9

AZIONAMENTI A FLUIDO

9-1 **Caratteristiche dei sistemi a fluido**

Nei capitoli precedenti si sono esaminati sistemi meccanici nei quali la trasmissione della potenza dal motore al carico e l'adeguamento delle caratteristiche del motore a quelle del carico sono effettuati attraverso catene di corpi solidi, spesso approssimati con il modello a corpi rigidi. In molte applicazioni tecniche uno o più elementi della catena trasferiscono potenza attraverso l'intervento di un fluido: se il fluido è incomprimibile (un liquido, di solito un olio) la trasmissione è detta *idraulica o oleodinamica o oleoidraulica*, se il fluido è comprimibile (un gas, di solito l'aria) la trasmissione è detta *pneumatica*. I sistemi a fluido sono ampiamente utilizzati nelle applicazioni in cui è richiesto ottenere movimenti controllando la velocità e le forze trasmesse; in molte di queste applicazioni è richiesto di fornire energia a più azionamenti posti in punti distinti della macchina. In effetti se la trasmissione dell'energia in parti diverse di una macchina e il controllo della velocità del carico sono effettuati con trasmissione meccanica è necessario realizzare apparati ingombranti, costosi, non facili da progettare e costruire, quali trasmissioni fra assi mobili genericamente disposti, cambi di velocità (eventualmente continui), etc. Il controllo di velocità in una trasmissione a fluido è concettualmente più semplice in quanto può essere sufficiente variare la portata del fluido, per esempio aprendo o chiudendo gradualmente una valvola. Analogamente il trasporto della potenza meccanica dal posto in cui è collegato il motore al carico è facilmente e sicuramente ottenuto con un tubo (in genere di piccolo diametro e flessibile) in cui scorre un fluido. L'azione di controllo può essere svolta manualmente, con strumenti elettromeccanici o sistemi elettronici. In questo ultimo caso si possono ottenere modalità di azionamento molto complesse con l'uso di reti logiche e combinatorie elettroniche, e anche con microprocessori.
Analogamente a quanto si è visto nei capitoli precedenti, in genere la sorgente di energia in un sistema a fluido è un motore elettrico o termico che fornisce energia meccanica (coppia e velocità angolare o forza e velocità); questa energia è convertita in energia di un fluido (pressione e portata) mediante un componente detto *pompa*; le caratteristiche del fluido possono essere agevolmente modificate attraverso vari dispositivi di regolazione (della portata e della pressione), poi l'energia del fluido viene riconvertita in energia meccanica mediante un componente detto *motore o attuatore*. La Fig. 9.1 presenta il caso più semplice di trasmissione idraulica con una pompa (che riceve energia dal motore elettrico o termico) e da un motore rotativo (che fornisce energia al carico). In questo caso non ci sono dispositivi di controllo, ma solo trasferimento di energia da una posizione ad un'altra della macchina.

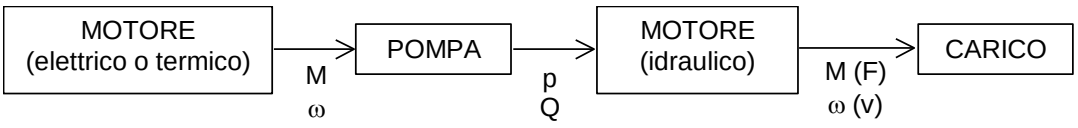

Fig. 9.1 Flusso di potenza in un sistema idraulico

In questo capitolo saranno trattati i sistemi idraulici. Considerazioni analoghe, ma tenendo conto della compressibilità del fluido possono essere svolte per i sistemi pneumatici.
I principali vantaggi dei sistemi idraulici sono:

- elevati rapporti potenza/peso e potenza/ingombro (in un normale sistema idraulico si possono avere pressioni di circa 25 MPa (1 MPa = 1 megaPascal = 10^6 Pa = 10^6 N/m^2), mentre un normale sistema pneumatico lavora alla pressione di 1 MPa; a parità di peso (e di inerzia) le forze sviluppate in un sistema idraulico sono nettamente superiori a quelle sviluppate in un sistema pneumatico o in uno elettromeccanico: ciò comporta anche minori tempi di risposta;
- progetto semplice dei movimenti del carico;
- regolazione discreta o continua del movimento e delle forze trasmesse;

- massima libertà nel posizionamento dei componenti del sistema;
- smorzamento delle vibrazioni;
- lunga durata;
- elevata rigidezza della trasmissione (a causa delle basse comprimibilità dell'olio e deformabilità dei tubi);
- facile smaltimento del calore generato per attrito durante il movimento (facendo raffreddare l'olio in un radiatore);
- sicurezza (protezione contro sovraccarichi, ripresa automatica del funzionamento, ecc.).

9-2 **Componenti base**

I componenti fondamentali di un sistema idraulico sono:
- pompe;
- motori;
- valvole;
- ausiliari (serbatoi, filtri, radiatori, ecc.).

9-2.1 POMPE

Per poter utilizzare trasmissioni a fluido è necessario disporre di almeno una *pompa* ossia di un componente che fornisca energia al fluido (pressione e portata) convertendo energia meccanica (in genere coppia e velocità angolare). La pompa mette in movimento un fluido con portata Q aspirandolo alla pressione di aspirazione p_1 e inviandolo alla pressione di mandata p_2. La potenza fornita al fluido è $P_p = Q(p_2-p_1)$, misurata in W se la portata è misurata in m^3/s e la pressione in N/m^2. La potenza del fluido è ottenuta dalla potenza meccanica fornita dal motore, $P_m = M\omega$, moltiplicata per il rendimento globale della pompa η_p: ossia $P_p = \eta_p M\omega$. Nei sistemi idraulici si usano in generale pompe volumetriche, alternative o rotative. Si dicono alternative le pompe nelle quali le pareti mobili della camera in cui il fluido riceve energia si muovono di moto alternativo (di solito rettilineo); rotative le pompe in cui il moto avviene senza inversione di verso. Si noti che la distinzione è fatta in base al movimento nella camera in cui si opera sul fluido, non sul movimento dell'organo che connette la pompa al motore.

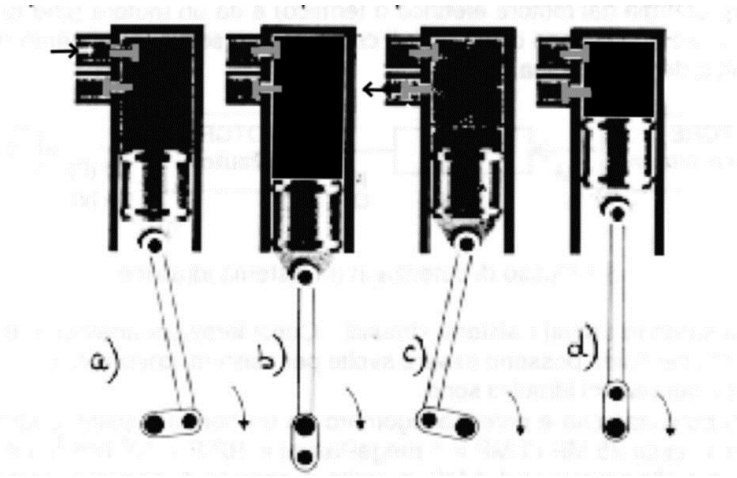

Fig. 9.2 Schema di funzionamento di una pompa alternativa
(a: aspirazione, b: punto morto inferiore, c: mandata, d: punto morto superiore)

Lo schema base di una pompa alternativa è riportato in Fig. 9.2. Il motore fa ruotare un albero a cui è connesso un meccanismo biella/manovella/pattino. Il pattino è costituito da un pistone la cui guida è il cilindro della pompa. Il movimento rotatorio continuo del motore viene trasformato in

movimento rettilineo alternativo del pistone che aspira il fluido dal tubo di *aspirazione* o lo invia nel tubo di *mandata*: i due tubi vengono aperti o chiusi automaticamente tramite due valvole unidirezionali. In Fig. 9.2-a il pistone scende dal punto morto superiore a quello inferiore aspirando il fluido. In Fig. 9.2-c il pistone sale dal punto morto inferiore a quello superiore mandando il fluido.Nelle figure 9.2-b e 9.2-d il pistone è per un istante fermo ai due punti morti.
Disponendo di una sola pompa come quella schematizzata in Fig. 9.2 il fluido viene inviato nel circuito in modo periodico, solo nella fase di mandata. Per rendere più continuo l'invio del fluido si possono disporre più pompe che lavorano in parallelo (hanno cioè tutte la stessa aspirazione e la stessa mandata), opportunamente sfasate fra loro. Negli impianti oleodinamici si realizzano pompe *pluricilindriche* con pistoni sfasati disposti con simmetria cilindrica o radiale rispetto all'asse di rotazione della pompa. In Fig. 9.3 si vede lo schema di principio di una pompa a simmetria cilindrica (detta anche *assiale*): in figura sono visibili due cilindri; il pistone nel cilindro in alto è al punto morto superiore, quello in basso è al punto morto inferiore; altri cilindri fuori dal piano della figura sono in posizioni intermedie.

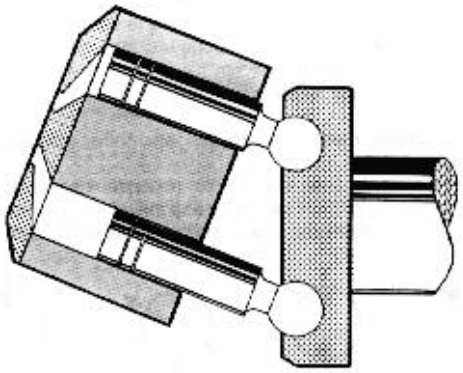

Fig. 9.3 Pompa pluricilindrica assiale

Se il meccanismo di sostegno della piastra che supporta i pistoni consente l'inclinazione della stessa, si può variare la portata Q della pompa dal valore Q=0 quando la piastra è verticale fino ad un valore massimo prestabilito. In tal caso la pompa è detta *a portata variabile.* Le pompe possono essere *monodirezionali*, quando il flusso passa sempre nello stesso verso, o *bidirezionali* quando è possibile variare il verso del flusso.
Gli schemi degli impianti oleodinamici fanno uso di simboli standardizzati: in Fig. 9.4 sono riportati i simboli di una pompa monodirezionale a portata costante, una pompa bidirezionale a portata costante, una pompa monodirezionale a portata variabile, una pompa bidirezionale a portata variabile.

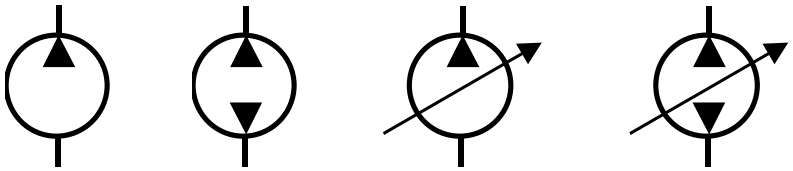

Fig. 9.4 Simboli di pompe

Si noti che dal punto di vista esterno la pompa si presenta costituita da un involucro, con collegamenti per i tubi di aspirazione e mandata, da cui sporge un albero rotante che viene connesso al motore.
Oltre alle pompe alternative possono essere realizzate anche pompe rotative. Come esempio la Fig. 9.5 riporta il disegno di una pompa ad ingranaggi.

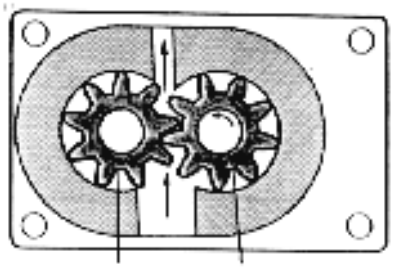

Fig. 9.5 Disegno di una pompa ad ingranaggi

9-2.2 MOTORI

Nei motori idraulici si effettua la conversione di energia opposta a quella delle pompe: l'energia del fluido (espressa da portata e pressione) viene convertita in energia meccanica (forza e velocità o coppia e velocità angolare). Spesso i motori vengono chiamati *attuatori*. Il motore è alimentato dal fluido alla pressione p_1 e lo scarica alla pressione di p_2. La potenza meccanica utilizzabile in uscita dal motore è $P_m = \eta_m Q(p_1-p_2)$, essendo η_m il rendimento globale del motore. La potenza è misurata in W se la portata è espressa in m^3/s e la pressione in N/m^2.
Nei sistemi idraulici si usano motori volumetrici di diverso tipo: alternativi rettilinei, alternativi semirotativi, alternativi rotativi, o rotativi.
I *motori alternativi rotativi* sono, in linea di principio, realizzati invertendo il funzionamento di una pompa alternativa pluricilindrica. In taluni casi la stessa macchina può essere usata come pompa o come motore. Simboli di motori alternativi rotativi sono riportati in Fig. 9.6.

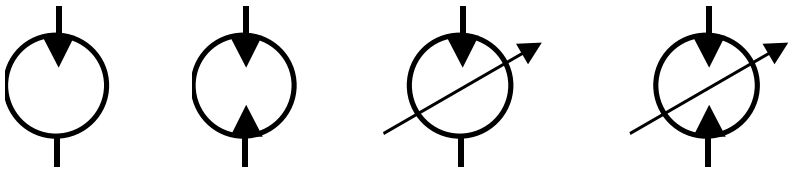

Fig. 9.6 Simboli di motori idraulici alternativi rotativi

I *motori alternativi rettilinei* sono la realizzazione più semplice e antica del motore idraulico. Entro un cilindro scorre un pistone. Introducendo fluido in pressione nel cilindro questo spinge il pistone con una forza F pari al prodotto della pressione p nel cilindro per l'area A del pistone: F=pA. In Fig. 9.7 si vedono 4 possibili simboli di motori alternativi rettilinei. Il primo rappresenta un cilindro a *semplice effetto*, in cui la pressione viene esercitata da una solo parte del pistone: risulta quindi definito il modo in cui il pistone è spinto in un verso, ma indefinito il modo in cui il pistone ritorna in verso contrario. Anche il secondo simbolo è quello di un cilindro a semplice effetto, ma in cui il ritorno del pistone è ottenuto con una molla. Gli ultimi due simboli rappresentano cilindri a *doppio effetto*, in cui la pressione può essere esercitata alternativamente da entrambe le parti, in modo da far muovere il pistone nei due versi.

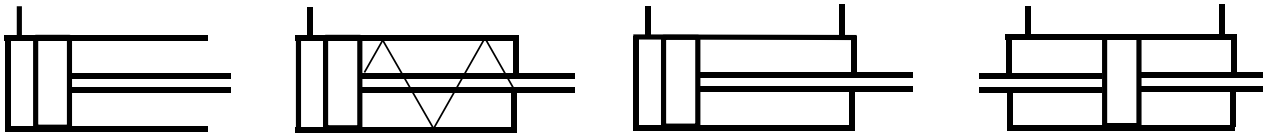

Fig. 9.7 Simboli di motori idraulici alternativi rettilinei

I motori alternativi semirotativi hanno un albero in uscita che può ruotare, in entrambi i versi, per una frazione di giro. Il principio di funzionamento è mostrato in Fig 9.8: se il fluido viene inviato al tubo A la paletta X fa ruotare il motore in senso orario e il fluido esce dal tubo B; viceversa se il fluido è fatto entrare dal tubo B.

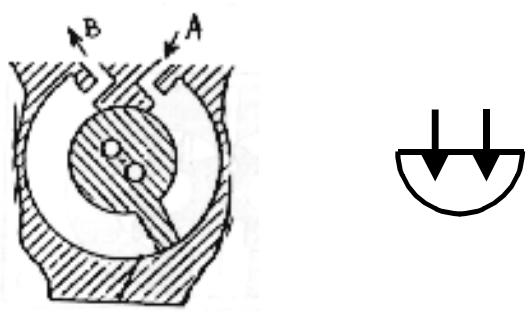

Fig. 9.8 Schema e simbolo di motore semirotativo

9-2.3 VALVOLE

La modifica dei parametri della potenza del fluido (pressione p e portata Q) viene ottenuta in modo relativamente semplice utilizzando vari tipi di valvole che possono essere comandate (aperte o chiuse) in diversi modi (automatico, manuale, meccanico, elettrico): ne vengono ora presentati alcuni esempi.

Valvola di non ritorno (Check valve)
Consente il passaggio libero dell'olio in una direzione, ma lo impedisce nella direzione opposta. Può esistere nella versione *pilotata* (*Pilot-operated*) che funziona come la precedente fino a quando interviene un segnale pilota (prodotto dalla pressione del fluido) che neutralizza la funzione di non ritorno.

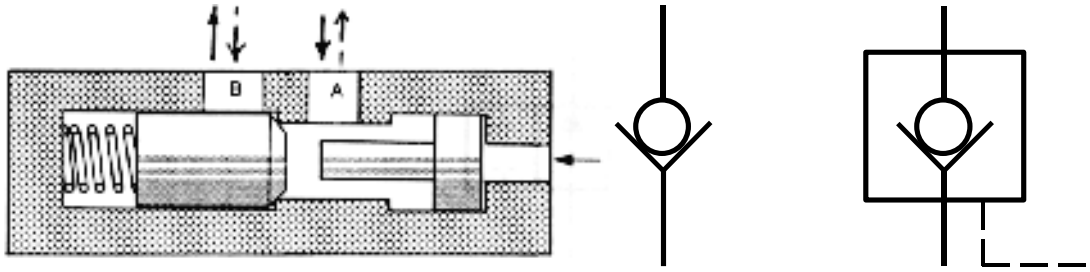

Fig. 9.9 Schemi e simboli di valvola di non ritorno

Valvola di sicurezza o limitatrice di pressione (Pressure relief valve or safety valve)
Consente il passaggio del fluido e il suo scarico al serbatoio quando viene superata una pressione prestabilita

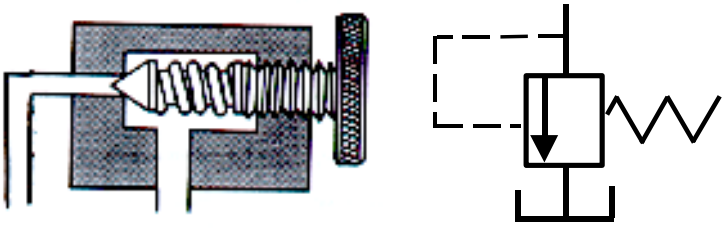

Fig. 9.10 Schema e simbolo di valvola di sicurezza

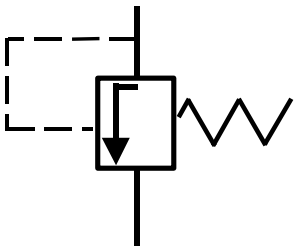

Fig. 9.11 Valvola di sequenza

Valvola di sequenza (Sequence valve)
Consente il passaggio del fluido verso altri dispositivi quando la pressione di entrata supera un valore prestabilito

Distributore n/m (directional control valve)
I distributori hanno lo scopo di ripartire il flusso del fluido fra diversi rami di un circuito e/o di bloccare il flusso. Vengono definiti con due cifre n/m: la prima cifra indica il numero delle *vie* di passaggio del fluido, la seconda il numero delle *posizioni* in cui la valvola può essere messa. Il più semplice tipo di distributore (Fig. 9.12) è quello 2/2, a 2 vie e 2 posizioni, detto anche *valvola di intercettazione* che consente o meno il passaggio del fluido: l'elemento mobile (il *cassetto*, al centro in figura) può essere spostato e per conseguenza viene aperto o chiuso il passaggio dell'olio fra i tubi A e B (due vie) a seconda delle due posizioni (valvola aperta e valvola chiusa) del cassetto.

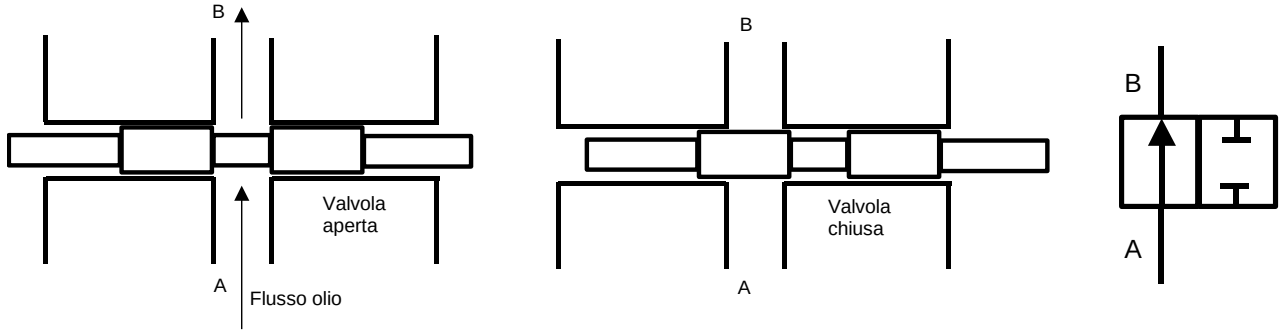

Fig. 9.12 Schema e simbolo di distributore 2/2

Distributore 3/2
Nelle sue due posizioni mette alternativamente in comunicazione uno di due condotti A o B con l'alimentazione (P) mentre blocca l'altro.

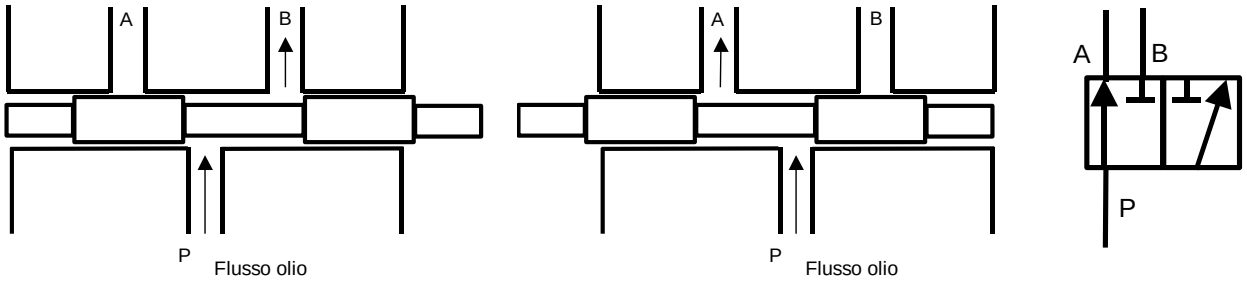

Fig. 9.13 Schema e simbolo di distributore 3/2

Distributore 4/2
Nelle sue due posizioni mette alternativamente in comunicazione uno di due condotti A e B con l'alimentazione (P) e lo scarico (T).

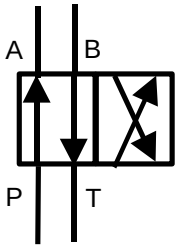

Fig. 9.14 Distributore 4/2

Distributore 4/3
E' uno dei distributori più usati. Deriva dal precedente 4/2, ma presenta anche una terza posizione in cui le diverse vie hanno collegamenti diversi dai precedenti. Per esempio nello schema successivo tutte le vie sono bloccate nella posizione centrale.

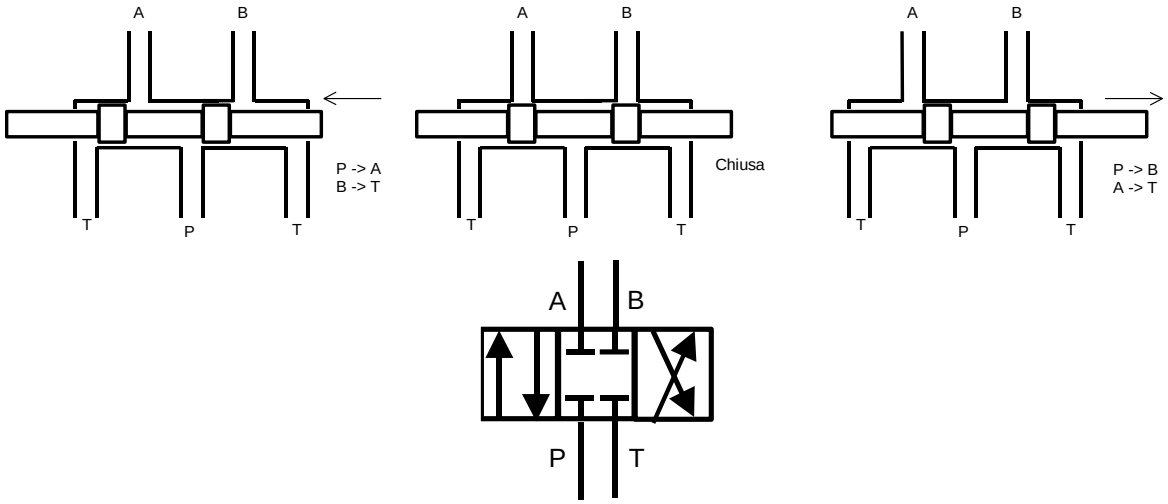

Fig. 9.15 Schema e simbolo di distributore 4/3

Il funzionamento del distributore è evidente: nella posizione a sinistra in figura l'alimentazione (P) è connessa ad A, lo scarico (T) è connesso a B. Nella posizione centrale tutte le vie sono chiuse. Nella posizione a destra l'alimentazione è connessa a B e lo scarico ad A.

9-2.4 VALVOLE PROPORZIONALI

Le valvole precedentemente descritte possono esser realizzate nelle versioni "tutto o niente" (detta anche a posizioni fisse) o "proporzionale" (detta anche senza posizioni fisse). Nella prima versione ogni valvola assume, nel funzionamento normale, solo le posizioni descritte, con le vie completamente aperte o chiuse; nella seconda versione, oltre alle posizioni descritte esistono posizioni intermedie in cui le valvole sono solo parzialmente aperte. Si usano gli stessi simboli visti in precedenza, ma si aggiungono, sopra e sotto al disegno del cassetto, segmenti orizzontali; per esempio per una valvola 4/3

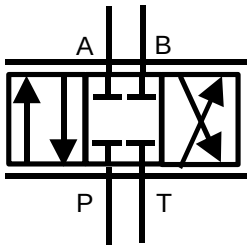

Fig. 9.16 Simbolo di distributore 4/3 proporzionale

Come nel caso dei motori, dei carichi e di altri componenti meccanici, anche il comportamento dei componenti a fluido può essere definito mediane curve caratteristiche che esprimono le relazioni fra le variabili della potenza. Nel caso di un fluido la potenza viene espressa dal prodotto fra la portata Q e la differenza di pressione Δp fra l'ingresso e l'uscita del componente: $P = Q\,\Delta p$.
Per le pompe (esattamente come per i motori) si possono considerare due situazioni limite:

- pompa che fornisce differenza di pressione costante tra mandata e aspirazione, indipendente dalla portata erogata;
- pompa che eroga portata costante, indipendente dalla differenza di pressione tra mandata e aspirazione.

Nella realtà esiste interdipendenza più o meno forte fra le due variabili Q e Δp, anche a seconda del modo in cui la pompa è regolata.
Anche per le valvole proporzionali 2/2 si possono individuare due situazioni limite:

- valvola di regolazione della portata nella quale la portata Q resta fissata al valore imposto dalla posizione x dell'organo di regolazione, indipendentemente dalla differenza di pressione Δp fra ingresso e uscita;
- valvola di regolazione della pressione nella quale la differenza di pressione Δp fra ingresso e uscita resta fissata al valore imposto dalla posizione x dall'organo di regolazione indipendentemente dalla portata Q.

Nella realtà esiste interdipendenza fra le due variabili Q e Δp.

9-2.5 COMANDO DELLE VALVOLE

Il movimento di apertura e chiusura di una valvola può essere comandato in diversi modi:

- manualmente
- meccanicamente
- elettricamente con solenoide (con o senza molla di richiamo)
- con solenoide e pilotaggio idraulico.

I rispettivi simboli vengono aggiunti al simbolo della valvola come indicato in Fig. 5.17

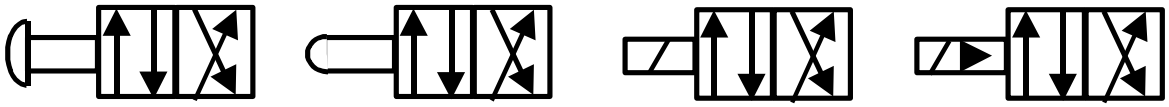

Fig. 9.20 Comandi manuale, meccanico, elettrico, pilotato

L'azionamento con pilotaggio idraulico consente di azionare una valvola (piccola) con azionamento a solenoide, utilizzando il movimento del fluido prodotto da questa valvola per azionarne una più grande. In questo modo si ottiene una amplificazione del segnale di comando che pur avendo bassa potenza può muovere una valvola (la seconda) di dimensioni rilevanti.

9-3 **Esempi di circuiti idraulici**

9-3.1 AZIONAMENTO IN MOTO ALTERNATIVO DI UN CILINDRO IDRAULICO

Un cilindro idraulico a doppio effetto viene azionato in movimento alternativo mediante una valvola 4/2 (Fig. 9.21).

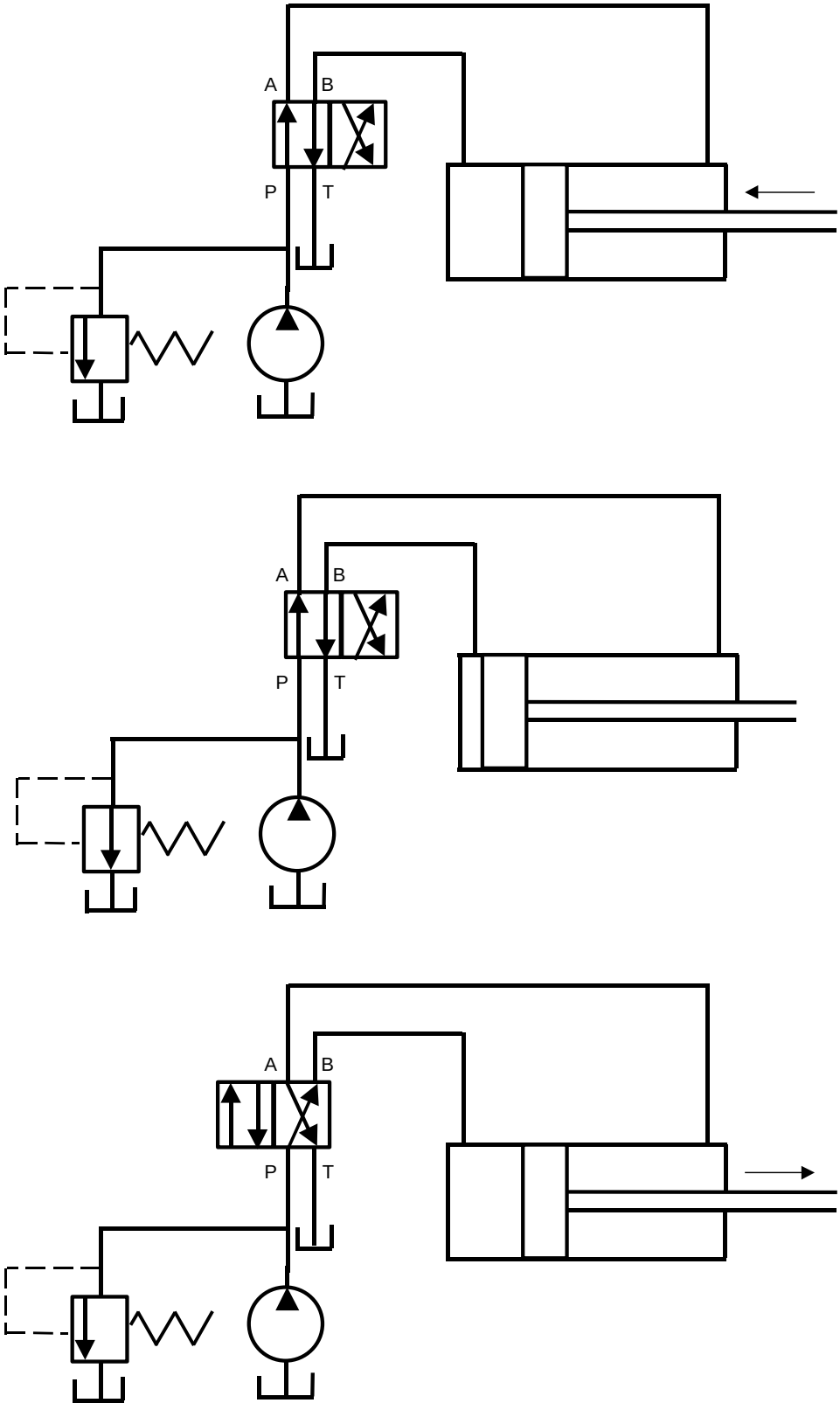

Fig. 9.21 Azionamento di un cilindro idraulico con valvola 4/2

Nella prima figura la valvola 4/2 collega P (mandata della pompa) ad A e B a T (scarico): il pistone, sotto l'effetto della pressione del fluido viene spostato verso sinistra. Quando il pistone raggiunge l'estremità della corsa (tocca il coperchio del cilindro) la pressione nel circuito aumenta, dato che la pompa continua a inviare fluido che non trova via di uscita: pertanto si apre la valvola di sicurezza che scarica il fluido, come si vede nella seconda figura, e il pistone resta fermo. Successivamente la valvola 4/2 viene azionata (da un operatore o da un sistema automatico non rappresentato in figura) e, come mostrato nella terza figura, mette in collegamento P con B e A con T; il pistone, sotto l'azione del fluido, si sposta verso destra.

9-3.2 CIRCUITO DI SEQUENZA

Un pezzo meccanico deve essere montato su una macchina utensile e forato. La successione delle operazioni richieste è (Fig. 5.19):

- bloccaggio del pezzo tra il supporto mobile (MOB) e la parete fissa di bloccaggio (BLOC),
- avanzamento della punta del trapano (PUN) in orizzontale e perforazione,
- ritorno della punta del trapano e sua uscita dal foro,
- sbloccaggio del pezzo e ritorno del pezzo.

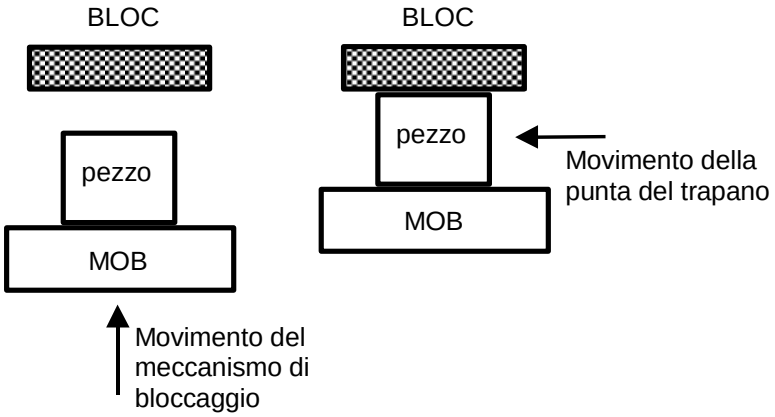

Fig. 9.22 Blocco di un pezzo meccanico

Occorre dunque sequenzializzare i movimenti nel modo seguente:

1. traslazione verticale verso l'alto di MOB (e del pezzo)
2. arresto di MOB e mantenimento di una sufficiente pressione fra il pezzo, MOB, e la parete fissa BLOC che ne eviti ogni spostamento
3. avanzamento della punta del trapano verso sinistra, fino ad effettuare la foratura
4. ritorno della punta del trapano
5. traslazione verticale verso il basso di MOB (e del pezzo).

La sequenza è ottenuta con il circuito di Fig. 9.23 Nel modo seguente:

1. Si collegano il tubo A alla pompa (valvola VAP) e il tubo B allo scarico (valvola VBP): il fluido in pressione passa attraverso la valvola di non ritorno pilotata (VNRP) e fa traslare il pistone nel cilindro verticale (CV) che é collegato al supporto MOB;
2. quando il pistone di C1 raggiunge la fine della corsa la pressione nel circuito aumenta fino a fare aprire la valvola di sequenza VS; il fluido entra nel cilindro orizzontale (CO) e ne sposta il pistone che è collegato alla punta del trapano,
3. quando la punta del trapano ha forato il pezzo, un dispositivo non mostrato in figura aziona la valvola VAP che scollega il tubo A dalla pompa e lo collega allo scarico; il pistone CV resta fermo, dato che l'olio non può defluire attraverso VNRP, mentre il pistone CO può tornare indietro dato che la molla lo spinge e che l'olio può defluire attraverso la valvola VNR;
4. quando CO è tornato in posizione iniziale (tutto a destra) viene azionata la valvola VBP con un

dispositivo non mostrato in figura: essa collega il tubo B alla pompa, VNRP viene aperta dalla pressione in B e il pistone CV, spinto dall'olio (e dal proprio peso) ritorna in posizione iniziale (in basso).

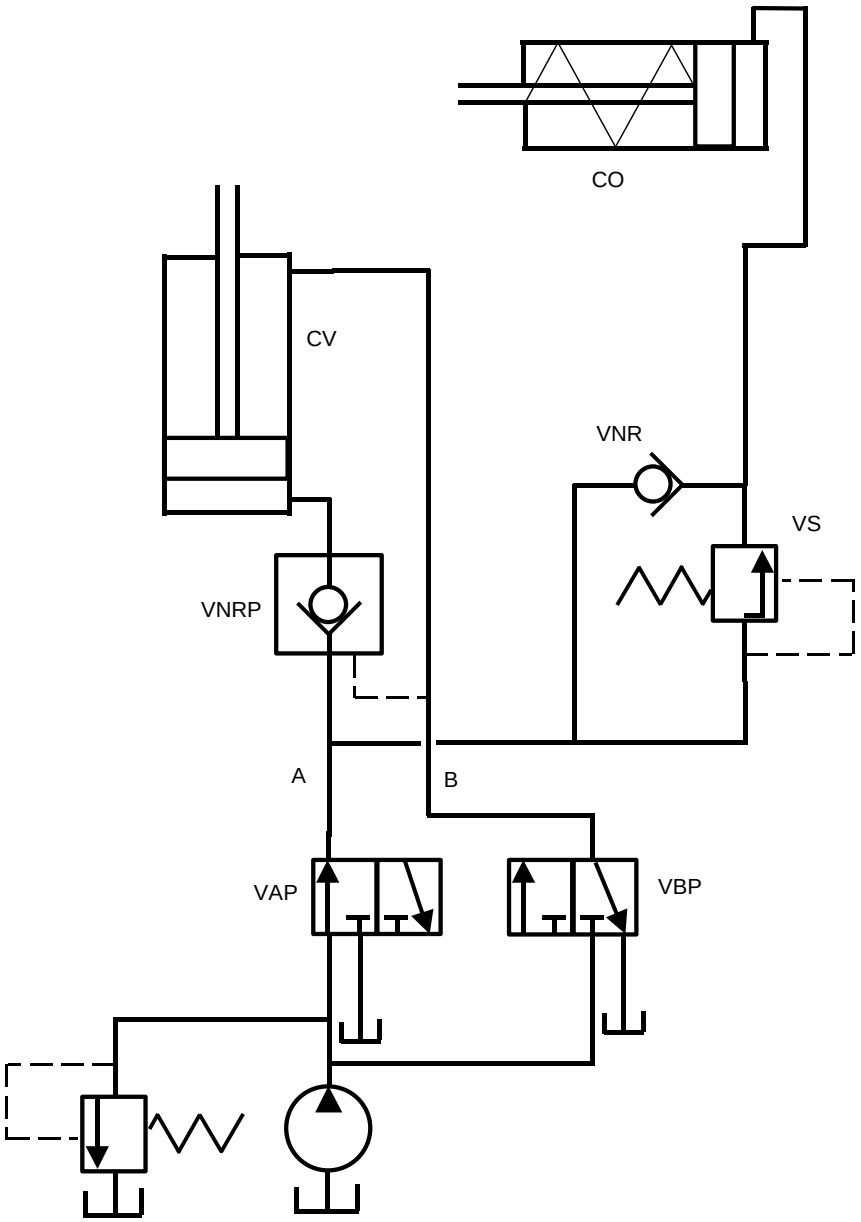

Fig. 9.23 Dispositivo di sequenza

9-3.3 AZIONAMENTO DI UN ROBOT

Il circuito, schematizzato in Fig. 9.24, comanda la rotazione di uno dei motori idraulici semirotativi che azionano i giunti di un robot . La valvola proporzionale 4/3 consente di controllare la rotazione del motore nei due versi o di tenerlo bloccato (senza perdere pressione nella linea di alimentazione). Le altre valvole consentono di bloccare il motore qualora la pressione della linea diminuisca (per esempio per rottura di un tubo) e di consentire il flusso a motore bloccato (by-pass) in caso la rotazione di questo sia impedita da ostacoli o eccessive forze esterne.
Il blocco meccanico consente di mantenere meccanicamente fissato il robot nella posizione di riposo quando si spegne la pompa. Nella posizione di riposo un'asola nel braccio del robot è posizionata in corrispondenza del perno comandato dal sistema di blocco meccanico. Allo

spegnimento della pompa il perno entra nell'asola e blocca meccanicamente il braccio. Solo all'accensione della pompa il blocco viene automaticamente rimosso.

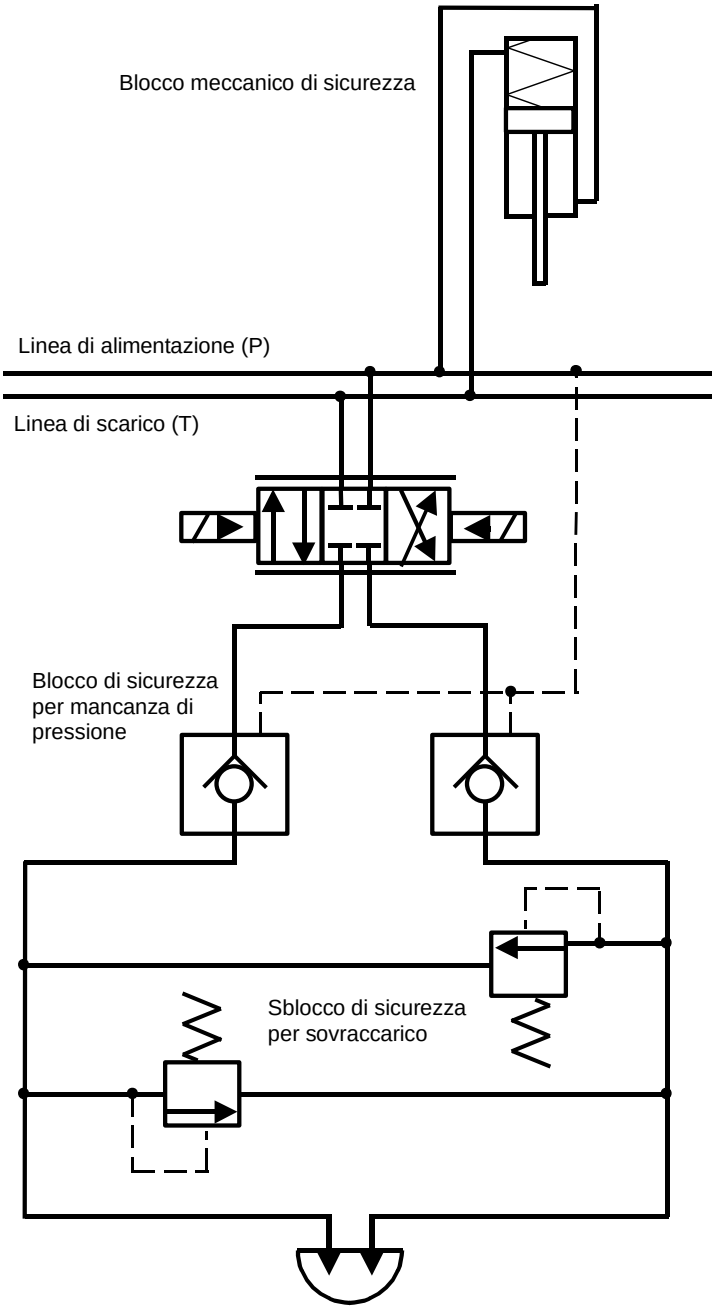

Fig. 9.24 Azionamento di un giunto di un robot

9.3.4 CIRCUITI CON RETROAZIONE

Usando sistemi a fluido è relativamente semplice realizzare sistemi retroazionati: infatti i sistemi a fluido sono spesso provvisti di comandi elettrici ed è agevole generare i relativi segnali di controllo in funzione dello stato del sistema controllato. Elementi interessanti per il controllo di posizione sono:

- interruttori meccanici
- sensori fotosensibili
- encoders
- sensori di prossimità

Due interruttori meccanici sono schematizzati in Fig. 9.25. Spingendo verso il basso la leva superiore del primo o il pulsante del secondo si chiude (o si apre) un contatto elettrico. Il segnale elettrico generato in tal modo viene utilizzato (previa amplificazione, se necessario) per comandare una o più elettrovalvole.

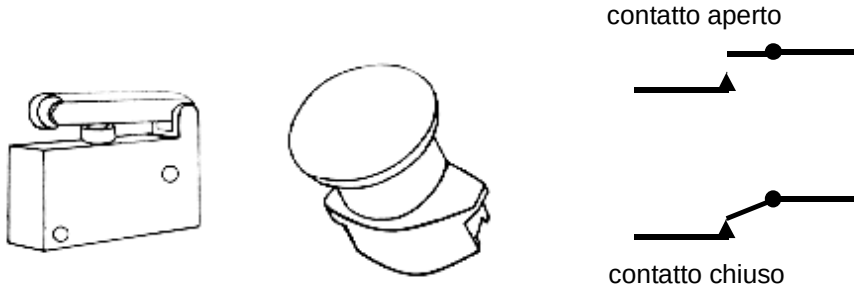

Fig. 9.25 Interruttori meccanici e schema di funzionamento

La Fig. 9.26 riporta un semplice esempio di circuito con retroazione (tutto o niente). Un motore idraulico rotativo bidirezionale fa ruotare (attraverso una idonea trasmissione non schematizzata in figura) un tamburo cilindrico sul quale si avvolge una fune che sposta verticalmente un carico. Il circuito è provvisto di valvole di sicurezza per limitare eccessivi aumenti di pressione.
La valvola 4/3 consente di far ruotare il motore nel verso desiderato sollevando o abbassando il carico.

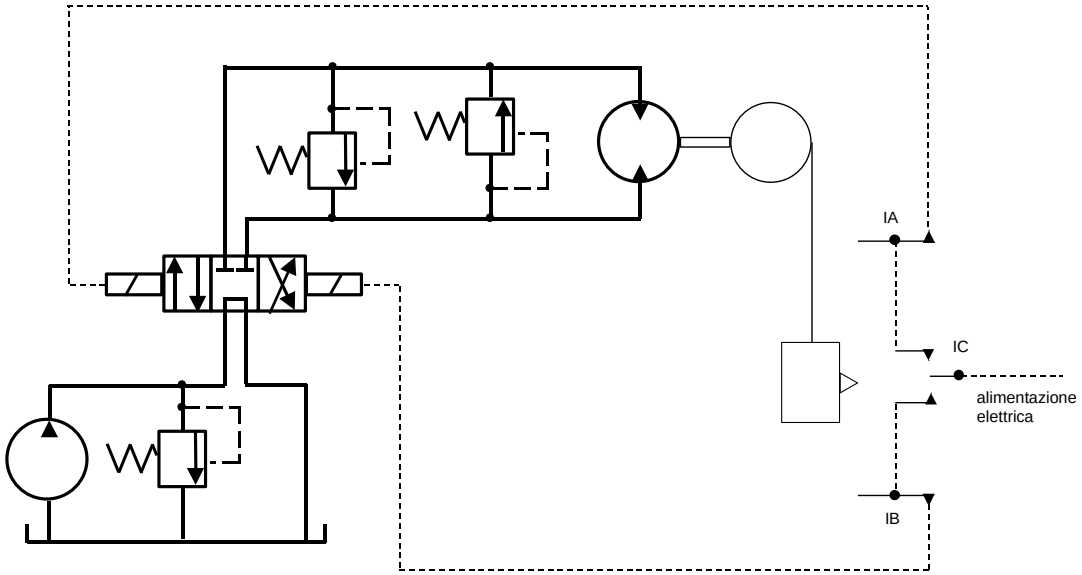

Fig. 9.26-a

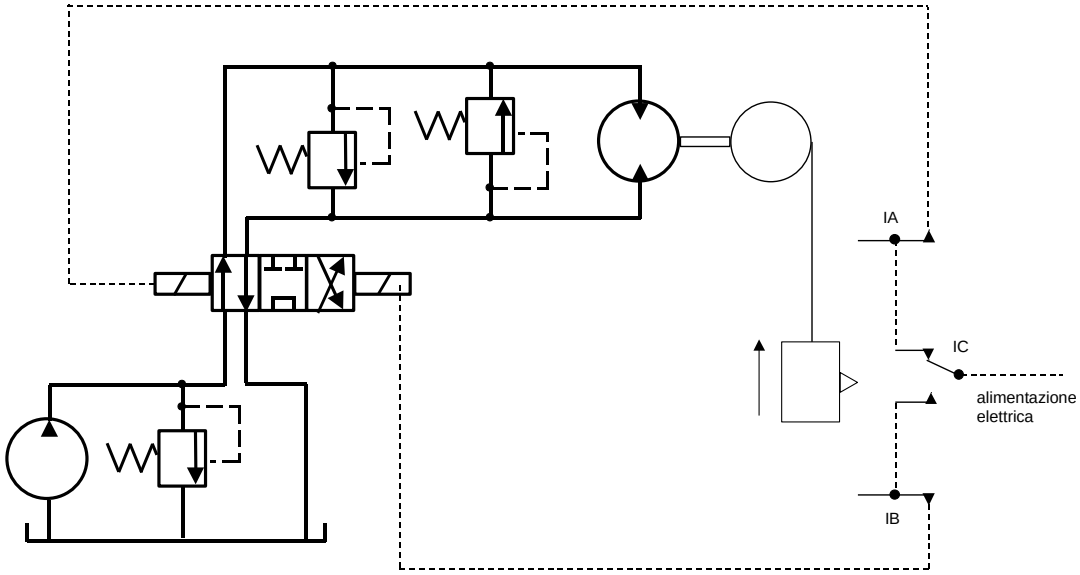

Fig. 9.26-b

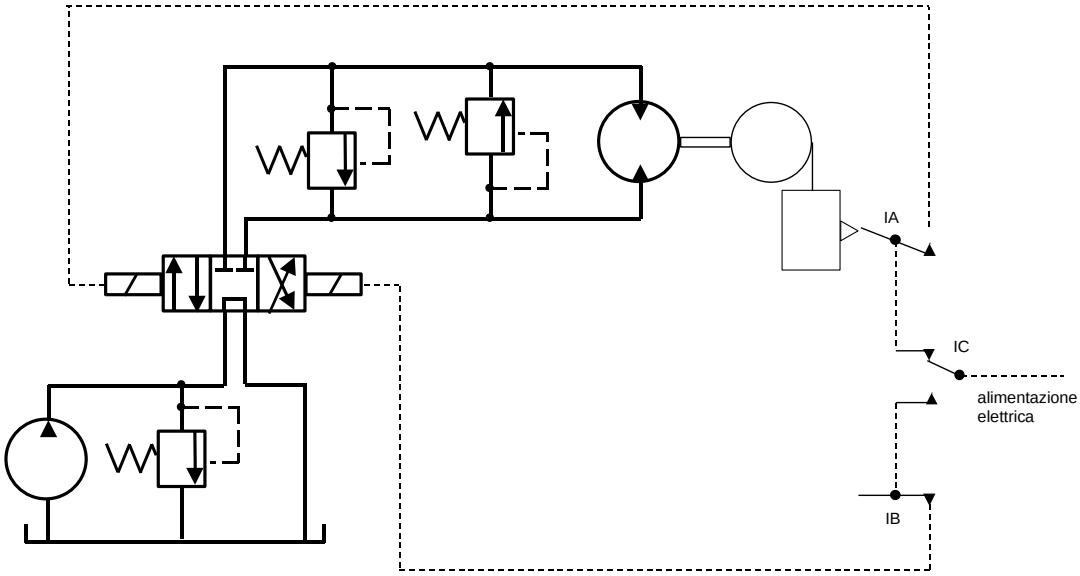

Fig. 9.26-c

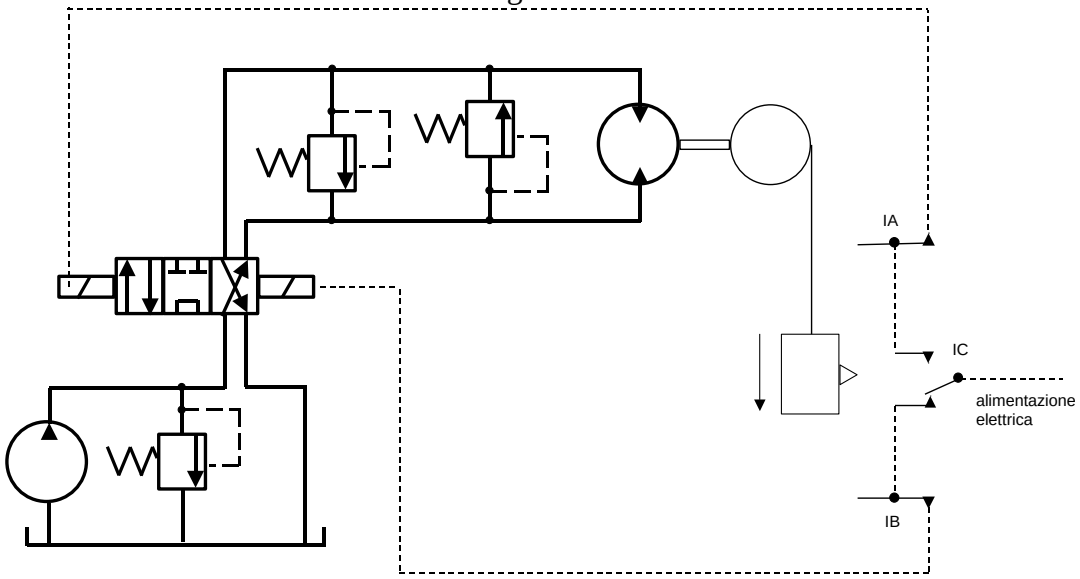

Fig. 9.26-d

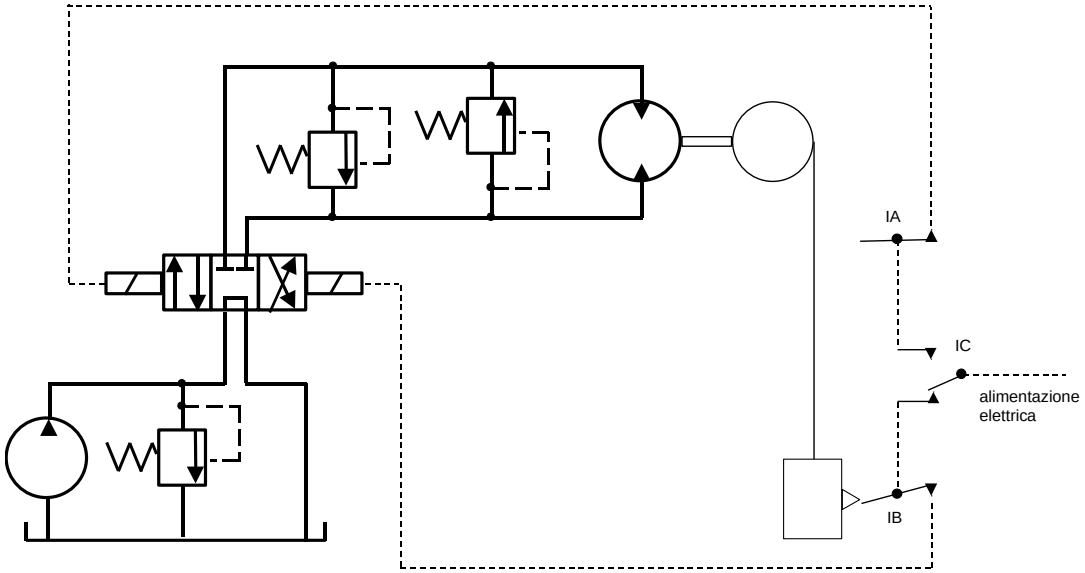

Fig. 9.26-e

In Fig. 9.26–a la valvola è chiusa, il motore è bloccato e il carico è fermo in posizione generica. In Fig. 9.26–b l'interruttore principale IC, a 3 posizioni, è stato spostato dalla posizione centrale (manualmente o con un dispositivo di controllo non rappresentato in figura) in modo da alimentare il circuito di controllo della valvola 4/3. Questa si apre, l'olio viene inviato al motore che facendo ruotare il tamburo solleva il carico. Quando il carico raggiunge l'altezza prestabilita (Fig. 9.26–c) fa scattare l'interruttore IA che interrompe il circuito elettrico: la valvola 4/3 non più alimentata elettricamente si chiude bloccando il motore e il carico nella posizione in alto. In Fig. 9.26–d l'interruttore IC è stato spostato nella terza posizione, in modo da alimentare il circuito di controllo della valvola 4/3 con tensione inversa di quella precedente. La valvola si apre in senso opposto al primo, l'olio viene inviato al motore che facendo ruotare il tamburo abbassa il carico. Quando il carico raggiunge l'altezza prestabilita (Fig. 9.26–e) fa scattare l'interruttore IB che interrompe il circuito elettrico: la valvola 4/3 non più alimentata elettricamente si chiude bloccando il motore e il carico nella posizione in basso.
Le altre valvole presenti nel circuito servono ad evitare punte eccessive di pressione dovute ad esempio a rapidi azionamenti della valvola 4/3.