

AUTOMAZIONE INDUSTRIALE

Obiettivi:

Il corso fornisce conoscenze relative all'automazione di processi industriali, con particolare attenzione all'automazione ON / OFF, ai controllori a logica programmabile ed alle loro applicazioni.

Argomenti:

- L'automazione dei processi industriali.
- Cenni di robotica
- Circuiti combinatori e numerici.
- Automazione ON / OFF.
- Elementi introduttivi ai PLC
- Programmazione di PLC
- Il linguaggio a contatti.
- Esempi di applicazioni controllate mediante PLC
- Componentistica per l'automazione.
- Attuatori elettrici
- Sensori

1	L'AUTOMAZIONE DEI PROCESSI INDUSTRIALI.....	3
1.1	INTRODUZIONE.....	3
1.2	IL PROBLEMA DELL'AUTOMAZIONE.....	6
1.3	GLI AUTOMATISMI INDUSTRIALI.....	7
1.4	UN AUTOMATISMO: IL CORPO UMANO	7
1.5	LA ROBOTICA	8
1.5.1	La nozione di robot.....	9
1.5.2	Definizioni e classificazioni	11
1.5.3	Struttura operativa gradi di libertà ed architettura	13
1.5.4	Gradi di libertà.....	14
1.5.5	Architettura del braccio	16
1.6	EVOLUZIONE DEI SISTEMI DI AUTOMAZIONE.....	21
2	SISTEMI NUMERICI E ALGEBRA DI BOOLE.....	23
2.1	SISTEMA NUMERICO DECIMALE.....	23
2.2	SISTEMA NUMERICO BINARIO	24
2.2.1	Le operazioni aritmetiche nel sistema binario.....	27
2.3	DISPOSITIVI BINARI.....	32
2.4	ALGEBRA DI BOOLE.....	33
2.5	TEOREMI FONDAMENTALI DELL'ALGEBRA DI BOOLE.....	45
3	AUTOMAZIONE ON / OFF.....	50
3.1	PNEUMATICA	50
3.1.1	Caratteristiche della pneumatica.....	52
3.1.2	Il concetto di pressione.....	53
3.1.3	Cambiamento di stato dei gas	55
3.1.4	Aria compressa.....	56
3.2	I CILINDRI PNEUMATICI.....	57
3.2.1	Cilindri a semplice effetto	58
3.2.2	Cilindri a doppio effetto	60
3.2.3	Altre tipologie di cilindro.....	64
3.3	MOTORI PNEUMATICI.....	67
3.4	GENERATORE DI VUOTO	68
3.5	COMANDI PER ATTUATORI PNEUMATICI.....	69
3.6	DISTRIBUTORI.....	71
3.7	ELETTROPNEUMATICA.....	71
3.8	IL RELÈ.....	73
3.9	SISTEMI DI CONTROLLO DIGITALI.....	75
3.9.1	Circuiti combinatori e numerici.....	75
4	ELEMENTI INTRODUTTIVI AI PLC.....	83
4.1	LA PROGRAMMAZIONE DEI PLC	88
4.2	LA PROGRAMMAZIONE IN DIAGRAMMA A RELÈ (KOP).....	90
4.2.1	Termini di base.....	90
4.2.2	Creazione di un programma	92
4.2.3	Aree di memoria	94
4.3	CODICE MNEMONICO	96
4.3.1	Struttura della memoria di programma.....	97
4.4	ISTRUZIONI DEL DIAGRAMMA A RELÈ.....	98
4.4.1	LOAD e LOAD NOT.....	98
4.4.2	AND e AND NOT.....	98
4.4.3	OR e OR NOT.....	99
4.4.4	Combinazione di istruzioni AND e OR	99
4.4.5	OUTPUT e OUTPUT NOT.....	100
4.4.6	L'istruzione END.....	101
4.4.7	AND LOAD.....	101

4.4.8	OR LOAD	102
4.4.9	Istruzioni di blocchi logici in serie.....	103
4.4.10	Come codificare più istruzioni	105
4.4.11	Salti.....	105
4.4.12	SET e RESET	106
4.4.13	Accorgimenti di programmazione.....	107
4.5	ESEMPI APPLICATIVI DI PROGRAMMAZIONE	108
5	ATTUATORI ELETTRICI.....	111
5.1.1	Motori a corrente continua	111
1.1.2	Motori "brushless" a magneti permanente.....	113
1.1.3	Motori a corrente alternata.....	114
1.1.4	Motori passo-passo	115
6	I SENSORI NELL'AUTOMAZIONE	118
6.1	SENSORI PER IL CONTROLLO DI MOVIMENTO E DI SPOSTAMENTO.....	119
6.1.1	Potenzimetri.....	119
1.1.2	Trasformatori differenziali variabili lineari (LVDT).....	121
1.1.3	Codificatori (encoder).....	121
1.2	SENSORI DI PROSSIMITÀ.....	124
1.2.1	Sensori fotoelettrici (o sensori ottici).....	124
1.1.2	Sensori a principio induttivo	126
1.1.3	Sensori a principio capacitivo	127
1.1.4	Sensori a ultrasuoni.....	127
1.1.5	Sensori magnetici a contatti reed.....	128
1.3	SENSORI DI DEFORMAZIONE E DI FORZA.....	129
1.3.1	Estensimetri	129
1.1.2	Sensori tattili	131
1.4	SENSORI DI VISIONE	132

1 L'automazione dei processi industriali

1.1 Introduzione

Il termine “automazione” entra nel vocabolario tecnico italiano agli inizi degli anni '60 dopo essere stato coniato negli Stati Uniti, dove appare il termine Automation per indicare i principali aspetti della rivoluzione organizzativa e gestionale in atto nei processi industriali ed in genere in qualsiasi processo tecnologico complesso.

In senso più ristretto, per “automazione industriale” si intende comunemente quell'insieme di teorie e tecniche operative utilizzate per progettare e realizzare nel campo industriale una progressiva sostituzione dell'attività umana con sistemi anche molto complessi di produzione, composti prevalentemente da macchine, dispositivi meccanici ed apparecchi elettrici.

Si comprende come gli uffici di progettazione degli impianti industriali si debbano in quel periodo trasformare rapidamente. Per motivi storici essi erano, all'epoca considerata, essenzialmente di cultura meccanica; mentre le nuove esigenze richiedono competenze non superficiali di elettrotecnica, elettronica, pneumatica, oleodinamica e, nei decenni successivi agli anni '60, anche di informatica. Si tratta quindi di una progettazione integrata, con forte contenuto di attività interdisciplinari.

Con l'aggettivo “automatico” si intende, come già nel linguaggio comune, la proprietà di qualsiasi apparato di **perseguire in modo autonomo gli obiettivi assegnati, prendendo delle decisioni ed agendo di conseguenza.**

In un sistema automatico è dunque riconoscibile un sistema delle decisioni (sistema di comando) ed un sistema di attuazione delle decisioni (sistema di potenza).

Il sistema di comando comprende sempre un sistema sensoriale che rileva costantemente gli effetti delle decisioni. In campo industriale, il panorama delle realizzazioni è estremamente vasto e variegato. Sulla base di una comune tecnologia meccanica, la moderna automazione industriale impiega tutte le altre tecnologie conosciute:

- Elettrica
- Elettronica
- A fluido: idraulica e pneumatica

Attualmente nell'industria manifatturiera assistiamo ad un continuo inserimento di automatismi capaci di sostituire l'uomo in alcune funzioni che gli sono proprie. A seconda delle funzioni umane sostituite si ottiene la classificazione dei corrispondenti tipi di sistemi di automazione.

Nel settore specifico dell'automazione industriale dei processi di produzione, la necessità di operare secondo i principi della flessibilità di montaggio e della qualità di produzione in un contesto altamente produttivo, implica la richiesta di un qualcosa che va leggermente oltre il concetto di robot: la linea integrata.

Per specificare tipologicamente il campo di interesse, si consideri un esempio semplificato: quello di una stazione per la composizione automatica (montaggio e assemblaggio) di un gruppo meccanico.

Fino ad ora, per le operazioni di montaggio, nelle industrie venivano prese in considerazione le seguenti due soluzioni:

- Montaggio automatico tramite macchina speciale monoscopo
- Montaggio manuale affidato ad operai qualificati

La prima soluzione è un classico esempio di automazione dedicata. Ogni stazione di lavoro è contraddistinta da una estrema specializzazione; si esegue una sola operazione in sequenza ed il moto è controllato da un dispositivo specificatamente costruito e non riconvertibile. La messa a punto è spinta fino all'ottenimento delle prestazioni desiderate e l'economicità della soluzione è legata a produzioni in grande serie.

L'uso dell'uomo in qualità di macchina operatrice entro una catena di montaggio è ampiamente menzionata come aspetto alienante dei tempi moderni. E' comunque una soluzione "flessibile" poiché sfrutta le potenzialità umane attribuendo all'operatore compiti molto ampi, tali cioè da includere: l'ispezione delle parti, la verifica di avanzamento del lavoro, la trasformazione, correzione ed adattamento dei componenti difettosi, il collaudo del gruppo ottenuto, ecc...

La nuova soluzione, quella dell'automazione industriale flessibile, comincia ora ad imporsi con l'evoluzione post-tayloristica dell'organizzazione del lavoro.

Qualunque sia il tipo di processo impiegato, **produrre** significa soprattutto **trasformare**, cioè effettuare un cambiamento nello stato, nella forma e nella natura di un "oggetto" per conferirgli lo status di "bene".

Per trasformare sono necessarie due cose:

- Energia spesa nella trasformazione
- Informazione utilizzata per pilotare l'impiego di energia

Negli ultimi anni, i sistemi di produzione hanno avuto una evoluzione determinata dall'ottimizzazione e dall'espansione di tali due componenti.

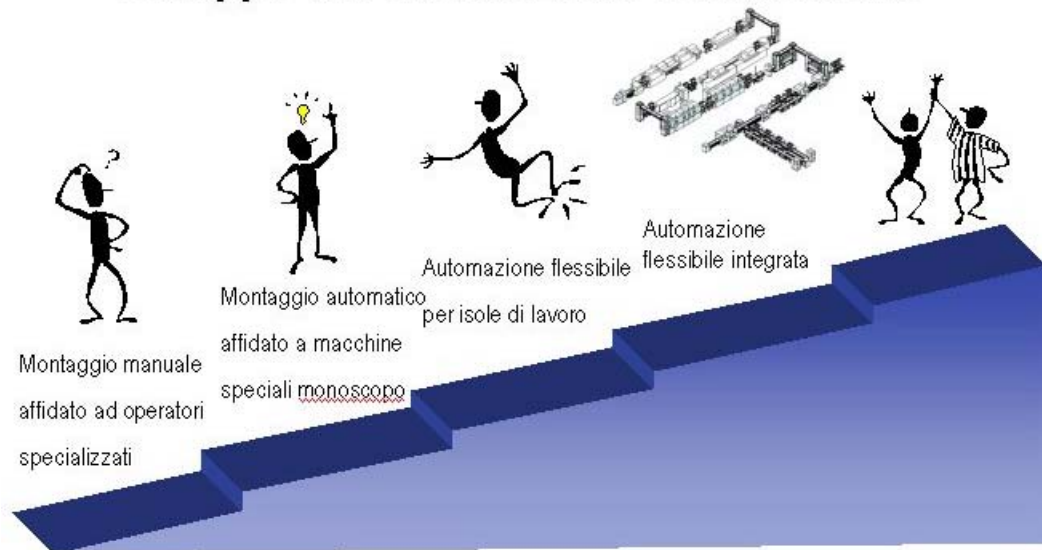
Il superamento delle *difficoltà energetiche* della produzione si è attuato in tre fasi:

1. Impiego di macchine al posto del lavoro umano: fase della meccanizzazione
2. Sviluppo di nuovi processi fisici
3. Impiego di materiali tecnologicamente più evoluti

Il superamento delle *difficoltà organizzative ed informative* della produzione si é attuato nelle seguenti cinque fasi:

1. Divisione del lavoro
2. Alta concentrazione di manodopera
3. Produzione di massa
4. Automazione rigida
5. Automazione flessibile

Sviluppo dell'automazione nell'industria



L'automazione si inquadra quindi tra le soluzioni ai problemi organizzativi ed informativi della produzione e si propone di sollevare l'uomo dai compiti di conduzione, sincronizzazione e controllo delle macchine di produzione cercando contemporaneamente di migliorare il livello di efficienza delle stesse macchine e dei processi.

1.2 Il problema dell'automazione

Stiamo assistendo oggi ad una progressiva “emigrazione” dei nostri processi produttivi più importanti verso quei paesi a basso costo di manodopera. Forse non ci siamo ancora resi conto che, quando acquistiamo dei beni di consumo anche ad elevato contenuto tecnologico, nella maggior parte dei casi questi portano il marchio “Made in Cina”, “Made in Korea”, “Made in Thailand”.

Per essere competitiva, in condizioni di mercato come quelle attuali, l'industria manifatturiera deve oggi produrre ad elevati livelli quantitativi e qualitativi. Gli obiettivi principali da raggiungere sono:

- Produrre a qualità costante
- Fornire le quantità che il mercato può assorbire
- Migliorare la produttività

In altri termini, è importante mantenere una presenza sul mercato, ma anche seguirne l'evoluzione, come suggeriscono le moderne teorie legate alla fabbricazione flessibile. L'automazione appare come una delle vie obbligatorie per conseguire gli obiettivi citati.

Il grado di automazione di un sistema varia notevolmente in base alla natura del processo, alla sua complessità, alla conoscenza che se ne possiede ed agli obiettivi legati al progetto. Si possono distinguere almeno tre livelli di automatizzazione:

- *Il livello di sorveglianza*, che risponde ad esigenze di conoscenza tecnica ed economica del processo controllato. Si tratta di una funzione passiva nei confronti del processo. Gli organi di controllo acquisiscono le informazioni, le analizzano e producono registrazioni e segnalazioni.
- *Il livello di guida operatore*, che completa il precedente mediante elaborazioni più complesse delle informazioni ed offre ai gestori del processo gli elementi che consentono interventi di regolazione.
- *Il livello di comando*, che corrisponde all'automatizzazione completa di determinate funzioni: dall'acquisizione dei dati, al loro trattamento, al conseguente intervento sul processo. L'uomo è in questo caso escluso dalla gestione del processo, può intervenire manualmente solo in caso di anomalie o interruzioni.

Anche l'automazione che interviene nell'ultimo dei tre livelli considerati può essere di tipo diverso. Si hanno in particolare:

- *L'automazione elementare*, realizzata su una macchina semplice o su parte di una macchina complessa. Si può trattare per esempio di automatizzare le funzioni di sicurezza o di sorveglianza dei tempi morti o di posizionamento dei pezzi. Gli automatismi corrispondenti sono generalmente ideati dal costruttore degli impianti cui sono destinati.
- *L'automazione intermedia*, interessa macchine più complesse o un insieme di macchine semplici. I comandi corrispondenti sono legati al funzionamento delle macchine. E' questo il dominio tipico dell'automazione industriale.

- *L'automazione integrata*, riguarda infine un intero reparto o addirittura l'intera fabbrica. Si ha in questo caso una connessione tra comandi, dati di lavorazione e dati gestionali. Ne risultano sistemi automatizzati, noti come FMS, nei quali l'intervento umano è minimo.

Nella presente trattazione si prenderà in considerazione il livello di automazione intermedia, nel quale si collocano i controllori programmabili.

1.3 Gli automatismi industriali

Gli automatismi industriali sono dei dispositivi che permettono alla macchina o agli impianti di funzionare automaticamente. Essi sono realizzati con lo scopo di risolvere dei problemi di natura tecnica, economica ed umana.

Un automatismo ben progettato:

- Semplifica considerevolmente il lavoro dell'uomo che, liberato dalla presenza costante sulla macchina, può dedicarsi ad altre attività più gratificanti;
- Elimina le fasi complicate, pericolose o indesiderabili, facendole eseguire dalla macchina;
- Facilita i cambiamenti di produzione permettendo il passaggio da una quantità o da un tipo di produzione ad un altro
- Migliora la qualità dei prodotti asservendo la macchina a criteri di fabbricazione ed a tolleranze che saranno ripetute nel tempo
- Accresce la produzione oltre che la produttività;
- Aumenta la sicurezza del personale
- Controlla e protegge gli impianti e le macchine

L'automatismo interviene in tutti gli stadi delle operazioni industriali, in campi assai diversi, quali le industrie di trasformazione, di fabbricazione, di trasporto, nelle macchine utensili.... oltre che nel settore terziario.

1.4 Un automatismo: il corpo umano

Il migliore automatismo è il corpo umano ed è impressionante la sua analogia con le diverse parti di un automatismo industriale. Il nostro corpo contiene un certo numero di organi che sono dotati di tutti gli elementi necessari al loro funzionamento: automatismo cardiaco, automatismo dei centri vasomotori e respiratori, automatismo dell'intestino, automatismo midollare.

Il funzionamento del nostro sistema nervoso dipende dal mondo esterno e le nostre cellule nervose entrano in attività sotto l'influenza di eccitazioni preliminari che vengono a manifestarsi o che, grazie alla nostra memoria, si sono prodotte anteriormente.

Queste eccitazioni provengono sia dall'interno del nostro organismo, quindi dai nostri organi, sia dal mondo esterno che ci circonda. Esse agiscono sulla superficie del nostro corpo e più particolarmente su talune zone idonee alla ricezione di queste eccitazioni, gli organi stessi.

- Senso del tatto: ci fa conoscere le qualità palpabili dei corpi, per mezzo delle sensazioni tattili (contatto e pressione), termiche (caldo e freddo) e dolorose
- Senso della vista: funzione per mezzo della quale noi percepiamo la luce, i colori, la forma degli oggetti nello spazio, tramite gli occhi, che sono sensibili a certe radiazioni
- Senso dell'udito: grazie all'orecchio ed al sistema uditivo noi percepiamo le vibrazioni, elementi che costituiscono i suoni
- Senso dell'odorato: che permette di percepire gli odori
- Senso del gusto: che, per mezzo della lingua, acquisisce i sapori.

A questi sensi si aggiunge quello dell'equilibrio che ci informa sulla posizione del nostro corpo rispetto alla terra e di numerose sensazioni interne che, provenienti da ricettori sparsi in tutti i nostri organi, tengono conto di tutte le variazioni che si generano.

Per analogia con un automatismo industriale, i cinque sensi corrispondono ai rilevatori periferici ed, analogamente, i messaggi provenienti dai nostri organi sono gli ordini di esecuzione che l'automatismo deve rispettare per assicurare lo svolgimento delle differenti operazioni.

Il cervello, che ha memorizzato le azioni da effettuare all'apparire di questo o di quel messaggio, genera tramite i nervi, motori che comandano i muscoli, un movimento particolare o un insieme di movimenti.

1.5 La robotica

La robotica ha radici culturali assai lontane e nell'ingenua concezione popolare veniva definita come quella scienza che studia macchine in grado di muoversi autonomamente ad imitazione dell'uomo.

Lo stesso termine robot è entrato nel vocabolario inglese all'inizio degli anni '20, con la traduzione della commedia di Karel Capek "R.U.R." (i robot universali di Rossum). Capek era cecoslovacco e nella sua lingua "robota" significa semplicemente "schiavo lavoratore". Nella commedia, i robot erano automi umanoidi costruiti da Rossum e da suo figlio con l'obiettivo di creare macchine obbedienti e al servizio dell'uomo. La storia si conclude purtroppo con i robot che uccidono gli uomini e assumono il controllo del mondo.

Fortunatamente, dopo due decenni, negli anni '40, lo scrittore e divulgatore Isaac Asimov ci presenta i robot in maniera più rispettosa dell'uomo che li costruisce descrivendoli infatti come macchine ingegnose e dotate di sofisticati circuiti di controllo tali da poter operare in obbedienza e senza conflitto al servizio dell'uomo.

Ma robot antropomorfi, che parlano e che camminano sono, ancora oggi e forse per molto tempo ancora, sogni di pura fantascienza.

Il concetto di robot industriale fu oggetto, nel 1954, di un brevetto riguardante un braccio meccanico controllato e destinato ad operare nelle fabbriche. Il primo robot industriale fu invece installato nel 1961 dalla Unimation Inc., importante azienda americana che ha svolto un ruolo di pioniere nel settore. Da allora migliaia e migliaia di robot sono stati introdotti nell'industria degli Stati Uniti, del Giappone e anche dell'Europa, ove l'Italia occupa una posizione avanzata.

Risale agli anni '70 di questo secolo la formalizzazione di un campo disciplinare scientifico cui è riconoscibile una propria autonomia e completezza.

In questi anni sono stati formalizzati insegnamenti di robotica, in cui le nozioni, derivate da campi diversi, sono state coordinate con la coerenza propria di un settore di innovazione tecnologica la cui rilevanza applicativa è fra le più significative dell'ingegneria odierna.

1.5.1 La nozione di robot

La presentazione della nozione "robot" si sviluppa secondo diverse angolazioni che spesso si appoggiano a concetti già noti. In questa prospettiva i robot sono, per convenzione, macchine "intelligenti", capaci di sostituire l'uomo in alcune funzioni che ne caratterizzano la classificazione.

L'antropomorfismo di queste macchine risiede in una specifica attitudine di reagire a classi di stimoli esterni e, quindi, nella possibilità:

- Di accogliere istruzioni al fine di essere educati allo svolgimento di prefissate operazioni
- Di scegliere gli interventi valutando l'esito delle operazioni in base alla conoscenza dello stato corrente

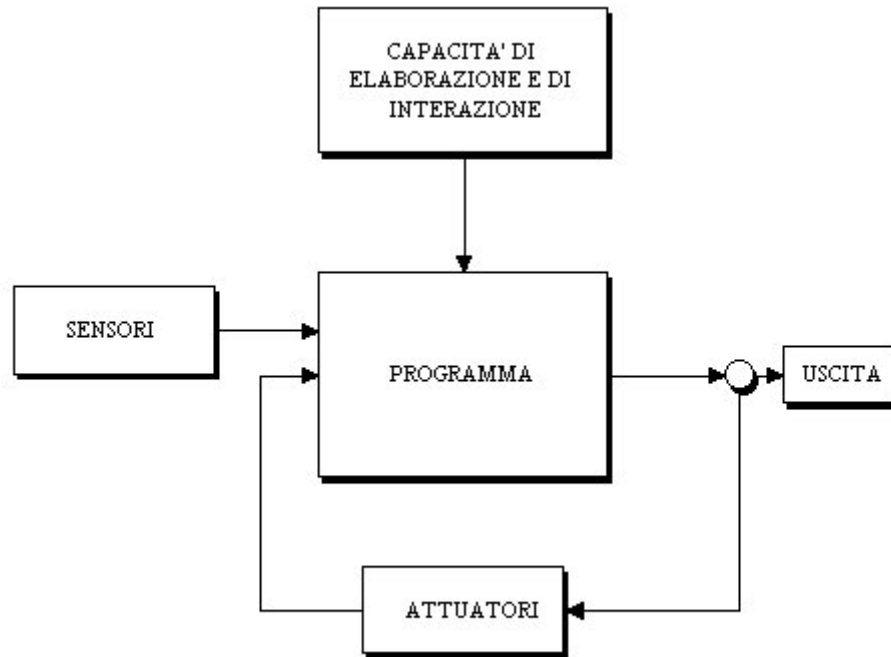
Un dispositivo con i predetti attributi fa parte della produzione industriale attuale, è costituito da un sistema meccanico in grado di interagire con il mondo esterno attraverso sensori ottici, tattili e di manipolazione governati da un calcolatore elettronico dotato di capacità di calcolo e di memoria.

Secondo questa schematizzazione un robot viene definito come

sistema artificiale che interagisce con l'ambiente esterno e con le parti funzionali di se stesso, avendo la capacità di elaborare informazioni, per eseguire un compito di modifica che gli è stato preordinato.

In questa definizione si è posto l'accento sulla capacità di elaborazione e di interazione e si tiene anche conto che il preordinamento dei compiti avviene con un trasferimento di informazioni non tutte note a priori, anzi, tipicamente da acquisire durante il ciclo di lavoro della macchina.

Le attività di interazione e di elaborazione sono svolte secondo quanto previsto da un programma che utilizza come ingresso delle informazioni ottenute da un sistema di sensori e che produce come uscita una modifica generata mediante un sistema di attuatori.



Il robot, inteso come sistema artificiale, è un sistema capace di fornire un certo insieme di primitive, ovvero un certo numero di attività elementari che possono essere eseguite automaticamente dall'unità stessa.

Queste primitive possono essere considerate anche come le istruzioni macchina del robot; in parte, quelle dedicate all'elaborazione dell'informazione, sono coincidenti con le istruzioni macchina di un calcolatore, mentre quelle dedicate all'interazione con il mondo, costituiscono una serie estremamente diversificata di attività peculiari della natura originale del robot.

Le nozioni di robot, presentate fino a questo momento, sono svincolate da particolari realizzazioni e ciò rappresenta sicuramente un vantaggio al fine di staccare le considerazioni, circa lo sviluppo futuro dei robot, da un'eccessiva dipendenza dalla morfologia e dalle esigenze applicative connesse.

Indipendentemente quindi dalla tipologia è possibile generalizzare la definizione ed evidenziare quei requisiti necessari ad una corretta individuazione del sistema robot in un contesto più vasto di macchine automatiche operatrici.

1) Il robot è multiscopo

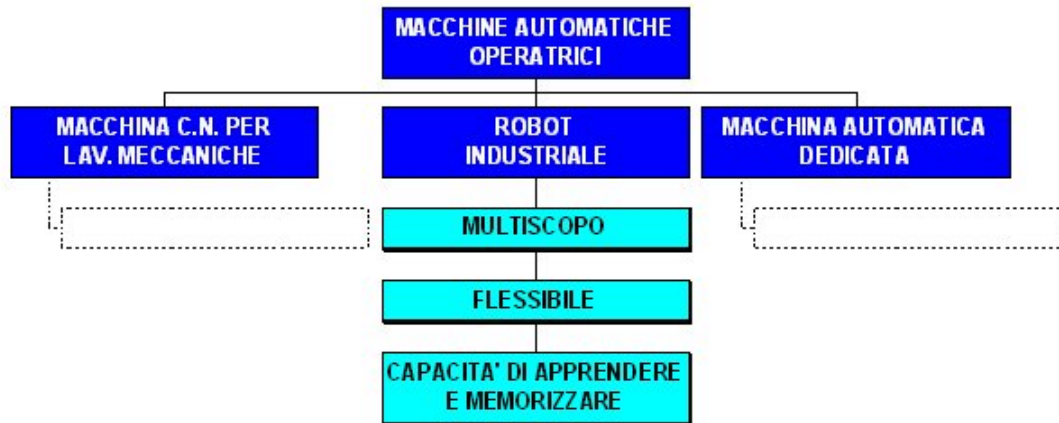
ed è progettato in modo relativamente indipendente dal lavoro a cui sarà destinato contrariamente alle macchine automatiche tradizionali specializzate rispetto al prodotto ed alla lavorazione che ne caratterizza sia l'hardware che la logica di controllo ed il tipo di convenienza economica

2) Il robot è flessibile

e cioè in grado di cambiare in tempi relativamente brevi il lavoro ed il ciclo operativo da eseguire.

3) Il robot ha la capacità di apprendere e memorizzare

tramite la programmazione che gli impartisce le istruzioni per effettuare determinate operazioni.



1.5.2 Definizioni e classificazioni

Nonostante i robot industriali abbiano fatto la loro comparsa in ambienti produttivi negli anni '60, sono trascorsi quasi venti anni prima che venisse elaborata una definizione formale del termine "robot". Solo nel gennaio del 1980, dopo quasi due anni di delibera, la Robot Industries Association (RIA) statunitense pubblicò la propria definizione ufficiale:

"un robot industriale è un manipolatore riprogrammabile multifunzione concepito per spostare materiali, pezzi, attrezzi od altri oggetti specifici, attraverso movimenti variamente programmabili, ed impiegato per una quantità di compiti diversi".

Come si vede, questa definizione appare ormai fortemente datata, cioè ancorata allo sviluppo della robotica all'inizio degli anni ottanta dove i robot utilizzati erano ancora quelli di seconda generazione in fase di maturità. La definizione, infatti, non accenna assolutamente alla possibilità di interfacciare il robot con l'ambiente di lavoro, alla capacità dello stesso di controllare le apparecchiature con le quali sta lavorando o di sincronizzarsi con le stesse. Né, tantomeno, fa menzione della sua capacità di reagire a dei cambiamenti che si verificano all'interno del processo da esso svolto.

Recentemente è stato pubblicato un Rapporto Tecnico dell' ISO TR 8373, dove il robot industriale viene definito come:

"manipolatore a molteplici gradi di libertà, comandato automaticamente, riprogrammabile, multiscopo, fisso o mobile, destinato ad applicazioni di automazione industriale."

Qui di seguito viene data una spiegazione dei termini utilizzati nella definizione sovrastante:

- **Manipolatore:** macchina il cui meccanismo è costituito normalmente da una serie di segmenti con accoppiamento di rotazione (giunto rotoidale) e o di scorrimento relativo tra loro (giunto prismatico), avente lo scopo di afferrare e o movimentare oggetti (pezzi o utensili) generalmente con diversi gradi di libertà. Può essere

comandata da un operatore, da un comando elettronico programmabile o da qualunque comando logico (sistema a camme, a logica cablata, ecc..)

- **Riprogrammabile:** i movimenti programmati o le funzioni ausiliarie possono essere variate senza modifiche fisiche
- **Multiscopo:** può essere adattato ad una diversa applicazione con modifiche fisiche, cioè con modifiche nella struttura meccanica o nel sistema di comando ad eccezione del cambio di cassette di programmazione, ROMs, ecc...

La classificazione dei robot industriali è resa difficoltosa dall'estrema varietà di realizzazioni e di punti di vista con i quali possono essere interpretate. Non esiste, a tutt'oggi, una classificazione universalmente accettata. Vari Enti di diversi Paesi hanno proposto le loro classificazioni che sono diventate standard solo nazionali.

Vediamone alcuni esempi.

** JIRA (Japanese Industrial Robots Association)*

- 1) manipolatori
- 2) robot sequenziali
- 3) robot ad apprendimento
- 4) robot a controllo numerico
- 5) robot intelligenti

** AFRI (Association Française de Robotique Industrielle)*

- 1) manipolatori controllati da operatore
- 2) manipolatori a sequenza fissa o variabile
- 3) robot a programma
- 4) robot intelligenti

** SIRI (Società Italiana di Robotica Industriale)*

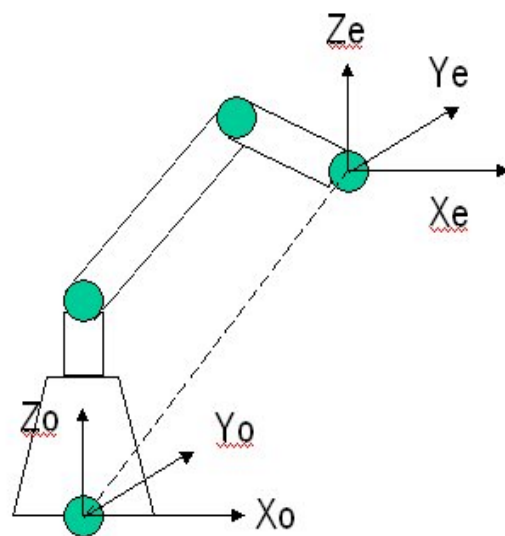
- 1) robot per alimentazione e scarico di macchine utensili
- 2) robot per saldatura a punti e per saldatura continua
- 3) robot per verniciatura
- 4) robot per montaggio ed assemblaggio
- 5) robot per misura automatica
- 6) robot per altre applicazioni

1.5.3 Struttura operativa gradi di libertà ed architettura

Operativamente un robot esegue una serie di funzioni connesse con la sua struttura meccanica, i suoi sensori, l'ambiente in cui opera, i compiti da eseguire, il calcolatore di controllo, il software operativo e l'interazione con l'operatore.

Sicuramente, tra questi, l'elemento che maggiormente caratterizza il robot nella propria funzionalità e nel più indicato campo applicativo è la struttura meccanica.

La struttura meccanica generalmente utilizzata nei robot è costituita da una catena articolata di elementi meccanici connessi tra loro mediante articolazioni (giunti, o joint) in modo da potersi muovere l'uno rispetto all'altro in maniera relativa e che possono essere connessi in serie, in parallelo o in forma mista.



Catena articolata di elementi meccanici connessi tra loro mediante articolazioni (giunti) collegati relativamente tra loro con accoppiamenti rotoidali o prismatici connessi in serie, parallelo o in forma mista.

Esempio di catena cinematica aperta con elementi in serie ad accoppiamento rotoidale

Il collegamento cinematico più comune è rappresentato da una catena cinematica aperta con elementi in serie dove gli elementi della catena sono collegati tra loro con accoppiamenti **rotoidali** (moto relativo di rotazione) e **prismatici** (moto relativo di traslazione). L'elemento iniziale della catena cinematica viene chiamato telaio (se fisso) o supporto mobile (se è mobile).

L'elemento finale della catena cinematica viene chiamato estremità e può essere una pinza per afferraggio, una pistola di verniciatura, una pinza di saldatura, un elemento di afferraggio, una pinza per montaggio, ecc....

I sistemi meccanici di manipolazione comprendono sia la struttura portante di un robot, sia la parte più propriamente destinata alla presa.

La struttura generale portante determina la capacità di movimento del robot, vincolando lo spazio che può essere raggiunto dagli organi di presa della macchina e vincolando anche in larga parte i tipi delle traiettorie che possono essere eseguite nel moto tra due punti o in uno spostamento di lavoro.

Problema di base di un sistema meccanico di tale tipo è quello della scelta della catena cinematica e del tipo di coordinate cui il robot farà riferimento. Tutto ciò è in stretta relazione con l'obiettivo di lavoro cui la macchina è destinata. Ad esempio, catene di tipo polare, costituzionalmente più semplici ma intrinsecamente più imprecise, sono adatte a robot di caricamento, presa e verniciatura. Catene cinematiche cartesiane che conducono a strutture chiuse e vincolate, sono più precise e meglio si prestano ad essere utilizzate in robot di montaggio o di misura.

Legato naturalmente al problema della catena cinematica è quello della scelta delle articolazioni e dei giunti, che dovrebbero risultare il più possibile senza gioco e senza attrito.

Interconnesso con il problema dell'architettura meccanica vi è poi quello dei dispositivi di azionamento e di blocco e la scelta tra le diverse strategie di sistemazione remota dei motori o di sistemazione a bordo dei bracci. Queste scelte vengono fatte in funzione della dinamica del sistema e sono legate alla possibilità di costruire opportuni modelli di simulazione applicando anche tecniche di calcolo avanzate.

Altro problema è quello della realizzazione di una struttura possibilmente modulare per risolvere, con opportune aggregazioni, situazioni differenti.

Nel campo dei sistemi meccanici destinati alla presa, occorre realizzare cinematismi atti ad effettuare la presa, la tenuta, la manipolazione ed il montaggio di elementi diversissimi tra loro per forma, dimensione, peso e stato della superficie. Una risoluzione generale del problema risulta impossibile ed è necessario affrontare i diversi problemi secondo gruppi di classi. Strettamente connesso al problema dei cinematismi è quello dell'azionamento e del controllo, e soprattutto l'esigenza di dotare gli organi di presa di sensori in grado di rilevare le caratteristiche intrinseche del pezzo da trattare, in modo da favorire e guidare la manipolazione del pezzo stesso.

1.5.4 Gradi di libertà

Per meglio comprendere la struttura e l'architettura di un sistema robotizzato è necessario introdurre un fondamentale concetto per i sistemi meccanici, o meglio, per i sistemi di corpi rigidi, comunque vincolati.

Diremo che un sistema ha n gradi di libertà quando si può rappresentare la sua posizione (o meglio la sua configurazione), almeno in una certa regione dello spazio, mediante n parametri indipendenti.

Ad esempio, un punto materiale libero ha tre gradi di libertà, perché occorrono tre parametri (le sue coordinate cartesiane, polari, ecc..) per determinarne la posizione. Un punto materiale che si muove su un piano possiede due gradi di libertà, perché occorrono due parametri (le sue coordinate nel piano) per fissarne la posizione. Così un punto materiale mobile su una retta o, più in generale, su una linea ha un solo grado di libertà.

Consideriamo adesso un corpo rigido nello spazio ed una terna cartesiana centrata sul suo baricentro (X', Y', Z'). Con traslazioni lungo i tre assi il corpo rigido effettua movimenti nello spazio, spostandosi rispetto ad una terna cartesiana fissa (X, Y, Z); ruotando attorno ai propri assi esso assume qualunque orientamento rispetto a quest'ultima.

Si dice che il corpo rigido libero nello spazio possiede 6 gradi di libertà (GDL), di cui 3 di traslazione e 3 di rotazione.

Come già detto, un braccio robotico è un meccanismo articolato che ha il compito di posizionare il segmento terminale (estremità) nello spazio, in una specifica posizione e con un dato orientamento rispetto ad un riferimento "assoluto", solidale alla base.

Per definizione diremo che il numero di GDL di un robot è pari al numero dei GDL del segmento terminale $S(n)$ o estremità.

Tale numero dipende dal numero dei segmenti e dal numero e tipo di connessioni reciproche.

Particolare attenzione va fatta per non confondere i gradi di libertà con i gradi di mobilità.

Anche i movimenti associati all'utensile portato dalla estremità del robot non costituiscono GDL. Ad esempio l'apertura / chiusura di una pinza parallela di manipolazione, la rotazione / arresto di un motore che muove la punta di un trapano, costituiscono un classico esempio mobilità e talvolta chiamate "falsi gradi di libertà".

In generale:

1. Una articolazione non dà luogo necessariamente a GDL
2. Un robot non usa di solito più di 6 GDL indipendenti, ma può usare molti più gradi di mobilità
3. Con più di 6 GDL, una certa posizione / orientamento può essere raggiunta con diverse configurazioni del braccio
4. Un robot dotato di un numero di gradi di mobilità superiore al numero di coordinate richieste dall'estremità, è ridondante. Tale ridondanza di gradi di libertà corrisponde alla mobilità del robot.

La soluzione di usare un numero di giunti pari al numero di GDL desiderati per la struttura articolata è la più ovvia, ma come meglio vedremo in seguito, il controllo del robot risulta semplificato se gli ultimi 3 giunti sono di rotazione ed i loro assi si incontrano in un punto. Così potremo dire che i primi 3 GDL di un robot posizionano la sua estremità, mentre gli altri tre la orientano.

Per studiare il moto di un corpo rigido conviene considerare, oltre al sistema di assi (O, X, Y, Z) a cui viene riferito il moto e che, per convenzione, chiameremo sistema fisso, un sistema di assi O', X', Y', Z' che diremo mobile, solidale al corpo, cioè con l'origine O' in un punto del corpo e orientamento degli assi fatti con altri punti del corpo stesso.

i', j', k' saranno tre vettori unitari paralleli e nello stesso verso di O'X', O'Y', O'Z'.

Ovviamente, ogni punto P del corpo avrà coordinate (x', y', z') invariabili col tempo rispetto al sistema mobile, perché le distanze dei punti del corpo rigido dai piani coordinati (che sono piani formati dai punti del corpo) non possono variare col tempo. Saranno invece variabili, in generale, le coordinate (x, y, z) del punto P rispetto al sistema fisso, che si possono determinare, come vedremo, mediante una trasformazione di coordinate, nota, in ogni istante, la posizione del sistema (O', X', Y', Z') solidale al corpo rigido rispetto al sistema fisso (O, X, Y, Z).

Per determinare l'orientamento di O', X', Y', Z' rispetto a O, X, Y, Z bastano tre parametri: i cosiddetti *angoli di Eulero*.

1.5.5 Architettura del braccio

Uno studio dei primi 3 GDL di un robot indica che le varie combinazioni di rotazioni e traslazioni possono dar luogo a qualche decina di diverse strutture. Le effettive realizzazioni risultano comunque essere limitate ad un numero inferiore di strutture tipo in relazione con l'applicazione pratica a cui i robot vengono destinati.

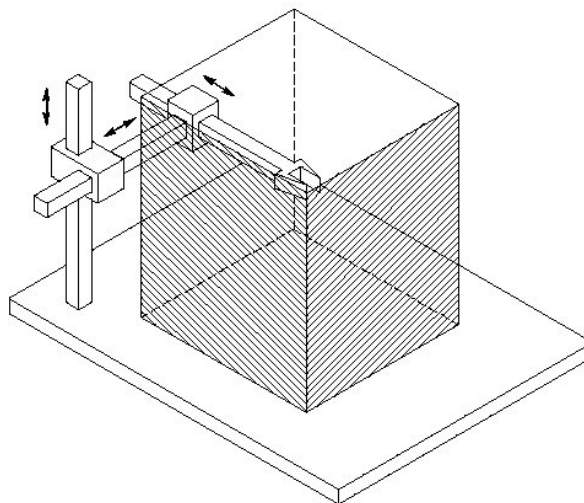
Esse richiamano i noti sistemi di riferimento e, tradizionalmente, associano il nome di questo sistema di riferimento alla struttura stessa. Si parla così di robot a struttura:

- *Cartesiana*
- *A portale*
- *Cilindrica*
- *Polare (o sferica)*
- *Articolata (di rivoluzione)*
- *A braccio girevole (SCARA)*

Una delle caratteristiche più importanti del manipolatore è la configurazione del suo volume o area di lavoro, che dipende dalle dimensioni del braccio e dalle capacità di movimentazione.

* ROBOT A COORDINATE CARTESIANE

La struttura a geometria cartesiana viene utilizzata soprattutto quando si vuole ottenere una elevata precisione di posizionamento dell'organo terminale, in quanto le traiettorie e gli errori di posizionamento sono facilmente controllabili. Consiste in tre assi lineari ortogonali realizzati con slitte traslanti, che forniscono gli spostamenti secondo le tre traslazioni principali x,y,z.



Robot cartesiano

Essa è molto simile a quella delle macchine a controllo numerico, essendo la risoluzione e la ripetibilità del braccio le stesse di tali macchine.

Il polso di un robot a coordinate cartesiane può essere programmato per tracciare un percorso lineare se gli assi che partecipano al movimento viaggiano a velocità costante.

Se l'estremità del robot deve tracciare un segmento di retta di L unità di lunghezza, alla velocità v , le velocità assiali sono:

$$V_x = (X/L)V$$

$$V_y = (Y/L)V$$

$$V_z = (Z/L)V$$

dove $L = X + Y + Z$

e V_x, V_y, V_z sono le componenti di V nelle direzioni X, Y, Z , rispettivamente.

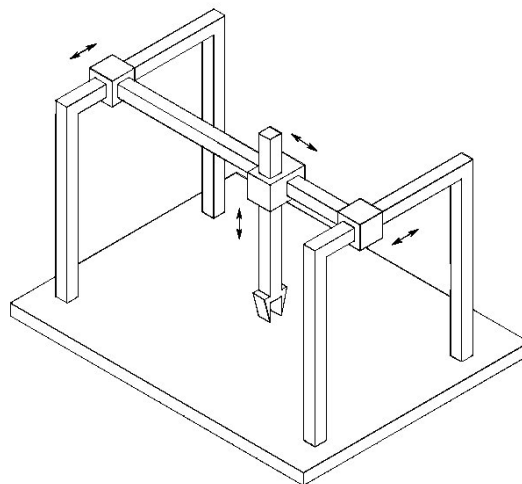
Queste semplici relazioni non sono valide sempre per tutti i robot di tipo cartesiano; in alcuni casi si impiegano algoritmi complessi, in cui le coordinate cartesiane vengono trasformate nelle coordinate dei giunti del manipolatore.

I robot cartesiani, così attraenti in teoria, non sono molto diffusi industrialmente (fanno eccezione quelli per il montaggio elettronico di componenti superficiali SMD), in quanto mancano di flessibilità meccanica non potendo raggiungere punti sul pavimento o punti invisibili dalla base. Inoltre la velocità di lavoro sul piano orizzontale è generalmente più bassa di quella tipica dei robot aventi una base rotante.

*** ROBOT A PORTALE**

Appartiene alla categoria dei cartesiani, ma in questo caso la struttura meccanica include anche un portale in modo tale che il robot possa essere montato al di sopra della zona di lavoro aumentando così l'accessibilità.

Questa struttura permette di gestire aree e volumi operativi molto ampi ed è spesso utilizzata in operazioni di manipolazione e pallettizzazione.



Robot a portale

* ROBOT CILINDRICO

Robot la cui struttura meccanica comprende un giunto di rotazione e due giunti di traslazione, i cui assi sono disposti secondo un sistema di coordinate cilindriche. Il braccio orizzontale si muove avanti e indietro, il carrello, nella cui estremità è fissata la pinza, si muove su e giù ed entrambi ruotano con la base.

I robot che utilizzano questo tipo di struttura lasciano ampia accessibilità alla zona di lavoro, consentendo una programmazione semplice per la determinazione dei valori delle coordinate necessarie a raggiungere il punto di lavoro. Vengono soprattutto utilizzati per operazioni di alimentazione a carico di particolari meccanici.

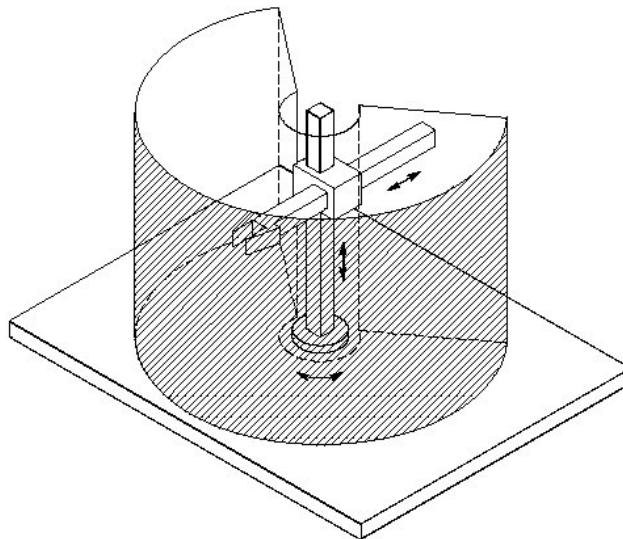
La risoluzione in un robot cilindrico non è costante ma dipende dalla distanza r della colonna dalla pinza lungo il braccio orizzontale. Se l'unità di risoluzione della base rotante è espressa in radianti, risulta che la risoluzione alla terminazione del braccio è αr .

Facciamo un esempio: il misuratore di posizione di un asse rotante di un robot cilindrico è un encoder che emette 6000 impulsi per giro ed è montato direttamente sull'albero; la massima lunghezza del braccio orizzontale è 1 metro; valutare la risoluzione peggiore all'estremità del braccio.

La risoluzione della base è $\alpha = 360^\circ / 6000 = 0.06^\circ$.

La risoluzione all'estremità del braccio è: $1000 \times 0.06 \times \pi / 180 = 1.05 \text{ mm}$.

L'esempio dimostra che la risoluzione del braccio attorno alla base può essere di due ordini di grandezza maggiore di quella ottenibile dai robot cartesiani (0.01).



Robot cilindrico

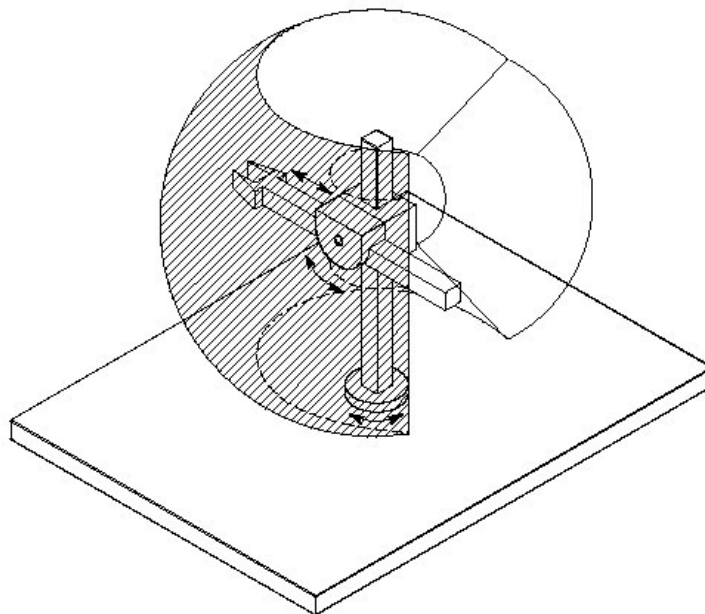
Questo è un limite dei robot cilindrici rispetto ai cartesiani. I robot a geometria cilindrica hanno però il vantaggio di una maggiore velocità dell'end effector in virtù della presenza dell'asse di rotazione. Tuttavia tale velocità in molti robot è limitata a causa del momento d'inerzia del braccio, che dipende, a sua volta, dall'end effector e dal relativo carico. E' infatti

difficile avere una buona risposta dinamica da robot aventi una base rotante poiché la coppia che il motore deve fornire dipende dalla posizione, dalla velocità, e dall'accelerazione degli altri giunti; ciò causa variazioni nella coppia e nel momento d'inerzia riflessi. Il momento d'inerzia riflesso sulla base dipende non solo dal peso dell'oggetto caricato, ma anche dalla distanza tra l'asse di base e l'oggetto manipolato. Tale distanza è funzione della posizione istantanea della pinza e degli altri giunti durante il movimento.

Conseguentemente, il momento d'inerzia effettivo sulla base varia nel tempo e con la posizione della pinza, da cui ne deriva una risposta dinamica del braccio non molto buona.

*** ROBOT POLARE (O SFERICO)**

La configurazione cinematica di un robot a coordinate sferiche è simile alla torretta di un carro armato. I movimenti fondamentali affidati al braccio sono rappresentati dalla traslazione lungo l'asse X, dalla rotazione di inclinazione attorno all'asse Y e dalla rotazione di orientamento attorno all'asse Z. Gli altri gradi di libertà sono ottenuti dando la possibilità di movimento alla testa di presa, rispetto al braccio.



Robot polare (o sferico)

L'entità della rotazione è usualmente misurata da encoder incrementali montati sugli assi rotanti. Lo svantaggio di un robot a coordinate sferiche rispetto ad un cartesiano consiste nel fatto che in esso vi sono due assi con risoluzione relativamente bassa e variabile con la lunghezza del braccio.

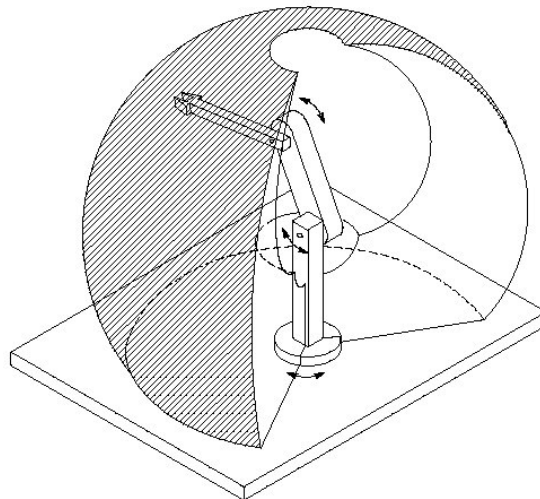
Robot di questo tipo si prestano bene ad operazioni di carico e scarico pezzi, di saldatura, di verniciatura, ecc....

* ROBOT ARTICOLATO

I robot articolati consistono di tre elementi rigidi connessi da due giunti rotanti e montati su una base pure rotante. Il cinematismo assomiglia molto a quello di un braccio umano. La pinza corrisponde alla mano che si attacca all'avambraccio tramite il polso (wrist). Il gomito (elbow) connette l'avambraccio al braccio che a sua volta, tramite la spalla (shoulder) si connette alla base.

Robot di questo tipo consentono di coprire ampie zone di lavoro e permettono un'ampia manovrabilità di organi di presa e attrezzi anche in situazioni tipiche dei montaggi adattativi.

Poiché un robot articolato ha tre assi di rotazione geometricamente diversi, la sua risoluzione spaziale dipende interamente dalla posizione del braccio. L'accuratezza di un robot articolato è bassa poiché gli errori ai giunti si accumulano all'estremità del braccio. Esso può comunque muoversi ad alta velocità ed ha una eccellente flessibilità meccanica, aspetti che lo rendono il più diffuso tra i robot medio piccoli.



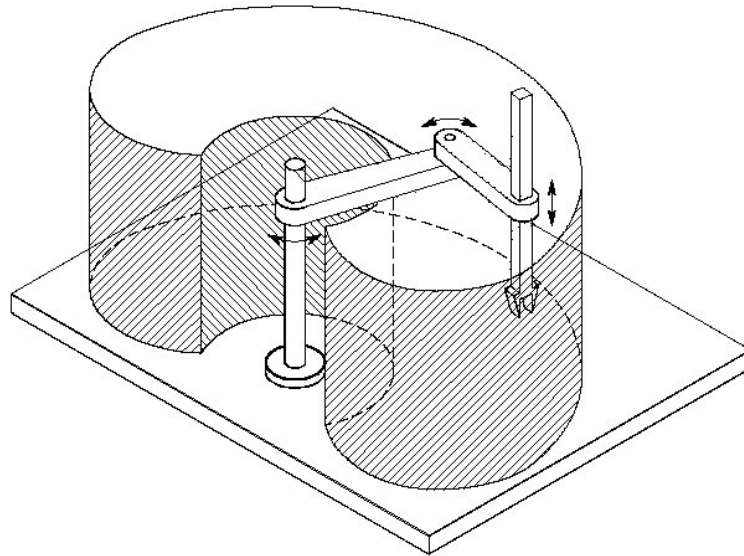
Robot articolato (o antropomorfo)

* ROBOT A BRACCIO GIREVOLE (SCARA)

E' questa una macchina molto diffusa a causa della sua economicità e della sua flessibilità applicativa. La sua struttura è stata studiata in Giappone dove, nel 1978 sono stati lanciati sul mercato i primi robot di questo tipo sotto il nome di "SCARA" acronimo che indica Selective Compliance Assembly Robot Arm che letteralmente significa braccio robotico per assemblaggio a cedevolezza selettiva.

E' un robot che si muove sostanzialmente su un piano tramite il movimento di due bracci snodati l'uno rispetto all'altro e rispetto al telaio fisso. Il terzo movimento (quello rettilineo dell'asse Z) è spesso realizzato con cilindri pneumatici.

E' particolarmente indicato per applicazioni di montaggio e manipolazione.



Robot SCARA

1.6 Evoluzione dei sistemi di automazione

Nei pochi anni che ci separano dalla crisi energetica del 1973, l'intero sistema industriale tradizionale ha subito grosse trasformazioni. Se la macchina a vapore può essere posta a capo della prima rivoluzione industriale, il calcolatore elettronico deve essere certamente riconosciuto come "motore" della seconda.

Le nuove tecnologie hanno prodotto una nuova generazione di macchine operatrici di:

- fabbricazione
- montaggio
- trasporto, manipolazione e immagazzinamento

in grado di svolgere sequenze complete e variabili di operazioni produttive, anziché ripetere all'infinito una o poche operazioni, in quanto programmabili.

Come abbiamo visto l'automazione rigida lascia il posto all'automazione flessibile ed é proprio in questo contesto che si inserisce il manipolatore programmabile che, per le sue diverse costruzioni e geometrie, diventa l'elemento fondamentale delle molteplici applicazioni ipotizzabili.

I sistemi di automazione si sono evoluti rapidamente nel tempo passando da iniziali soluzioni rigide (cablate) a moderne soluzioni flessibili (programmabili).

- Prima generazione

Risale agli anni '60 ed è caratterizzata da una unità di controllo costituita da un sequenziatore. In questo caso i sistemi di automazione sono costituiti da manipolatori definiti a "sequenze limitate".

Il sequenziatore può essere implementato in tecnologia elettromeccanica od elettronica cablata, ma molto più frequenti sono le soluzioni pneumatiche, realizzate ad esempio mediante programmatori a camme. Il sequenziatore emette gli ordini on-off agli attuatori di comando delle varie parti del robot e riceve segnali di consenso di fine corsa meccanici o elettrici. Tali segnali disattivano un attuatore e permettono l'attivazione del successivo.

Con queste soluzioni si ha dunque il solo controllo delle posizioni terminali e non delle traiettorie ed i comandi servono solo per accendere e spegnere i motori; deriva da qui il tipico nome di sistema "pick and place" (prendi e metti).

- Seconda generazione

I sistemi di automazione della seconda generazione sono macchine controllate da un calcolatore digitale dedicato. Essi sono perciò in grado di ripetere indefinitamente la sequenza contenuta in una memoria a stato solido. Tale sequenza di operazioni da svolgere può essere cambiata molto semplicemente, con conseguente flessibilità operativa della macchina.

Ogni asse è servo-controllato ed ogni segmento del manipolatore è equipaggiato con adeguati sensori di posizione e di velocità. Al pari delle altre macchine operatrici programmabili, quali ad esempio la macchina utensile a CN, il robot può essere programmato con metodo linguistico mediante un apposito linguaggio di programmazione. Ma a differenza di ogni altra macchina operatrice, il robot può anche apprendere il proprio compito operativo tramite una azione di guida del braccio lungo il percorso necessario per eseguire il compito ed una esecuzione campione delle diverse operazioni.

- Terza generazione

Sono caratterizzati da notevoli capacità adattative e vengono, per questo motivo, chiamati "intelligenti". Sono in grado di eseguire il compito assegnato verificando la propria interazione con l'ambiente attraverso un modello predefinito ed utilizzano linguaggi di programmazione evoluti in grado di assicurare interfacciamenti con banche dati e con unità di elaborazioni esterne per il carico e lo scarico dei programmi. Grazie ai feedback dei dati sensoriali e dell'interfacciamento con banca dati, sono inoltre in grado di inviare messaggi all'operatore che descrivono la natura e l'ubicazione degli eventuali stati di malfunzionamento.

- Quarta generazione

Nessuno sa ancora con certezza come saranno i sistemi di automazione appartenenti a questa quarta generazione. Probabilmente saranno costituiti da manipolatori del tipo non metallici, dal momento che i prezzi dei materiali ad alto contenuto tecnologico sono in costante diminuzione. Saranno sicuramente più leggeri, più veloci, più precisi e più accurati nelle realizzazioni ed utilizzeranno la percezione visiva e sensoriale in modo da raggiungere il vero coordinamento occhio-mano, indispensabile per lo svolgimento di operazioni molto complesse.

Il loro sviluppo va certamente al passo con lo sviluppo dell'informatica e dell'elettronica; ci aspettiamo quindi sistemi ancor più flessibili degli attuali ed in grado di soddisfare, con il minimo sforzo da parte di chi li deve programmare, le più complesse esigenze operative.

2 Sistemi numerici e algebra di Boole

2.1 Sistema numerico decimale

Ogni linguaggio, per essere scritto e comunicato, ha bisogno di un metalinguaggio. Così la matematica viene spiegata e comunicata attraverso il linguaggio della lingua parlata o scritta. Linguaggio e metalinguaggio possono però talvolta coincidere.

Ad esempio, per descrivere le regole della grammatica italiana ci serviamo dell'italiano stesso

Invece in matematica

“ $2X + 4 > 0$ è una disequazione”

utilizziamo il linguaggio matematico ($2X + 4 > 0$) mentre la parte “è una disequazione” appartiene al metalinguaggio che serve a descrivere la prima parte matematica

Per esprimere un linguaggio abbiamo bisogno quindi di un insieme di elementi che possano essere messi in corrispondenza biunivoca tra loro e che rappresentino tutti uno stesso concetto astratto: per il linguaggio matematico utilizziamo i numeri.

Il sistema numerico decimale è quello usato più frequentemente nella vita odierna, è detto a base dieci in quanto per rappresentare un numero qualsiasi sono necessarie dieci cifre: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9.

Si consideri, ad esempio, il numero decimale intero 212; esso può essere scritto come:

$$200 + 10 + 2$$

$$2 \times 10^2 + 1 \times 10^1 + 2 \times 10^0$$

cioè come somma di potenze del dieci in cui la prima cifra a partire da destra rappresentante l'unità viene detta cifra meno significativa o di **minor peso**, mentre la cifra più a sinistra, che rappresenta le centinaia, è detta cifra di **maggior peso** o più significativa.

E' chiaro che cifre uguali hanno diverso peso a seconda della posizione occupata dal numero.

Si consideri ora il numero decimale frazionario 525,27. Anch'esso può essere scritto sotto forma di potenze di dieci con la sola avvertenza che le cifre decimali dopo la virgola vanno moltiplicate per potenze negative di dieci crescenti:

$$\begin{aligned} 525,27 &= 500 + 20 + 5 + 0,2 + 0,07 = \\ &= 5 \times 10^2 + 2 \times 10^1 + 5 \times 10^0 + 2 \times 10^{-1} + 7 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

In generale in un sistema numerico di base B un numero intero di n cifre può essere rappresentato nella seguente forma:

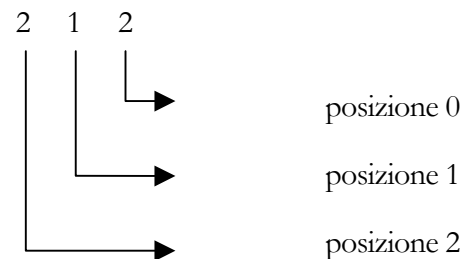
$$N = p_{n-1}B^{n-1} + p_{n-2}B^{n-2} + \dots + p_0B^0 = \sum p_j B^j$$

Essendo N il numero intero, B la base del sistema, p_j la cifra nella generica posizione j ed n il numero delle cifre.

Nel caso del numero decimale $(212)_{10}$:

$$N = \sum_{j=0}^2 p_j B^j = p_0 B^0 + p_1 B^1 + p_2 B^2 =$$

$$= 2 \times 10^0 + 1 \times 10^1 + 2 \times 10^2 = 212$$



Mentre per un numero generico qualsiasi vale la seguente espressione:

$$N = p_{n-1}B^{n-1} + \dots + p_0B^0 + p_{-1}B^{-1} + \dots + p_{-m}B^{-m} = \sum_{j=-m}^{n-1} p_j B^j$$

dove con m si è indicato il numero di cifre dopo la virgola ed n il numero di cifre intere.

Nel caso in cui

$$N = \begin{array}{ccccc} 5 & 2 & 5 & , & 2 & 7 \\ | & | & | & & | & | \\ p_{-2} & p_{-1} & p_0 & & p_{-1} & p_{-2} \end{array}$$

$$\begin{aligned} N &= \sum_{j=-2}^2 p_j B^j = p_{-2}B^{-2} + p_{-1}B^{-1} + p_0B^0 + p_{-1}B^{-1} + p_{-2}B^{-2} = \\ &= 7 \times 10^{-2} + 2 \times 10^{-1} + 5 \times 10^0 + 2 \times 10^{-1} + 5 \times 10^{-2} = (525,27)_{10} \end{aligned}$$

2.2 Sistema numerico binario

E' il sistema usato nei calcolatori elettronici ed è un sistema a base o radice due. Vengono infatti usate soltanto due cifre 0 e 1 indicate usualmente col termine bit (abbreviazione di binary digit) per la formazione del numero binario.

Un qualsiasi numero in un sistema binario può essere rappresentato da una serie di bit equivalente alla somma di potenze del DUE, ognuna delle quali moltiplicata per una cifra che può essere 0 o 1.

Per rappresentare o convertire in forma binaria un numero decimale possono essere usati diversi metodi. Il primo metodo consiste nella divisione ripetuta per 2 fino ad avere un quoziente nullo. Il numero binario risultante è composto dai resti delle successive divisioni, dove il bit di minor peso è il resto della prima divisione e il bit di maggior peso è quello dell'ultima.

Conversione binaria del numero 39

$$\begin{array}{r}
 39 \\
 \text{---} = 19 + \mathbf{1} \text{ bit di minor peso} \\
 2 \\
 \\
 19 \\
 \text{---} = 9 + \mathbf{1} \\
 2 \\
 \\
 9 \\
 \text{---} = 4 + \mathbf{1} \\
 2 \\
 \\
 4 \\
 \text{---} = 2 + \mathbf{0} \\
 2 \\
 \\
 2 \\
 \text{---} = 1 + \mathbf{0} \\
 2 \\
 \\
 1 \\
 \text{---} = 0 + \mathbf{1} \text{ bit di maggior peso} \\
 2
 \end{array}$$

Si può dunque scrivere:

$$\begin{array}{l}
 39 = 1 \times 2^5 + 0 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 \\
 \Rightarrow = \mathbf{100111} \\
 \begin{array}{c}
 \uparrow \qquad \qquad \uparrow \\
 \text{bit di maggior peso} \quad \text{bit di minor peso}
 \end{array}
 \end{array}$$

Conversione binaria del numero 16

$$\begin{array}{r}
 16 \\
 \text{---} = 8 + \mathbf{0} \text{ bit di minor peso} \\
 2 \\
 \\
 8 \\
 \text{---} = 4 + \mathbf{0} \\
 2
 \end{array}$$

$$\frac{4}{2} = 2 + 0$$

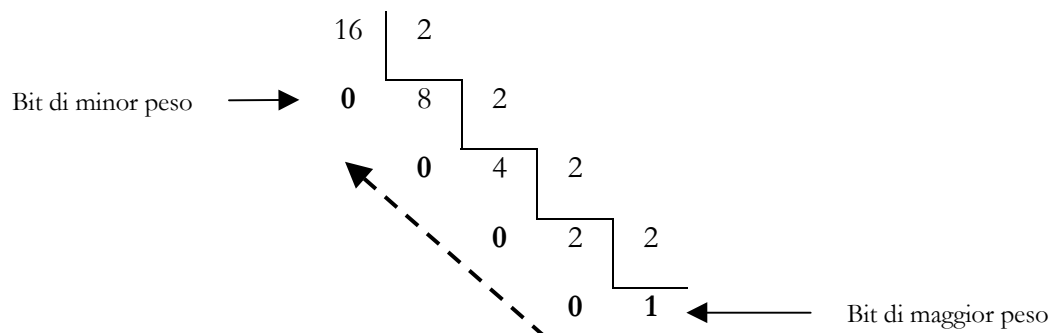
$$\frac{2}{2} = 1 + 0$$

$$\frac{1}{2} = 0 + 1 \text{ bit di maggior peso}$$

Si può dunque scrivere:

$$16 = 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 0 \times 2^0$$

$$\Rightarrow = 10000$$



Il metodo appena descritto presenta però l'inconveniente di non poter essere usato per numeri con parte frazionaria. Un secondo metodo consiste nell'esprimere il numero decimale come somma di potenze del due e moltiplicarle per le cifre 0 e 1 appropriatamente.

In maniera del tutto analoga a quanto descritto precedentemente per il sistema decimale, si guarda la più grande potenza di 2 (cioè il più grande tra i possibili raggruppamenti) contenuta nel numero decimale, e così di seguito per ciò che rimane.

Si voglia ad esempio sapere quale binario corrisponde al decimale 15. Il più grande raggruppamento contenuto nel numero è il gruppo da 8 unità, pari a 2^3 unità. Abbiamo poi 7 unità che contengono un gruppo da $4 = 2^2$ unità e 3 unità, che contengono un gruppo da $2 = 2^1$ unità. Infine rimane una unità semplice $1 = 2^0$ unità.

$$(15)_{10} = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = (1111)_2$$

$$(15,5)_{10} = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} = (1111,1)_2$$

In maniera analoga si ottiene il passaggio da un numero binario ad un numero decimale:

$$(1111)_2 = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 8 + 4 + 2 + 1 = (15)_{10}$$

$$\begin{aligned} (1111,1)_2 &= 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} = \\ &= 8 + 4 + 2 + 1 + 0,5 = (15,5)_{10} \end{aligned}$$

2.2.1 Le operazioni aritmetiche nel sistema binario

Sono operazioni che soddisfano alle stesse regole valide per i numeri decimali ed hanno il vantaggio di essere sotto certi aspetti molto più semplici rispetto a quest'ultime in quanto le cifre usate sono soltanto due.

a) Addizione binaria

Viene eseguita allo stesso modo di quella decimale, la tabella per l'addizione di due cifre binarie è la seguente:

0	+	0	=	0
0	+	1	=	1
1	+	0	=	1
1	+	1	=	0 con riporto di 1

Dato che nel sistema binario la cifra più alta è 1, quando la somma è maggiore di uno essa richiede il riporto di una cifra in pieno accordo a quanto avviene nel sistema decimale, dove essendo 9 la cifra più alta, ogni somma maggiore di 9 richiede il riporto di una cifra.

Esempio 1

Addizione dei numeri binari 1111 e 1110

binario						decimale	
	1 ^R	1 ^R	1 ^R		riporto		
		1	1	1	Primo addendo	1	5
+		1	1	1	Secondo addendo	1	4
	1	1	1	0	somma	2	9

Esempio 2

Addizione dei numeri binari 111001 e 001101

binario							decimale		
	1 ^R	1 ^R		1 ^R		riporto	1 ^R		
	1	1	1	0	0	1	Primo addendo	1	5
+	0	0	1	1	0	1	Secondo addendo	1	4
							somma		
1	0	0	0	1	1	0		2	9

b) Sottrazione binaria

E' l'operazione inversa dell'addizione. Essa può essere eseguita analogamente al sistema decimale, prendendo in prestito una cifra dalla colonna di ordine superiore tutte le volte che la differenza scende sotto lo 0.

La tabella per la sottrazione binaria tra due bit è la seguente:

0	-	0	=	0
1	-	1	=	0
1	-	0	=	1
0	-	1	=	1 con riporto negativo di 1

Esempio 3

Sottrazione di $(0001101)_2$ da $(1000110)_2$

binario								decimale	
	1	0	0	0	1	1	0	7	0
-	0	0	0	1	1	0	1	1	3
	1 ^P	1 ^P	1 ^P			1 ^P		1 ^P	
	0	1	1	1	0	0	1	5	7

Esempio 4

Sottrazione di $(01110)_2$ da $(11101)_2$

binario							decimale	
	1	1	1	0	1		2	9
-	0	1	1	1	0		1	4
	1 ^P	1 ^P	1 ^P					
	0	1	1	1	1		1	5

La sottrazione può essere eseguita con il metodo appena visto oppure tramite un numero chiamato **complemento a due** ottenuto invertendo tutti i bit del sottraendo, cioè scambiando gli 1 in zero e viceversa, e aggiungendo 1 al risultato. La differenza fra i due numeri si trova addizionando il complemento del sottraendo al minuendo e trascurando l'eventuale riporto dell'ultima cifra. Il metodo del complemento a due viene usato nei calcolatori elettronici poiché offre una maggiore facilità di meccanizzazione.

Esempio 5

Sottrazione di $(01110)_2$ da $(11101)_2$ con il metodo del *complemento a due*.

	0	1	1	1	0	sottraendo
	1	0	0	0	1	inversione del sottraendo
+					1	
	1	0	0	1	0	complemento del sottraendo
+	1	1	1	0	1	minuendo
1	0	1	1	1	1	risultato (differenza)



Riporto da trascurare

Esempio 6

Sottrazione di $(0001101)_2$ da $(1000110)_2$ con il metodo del *complemento a due*.

	0	0	0	1	1	0	1	sottraendo
	1	1	1	0	0	1	0	inversione del sottraendo
+							1	
	1	1	1	0	0	1	1	complemento del sottraendo
+	1	0	0	0	1	1	0	minuendo
1	0	1	1	1	0	0	1	risultato (differenza)

↑
Riporto da trascurare

c) Moltiplicazione binaria

La moltiplicazione binaria, intesa come addizione ripetuta, segue le stesse regole della moltiplicazione decimale. Essa soddisfa alla seguente tabella:

0	x	0	=	0
0	x	1	=	0
1	x	0	=	0
1	x	1	=	1

Esempio 7

Moltiplicazione di $(1111)_2$ per $(10)_2$:

		binario				
		1	1	1	1	moltiplicando
	x			1	0	moltiplicatore
		0	0	0	0	
1		1	1	1	-	
1		1	1	1	0	prodotto

		decimale		
		1	5	
	x		2	
		3	0	

Esempio 8

Moltiplicazione di $(10111)_2$ da $(110)_2$:

		binario						
		1	0	1	1	1	moltiplicando	
				1	1	0	moltiplicatore	
		0	0	0	0	0		
	1	0	1	1	1	-		
	1	0	1	1	1	-	-	
1	0	0	0	1	0	1	0	prodotto

		decimale		
		2	3	
	x		6	
	1	3	8	

d) Divisione binaria

La divisione nel sistema binario segue lo schema della divisione nel sistema decimale e può essere eseguita contando quante volte un numero può essere sottratto da un altro.

Il risultato è detto quoziente. In realtà questa operazione viene eseguita dai calcolatori elettronici per sottrazioni ripetute.

Esempio 9

Divisione di $(1111)_2$ per $(11)_2$:

	binario						decimale	
dividendo	1	1	1	1		divisore	1	5
	1	1				quoziente	1	5
	0	0	1	1			-	-
			1	1				
			-	-				

Esempio 10

Divisione di $(10000)_2$ per $(10)_2$:

	binario							decimale	
dividendo	1	0	0	0	0		1	6	2
	1	0					1	6	8
	-	-					-	-	

Da quanto descritto si può notare che l'operazione aritmetica fondamentale del sistema binario è l'addizione, in quanto tutte le altre operazioni possono essere ricondotte ad essa.

TABELLA 1

Tabella di conversione decimale – binario per i primi 32 numeri interi

<i>Decimale</i>	<i>Binario</i>
0	0
1	01
2	10
3	11
4	100
5	101
6	110
7	111
8	1000
9	1001
10	1010
11	1011
12	1100
13	1101
14	1110
15	1111
16	10000
17	10001
18	10010
19	10011
20	10100
21	10101
22	10110
23	10111
24	11000
25	11001
26	11010
27	11011
28	11100
29	11101
30	11110
31	11111
32	100000

2.3 Dispositivi binari

Si incontra spesso, in ambito tecnico, la necessità di operare codifiche delle informazioni per adattare la rappresentazione al canale della trasmissione ed alle macchine che devono elaborarle.

Il codice binario per numeri è uno tra gli strumenti generalmente applicabili per la semplificazione del problema trasmissione dati / segnali. Verrà in questo capitolo brevemente trattato per meglio comprendere la comunicazione binaria dei sistemi di controllo.

Il funzionamento di un apparato digitale si basa sul continuo susseguirsi di cambiamenti di valore che il mondo esterno, o i circuiti interni, impongono ad un opportuno insieme di grandezze fisiche.

Per impostare una descrizione matematica del comportamento dei sistemi digitali occorre innanzitutto riuscire a prescindere dalla natura delle grandezze fisiche impiegate e dai possibili valori nominali che per esse sono stati scelti in sede di progetto.

A tale scopo definiremo "configurazione binaria" un'arbitraria disposizione uno accanto all'altro dei simboli 0 e 1. E' noto dal calcolo combinatorio che, una volta prefissata la lunghezza della "stringa" dei simboli, risulta pure prefissato il numero di differenti configurazioni così ottenibili: l'elencazione di N simboli 0 o 1 consente infatti di generare non più e non meno di 2^N distinte configurazioni binarie, cioè tante quante sono le disposizioni con ripetizione di 0 e 1 a N a N.

La codifica o rappresentazione binaria delle informazioni è basata sulla seguente asserzione:

" Un insieme di M eventi mutuamente esclusivi può essere posto in corrispondenza con l'insieme dei valori assunti da N variabili binarie se e solo se $M \leq 2^N$."

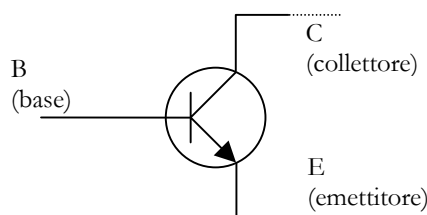
Il rispetto della disuguaglianza consente infatti di rappresentare ciascun evento con almeno una delle 2^N possibili configurazioni di valore e di risalire univocamente da ciascuna configurazione al particolare evento che essa deve individuare.

L'importanza dei codici binari risiede nel fatto che gli elaboratori elettronici accettano, memorizzano ed elaborano solo informazioni codificate in tali codici.

Ciò perché tutti i dispositivi usati per la memorizzazione e la elaborazione presentano solo due stati significativi, i quali vengono chiamati a rappresentare appunto i bit 0 e 1.

In particolare, alla base di un circuito di memorizzazione o elaborazione stanno microscopici interruttori, realizzati con transistor o diodi.

Un transistor è un componente a semiconduttore (germanio o silicio), fornito di tre terminali chiamati base (B), emettitore (E) e collettore (C). Il simbolo normalmente utilizzato negli schemi circuitali è quello indicato in figura.

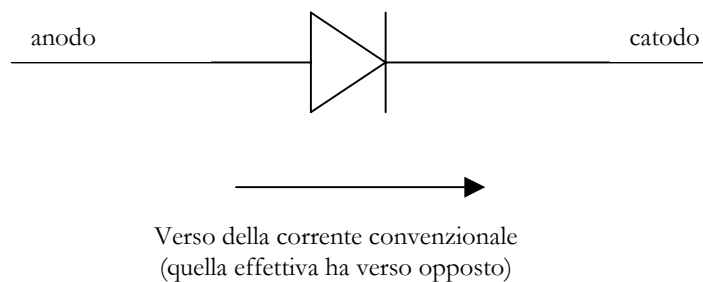


Un transistor può funzionare in tre modi distinti:

- in regime di **interdizione**, cioè in maniera equivalente ad un interruttore aperto
- in regime di **saturazione**, cioè in maniera equivalente ad un interruttore chiuso
- in regime **lineare**, cioè come un amplificatore proporzionale di corrente e/o tensione.

Nell'uso che se ne fa nei circuiti degli elaboratori, la regione lineare viene fatta "attraversare" velocemente dal dispositivo, il quale presenterà due sole condizioni di funzionamento. Più precisamente, il transistor sarà interdetto (stato off o aperto) quando tra base ed emettitore è presente una tensione inferiore a 0,7 V per transistor al silicio, e 0,4 V per transistor al germanio. E' invece in saturazione (stato on o chiuso) nel caso contrario.

Anche il diodo è un dispositivo a semiconduttore, fornito di due terminali chiamati anodo e catodo. Se la tensione applicata all'anodo è maggiore di quella applicata al catodo ("polarizzazione diretta") il diodo presenta una resistenza estremamente bassa al passaggio della corrente elettrica e si comporta, in questo caso, come un interruttore chiuso. Viceversa, se la tensione al catodo è maggiore rispetto a quella dell'anodo ("polarizzazione inversa") la resistenza al passaggio della corrente diventa estremamente alta ed il diodo si comporta come un interruttore aperto.



In generale, l'utilizzo di dispositivi a due soli stati per la rappresentazione dei bit 0 e 1 ha diversi vantaggi.

In primo luogo quello di essere semplice e di consentire ampie tolleranze. Non è necessario un alto livello di precisione dei segnali applicati ai diversi componenti binari. Per questo motivo i componenti elettronici di un elaboratore possono essere costruiti in modo più grossolano ed economico di quelli impiegati, ad esempio, in un impianto di alta fedeltà.

2.4 Algebra di Boole

Nella quasi totalità dei calcolatori elettronici l'informazione viene elaborata sotto forma digitale, cioè i segnali elettrici che la rappresentano possono assumere soltanto due valori nominali. I circuiti preposti a tale scopo sono conosciuti sotto il nome di circuiti logici.

Essi hanno la caratteristica comune di operare con segnali binari, con segnali quindi che possono assumere soltanto due valori o livelli.

Tali circuiti sono realizzati fisicamente con elementi che possono trovarsi soltanto in due stati diversi: diodi conducenti o non conducenti, transistor saturi o interdetti, ecc.

Per il funzionamento del circuito logico non è essenziale conoscere il valore numerico esatto del segnale binario, di conseguenza, per rappresentarne i due possibili valori o livelli, risulta

comodo far uso di sue simboli scelti a piacere. Normalmente questi valori sono indicati con “0” e “1” (Low = basso, High = alto). Ne deriva che il funzionamento di un circuito può essere interamente descritto da un punto di vista logico e non quantitativo e senza preoccuparsi della sua struttura fisica.

Sulla base della numerazione binaria si sviluppa l'algebra di Boole in cui una variabile si definisce booleana in quanto può assumere soltanto due valori: vero e falso (corrispondenti ai bit 1 e 0).

Le variabili booleane tendono a rappresentare lo stato di un sistema digitale e su di esse possono essere effettuate operazioni, chiamate logiche o booleane in onore del matematico George Boole che per primo le definì nel 1847. Le elaborazioni cui sono soggette le informazioni saranno così il prodotto ultimo di tali operazioni.

Ciascuna operazione logica è caratterizzata da un nome, un simbolo operativo e da una tabella della verità, cioè una tabella che riporta i valori della variabile logica di uscita per ogni combinazione delle variabili logiche di ingresso.

Le operazioni fondamentali più comunemente usate nell'algebra di Boole sono:

- prodotto logico o AND
- somma logica o OR
- negazione o complementazione o NOT

Queste operazioni non debbono essere confuse con le operazioni di somma e prodotto dell'algebra usuale che si applicano anche ai numeri binari.

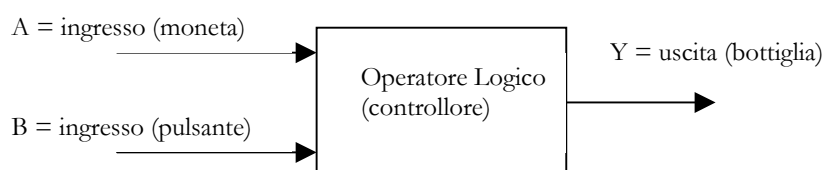
a) Operazione AND (prodotto logico)

Si analizzi la seguente situazione: ci troviamo davanti ad un distributore automatico di bevande ed abbiamo sete.

“Per acquistare una bottiglia di acqua naturale devo inserire la moneta e premere il pulsante verde”

E' chiaro che devono manifestarsi contemporaneamente queste due condizioni per soddisfare la nostra esigenza:

1. devo inserire la moneta giusta
2. deve premere il pulsante verde



Assegnando opportunamente alle variabili binarie i valori “0” e “1” si può scrivere:

Y =	“1”	Il distributore automatico funziona
	“0”	Il distributore automatico non funziona
A =	“1”	La moneta giusta è stata inserita
	“0”	La moneta giusta non è stata inserita
B =	“1”	Il pulsante verde è stato premuto
	“0”	Il pulsante verde non è stato premuto

Con A e B variabili indipendenti e Y variabile dipendente:

$$Y = f(A, B)$$

E' possibile compilare ora una tabella, detta *tabella della verità (truth-table)*, in cui compaiono tutte le 2^n possibili configurazioni delle variabili indipendenti, con n numero delle variabili.

A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Tabella della verità del prodotto logico delle variabili binarie A e B

Questa tabella fornisce il prodotto logico (AND) poiché soddisfa alle seguenti condizioni:

$$0 * 0 = 0$$

$$0 * 1 = 0$$

$$1 * 0 = 0$$

$$1 * 1 = 1$$

ed è in pieno accordo con l'equazione algebrica $Y = A * B$ in quanto il distributore automatico funziona se e soltanto se A e B valgono 1 (la moneta giusta è stata inserita ed il pulsante verde è stata premuto) mentre in tutti gli altri casi non funziona.

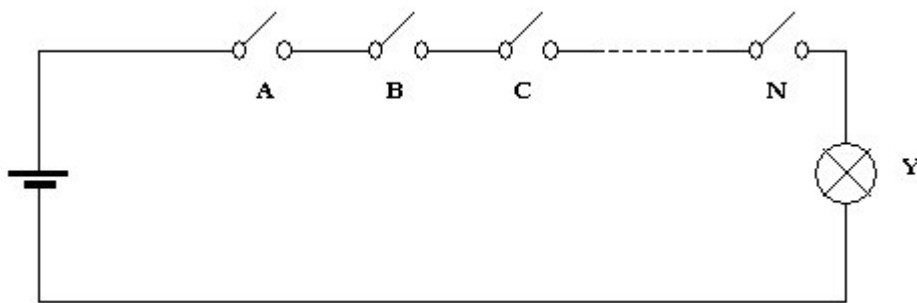
Generalizzando si può concludere che in un sistema a n variabili:

$$Y = A * B * C * * N$$

Y vale 1 solamente se tutte le n variabili valgono 1.

L'operazione AND si applica su più variabili booleane di ingresso e la variabile booleana di uscita assume il valore 1 solo se tutte quelle di ingresso hanno valore 1.

Nella seguente figura è mostrato un circuito elettrico che realizza la funzione AND



Circuito AND o coincidenza

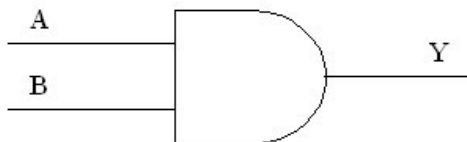
Assegnando ad ogni contatto una variabile binaria che vale 0 quando il contatto è aperto e 1 quando è chiuso, e indicando con 0 lo spegnimento della lampada e con 1 la sua accensione, il circuito sopra riportato soddisfa all'equazione algebrica:

$$Y = A * B * C * * N$$

propria della funzione AND in quanto circola corrente, e quindi si accende la lampada, se e soltanto se tutti i contatti sono chiusi.

Il simbolo operativo di questa funzione è " * ". Per questo motivo l'operazione viene chiamata "prodotto logico".

Il simbolo grafico dell'operatore AND è così schematizzato:



Simbolo della porta AND

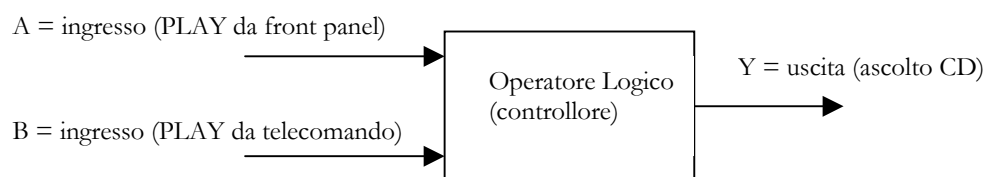
b) Operazione OR (somma logica)

Si analizzi la seguente situazione: dobbiamo accendere il nostro lettore CD per ascoltare un disco ed abbiamo la possibilità di attivare il comando PLAY sia dal telecomando sia dal front panel dell'apparecchio stesso.

“Ascolto il disco se premo PLAY dal telecomando o dal front panel dell'apparecchio”

In questo caso esistono due condizioni per l'ascolto del disco:

1. premo PLAY da telecomando
2. premo PLAY da front panel



E' sufficiente che si verifichi soltanto una fra le due condizioni perché il disco venga ascoltato. Assegnando opportunamente alle variabili binarie i valori “0” e “1” si può scrivere:

Y =	“1”	Ascolto il disco
	“0”	Non ascolto il disco
A =	“1”	PLAY da telecomando attivato
	“0”	PLAY da telecomando disattivato
B =	“1”	PLAY da front panel attivato
	“0”	PLAY da front panel disattivato

Con A e B variabili indipendenti e Y variabile dipendente:

$$Y = f(A, B)$$

La rappresentazione algebrica che ne deriva è:

$$Y = A + B$$

La variabile di uscita assume valore 1 se almeno una di quelle di ingresso assume valore 1.

E' possibile compilare ora una tabella, detta *tabella della verità (truth-table)*, in cui compaiono tutte le 2^n possibili configurazioni delle variabili indipendenti, con n numero delle variabili.

A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Tabella della verità della somma logica delle variabili binarie A e B

Questa tabella fornisce la somma logica (OR) poiché soddisfa alle seguenti condizioni:

$$0 + 0 = 0$$

$$0 + 1 = 1$$

$$1 + 0 = 1$$

$$1 + 1 = 1$$

ed è in pieno accordo con l'equazione algebrica $Y = A + B$ in quanto il lettore CD parte se viene premuto il tasto PLAY da telecomando o da front panel.

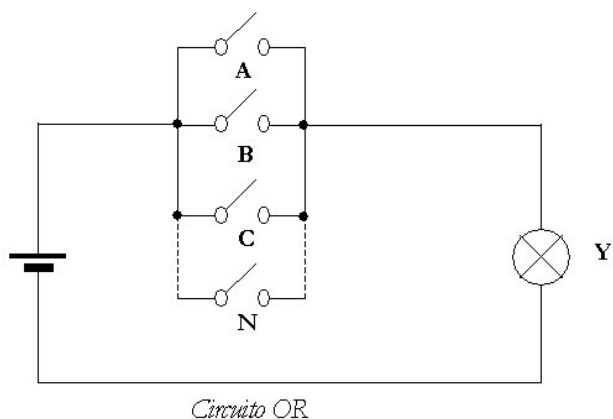
Generalizzando si può concludere che in un sistema a n variabili:

$$Y = A + B + C + + N$$

La somma logica Y vale 1 quando una o (OR) più variabili assumono il valore 1. Vale 0 quando tutte le variabili assumono il valore 0.

L'operazione OR si applica su più variabili booleane di ingresso e la variabile booleana di uscita assume il valore 1 se almeno una di quelle di ingresso assume valore 1.

Nella seguente figura è mostrato un circuito elettrico che realizza la funzione OR



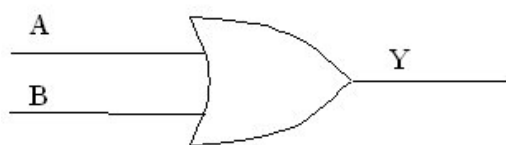
Assegnando ad ogni contatto una variabile binaria che vale 0 quando il contatto è aperto e 1 quando è chiuso, e indicando con 0 lo spegnimento della lampada e con 1 la sua accensione, il circuito sopra riportato soddisfa all'equazione algebrica:

$$Y = A + B + C + \dots + N$$

propria della funzione OR in quanto circola corrente, e quindi si accende la lampada, se almeno uno dei contatti è chiuso.

Il simbolo operativo di questa funzione è " + ". Per questo motivo l'operazione viene chiamata "somma logica".

Il simbolo grafico dell'operatore OR è così schematizzato:



Simbolo della porta OR

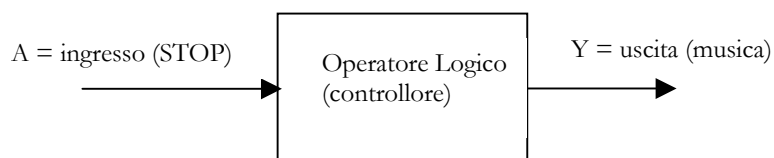
c) Negazione o complementazione NOT

Si analizzi la seguente situazione: stiamo ascoltando un disco con il nostro lettore CD ed abbiamo la possibilità di premere il comando STOP per interrompere la musica.

“Continuo ad ascoltare la musica se non premo STOP”

In questo caso esistono due condizioni per l'ascolto del disco:

1. continuo ad ascoltare se non premo STOP
2. non ascolto più se premo STOP



I valori delle variabili sono:

Y =	"1"	Ascolto musica
	"0"	Non ascolto musica
A =	"1"	Premo STOP
	"0"	Non premo STOP

e la corrispondente equazione algebrica vale:

$$Y = \bar{A}$$

Con $\bar{A}$ complemento o inverso di A, 0 complemento di 1 e 1 complemento di 0

La variabile di uscita assume valore il valore opposto della variabile di ingresso.

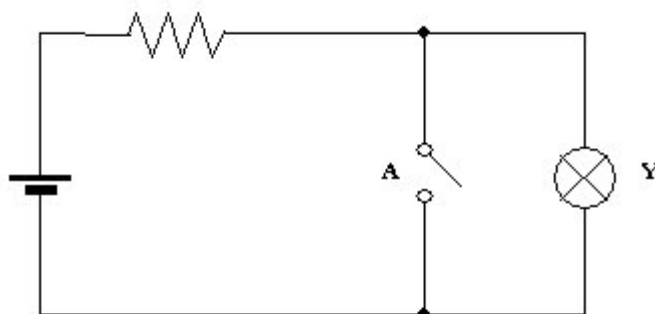
La *tabella della verità* che verifica l'operazione logica inversione è molto semplice in quanto si ha soltanto una è la variabile indipendente del sistema.

A	Y
0	1
1	0

Tabella della verità della negazione di variabile binaria A

L'operazione NOT si applica su una variabile booleane di ingresso e produce una variabile di uscita in ogni caso di valore opposto.

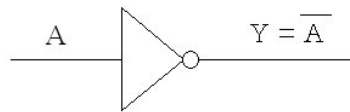
Un circuito invertitore NOT può essere realizzato elettricamente mediante il seguente schema.



Ciruito NOT

La lampada è spenta ($Y=0$) perché cortocircuitata quando il contatto A è chiuso ($A=1$); accesa quando il contatto A è aperto ($Y=1$, $A=0$).

Il simbolo grafico dell'operatore NOT è così schematizzato:



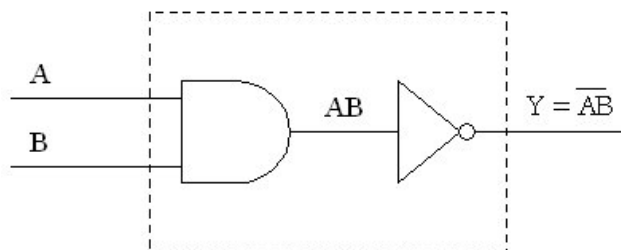
Simbolo della porta NOT

I circuiti finora considerati che realizzano le operazioni di prodotto, somma e negazione sono detti *porte logiche* in quanto l'uscita Y assume il valore 1 soltanto per determinate configurazioni di ingressi. E' possibile definire altre operazioni logiche elementari, chiamate universali, in aggiunta a quelle considerate:

- porta logica NAND
- porta logica NOR
- porta logica OR esclusivo o XOR

d) Porta logica NAND

Si tratta di un circuito AND seguito da un NOT. Questo circuito esegue il prodotto logico complementato delle variabili di ingresso.



Simbolo della porta NAND

L'espressione algebrica per un NAND a due ingressi vale

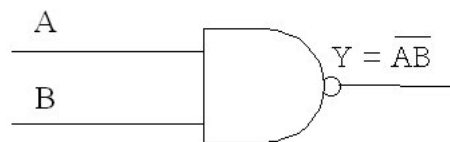
$$Y = \overline{A * B}$$

Mentre la tabella della verità è la seguente:

A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Tabella della verità della porta logica NAND a due ingressi

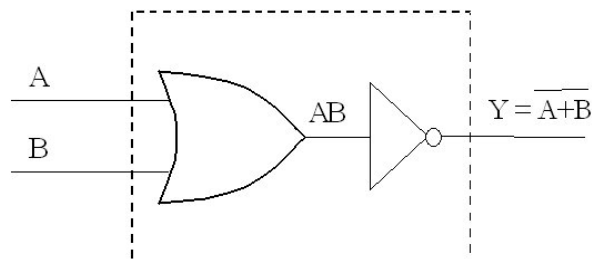
Generalizzando si può dire che l'uscita di una porta logica NAND vale 0 se e soltanto se tutti i suoi ingressi sono a livello 1.



Simbolo semplificato della porta NAND

e) Porta logica NOR

E' un circuito che esegue la somma complementata delle variabili di ingresso. In altre parole è un circuito OR seguito da un NOT.



Simbolo della porta NOR

L'espressione algebrica per un NOR a due ingressi vale

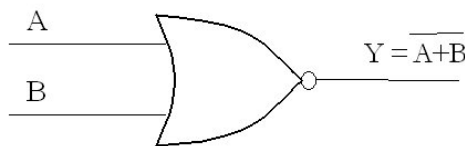
$$Y = \overline{A + B}$$

Mentre la tabella della verità è la seguente:

A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Tabella della verità della porta logica NOR a due ingressi

Dall'esame della tabella si può notare che *l'uscita di un NOR vale 1 se e solamente se tutti gli ingressi valgono 0*



Simbolo semplificato della porta NOR

f) Porta logica OR esclusivo (XOR)

La funzione logica realizzata da questa porta vale:

$$Y = \overline{A} B + A \overline{B}$$

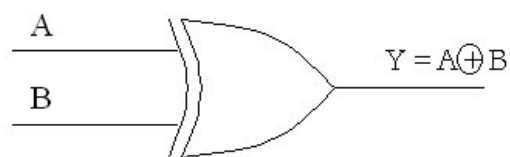
Tale espressione è in pieno accordo con la seguente tabella della verità, come può essere facilmente verificato assegnando indifferentemente 0 ed 1 alle variabili indipendenti:

A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Tabella della verità della porta logica XOR a due ingressi

Dalla tabella della verità è possibile notare che *l'uscita di una porta logica XOR vale 1 soltanto se i due ingressi sono diversi*

Uno dei simboli con cui si esprime l'operazione OR esclusivo è il seguente:



Simbolo della porta XOR

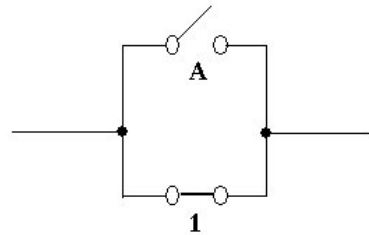
2.5 Teoremi fondamentali dell'algebra di Boole

Alcuni di questi teoremi sono immediatamente comprensibili se dimostrati fisicamente mediante una rete di contatti ai quali viene associato il valore 1 se chiusi e 0 se aperti..

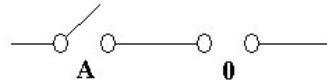


Teorema di annullamento

$$A + 1 = 1$$

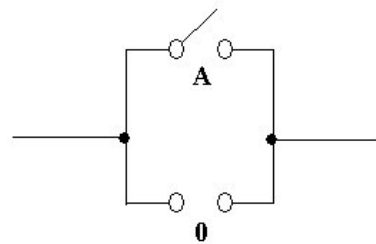


$$A * 0 = 0$$

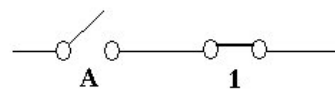


Teorema di identità

$$A + 0 = A$$



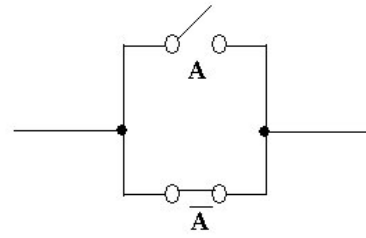
$$A * 1 = A$$



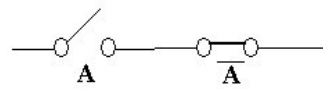


Teorema dei complementi

$$A + \bar{A} = 1$$

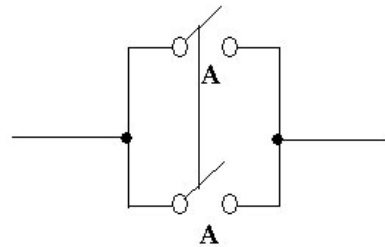


$$A * \bar{A} = 0$$

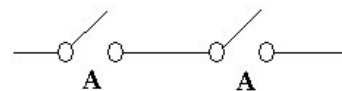


Teorema di idempotenza

$$A + A = A$$



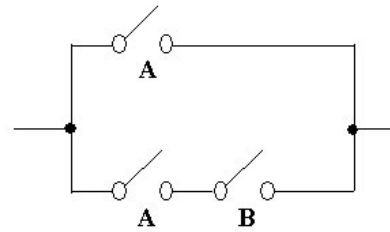
$$A * A = A$$



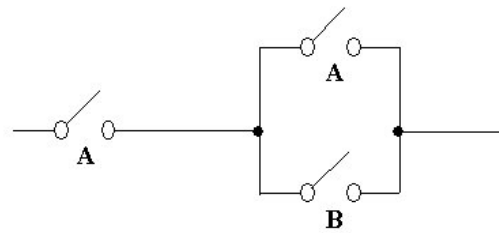


1° Teorema dell'assorbimento

$$A + A B = A$$



$$A * (A + B) = A$$



2° Teorema dell'assorbimento

$$A + \bar{A} B = A + B$$

$$A * (\bar{A} + B) = A * B$$

Inoltre valgono le seguenti proprietà:

$A + B = B + A$ $A * B = B * A$	Proprietà commutativa
$(A + B) + C = A + (B + C)$ $(A * B) * C = A * (B * C)$	Proprietà associativa
$A B + A C = A * (B + C)$ $(A + B) * (A + C) = A + B C$	Proprietà distributiva

I teoremi precedenti esposti in coppia sono detti duali:

*si può passare dall'uno all'altro sostituendo l'operatore (*) con l'operatore (+) il valore 1 con il valore 0 e viceversa.*

Ogni teorema inoltre può essere verificato con il metodo dell'induzione matematica, operazione che consiste nel verificare la relazione con tutti i possibili valori delle variabili.

Ad esempio:

$$A + \bar{A}B = A + B$$

A	B	$A + \bar{A}B$							$A + B$				
0	0	0	+	1	*	0	=	0	0	+	0	=	0
0	1	0	+	1	*	1	=	1	0	+	1	=	1
1	0	1	+	0	*	0	=	1	1	+	0	=	1
1	1	1	+	0	*	1	=	1	1	+	1	=	1



Teoremi di De Morgan

1. $\overline{(A + B)} = \bar{A} * \bar{B}$
2. $\overline{(A * B)} = \bar{A} + \bar{B}$

A	B	$\overline{(A + B)}$	$\bar{A} * \bar{B}$
0	0	1	1
0	1	0	0
1	0	0	0
1	1	0	0

A	B	$\overline{(A * B)}$	$\bar{A} + \bar{B}$
0	0	1	1
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	0	0

Il primo stabilisce che la complementazione della somma di due variabili è uguale al prodotto delle stesse variabili complementate.

Il secondo stabilisce che la complementazione del prodotto di due variabili è uguale alla somma delle stesse complementate.

I due teoremi possono essere conglobati in uno solo detto Teorema di De Morgan generalizzato:

Ogni complementazione di una funzione logica può essere ottenuta scambiando fra loro gli operatori (+) e (*) e complementando tutte le variabili.

3 Automazione ON / OFF

3.1 Pneumatica

Da molti anni la pneumatica ha conquistato una posizione insostituibile in numerosissimi settori della tecnica di comando e di azionamento. Il termine "pneumatica", derivato dal greco (neuma = fiato, respiro), significa trasmettere energia o segnali impiegando come mezzo di trasmissione l'aria compressa.

Per utilizzare la pneumatica in modo ottimale è necessario che l'utente dei componenti e dei sistemi pneumatici apprenda almeno le nozioni fondamentali su questa tecnologia.

Pneumatica: utilizzo dell'aria come fluido di lavoro per compiti di azionamento e di controllo in macchine ed impianti industriali.

Tale concetto è parte delle più antiche conoscenze dell'umanità, ma si è dovuto attendere il secolo scorso per vederne sorgere lo studio sistematico e le prime applicazioni industriali. Già intorno all'anno 2500 avanti Cristo si trova traccia dei primi impieghi dell'aria compressa sotto forma di soffietti. In successivi sviluppi l'aria compressa viene impiegata nella costruzione di organi, nell'industria mineraria e nel settore metallurgico.

L'utilizzo sistematico dell'aria compressa nella tecnologia si verifica tuttavia solo verso la metà del 19° secolo. Utensili pneumatici, martelli pneumatici, impianti per posta pneumatica, locomotori ed altri dispositivi ausiliari rappresentano esempi dello sviluppo verificatosi su larga scala.

L'ingresso della pneumatica nel settore della meccanizzazione e dell'automazione inizia a metà del 20° secolo.

L'aria compressa si può ormai trovare in quasi tutti i settori della tecnica:

- industria
- artigianato
- trasporto su rotaia
- trasporto aereo
- trasporto su strada
- industria mineraria
- navigazione
- medicina
- macchine edili
- difesa

Gli attuatori pneumatici hanno oggi un grosso peso nelle applicazioni di automazione industriale e servono a compiere lavoro meccanico realizzato dalla traslazione o dalla rotazione di un apposito organo a spese dell'energia di un fluido in pressione, sia questa aria o gas compresso. Le funzioni compiute sono molte. Vi sono attuatori alternativi che compiono spostamenti, o rotazioni, di ampiezza limitata e che sono costituiti da vari tipi di cilindri. Vi sono poi veri e propri motori rotativi in grado di compiere rotazioni continue.

Applicazioni

○ *Realizzazione di movimenti rettilinei*

- | | |
|--------------------------------|-------------------------|
| - attrezzi di fissaggio | - stazioni di rotazione |
| - unità di avanzamento | - robot industriali |
| - sollevamento ed abbassamento | - saldatrici a punti |
| - apertura e chiusura | - chiodatrici |
| - inclinazione | - espulsori |
| - presse pneumatiche | - vibratori |
| - azionamenti su porte | - trasporto-spinta |
| - tavole rotanti | - frenatura |
| - alimentazione pezzi | |

○ *Realizzazione di movimenti rotatori*

- | | |
|----------------|----------------------|
| - avvitatrici | - trapani |
| - molatrici | - cesoie per lamiera |
| - filettatrici | - roditrici |

○ *Impiego come mezzo di controllo*

- | | |
|--------------------------|-----------------|
| - controllo dei cicli | - conteggio |
| - controllo di posizione | - decelerazione |
| - protezione | - accumulazione |
| - bloccaggio | - rilevamento |

○ *Impieghi vari*

- | | |
|----------------------------|----------------------|
| - aria per usi di officina | - soffiatura |
| - verniciatura | - unità di controllo |
| - posta pneumatica | |

Nei robot questi attuatori possono essere utilizzati sia per la movimentazione dei bracci (traslazioni e rotazioni), sia per il comando di pinze o organi di afferraggio.

3.1.1 Caratteristiche della pneumatica

- L'aria è disponibile ovunque, gratis ed in quantità illimitata
- L'aria compressa si trasporta facilmente in tubazioni, anche flessibili e di piccolo diametro, e può essere inoltre trasportata tramite recipienti (bombole)
- Bassa concentrazione di potenza degli azionamenti
- Basso rapporto peso / potenza e alte velocità
- Protezione antideflagrante intrinseca
- Insensibile alle influenze esterne come basse temperature, impurità, vibrazioni meccaniche, umidità e campi elettrici
- Possibilità di sovraccarico degli organi motori fino all'arresto
- Non occorrono tubazioni di ritorno
- L'aria compressa non richiede di essere riciclata ma si può scaricare liberamente in atmosfera
- Semplice conversione dell'energia sia in movimenti rotatori che rettilinei (il movimento rettilineo si ottiene direttamente a differenza dei motori elettrici dove sono necessari sistemi di trasformazione del moto)
- Velocità e forze possono essere variate in modo semplice e continuo in un campo molto ampio
- La trasmissione di energia è possibile su lunghe distanze
- Facile manutenzione degli apparecchi grazie alla loro semplice costruzione
- Elevata affidabilità, sicurezza di esercizio e lunga durata degli attuatori e degli elementi di comando
- Sicurezza di esercizio anche in condizioni d'esercizio gravose
- Economicità dei comandi e degli azionamenti pneumatici
- E' necessario il trattamento preventivo dell'aria
- Data la comprimibilità dell'aria non è possibile realizzare con mezzi semplici un'accurata regolazione di velocità
- Le perdite per tra filamento riducono l'economicità di esercizio
- Gli scarichi sono rumorosi
- La nebbia d'olio che viene dispersa nell'aria compressa (attraverso i lubrificatori) per la lubrificazione dei componenti, si scarica in atmosfera insieme con l'aria di scarico.

Dalla disponibilità gratuita dell'aria deriva una caratteristica importante degli impianti ad aria compressa: lo **scarico libero in atmosfera**.

Nei cilindri la camera in pressione viene successivamente posta allo scarico in atmosfera; negli utensili basati sui motori pneumatici l'aria di ammissione va allo scarico dopo aver prodotto il lavoro. L'aria compressa viene quindi continuamente consumata, al contrario degli impianti ***oleodinamici***, dove lo scarico degli attuatori è continuamente raccolto e rimesso in circolo.

L'organo generatore dell'energia di pressione è il **compressore**. Si tratta di una macchina il cui funzionamento non differisce, nelle linee essenziali, da quello di una motrice a vapore. Se il consumo dell'impianto fosse regolare, un compressore dimensionato per fornire la necessaria portata oraria di aria sarebbe del tutto sufficiente.

In pratica poiché, specie nei piccoli - medi impianti, raramente il consumo è regolare, viene impiegato un serbatoio di accumulo, il quale svolge tre importanti funzioni:

1. Consente di disporre di una pressione sempre costante
2. Determina una buona regolarità di flusso indipendentemente dal numero e dalla intermittenza delle singole utilizzazioni
3. Smorza le eventuali pulsazioni della portata generata dal compressore (specie se questo è alternativo).

L'aria, prelevata dall'atmosfera in luoghi generalmente lontani da fonti di inquinamento, è sottoposta ad una preliminare filtrazione, quindi è compressa fino alla prevista pressione di lavoro, ed immagazzinata nel serbatoio-polmone.

Di qui, una rete di tubazioni provvede alla sua distribuzione ai vari punti di utilizzazione: macchine pneumatiche, utensili, ecc....

3.1.2 Il concetto di pressione

Pressione atmosferica normale in funzione dell'altitudine

Altitudine (mt)	Pressione (mbar)
0	1.013
500	955
1.000	899
2.000	795
5.000	540
8.000	356

Quando si parla di pressione atmosferica e si forniscono i valori numerici concernenti la pressione, occorre precisare il sistema di riferimento adottato, tenendo presente che tutti i sistemi agisce la pressione atmosferica.

Pressione atmosferica

E' la pressione prodotta dal peso dell'atmosfera da cui è avvolta la terra. Questa dipende dalla densità dell'atmosfera e dall'altitudine del punto considerato, per cui non presenta un valore costante.

Pressione atmosferica normale

Per poter fornire valori di pressione esattamente definibili, malgrado le oscillazioni della pressione atmosferica, le norme internazionali hanno stabilito una pressione di riferimento:

la pressione atmosferica “normale” a livello del mare è di 1.013 bar = 1.013 hPa = 760 Torr

L'unità di pressione nel Sistema Internazionale è il **Pascal** (Pa), definito come la *pressione sviluppata dalla forza di 1 N che grava sulla superficie di 1 m²*.

Poiché si tratta di una unità troppo piccola per i normali usi, se ne impiega un multiplo chiamato **bar**:

$$10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ bar}$$

Sono però ancora in uso unità di misura del Sistema Tecnico. In particolare il chilopound (simbolo: kp), nome dato al chilogrammo-forza (Kgf) ed equivalente a:

$$9,80665 \text{ N}$$

L'**atmosfera fisica** (atm) è definita come la *pressione esistente a livello del mare ed equivale alla pressione esercitata da una colonna di mercurio alta 760 mm, a 0°C*. L'atmosfera fisica equivale quindi a 1,033 Kp/cm².

Per semplificare i calcoli è stata definita l'**atmosfera tecnica** (at):

$$1 \text{ at} = 1 \text{ Kp/cm}^2$$

La corrispondenza di queste unità con l'unità di misura del Sistema Internazionale si deduce con semplici passaggi:

$$1 \text{ atm} = 1,033 \frac{\text{Kp}}{\text{cm}^2} = 1,033 \times 9,8 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2} = 1,01 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \sim 1 \text{ bar}$$

$$1 \text{ at} = 1 \frac{\text{Kp}}{\text{cm}^2} = 9,8 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2} = 0,98 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \sim 0,98 \text{ bar}$$

$$1 \text{ bar} = 1 \text{ atm} = 1,02 \text{ Kp / cm}^2$$

Tabella di conversione tra valori della pressione espressi in diverse unità di misura

Pa (N/m ²)	Bar	Psi (lbf/sq. in)	Torr (mm Hg)
1	10 ⁻⁵	1,45 x 10 ⁻⁴	75 x 10 ⁻⁴
9,81 x 10 ⁴	0,981	14,22	736
1,013 x 10 ⁵	1,013	14,68	760
10 ⁵	1	14,5	750
133	1,33 x 10 ⁻³	1,92 x 10 ⁻²	1
9,81	9,81 x 10 ⁻⁵	1,42 x 10 ⁻³	7,36 x 10 ⁻²
69 x 10 ³	6,9 x 10 ⁻⁵²	1	51,72

3.1.3 Cambiamento di stato dei gas

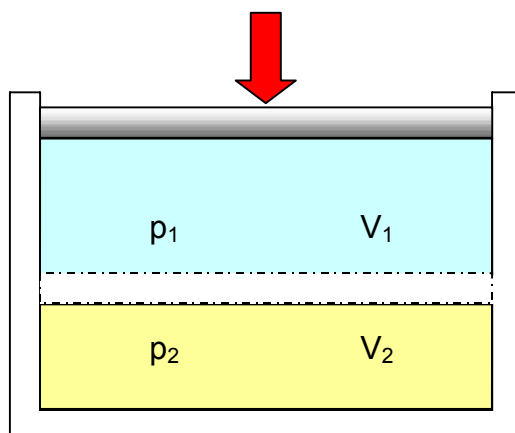
Lo stato di un gas viene determinato dalle tre grandezze *pressione, volume e temperatura*. I rapporti fra le tre grandezze per i gas ideali sono fissati dalle leggi di Gay-Lussac e Boyle-Mariotte

Pressione e Volume

Diminuendo il volume a temperatura costante la pressione aumenta (isoterma: $T = \text{cost.}$)

$$p \times V = \text{cost}$$

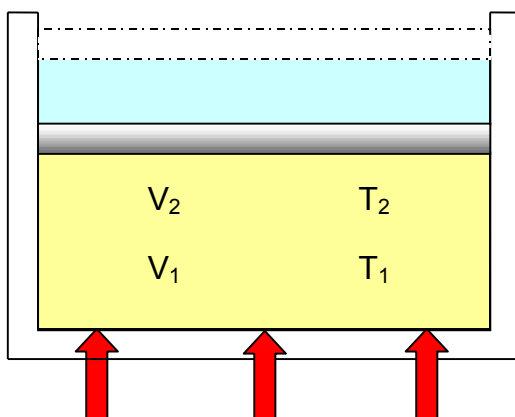
$$p_1 \times V_1 = p_2 \times V_2$$



Volume e Temperatura

A pressione costante il volume d'aria è direttamente proporzionale alla sua temperatura assoluta (isobara: $p = \text{cost.}$)

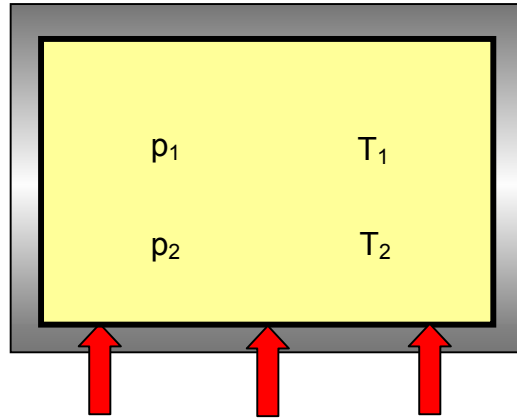
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$



Pressione e Temperatura

A volume costante la pressione dell'aria è direttamente proporzionale alla sua temperatura assoluta (isocora : $V = \text{cost.}$)

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

***Equazione generale di stato***

Raggruppando questi principi si giunge all'equazione generale di stato per i gas

$$\frac{p_1 \times V_1}{T_1} = \frac{p_2 \times V_2}{T_2} = \text{cost.}$$

Oppure, in altra forma:

$$p \times V = m \times R \times T$$

dove :

p : pressione

V : volume

m : massa

T : temperatura assoluta

R: costante dei gas (per l'aria $R=287$)

3.1.4 Aria compressa

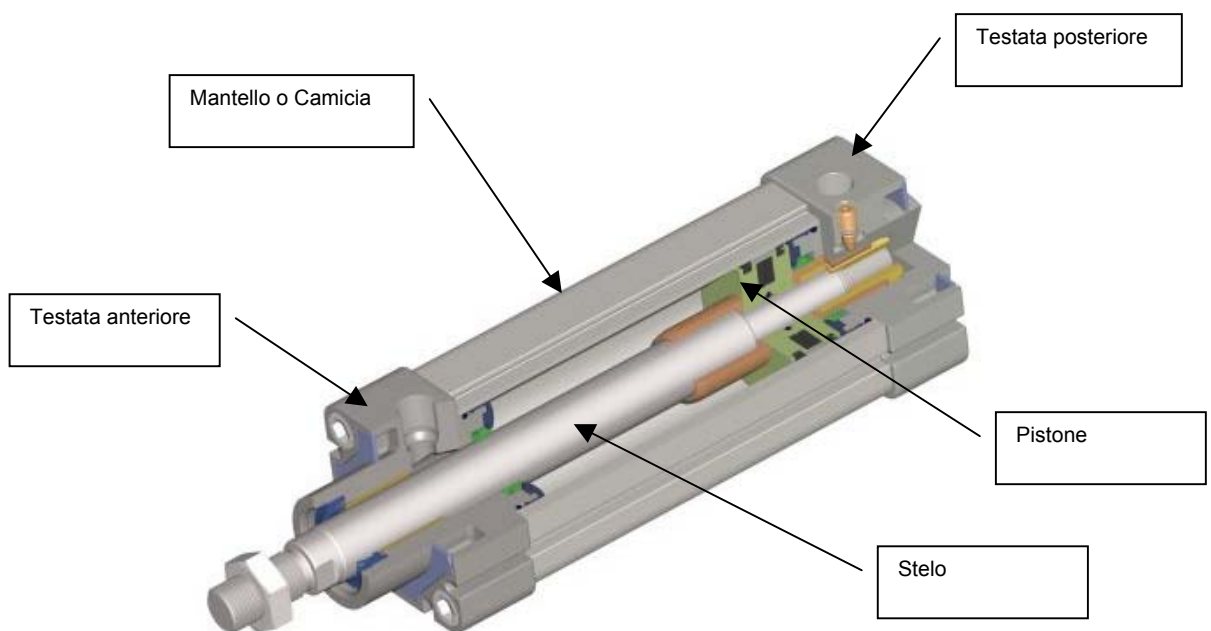
Per aria compressa s'intende aria atmosferica compressa che in questa condizione ha accumulato energia sotto forma di pressione e, quindi, è in grado di effettuare un lavoro. Durante la compressione si produce calore. Quando l'aria compressa si espande, subisce un raffreddamento

3.2 I cilindri pneumatici

I cilindri costituiscono il più semplice ed il più naturale tra gli attuatori pneumatici e sono classificati come organi di trasformazione dell'energia. Infatti, per poter raccogliere lavoro all'esterno, è necessario che qualche parte si muova sotto l'effetto della pressione e ciò avviene nella maniera più naturale facendo in modo che un lato di un tubo (**mantello** o **camicia** del cilindro) in cui si invia aria in pressione, sia libero di spostarsi. Il lato che si muove si chiama **pistone**.

La forza generata sul pistone dalla pressione viene poi di norma portata all'esterno mediante un puntone detto **stelo**.

Il mantello è racchiuso tra due **testate**, anteriore e posteriore; la prima con un foro centrale con guarnizione raschia polvere entro il quale scorre lo stelo.



Un cilindro trasforma dunque l'energia potenziale di pressione contenuta nel serbatoio in energia cinetica di movimento. Il lavoro utile prodotto è direttamente proporzionale alla pressione esercitata sull'area del pistone, ed al suo spostamento che è pari alla corsa.

Il mantello (o camicia) è generalmente costituito da un tubo di acciaio trafilato senza saldatura. Più raramente, il mantello è in alluminio, ottone o bronzo.

La lunghezza del mantello definisce la corsa massima del cilindro, mentre il suo diametro interno ne definisce l'**alesaggio**. Recentemente, il CETOP (Comitato Europeo Trasmissioni Oleodinamiche e Pneumatiche) ha emanato l'unificazione della serie dei diametri interni, o alesaggi standard dei cilindri o pneumatici:

8, 12, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 320, 400, 500 mm

Il corpo del pistone è costruito in lega leggera, in acciaio o in materie plastiche. Il corpo del pistone deve essere progettato in modo che le guarnizioni siano spinte dall'aria stessa a migliorare la tenuta tra la camera lato stelo e lato pistone del cilindro.

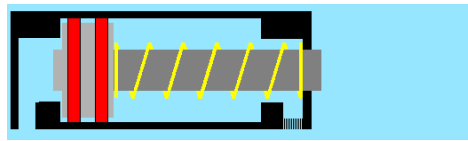
Il materiale dello stelo, o asta, è di preferenza acciaio legato. Lo stelo può essere semplice o passante, a seconda che debba uscire da una sola o da entrambe le testate.

Le testate possono essere realizzate per fusione di lega leggera e devono assicurare la tenuta meccanica e pneumatica col mantello, la guida e la lubrificazione dello stelo, l'entrata e l'uscita dell'aria dal cilindro. La testata anteriore, da cui esce lo stelo, ha incorporata una bronzina, che provvede alla lubrificazione dello stesso.

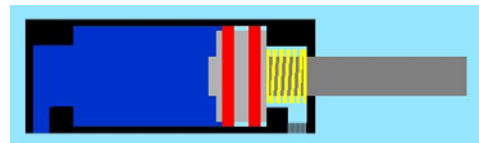
Si costruiscono cilindri a **semplice** e a **doppio effetto**.

3.2.1 Cilindri a semplice effetto

Nei cilindri a semplice effetto il moto del pistone in una direzione è affidato all'azione di una molla. Il pistone è spinto in un verso dall'aria compressa che entra attraverso il condotto di alimentazione, mentre nel senso opposto il moto di ritorno è affidato alla molla.

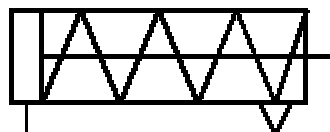


Cilindro a semplice effetto a riposo



Cilindro a semplice effetto in lavoro

La spinta dell'aria compressa agisce solo in un senso mentre il movimento in senso opposto avviene per effetto di una molla, oppure di forze esterne



Simbolo grafico DIN/ISO 1219 – Cilindro a semplice effetto (con ritorno a molla)

Il vantaggio principale dei cilindri a semplice effetto è nell'uso di valvole di comando più semplici di quelle necessarie ai cilindri a doppio effetto, in cui entrambe le corse si producono grazie all'aria compressa.

Gli svantaggi sono dati da una corsa limitata e dal fatto che anche limitata è la velocità di ritorno affidata alla molla.

Caratteristiche:

- Consumo d'aria in un solo senso
- Posizione definita anche senza energia
- Forza d'avanzamento ridotta (10% circa) a causa della molla
- Ingombro in lunghezza maggiore
- Lunghezza di corsa limitata
- Forza di ritorno modesta (circa il 10% della forza di spinta)
- La molla è un pezzo addizionale di usura

I cilindri a semplice effetto sono indicati quando le forze vengono richieste solo in un senso ed il movimento di ritorno può avvenire liberamente e senza carico resistente.

Sono indicati inoltre per impieghi in cui, per motivi di sicurezza, in caso di mancanza d'energia il cilindro deve assumere una posizione definita.



Cilindro pneumatici commerciali

Esempio di impiego: serraggio, azionamento di valvole, espulsori, ecc...

I cilindri a semplice effetto possono essere impiegati in spinta (cilindro spingente con posizione di riposo: asta tutta dentro) o in tiro (cilindro traente, con posizione di riposo: asta tutta fuori). Questi ultimi vengono usati per situazioni di emergenza derivanti da mancanza di alimentazione).

I valori di forza ottenibili con un cilindro a semplice effetto, di dato alesaggio D, si ottengono moltiplicando i valori di superficie per i valori di pressione su queste agenti.

La superficie utile di spinta è:

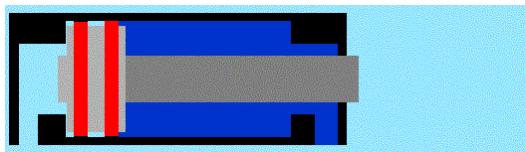
$$A_s = \frac{\pi D^2}{4}$$

perciò la Forza di spinta sviluppata risulta:

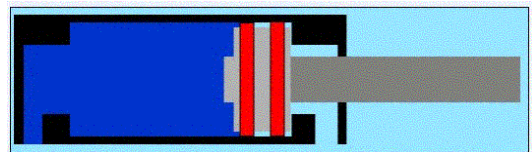
$$F_s = p A_s \quad (p \text{ è la pressione di lavoro relativa})$$

3.2.2 Cilindri a doppio effetto

Nei cilindri a doppio effetto la spinta dell'aria compressa può agire nei due sensi. Questi sono raccomandati per grossi diametri e corse lunghe. Se il cilindro deve spostare grandi masse, viene fornito di **ammortizzatori di fine corsa** per evitare gli urti del pistone contro le testate di fine corsa.

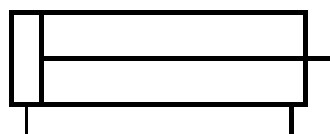


Cilindro a doppio effetto a riposo



Cilindro a doppio effetto in lavoro

La spinta dell'aria compressa agisce nei due sensi (spinta – tiro)



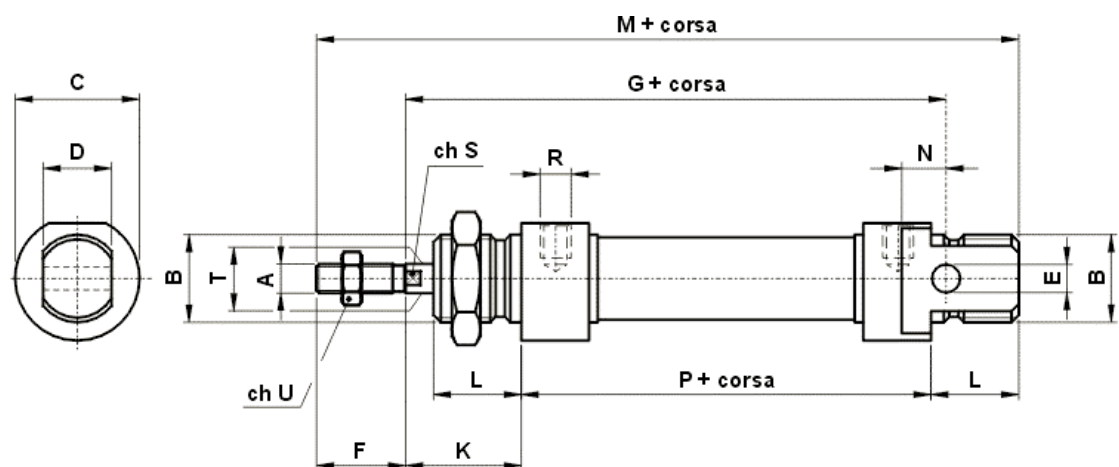
Simbolo grafico DIN/ISO 1219 – Cilindro a doppio effetto

Caratteristiche:

- Forze di avanzamento disponibili nei due sensi
- La forza di ritorno è inferiore alla forza di avanzamento di una quantità pari al prodotto della pressione per la sezione dello stelo
- Non sono ammessi carichi laterali sullo stelo
- Il diametro dello stelo deve avere dimensione ridotta per consentire una forza di ritorno sufficientemente grande
- Struttura semplice
- Caratteristiche favorevoli

I cilindri a doppio effetto si impiegano quando sono richiesti movimenti lineari con sviluppo di forze in entrambi i sensi.

Esempi di impiego: serraggio, alimentazione, selezionamento, assemblaggio, formatura, pressatura, punzonatura, piegatura, inclinazione.



Disegno meccanico di un cilindro pneumatico

Nel caso di cilindri a doppio effetto, di dato alesaggio D e di diametro stelo d, la Forza di spinta si calcola allo stesso modo di un cilindro a semplice effetto:

La superficie utile di spinta è:

$$A_s = \frac{\pi D^2}{4}$$

perciò la Forza di spinta sviluppata risulta:

$$F_s = p A_s \quad (p \text{ è la pressione di lavoro relativa})$$

Mentre, la Forza di tiro agirà chiaramente sulla superficie utile di tiro, e cioè:

$$A_t = \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4}$$

perciò la Forza di tiro sviluppata risulta:

$$F_t = p A_t \quad (p \text{ è la pressione di lavoro relativa})$$

Da queste relazioni si vede come la forza teorica di spinta sia sempre maggiore della spinta teorica di tiro, per la presenza dello stelo che riduce la sezione utile nel tiro.

In realtà è necessario tenere conto delle resistenze di attrito che si oppongono allo scorrimento del pistone e dello stelo. Poiché la forza si misura staticamente, la resistenza di attrito è quella statica, corrispondente alla partenza; durante il movimento la resistenza di attrito è minore.

Si usa tenere conto delle circostanze dette attraverso un rendimento il cui valore può assumersi nel campo 80 - 85 %.

Per il calcolo del volume d'aria in pressione basta moltiplicare la corsa utile del cilindro per l'area utile di spinta e, nel caso di un cilindro a doppio effetto, sommare a questa il prodotto della corsa utile per l'area utile di tiro.

$$V_s = A_s * h \quad [cm^3]$$

$$V_t = A_t * h \quad [cm^3]$$

$$V = V_s + V_t$$

Esercizi sui cilindri

1. Un cilindro a doppio effetto ha un diametro di 80 mm ed un diametro dello stelo di 25 mm. La pressione di esercizio è di 6 bar (60 N/cm²). Quali sono le forze teoriche sviluppate nelle corse avanti e indietro?

Soluzione

La superficie utile di spinta è:

$$A_s = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,14 \times 8^2}{4} = 50,3 \text{ cm}^2$$

perciò la Forza di spinta sviluppata risulta:

$$F_s = p A_s = 60 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2} \times 50,3 \text{ cm}^2 = 3.018 \text{ N}$$

La superficie utile di tiro è:

$$A_t = \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4} = \frac{3,14 (8^2 - 2,5^2)}{4} = 45,4$$

perciò la Forza di tiro sviluppata risulta:

$$F_t = p A_t = 60 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2} \times 45,4 \text{ cm}^2 = 2.724 \text{ N}$$

Per procedere alla scelta del cilindro da adottare in ogni singola applicazione è necessario innanzi tutto definirne le caratteristiche generali, in base alle necessità delle apparecchiature servite ed alle condizioni dell'ambiente in cui deve operare. In questa prima fase si deve pertanto stabilire:

- Se adottare un cilindro a semplice o a doppio effetto
- Se i materiali di costruzione possono essere quelli di normale impiego o debbano avere caratteristiche particolari
- Il tipo di fissaggio
- Se debba o meno avere l'ammortizzatore di fine corsa in funzione delle masse da movimentare.

Stabilito il tipo si può passare al dimensionamento. Questo si attua in due fasi:

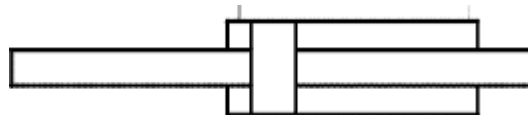
1. Dimensionamento dell'alesaggio in funzione dello sforzo di lavoro richiesto
2. Definizione della corsa massima consentita per non incorrere in fenomeni di instabilità al carico di punta.

3.2.3 Altre tipologie di cilindro

Oltre al classico schema di cilindro con asta che fuoriesce dalla testata anteriore, nei robot e nei manipolatori vengono usate numerose varianti e cilindri di tipo particolare per soddisfare le molteplici esigenze.

Tra i vari tipi ricordiamo: cilindri a stelo passante, cilindri a più posizioni, cilindri rotativi, cilindri senza stelo, cilindri a membrana.

Cilindri a stelo passante. Sono forniti di stelo sporgente da entrambe le testate; hanno pertanto una uguale forza di spinta in entrambi i versi di movimento.



Simbolo grafico DIN/ISO 1219 – Cilindro a doppio stelo (stelo passante)

Con questo cilindro si ha la possibilità di eseguire lavoro su entrambi i lati. Grazie all'esistenza di supporti alle due estremità, questo cilindro dispone di una guida migliore

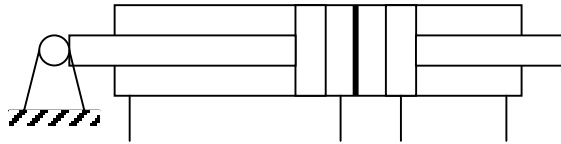
Caratteristiche:

- Possibilità di lavorare su entrambi i lati
- Distanza costante tra i due supporti
- Possibilità di assorbire piccoli carichi laterali
- Le superfici attive del pistone sono uguali su entrambi i lati, per cui sono uguali anche le forze sviluppate nei due sensi.

Questi cilindri sono usati quando occorre una guida migliore di quanto diano i normali cilindri, e cioè con presenza di carichi radiali sull'asta. La seconda asta inoltre può essere usata per comandare sensori e fine corsa senza intralciare l'asta usata per l'azionamento dei meccanismi del robot.

Cilindri a più posizioni. Servono per fermare l'asta del cilindro in più posizioni intermedie e non solo nelle due posizioni estreme come avviene nei cilindri normali. Nel caso di un cilindro a quattro posizioni due cilindri a doppio effetto sono affiancati con gli steli posti da parti

opposte. Lo schema può essere esteso a più cilindri ed il numero delle posizioni ottenibili da questo sistema è $2n$, dove n è il numero dei cilindri accoppiati. Dispositivi di questo genere si basano sull'uso di arresti meccanici che agiscono sul moto dei pistoni (azionamento di scambi, azionamento di valvole, modifica di fermi, ecc...). Le precisioni ottenibili sono dell'ordine di 0.05 mm.



Simbolo grafico DIN/ISO 1219 – Cilindro a più posizioni

Cilindri a membrana. Sono costituiti da una membrana che si deforma sotto l'azione dell'aria compressa espandendosi e spostando l'organo di forza. Questo elemento viene utilizzato per il serraggio rapido di pinze e ganasce per l'afferraggio ed il bloccaggio di pezzi durante la movimentazione, il montaggio e la generica manipolazione. Si comporta come un cilindro di serraggio a semplice effetto poiché, in assenza di pressione, la membrana riacquista la sua configurazione iniziale. La presenza della membrana, consente un'ampia superficie di contatto e la possibilità di adattarsi anche a pezzi le cui superfici non siano esattamente parallele alla faccia dell'attuatore.



Cilindro a membrana



Simbolo grafico DIN/ISO 1219 – Cilindro a membrana

Caratteristiche:

- Struttura semplice
- Dimensioni contenute e forze molto elevate (fino a 25.000 N)
- Corse molto limitate
- Installazione semplice
- Prezzo conveniente

Cilindri senza asta. Sono attuatori di tipo lineare, costituiti da un cilindro in cui lo stantuffo è direttamente utilizzato per compiere il lavoro meccanico senza bisogno dell'interposizione dell'asta. Questi cilindri vengono impiegati quando esistono problemi di carico di punta sullo stelo a causa dell'elevata lunghezza della corsa

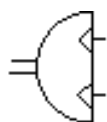
Vantaggio fondamentale è un ingombro ridotto, dato che è l'intera canna del cilindro che è utilizzata direttamente per ricavare la funzione di forza.

Settori d'impiego principali: per grandi corse e dove sono richieste quote di montaggio contenute. Es: inserimento, spostamento, apertura, chiusura, sollevamento, azionamento di porte, trasporto, alimentazione di pezzi da lavorare.



Cilindro senza stelo

Cilindri per motori rotativi. Sono forniti di un albero di uscita in grado di compiere rotazioni alternative. Vengono generalmente adoperati quando occorre avere angoli di rotazione superiori a 120° , o quando si vuole avere un ingombro ridotto ed una costruzione compatta.



Simbolo grafico DIN/ISO 1219 – Cilindro rotativo



Cilindro rotativo

3.3 Motori pneumatici

I motori pneumatici trasformano energia di pressione in lavoro meccanico con movimento rotativo.

I parametri caratteristici del movimento rotatorio sono:

- Coppia M (N x m)
- Numero di giri n (min^{-1})
- Velocità angolare W (s^{-1})
- Potenza (Watt)

I motori pneumatici possiedono caratteristiche tecniche che si ritrovano anche in altri componenti pneumatici e, che in molti casi, ne consentono un impiego economico e tecnicamente ottimale.

- Possibilità di sovraccarico fino all'arresto
- Tempo di inserzione illimitato
- Protezione antideflagrante totale
- Nessun autoriscaldamento
- Insensibilità ad influenze ambientali come polvere, acqua, umidità
- Manutenzione semplice
- Facilità ed immediatezza di inversione del senso di rotazione
- Possibilità di alimentazione anche con fluidi diversi dall'aria

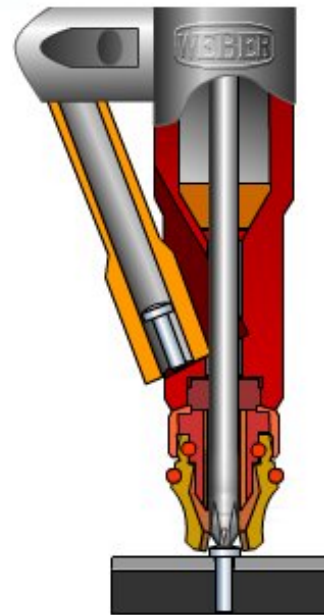
Le macchine volumetriche sono in linea di principio reversibili: un compressore può funzionare come motore, convertendo energia di pressione in energia meccanica di rotazione, funzionando perciò come un attuatore pneumatico.

La rotazione del motore può essere oraria o antioraria, invertibile con facilità, invertendo il senso del flusso.

La tipologia è dunque la medesima dei compressori. Rispetto a questi, i motori pneumatici presentano ovviamente differenze costruttive più o meno accentuate.

Il comportamento medio dei diversi tipi di motore pneumatico risulta dalle curve di coppia, rendimento e consumo d'aria in funzione della velocità percentuale rispetto a quella caratteristica a vuoto.

In tutti i tipi è evidente la netta dipendenza della velocità di rotazione dal valore della coppia resistente. Si presenta dunque la circostanza tipica anche dei cilindri: il carico applicato (qui sotto forma di coppia) influenza notevolmente la velocità di lavoro anche in questo attuatore pneumatico.



Avvitatore pneumatico

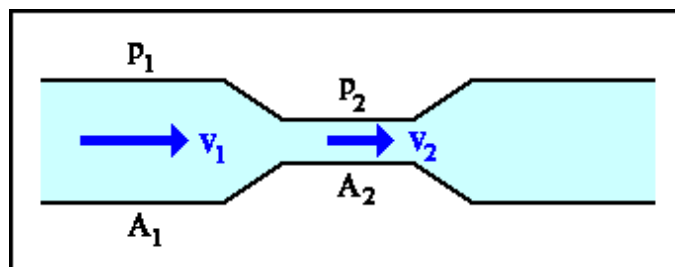
Una applicazione tipica dei motori pneumatici a palette e quella degli avvitatori pneumatici, in cui si ha l'arresto dell'utensile al superamento del valore della coppia di serraggio che coincide col massimo della caratteristica meccanica.

In genere si tratta di attuatori molto rumorosi: la rumorosità deriva sia dal moto dell'aria entro i condotti e nei diversi componenti, sia soprattutto dallo scarico finale, per il quale i vari sistemi silenziatori sono purtroppo un palliativo molto blando.

A differenza dei motori elettrici, hanno però il grande pregio di non risentire dei sovraccarichi: possono essere caricati fino all'arresto sotto carico senza pericolo.

3.4 Generatore di vuoto

I generatori di vuoto sono basati sull'effetto Venturi: l'aria in pressione, passando attraverso una strozzatura, crea una depressione che genera il vuoto entro un condotto che fa capo alla strozzatura. Se ai capi di questo condotto si pone una ventosa, al suo interno può essere creato il vuoto. La pressione esterna atmosferica spingerà la ventosa contro la superficie di un pezzo che potrà essere in tal modo afferrato e spostato.



Le ventose sono accessori per il vuoto indispensabili là dove si presenti un problema di sollevamento o di manipolazione di oggetti, lastre o altri corpi "difficili da prendere" con gli altri metodi tradizionali di serraggio, perché privi di appigli, perché fragili, o perché estremamente deformabili.

Una corretta applicazione delle ventose assicura semplicità, economia, sicurezza; presupposti questi, fondamentali per la perfetta realizzazione di ogni automatismo.

Si trovano normalmente disponibili con diverse mescole, più o meno resistenti ad oli, grassi, idrocarburi e gas, e più o meno flessibili. La rettifica del labbro permette di ottenere la perfetta tenuta anche al minimo appoggio.

Il generatore di vuoto è sempre accoppiato ad un **vacuostato**, un sensore pneumatico che, al superamento di una certa soglia regolabile di depressione, fornisce un segnale che avrà il significato di presa effettuata.

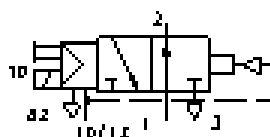
3.5 Comandi per attuatori pneumatici

Come si è già visto precedentemente, l'energia di pressione generata dalla centrale di compressione viene trasformata in vario modo dagli attuatori pneumatici: in energia cinetica di movimento, in energia d'urto, forza di serraggio, ecc....

Tra i gruppi funzionali ve n'è un altro, con funzione di distribuzione dell'aria compressa nelle direzioni volute, secondo opportune azioni di comando.

Tutte le apparecchiature in grado di aprire / chiudere o deviare un flusso d'aria compressa sono generalmente definite **valvole controllo direzione** (comandano start, stop e senso di flusso dell'aria compressa).

La funzione di una valvola direzionale è riconoscibile attraverso il simbolo grafico conforme alla norma ISO 1219.



Una valvola direzionale di questo genere permette di:

- collegare l'aria compressa con la camera lato pistone
- mettere a scarico la camera suddetta con la contemporanea intercettazione della condotta di alimentazione

Una valvola come sopra descritta viene chiamata "valvola direzionale 3/2" perché possiede 3 attacchi (e precisamente per il collegamento al cilindro, alla linea di pressione e allo scarico) e 2 posizioni di commutazione (una per l'uscita ed una per il rientro del cilindro)

Ogni posizione di commutazione è rappresentata da un quadrato, per cui il numero delle posizioni di commutazione è uguale al numero di quadrati.

Il numero di attacchi della valvola è uguale al numero di intersezioni tra lo schema interno ad uno qualsiasi dei quadrati ed il bordo del quadrato stesso.



Elettrovalvola direzionale monostabile

Il comando degli attuatori pneumatici avviene con valvole che possono avere azionamento pneumatico od elettrico. Nei robot e manipolatori, in cui viene di massima utilizzato un controllo elettronico, il controllo dei cilindri avviene tramite elettrovalvole.

Attualmente è possibile disporre di microelettrovalvole in grado di azionare anche cilindri di grosse dimensioni, tramite un comando in più stadi di amplificazione del segnale pneumatico.

Queste microvalvole richiedono una potenza di azionamento molto ridotta e sono direttamente compatibili con microprocessori e computer. Risulta così semplificato il problema dell'interfacciamento tra organi di controllo e attuatori.

Questa ampia categoria di componenti può essere suddivisa in un primo gruppo di valvole che operano su due o più rami del circuito, ed in un secondo gruppo di valvole che agiscono su un solo ramo di circuito.

Al primo gruppo appartengono:

- le valvole di distribuzione vera e propria, o distributori
- le valvole seletttrici

Al secondo gruppo appartengono:

- le valvole di non ritorno (unidirezionali)
- le valvole di intercettazione (o valvole di distribuzione a due sole vie)

3.6 Distributori

Tutte le valvole controllo direzione lavorano impedendo, o favorendo, il passaggio dell'aria compressa attraverso condotti ricavati nel corpo della valvola stessa.

Le caratteristiche fondamentali che ne definiscono la funzionalità (e perciò l'impiego), sono due:

- il numero delle vie , o bocche, che possono essere poste in connessione;
- il numero delle variazioni che, con adatte azioni di comando, possono essere effettuate nei collegamenti, o numero di posizioni di lavoro.

I due numeri separati da una barra costituiscono perciò la sigla identificativa di un distributore. Ad esempio, la sigla 3/2 indica una valvola con tre bocche e due posizioni di lavoro.

I distributori a due posizioni sono i più diffusi. Quelli a tre posizioni, molto utilizzati in oleodinamica, sono invece poco utilizzati in pneumatica.

Delle bocche, una è sempre quella di alimentazione (o di collegamento ad una presa di pressione), una o più sono di utilizzazione (uscite che possono essere poste in pressione), una o più sono di scarico dell'aria compressa da linee di uscita precedentemente poste in pressione.

La chiusura o l'apertura delle luci interne di passaggio è dovuta ad un organo genericamente chiamato cursore , il quale assume la forma di un otturatore scorrevole agente su una sede di forma opportuna con l'interposizione di una guarnizione elastica, che assicura una eccellente tenuta e permette un corretto funzionamento senza attrito anche in assenza di lubrificazione.

Le valvole ad otturatore hanno come caratteristiche specifiche l'alta velocità di commutazione e una grande sezione di passaggio che le rende particolarmente adatte negli impianti di alta potenza.

3.7 Elettropneumatica

Se la parte di potenza di un automatismo è di tipo pneumatico, mentre la parte di comando è di tipo elettrico, l'insieme prende il nome di circuito elettro-pneumatico.

Gli elementi posizionatori e quelli sensoriali contengono degli elementi di interfaccia:

- nelle elettrovalvole, o distributori principali a comando elettrico, si ha la "traduzione" di un segnale elettrico in segnale pneumatico di comando al circuito;
- nei fincorsa elettrici si ha la traduzione di una informazione di posizione raggiunta in segnale elettrico.

Nella moderna Automazione Industriale i circuiti elettrici comandano attuatori di diverse tecnologie (idraulica, elettrica, elettronica) ed inoltre una serie di apparecchiature quali ad esempio lampade di segnalazione, generatori acustici di allarme, ecc.

Le elettrovalvole sono valvole funzionalmente analoghe a quelle tradizionali, con la differenza che qui l'azionamento è provocato dalla corrente di eccitazione di un avvolgimento elettrico (bobina) il cui campo magnetico attrae l'organo mobile di commutazione della valvola stessa.

Analogamente alle valvole a comando pneumatico, anche quelle a comando elettrico possono essere ad azionamento diretto o pilotato. Le prime vengono generalmente costruite solo per piccoli diametri di passaggio (minori di 4 mm) e nelle versioni a 2 o 3 vie. In tutti gli altri casi viene preferito il servopilotaggio a causa delle grandi dimensioni che assumerebbe la bobina per poter essere in grado di attrarre il pistoncino di commutazione delle vie.

In generale, l'uso di elettrovalvole (cioè della soluzione elettropneumatica) è consigliabile dove siano da prevedere lunghe distanze fra il punto di comando e la valvola comandata, o dove siano necessari tempi di risposta molto brevi.

Le elettrovalvole ad impulsi si distinguono dalle altre a causa della presenza di due bobine sul corpo della stessa valvola. Il grande vantaggio che presenta questo tipo rispetto al precedente è il minor tempo di eccitazione cui sono sottoposte le bobine: ne consegue un aumento della durata che spesso compensa largamente il maggior costo che questa esecuzione comporta.

La costruzione delle bobine delle elettrovalvole deve essere tale da soddisfare i seguenti requisiti:

- forza di attrazione elevata con piccoli ingombri;
- insensibilità alle vibrazioni
- funzionamento silenzioso
- grande frequenza di manovra
- posizione di montaggio indifferente

L'isolamento delle bobine deve essere inoltre in grado di assicurare un perfetto funzionamento per temperature ambiente variabili da -40 fino a +80 °C, ed in presenza di elevata umidità atmosferica e vapore.

Per ottemperare a questa esigenza, l'isolamento viene generalmente effettuato annegando le bobine in un bagno di resine di tipo epossidico.

Le caratteristiche elettriche dipendono dalla tensione alla quale si vuole alimentare la bobina e dal tipo di corrente usata (alternata o continua).

La temperatura massima raggiungibile dalla bobina deve essere tale che la bobina stessa e l'ambiente si crei un salto di temperatura tale da stabilire l'equilibrio termico fra quantità di calore prodotto dall'eccitazione magnetica e quello disperso attraverso la superficie della bobina stessa.

3.8 Il Relè

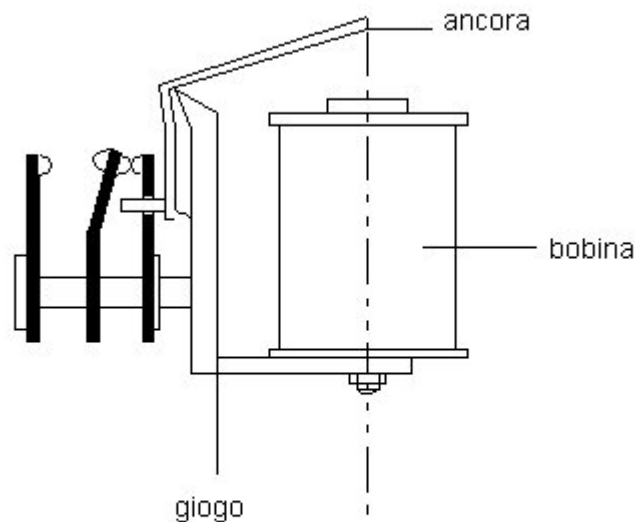
Il **relè** è un apparecchio che contribuisce in larga misura a risolvere i problemi circuitali elettrici. E' costituito da un elettromagnete (nucleo + bobina), da una armatura mobile posta ad una estremità del nucleo e mantenuta distante dallo stesso mediante l'azione di molle.

Il relè è inoltre costituito da un certo numero di contatti, che possono essere:

- normalmente chiusi, NC (o "in apertura" all'eccitazione della bobina)
- normalmente aperti, NA (o "in chiusura")
- di scambio: un contatto apre un circuito e ne chiude un altro; di solito la bobina comanda uno o più contatti di scambio.

Chiudendo il circuito della bobina (circuito secondario o di comando), l'ancora viene attratta e, con il suo movimento a bilanciere, agisce meccanicamente sui contatti, aprendoli se sono NC, chiudendoli se sono NA; a tali contatti è collegato il circuito principale.

I due circuiti possono essere alimentati in corrente continua o alternata, a seconda delle esigenze, e l'ampereaggio nei due può anche essere notevolmente diverso. Tale è ad esempio il caso in cui un certo pulsante di comando sia dimensionato per un amperaggio molto diverso da quello necessario per pilotare la bobina di una elettrovalvola (circuito principale).



Schema di principio del relè elettromeccanico monostabile

Gli elettromagneti con bassissimo assorbimento di corrente sono impiegati principalmente nei circuiti finali degli apparati elettronici (una logica elettronica genera infatti correnti dell'ordine del milli-Ampere o di qualche micro-Ampere).

Il relè considerato in figura è di tipo **monostabile**, mentre esistono **ad impulsi** (detti anche "passo-passo"). In questo caso, ogni volta che arriva un impulso di corrente alla bobina,

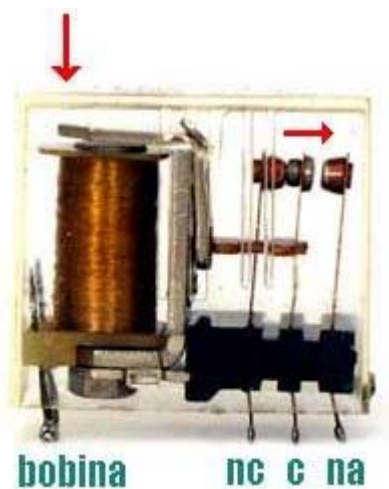
l'ancora viene attratta, e provoca la rotazione di una camma: al primo impulso i contatti vengono chiusi, al secondo impulso vengono aperti; e così via.

Vi sono molte circostanze nelle quali un segnale di comando, dato impulsivamente, deve provocare effetti duraturi: occorre perciò un circuito che "ricordi" tale comando, perpetuandone l'effetto anche oltre la sua cessazione.

Nel caso dei relè monostabili è necessario un circuito di automantenimento, o di **autoritenuta**.

Questo si costruisce con estrema facilità collegando in modo opportuno il contatto che deve provocare l'azione stabile.

Cos'è e come funziona un relè



Un relè è sostanzialmente un interruttore, cioè un dispositivo in grado di aprire e chiudere un circuito. A differenza dell'interruttore però, il relè non viene azionato a mano, ma da un elettromagnete, costituito da una bobina di filo avvolto intorno ad un nucleo di materiale magnetico.

Quando passa corrente nella bobina di filo, si crea un campo magnetico che attira l'ancoretta secondo la freccia rossa verticale; l'ancoretta ruota e spinge il contatto centrale C verso destra, secondo la freccia orizzontale. In questo modo, il collegamento tra il contatto centrale e quello di sinistra (NC) si apre, mentre si chiude il collegamento tra il contatto centrale e quello di destra (NA). Il contatto di sinistra viene definito NC, cioè normalmente chiuso, perché è tale quando il relè è a riposo. Allo stesso modo l'altro contatto, aperto quando il relè non è eccitato, viene definito NA, cioè normalmente aperto.

3.9 Sistemi di controllo digitali

Per gli automatismi più veloci e complessi, in cui ci sia bisogno cioè di elaborare le informazioni con specifiche stringenti in termini di affidabilità, compattezza, consumo e costo, si impone necessaria la realizzazione del sistema di comando con tecnologia elettronica.

Si devono inizialmente stabilire quali sono i segnali provenienti dal processo (variabili di ingresso, dai sensori) e le azioni che sul processo devono essere comandate (variabili di uscita, verso gli attuatori).

Se possibile, le equazioni logiche che risultano dall'analisi del processo devono essere minimizzate.

Vi sono diversi modi principali di operare: combinando singole porte logiche e Flip-Flop dedotti da circuiti integrati a piccola e media scala di integrazione (SSI e MSI); programmando una ROM, se il problema è combinatorio; utilizzando microprocessori.

Questi metodi, pur sempre validi, non trovano oggi grossi utilizzi perché sono stati superati dall'impiego nelle applicazioni di Automazione Industriale dei **PLC**.

3.9.1 Circuiti combinatori e numerici

Il progetto e la successiva costruzione di un sistema digitale, può prendere l'avvio in due diversi modi corrispondenti a due diverse filosofie.

Un primo modo consiste nel porre l'accento principalmente sui problemi quali l'assegnazione degli stati e la costruzione delle tabelle della verità, la minimizzazione, la manipolazione di porte logiche, ecc..., che in definitiva, privilegia un approccio di tipo hardware.

Un secondo metodo consiste, invece, nell'affrontare i problemi cercando di scoprire una soluzione sistematica per la realizzazione del progetto ed il suo controllo. In pratica, rimanendo inizialmente il più possibile dai problemi di hardware, ci si accosta al progetto visto nella sua totalità (top), per scendere via via ad una selezione dei problemi di tipo assemblativo (down).

Questo metodo, conosciuto come top-down, viene utilizzato soprattutto nella realizzazione di sistemi digitali complessi quali microprocessori, microcomputer, ecc., le cui problematiche esulano dagli intenti di questo corso.

In questo capitolo sono esposte le cognizioni di base necessarie per progettare e realizzare un circuito combinatorio di media complessità.

Resta in ogni caso valido il principio che non sempre la soluzione si ottiene dalla rigida applicazione di un metodo piuttosto che un altro. In qualche caso è l'esperienza e l'inventiva del progettista che può far superare ostacoli altrimenti insormontabili.

Tutti i circuiti digitali che saranno trattati nel seguito si suddividono in due grandi tipi:

1. **Circuiti combinatori**
2. **Circuiti sequenziali**

Per circuiti di tipo **combinatorio** si intendono quei blocchi funzionali in cui, data una o più variabili di ingresso I, le uscite Y sono funzione solo dello stato attuale degli ingressi. Sono, in altre parole, quei circuiti che non hanno nessuna capacità di memorizzare quanto è accaduto precedentemente.

Viceversa, si chiamano **sequenziali** quei circuiti la cui condizione dipende anche dagli stati precedenti delle uscite.

Alcune delle più comuni operazioni eseguite dai circuiti combinatori sono le seguenti:

- a) Conversione di dati da una rappresentazione ad un'altra
- b) Comparazione di dati
- c) Trasferimento d'informazioni a varie destinazioni
- d) Selezione di dati fra diverse sorgenti
- e) Esecuzione di operazioni aritmetiche e logiche

Quando si vuole progettare un circuito digitale per il controllo di un processo industriale o per il trattamento delle informazioni sotto forma numerica, si può cercare d'impostare il problema definendo, nel modo più generale possibile, alcune fasi di lavoro successive. Esse possono essere così definite:

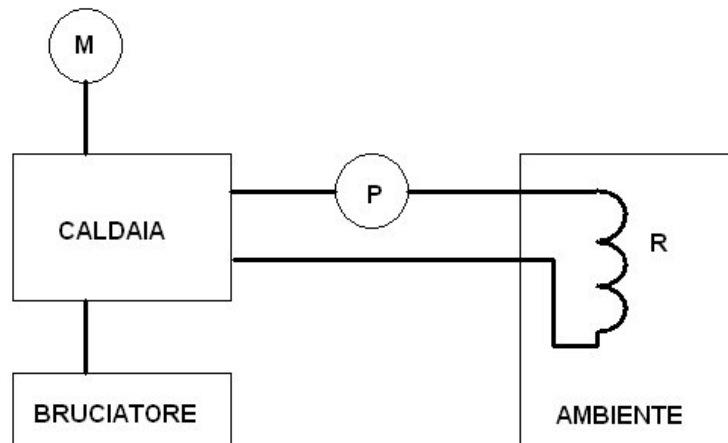
- 1 Individuazione delle variabili presenti nel sistema
- 2 Stesura della tabella della verità del sistema completo
- 3 Traduzione della tabella della verità in funzioni Booleane
- 4 Semplificazione delle funzioni
- 5 Realizzazione di uno schema a blocchi funzionale
- 6 Ulteriore semplificazione e minimizzazione

Lo studio delle singole fasi sarà effettuato tramite la loro applicazione ad un esempio che, pur nella sua limitazione, permette di chiarire in modo più diretto le problematiche incontrate.

1 - Individuazione delle variabili

Come esempio di processo da controllare si può prendere un sistema composto da una caldaia che debba riscaldare acqua per mantenere un ambiente ad una temperatura costante. In figura è mostrato lo schema di principio del processo.

Per un corretto funzionamento dell'impianto è necessario fornirgli delle informazioni, tenendo presente che le variabili scelte e la loro assunzione ad uno stato logico piuttosto che un altro è del tutto arbitraria, ma il metodo è comunque valido per qualsiasi altro tipo di assunzione.

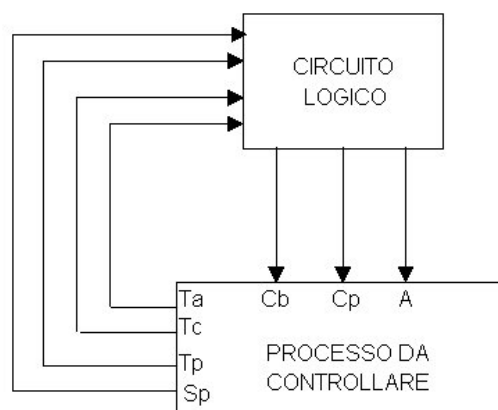


Riscaldamento di un ambiente: M = manometro, P = pompa, R = radiatore

Tali informazioni potrebbero essere le seguenti:

- la temperatura dell'ambiente che si vuole riscaldare (T_a), che può oppure no superare una soglia prefissata;
- la temperatura dell'acqua contenuta nella caldaia (T_c) che non deve superare una determinata soglia, ad esempio 60°C ;
- la temperatura dell'acqua oltre la quale la pompa di circolazione deve entrare in funzione, ad esempio 30°C ;
- infine un manometro di sicurezza che deve impedire alla pressione, in caso di guasto, di superare una data soglia di sicurezza.

Dall'elaborazione di queste informazioni fornite dal processo al circuito digitale, devono essere generati dei segnali di uscita per il comando, tramite opportuni circuiti di interfaccia, dell'accensione del bruciatore (C_b), della pompa (C_p); ed infine un segnale di allarme (A) che spenga tutto l'impianto ed accenda una spia. L'intero sistema, costituito dal processo da controllare e dal circuito di controllo, si presenta secondo lo schema a blocchi di figura:



Schema a blocchi del controllo di processo

Varabile	Stato del segnale	Livello logico associato
Ta	ambiente al di sotto della temperatura	0
	ambiente al di sopra della temperatura	1
Tc	acqua al di sotto di 60°C	0
	acqua al di sopra di 60°C	1
Tp	acqua al di sopra di 30°C	1
	acqua al di sotto di 30°C	0
Sp	pressione al di sopra della soglia	1
	pressione al di sotto della soglia	0
Cb	il bruciatore deve essere spento	0
	il bruciatore deve essere acceso	1
Cp	la pompa deve essere spenta	0
	la pompa deve essere in funzione	1
A	allarme non in funzione	0
	allarme in funzione	1

2 - Stesura della tabella della verità

Nella stesura della tabella della verità se il numero delle variabili di ingresso è limitato (come nel caso in studio, in cui sono quattro), si possono rappresentare tutte le loro possibili combinazioni anche se alcune di esse sono indifferenti o impossibili a verificarsi.

Nel caso, invece, in cui il numero di esse sia elevato ed il numero delle situazioni impossibili od indifferenti non sia più trascurabile, risulta più agevole stendere una tabella della verità contenente solo la rappresentazione degli stati possibili, semplificando, così, notevolmente il successivo lavoro di minimizzazione.

Nel tipo di processo in esame si è supposto il seguente funzionamento: inizialmente l'ambiente che si vuol riscaldare è freddo, l'acqua nella caldaia è fredda e la pompa che la spinge in circolazione è ferma.

Dopo l'accensione del bruciatore, la pompa entra in funzione non appena l'acqua supera i 30°C di temperatura e si spegne solo in caso di allarme o se la temperatura scende nuovamente sotto i 30°C.

Il bruciatore si accende fintanto che l'ambiente è freddo e l'acqua nella caldaia è al di sotto di 60°C. Si spegne, invece, quando l'ambiente ha raggiunto la temperatura voluta o quando l'acqua sale al di sopra di 60°C. Nel caso di allarme, che si ha se la pressione supera un determinato valore, il manometro emette un segnale (Sp), che deve spegnere tutto l'impianto ed accendere una lampada spia.

Tutto ciò può essere sintetizzato dalla seguente tabella della verità:

Variabili in ingresso				Variabili in uscita			Note
Ta	Tc	Tp	Sp	Cb	Cp	A	
0	0	0	0	1	0	0	inizio funzionamento
0	0	0	1	0	0	1	processo in Allarme
0	0	1	0	1	1	0	Temp. acqua > 30°C
0	0	1	1	0	0	1	processo in Allarme
0	1	0	0	0	0	0	Temp. acqua > 60°C (imposs.)
0	1	0	1	0	0	1	processo in Allarme
0	1	1	0	0	1	0	è accesa solo la pompa
0	1	1	1	0	0	1	processo in Allarme
1	0	0	0	0	0	0	ambiente in temperatura
1	0	0	1	0	0	1	processo in Allarme
1	0	1	0	0	1	0	ambiente caldo e pompa attiva
1	0	1	1	0	0	1	processo in Allarme
1	1	0	0	0	0	0	ambiente caldo, non scaldare
1	1	0	1	0	0	1	processo in Allarme
1	1	1	0	0	1	0	ambiente caldo e pompa attiva
1	1	1	1	0	0	1	processo in Allarme

3 - Traduzione della tabella in funzioni Booleane

Osservando la tabella della verità è evidente che, poiché il numero di 1 nelle variabili di uscita è minore del numero di 0, risulta più agevole scrivere le rispettive funzioni come somma di prodotti ottenendo:

$$Cb = \bar{T}a \bar{T}c \bar{T}p \bar{S}p + \bar{T}a \bar{T}c Tp \bar{S}p$$

$$Cp = \bar{T}a \bar{T}c Tp \bar{S}p + \bar{T}a Tc Tp \bar{S}p + T\bar{a} \bar{T}c Tp \bar{S}p + T\bar{a} Tc Tp \bar{S}p$$

$$A = \bar{T}a \bar{T}c \bar{T}p Sp + \bar{T}a \bar{T}c Tp Sp + \bar{T}a Tc \bar{T}p Sp + \bar{T}a Tc Tp Sp + \\ T\bar{a} \bar{T}c \bar{T}p Sp + T\bar{a} \bar{T}c Tp Sp + T\bar{a} Tc \bar{T}p Sp + T\bar{a} Tc Tp Sp$$

4 - Semplificazione delle funzioni

Lo scopo della semplificazione è quello di diminuire le porte necessarie, per rendere minimo l'ingombro del circuito, l'assorbimento di potenza, il costo e la complessità.

Tra i vari metodi di semplificazione esistenti si è in questo caso adoperato quello delle mappe di Karnaugh, che dà i seguenti risultati:

Per Cb:

		Ta Tc			
		00	01	11	10
Tp Sp	00	1			
	01				
	11				
	10	1			

$$C_b = \bar{T}_a \bar{T}_c \bar{S}_p$$

Per Cp

		Ta Tc			
		00	01	11	10
Tp Sp	00				
	01				
	11				
	10	1	1	1	1

$$C_b = T_p \bar{S}_p$$

Per A

Ta Tc

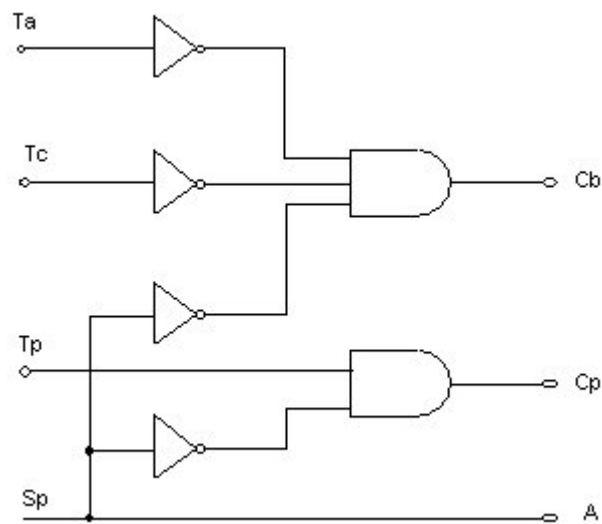
Tp Sp

	00	01	11	10
00				
01	1	1	1	1
11	1	1	1	1
10				

A = Sp

5 - Realizzazione di uno schema a blocchi

Dalla rigida applicazione delle tre funzioni ottenute al punto precedente si ottiene il seguente schema a blocchi:



Questo circuito può essere ulteriormente semplificato utilizzando varie metodologie. Una di queste consiste nell'usare parti di circuito realizzato da porte che sono usate per implementare un'altra funzione.

Così, ad esempio, si può prelevare la variabile Sp all'uscita dell'inverter (negata) utilizzato per ottenere la variabile Cp, risparmiando un inverter.

Un altro metodo per l'ulteriore semplificazione si può ottenere applicando le leggi di De Morgan. In particolare la variabile di uscita

$$C_b = \bar{T}_a \bar{T}_c \bar{S}_p$$

può essere trasformata in

$$C_b = \overline{T_a + T_c + S_p}$$

ed utilizzato in questo caso un nuovo schema a NOR.

Naturalmente questo modo di operare risulta tanto più utile, quanto più è complesso il circuito da realizzare.

Continuando in questo modo e facendo uso delle leggi dell'algebra di commutazione, il circuito di partenza può ottenersi in un'estrema varietà di configurazioni più o meno valide a seconda delle necessità di progetto.

Va in ogni modo sempre tenuto presente che ogni qualvolta si sceglie un integrato è bene, per ragioni di ingombro, potenza e costo, utilizzare sempre tutte le porte in esso contenute.

4 Elementi introduttivi ai PLC

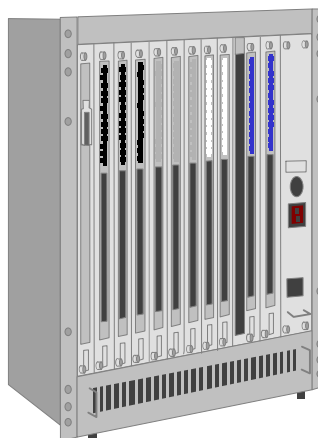
Un controllore a Logica Programmabile (o PLC = Programmable Logic Controller) è un semplice ed economico microcomputer dedicato all'ambiente industriale, per il quale è dotato delle opportune interfacce.

Secondo il NEMA (National Electrical Manufacturers Association), un controllore a logica programmabile è una apparecchiatura di controllo avente le seguenti caratteristiche:

- apparecchiatura elettronica a microprocessore operante in modo digitale
- usa moduli di I/O per recepire segnali da dispositivi sensoriali e per comandare dispositivi di attuazione
- ha una memoria di lavoro (di tipo RAM) per immagazzinare internamente tali "dati" e le istruzioni per specifiche funzioni, come funzioni logiche, sequenziali, di temporizzazione, di conteggio o aritmetiche
- esegue le funzioni assegnate ad un automatismo, espresse attraverso un apposito programma di istruzioni.

Molto più frequentemente, il PLC viene impiegato per automatismi logici, a media complessità.

I controllori programmati (PLC) hanno fatto la loro prima apparizione agli inizi degli anni '70 come sistemi flessibili e di basso costo per l'automazione delle linee di produzione dell'industria automobilistica. Gradualmente, la loro estensione ha interessato tutti i settori industriali, sostituendo ormai ovunque i sistemi di controllo a relè, relativamente più lenti, meno affidabili e caratterizzati da problemi di cablaggio.



Nella loro concezione più semplice, i PLC lavorano tenendo sotto controllo, attraverso scansioni cicliche, i segnali di ingresso provenienti da sorgenti quali sensori, finecorsa o pulsanti. Quando rilevano delle variazioni nei segnali di ingresso tali da cambiare lo stato logico (segnali on / off), i PLC reagiscono in base al programma scritto dall'utente, in modo da generare segnali di uscita in grado di poter pilotare carichi esterni al sistema controllato, come relè, controlli per motori, display ed allarmi.

Un sistema del genere elimina gran parte dei problemi di cablaggio ed aumenta la flessibilità del sistema perché permette la modifica del software applicativo in maniera estremamente semplice.

Un PLC è dunque un dispositivo di tipo industriale, concepito per risolvere problemi di controllo di automazione, con una struttura costruttiva che rispecchia a tutti gli effetti quella di un calcolatore, dal quale si differenzia per le modalità di utilizzo dei singoli componenti.

Un tipico PLC presenta infatti:

- Un gruppo di alimentazione
- L'unità centrale di elaborazione (CPU)
- La sezione di ingresso / uscita
- Le unità di memoria (di programmi e di dati)
- L'unità di programmazione

Il gruppo di alimentazione fornisce la tensione e la corrente di lavoro ai dispositivi elettronici. Sono disponibili alimentatori per il collegamento diretto alla rete elettrica (110/220 VAC) oppure alimentatori in corrente continua (24 VDC) particolarmente indicati quando è necessario realizzare un quadro elettrico collegabile a batterie tampone per assicurare il funzionamento anche in condizioni di mancanza della tensione di rete.

La CPU è il cuore del PLC, perché contiene i circuiti che gestiscono tutte le attività del controllore e, in particolare, esegue la scansione del programma, la lettura degli ingressi ed il pilotaggio delle uscite. La CPU è in genere dotata di LED di segnalazione che indicano lo stato di funzionamento: presenza dell'alimentazione, modalità operativa, condizioni di allarme e di errore.

I parametri che caratterizzano la CPU sono:

- ❖ Massimo numero di I/O indirizzabili
- ❖ Velocità di scansione per 1000 istruzioni (1Kbyte)
- ❖ Numero e tipologia delle istruzioni eseguibili
- ❖ Massima dimensione del programma (espressa in Kbyte)
- ❖ Tipologia di moduli I/O e speciali collegabili
- ❖ Possibilità di interfacciamento con computer e/o altri PLC

L'unità di memoria permette la registrazione delle istruzioni che costituiscono il programma. Può essere a sola lettura (EPROM) oppure a lettura e scrittura (RAM o EEPROM).

Nel primo caso, il programma deve essere memorizzato tramite un particolare dispositivo chiamato programmatore di EPROM; eventuali modifiche al programma richiedono la cancellazione del chip di memoria e la sua riprogrammazione.

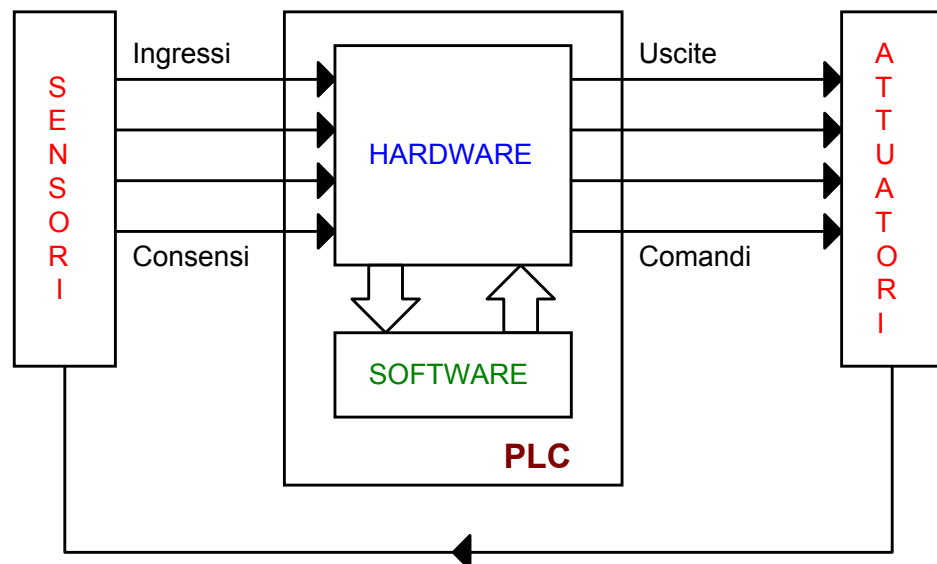
Nel secondo caso, invece, la programmazione e le eventuali modifiche avvengono direttamente tramite "console" dedicata o personal computer.

La sezione di ingresso/uscita (I/O) comprende i dispositivi di interfacciamento ed i relativi cablaggi, che ne permettono il collegamento al sistema da controllare. Questa parte è spesso modulare e può risiedere in un rack separato, oppure essere integrata con la CPU.

Tutti i moduli, sia di ingresso che di uscita, sono corredati di LED di segnalazione, che indicano costantemente lo stato di ciascun punto. A seconda delle specifiche esigenze di progetto, è possibile scegliere tra moduli di ingresso alimentati in c.c. o c.a., direttamente interfacciabili con sensori PNP o NPN e moduli di uscita dotati di uno stadio finale a relè o a transistor. Per assicurare la massima immunità ai disturbi, i moduli I/O presentano speciali circuiti optoelettronici che realizzano una separazione galvanica fra il segnale in campo ed il medesimo segnale all'interno del PLC. Il foto-accoppiatore trasferisce il segnale tramite un fotodiodo, ossia tramite emissione luminosa, e non attraverso un collegamento elettrico.

Oltre ai classici moduli I/O sono oggi disponibili anche moduli speciali che assolvono a funzioni anche molto sofisticate (porte seriali, moduli conversione analogico / digitale, controllo assi, reti di comunicazione, ecc...)

Un PLC è un sistema di comando a cui si collegano quindi sensori ed attuatori per l'elaborazione delle relative informazioni.



Eseguendo ciclicamente il programma memorizzato, il PLC legge lo stato degli ingressi, leggendo le corrispondenti celle di memoria, ed esegue su questi le operazioni logiche indicate nelle istruzioni del programma, producendo le uscite corrispondenti.

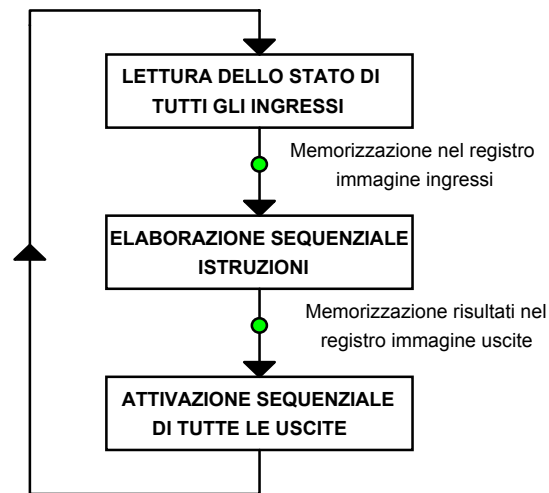
A puro scopo indicativo, si può dire che alcuni PLC tra i più economici, richiedono un tempo di elaborazione dell'ordine di 10 - 70 millisecondi per eseguire una istruzione, e compiono quindi la scansione di 1K di memoria di istruzioni in 10 - 70 millisecondi.

Quelli più potenti arrivano a tempi di elaborazione di 1 millisecondo per 1K di istruzioni.

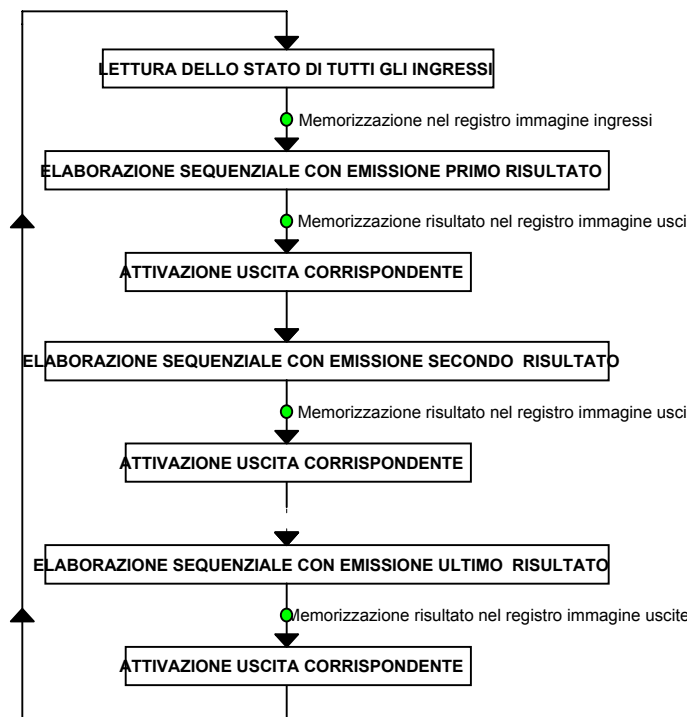
SCANSIONE: INTERVALLO DI TEMPO NECESSARIO PER ESEGUIRE UN CICLO DEL PROGRAMMA

Tipi di scansione:

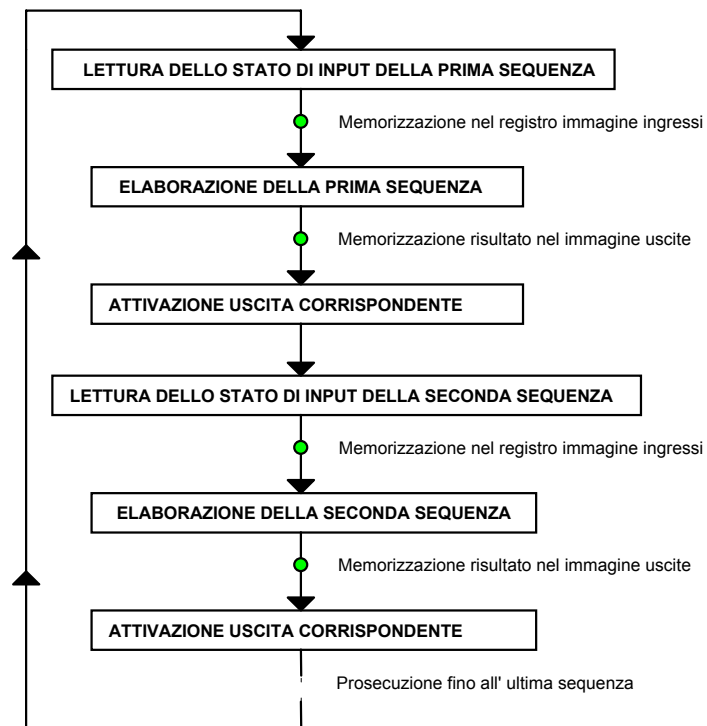
1. Scansione sincrona di ingresso e di uscita



2. Scansione sincrona di ingresso e asincrona di uscita



3. Scansione asincrona di ingresso e di uscita



Dove si usano i PLC

In tutte quelle applicazioni dove

- ❖ Sono richiesti più di 10 I/O
- ❖ Si deve garantire un prodotto affidabile
- ❖ È richiesta una apparecchiatura con caratteristiche industriali
- ❖ Si devono prevedere espansioni e modifiche nella logica di controllo
- ❖ Sono richieste funzioni sofisticate come:
 - Connessioni a computer, terminali, stampanti, . .
 - Elaborazioni matematiche
 - Posizionamenti
 - Regolazioni PID

Applicazioni tipiche dei PLC

- MACCHINE UTENSILI
- MACCHINE PER LO STAMPAGGIO
- MACCHINE PER IMBALLAGGIO
- MACCHINE PER IL CONFEZIONAMENTO
- ROBOT / MONTAGGIO
- REGOLAZIONE PROCESSI CONTINUI
- MACCHINE TESSILI
- SISTEMI DI MOVIMENTAZIONE/TRASPORTO
- CONTROLLO ACCESSI

4.1 La programmazione dei PLC

I circuiti a logica interna dei PLC sostituiscono i relè, i temporizzatori, i contatori e gli altri dispositivi discreti normalmente utilizzati per costruire sistemi di controllo elettromeccanici. L'effettivo funzionamento della macchina avviene come se tali componenti fossero presenti, ma con caratteristiche di flessibilità ed affidabilità notevolmente superiori. Nella programmazione con i diagrammi a relè restano tuttavia in uso i simboli dei quadri elettromeccanici.

Chi programmerà il PLC e che conoscenze dovrà avere?

Se è vero che queste macchine possono portare numerosi vantaggi alle aziende che le utilizzano, è altrettanto vero che questo non deve avvenire a costo di una forzata riqualificazione del personale. I PLC devono cioè inserirsi in azienda nel modo più naturale possibile, permettendo di mantenere le stesse metodologie di impiego delle apparecchiature che vanno a sostituire.

Primo metodo di programmazione

Il primo linguaggio sviluppato per i PLC è stato quello dei **diagrammi a relè** (reti ladder o schemi a contatti o KOP). Le loro applicazioni iniziali, infatti, vedevano soprattutto la sostituzione dei PLC ai quadri di comando a relè.

Ciò ha spinto i costruttori ad offrire delle macchine utilizzabili esattamente come se contenessero al loro interno dei componenti quali relè, temporizzatori e contatori. Il fatto che tali componenti non siano fisicamente presenti nel PLC può essere ignorato dall'utente, che continua a lavorare come prima, anche se con una elettromeccanica "virtuale". La sola differenza è che al cacciavite ed al filo elettrico, necessari per collegare i relè, si sostituisce la console di programmazione. Essa tuttavia riporta tutti i simboli a cui i tecnici sono abituati: contatti normalmente aperti o chiusi, bobine, connessioni in serie (funzioni AND) o in parallelo (funzioni OR), ecc.

Per programmare uno schema di controllo, l'utente non deve fare altro che premere in sequenza i tasti che gli servono, come se dovesse disegnare uno schema funzionale, che infatti vedrà prendere corpo sullo schermo della consolle. Rispetto ad uno schema fisico, tuttavia, lo schema programmato offre la possibilità di apportare facilmente qualsiasi modifica o estensione, senza richiedere il rifacimento del cablaggio, quindi con enormi vantaggi in termini di tempo e di costi.

Secondo metodo di programmazione

Un'altra categoria di **linguaggi** è quella che potremmo definire per "elettronici" o, più genericamente, per "**logici**", essendo essi basati su una simbologia utilizzata, per esempio, anche in pneumatica. Intendiamo riferirci alla logica booleana ed alle sue regole.

Per realizzare uno schema di controllo, si stabiliscono inizialmente i legami richiesti fra i segnali di ingresso e le variabili di uscita. Tali relazioni sono spesso rappresentate dalle tabelle della verità. A questo punto si procede alla sintesi del sistema, utilizzando uno dei vari metodi noti (mappe di Karnaugh, diagrammi di Quine-McCluskey, ecc...). Il risultato finale è una serie di espressioni logiche, dove le relazioni tra le variabili sono espresse sotto forma di operatori logici elementari (AND, OR, NOT, ecc...). Analogamente ai linguaggi elettromeccanici, gli operatori logici sono specificati nel PLC mediante codici corrispondenti, con vantaggi simili a quelli già descritti.

Terzo metodo di programmazione

Un terzo metodo di programmazione dei PLC utilizza i **linguaggi per "informatici"**. L'introduzione del personal computer a tutti i livelli della fabbrica ne ha diffuso notevolmente la conoscenza, almeno in termini generali. Naturale, quindi, che anche i costruttori di PLC si siano adeguati presentando dei linguaggi che ne permettono la programmazione quasi fossero dei personal computer. Si tratta in genere di versioni semplificate del BASIC o di linguaggi sviluppati ad hoc, spesso chiamati "colloquiali" perché basati su una serie di comandi espressi con parole di facile comprensione (SE...ALLORA....., ALTRIMENTI....).

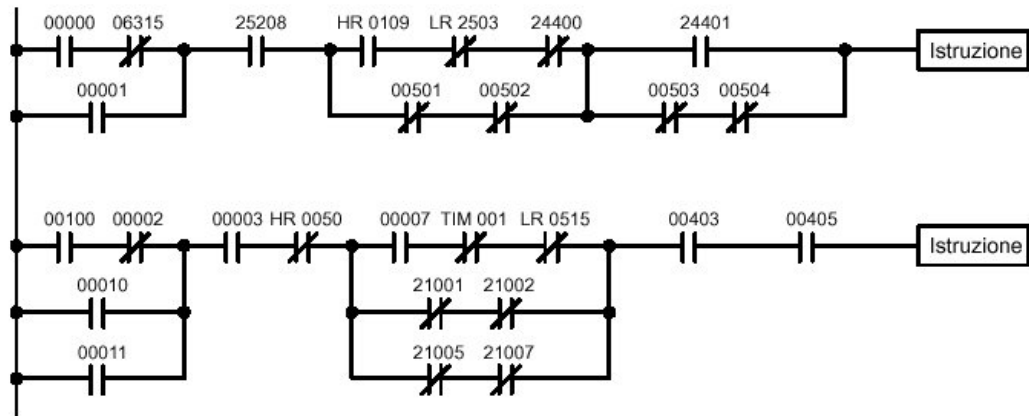
I linguaggi di questo tipo permettono di aggiungere alle funzioni di controllo delle utili funzioni di calcolo, importanti per risolvere con maggior facilità applicazioni complesse quale, per esempio, il controllo PID. Inoltre è più facile costruire dei programmi modulari, quindi più flessibili e riutilizzabili. Scegliere questi linguaggi significa infine adottare un metodo omogeneo per programmare PLC, personal computer ed altre apparecchiature "intelligenti", cosa che sarà indispensabile in vista della "Factory Automation".

Quarto metodo di programmazione

L'ultima nata è la programmazione grafica (**GRAFCET**) che si basa sulla considerazione che ciascun utente conosce bene la propria applicazione, nella sequenza in cui essa si sviluppa. Il Grafcet offre una serie di simboli universali che permettono di definire le specifiche operative di qualsiasi impianto automatico e di progettare lo schema di controllo.

4.2 La programmazione in diagramma a relè (KOP)

Un diagramma a relè consiste di una barra verticale posta sul lato sinistro e di un insieme di diramazioni orizzontali che partono dalla linea verticale. La barra verticale è chiamata “bus”, le diramazioni vengono chiamate “righe circuitali”. Sulle righe circuitali vengono posti i vari contatti che si collegano alla parte destra. La combinazione logica di questi contatti determina quando e come le istruzioni poste a destra devono essere eseguite. Qui sotto è riportato un circuito in diagramma a relè.



Come si può osservare, le righe circuitali possono avere a loro volta diverse diramazioni che poi si collegano nuovamente. Ogni coppia di tratti verticali è chiamata contatto. Nel caso i contatti non siano dotati di un tratto diagonale, vengono detti contatti aperti e corrispondono alle istruzioni LOAD, AND o OR.

I contatti che prevedono dei tratti diagonali vengono chiamati contatti chiusi e corrispondono alle istruzioni LOAD NOT, AND NOT o OR NOT. Il numero in corrispondenza di ciascun contatto indica l'operando (in questo caso un bit) dell'istruzione.

Lo stato del bit associato a ciascun contatto determina la condizione di esecuzione per l'istruzione seguente. Il modo in cui opera ciascuna istruzione in base allo stato dei contatti viene descritto successivamente. Prima di analizzarlo però, è bene chiarire altri termini base.

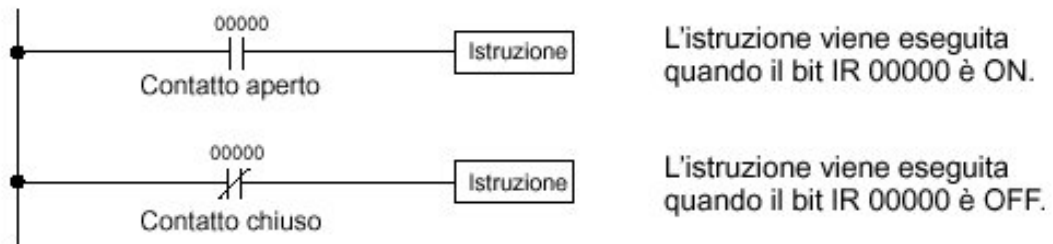
4.2.1 Termini di base

Contatto normalmente chiuso e normalmente aperto

Ogni contatto in un diagramma a relè può essere ON o OFF in funzione dello stato del bit ad esso associato. La condizione normale è ON se il bit è ON, e OFF se il bit è OFF.

Viceversa, nel caso di condizione negata, allora lo stato è ON se il bit è OFF e OFF se il bit è ON.

In generale viene usata una condizione normale quando si vuole che accada qualcosa quando il bit è ON, mentre si usa una condizione negata quando si vuole che accada qualcosa quando il bit è OFF.



Condizioni per l'esecuzione

In un programma in diagramma a relè, la combinazione logica di condizioni ON e OFF prima di una istruzione determina la condizione necessaria affinché l'istruzione venga eseguita.

Questa condizione, che sia ON o OFF, viene chiamata condizione per l'esecuzione dell'istruzione. Tutte le istruzioni, a parte LOAD e LOAD NOT, richiedono una condizione per l'esecuzione.

Bit di operando

Gli operandi possono essere, per ciascuna istruzione, qualsiasi bit delle aree IR, SR, HR, AR, LR o TC. Ciò significa che un contatto, in un diagramma a relè, può essere dato dallo stato degli I/O, dei flag, dei bit interni, dei temporizzatori/contatori, ecc.

Le istruzioni LOAD e OUT possono anche utilizzare i relè temporanei TR, ma questi vengono usati solo in casi speciali.

Blocchi logici

Il modo in cui i contatti influenzano le istruzioni è determinato dalle relazioni logiche tra i vari contatti presenti all'interno delle singole righe circuitali. Ciascun gruppo di contatti che definisce un certo risultato logico, viene detto blocco logico. Sebbene i diagrammi a relè possano venire scritti senza analizzare i singoli blocchi logici, è necessario comprenderne bene il significato per realizzare una efficace programmazione, quando si programma in lista istruzioni.

Blocco di istruzioni

Un blocco di istruzioni consiste di tutte quelle istruzioni che sono interconnesse all'interno di un diagramma a relè. L'inizio e la fine di un blocco di istruzioni sono identificabili con due punti consecutivi del diagramma a relè in cui può essere tracciata una linea orizzontale senza che questa intersechi alcuna linea verticale. Tutte le istruzioni all'interno di tali punti costituiscono il blocco di istruzioni.

4.2.2 Creazione di un programma

Nella creazione del programma di controllo in diagramma a relè vengono generalmente seguite **otto fasi** fondamentali:

1. Determinare che cosa il sistema di controllo deve fare e secondo quale sequenza.
2. Selezionare i dispositivi di ingresso e di uscita del PLC.
3. Disegnare uno schema di controllo, utilizzando i simboli dei diagrammi a relè. Come in un normale schema funzionale, è necessario riportare, nella corretta sequenza, le funzioni richieste e le loro correlazioni.
4. Codificare i simboli dello schema in un formato adatto per l'inserimento nella CPU tramite la console di programmazione, in base al tipo di PLC scelto ed alle funzioni offerte dalla console stessa.
5. Trasferire lo schema codificato (programma) nella CPU.
6. Attivare il programma, ossia eseguirlo.
7. Verificare se il programma contiene degli errori.
8. Correggere gli errori e memorizzare il programma finito.

Esaminiamo più in dettaglio le prime quattro fasi, meno legate al particolare PLC selezionato.

PRIMA FASE

La valutazione delle operazioni da controllare mediante PLC rappresenta evidentemente una fase molto importante per scegliere la configurazione e le funzioni del PLC stesso.

Per utilizzare un PLC in una applicazione di controllo, occorre in primo luogo determinare le specifiche del sistema, ed in particolare le specifiche di ingresso e uscita.

La prima cosa da fare è quindi valutare il numero ed il tipo di I/O richiesti dall'applicazione. Ciò richiede l'identificazione di tutti i dispositivi che devono inviare un segnale di ingresso al PLC (sensori, pulsanti, periferiche, ecc...) o che da questo devono ricevere un segnale (attuatori, servocomandi, sistemi di visualizzazione, ecc...) decidendo, in base alla natura di ciascuno di essi, quanti punti elementari (bit) sono necessari.

Il numero dei punti di ingresso, sommato al numero dei punti di uscita, fornisce il numero complessivo dei punti I/O, che non deve mai superare la capacità massima del controllore (riportata fra i dati caratteristici).

In base ai moduli di I/O selezionati, i segnali di ingresso e di uscita possono avere tensioni o correnti diverse, permettendo quindi un adattamento ottimale del PLC alle condizioni di impianto. Preparare una tabella che mostri la corrispondenza tra i bit di I/O ed i dispositivi di I/O.

Il passo successivo consiste nel determinare la sequenzialità degli eventi e la successione temporale secondo la quale fornire i comandi. E' necessario quindi identificare le relazioni di

ciascun dispositivo controllato nei confronti degli altri ad esso legati (ad esempio, fra una fotocellula ed un motore) ed anche le risposte reciproche. Per esempio, in una applicazione di controllo, una fotocellula può essere collegata funzionalmente ad un motore tramite un contatore interno al PLC. Il motore parte quando il PLC riceve un segnale di ingresso da un interruttore e si ferma quando il contatore ha ricevuto "n" segnali di ingresso della fotocellula.

SECONDA FASE

Molti controllori programmabili utilizzano il concetto di **canali I/O** per identificare i singoli punti. Ciascun canale comprende normalmente 16 punti ed ogni punto è identificato mediante un numero di quattro cifre.

Le due cifre a sinistra identificano il canale, mentre le due cifre a destra identificano il punto all'interno del canale. 0000 identifica quindi il primo punto del primo canale, mentre 0104 identifica il quinto punto (04) del secondo canale (01).

Oltre ai punti di I/O, occorre assegnare i relè ausiliari interni del PLC. Si tratta di relè che non controllano direttamente dei dispositivi esterni, ma sono usati come aree di memorizzazione o elaborazione dei dati, per controllare altri relè, temporizzatori, e contatori.

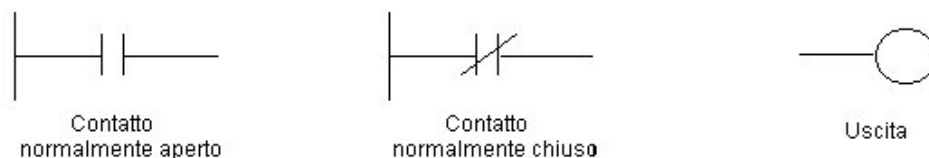
Funzionalmente, i relè ausiliari interni equivalgono quindi ai relè interni dei quadri elettromeccanici. Si parla quindi, in genere, di uscite interne.

Anche ai temporizzatori ed ai contatori devono essere assegnati dei numeri di identificazione, evitando di dare lo stesso numero ad un contatore e ad un temporizzatore. Ad esempio, non vi possono essere contemporaneamente un temporizzatore 01 ed un contatore 01.

Dopo aver reso identificabili mediante indirizzi tutti gli elementi di ingresso e uscita e gli indirizzi interni che faranno parte dello schema di controllo, si può passare alla terza fase.

TERZA FASE

E' ora necessario codificare con un diagramma a relè quanto messo a punto nelle due fasi precedenti. I tre simboli fondamentali dei diagrammi a relè sono riportati nella seguente figura:



Simboli fondamentali dei diagrammi a relè

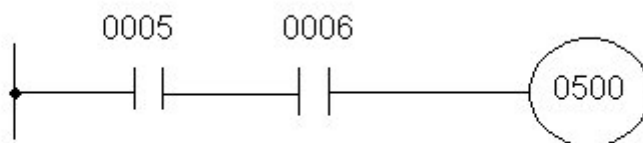
Un programma scritto in un diagramma a relè è formato da una serie di righe circuitali, delimitate sul lato sinistro da una barra verticale. E' necessario ricordare che:

- ogni riga deve terminare con la bobina di un relè, di un temporizzatore/contatore o con un blocco funzionale (istruzione speciale);
- a differenza degli schemi elettrici, nei diagrammi a relè non è sempre necessario disegnare la barra destra;
- il numero dei contatti in serie o in parallelo utilizzabili su una riga circuitale è spesso limitato.

QUARTA FASE

Non appena le funzioni di controllo sono state compiutamente espresse sotto forma di diagramma a relè, occorre trasformare quest'ultimo nel linguaggio utilizzabile dal PLC. Spesso, se la consolle di programmazione lo consente, è sufficiente riscrivere il diagramma a relè utilizzando la tastiera e seguendo le indicazioni che appaiono sullo schermo. In altri casi, è necessario trasformare il diagramma a relè in un codice mnemonico.

Gli indirizzi sono delle posizioni di memoria nelle quali si possono registrare istruzioni o dati. Le istruzioni servono per spiegare al PLC che cosa deve fare, utilizzando i dati da cui sono seguite.



Esempio di riga circuitale

4.2.3 Aree di memoria

I dati e i flag che possono essere usati con ciascuna istruzione, sono indicati da sigle. Per determinarli in modo univoco ci si deve riferire al manuale specifico del PLC interessato.

Area dati	Descrizione
IR	Bit che possono essere assegnati ai terminali di I/O esterni, relè interni o relè speciali
SR	Bit che svolgono funzioni specifiche come bit di controllo e flag.
HR	Bit che memorizzano i dati e mantengono lo stato ON/OFF quando viene disattivata l'alimentazione.
AR	Bit che svolgono funzioni specifiche come bit di controllo e flag.
LR	Utilizzata per le connessioni di dati 1 a 1 con altri PC.
TC	Vengono utilizzati gli stessi numeri per temporizzatori e contatori.

Area IR - Bit di I/O

Di seguito vengono illustrate le funzioni dell'area IR.

I bit dell'area IR da IR 00000 a IR 01915 vengono assegnati ai terminali del modulo CPU e dei moduli I/O. Questi bit riflettono lo stato ON/OFF dei segnali di ingresso e uscita. I bit di ingresso iniziano da IR 00000, mentre quelli di uscita da IR 01000.

La seguente tabella indica i bit IR assegnati ai terminali di I/O dei moduli CPU del CPM1

Modulo CPU CPM1	I/O	Terminali modulo CPU	Terminali unità I/O
CPM1-10CDR-□	Ingressi	6 punti: 00000 a 00005	12 punti: 00100 a 00111
	Uscite	4 punti: 01000 a 01003	8 punti: 01100 a 01107
CPM1-20CDR-□	Ingressi	12 punti: 00000 a 00011	12 punti: 00100 a 00111
	Uscite	8 punti: 01000 a 01007	8 punti: 01100 a 01107
CPM1-30CDR-□	Ingressi	18 punti: 00000 a 00011, 00100 a 00105	12 punti: 00200 a 00211
	Uscite	12 punti: 01000 a 01007, 01100 a 01103	8 punti: 01200 a 01207
CPM1-30CDR-□ -V1	Ingressi	18 punti: 00000 a 00011, 00100 a 00105	36 punti: 00200 a 00211 00300 a 00311 00400 a 00411
	Uscite	12 punti: 01000 a 01007, 01100 a 01103	24 punti: 01200 a 01207 01300 a 01407 01400 a 01407

Area SR - Flag

Questi bit vengono utilizzati soprattutto come flag relativi al funzionamento del PLC oppure come contenitori dei valori impostati e correnti per le diverse funzioni.

I canali da SR 244 a SR 247 possono essere utilizzati come bit di lavoro quando gli interrupt di ingresso non vengono impiegati in modalità contatore.

Area TR - Flag

Quando un diagramma a relè complesso non può essere programmato in codice mnemonico in modo completo, questi bit vengono utilizzati per memorizzare temporaneamente le condizioni ON/OFF nei rami del programma. Questi bit vengono impiegati solo per il codice mnemonico. Programmando direttamente con il software di programmazione, i bit TR vengono gestiti in modo automatico.

Gli stessi bit TR non possono essere utilizzati più di una volta nell'ambito dello stesso blocco di istruzioni, ma possono essere impiegati più volte in blocchi di istruzioni diversi. Lo stato ON/OFF dei bit TR non può essere controllato da una unità periferica.

Area HR – Mantenimento stato

Questi bit conservano lo stato ON/OFF anche quando viene disattivata l'alimentazione oppure quando si avvia o si arresta il funzionamento del PLC. Questi bit lavorano allo stesso modo come bit di lavoro.

Area AR – Bit di controllo

Si tratta di bit che vengono utilizzati soprattutto come flag relativi al funzionamento del PLC. Questi bit conservano lo stato ON/OFF anche quando viene disattivata l'alimentazione oppure quando si avvia o si arresta il funzionamento del PLC.

Area LR – Bit di connessione

Quando esiste una connessione tra un due PLC Omron CPM, questi bit vengono utilizzati per la condivisione dei dati. Quando non vengono utilizzati nelle connessioni PC link 1:1, i bit LR possono essere usati come bit di lavoro.

Area TC – Temporizzatori / Contatori

Si tratta di un'area utilizzata per gestire i temporizzatori e i contatori creati con le istruzioni TIM, TIMH(15), CNT e CNTR(12). Gli stessi numeri vengono utilizzati sia per i temporizzatori che per i contatori ed ogni numero può essere impiegato solo una volta nel programma utente. Non è possibile utilizzare lo stesso numero TC per più di una volta anche per istruzioni diverse. I numeri TC vengono utilizzati per la creazione di temporizzatori e contatori e per l'accesso a flag di completamento e valori correnti (PV). Se un numero TC viene designato per i dati di canali, accede al valore corrente (PV); se viene utilizzato per i dati dei bit, accede al flag di completamento per il temporizzatore/contatore.

4.3 Codice mnemonico

Il diagramma a relè non può essere inserito direttamente nel PLC per mezzo di una Consolle di Programmazione, occorre adoperare il software di programmazione. Per scrivere da una Consolle di Programmazione è necessario convertire il diagramma relè in codice mnemonico.

Il codice mnemonico fornisce esattamente le stesse istruzioni del diagramma a relè, ma in una forma che può essere subito digitata nel PLC. Effettivamente, è possibile programmare direttamente in codice mnemonico, sebbene non sia raccomandabile ai principianti o nella stesura di programmi complessi. Inoltre, indifferentemente da quale dispositivo di programmazione si usi, il programma viene conservato nella memoria in forma mnemonica, e questo fa sì che sia importante conoscere il codice mnemonico.

Data l'importanza della Consolle di Programmazione come dispositivo periferico e del codice mnemonico per la comprensione completa del programma, introdurremo e descriveremo il codice mnemonico insieme al diagramma a relè. Si rammenti che non è necessario usare il codice mnemonico nel caso si stia sviluppando il programma col software di programmazione.

4.3.1 Struttura della memoria di programma

Il programma viene scritto negli indirizzi della memoria di programma. Gli indirizzi della memoria di programma sono leggermente diversi da quelli di altre aree di memoria perché ciascun indirizzo non contiene necessariamente la stessa quantità di dati. Invece, ciascun indirizzo contiene una istruzione e tutti gli identificatori e operandi necessari per quella istruzione (che verranno descritti più dettagliatamente in seguito). Dato che alcune istruzioni non hanno bisogno di operandi mentre altre possono richiederne fino a tre, gli indirizzi della memoria di programma possono essere composti da uno a quattro canali.

Gli indirizzi della memoria di programma iniziano a 00000 e continuano fino a che la capienza della memoria di programma non si esaurisce. Il primo canale di ciascun indirizzo definisce l'istruzione.

Qualsiasi identificatore usato dall'istruzione viene anche contenuto nel primo canale. Inoltre, se una istruzione richiede soltanto un unico bit di operando (senza identificatore), anche il bit dell'operando viene programmato sulla stessa linea circuitale dell'istruzione. I canali restanti, necessari all'istruzione, contengono gli operandi che specificano quali dati devono essere usati. Le istruzioni usate verranno descritte più avanti. Nelle istruzioni con operandi le colonne degli indirizzi e istruzioni relative a tali operandi sono lasciate in bianco. Se l'istruzione non richiede un identificatore o bit di operando, la riga per la colonna dell'operando viene lasciata in bianco.

È una buona idea scorrere tutti gli spazi in bianco di una colonna dati (per le istruzioni che non richiedono dati) in modo da verificare velocemente se qualche indirizzo è stato dimenticato. Durante la programmazione gli indirizzi vengono visualizzati automaticamente e non devono essere inseriti a meno che per qualche motivo non si desideri una posizione diversa per l'istruzione. Quando si effettua una conversione in codice mnemonico è meglio iniziare dall'indirizzo 00000 del programma di memoria a meno che non si abbia una ragione specifica per iniziare da un altro punto.

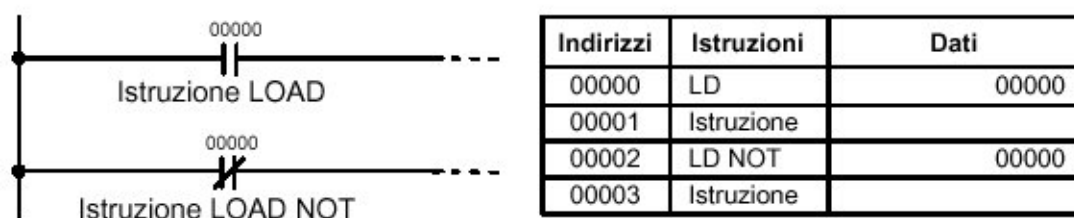
Indirizzi	Istruzioni	Operandi	
00000	LD	HR	0001
00001	AND		00001
00002	OR		00002
00003	LD NOT		00100
00004	OR		00101
00005	AND LD		
00006	MOV(21)		
			000
		DM	0000
00007	CMP(20)		
		DM	0000
		HR	00
00008	AND		25505
00009	OUT		20000
00010	MOV(21)		
		DM	0000
		DM	0500
00011	LD		00502
00012	AND		00005
00013	OUT		20001

4.4 Istruzioni del diagramma a relè

Le istruzioni del diagramma a relè sono quelle istruzioni che corrispondono ai singoli contatti e ne definiscono le regole di interazione. Tali istruzioni da sole o in combinazione con le istruzioni dei blocchi logici, descritti successivamente, costituiscono le condizioni operative su cui tutte sono basate le altre istruzioni.

4.4.1 LOAD e LOAD NOT

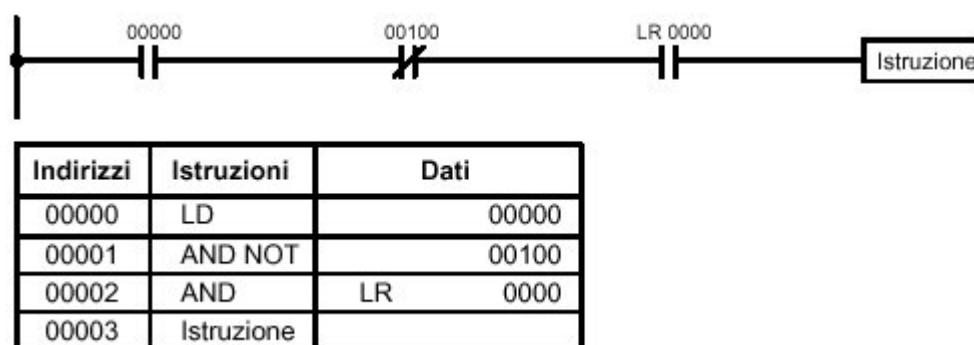
Il primo contatto, che inizia qualsiasi riga circuitale in un diagramma a relè, corrisponde a una istruzione LOAD o LOAD NOT. Ciascuna di queste istruzioni richiede una linea del codice mnemonico. Il termine "Istruzione" utilizzato nella tabella che segue identifica una qualsiasi istruzione che può essere inserita nella parte destra del diagramma.



Quando questo è il solo contatto di una riga circuitale, la condizione operativa per l'istruzione posta sul lato destro è ON quando il contatto è ON. Per l'istruzione LOAD (contatto normalmente aperto) la condizione operativa è ON se IR 00000 è ON, viceversa per l'istruzione LOAD NOT (contatto normalmente chiuso) la condizione operativa è ON se IR 00000 è OFF.

4.4.2 AND e AND NOT

Quando due o più contatti sono collegati in serie sulla stessa riga circuitale, il primo corrisponde a un'istruzione LOAD o ad un LOAD NOT, gli altri contatti alle istruzioni AND o AND NOT. Il seguente esempio mostra tre contatti che corrispondono, a partire da sinistra, alle istruzioni LOAD, AND NOT e infine AND. Ciascuna di queste istruzioni richiede una linea del codice mnemonico.



L'istruzione sulla destra avrà una condizione operativa ON solo quando tutte e tre le condizioni saranno ON, ovvero quando IR 00000 è ON, IR 00100 è OFF e LR 0000 è ON.

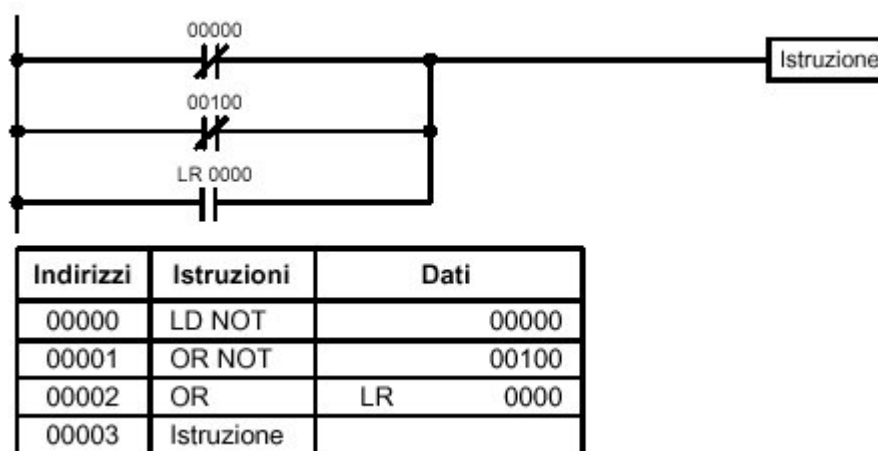
In conclusione, le istruzioni AND devono venire considerate in serie e ognuna è il risultato dell'AND logico tra la condizione operativa (somma di tutte le condizioni operative che

precedono quel punto) e lo stato del bit associato all'istruzione AND. Se entrambi sono ON, allora il risultato è una nuova condizione operativa ON valida per la successiva istruzione. La condizione operativa per il primo AND di una serie è la prima condizione della riga circuitale.

Ciascuna istruzione AND NOT di una serie è il risultato dell'AND logico tra la condizione operativa e lo stato negato del bit associato alla istruzione AND NOT.

4.4.3 OR e OR NOT

Quando due o più contatti sono collegati in parallelo, il primo contatto corrisponde a un'istruzione LOAD o LOAD NOT, gli altri contatti corrispondono alle istruzioni OR o OR NOT. Il seguente esempio mostra tre contatti collegati in parallelo che corrispondono alle istruzioni LOAD NOT, OR NOT e OR. Ciascuna di queste istruzioni richiede una linea del codice mnemonico.



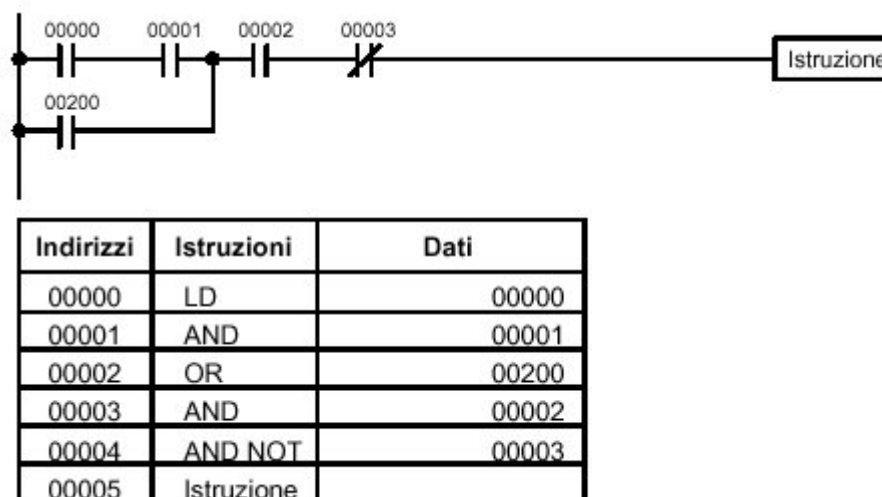
L'istruzione posta a destra ha una condizione operativa uguale a ON quando almeno uno dei contatti in parallelo è ON, ad esempio IR 00000 è OFF, IR 00100 è OFF e LR 0000 è ON.

Le istruzioni OR e OR NOT possono venire considerate singolarmente essendo ognuna il risultato dell'OR logico tra la condizione operativa e lo stato del bit associato all'OR. Se almeno uno di essi è ON, si genera una condizione operativa ON per la successiva istruzione.

4.4.4 Combinazione di istruzioni AND e OR

Quando in una riga circuitale vengono combinate insieme delle istruzioni AND e OR, ciascuna può venire considerata singolarmente, e ciascuna esegue una operazione logica tra la condizione operativa e lo stato del bit associato ad essa.

Quello che segue ne è un esempio; lo si osservi attentamente per convincersi che il codice mnemonico segue fedelmente il diagramma a relè.



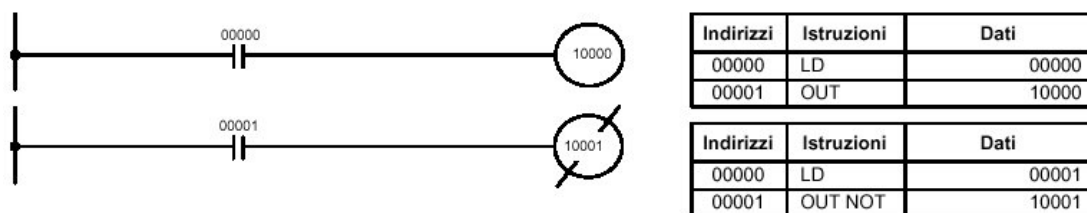
In questo esempio, viene eseguito un AND tra lo stato dei bit 00000 e 00001 per determinare la condizione operativa posta in OR con lo stato del bit 00200. Il risultato di questa operazione determina, a sua volta, la condizione operativa dell'AND con lo stato del bit 00002, che definisce la condizione operativa dell'AND NOT con lo stato del bit 00003.

Tuttavia, in circuiti più complessi, è necessario analizzare la riga circuitale in termini di blocchi logici, prima di poter arrivare a determinare la condizione operativa per l'istruzione finale e dove utilizzare le istruzioni AND LOAD e OR LOAD.

Prima di considerare circuiti più complessi, vedremo le istruzioni necessarie a completare un semplice programma di I/O.

4.4.5 OUTPUT e OUTPUT NOT

Le istruzioni OUTPUT e OUTPUT NOT vengono usate per controllare i bit in base alla condizione operativa. Con l'istruzione Output, il bit operando sarà ON finché la condizione operativa resta ON e sarà OFF finché la condizione operativa resta OFF. Con l'istruzione OUTPUT NOT, il bit operando sarà ON finché la condizione operativa resta OFF e sarà OFF finché la condizione operativa resta ON. Ciò si rappresenta come segue. Ciascuna di queste istruzioni richiede una linea del codice mnemonico.

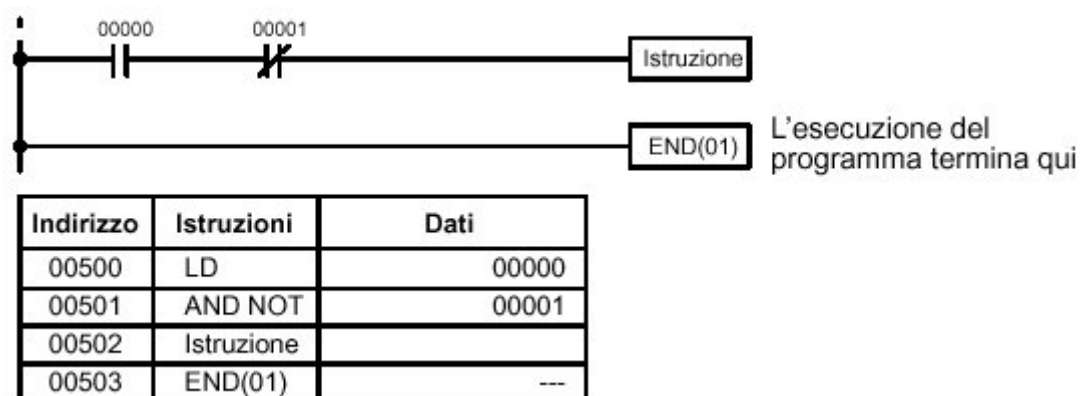


Nell'esempio precedente, il bit 10000 starà ON finché 00000 resta ON e il bit 10001 starà OFF finché 00001 resta ON. In questo caso 00000 e 00001 rappresentano i bit di ingresso e 10000, 10001 i bit di uscita assegnati dal PLC, ovvero i segnali che arrivano ai punti di ingresso associati a 00000 e 00001 controllano rispettivamente i punti di uscita 10000 e 10001.

Il periodo in cui un bit resta ON o OFF, può venire controllato combinando opportunamente delle istruzioni OUTPUT e OUTPUT NOT con l'istruzione Timer.

4.4.6 L'istruzione END

L'ultima istruzione di qualunque programma deve essere l'istruzione END. La CPU esegue tutte le istruzioni fino al primo END, quindi torna ad eseguire la prima istruzione del programma. Sebbene una istruzione END possa venire messa in qualunque punto del programma, (utile in fase di debug) nessuna istruzione successiva ad essa può venire eseguita. Il numero che segue l'istruzione END rappresenta il codice mnemonico dell'istruzione stessa e viene utilizzato quando il programma viene inserito nel PLC. L'istruzione END non necessita di operandi e sulla stessa linea non può essere inserita nessun'altra istruzione.



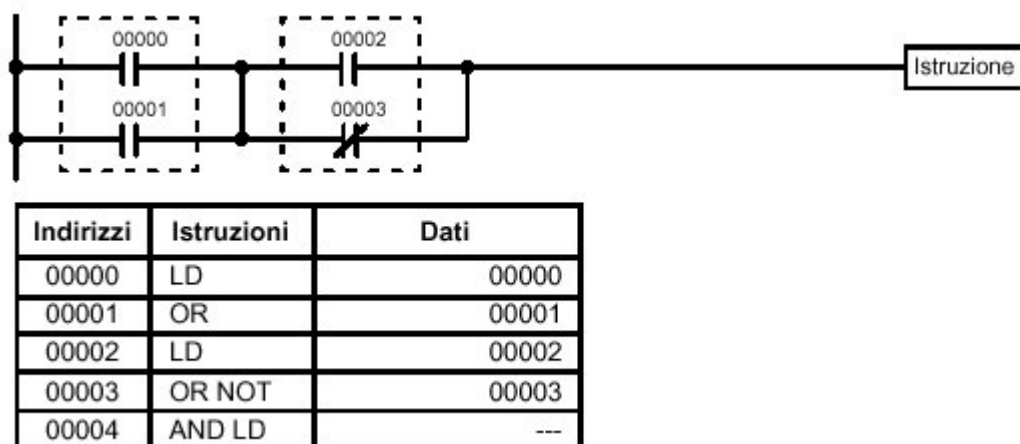
Se non è stata programmata alcuna istruzione di End, il programma non può venire eseguito. Abbiamo terminato le istruzioni che servono a scrivere un semplice programma di I/O.

Prima di terminare con la programmazione in diagramma a relè e passare all'inserimento del programma nel PLC, vediamo le istruzioni dei blocchi logici (AND LOAD e OR LOAD) che sono spesso utili anche in programmi di grande semplicità.

4.4.7 AND LOAD

Le istruzioni dei blocchi logici non corrispondono direttamente a un contatto in diagramma a relè, bensì descrivono le relazioni fra più blocchi logici. L'istruzione AND LOAD esegue l'AND logico fra le condizioni operative risultanti da due blocchi logici. L'istruzione OR LOAD esegue l'OR logico fra le condizioni operative risultanti da due blocchi logici.

Sebbene semplice all'apparenza, il diagramma riportato qui sotto, richiede una istruzione AND LOAD.



I due blocchi logici sono evidenziati dalle linee tratteggiate. Lo studio di questo esempio mostra che si genera una condizione operativa ON quando almeno una delle condizioni del blocco logico sinistro è ON (es.: o 00000 o 00001 è ON), e quando almeno una delle condizioni del blocco destro è ON (es.: 00002 è ON e 00003 è OFF).

Il precedente diagramma a relè non può essere convertito in lista istruzioni utilizzando unicamente le istruzioni AND e OR. Se si tenta un AND tra IR 00002 e il risultato di un OR tra IR 00000 e IR 00001, OR NOT tra IR 00002 e IR 00003 viene perso e l'OR NOT termina producendo come risultato un OR NOT tra IR 00003 e il risultato di un AND tra IR 00002 e il primo OR. Ciò di cui si necessita è una modalità per eseguire l'OR indipendentemente dal NOT e quindi combinarne i risultati.

La conversione può essere effettuata utilizzando le istruzioni LOAD o LOAD NOT.

Quando queste istruzioni vengono utilizzate in questo modo, la condizione di esecuzione corrente viene salvata in un buffer speciale e il processo logico viene fatto partire. Per combinare il risultato della condizione di esecuzione attuale (contatto 00002 e OR negato 00003) con la precedente (contatto 00000 e OR 00001) bisogna utilizzare un'istruzione AND LOAD o un'istruzione OR LOAD. Qui "LOAD" si riferisce al caricamento dell'ultima condizione di esecuzione. Una istruzione di LOAD o LOAD NOT viene utilizzata ogni qual volta esistano in una linea circuitale più contatti in serie o in parallelo.

Analizzando il circuito in termini di istruzioni, il contatto 00000 è un'istruzione LOAD, mentre il contatto sottostante è un'istruzione OR tra lo stato del bit 00000 e lo stato di 00001. Il contatto 00002 è ancora un'istruzione LOAD mentre il contatto sottostante è una istruzione OR NOT tra lo stato del bit 00002 e lo stato negato di 00003. Per poter eseguire l'istruzione posta a destra, deve venire eseguito l'AND logico tra le condizioni operative risultanti da questi due blocchi logici.

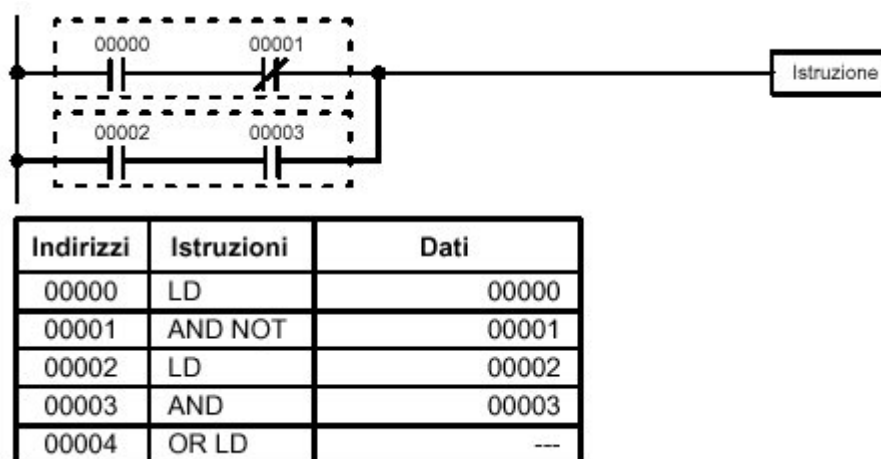
L'istruzione AND LOAD permette di eseguire proprio questo. AND LOAD esegue un AND tra la corrente condizione operativa e l'ultima non utilizzata.

Una condizione operativa inutilizzata viene generata da una istruzione LOAD o LOAD NOT. L'istruzione AND LOAD non necessita di operandi propri, in quanto opera con condizioni operative pregresse. Anche in questo caso i trattini indicano che non devono essere inseriti o designati operandi.

4.4.8 OR LOAD

Sebbene non descritto in dettaglio, il seguente circuito richiede una istruzione OR LOAD tra il blocco logico superiore e quello inferiore. Una condizione operativa ON, utilizzabile dall'istruzione posta a destra, risulta quando 00000 è ON e 00001 è OFF o quando sia 00002 sia 00003 sono ON.

Il funzionamento del codice istruzioni per l'istruzione OR LOAD è esattamente lo stesso dell'istruzione AND LOAD tranne che in OR LOAD la condizione di esecuzione corrente è posta in OR con la condizione di esecuzione che precede.



Naturalmente in alcuni circuiti è necessario adottare, sia la istruzione AND LOAD sia l'istruzione OR LOAD.

4.4.9 Istruzioni di blocchi logici in serie

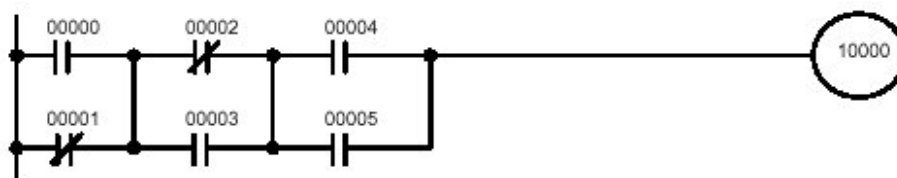
Per codificare i circuiti con istruzioni di blocchi logici in serie, il circuito deve essere suddiviso in blocchi logici. Ciascun blocco viene codificato usando una istruzione LOAD per codificare il primo contatto, si usa quindi AND LOAD o OR LOAD per combinare in modo logico i blocchi. Sia con AND LOAD che con OR LOAD vi sono due metodi per fare questo.

Uno è quello di codificare l'istruzione logica del blocco che si trova dopo i primi due blocchi ed in seguito quella dopo ciascun blocco aggiuntivo.

L'altro è quello di codificare tutti i blocchi da collegare, iniziando ciascun blocco con LOAD o LOAD NOT, e quindi codificare le istruzioni di blocco logico che li collegano. In questo caso si devono collegare per prime le istruzioni dell'ultimo paio di blocchi e poi tutti i blocchi precedenti procedendo a ritroso fino al primo.

Sebbene entrambi i metodi producano esattamente lo stesso risultato, il secondo metodo, quello relativo alla codificazione di tutte le istruzioni di blocco logico insieme, può essere usato solo se si stanno collegando al massimo 8 blocchi, cioè se sono richieste sette, o meno, istruzioni di blocco logico.

Il circuito seguente richiede che AND LOAD sia convertito in codice mnemonico perché contiene tre paia di contatti paralleli in serie. Nell'illustrazione sono anche contenute le due opzioni per la codifica del programma.

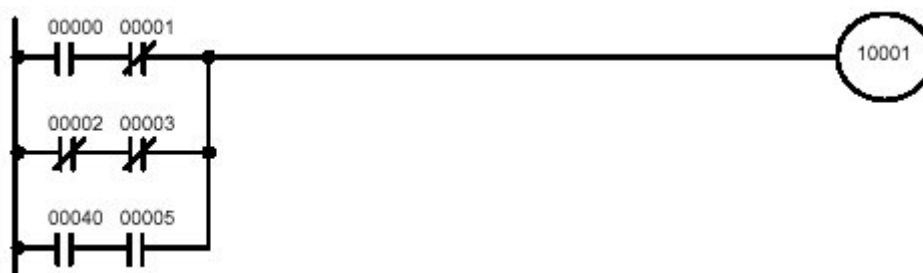


Indirizzi	Istruzioni	Dati
00000	LD	00000
00001	OR NOT	00001
00002	LD NOT	00002
00003	OR	00003
00004	AND LD	—
00005	LD	00004
00006	OR	00005
00007	AND LD	—
00008	OUT	10000

Indirizzi	Istruzioni	Dati
00000	LD	00000
00001	OR NOT	00001
00002	LD NOT	00002
00003	OR	00003
00004	LD	00004
00005	OR	00005
00006	AND LD	—
00007	AND LD	—
00008	OUT	10000

Si ricordi ancora che con il metodo a destra è possibile collegare solo un massimo di otto blocchi mentre non vi è un limite nel numero di blocchi collegabili col primo metodo.

Il circuito seguente richiede che le istruzioni OR LOAD siano convertite in codice mnemonico perché le tre coppie di contatti sono collegate in parallelo.



Il primo contatto di ciascuna coppia viene convertito in LOAD con il bit operando associato e quindi posto in AND con l'altro contatto.

I primi due blocchi possono essere codificati per primi, seguiti da OR LOAD, dall'ultima coppia di contatti blocco, e da un altro OR LOAD; oppure si possono codificare prima i tre blocchi seguiti da due OR LOAD.

La figura seguente mostra i codici mnemonici per entrambi i metodi.

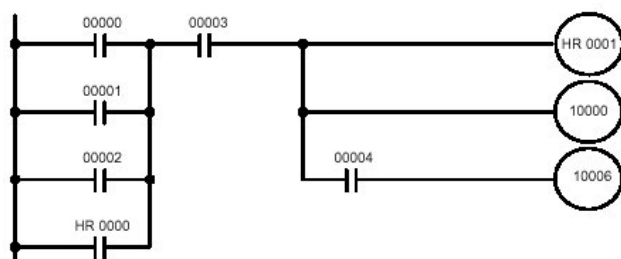
Si ricorda ancora che con il metodo a destra è possibile collegare solo un massimo di otto blocchi mentre non vi è un limite nel numero di blocchi collegabili col primo metodo.

Indirizzi	Istruzioni	Dati
00000	LD	00000
00001	AND NOT	00001
00002	LD NOT	00002
00003	AND NOT	00003
00004	OR LD	—
00005	LD	00004
00006	AND	00005
00007	OR LD	—
00008	OUT	10001

Indirizzi	Istruzioni	Dati
00000	LD	00000
00001	AND NOT	00001
00002	LD NOT	00002
00003	AND NOT	00003
00004	LD	00004
00005	AND	00005
00006	OR LD	—
00007	OR LD	—
00008	OUT	10001

4.4.10 Come codificare più istruzioni

Se ci sono più di istruzioni di uscita eseguite con la stessa condizione di esecuzione, queste devono essere inserite consecutivamente seguendo l'ultima condizione sulla linea di istruzione. Nell'esempio che segue l'ultima linea di istruzione contiene una condizione in più che corrisponde ad un AND con 00004.



Indirizzi	Istruzioni	Dati
00000	LD	00000
00001	OR	00001
00002	OR	00002
00003	OR	HR 0000
00004	AND	00003
00005	OUT	HR 0001
00006	OUT	10000
00007	AND	00004
00008	OUT	10006

4.4.11 Salti

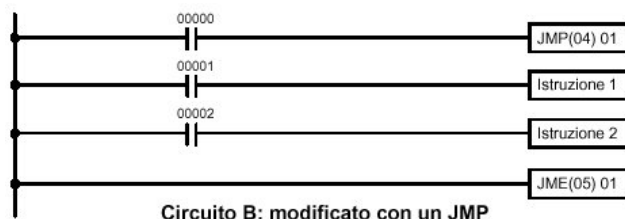
Una parte del programma può essere saltata in conformità ad una certa condizione operativa. Sebbene ciò sia simile a quanto avviene quando la condizione operativa per un Interblocco è uguale a OFF, con le istruzioni di salto, gli operandi di tutte le istruzioni mantengono il loro stato. L'istruzione di Salto può perciò essere usata per controllare dei dispositivi che richiedono un'uscita ritentiva, ad esempio dispositivi pneumatici e idraulici. L'istruzione di interblocco può essere usata per controllare dispositivi che non richiedono la ritenzione delle uscite, ad esempio la strumentazione elettronica.

I salti si ottengono tramite le istruzioni di Salto JMP(04) e Fine Salto JME(05). Se la condizione operativa del JMP(04) è ON il programma viene eseguito normalmente come se questa istruzione non esistesse. Se la condizione operativa del salto è OFF, l'esecuzione del programma ignora le istruzioni comprese tra il JMP e il JME senza modificare alcuno stato.

A tutte le istruzioni JMP e JME vengono assegnati dei numeri tra 00 e 99. Ci sono due tipi di salto. Il numero del salto ne identifica il tipo.

Una istruzione di salto può venire identificata usando un numero tra 01 e 99 una sola volta, cioè ciascun numero viene usato una volta sola nella istruzione JMP e una volta nella JME.

Quando viene eseguita l'istruzione di JMP, il controllo passa immediatamente dopo all'istruzione JME con lo stesso numero, come se non ci fosse nessuna istruzione compresa tra il JMP e il JME. Il circuito B può venire modificato come mostrato qui sotto per utilizzare le istruzioni di salto. Sebbene 01 sia stato usato come numero di salto, qualsiasi altro numero tra 02 e 99 potrebbe venire assegnato ad altre istruzioni di salto in altre parti del programma.

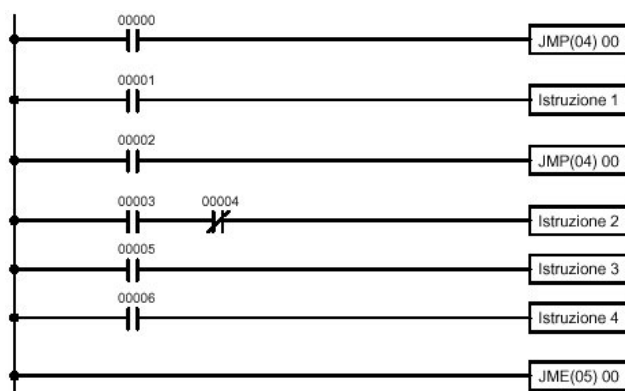


Indirizzi	Istruzioni	Dati
00000	LD	00000
00001	JMP(04)	01
00002	LD	00001
00003	Istruzione 1	
00004	LD	00002
00005	Istruzione 2	
00006	JME(05)	01

Rispetto alle precedenti configurazioni, quando il bit 00000 è OFF, il tempo di esecuzione del circuito B così modificato è più breve.

L'altro tipo di istruzione di salto, viene creata assegnando al JMP il numero 00. In questo caso è possibile definire un numero di salti JMP(04) desiderato. Inoltre possono venire usati anche più JMP 00 consecutivi senza alcun JME 00 tra di essi. Quando si utilizza il numero 00 per l'istruzione di salto, il programma non esegue le istruzioni comprese il JMP 00 e JME 00. Anche in questo caso lo stato delle istruzioni comprese in una sezione di Salto, non viene modificato, però la ricerca della istruzione di Fine Salto JME(05) 00 comporta un leggero prolungamento del tempo di scansione.

Le istruzioni di Salto non influenzano minimamente lo stato delle istruzioni tra il JMP e JME.



Indirizzi	Istruzioni	Dati
00000	LD	00000
00001	JMP(04)	00
00002	LD	00001
00003	Istruzione 1	
00004	LD	00002
00005	JMP(04)	00
00006	LD	00003
00007	AND NOT	00004
00008	Istruzione 2	
00009	LD	00005
00010	Istruzione 3	
00011	LD	00006
00012	Istruzione 4	
00013	JME(05)	00

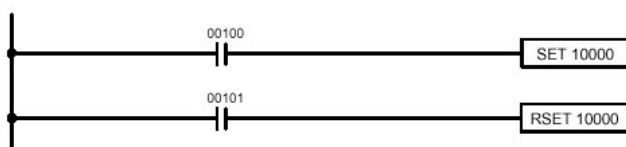
4.4.12 SET e RESET

Le istruzioni di SET e RESET sono molto simili a OUTPUT e OUTPUT NOT tranne per il fatto che cambiano lo stato bit solo a fronte di una condizione di esecuzione ON. Entrambe le istruzioni non alterano lo stato del bit a fronte di condizioni di esecuzione OFF.

L'istruzione SET imposterà il bit a ON quando la condizione di esecuzione va ad ON, ma a differenza dell'istruzione OUTPUT, non porterà il bit ad OFF quando la condizione operativa cambierà ad OFF.

L'istruzione RESET imposterà il bit a OFF quando la condizione di esecuzione va ad ON ma a differenza dell'istruzione OUTPUT NOT, non porterà il bit ad ON quando la condizione operativa cambierà ad OFF.

Nell'esempio che segue 10000 verrà portato ad ON quando 00100 va ad ON e rimarrà ad ON a prescindere dallo stato di 00100. Quando invece 00101 va ad ON, RESET porrà 10000 ad OFF.

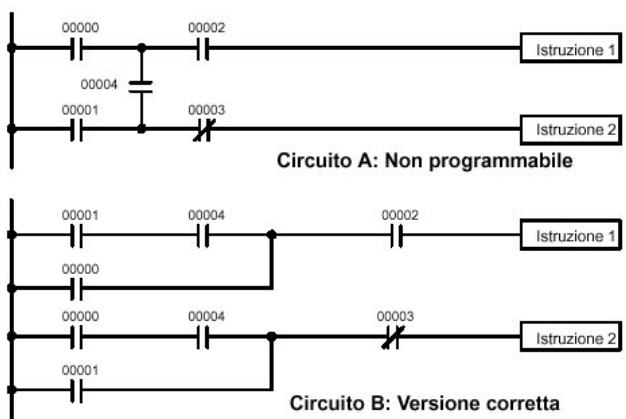


Indirizzi	Istruzioni	Dati
00000	LD	00100
00001	SET	10000
00002	LD	00101
00003	RSET	10000

4.4.13 Accorgimenti di programmazione

Il numero di contatti che possono venire collegati in serie o in parallelo è illimitato. Sebbene possano venire scritti circuiti molto complessi non è possibile posizionare nessun contatto sulle linee verticali che uniscono due righe circuitali.

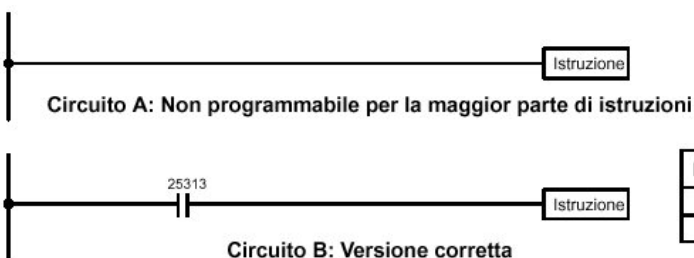
Il circuito A mostrato qui sotto non è possibile e di conseguenza deve essere ridisegnato come circuito B. I codici mnemonici sono forniti solo per il circuito B in quanto la codifica del circuito A non può essere effettuata.



Indirizzi	Istruzioni	Dati
00000	LD	00001
00001	AND	00004
00002	OR	00000
00003	AND	00002
00004	Istruzione 1	
00005	LD	00000
00006	AND	00004
00007	OR	00001
00008	AND NOT	00003
00009	Istruzione 2	

Non c'è alcuna limitazione numerica all'uso di un contatto all'interno di un programma. Spesso i programmi vengono inutilmente complicati per cercare di minimizzare il numero di volte che un contatto viene usato.

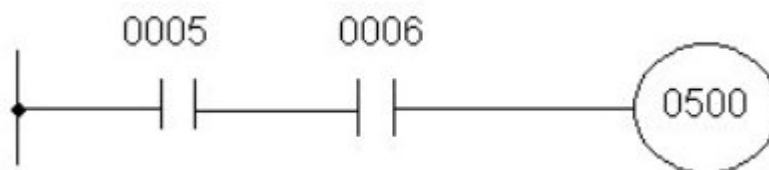
Ad eccezione delle istruzioni per le quali non è consentita alcuna condizione (ad esempio, INTERLOCK CLEAR e JUMP END), qualsiasi riga di istruzione richiede almeno una condizione che definisce la condizione di esecuzione dell'istruzione posta sul lato destro. Inoltre il circuito A, riportato di seguito, deve essere ridisegnato come circuito B. Se occorre eseguire sempre un'istruzione (se un'uscita deve essere sempre impostata su ON durante l'esecuzione del programma), è possibile utilizzare un Flag su ON (SR).



Indirizzi	Istruzioni	Dati
00000	LD	25313
00001	Istruzione	

4.5 Esempi applicativi di programmazione

Esempio n. 1



Consideriamo, per esempio, lo schema di figura. Si tratta di due contatti in serie (AND), la cui simultanea chiusura permette di eccitare una bobina di uscita. Per codificare questo schema, dobbiamo in primo luogo specificare l'indirizzo di memoria (da non confondere con gli indirizzi dei canali I/O) in cui vogliamo che il programma abbia inizio.

Utilizziamo a tale scopo l'indirizzo 0000. In tale indirizzo scriviamo una istruzione che indica la prima operazione del programma: LD (LOAD). Questa istruzione è utilizzata ogni volta che inizia una nuova riga circuitale dalla barra verticale. Sul foglio di programmazione, accanto all'indirizzo 0000 riportiamo l'istruzione LD.

Indirizzi	Istruzioni	Dati
0000	LD	0005
0001	AND	0006
0002	OUT	0500
0003	END	

Poiché il primo contatto del circuito deve essere memorizzato come dato dell'istruzione LD, lo scriveremo nella colonna dei dati. Nel nostro caso, il dato è 0005, ossia l'indirizzo (questa volta di I/O) che abbiamo assegnato al contatto. Con questa prima istruzione abbiamo ordinato al PLC di prendere in carico lo stato del contatto 0005, che verrà memorizzato.

L'elemento successivo del diagramma a relè è l'istruzione AND a cui nel programma assegneremo l'indirizzo di memoria 0001. Il dato per l'istruzione AND è il secondo contatto, che ha in questo caso l'indirizzo 0006. Sul foglio di programmazione, lo scriveremo accanto al codice AND.

Ora ci serve una istruzione per mettere in uscita il risultato dei due contatti in serie: l'istruzione OUT (OUTPUT). Scriveremo questa istruzione nell'indirizzo 0002 e sceglieremo l'indirizzo del relè di uscita sul quale inviare il segnale. Abbiamo scelto il relè 0500, riportato nella colonna dei dati. Resta soltanto da dire al PLC che il programma è finito. Scriveremo quindi una istruzione END nell'indirizzo 0003.

Esempio n.2

Proviamo ora con un programma un po' più complesso. Immaginiamo un circuito di controllo per una macchina di imballaggio. Il circuito serve a rilevare e contare il numero di prodotti trasportati su una linea di assemblaggio robotizzata. Non appena sono stati contati cinque prodotti, il circuito eccita un solenoide (elettrovalvola) che riceve la corrente per due secondi e viene quindi diseccitato.

Seguiamo le fasi di programmazione descritte.

➤ Prima fase:

Determinare che cosa il sistema di controllo deve fare e secondo quale sequenza.

- Una fotocellula conta il passaggio dei pezzi sulla linea di trasporto
- Un contatore memorizza il n° di pezzi transitati
- Dopo aver contato 5 pezzi, il sistema attiva una elettrovalvola che comanda il ciclo di imballaggio
- L'attuatore pneumatico di imballaggio deve restare attivo per 2 secondi

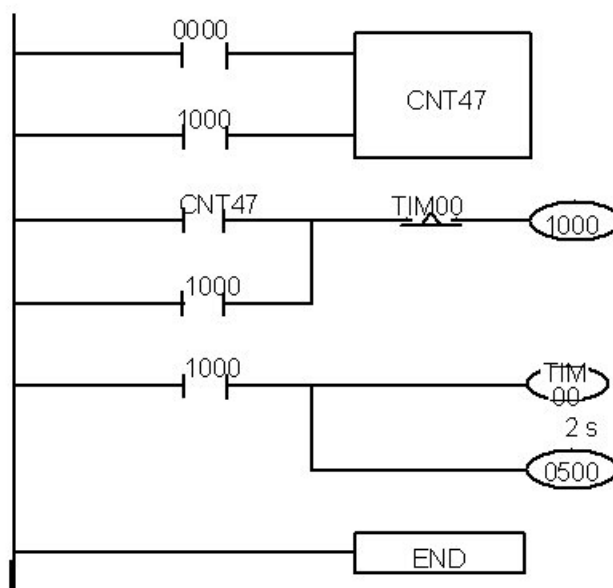
➤ Seconda fase:

Selezionare i dispositivi di ingresso e di uscita del PLC ed assegnazione indirizzi ai componenti che formano il circuito

Sono presenti un dispositivo di ingresso (fotocellula), un dispositivo di uscita (elettrovalvola), un relè ausiliario di controllo, un temporizzatore ed un contatore.

Fotocellula	Relè d'ingresso n. 0000
Uscita sul solenoide (attivazione elettrovalvola)	Relè d'uscita n. 0500
Relè di controllo (X1)	Relè ausiliario interno n. 1000
Contatore CC	CNT47
Temporizzatore T	TIM00

➤ Terza fase: il diagramma a relè che rappresenta questo circuito è riportato nella seguente figura:



- Quarta fase: dobbiamo ora codificare il diagramma a relè. Prima, però, indichiamo alcuni punti su cui fare attenzione:
- Poiché ai temporizzatori ed ai contatori devono essere assegnati dei numeri diversi (nel caso del C20 da 00 a 47), un modo comodo per eseguire l'assegnazione è iniziare da un estremo del campo per i temporizzatori e dall'altro estremo per i contatori. Per esempio, diamo al temporizzatore il numero 00 ed al contatore il numero 47;
 - I temporizzatori ed i contatori non possono generare direttamente una uscita, ma devono utilizzare un relè di uscita. Il contatto di tale relè può essere utilizzato più volte nel diagramma, mentre non si può più assegnare la stessa bobina;
 - La codifica deve avvenire seguendo il diagramma da sinistra a destra e dall'alto in basso.

In base a queste considerazioni si può quindi ottenere il programma codificato riportato in figura.

Indirizzi	Istruzioni	Dati
0000	LD	0000
0001	LD	1000
0002	CNT	47
0003	LD	CNT47
0004	OR	1000
0005	AND-NOT	TIM00
0006	OUT	1000
0007	LD	1000
0008	TIM	00
		#0020
0009	OUT	0500
0010	END	

Nel PLC la CPU effettua la lettura delle istruzioni presenti in memoria e le esegue in sequenza fino alla istruzione di fine programma. A questo punto viene eseguita la lettura degli ingressi e vengono pilotate le uscite sulla base dell'immagine delle stesse presenti in memoria.

Ciò significa che se il processo richiede tempi stretti è necessario adottare un PLC che abbia un tempo di scansione molto basso. In genere, come termine di paragone, si considera il tempo di esecuzione medio necessario per eseguire 1000 istruzioni.

Infatti, quanto più la CPU è rapida nell'eseguire le istruzioni, tanto più frequentemente verranno aggiornate le uscite e saranno acquisiti gli ingressi, consentendo al PLC di seguire l'evoluzione del processo in tempo reale.

5 Attuatori elettrici

Gli attuatori sono organi finali di un sistema automatico; la loro funzione è quella di eseguire le operazioni controllate dal sistema medesimo.

Nel campo della automazione il sistema attuatore comprende l'attuatore propriamente detto e l'organo trasmettitore, che consente di poter trasferire l'energia meccanica in punti diversi da quelli nei quali è stata generata e con caratteristiche che la rendano idonea ad essere utilizzata nella struttura meccanica dello specifico robot. E' tramite l'azione degli attuatori che, ad esempio, un manipolatore dà attuazione alle "decisioni" prese dagli organi programmatori delle operazioni: tra questi rivestono particolare importanza gli attuatori elettrici.

Agli attuatori impiegati nei sistemi di automazione, caratterizzati da un servizio intermittente, si chiede sostanzialmente di possedere elevate coppie allo spunto ed elevate accelerazioni con una debole inerzia del rotore: anche le velocità richieste non presentano di solito valori elevati.

A titolo di esempio si può riportare qualche dato numerico:

- coppia 3 - 4 N m
- velocità 300 - 400 giri/min
- accelerazione 5000 rad/sec²

Il rapporto fra la coppia massima sviluppabile ed il momento d'inerzia del rotore è quasi sempre il parametro più importante. Tuttavia sono richiesti anche motori con coppie assai più elevate di quella indicata e più alte velocità. Le coppie ottenibili non superano solitamente qualche decina di N. m.

Gli attuatori elettrici impiegati nella automazione sono i motori a corrente continua, quelli a corrente alternata ed i motori passo-passo.

5.1.1 Motori a corrente continua

Tra gli attuatori di movimento e spostamento, i motori in corrente continua hanno sicuramente una posizione di primo piano soprattutto nei casi in cui non è richiesta una eccessiva potenza. I motori elettrici in corrente continua per l'automazione devono avere caratteristiche diverse da quelli destinati ad un servizio più o meno continuo con velocità pressoché costante.

In particolare l'impiego degli azionamenti elettrici rispetto a quelli idraulici o pneumatici è rapidamente aumentato in virtù di:

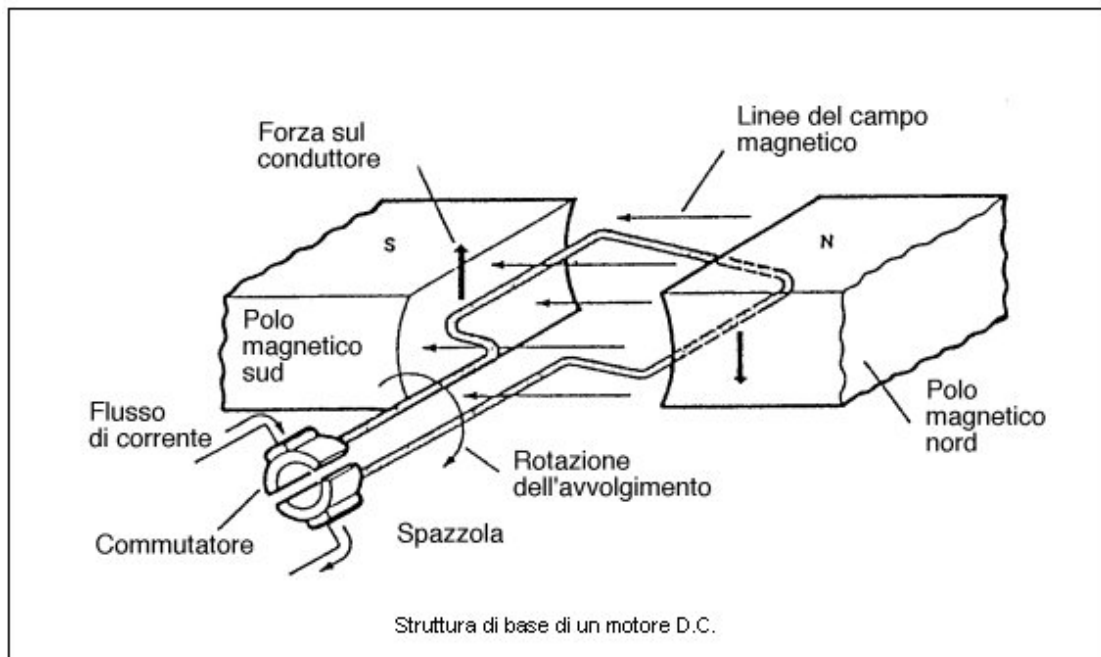
- facilità di manutenzione
- eliminazione dei riduttori di velocità
- possibilità di montaggio diretto sugli assi
- precisione ed affidabilità del comando
- limitata rumorosità.

Inoltre notevoli sono stati recentemente i progressi nei magneti permanenti, che hanno consentito l'eliminazione degli induttori, e nei materiali magnetici a elevata permeabilità, che hanno consentito un miglioramento delle caratteristiche rotoriche in ordine alla dissipazione di calore.

La presente nota si propone di descrivere i tipi di motori in corrente continua più in uso, fino a quelli più recenti, destinati ad avere un impiego sempre maggiore nei robot di piccole e medie dimensioni.

Per introdurre l'argomento si richiama brevemente il principio di funzionamento di un motore DC (*Direct Current*).

Nella figura è illustrata la struttura di base. Il principio di funzionamento si basa sul fatto che, su un filo percorso da corrente elettrica, nasce una forza quando il filo stesso si trova in un campo magnetico statico. L'avvolgimento di rotore è collegato a segmenti di commutazione (collettore) e riceve corrente attraverso spazzole che strisciano sul collettore stesso.



Il collettore e le spazzole formano un commutatore per la corrente del rotore, in modo che essa scorra sempre nella direzione corretta e fornisca una coppia che determina la rotazione in un senso.

I motori a corrente continua sono costituiti quindi di uno statore realizzato in ferro, con espansioni polari, e di un rotore, anch'esso in ferro, nelle cui cave è situato l'avvolgimento costituito da fini matasse ai cui estremi sono collegate le lame del collettore. Attorno alle espansioni polari di uno statore sono avvolti gli avvolgimenti di eccitazione o di campo che producono il campo magnetico principale. Il circuito di rotore è percorso dalla corrente di indotto o di armatura mentre nelle lame del collettore avviene la commutazione tramite le spazzole.

I motori elettrici in corrente continua sono gli attuatori più comunemente usati nei sistemi di controllo per piccole potenze (meno di 100 W).

Il sistema di eccitazione impiegato in questo tipo di motori è normalmente quello che prevede l'eccitazione stessa attuata indipendentemente: infatti, in tal caso, operando il cosiddetto "controllo di armatura", si controllano bene sia la velocità che la coppia del motore.

Prima di descrivere il funzionamento dei vari tipi di motori DC per automazione è opportuno accennare alle caratteristiche elettriche e meccaniche desiderate. Esse sono:

- la coppia C sviluppata deve essere ad andamento lineare con la velocità di rotazione ω
- a velocità di rotazione $\omega = d\theta / dt$ costante la coppia C deve essere proporzionale alla tensione applicata V
- la potenza P deve essere proporzionale all'effettiva richiesta del carico e, dai due precedenti punti, avendo supposto le caratteristiche lineari, per una determinata tensione, raggiungerà il suo massimo per valori di ω e V pari alla metà dei valori massimi
- poiché il sistema automatico deve esercitare la sua azione con prontezza occorre che l'accelerazione, la decelerazione e l'inversione di marcia seguano con fedeltà il segnale di ingresso.

5.1.2 Motori "brushless" a magneti permanente

La principale limitazione di un motore in c.c. è il sistema collettore - spazzole, sede di usura e scintillii.

Nel motore senza spazzole, o brushless, la funzione di questo sistema è svolta da una logica elettronica assistita da un trasduttore di posizione angolare dell'albero (spesso un resolver): la logica riconosce gli avvolgimenti perpendicolari al campo induttore, e li alimenta.

Grazie a questa soluzione, che vede l'alimentazione degli avvolgimenti realizzata per via elettronica e non meccanica, gli avvolgimenti possono essere trasferiti sullo statore, che scambia le proprie funzioni con quelle del rotore, costruito con magneti permanenti che danno luogo ad un campo magnetico rotante.

In automazione e in robotica si impiegano preferibilmente motori con induttore costituito da magneti permanenti poiché tale soluzione offre, rispetto ai motori DC tradizionali, i seguenti vantaggi:

- eliminazione dell'eccitazione esterna con semplificazione dei cablaggi
- eliminazione degli induttori
- annullamento delle perdite di eccitazione
- caratteristica coppia-velocità di rotazione molto lineare in tutto il campo di lavoro
- coppia proporzionale, in prima approssimazione, alla corrente di armatura

Nella loro costruzione si impiegano i seguenti tipi di magneti permanenti:

- ceramici
- a terre rare - cobalto

5.1.3 Motori a corrente alternata

L'impiego dei motori a corrente alternata nella robotica e in tutto il settore dei controlli automatici è sostanzialmente limitato al motore bifase. Il motore trifase è difficilmente impiegato per le difficoltà ad ottenere una elevata coppia allo spunto e per le difficoltà di regolazione della velocità.

Nell'ambito delle piccole potenze (da qualche watt a qualche decina di watt) il motore bifase è risultato spesso preferibile al motore a corrente continua.

Esso è realizzato normalmente con un rotore a gabbia di scoiattolo. I due avvolgimenti sono alimentati con tensioni sinusoidali sfasate di $\pi/2$: una è la tensione di controllo e l'altra di riferimento. La tensione di controllo può variare in ampiezza per realizzare il controllo di velocità.

Il compito dei due avvolgimenti è quello di generare un campo magnetico rotante sotto la cui azione il rotore viene trascinato in rotazione. Elevando opportunamente la resistenza rotorica si riesce a distendere la caratteristica meccanica del motore fino ad ottenere una forma pressoché lineare come richiesto.

Naturalmente si abbassa notevolmente il rendimento ed è per questo che il motore bifase non si costruisce che per piccole potenze.

L'alimentazione di un motore in corrente alternata deve presentare una uscita variabile in tensione e frequenza.

Lo schema base più utilizzato è costituito da due stadi in cascata: il primo converte la tensione alternata di rete in tensione continua a dato valore, il secondo effettua una conversione continua-alternata a data frequenza.

L'inverter è chiamato a tensione impressa perché un grosso filtro capacitivo fissa rigidamente la tensione di alimentazione al secondo stadio, in questo modo la tensione di uscita verso il motore non viene influenzata dalla natura del circuito.

La corrente erogata è approssimativamente costante.

Gli azionamenti in c.a. a frequenza variabile presentano prerogative non riscontrabili nei corrispondenti c.c. : una delle principali prerogative è la facilità dell'inversione del senso di marcia. Mentre nel controllo della velocità dei motori in c.c. ciò si ottiene invertendo la tensione di armatura, nel caso c.a. basta semplicemente invertire due delle tre fasi di alimentazione.

Altre prerogative sono la frenatura, la robustezza, il minor costo e l'affidabilità.

5.1.4 Motori passo-passo

I motori passo-passo sono componenti elettromagnetici che trasformano un impulso elettrico in forma meccanica, con un determinato e costante incremento di rotazione dell'albero. Sono anche chiamati "stepper motors".

Questi motori si basano sul principio di funzionamento del campo rotante a scatti.

Nella rotazione si può andare avanti o indietro e questo dipende dall'ordine con cui i suoi avvolgimenti sono eccitati.

Il motore passo-passo può essere paragonato ad una serie di avvolgimenti disposti in cerchio, avvolgimenti che, quando sono eccitati, reagiscono successivamente su un nucleo di ferro dolce o magnete permanente, facendolo ruotare di un angolo.

Nel passaggio da una bobina all'altra si ottiene un movimento non lineare di $2 / n$ radianti ogni volta (dove n è il numero delle fasi).

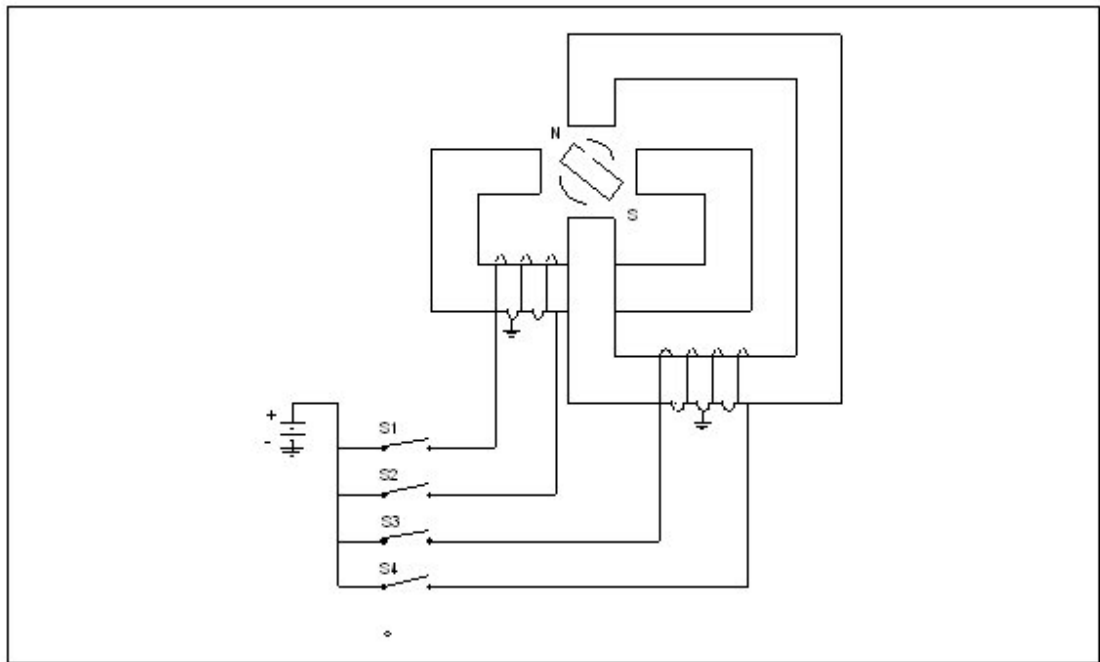
La velocità in giri al minuto sarà:

$$N = 60 \frac{f}{n}$$

La buona precisione di posizionamento ne permette un impiego in catena aperta, cioè senza retroazione con conseguente risparmio dell'elettronica di controllo.

I motori passo-passo sono di tipo sincrono, esistendo una corrispondenza fra segnale di alimentazione e posizione del rotore

Per meglio comprendere il principio di funzionamento di questo tipo di motore si immagini, per semplicità, che quest'ultimo sia schematizzabile come mostrato in figura (struttura di base, poli magnetici e circuiteria di azionamento).



Schema di principio del motore passo-passo

Ad ogni passo si avrà una certa oscillazione la cui ampiezza dipende dal rapporto coppia resistente / momento di inerzia del carico, nel senso che un elevato rapporto aumenta lo smorzamento.

La circuiteria di azionamento risiede in moduli esterni. Il principale inconveniente di questo motore è la perdita del passo e quindi del sincronismo, cosa che si verifica quando la coppia resistente è superiore a quella motrice: in tal caso il motore si arresta e riprende a muoversi quando la frequenza di commutazione della corrente negli avvolgimenti torna al di sotto della frequenza di avvio-arresto, ovvero della massima frequenza a cui il motore è in grado di effettuare il singolo passo. Un altro svantaggio è la potenza limitata cui già si è accennato. Queste due caratteristiche limitano l'impiego del motore alle applicazioni in cui sono in gioco piccoli carichi.

I parametri caratteristici del motore sono i seguenti:

- Coppia massima rotazione	0,2 N m a 500 passi / s
	0,4 N m a 200 passi / s
- Velocità massima	1000 - 2000 passi / s
- Angolo corrispondente al passo	1,8°
- Risoluzione	lunghezza minima del passo: qualche frazione di grado

Si hanno i seguenti tipi di motori passo-passo:

a) Motori a magnete permanente

Sono quelli sostanzialmente descritti nel punto precedente.

b) Motori a riluttanza variabile

Hanno lo statore con un certo numero di poli salienti avvolti e il rotore sagomato con denti o espansioni in ferro dolce. I denti del rotore e dello statore rendono variabile la riluttanza del traferro e con i poli contribuiscono a determinare il passo del motore.

Quando la corrente percorre un determinato avvolgimento, si sviluppa una coppia che fa girare il rotore fino alla posizione a riluttanza magnetica minima e mettendo successivamente in tensione un altro avvolgimento, la configurazione a riluttanza minima cambia provocando il movimento del motore.

Con una opportuna sequenza di alimentazione è possibile creare un susseguirsi di posizioni di equilibrio e quindi la rotazione.

c) Motori ibridi

Sono basati su una tecnica composta. La loro coppia è proporzionale alla corrente e possono avere un numero elevato di passi a giro.

I magneti permanenti del rotore, che servono a polarizzare i poli salienti, creano un flusso che si richiude attraverso la carcassa.

Gli statori sono disposti in modo identico e gli avvolgimenti sono comuni alle due parti.

Normalmente la scelta avviene tra i motori a magnete permanente e motori ibridi, in quanto quelli a riluttanza variabile si impiegano quando occorre riferirsi a vari parametri.

La seguente tabella riporta le caratteristiche principali dei motori passo-passo.

Tipo motore	Magnete perm.	Rilutt. variabile	Ibrido
Costo	basso	medio-alto	alto
Efficienza	alta	bassa	media
Coppia residua	alta	media	media
Coppia dinamica	bassa	media	media
Inerzia rotore	alta	bassa	bassa
Velocità	media	alta	molto alta
Smorzamento	buono	scarso	buono
Potenza erogata	alta	bassa	medio-alta
Angolo tipico di passo	1.5° - 1.8° - 5.9° - 6.7° - 15° - 18° - 25° - 30°	1.8° - 7.5° - 15° - 31°	0.9° - 1.8° - 2° - 3.6°

6 I sensori nell'automazione

E' noto che le capacità di manipolazione dell'uomo sono dovute, più che al suo apparato motorio flessibile ma impreciso, alla fantastica sofisticazione del suo sistema sensoriale ed alla capacità di elaborazione del suo cervello.

Se si vuole quindi ottenere da un robot una capacità di manipolazione che sia, pur lontanamente, paragonabile a quella dell'uomo, occorre dotare il robot di sensori di diverso tipo e sfruttare in maniera più completa possibile tutte le informazioni che da questi provengono.

Per quanto riguarda le applicazioni ai robot, un sensore può essere definito come un dispositivo che emette segnali elettrici dipendenti, secondo una legge nota, da uno o più parametri fisici del robot e/o dal mondo che lo circonda.

Questa definizione include qualunque tipo di sensore collegabile a robot industriali, dai più semplici ai più complessi.

Più importante della definizione è però una classificazione dei sensori. Mentre molti hanno tentato classificazioni in base al tipo o in base alle grandezze che essi misurano, è molto più utile ed interessante farne una in base all'uso che di ogni sensore si fa all'interno della macchina perché è questo il fattore discriminante riguardo alle problematiche di collegamento e di gestione da parte dei sistemi di controllo.

Secondo questo criterio, si possono individuare tre classi di sensori:

- Classe A - Sensori usati per il corretto funzionamento della macchina
- Classe B - Sensori usati per garantire la sicurezza (operatori compresi)
- Classe C - sensori usati per il corretto funzionamento del programma del robot.

Nella prima classe sono compresi, oltre ai dispositivi che negli azionamenti retroazionati forniscono le informazioni di velocità e posizione, anche gli interruttori di fine corsa o simili, quando vengono usati come riferimenti di posizione (ad esempio negli azionamenti passo-passo), e tutti i dispositivi le cui informazioni sono necessarie al funzionamento del robot.

Alla seconda classe appartengono tutti i dispositivi che presiedono alla sicurezza della macchina e dell'ambiente circostante (fine-corsa e sensori di sforzo eccessivo, sbarramenti fotoelettrici, pulsanti di emergenza, ecc...).

Nella terza classe, infine, sono compresi tutti i sensori che non fanno parte delle prime due.

A proposito di questa classificazione, è opportuno osservare che i sensori di classe B sono necessariamente dispositivi binari: qualora essi siano implementati con rilevatori analogici, è necessario confrontare la grandezza rilevata con soglie opportune, ed il risultato di questa operazione è l'unica informazione interessante.

Anche se non è possibile dare una metodologia generale per il collegamento dei sensori, perché le strutture dei sistemi di controllo possono essere molto diverse fra loro, si possono fare alcune considerazioni di carattere generale.

I sensori di classe A devono essere collegati direttamente ai dispositivi che azionano i singoli attuatori.

Per quanto riguarda i sensori di classe B, vale un ragionamento analogo: essi devono essere collegati al sistema di controllo al livello più basso possibile, in modo che eventuali malfunzionamenti dell'hardware non ne compromettano il buon funzionamento. Un esempio di questo tipo di collegamento si trova in quei robot dove i sensori di classe B agiscono direttamente sugli alimentatori dei motori, o sui microcalcolatori che li controllano. E' evidente che in questo caso, oltre ad intraprendere opportune azioni all'insorgere di situazioni di emergenza, il sistema deve essere in grado di informare i livelli più alti dell'accaduto, in modo che il programma del robot possa essere interrotto e sostituito con opportune routine di uscita dalla situazione di emergenza.

I sensori di classe C di basso livello, infine, devono essere collegati al livello più alto, perché le loro informazioni sono utilizzate direttamente dalla unità che esegue il programma di utente.

6.1 Sensori per il controllo di movimento e di spostamento

Nel campo della robotica i sensori sono importanti per affrontare i seguenti problemi:

- controllo dei movimenti dei vari giunti del robot, del loro posizionamento iniziale e finale, della correttezza della traiettoria in termini di percorso, velocità ed accelerazione.
- capacità del sistema di tener conto del mondo esterno affinché il robot possa essere in grado di sostituire l'uomo in termini di capacità di "vedere", "sentire" e "prendere" oggetti con una determinata pressione.

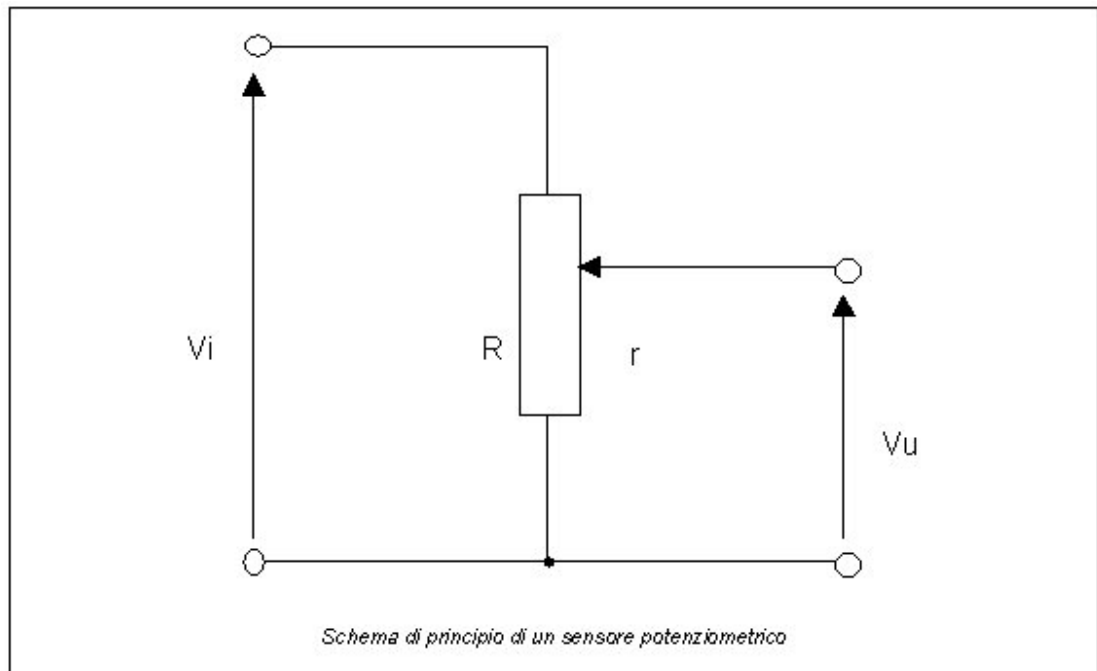
6.1.1 Potenzimetri

I più semplici sensori impiegati per questo scopo sono i potenziometri, il cui principio è quello di convertire una posizione in un valore di resistenza elettrica. Il passaggio da posizione a variazione di resistenza e infine a variazione di tensione è molto semplice. Infatti la tensione V_u corrispondente ad una data posizione è fornita dall'espressione:

$$V_u = V_i \frac{r}{R}$$

in cui r rappresenta la porzione di resistenza inserita rispetto alla massa, mentre R è la resistenza di tutto il potenziometro.

Il valore di V_u dipende dal valore di V_i che alimenta il potenziometro. V_i può essere indifferentemente una tensione continua o alternata.



Si possono avere potenziometri a spostamento lineare o a spostamento angolare, a un giro o a più giri. Nel caso dei tipi a spostamento angolare vale la seguente relazione:

$$V_u = \frac{V_i}{\alpha_{\max}} \alpha$$

dove $\alpha_{\max}$ è il massimo angolo di corsa del cursore.

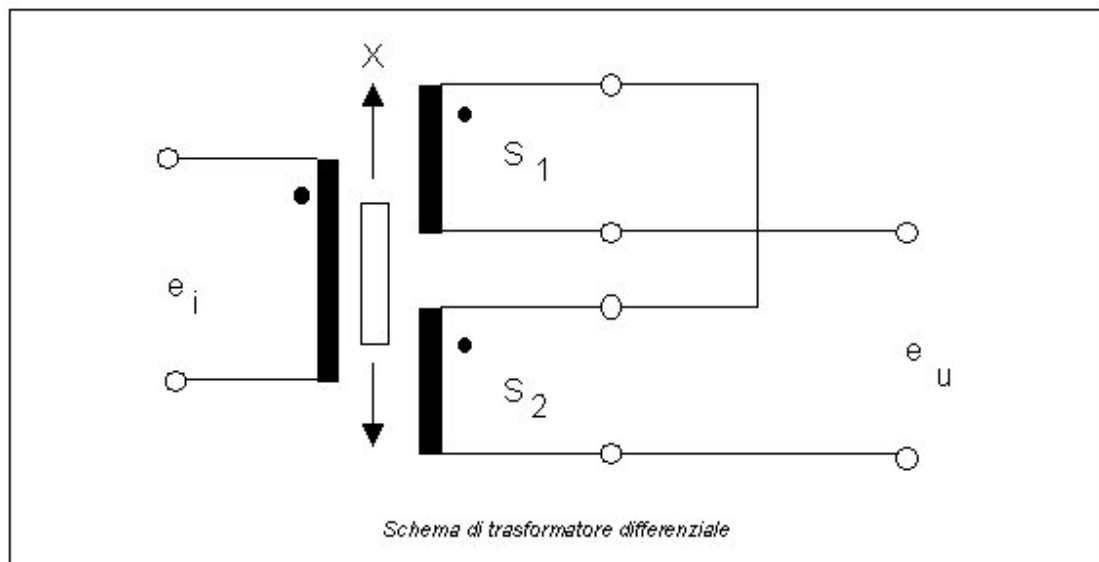
I potenziometri adoperati come trasduttori di posizione sono contraddistinti dalle seguenti caratteristiche:

- **linearità:** un potenziometro si dice lineare quando la variazione della tensione di uscita è legata allo spostamento da un coefficiente di proporzionalità costante per tutta la corsa del potenziometro. Qualsiasi variazione del coefficiente di proporzionalità viene riferita come errore di linearità.
- **risoluzione:** indica lo spostamento minimo del cursore per avere un delta di scostamento in tensione.
- **potenza dissipabile:** insieme al valore di R , la potenza dissipabile P_d definisce le caratteristiche elettriche del potenziometro.
- **rumore:** va sotto questo nome qualunque scostamento in tensione provocato da errori di linearità, da difetti meccanici, da scintillio, da polvere che interrompe la continuità del contatto.

6.1.2 Trasformatori differenziali variabili lineari (LVDT)

Il trasformatore differenziale variabile lineare (LVDT) si basa sul principio secondo il quale la tensione indotta su un avvolgimento secondario dipende dal coefficiente di accoppiamento tra primario e secondario.

Nella figura è riportato lo schema tipico di un trasformatore differenziale.



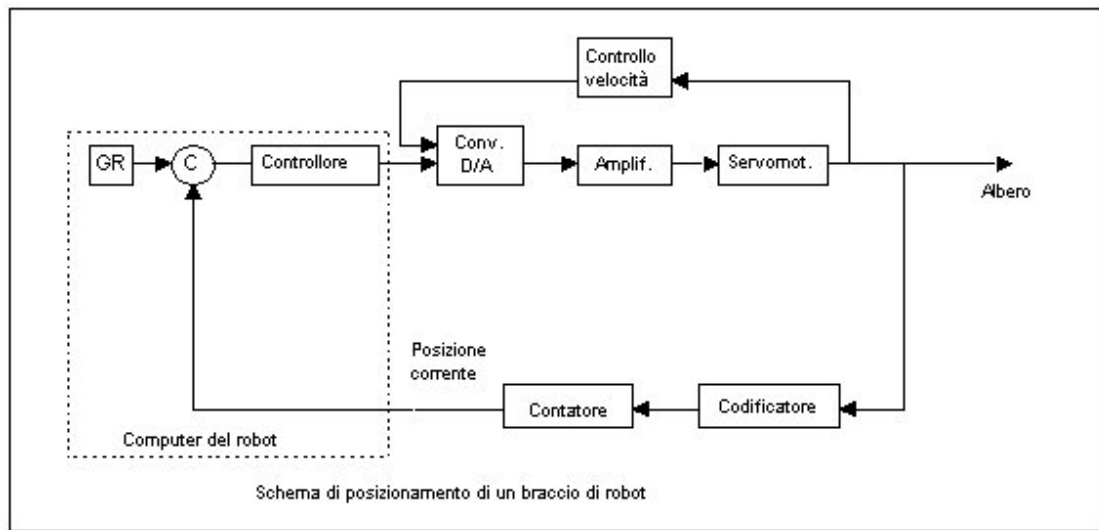
Quando l'avvolgimento primario viene eccitato dalla corrente alternata, sugli avvolgimenti secondari viene indotta una tensione. I due avvolgimenti secondari sono connessi in serie in opposizione cosicché le due tensioni sono in opposizione di fase. La tensione di uscita è così la differenza tra le due tensioni. Il coefficiente di accoppiamento dipende dalla posizione del nucleo. La tensione sarà nulla quando il nucleo è in posizione centrale; spostandosi il nucleo, la tensione dei due avvolgimenti varierà.

La sensibilità del sistema è abbastanza buona. Si può però osservare che:

- la tensione di uscita è rappresentata da due tratti di caratteristiche simmetriche e piuttosto lineari corrispondenti a spostamenti positivi e negativi
- il valore della tensione di uscita in corrispondenza dello zero meccanico non è nullo e ciò a causa degli accoppiamenti capacitivi e della presenza di armoniche.

6.1.3 Codificatori (encoder)

Allo scopo di illustrare il principio di funzionamento di un codificatore di posizione, comunemente chiamato "encoder", nella seguente figura viene presentato lo schema a blocchi di un sistema di posizionamento di un braccio di robot.



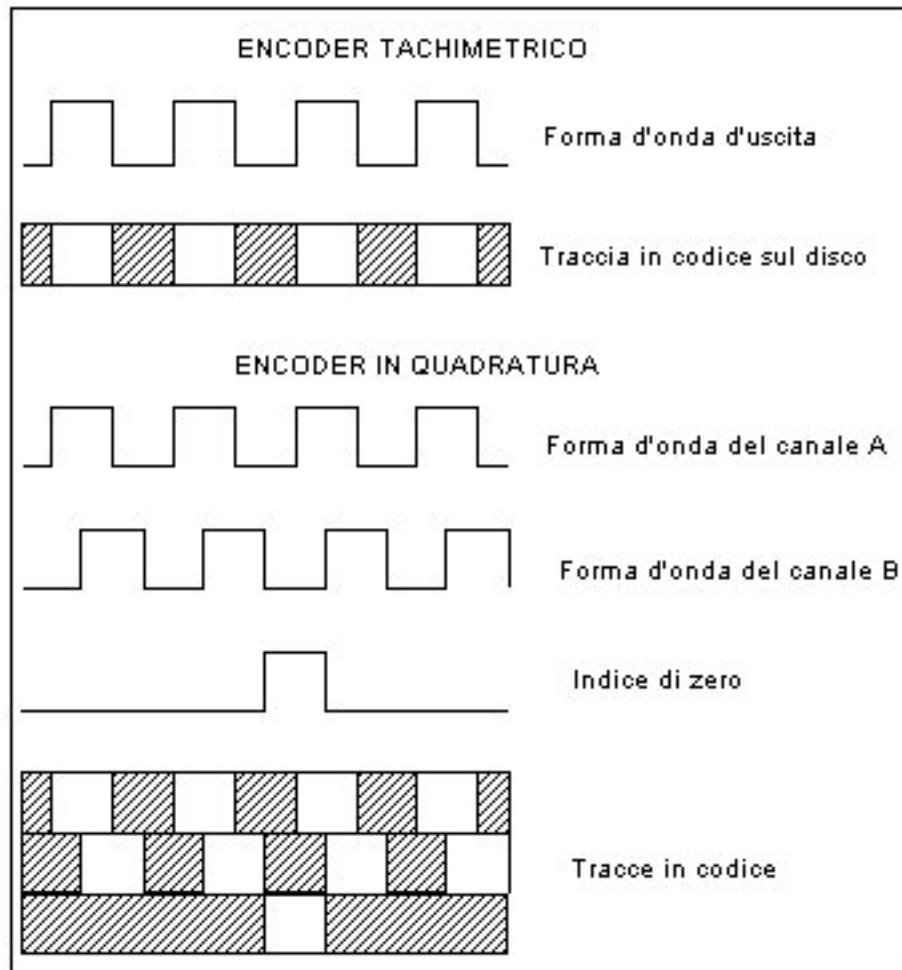
I posizionamenti vengono, di norma, eseguiti con motori in corrente continua, con regolazione ad anello chiuso. E' necessario, istante per istante, confrontare la posizione raggiunta con quella impostata e comportarsi analogamente anche per la velocità.

Su come opera il motore è opportuno fare delle considerazioni: nell'esempio, l'anello di velocità è gestito in maniera hardware, infatti un segnale proporzionale alla velocità e fornito da un trasduttore di velocità (dinamo tachimetrica) viene riportato nel sistema di controllo dove viene confrontato con la velocità impostata dall'operatore per apportare le correzioni necessarie. Il secondo anello, relativo al posizionamento, può essere realizzato prevalentemente in maniera hardware e software: per esempio, impiegando contatori up/down vengono contati gli impulsi inviati dal trasduttore encoder, e al processore non rimane che leggere i dati raccolti dal contatore a intervalli regolari. In ogni caso, un trasduttore di posizione molto impiegato nei sistemi robotici è l'**encoder**.

L'encoder è un dispositivo azionato da un albero rotante, il quale fornisce in uscita impulsi corrispondenti alla posizione angolare dell'albero. Esso contiene al suo interno un disco rotante diviso in segmenti alternativamente opachi e trasparenti.

Su un lato del disco è situata la sorgente luminosa e sull'altro una o più fotocellule. Il cambio della luminosità della fotocellula causato dalla rotazione del disco, produce gli impulsi di tensione (sotto forma di onda quadra) in uscita.

Lo spostamento angolare dell'albero è misurato dal numero di impulsi, i quali, se riferiti al tempo, esprimono la velocità (codificatore tachimetrico).



Usando due fotocellule in corrispondenza della stessa traccia del disco e sistemandole in modo che i segnali di uscita (onde quadre) siano sfasati di 90° l'uno rispetto all'altro, è possibile misurare, con la logica del circuito esterno, il senso di rotazione rilevando se il segnale A precede il B o viceversa. Esiste inoltre un'altra fotocellula che fornisce un impulso indicatore della posizione di riposo (riferimento zero).

I due canali in quadratura evitano anche l'errata misura nel caso di vibrazioni del codificatore tachimetrico.

L'encoder descritto viene detto di tipo **incrementale** in quanto i segnali di uscita sono proporzionali in modo incrementale allo spostamento effettuato.

Gli encoder incrementali possono fornire purtroppo errori, e quindi posizioni non corrette, a causa del conteggio errato provocato da disturbi, compresa l'eventuale interruzione della alimentazione. Questi errori possono essere eliminati con l'impiego di **encoder assoluti**, nei quali ad ogni posizione dell'albero corrisponde un valore ben definito.

Nel codificatore assoluto sono previste sul disco tracce capaci di fornire segnali in codice. Per rilevare la luce che passa attraverso il disco è prevista una fotocellula per ogni traccia.

I codici impiegati sono quelli di tipo binario, BCD, Gray ecc.; che permettono di ricavare anche decine di migliaia di bit per giro.

6.2 Sensori di prossimità

I sensori di prossimità sono in grado di percepire ed indicare la presenza di un oggetto all'interno di un determinato campo, in prossimità del sensore stesso.

Un sensore di prossimità può anche essere predisposto per misurare distanze: il sensore produce un segnale continuo (anziché on-off) proporzionale alla distanza. Mediante più misure lineari a direzioni diverse si possono poi agevolmente determinare posizioni ed orientamenti di pezzi semplici e complessi.

I sensori di prossimità possono basarsi su numerosi principi fisici: induttivo, capacitivo, magnetico, fluidico, luminoso ed ultrasonico.

6.2.1 Sensori fotoelettrici (o sensori ottici)

In questa categoria di sensori si possono annoverare dispositivi assai diversi per concezione, frequenza della radiazione usata e quindi per settore d'impiego.

I sensori ottici più tradizionali funzionavano con luce visibile. Essi impiegavano generalmente sorgenti a filamento e rilevatori di tipo a fotoresistenza. Questi dispositivi comportavano tuttavia alcuni inconvenienti fra i quali la durata limitata della sorgente (alcune migliaia di ore) e la velocità di risposta modesta.

Prestazioni nettamente superiori sono state ottenute impiegando emettitori a LED (per esempio arseniuro di gallio) e rivelatori al silicio (fotodiodo o fototransistor). La banda di emissione dell'arseniuro di gallio (circa 0.7 - 0.9 μm), infatti, si adatta bene alla regione di assorbimento del silicio.

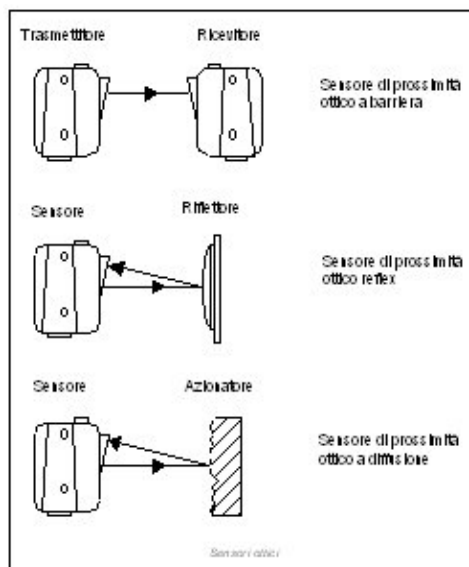
I moderni sensori ottici si suddividono in tre grandi famiglie:

- sensori di prossimità a barriera
- sensori di prossimità reflex
- sensori di prossimità a diffusione.

I sensori a barriera sono costituiti da un trasmettitore (emettitore) e da un ricevitore (rivelatore) separati tra di loro. Qualunque oggetto non trasparente interposto interrompe il raggio luminoso (light beam) e viene pertanto rilevato. Questo tipo di sistema è generalmente impiegato dove sono richieste elevate distanze d'intervento. I dispositivi commerciali a barriera funzionano infatti, a seconda dei tipi, con distanze trasmettitore / ricevitore comprese fra qualche metro.

I sistemi di funzionamento reflex, adatti per medie distanze di intervento, hanno il trasmettitore e il ricevitore integrati nello stesso contenitore. Viene usato un riflettore prismatico il quale riflette il raggio trasmesso e pertanto viene rilevato. Questo sistema viene utilizzato per piccole o medie distanze oppure laddove è impraticabile l'impiego di un trasmettitore e un ricevitore separati.

Naturalmente non può essere utilizzato per rilevare oggetti molto riflettenti come metalli levigati.

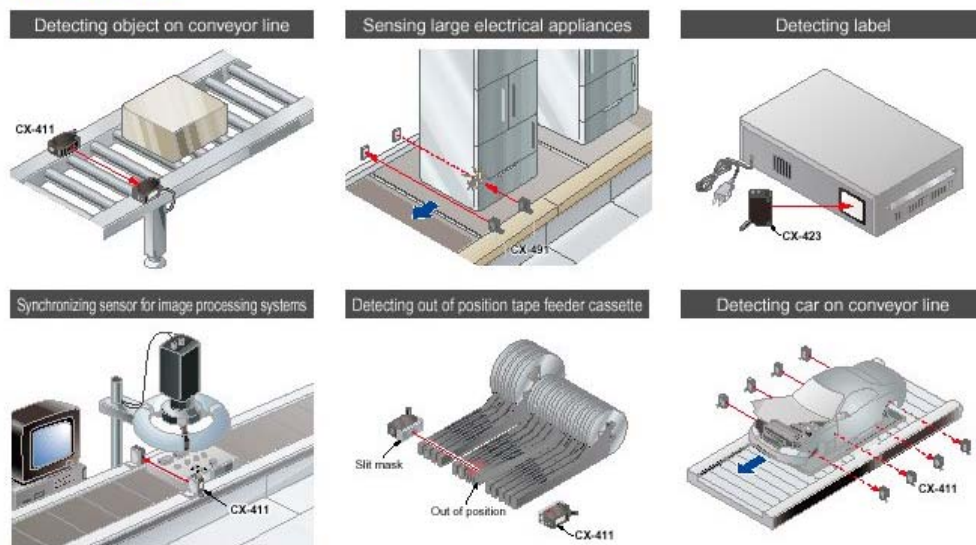


I sensori di prossimità a diffusione sono analoghi a quelli reflex, ma non richiedono l'impiego di un riflettore. La potenza emessa, infatti, è molto bassa ed è lo stesso oggetto da rilevare che riflette il raggio verso il ricevitore. La distanza d'intervento, per questi tipi di sensori, è naturalmente strettamente legata alle caratteristiche superficiali dell'oggetto da rilevare. Pertanto i costruttori normalmente equipaggiano tali sensori a diffusione con un regolatore di sensibilità per permettere agli utilizzatori di poterli adattare allo specifico impiego. Questi modelli vengono impiegati solo per piccole distanze (fino a qualche decina di cm).

I vantaggi principali dei sensori ottici sono rappresentati dalla elevata distanza d'intervento. D'altra parte, come si è visto, le caratteristiche d'intervento sono fortemente legate al tipo di superficie dell'oggetto da rilevare. Tale caratteristica, negativa per molte applicazioni, si rivela interessante per esempio per discriminare oggetti di colore diverso (per esempio rivelare la presenza di una etichetta su un contenitore).

L'introduzione di fibre ottiche ha permesso di risolvere problemi particolari di rilevamento ed i costruttori più evoluti forniscono infatti, oltre ai sensori, anche numerosi tipi di fibre ottiche da applicare ai sensori stessi.

APPLICATIONS



6.2.2 Sensori a principio induttivo

I sensori elettronici di prossimità a principio induttivo sfruttano il fenomeno dello smorzamento di un campo elettromagnetico per effetto delle correnti indotte (correnti di Foucault) in materiali conduttori posti nelle loro vicinanze.

La bobina di un circuito oscillante genera un campo elettromagnetico ad alta frequenza che induce, in azionatori metallici vicini, correnti parassite.

Queste correnti provocano una perdita di energia nell'oscillatore, smorzando l'ampiezza del segnale. La riduzione dell'ampiezza dell'oscillazione è rilevata da un amplificatore di soglia con isteresi che, a sua volta, comanda uno stadio amplificatore finale per l'azionamento di un carico esterno.



Essi si suddividono in due categorie: autoamplificati e non amplificati.

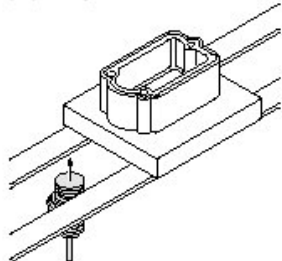
- I sensori autoamplificati si dividono a loro volta in sensori a corrente continua e sensori a corrente alternata.
- I sensori non amplificati sono costituiti da un oscillatore e vengono utilizzati per ottenere segnali a basso livello atti a comandare un amplificatore separato.

L'assenza di contatto meccanico fra azionatore e sensore consente, unitamente alle precedenti caratteristiche, una durata ed un numero di operazioni illimitate rispetto ad altri tipi di interruttori di prossimità, riducendo altresì ogni problema di manutenzione.

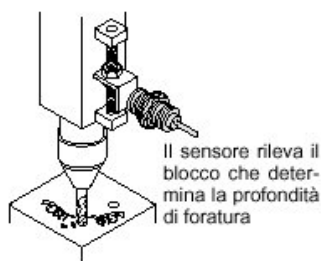
I sensori induttivi rappresentano senza dubbio i sensori di prossimità più diffusi su macchine automatiche e sono gli unici che, grazie alla maturità raggiunta dalla tecnologia, godono di una normalizzazione a livello internazionale (CENELEC).

APPLICAZIONI

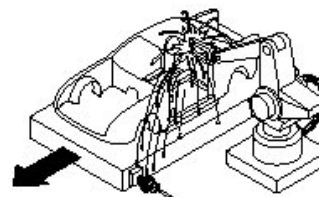
Rilevamento passaggio pallets in alluminio



Controllo profondità di foratura



Posizionamento oggetti in aree di saldatura (solo GX-F□U-J)



6.2.3 Sensori a principio capacitivo

I sensori di prossimità a principio capacitivo, o sensori capacitivi, sfruttano la variazione di capacità parassita che si crea tra sensore ed oggetto da rilevare. In corrispondenza di una determinata distanza dell'oggetto dalla faccia sensibile del sensore, entra in oscillazione un circuito e l'insorgere o il cessare di tale oscillazione viene sentito da un rilevatore di soglia che

comanda un amplificatore per l'azionamento di un carico esterno.



E' evidente che, dato il principio di funzionamento descritto, un sensore di prossimità capacitivo può essere utilizzato come rilevatore di oggetti metallici e non metallici come legno, liquidi, materiali plastici. Impieghi tipici si hanno per esempio nei dispositivi contapezzi, nei controlli di livello in recipienti, ecc.

I parametri sono simili a quelli dei sensori induttivi mentre le distanze di intervento per i tipi cilindrici di diametro 18 - 30 mm., molto diffusi nell'industria, sono nel campo 8 - 20 mm.

6.2.4 Sensori a ultrasuoni

I sensori di prossimità a ultrasuoni sfruttano l'emissione di impulsi sonori a frequenza elevata (40 - 200 KHz) per rilevare la presenza di oggetti posti nelle loro vicinanze grazie all'eco dovuta alla riflessione degli ultrasuoni da parte degli oggetti stessi.

Il segnale emesso è costituito in genere da un treno di impulsi viaggianti alla velocità del suono nell'aria (340 m/s circa).

L'emissione avviene tramite un apposito trasduttore elettroacustico di tipo piezoceramico. L'onda riflessa è rilevata da un analogo trasduttore la cui funzione è quella di riconvertire i segnali acustici in segnali elettrici.



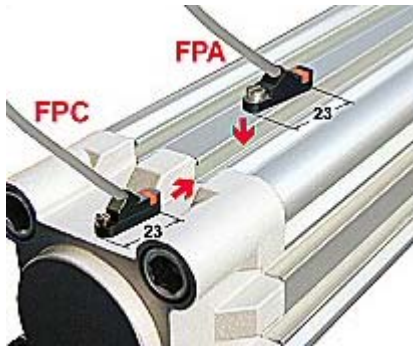
Nelle applicazioni dei sensori di prossimità interessa rilevare la presenza di un oggetto (azionatore) in un certo campo di rilevamento prefissato ed eventualmente programmabile in ampiezza dall'utilizzatore.

Pertanto il tempo di ritardo, cioè il tempo che intercorre fra l'istante di emissione di un impulso e l'istante di ricezione dello stesso, essendo proporzionale alla distanza azionatore / sensore, permette al sensore di stabilire se l'azionatore è o meno in campo.

L'impiego della tecnologia a ultrasuoni nel campo dei sensori di prossimità permette di ottenere distanze di intervento massime di ordine nettamente superiore rispetto a quelle ottenibili con la tecnologia induttiva o capacitiva a parità di dimensione geometrica del sensore. Il sensore ad ultrasuoni rappresenta dunque una vantaggiosa alternativa nei confronti dei sensori ottici, comunemente utilizzati per rilevare oggetti distanti; infatti le caratteristiche

di rilevamento di un sensore a ultrasuoni non dipendono dalle caratteristiche cromatiche superficiali dell'oggetto da rilevare e possono essere sentite anche superfici trasparenti.

6.2.5 Sensori magnetici a contatti reed



I sensori di prossimità magnetici a reed sono costituiti da due lamine di materiale ferromagnetico (ferro-nichel), all'interno di un contenitore in atmosfera di gas inerte. Le lamine sono rivestite con un materiale che migliora la conduttività e indurisce la superficie, per prevenire la formazione di microsaldature e microcrateri nel punto di contatto. Le lamine sono posizionate ad una piccola distanza fra loro. Quando la forza di attrazione tra le lamine supera la resistenza elastica delle lamine stesse, queste si flettono l'una verso l'altra, realizzando un contatto elettrico. La distanza di intervento è funzione della sensibilità del reed, della intensità del campo magnetico e anche della sua forma nel caso in cui non è uniforme (per es. nei cilindri con pistone magnetico). I materiali non ferrosi o ferrosi amagnetici, interposti tra sensore e magnete, non alterano il funzionamento del reed perché il campo magnetico attraversa queste pareti. Bisogna invece prestare particolare attenzione a materiali ferrosi o altri magneti posti a pochi centimetri dal campo magnetico (per es. trucioli di ferro, supporti, viti di fissaggio, cilindri con pistone magnetico) perché possono influenzare il campo e farlo deviare.

Tali campi, generati da magneti permanenti o da bobine percorse da corrente, producono sulle lamine, per il fenomeno di induzione magnetica, polarità di segno opposto.

Questi interruttori di prossimità (reed o hall-effect) sono principalmente usati per determinare la posizione del pistone magnetico in un cilindro pneumatico ed idraulico.

Il loro utilizzo è consigliato per sostituire interruttori meccanici a leva o a pulsante, ad esempio, per motivi di sicurezza, per impedire l'azionamento manuale di un interruttore. Disponibilità di varie versioni e modelli: normalmente aperto o normalmente chiuso, con o senza connettore.

La chiusura dei contatti dipende dalla sensibilità del reed e dalla forza del magnete nella fase di avvicinamento. Le superfici di contatto delle lamine dei reed sono rivestite con materiale pregiato (oro, rodio, tungsteno) che le rendono adatte a comandare circuiti a basse correnti e a forti carichi induttivi.

Rispetto ai contatti tradizionali ad azionamento meccanico si possono annoverare diversi vantaggi:

- la chiusura ermetica in gas protegge i contatti dalla polvere, dall'ossidazione e dalla corrosione
- l'azionamento dei contatti avviene senza complicati ed ingombranti meccanismi, sfruttando l'influenza di un campo magnetico
- alta velocità di funzionamento, fino a 300 Hz per alcuni tipi; breve tempo di attrazione (1.5 - 3 ms, compresi i rimbalzi)

- la particolare concezione costruttiva e l'alta qualità dei materiali impiegati assicurano ai contatti una lunga vita (10^7 - 10^8 operazioni)
- assenza di manutenzione e ridottissimo ingombro.

6.3 Sensori di deformazione e di forza

I controlli di sforzo si basano prevalentemente sugli **estensimetri**, ma molto utilizzati sono anche i sensori **piezoelettrici**.

Come sappiamo, certi cristalli sotto pressione generano sulle facce opposte cariche elettriche proporzionali allo sforzo cui sono sottoposte; questi sensori sono particolarmente adatti ad impieghi con corrente alternata.

I sensori piezoelettrici sono sensibili sia alla forza lungo un asse, sia alla coppia intorno all'asse stesso.

Tali sensori permettono il controllo in tempo reale dell'intensità (ed anche della direzione) delle forze e delle coppie applicate dal robot agli oggetti manipolati.

Generalmente, i sensori di sforzo vengono applicati tra il polso e la pinza, e solo recentemente sono stati messi a punto sensori a 6 gradi di libertà (per misurare componenti multiple di forza) talmente leggeri e di dimensioni tali da poter essere montati sulle dita di una pinza per impianti robotizzati.

I sensori di deformazione e di forza sono particolarmente interessanti per le operazioni di assemblaggio, quando è ad esempio necessario correggere la posizione e l'orientamento del robot: questa correzione viene effettuata in funzione della forza esercitata nel manovrare i pezzi.

Oppure, nelle applicazioni in cui è necessario applicare una pressione costante (ad esempio operazioni di incollaggio) o, ancora, nella misurazione della forza di inserzione dei componenti elettronici in un circuito stampato.

La forza viene misurata in newton (N); 1 N corrisponde a 0.102 Kg; e a 0.225 libbre.

I trasduttori di forza sono spesso basati su trasduttori di spostamento come ad esempio la compressione di una molla che agisce su un LVTD. Dispositivi di questo tipo sono chiamati anche "celle di carico".

Altre volte vengono usate celle di carico costituite da trasduttori piezoelettrici di forza.

6.3.1 Estensimetri

Alcune misure di spostamento si riferiscono a movimenti molto piccoli. In tali casi sono molto adatti i cosiddetti "**strain gages**", sensori di basso costo, di facile uso e che talora possono venire resinati nello stesso corpo in misura.

Gli "strain gages" si basano sul principio che la resistenza (R) di un conduttore è direttamente proporzionale alla resistività (ρ) ed alla sua lunghezza (L), mentre è inversamente proporzionale alla sua sezione (S).

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

Se un conduttore è tirato ed allungato, la sua lunghezza aumenta e la sua sezione diminuisce; conseguentemente la sua resistenza aumenta.

Nella figura è riportata una configurazione di strain gages a film o foglia, ottenuta con processo tipo circuito stampato.

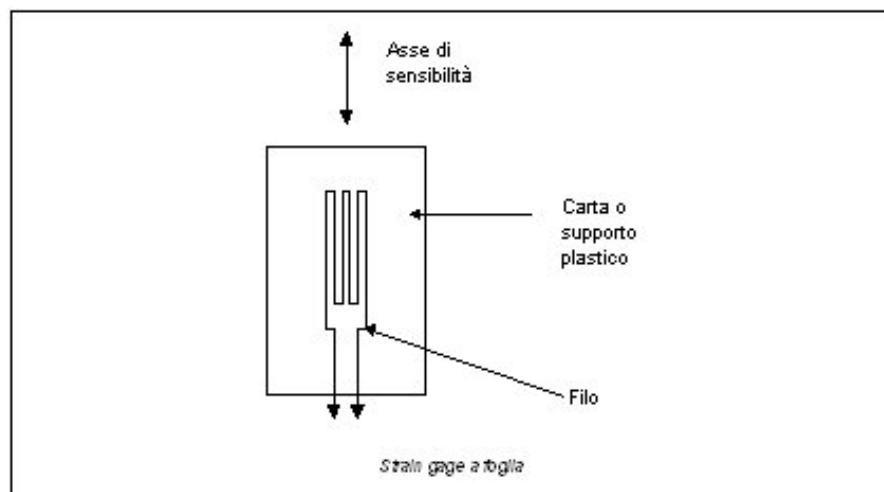
Le resistenze variano tra 30 e 3000 Ω , con valori comuni attorno a 120 e a 350 Ω ; le lunghezze variano tra i valori 0.1 e 100 mm.

Normalmente viene usato un parametro specificativo indicante il rapporto tra la variazione di resistenza rapportata alla resistenza totale e la variazione di lunghezza rapportata alla lunghezza totale.

Tale fattore, chiamato "**gage factor**", è espresso da :

$$\frac{\Delta R / R}{\Delta L / L}$$

Supponendo che uno "strain gage" lungo 40 mm abbia una resistenza nominale di 350 Ω e un "gage factor" di 2, vediamo di quanto aumenta la resistenza se lo "strain gage" viene allungato di 0.2 mm.



Per prima cosa si calcola il denominatore dell'espressione precedente, cioè

$$\Delta L / L = 0.005$$

quindi si moltiplica questo valore per il "gage factor" ottenendo

$$\Delta R / R = 2 \times 0.005 = 0.01$$

infine, moltiplicando 0.01 per $R = 350 \Omega$ si ottiene $R = 3.5 \Omega$.

6.3.2 Sensori tattili

Un altro settore in cui la ricerca è molto intensa, oltre a quello della visione artificiale, è quello dei sensori tattili, nella consapevolezza che il raggiungimento di una buona funzionalità anche in questo campo è il primo requisito per affidare ai robot lavori sempre più complessi.

Il dotare la mano di un robot di capacità tattili vicine a quelle umane rappresenta un obiettivo molto attraente.

Attualmente le ricerche sono orientate ad implementare un sensore tattile dalle seguenti caratteristiche:

- array con 4 x 4 elementi sensibili ogni cm^2
- tempo di risposta di ogni elemento sensibile compreso tra 1 e 10 ms
- sensibilità di ogni elemento pari a 10^{-3} Kg.
- "pelle artificiale" robusta in grado di sopportare bene l'ambiente di fabbrica.

Sono stati provati diversi materiali quali gomma conduttiva, PZT (ceramica piezoelettrica), PVF2 (fluoruro di polivinile). Quest'ultimo sembra essere vincente essendo robusto, leggero, facilmente conformabile alle superfici complesse.

E' inoltre privo di difetti dei concorrenti quali isteresi, scarsa linearità, deriva termica, ecc.....

Un prototipo di sensore tattile consiste dunque di un foglio di PVF2 metallizzato su entrambe le superfici, per assicurare un buon contatto elettrico. Dal foglio viene ricavata una matrice di 16 (4 x 4) elementi sensibili, ognuno dei quali ha l'amplificatore di segnale e il convertitore A/D, una memoria RAM di 2 kbyte per 8 bit, una ROM di 4 kbyte per 8 bit ed un microprocessore.

I 16 microprocessori portano le informazioni della cella relativa ad un microprocessore di supervisione che effettua le necessarie correlazioni e le invia, a sua volta, ad un elaboratore principale che ricostruisce l'immagine tattile vera e propria. Si tratta, come ci si può rendere conto, di una apparecchiatura molto complessa.

6.4 Sensori di visione

Il robot è stato descritto come una macchina programmabile e multiscopo dedicata alla produzione.

Questa flessibilità, tuttavia, nell'ambiente operativo è fortemente condizionata dalle capacità sensoriali dei robot. In realtà sappiamo che anche per la più semplice applicazione il robot è dotato di una rete sensoriale composta da: sensori di presenza pezzo, sensori di stato delle macchine di cui il robot è "server", ecc...

Tali sensori però influenzano solo la sequenza di esecuzione e la cadenza delle operazioni del robot senza aumentarne la flessibilità. Una maggiore flessibilità è data dal controllo di tipo adattativo, un controllo cioè che permetta, per esempio, di percorrere traiettorie indipendenti da quelle programmate sulla base di indicazioni fornite da sensori evoluti.

In questo modo il programma che l'operatore introduce non contiene istruzioni di posizionamento che il manipolatore deve ripetere, ma piuttosto istruzioni che definiscono i movimenti che il robot deve compiere in funzione di segnali provenienti dai sensori. L'implementazione di un controllo che sappia adattarsi alle condizioni operative (controllo adattativo) deve essere il più possibile generale, non orientata cioè ad una specifica applicazione, in modo da lasciare la massima libertà di scelta dei sensori da parte di chi deve inserire il robot in un processo produttivo. Tra i sensori che maggiormente consentono un controllo di tipo adattativo i più importanti sono i sensori di visione, che, data la loro complessità, sono chiamati più frequentemente sistemi di visione.

I sensori di visione hanno lo scopo di identificare la posizione e l'orientamento dell'oggetto che si trova nel campo del sensore, al fine di guidare il robot verso l'oggetto stesso.

Essi sono impiegati anche per riconoscere oggetti che per forma o colore sono difettosi o più in generale per il controllo della qualità dei pezzi. La struttura tipica di un sistema di visione si sintetizza nel seguente funzionamento:

- il compito di riprendere le immagini è affidato ad una telecamera a stato solido posta sopra la scena
- il rilevamento avviene per mezzo di un reticolo di elementi fotosensibili su un chip CCD (Coupled Charge Device). Su ciascun elemento si produce una tensione proporzionale alla luminosità del corrispondente punto della scena
- dopo una conversione analogico / digitale, i valori di tensione associati a ciascun elemento (detto pixel), proporzionali al suo livello di grigio, vengono memorizzati sotto forma di matrice numerica in un buffer di memoria RAM. Tale memorizzazione viene eseguita perché il tempo di acquisizione e conversione analogico / digitale dell'immagine è di pochi millisecondi, mentre il tempo di elaborazione della stessa può essere anche di alcuni secondi.

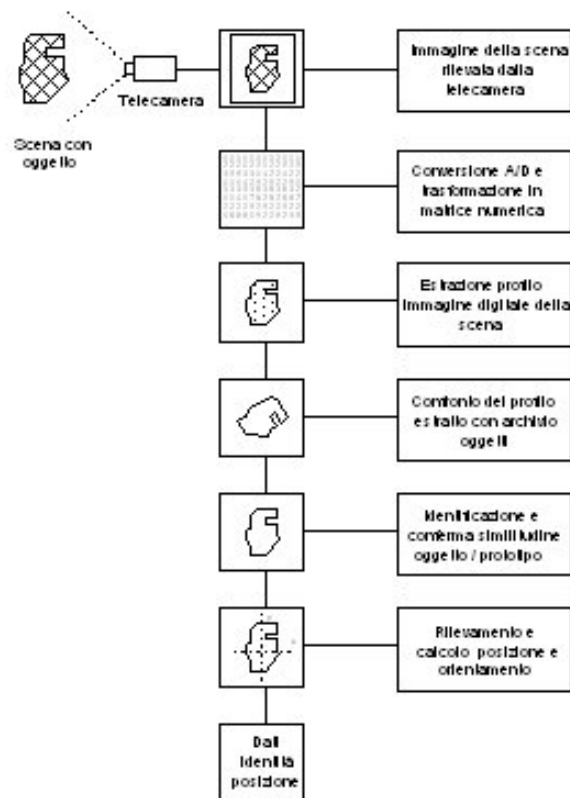
Si fa notare che mentre l'occhio umano può distinguere una trentina di livelli di grigio, i sistemi di visione operano su almeno 64 (512 nel caso dei sistemi di visione più evoluti).

Successivamente la matrice numerica viene elaborata per evidenziare il profilo degli oggetti rispetto allo sfondo della scena. Una volta evidenziati, questi vengono confrontati con quelli precedentemente memorizzati. L'identità dell'oggetto viene poi resa disponibile per il controllo

del robot al fine di attivare specifiche sequenze di operazioni quali selezione dell'end effector, azionamenti di dispositivi ausiliari, ecc... In base al profilo rilevato il sistema di visione determina la posizione dell'oggetto ed il suo orientamento e li trasmette al controllo del robot.

Pertanto l'utilizzatore programmerà:

- il sistema di visione memorizzando le immagini che il sistema deve identificare (prototipi)
- il robot inserendo un programma di manipolazione per ciascuno degli oggetti.



Schema funzionale del sistema di visione

La procedura di ricerca del profilo degli oggetti consiste normalmente nella scansione della matrice numerica in cui sono stati memorizzati i valori di grigio di ciascun elemento di immagine (pixel). Durante tale scansione vengono "trovati" gli oggetti presenti nella scena.

Per eseguire tale funzione, esistono due fondamentali tipi di algoritmi:

a) algoritmo basato su di un livello di grigio (algoritmo binario)

Consiste nel fissare, a seconda della situazione, un valore-soglia di grigio, al di sopra del quale il pixel deve considerarsi parte dell'oggetto; ad esso viene associato il valore 0. Se il pixel è parte dello sfondo, ad esso viene associato il valore 1.. La successiva elaborazione verrà eseguita sugli elementi di valore 1, e porterà all'identificazione degli oggetti presenti nella scena.

Questo tipo di algoritmo è il più semplice e diffuso. La sua principale limitazione è nella sensibilità alle variazioni di illuminazione della scena.

Se gli oggetti non hanno bordi nettamente contrastanti con lo sfondo, variazioni dell'illuminazione possono implicare che parte dell'oggetto, vicino al suo profilo, abbia un livello di grigio inferiore alla soglia, e quindi venga trattato come sfondo o, viceversa, che la sua ombra abbia un livello di grigio superiore alla soglia e che quindi sia trattato come oggetto.

b) algoritmo basato sui gradienti di grigio

Consiste nel fissare un valore della differenza tra i livelli di grigio di pixel adiacenti.

Quando, durante la scansione, viene rilevato tale gradiente, il pixel relativo viene definito come un pixel di transizione. Gli insiemi dei pixel di transizione formanti linee chiuse individueranno i profili degli oggetti presenti nella scena.

Questo tipo di algoritmo, più complesso del precedente, ha il vantaggio di avere una sensibilità di gran lunga minore della variazione di illuminazione della scena, ma soprattutto salva una quantità di informazioni sull'oggetto, che con il sistema binario vanno disperse, come profilature interne al contorno dell'oggetto, scritte o colorazioni sufficientemente contrastanti, incisioni, ecc..., che il sistema binario semplicemente cancella.

L'archivio delle immagini da identificare è una base dati residenti nella memoria RAM del sistema, nella quale sono registrate, per ogni immagine, alcune delle sue caratteristiche geometriche (area, perimetro, lunghezza assi principali di inerzia, ecc...) tali che i loro valori garantiscano l'identificazione univoca degli oggetti che potrebbero presentarsi nella scena riprese dalla telecamera. Tali caratteristiche, per taluni sistemi, devono essere introdotte dall'operatore mediante tastiera, per altri vengono elaborate dal sistema stesso, dopo che l'oggetto da archiviare è stato "prototipizzato" una o più volte. Creato tale archivio, il sistema potrà identificare, nella scena, gli oggetti le cui caratteristiche sono già state memorizzate.

L'identificazione avviene dopo che il sistema ha evidenziato i profili degli oggetti presenti nella scena. Di ogni profilo vengono calcolati i valori e viene confrontata la mappa dell'immagine con quella di ciascuna delle immagini archiviate, fino a trovare, tra quelle, la combinazione che meno si discosta da quella del profilo in esame.

Ne consegue che la scelta delle caratteristiche geometriche, che devono costituire la "carta d'identità" degli oggetti in memoria, è critica: occorre infatti evitare che due oggetti diversi possano avere la stessa combinazione di valori delle caratteristiche.

Utilizzare molte caratteristiche evita questi inconvenienti, ma aumenta ovviamente il tempo di elaborazione, ed è quindi necessario trovare un compromesso tra queste due esigenze. Tale scelta viene comunque operata dai progettisti del sistema, e raramente l'utilizzatore può intervenire su questo aspetto.

L'archivio immagini deve contenere, per ogni immagine, indicazioni per il prelievo del pezzo da parte del robot. Tali indicazioni consistono essenzialmente nella posizione che l'organo di presa del robot deve avere relativamente all'oggetto.

Per esempio tale posizione può essere definita utilizzando come sistema di riferimento gli assi principali di inerzia dell'immagine. Una volta identificati gli oggetti presenti sulla scena, il

sistema può rilevare posizione ed orientamento di quelli che il robot deve prelevare, e trasmettere tali dati al controllo del robot stesso.

Le procedure di riconoscimento sopra descritte presuppongono che rimanga fissa la posizione della telecamera rispetto alla base del robot. Per tale motivo è necessario effettuare, a monte del processo di rilevamento ed elaborazione di immagine, una "calibrazione" della telecamera montata sul braccio del robot che permetta di mettere in relazione tra di loro, mediante trasformazioni di coordinate, i vari sistemi di riferimento relativi adottati (posizione camera - posizione pinza - sistema di riferimento assoluto del robot).