

3

Trasduttori e strumenti di misura

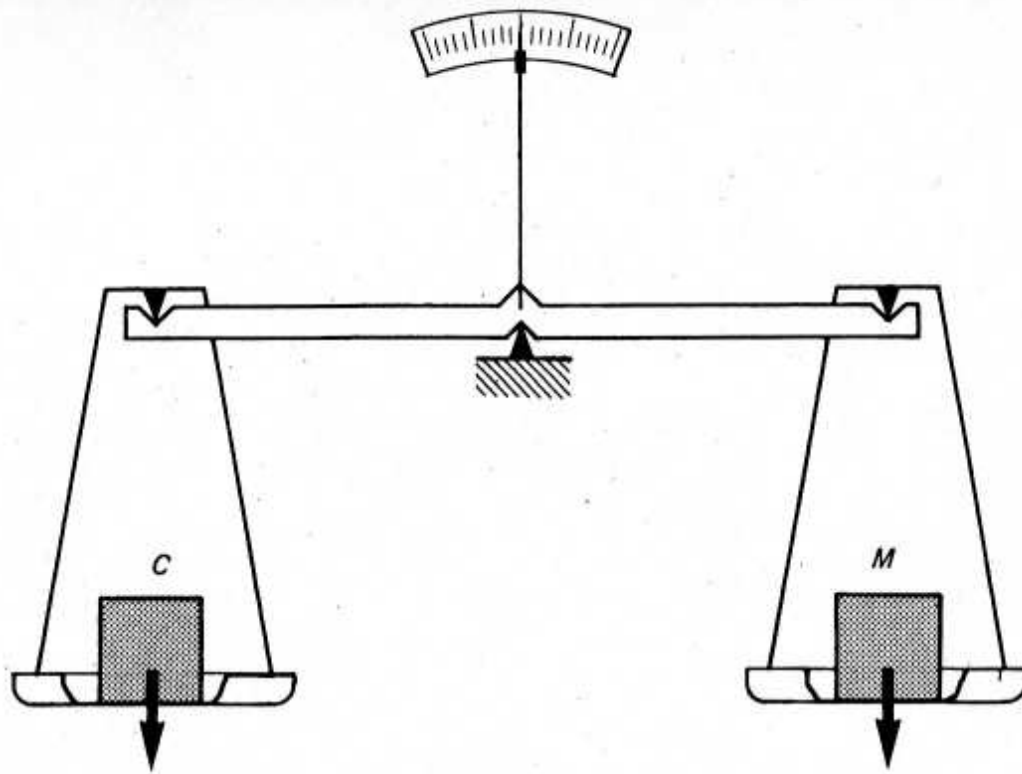
3.1. Concetto di misura - Misurazioni per confronto e per deviazione

Il concetto tradizionale di operazione di misura (misurazione), trasmesso fedelmente dai greci fino ai nostri professori di liceo, è quello di una operazione di confronto tra la grandezza fisica in esame ed un'altra, della stessa specie, scelta come unità (it. *campione* - ingl. *standard* - fr. *étalon*). L'esempio classico è quello della misura della massa (fig. 3.1) in cui uno strumento (bilancia) trova il suo equilibrio sotto l'azione delle due forze contrastanti dovute al misurando M ed al campione C .

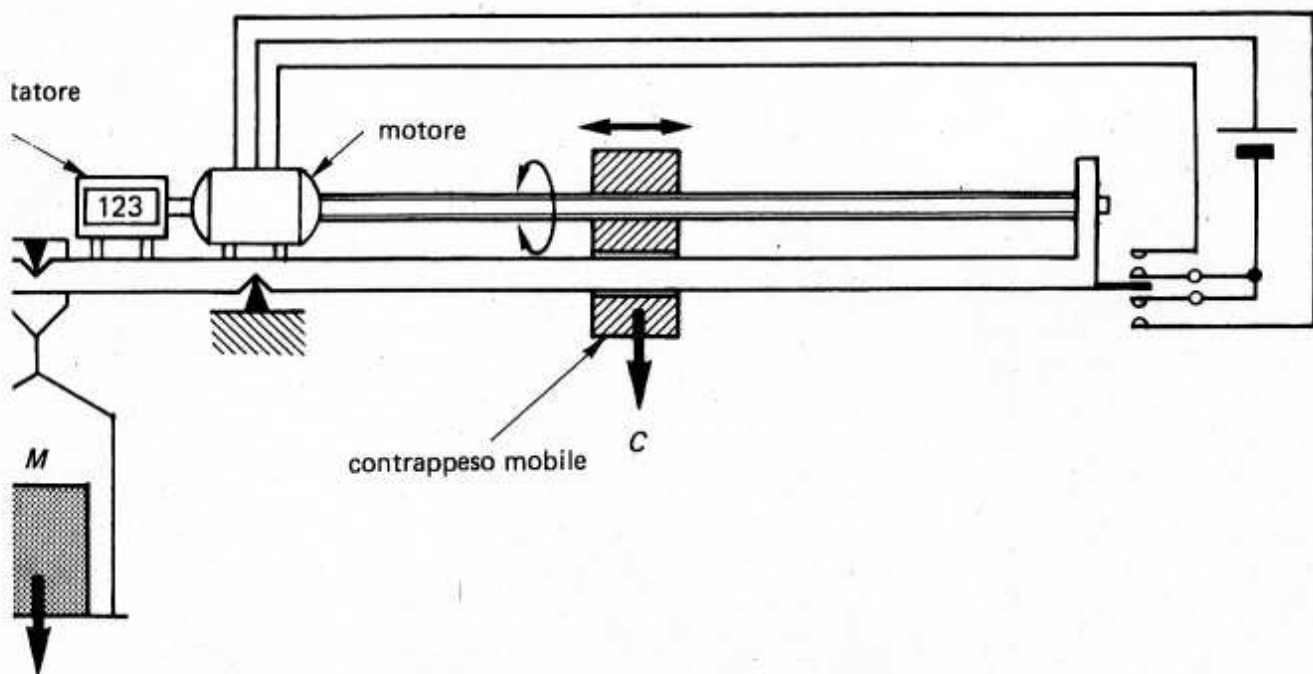
Questo schema di misurazione può anche essere automatico, come in fig. 3.2, in cui il motore sposta il contrappeso mobile C (campione) in un senso o nell'altro, per mezzo di una vite, fino ad ottenere l'equilibrio. In questa condizione il contatto si interrompe e si legge il peso direttamente al contatore.

Tuttavia ciascuno di noi, leggendo l'ora od il tachimetro della sua vettura, si è reso conto di eseguire una misura di tempo o di velocità senza avere con sé né il campione di tempo, né quello di velocità. Si tratta, in questo caso, di strumenti a deviazione in cui si legge lo spostamento di un indice sulla scala, mentre nel caso della bilancia si tratta di metodi di misura per confronto (o metodi di zero). I principi della metrologia sono tuttavia salvi perché, anche se il confronto con il campione non è diretto, la scala è stata tarata (ingl. *calibration* - fr. *étalonnage*) per confronto con un campione, ed il confronto ha quindi sempre luogo, anche se spezzato in due momenti successivi.

La distinzione tra metodi di misura per confronto e metodi per deviazione è tuttavia utile. In generale si può dire che i metodi di misura



3.1 — Bilancia (misura per confronto).



3.2 — Bilancia automatica.

per confronto sono piuttosto riservati alle misure di laboratorio mentre le misure per deviazione (più semplici e più veloci) sono utilizzate negli strumenti industriali o di uso corrente.

I metodi di misura per confronto si possono poi ulteriormente suddividere in metodi *per opposizione* ed in metodi *per sostituzione*. Nel caso della bilancia la fig. 3.1 corrisponde ad una misura per opposizione. La bilancia ad un sol piatto esegue invece misure per sostituzione. Un altro esempio di misura per sostituzione è quello della misura delle dimensioni di un pezzo a mezzo di comparatore (= strumento di zero) e di blocchetti di riscontro (= campione). Il ponte di Wheatstone (fig. 3.3) è invece un esempio di misura per opposizione.

Si noti tuttavia che lo stesso principio fisico di misura può essere in generale usato in due montaggi di tipo diverso, di cui l'uno corrisponde ad un metodo di misurazione per opposizione e l'altro per deviazione.

Così in fig. 3.4 si vedono due montaggi per la misura della piccola distanza ΔX con un metodo pneumatico (che trova applicazione in diversi tipi di comparatori, estensimetri, ecc. (1)). La variazione della distanza ΔX provoca una differenza di pressione nelle due camere a monte ed a valle dell'ugello, e dunque una differenza di livello nei tubi ad U del manometro ad acqua. Nello schema *a*) (misurazione per deviazione) si legge direttamente la differenza di livello ΔH , nello schema *b*) (misurazione per opposizione) l'operatore la compensa aprendo più o meno la vite B : raggiunto l'equilibrio si legge lo spostamento della vite.

Volendo fare un'analogia con i componenti di un circuito (fig. 3.5) si nota che nel caso del sistema per deviazione lo schema corrisponde ad un circuito aperto, con diversi elementi (trasduttori) collegati in serie,

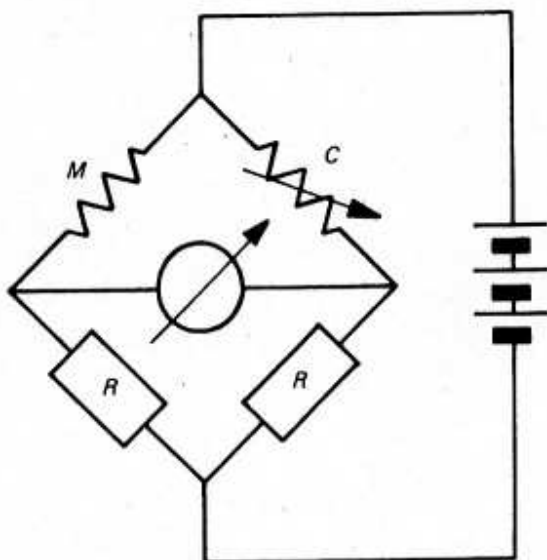


Fig. 3.3 — Ponte di Wheatstone.

(1) Si veda la fig. 7.14.

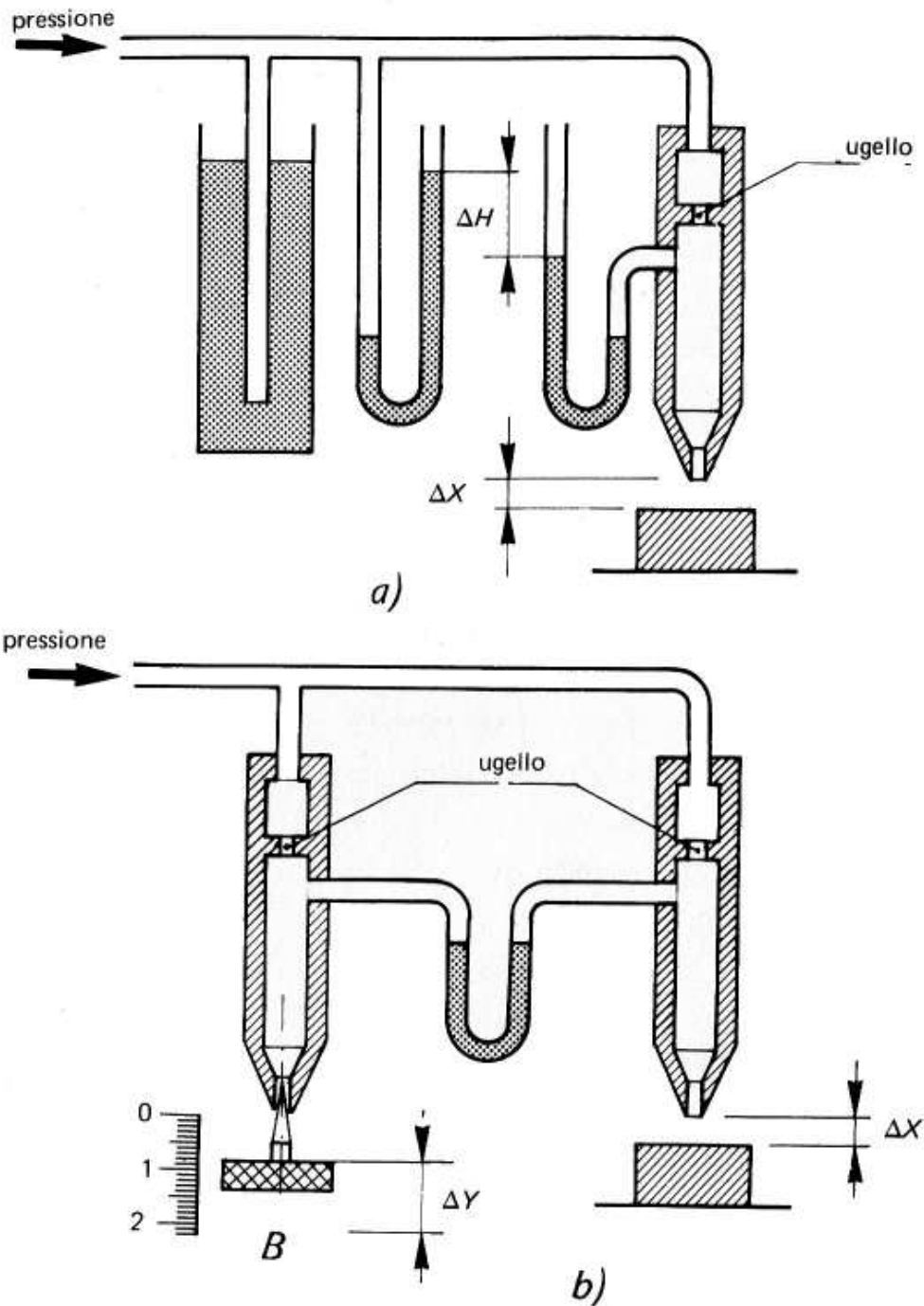


Fig. 3.4 – Misura della distanza ΔX con metodo pneumatico. a) misura per deviazione; b) misura per confronto.

mentre nel caso del sistema per opposizione, i diversi elementi formano un *anello* (ingl. *loop* - fr. *boucle*) in cui l'informazione continua a circolare fino a quando non si arriva all'equilibrio: in questo momento un elemento logico (rappresentato da una losanga) apre l'anello.

La presenza dell'elemento logico capace di prendere una decisione ed il chiudersi del circuito sono le caratteristiche che distinguono un sistema di misurazione per confronto rispetto ad uno a deviazione.

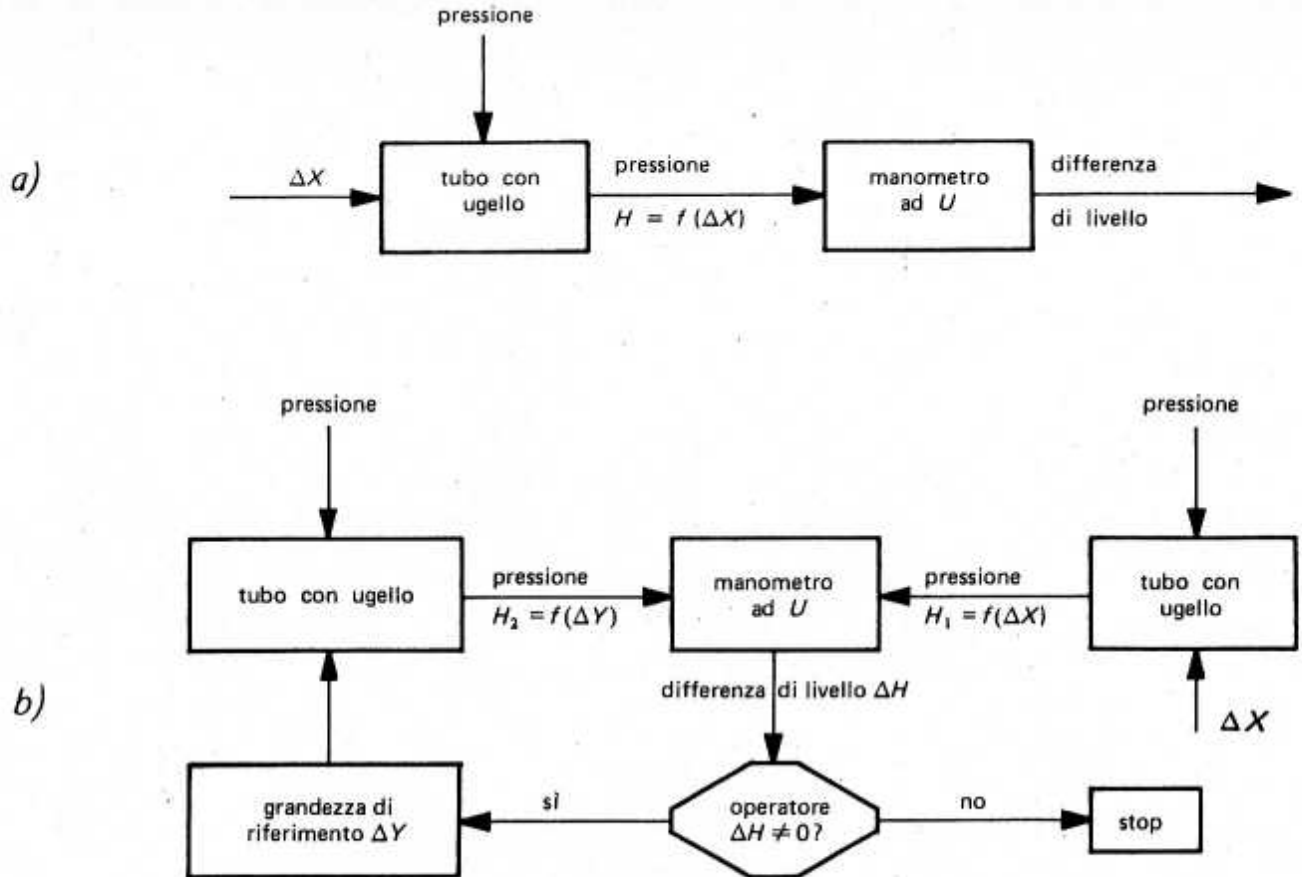


Fig. 3.5 — Schema logico della misura con i due metodi di fig. 3.4.

3.2. Sistemi di misura ed elaborazione dell'informazione

Abbiamo schematizzato in fig. 3.5 l'operazione di misura come la trasmissione di una informazione tra elementi diversi collegati tra loro in catene aperte o chiuse. Ogni elemento riceve dal precedente l'informazione in un certo formato e la restituisce al successivo in formato diverso.

In effetti l'apparecchio di misura isolato è sempre più un caso particolare: negli impianti automatici così come nei sistemi di controllo e regolazione osserviamo apparecchi di misura, circuiti logici, relais e dispositivi attuatori che si scambiano segnali, memorizzano, elaborano, prendono delle decisioni, compiono operazioni, legati tra loro da mille fili. Ed è sempre più difficile distinguere dove inizia e dove finisce l'apparecchio di misura che esegue il confronto tra la grandezza in esame ed il campione.

La fig. 3.30 mostra un sistema automatico di misura di deformazioni elastiche all'interno di un corpo. Si vede di quanti elementi, operativamente diversi, è costituito il sistema. In generale possiamo dire che nei sistemi di acquisizione ed elaborazione dei dati (misure) intervengono parte o tutti gli elementi che abbiamo schematizzato in fig. 3.6.

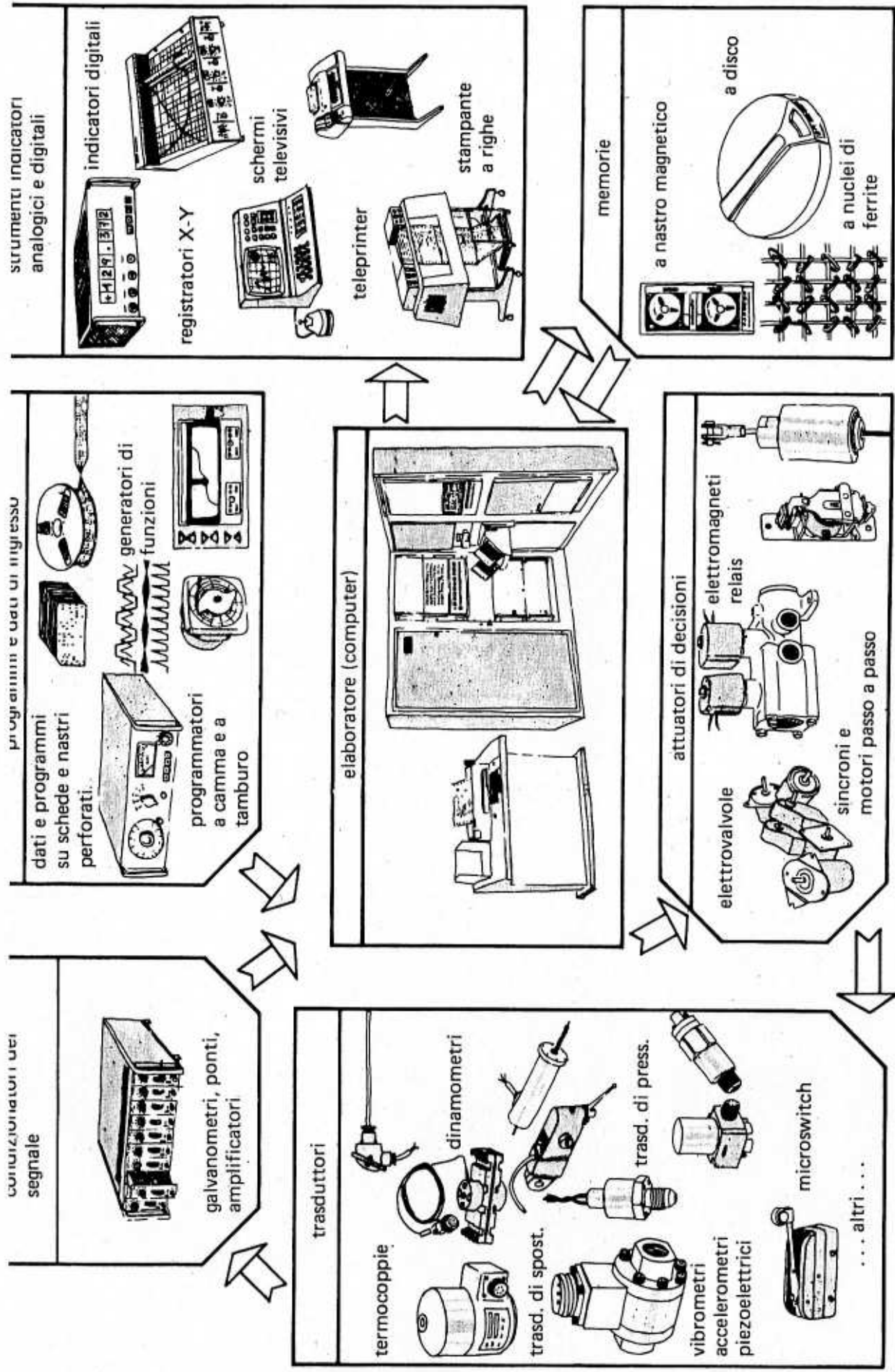


Fig. 3.6 — Elementi diversi che intervengono in un sistema di acquisizione ed elaborazione dati.

All'ingegnere metrologico il compito di conoscere quali trasduttori sensibili alle diverse grandezze che si intendono misurare sono oggi a disposizione; quali mezzi (amplificatori, ponti, ecc.) possono migliorare il segnale; quali altri (registratori, oscilloscopi, ecc.) permettono di metterlo in evidenza. Resta infine il compito di sapere come tutti questi elementi devono essere tra loro correttamente connessi, e saper giudicare se essi sono sufficientemente semplici, sensibili, sicuri (in una sola parola *affidabili*) e conoscere quali condizioni ambientali e d'uso influiscono sugli apparecchi e quale fiducia si può riporre nei risultati.

I campi di applicazione dei sistemi di elaborazione delle misure non sono d'altronde solo quelli tradizionali dell'ingegneria; in fig. 3.7 abbiamo volutamente presentato un esempio di un campo assai diverso.

Partendo da questa nuova ottica la definizione classica di operazione di misura tende ad essere messa in discussione, nel tentativo di generalizzarla. Se *fare una misura* significa *eseguire con uno strumento una operazione matematica*, ebbene ciò potrebbe voler dire non solo determinare *un rapporto*, ma anche, ad esempio, determinare l'eguaglianza di un intervallo, od un rapporto gerarchico (\geq). Stevens ha proposto la classificazione delle scale di misura riportata in tab. 3.1 con l'avvertenza che la sua classificazione non è esaustiva (egli stesso ha proposto un quinto tipo di scala: ad intervalli logaritmici). Su questa strada si potrebbe definire *misurare: ogni processo che porta ad assegnare dei numeri ad aspetti di oggetti od eventi, in accordo a certe regole (qualsiasi, purché non casuali)*. Rientrerebbero così ad esempio tra gli apparecchi di misura anche i contatori ed i rivelatori di zero (strumenti a soglia) esclusi dalla definizione classica euclidea.

Senza addentrarci in questa discussione, noi pensiamo sia tuttavia utile non insistere troppo sulla visione tradizionale dell'apparecchio di misura come un dispositivo isolato che permette il confronto di due grandezze della stessa specie, per vederlo invece come un elemento attivo ed operativo che trasforma un tipo di segnale all'ingresso in un altro all'uscita.

Tornando ai due schemi della fig. 3.5 (misura per deviazione e per confronto) possiamo osservare che lo stesso schema logico si ritrova nella maggior parte dei sistemi di comunicazione dei segnali o di regolazione. Si vedano nelle figg. 3.8 e 3.9 i due casi di sistema industriale di conteggio di scatole (circuito aperto, elementi in serie) e di regolazione a tutto o niente della temperatura in un forno (circuito chiuso asservito). E come il sistema di misura per deviazione è in generale più semplice che non quello per confronto, così i sistemi *a catena aperta* (fig. 3.8) risultano più semplici che non i sistemi *asserviti* (fig. 3.9). E' chiaro infatti che la temperatura

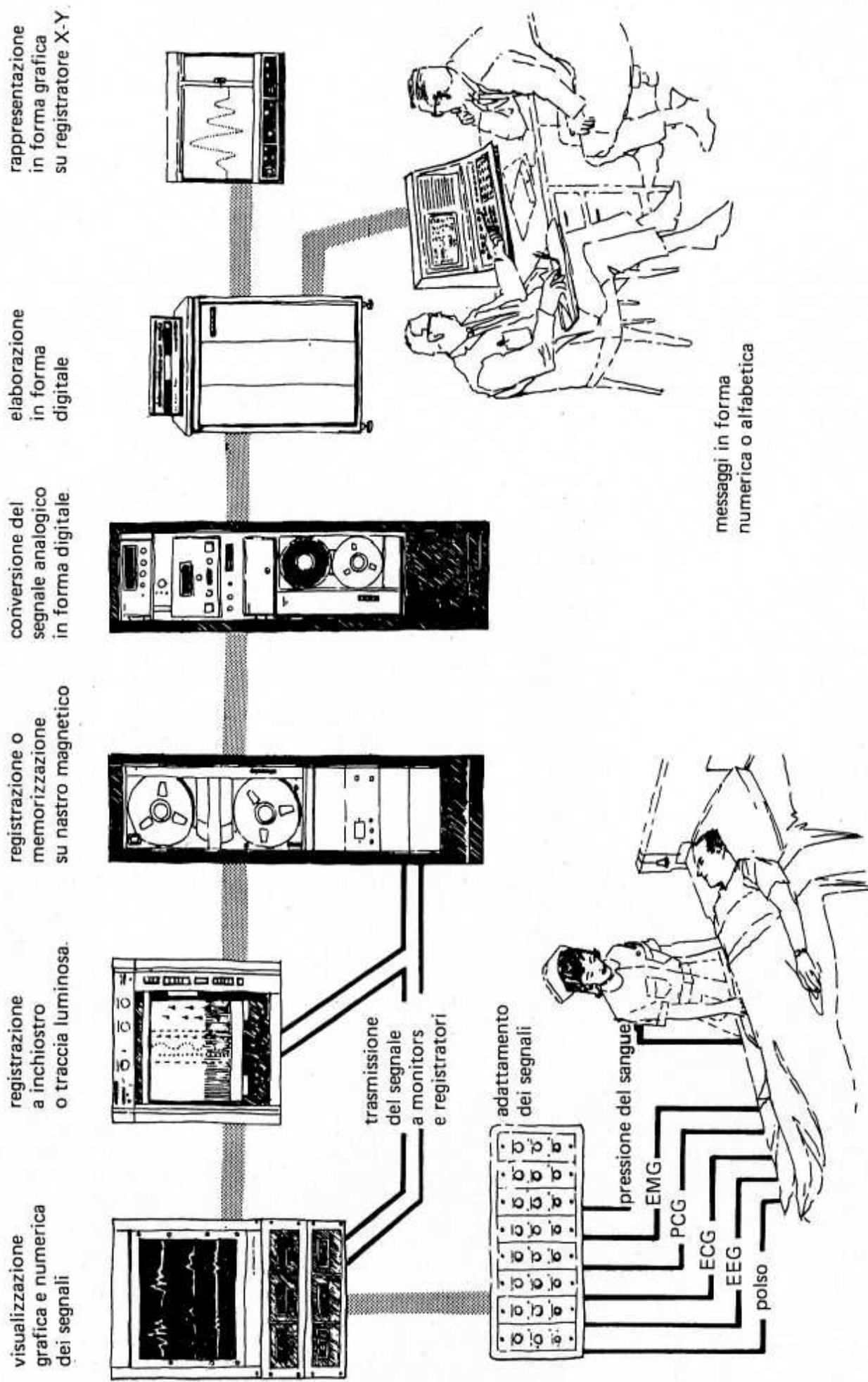


Fig. 3.7 — Sistema di acquisizione ed elaborazione di dati in un reparto di rianimazione di ospedale.

Tabella 3.1. — Classificazione delle scale di misura (secondo Stevens).

Scala	Operazione matematica corrispondente	Esempio tipico
Nominale	Determinazione di uguaglianza	Conteggio, numerazione di giocatori di una squadra di calcio
Ordinale	Determinazione di più grande di ... o più piccolo di ...	Durezza dei materiali, numerazione delle strade
Intervalli lineari	Determinazione di uguaglianza di intervalli o differenze	Temperatura ($^{\circ}\text{F}$ o $^{\circ}\text{C}$) Posizione Energia (potenziale) Tempo (calendario)
Rapporti	Determinazione di uguaglianza di rapporti	Misura di lunghezza, massa, temperatura (K)

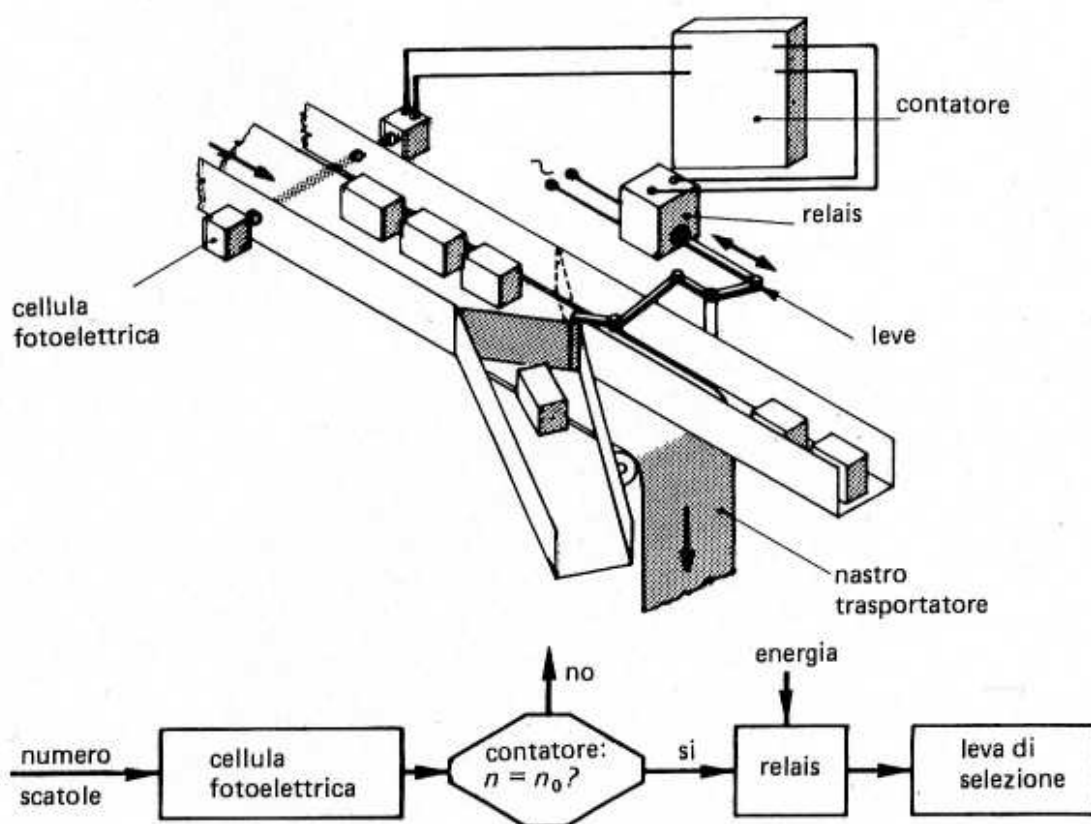


Fig. 3.8 — Catena di misura aperta (sistema industriale di conteggio di scatole di un prodotto).

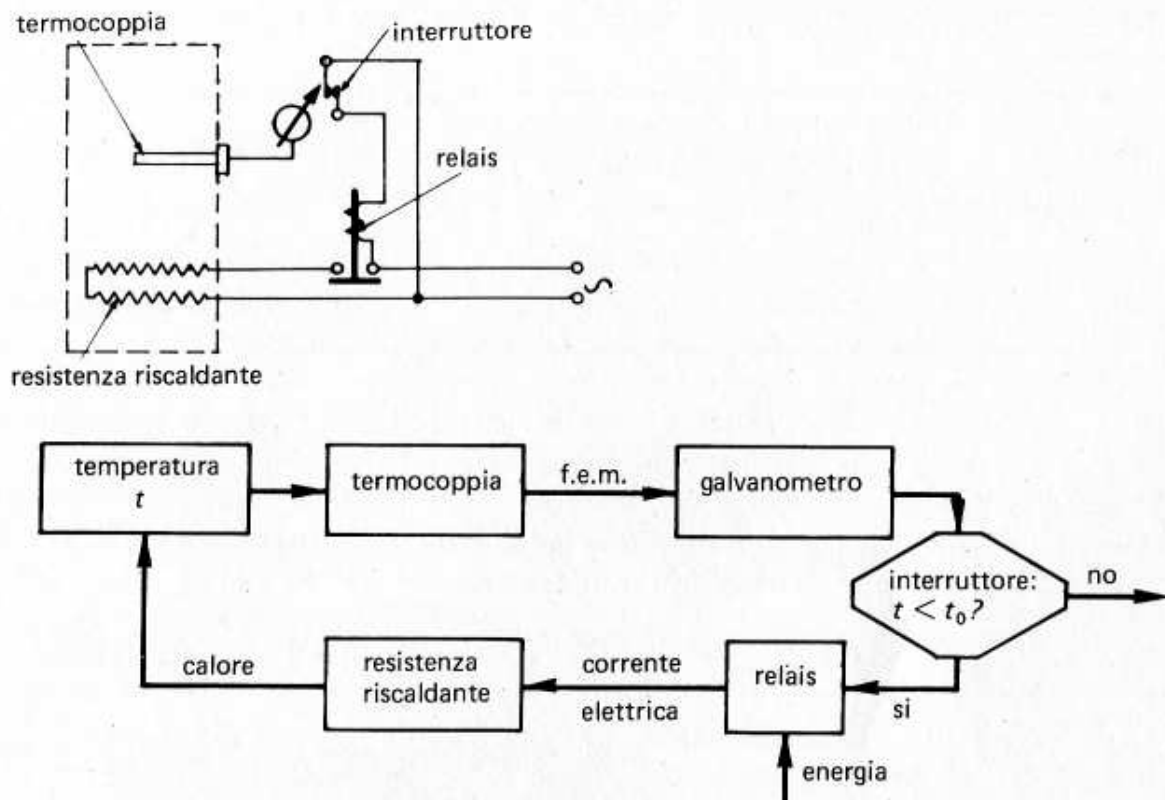


Fig. 3.9 — Regolazione per “tutto o niente” della temperatura t in un forno industriale.

nel forno subirà delle fluttuazioni, a causa del funzionamento intermittente della resistenza di riscaldamento, e che la frequenza e l'ampiezza di queste fluttuazioni dipenderanno dalle caratteristiche del sistema (2).

In generale dovremo quindi vedere un sistema di misura ed elaborazione dei dati come formato da tanti elementi diversi che si trasmettono un segnale. Anzi, lo stesso apparecchio di misura, quale noi lo vediamo nel suo insieme (galvanometro, comparatore a quadrante, ecc.) può essere ulteriormente scomposto nei vari elementi che lo costituiscono e che si trasmettono in serie il segnale, elementi che identificheremo con il termine generico di *trasduttori* (ingl. *transducers* - fr. *capteurs*).

3.3. I trasduttori

Ogni strumento di misura può quindi essere schematizzato da un quadripolo, con notazione analoga a quella degli elettronici.

Osserviamo le figg. 3.10 e 3.11 (termometro a liquido e dinamometro

(2) Di questi argomenti noi qui tuttavia non ci occuperemo, facendo essi parte della teoria della regolazione.

a molla). Un segnale entra nello strumento sotto forma di una certa quantità di energia (energia termica ed energia meccanica). Un segnale diverso (spostamento del menisco, spostamento dell'indice del dinamometro) ne esce, ancora sotto forma energetica.

In generale l'energia all'entrata si presenta sotto forma di prodotto di due grandezze delle quali una si misura mentre l'altra coesiste; così ad esempio, nel caso del dinamometro, la forza genera una tensione ed una deformazione (il loro prodotto dà luogo ad un lavoro di deformazione); solo la deformazione viene misurata per essere messa in relazione con la forza. Quanto sopra è vero sia per la grandezza all'entrata (grandezza da misurare o misuranda) sia per quella all'uscita.

Si possono dunque ritrovare in quasi tutti gli strumenti:

– un *elemento sensibile* alla grandezza in entrata (ingl. *detector* - fr. *capteur*). Nelle figg. 3.10 e 3.11 si tratta della massa del liquido in un caso, e della molla nell'altro;

– un *elemento modificatore* (ingl. *transducer* - fr. *convertisseur*) che è il cuore dello strumento e che amplifica il segnale rivelato dal misuratore, ovvero ne modifica la natura. Nei due casi considerati si tratta dell'insieme capillare-colonna di mercurio che converte una variazione di volume in una differenza di livello, ed ancora della molla che converte una forza in uno spostamento del suo estremo superiore. Da notare che oltre a questi elementi modificatori *intenzionali* ve ne possono essere altri *parassiti*: i primi sono inseriti volontariamente con lo scopo di amplificare, derivare, integrare o filtrare la grandezza da misurare, i secondi sono inseriti involontariamente e procurano un disturbo che modifica la grandezza da misurare; questi ultimi possono essere costituiti, ad esempio, dai cavi di collegamento che con la loro resistenza e capacità introducono un disturbo;

– un *elemento rivelatore* (menisco del mercurio e graduazione in un caso, indice e scala del dinamometro nell'altro) che trasforma la grandezza modificata in una indicazione che può essere percepita con uno dei nostri sensi; di solito si tratta di una percezione ottica, come è il caso degli strumenti indicatori, dei galvanometri, degli strumenti registratori, del cambiamento di colore di una miscela chimica e così via.

Lo strumento può naturalmente essere scomposto con maggiore o minor dettaglio. In certi casi può essere utile considerare lo strumento nella sua globalità, come una *black box* contraddistinta dalla sua funzione di trasferimento tra la grandezza all'uscita e quella all'entrata. In altri casi, per esaminare ad esempio gli errori introdotti dai singoli componenti, può essere utile scomporlo in più stadi.

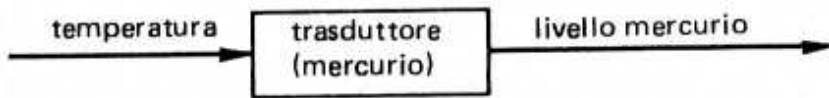
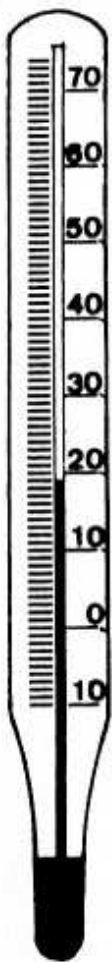
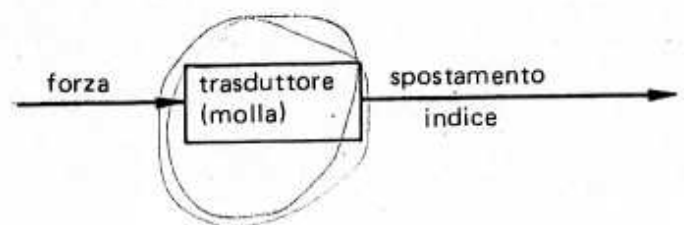
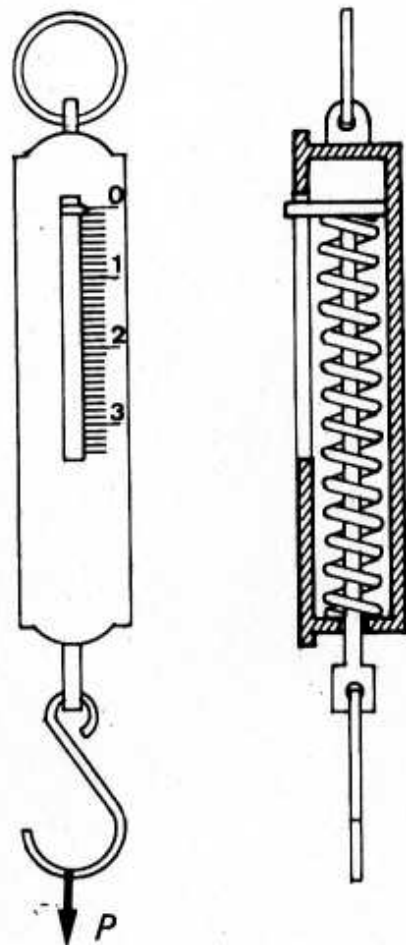


Fig. 3.10 — Termometro a colonna di liquido.



ig. 3.11 — Dinamometro a molla.

Si vedano ad esempio le figg. 3.12 e 3.13, in cui sono stati messi in evidenza gli stadi elementari che compongono due strumenti pure relativamente semplici come un manometro a tubo di Bourdon ed un dinamometro a strain gages. Si noterà che mentre nel caso di fig. 3.12 il processo di misurazione ricava dal misurando l'energia necessaria al funzionamento e quindi non richiede energia ausiliaria, tale energia è richiesta nel caso di fig. 3.13. Ciò è evidente dallo schema a blocchi: in fig. 3.13 è necessaria una entrata supplementare.

Una suddivisione dei trasduttori può quindi essere basata sul loro principio di funzionamento: essi possono essere suddivisi in due categorie. Alla prima appartengono quei trasduttori in cui l'energia assorbita dal processo di misurazione è utilizzata per ottenere direttamente un segnale di misura; alla seconda categoria appartengono quei trasduttori in cui altra energia — di tipo diverso dalla precedente — è richiesta ad una sorgente esterna per ottenere un segnale di misura. Così ad esempio nel caso di un termometro parte del calore del processo in esame è utilizzato per procurare lo spostamento della colonnina di mercurio, che dà la misura della temperatura del processo, mentre, nel caso di un estensimetro elettrico a resistenza, la deformazione del corpo trasmessa alla griglia estensimetrica ne fa variare la resistenza, però per misurarla è necessario inserirla in un circuito alimentato dall'esterno.

I trasduttori della prima categoria si chiamano *attivi*, in quanto sono capaci di utilizzare una parte dell'energia del processo in esame per ottenere un segnale all'uscita; i trasduttori della seconda categoria si chiamano *passivi* in quanto richiedono un'energia ausiliaria per ottenere un segnale all'uscita.

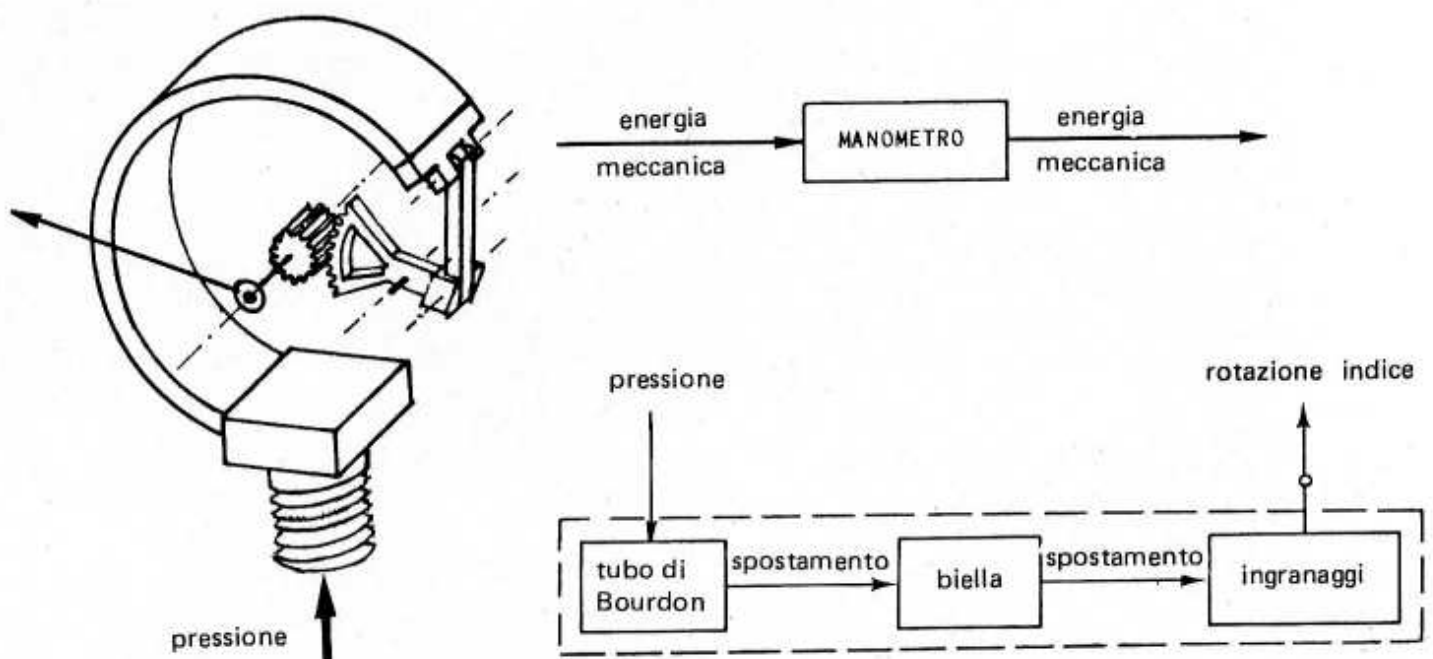
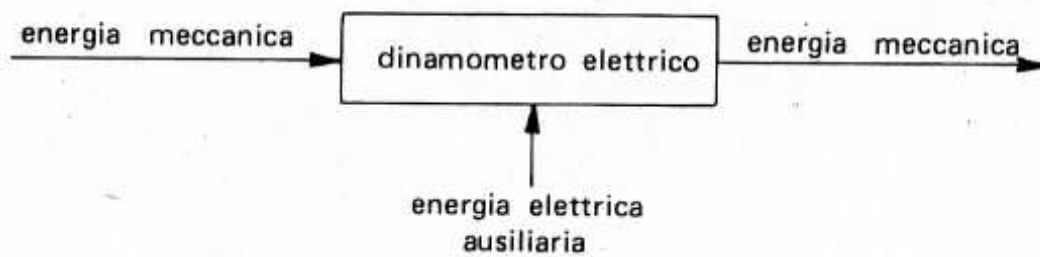
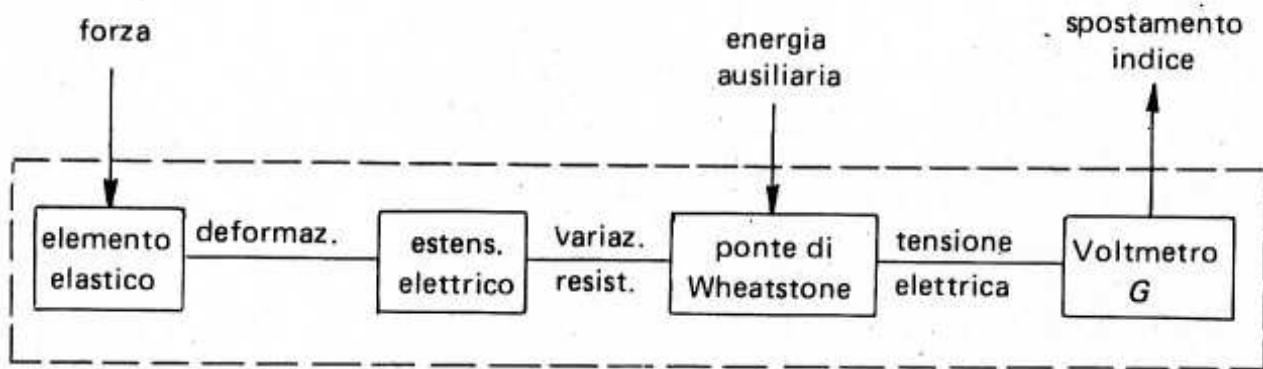
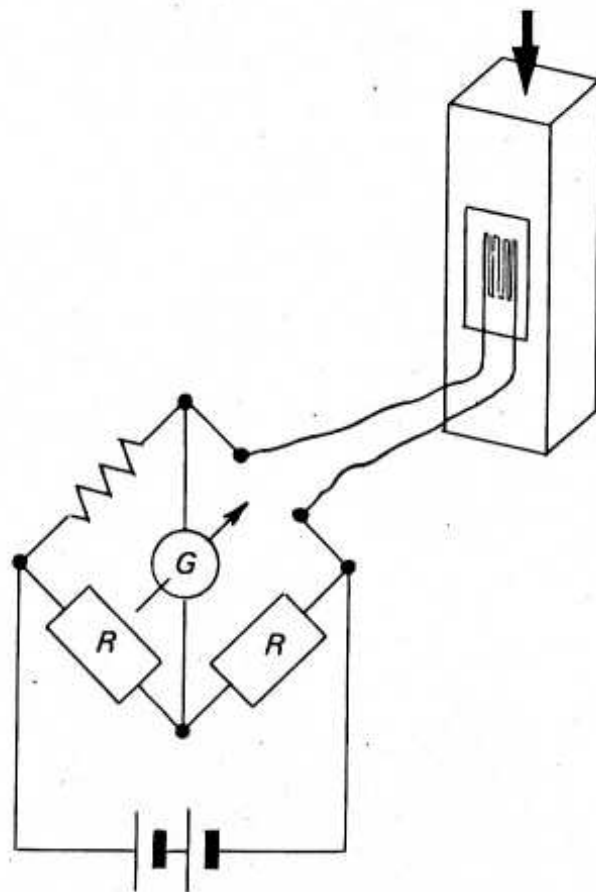


Fig. 3.12 — Manometro a tubo di Bourdon.



3.13 — Dinamometro a strain gages.

I processi e i principi fisici che con un trasferimento diretto consentono di ottenere trasduttori attivi sono, ad esempio: leve meccaniche, elettrogeneratori, effetto termoelettrico, effetto piezoelettrico, effetto magnetostrittivo e così via.

I processi che danno luogo a trasduttori passivi sono quelli che utilizzano come mezzo di trasferimento una impedenza di qualsiasi forma: resistenza, capacità e induttanza, o ancora gli amplificatori elettronici che richiedono — come è noto — l'energia necessaria per l'alimentazione.

Il trasduttore attivo si può considerare — come già detto — come un componente di un circuito con terminali di ingresso e di uscita; la sua caratteristica è espressa dalla funzione di trasferimento, che dipende dal valore delle energie dei segnali all'ingresso e all'uscita.

Il trasduttore passivo si può considerare un componente con un terminale in più, e la sua caratteristica dipende, oltre che dall'energia del segnale all'ingresso, anche dall'energia ausiliaria, perciò il rapporto di trasferimento dev'essere espresso anche in funzione dei parametri dell'energia ausiliaria.

La presenza dell'energia ausiliaria costituisce nello stesso tempo una complicazione ed una limitazione; una complicazione poiché le proprietà del trasduttore sono influenzate da detta energia, una limitazione in quanto l'energia ausiliaria dev'essere fornita in misura tale da non influenzare i risultati delle misure con gli effetti che essa può procurare.

Così ad esempio nel caso di un estensimetro elettrico (fig. 3.13) inserito in un circuito di misura, il segnale di uscita E dipende dalla corrente I di alimentazione oltre che dalla resistenza iniziale R_0 dell'estensimetro, dalla sua sensibilità alla deformazione K , nonché dal valore della deformazione applicata. Come vedremo nel cap. 8 la I non può superare un determinato valore, altrimenti il riscaldamento per effetto Joule può influenzare i risultati della misura.

Inoltre nei trasduttori passivi aumentano le possibilità di avere del rumore di fondo, proprio per la presenza dell'energia ausiliaria.

I numerosissimi tipi di trasduttori che si possono concepire sono basati sulle combinazioni fra le diverse forme di energia all'entrata ed all'uscita. Essi sfruttano i principi fisici che sono esaminati al paragrafo seguente, ed a mezzo dei quali si passa direttamente da una forma di energia ad un'altra, come è il caso dei trasduttori attivi.

Per i trasduttori passivi l'aggiunta dell'energia ausiliaria fa aumentare il numero delle combinazioni possibili.

3.4. Principi fisici utilizzati nei trasduttori per la trasformazione di un segnale energetico

La trasformazione del segnale energetico all'ingresso di un trasduttore in quello — di formato diverso — all'uscita, dipende dal principio fisico su cui è basato il funzionamento del trasduttore. Limitando l'esame alle grandezze meccaniche ed a quelle che si verificano in risposta a varie grandezze meccaniche, i principi fisici più frequentemente applicati nel campo dei trasduttori meccanici sono i seguenti:

1. I principi che legano le leggi dello spostamento e della deformazione (legge di Newton, legge di Hooke, legge della conservazione dell'energia). A questa categoria appartengono quei trasduttori nei quali la misura è legata a spostamenti o variazioni di forma di corpi, come: i trasduttori di spostamento, di velocità, di accelerazione, di pressione, di coppia torcente, di forza. La fig. 3.14 mostra alcuni sistemi meccanici per l'amplificazione di uno spostamento. Tali sistemi si ritrovano sovente come componenti di strumenti di tipo diverso, e particolarmente per la misura di spostamenti e deformazioni. Si noti ad esempio che il comparatore della fig. 3.19 corrisponde allo schema *a)* della fig. 3.14 e che l'estensimetro Johansson (fig. 7.11) utilizza lo schema *d)* della fig. 3.14. I dati sulla soglia di sensibilità ed il campo di misurazione, indicati in fig. 3.14, si riferiscono a comparatori a quadrante per la misura dello spostamento, realizzati secondo i principi schematizzati nella figura.

2. Effetto fotoelastico, legato alla variazione di proprietà ottiche di corpi trasparenti, quando questi sono assoggettati a tensione meccanica. Se ne parlerà diffusamente nel cap. 10.

3. Effetto meccanico-capacitivo, legato alla variazione della capacità di un condensatore. Può essere dovuta alle variazioni: della distanza fra le piastre, della superficie delle piastre e del dielettrico. Si vedano, in fig. 3.15, alcuni schemi possibili.

4. Effetto meccanico-resistivo che può manifestarsi in due forme:

a. come variazione della resistenza R di un conduttore quando questo è assoggettato ad una tensione meccanica. La variazione di resistenza è legata sia alla variazione di dimensioni geometriche, sia alla variazione delle proprietà elettriche del conduttore (resistività ρ) secondo la 2^a legge di Ohm:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Negli estensimetri elettrici metallici è preponderante il termine dovuto alla variazione di dimensioni geometriche, mentre negli estensimetri a semiconduttore è preponderante il termine dovuto alla variazione di resistività. Se ne parlerà diffusamente nel cap. 8.

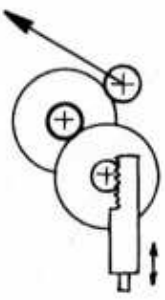
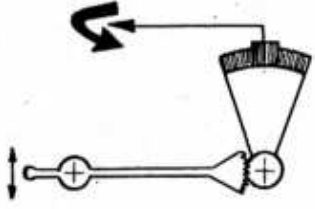
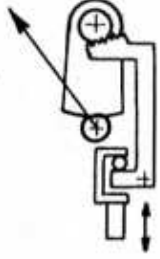
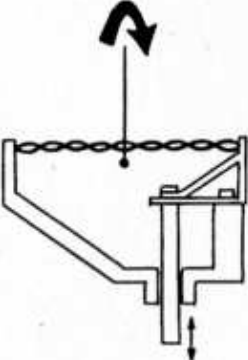
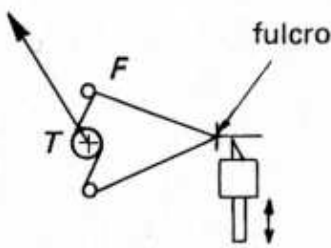
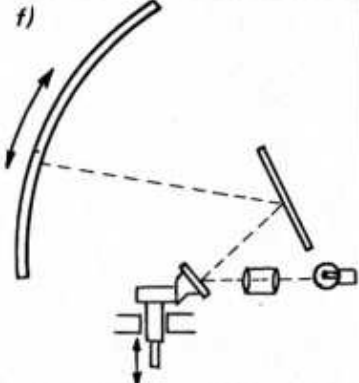
		
<p>accoppiamento pignone e cremagliera più treni di ingranaggi amplificatori</p>	<p>leva con settore dentato e pignone più corona dentata e pignone finale</p>	<p>leve composte collegate da settori dentati e pignoni</p>
<p>1 div = 1 – 10 μm corsa = 1 – 10 mm</p>	<p>1 div = 2 – 20 μm corsa = 0,2 – 2 mm</p>	<p>1 div = 0,5 – 10 μm corsa = 0,05 – 0,5 mm</p>
		
<p>lo spostamento dell'asta provoca una variazione di tensione sul nastro e la conseguente rotazione dell'indice</p>	<p>lo spostamento del palpatore fa ruotare la forcella F ai cui estremi è fissato il nastro avvolto intorno al tamburo T, che ruota con l'indice</p>	<p>la rotazione dello specchietto sposta lo spot luminoso su di una scala graduata circolare</p>
<p>1 div = 0,2 – 10 μm corsa = 0,02 – 1 mm</p>	<p>1 div = 0,2 – 5 μm corsa = 0,02 – 0,5 mm</p>	<p>1 div = 0,5 – 1 μm corsa = 0,07 – 0,1 mm</p>

Fig. 3.14 – Schema di alcuni sistemi meccanici di amplificazione dei piccoli spostamenti (secondo Farago F.T., *Handbook of dimensional measurement*, Industrial Press, New York, 1968).

Nel campo della misura di grandezze meccaniche bisogna osservare che i trasduttori che trasformano la grandezza da misurare nella deformazione di un corpo elastico hanno una grande importanza. E' infatti sovente semplice trasformare una pressione, uno spostamento, una forza, una coppia, nella deformazione di un corpo elastico, e la maggior parte dei fenomeni fisici possono d'altra parte dar luogo a forze, variazioni di volume, spostamenti relativi.

Il ricondurre una grandezza fisica ad una deformazione elastica è vantaggioso perché si può oggi disporre di estensimetri elettrici a resistenza (strain gages, cap. 8), che ai vantaggi di una grande elasticità d'impiego uniscono quello di una uscita elettrica. E sebbene il campo di deformazione lineica che si può misurare con questi trasduttori sia limitato ad un massimo dello 0,15% circa, si può sempre agire, a seconda del valore dello sforzo applicato, sulla forma dell'elemento elastico che, di volta in volta, avrà la forma di una barra, un tubo, una lamina in flessione, una membrana ecc. con montaggi degli strain gages in serie o in opposizione.

Il principio di misura è sempre lo stesso, ma si può immaginare a quante differenti realizzazioni esso ha dato luogo (si vedano alcuni esempi in fig. 3.22).

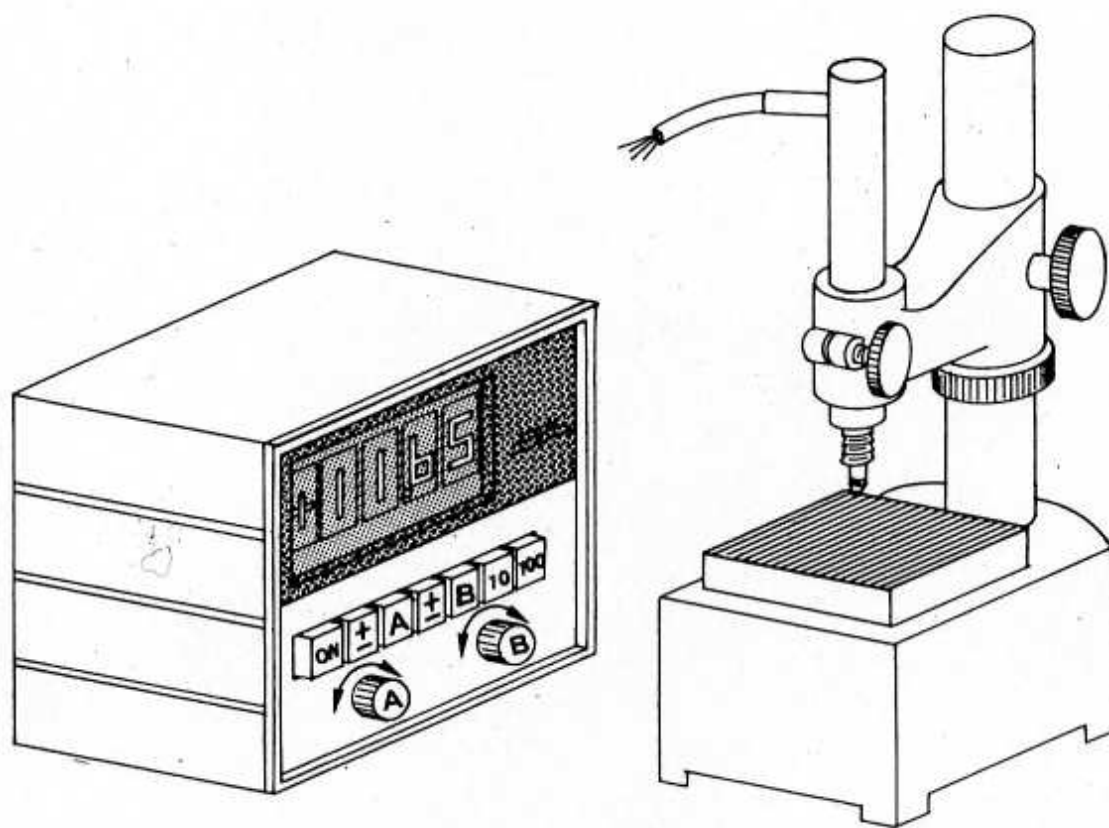


Fig. 3.21 — Micrometro di tipo elettronico, con trasduttore differenziale di spostamento a variazione di induttanza, memoria e strumento indicatore numerico.

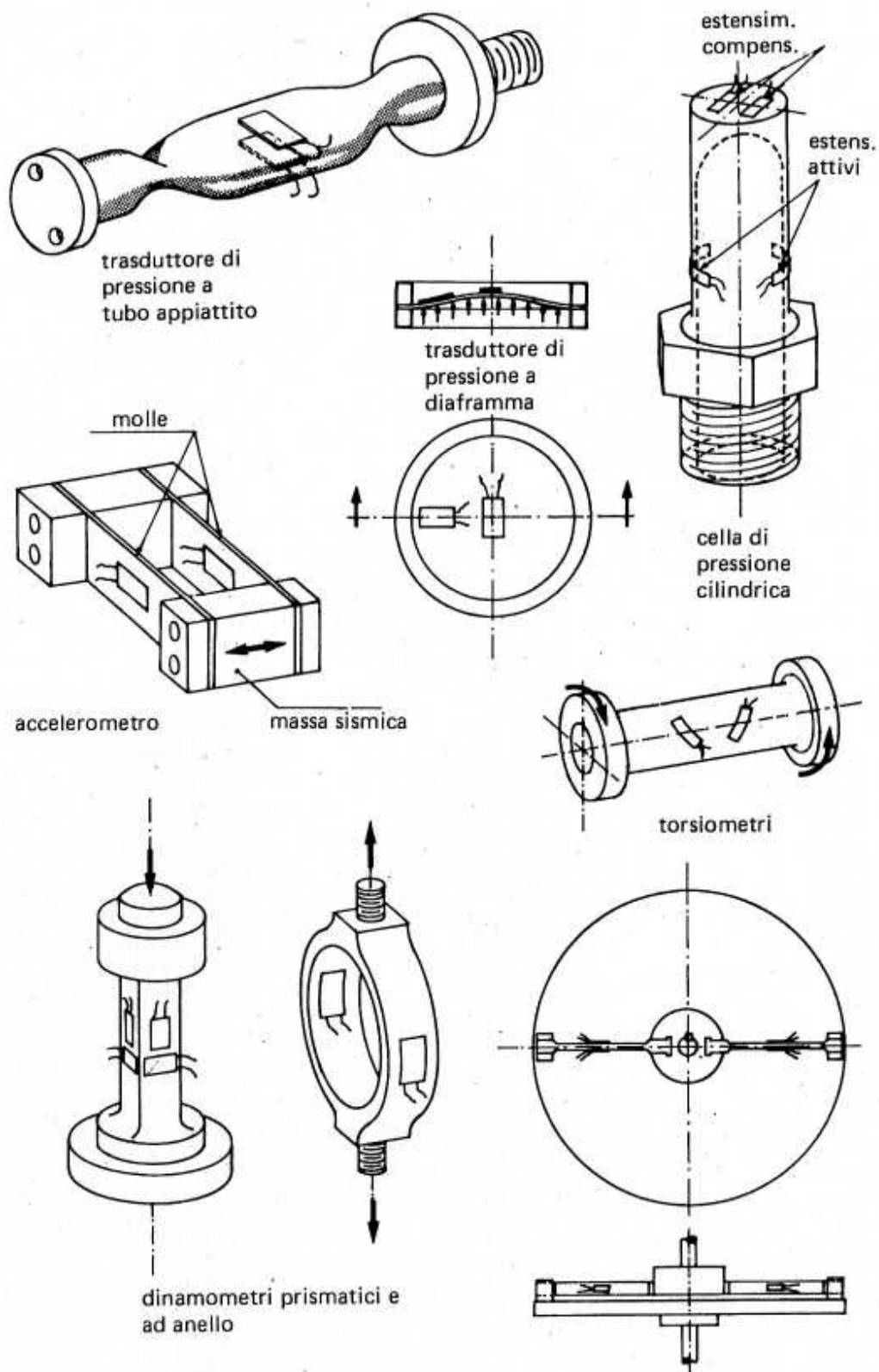
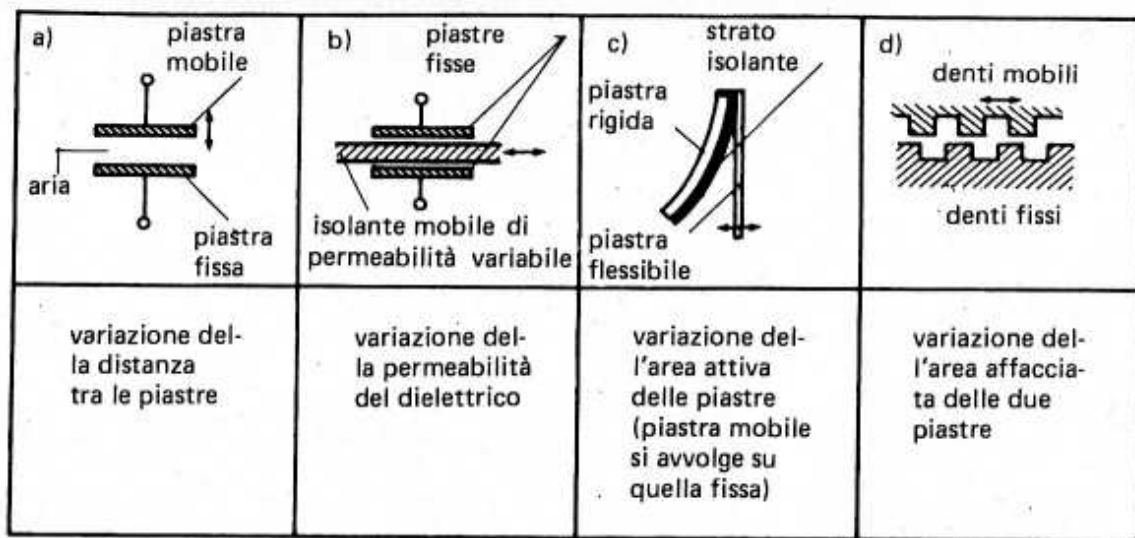


Fig. 3.22 — Misura di differenti grandezze fisiche (pressione, accelerazione, coppia, forza ...) mediante trasduttori che utilizzano estensimetri elettrici a resistenza.



3.15 – Effetti meccanico-capacitivi che trovano applicazione nella costruzione di trasduttori.

b. Come variazione della resistenza di un conduttore per effetto tanto della variazione della sua lunghezza attiva. E' il caso di una bobina con un cursore mobile che inserisce nel circuito una parte soltanto delle spire.

5. *Effetto induttivo*, legato alla variazione della induttanza propria o mutua in 1, 2 o più bobine, causata: dalla variazione del numero delle spire n ; dalla variazione del fattore di forma G ; dalla variazione della permeabilità magnetica μ . L'induttanza cambia anche a seconda che la bobina sia avvolta in aria ovvero intorno ad un ferro: la bobina in aria può funzionare a frequenza portante elevata e perciò per fenomeni di alta frequenza; la bobina in ferro non produce campi magnetici dispersi e ciò non risente dei loro effetti, come è il caso della bobina in aria. La fig. 3.16 presenta un quadro generale dei trasduttori basati sul principio induttivo.

6. *Effetto piezoelettrico*, legato alla variazione di tensione elettrostatica presentata da alcuni materiali (sale di Rochelle, cristallo di quarzo), quando sono assoggettati ad una tensione meccanica. La piezoelettricità si manifesta in quei cristalli che non possiedono un centro di simmetria. Si veda la fig. 3.17.

7. *Effetto magnetostrittivo*, legato alla variazione di lunghezza di un materiale ferromagnetico a causa di una variazione del campo magnetico longitudinale (*effetto Joule*) oppure alla variazione di flusso magnetico prodotto da una variazione di lunghezza di un magnete permanente (*effetto magnetostrittivo*). Applicazioni del primo caso si trovano nei sistemi interferometrici,

variaz. L dovuta a:		uscita singola			uscita differenziale		
		n	G	μ riluttanza	n	G	μ riluttanza
induttanza propria	aria						
	ferro						
induttanza mutua	aria						
	ferro						

Fig. 3.16 — Trasduttori basati su principi induttivi.

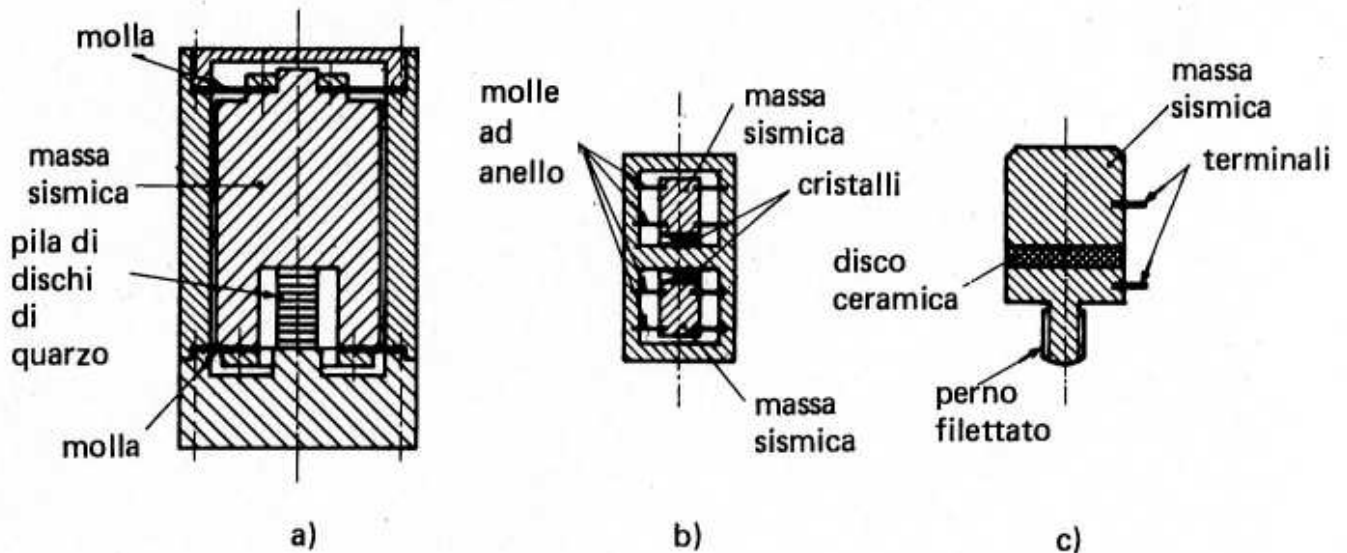


Fig. 3.17 — Accelerometri piezoelettrici. Diverse soluzioni costruttive: a) trasduttore ad alta sensibilità, che utilizza 10 dischetti di quarzo; b) trasduttore formato da due accelerometri accoppiati; c) accelerometro miniaturizzato con disco ceramico ferroelettrico.

per imprimere spostamenti dell'ordine della frazione di lunghezza d'onda, e del secondo caso in trasduttori usati per la misura della detonazione di un motore a combustione interna (fig. 3.18). Inoltre, quando un cavo, posto in un campo magnetico longitudinale, ed assoggettato ad una coppia, genera ai suoi capi un impulso di tensione, si parla di *effetto Wertheim*, mentre l'inverso prende il nome di *effetto Wiedeman*.

8. *Effetto generatore*, legato allo sviluppo di una forza elettromotrice, quando si crea un moto relativo tra un conduttore ed un campo magnetico. Un'applicazione diffusa si trova nella dinamo tachimetrica.

9. *Effetto giromagnetico*, legato alla variazione di magnetizzazione causata da una rotazione (*effetto Barnett*); l'inverso prende il nome di *effetto Einstein-Deettaas*.

Bisogna tuttavia notare che non tutti i principi di misura sono ugualmente utilizzati. Abbiamo già accennato all'enorme sviluppo che hanno avuto, in questi ultimi anni, i trasduttori ad uscita elettrica. Ciò per la grande prontezza della risposta, per la possibilità di trasmettere il segnale a distanza e di amplificarlo, ma soprattutto perché essi possono essere integrati in una catena logica i cui elementi sono sostanzialmente di tipo elettronico e si trovano oggi facilmente sul mercato.

Così, in generale, in tutti i casi di sistemi di controllo o regolazione, si darà la preferenza ad una termocoppia rispetto ad un termometro a lamina bimetallica o a liquido.

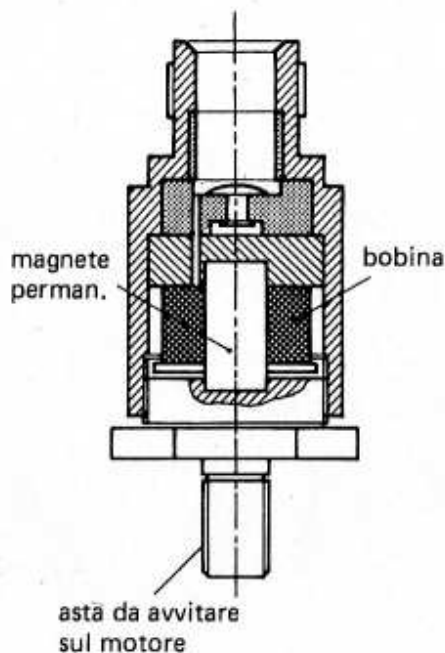


Fig. 3.18 — Misuratore della detonazione in un motore a combustione interna, basato sul principio magnetostrittivo.

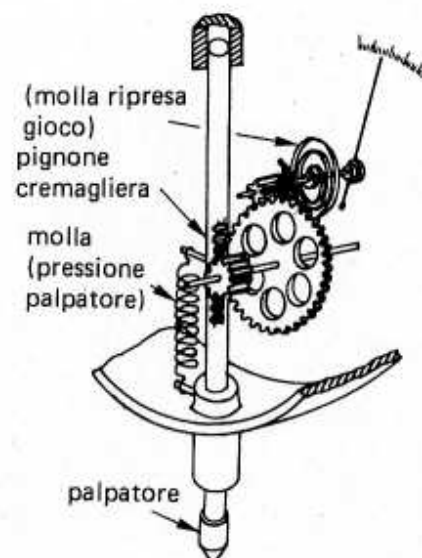


Fig. 3.19 — Comparatore centesimale a quadrante.

Nel campo della costruzione di comparatori e micrometri si stanno abbandonando i pur diffusissimi e precisi sistemi ad ingranaggi (fig. 3.19) o a nastro metallico avvolto (3). In un primo tempo si sono applicati ai quadranti di questi strumenti due interruttori, azionati dallo spostamento dell'indice (fig. 3.20), che hanno permesso di segnalare, ad esempio mediante l'accensione di lampadine su di un quadro di controllo, il superamento di limiti di tolleranza prefissati. Oggi, per scopi di controllo e regolazione, si dà la preferenza a micrometri in cui l'elemento sensibile è un trasduttore differenziale di spostamenti a variazione d'induttanza (4). Un micrometro elettrico come quello di fig. 3.21 associato ad un alimentatore, uno strumento indicatore (millivoltmetro) ed una piccola memoria magnetica, permette di commutare istantaneamente la scala di misura, di dare direttamente la differenza tra l'indicazione dello strumento ed un valore prefissato, di indicare direttamente l'eccentricità di un corpo cilindrico come differenza tra il valore massimo ed il valore minimo misurato, o lo spessore di un corpo tubolare come differenza tra la lettura all'interno e quella all'esterno, di stampare questi risultati, o di memorizzarli o segnalarli in forme diverse.

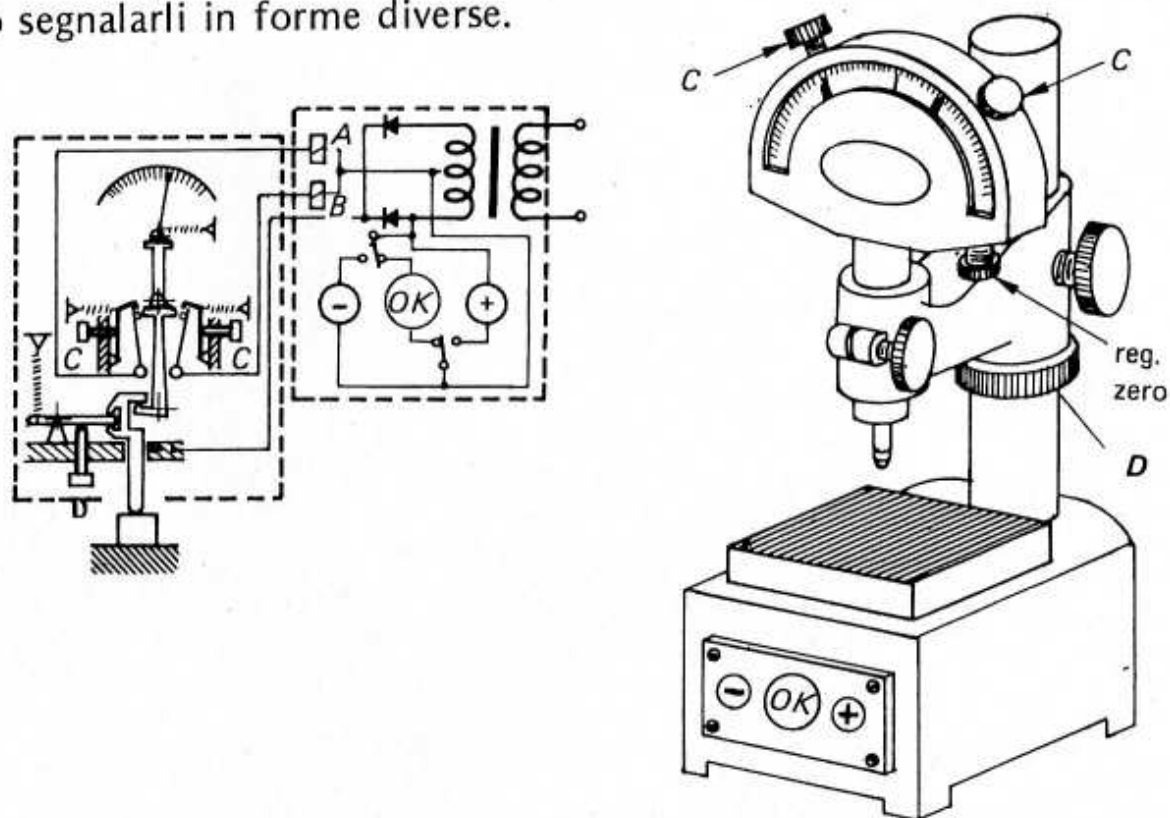


Fig. 3.20 — Micrometro meccanico con sistema elettrico di segnalazione. Le tre lampadine: -, OK, + indicano le tre posizioni dell'indice entro o fuori la zona di tolleranza, fissata dai due indici registrabili. A sinistra lo schema elettrico (A, B: relai; C: viti di registrazione della posizione degli indici di tolleranza; D: viti di sollevamento del palpatore).

- (3) Si tratta dello schema della fig. 3.14 d). Con questi sistemi si è arrivati a soglie di sensibilità di $0,01 \mu\text{m}$.
- (4) Schema della casella in alto a destra in fig. 3.16.

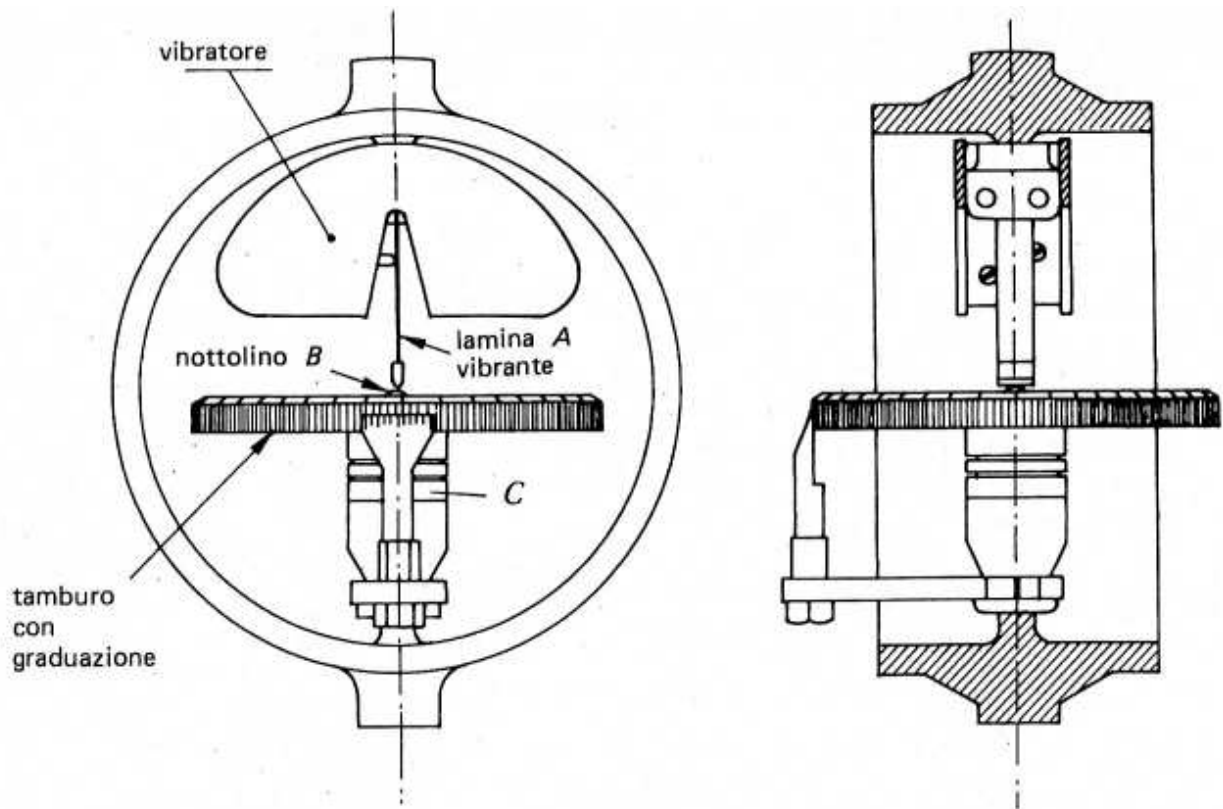


Fig. 3.23. — Dinamometro ad anello Morehouse. Si misura lo schiacciamento diametrale dell'anello. Un rivelatore acustico è utilizzato per segnalare il raggiungimento della condizione di zero, in cui si effettua la lettura sul tamburo della graduazione.

Tabella 3.2. — Strumenti di rivelazione.

			limiti di frequenza		
Strumenti rivelatori	Strumenti indicatori	Indice meccanico	{ numeratore meccanico numeratore elettronico		
		Indice luminoso			
		Indice numerico			
	Strumenti registratori	Indice meccanico	carta normale	}	0,5 ÷ 1 Hz
			carta cerata		
			carta metallizzata		
		Indice luminoso	carta fotografica	}	3000 Hz
			carta autosviluppante		
			pellicola		
	Strumenti stampanti	Indice a raggio catodico	carta fotografica	}	3000 Hz
		pellicola	> 50000 Hz		
Registratore elettrostatico				3000 Hz	
Registratore magnetico				1 MHz	
Strumenti stampanti	Scriventi	carta	}	50 can/s	
		scheda		20 can/s	
Strumenti stampanti	Perforatrici	nastro o banda di carta	}	10 can/s	
		scheda		1,5 can/s	

quando questo è difficilmente rilevabile con l'indice di lettura; così ad esempio in una macchina di prova di materiali, in una prova di trazione effettuata su un provino di acciaio dolce, l'indice folle può servire a determinare il carico di snervamento superiore ed il carico di rottura.

Gli indici meccanici debbono avere l'estremità appiattita o debbono terminare a punta per ridurre al minimo gli errori di lettura.

Gli strumenti con indice luminoso in generale sono costruiti in modo da riflettere sulla scala di lettura, attraverso uno specchio collegato all'equipaggio mobile dell'elemento sensibile, un indice proiettato da una sorgente luminosa (5). Essi hanno il vantaggio rispetto agli indici meccanici: *a)* di avere una minore inerzia e di potere quindi seguire fenomeni variabili nel tempo con rapidità; *b)* di presentare una maggiore facilità di lettura; *c)* di potere amplificare entro uno spazio limitato il cammino del raggio luminoso. Esempi di strumenti con indice luminoso sono costituiti dai galvanometri, dagli amperometri, ecc.

Gli strumenti con indice numerico sono quelli che mostrano su un quadrante o su un visore direttamente il numero corrispondente al valore della grandezza in esame (6). Questi indici numerici possono essere numeratori meccanici o luminosi: nei primi il numeratore è comandato da un motorino elettrico o da un sistema meccanico di trasmissione, collegato all'elemento sensibile; nei secondi si illuminano i filamenti luminosi a forma di cifra.

Gli strumenti con indice numerico, rispetto agli altri finora esaminati, che sono strumenti analogici, hanno il vantaggio di presentare un errore di lettura ed un errore di scelta di scala nulli. Questi strumenti rivelatori si vanno sempre più diffondendo per la facilità di lettura, anche se il loro costo è più elevato.

(5) Si veda lo schema della fig. 3.14 f).

(6) Si veda, ad esempio, lo strumento disegnato in fig. 3.21.