

Sensori di temperatura

12.1. Introduzione

La *temperatura* rientra tra quelle *variabili* cosiddette *intensive* nel senso che è un parametro che non può essere sommato alla stessa maniera per esempio dello *spostamento*, che è una *variabile estensiva*. Questa premessa è necessaria perché chi legge si abitui a considerare la temperatura e i sensori di temperatura in modo atipico rispetto agli altri parametri e agli altri sensori che saranno esaminati di seguito.

Che il *calore* sia una forma di energia è un concetto primitivo, ma fu solo intorno alla metà del 1800 che Joule dimostrò l'equivalenza numerica tra calore ed energia meccanica. Si ricorda che il trasferimento di calore può avvenire per *conduzione*, attraverso un materiale solido o un fluido fermo, per *convezione*, attraverso il moto di un fluido, e per *radiazione* o *irraggiamento*, attraverso onde elettromagnetiche.

La *temperatura* è la *misura del grado di riscaldamento o raffreddamento di un corpo* ed è misurata mediante sensori che prendono anche il nome di *termometri*. Questi si basano molto spesso sul principio che due corpi inizialmente a differenti temperature, quando sono messi a contatto, si portano in equilibrio termico raggiungendo la stessa temperatura. Bisogna solo porre attenzione, nell'uso dei sensori termici, che la loro presenza non alteri il valore di temperatura da misurare.

Poiché la misura della temperatura è eseguita utilizzando l'effetto che essa produce non è semplice definire una *scala* per le temperature così come per la lunghezza. Nella scala assoluta delle temperature è stato definito un solo *punto* fisso che è quello *triplo dell'acqua*, pari a 273,16 K e 0,01 °C (gradi Celsius e non centigradi come molto spesso sono denominati). In realtà poi esiste una *scala internazionale pratica di temperatura*, in cui sono definiti diversi punti fissi, facilmente riproducibili. A questo proposito è importante ricordare alcune definizioni:

- al *punto di ebollizione* corrisponde la temperatura di equilibrio tra le fasi liquida e gassosa di una sostanza;
- al *punto di congelamento* corrisponde la temperatura di equilibrio tra le fasi solida e liquida;
- al *punto di sublimazione* corrisponde la temperatura alla quale la sostanza passa direttamente dalla fase solida a quella gassosa;

— al *punto di congelamento dell'acqua* corrisponde la temperatura di 273,15 K, 0 °C, 32 °F.

È opportuno richiamare una legge fondamentale della fisica dovuta a Boyle, confermata poi dalla legge di Charles. La legge di Boyle afferma che in una data quantità di gas il prodotto della pressione, p , per il volume, V , resta fisso a temperatura assoluta, T , costante:

$$[12.1] \quad p V = R T$$

dove R è una costante di proporzionalità pari al numero di molecole moltiplicato per la costante, k , di Boltzmann. Un termometro a gas, a volume costante, nel quale si misura la pressione di un volume fisso di un gas inerte, funzione della temperatura, è alla base della scala termodinamica della temperatura.

Un'altra legge importante da tener presente nella realizzazione di sensori di temperatura è quella di Fourier, che afferma che la variazione temporale della quantità di calore trasferita a un corpo è proporzionale alla conducibilità termica del corpo, all'area della sezione trasversale e al gradiente di temperatura nella direzione del flusso di calore.

12.2. Sensori di temperatura

Per misurare la temperatura vi sono tanti metodi, che danno luogo a una notevole quantità di sensori. Nelle pagine seguenti se ne farà una disamina sintetica, ma quanto più possibile completa.

I *primi sensori di temperatura* realizzati furono i *termometri a dilatazione* che utilizzano tubi di vetro con all'interno acqua, alcool o mercurio. Il motivo è semplice e risiede nel noto principio fisico dell'espansione e contrazione di un corpo soggetto a variazioni di temperatura. Nei termometri a dilatazione la sensibilità dipende dai coefficienti di dilatazione termica relativi ai due materiali utilizzati: solidi, liquidi o gas. La misura della temperatura non è assoluta, per cui è necessario tarare la scala del sensore. I termometri a dilatazione si distinguono in *sensori liquido-in-vetro e bimetallici*. Il limite di temperatura inferiore scende difficilmente al di sotto dei -50 °C e quello superiore sale difficilmente al di sopra dei 600 °C. L'accuratezza varia con il costo del sensore e generalmente l'incertezza è intorno all'1% per quelli bimetallici, che non consentono neanche di raggiungere elevate risoluzioni, mentre in quelli in vetro si ha una maggiore accuratezza e nei sensori di maggior pregio si possono avere incertezze ridotte dell'ordine di 0,01%.

Vi sono altri sensori che hanno in uscita un segnale elettrico ed essi raggruppano le *termocoppie*, i *termometri a resistenza*, i *termistori* e quelli *a semiconduttore*. I primi due tipi di sensori risalgono agli inizi del diciannovesimo secolo, mentre gli ultimi due hanno avuto lo stesso sviluppo della tecnologia dei semiconduttori, tanto che la maggior parte de-

gli ultimi sensori di temperatura immessi sul mercato utilizzano tale tecnologia. Il limite inferiore di questi termometri è intorno ai -200°C , mentre quello superiore, ottenuto con metalli preziosi, arriva ai 1500°C . Anche per questi sensori i livelli di precisione sono in un'ampia gamma e sono legati al costo. Le maggiori accuratezze e linearità si hanno con i termometri a resistenza.

Altri tipi di sensori sono quelli che non richiedono un contatto meccanico con il mezzo di cui si vuole misurare la temperatura e fanno uso dell'energia irradiata dal corpo caldo. Essi risultano molto precisi, ma sono anche costosi, e prendono il nome di *pirometri*.

12.3. Sensori liquido in vetro

Questi sensori o termometri hanno come elementi costitutivi un *bulbo* ampio all'estremità inferiore, un *tubo capillare* dotato di *scala graduata*, il *liquido* che riempie il bulbo e parte del capillare, un *bulbo più piccolo* all'estremità superiore. Questo ultimo bulbo rappresenta un serbatoio di sicurezza nell'eventualità si ecceda il campo di temperatura stabilito. Quando la temperatura cresce, la maggiore dilatazione del liquido rispetto a quella del vetro causa l'innalzamento del liquido nel capillare dal quale si risale alla misura della temperatura.

Nel volume racchiuso al di sopra del liquido nel capillare può esserci il vuoto, aria o altro gas, in genere gas inerte per i campi di temperatura più elevati. Infatti l'aumento di pressione, che deve essere inizialmente controllato con molta cura, consente un aumento del punto di ebollizione del liquido.

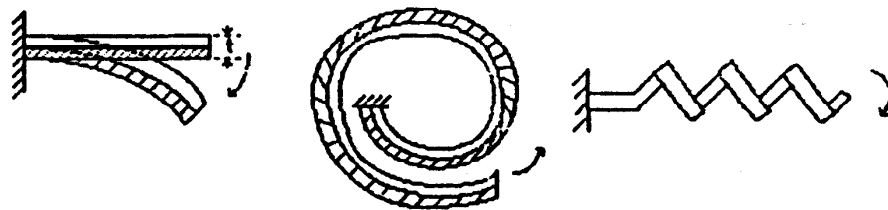
Il liquido utilizzato in un sensore in vetro deve avere diverse proprietà. Perché lo strumento abbia una *scala lineare* vi dovrebbe essere una relazione di proporzionalità tra temperatura e innalzamento del liquido nel capillare. Il *coefficiente di dilatazione* del liquido dovrebbe essere quanto più elevato possibile rispetto a quello del vetro, in quanto la maggiore espansione permette di allargare il diametro del capillare e quindi di avere una lettura più facile; al riguardo l'alcool è preferibile al mercurio. Non vi dovrebbe essere *cambiamento di stato* del liquido in un campo di temperature più ampio possibile. Il mercurio è limitato alle basse temperature per il suo basso punto di congelamento (-35°C), mentre gli alcool non consentono di raggiungere alte temperature, per il loro basso punto di ebollizione. Si richiede la *visibilità del liquido* e al riguardo il mercurio è preferibile all'alcool, che deve essere utilizzato con colorante. Infine per evitare letture errate durante un *transitorio termico* il liquido dovrebbe presentare un basso coefficiente di adesione al vetro e sotto questo aspetto il mercurio è preferibile all'alcool.

In definitiva si può affermare che il *mercurio* è senza dubbio il *miglior liquido* per termometri in vetro ed è quello in genere più utilizzato nei termometri di maggior precisione.

12.4. Sensori bimetallici

Alla *misura di temperatura* si potrebbe risalire attraverso l'*allungamento o accorciamento di una barra* soggetta all'effetto termico. Solo che la barra che serve per confrontare la variazione di lunghezza dovrebbe essere realizzata con materiale con coefficiente termico nullo o dovrebbe essere controllata in temperatura durante la misura, in modo che detta barra non subisca variazioni nelle sue dimensioni. Per evitare queste complicazioni i sensori bimetallici si realizzano saldando l'uno all'altro due metalli con coefficienti di dilatazione molto differenti tra loro. In genere si utilizzano *leghe invar* con *acciaio* o con *leghe di ottone*. Questi sensori sono realizzati in diverse forme, in fig. 12.1 si mostrano quelle *a semplice striscia*, *a spirale* e *a elica*. In ogni caso la variazione di temperatura produce un movimento lineare o rotatorio utilizzato per chiudere un contatto e quindi azionare ad esempio un interruttore o un trasduttore di spostamento con elevata risoluzione, quando sia necessario avere a disposizione un segnale elettrico.

FIGURA 12.1
Varie forme di sensori bimetallici



La *robustezza* e la *semplicità della costruzione* ne hanno consentito la diffusione soprattutto nei dispositivi di controllo della temperatura. Nel caso del sensore a semplice striscia, il raggio di curvatura è legato alla variazione di temperatura cui è soggetta da una relazione del tipo:

$$[12.2] \quad r = \frac{at}{b(T - T_0)}$$

dove r è il raggio di curvatura, t lo spessore della striscia, T_0 la temperatura iniziale, T quella finale, a e b parametri caratteristici del sensore funzioni dei rapporti tra gli spessori dei due metalli, dei loro moduli di elasticità e dei coefficienti di dilatazione. L'eq. [12.2] è affetta da un errore sistematico dovuto al carico distribuito sulla trave.

La *precisione* ottenibile da questi sensori *non è molto elevata* e il *campo di misura* non è molto esteso, compreso tra $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, ma il costo ridotto li rende interessanti per un livello iniziale di controllo. Lo stesso principio impiegato per questi sensori è utilizzato per produrre un moto meccanico di compensazione dell'errore di temperatura in strumenti analogici di precisione.

12.5. Sensori a termocoppia

Nel capitolo undicesimo si è visto come sfruttando gli effetti termoelettrici si possa realizzare un sensore attivo di temperatura che è la *termocoppia*. Questa è costituita da due conduttori metallici di differente funzione lavoro saldati ai due estremi. Si ottengono così due giunzioni. Se le temperature relative alle due giunzioni sono diverse si manifesta una f.e.m. La relazione tra f.e.m. e differenza di temperatura si riproduce nel tempo e in genere è ricavata empiricamente. Delle due giunzioni quella alla temperatura incognita prende il nome di *giunzione calda* o di misura, l'altra, mantenuta a una temperatura fissa e nota viene denominata *giunzione fredda* o di riferimento.

La f.e.m. risultante, indicate con 1 e 2 le due giunzioni della termocoppia, in genere ha un'espressione del tipo:

$$[12.3] \quad e_{12} = k (T_2 - T_1) \left(T_n - \frac{T_2 + T_1}{2} \right)$$

dove T_n prende il nome di *temperatura neutra* della termocoppia. Si definisce *potere termoelettrico* riferito alla temperatura T_2 la variazione infinitesima della f.e.m. riferita a una variazione elementare di temperatura:

$$[12.4] \quad k_{T_2} = \frac{de_{12}}{dT_2} = k (T_n - T_2)$$

T_n rappresenta dunque la temperatura alla quale il potere termoelettrico è nullo. Si può ora esprimere la f.e.m. in funzione del potere termoelettrico della termocoppia:

$$[12.5] \quad \begin{aligned} e_{12} &= k (T_2 - T_1) \left(T_n - \frac{T_2 + T_1}{2} - T_1 + T_1 \right) = \\ &= k (T_2 - T_1) \left[(T_n - T_1) - \frac{T_2 - T_1}{2} \right] \end{aligned}$$

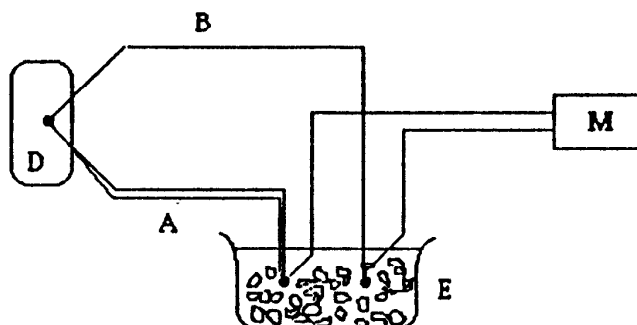
se $(T_n - T_1) \gg (T_2 - T_1)/2$ si ha:

$$[12.6] \quad e_{12} = k_{T_1} (T_2 - T_1)$$

il potere termoelettrico o coefficiente assoluto di Seebeck rappresenta quindi la *costante di conversione* della termocoppia.

Esistono alcune leggi molto semplici relative al funzionamento delle termocoppie. Una prende il nome di *legge dei metalli interposti* e stabilisce che l'inserzione di un metallo in un circuito a termocoppia non alte-

FIGURA 12.2

Misura della temperatura mediante sensore a termocoppia

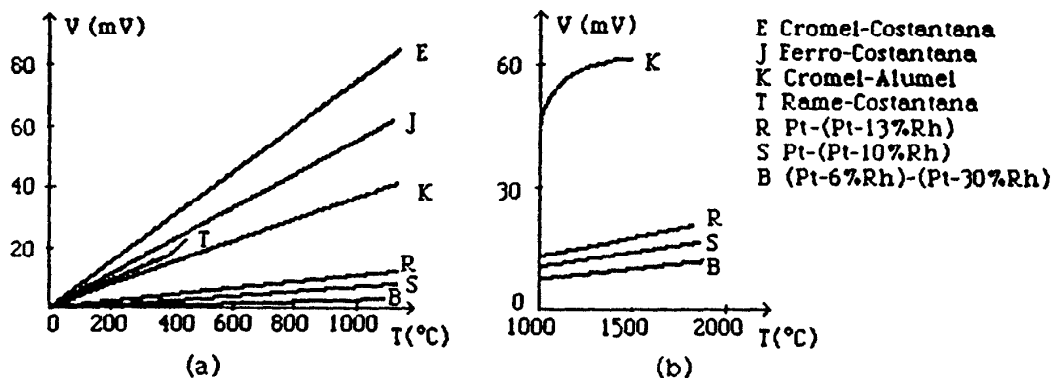
ra la f.e.m. risultante qualora le giunzioni introdotte dal terzo metallo siano alla stessa temperatura. Questa legge consente la predisposizione di un dispositivo di misura senza che si alteri il legame tra f.e.m. e temperatura. Lo strumento di misura può anche essere posto lontano dal giunto freddo, come mostra la fig. 12.2, dove A e B rappresentano i metalli costituenti la termocoppia, D la giunzione calda, E quella fredda, M lo strumento di misura, collegato tramite dei cavetti alla giunzione fredda E. Questa in genere si pone a una temperatura praticamente costante annegandola a una certa profondità nel terreno. Infatti a qualche metro sotto terra la temperatura si mantiene invariante con le condizioni climatiche esterne. Nella fig. 12.2 si è assunta come temperatura di riferimento quella di fusione del ghiaccio, che è quella standard cui normalmente sono riferiti i valori di f.e.m. della termocoppia.

D'altra parte, per risalire alla temperatura del giunto caldo, non è necessario che il giunto freddo si trovi alla temperatura di riferimento della termocoppia, in quanto questa è soggetta alla *legge delle temperature intermedie*. Se una termocoppia sviluppa una f.e.m., e_1 , quando le sue giunzioni sono a temperatura T_1 e T_2 e una f.e.m., e_2 , quando le sue giunzioni sono a temperatura T_2 e T_3 , essa svilupperà una f.e.m. ($e_1 + e_2$) quando le sue giunzioni siano a temperatura T_1 e T_3 . Così per esempio si voglia misurare la temperatura T_x del giunto caldo nota la temperatura T_f del giunto freddo e quella di riferimento T_r . La f.e.m. misurata si può esprimere come somma di due f.e.m. secondo la seguente relazione:

$$[12.7] \quad e_{xf} = e_{xr} + e_{rf}$$

la f.e.m. e_{rf} si ricava dalla tabella f.e.m.-temperatura, in corrispondenza della temperatura T_f , misurata. Per differenza si ottiene la f.e.m. e_{xr} , dalla quale, sempre in base alla tabella, si risale al valore della temperatura T_x . La f.e.m. e_{rf} si può considerare un *termine correttivo* e la correzione è oggi resa automatica, mediante opportuni sistemi a microprocessore, come sarà mostrato in seguito.

FIGURA 12.3
Caratteristiche delle termocoppie più diffuse



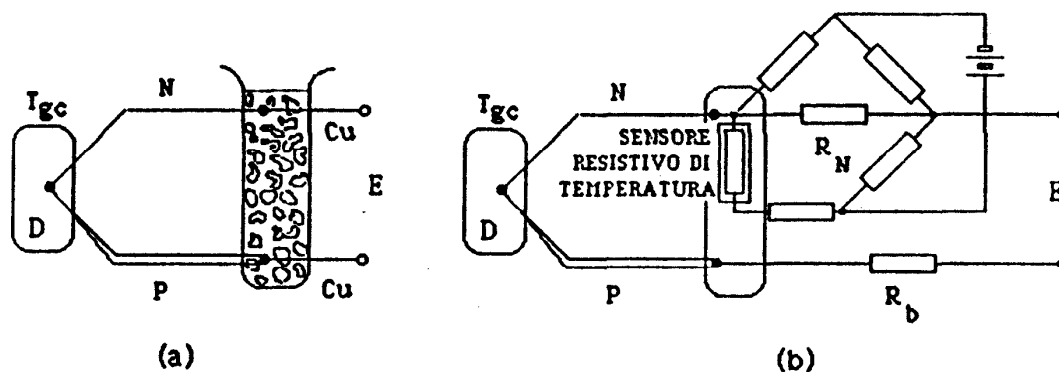
I materiali più comunemente usati per termocoppie sono: *rame*, *ferro*, *platino*, *rodio*, *iridio*, *costantana* (60% Cu, 40% Ni), *chromel* (10% Cr, 90% Ni), *alumel* (2% Al, 90% Ni, 8% Si e Mn). Le più diffuse combinazioni di questi materiali, ormai diventate standard, e le loro caratteristiche salienti sono indicate nella fig. 12.3.

Per quanto attiene alle *dimensioni* dei conduttori vi è da dire che la sezione della spira dovrà aumentare con la temperatura da misurare, ma solo nei limiti di una buona conservazione dei materiali, in quanto all'aumentare delle dimensioni della spira, a parità di salto termico, cresce il *tempo di risposta* della termocoppia. Per la *protezione esterna* i conduttori sono isolati elettricamente con materiali plastici o ceramici, per proteggere i conduttori dagli effetti delle alte temperature, e quindi inseriti in appositi tubi, che consentono l'inattaccabilità da agenti chimici oltre a conferire resistenza meccanica. I due fili costituenti la termocoppia prendono anche la denominazione di "positivo", P, e "negativo", N. La giunzione può essere realizzata o mediante *saldatura sia testa a testa sia a ricoprimento* o avvolgendo uno sull'altro, in diverso modo, i due conduttori. Le giunzioni possono essere sia *esposte*, in tal caso presentano la risposta più rapida, sia *incapsulate*, quando è necessario proteggerle dal fluido o solido caldo. Le termocoppie possono avere le forme più disparate: a dado o a bullone, per essere facilmente montate su particolari parti di macchina; a puntale o a conduttore flessibile, per poter penetrare nelle parti più recondite di un impianto; a lamina, avvolta su materiale plastico, quando il requisito richiesto sia la sottigliezza.

Dall'esame della fig. 12.3 si ricava che i valori delle f.e.m. disponibili ai morsetti della termocoppia sono molto bassi e quindi non facilmente misurabili con una piccola fascia di incertezza. La misura può essere eseguita in termini di corrente utilizzando un *galvanometro* in quanto si tratta di correnti molto piccole, ma in tal caso in genere non risulta trascurabile l'errore di consumo della termocoppia dovuto alla limitazione di corrente causata dalla sua resistenza interna, non trascurabile rispetto

FIGURA 12.4

Compensazione delle variazioni della temperatura di riferimento

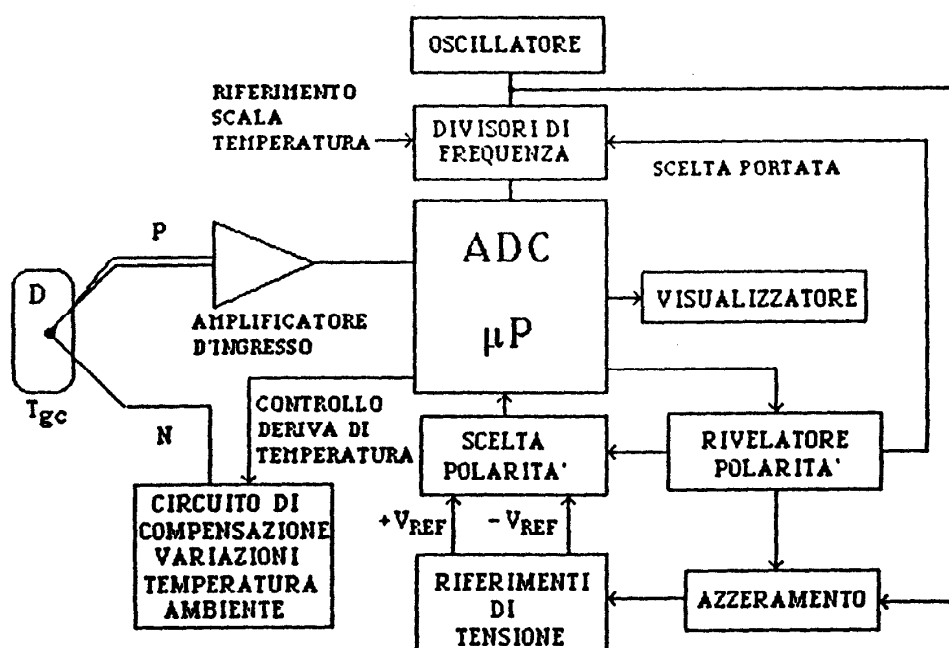


a quella del galvanometro. Si preferisce quindi misurare la f.e.m., utilizzando un *potenziometro in c.c.*. Poiché le tensioni in gioco sono dell'ordine dei millivolt per centinaia di gradi Celsius, è necessario ricorrere a potenziometri a bassa portata. L'uso del potenziometro, in fase di taratura, consente anche di eliminare la deriva dallo zero dovuta alla presenza di gradienti di temperatura lungo i conduttori della termocoppia (*effetto Thomson*). Le possibilità offerte dai moderni *strumenti programmabili a microprocessore* e in particolare tra l'altro quelle di presentare elevate impedenze di ingresso di molti ordini superiori a quelle interne alla termocoppia e di avere ottime risoluzioni dell'ordine dei microvolt per digit, ha spinto verso una loro sempre maggiore diffusione a scapito dei potenziometri.

Si è detto che la termocoppia richiede quasi sempre come temperatura di riferimento quella corrispondente al punto di fusione del ghiaccio. Allo scopo, nelle misure di maggiore precisione, i morsetti della giunzione di riferimento con i cavetti che vanno al misuratore di f.e.m. sono posti in una bacinella con acqua e ghiaccio, predisposti in un contenitore ben isolato, come mostrato in fig. 12.4a. A volte questo contenitore è un vero e proprio piccolo *frigorifero*, basato sull'*effetto Peltier*, con un sistema di controllo ad anello chiuso, così da permettere il mantenimento dell'equilibrio acqua-ghiaccio.

In altri strumenti, invece di mantenere una temperatura fissa della giunzione di riferimento, si opera una *correzione* sul valore della tensione in uscita alla termocoppia, che porti in conto le variazioni subite dalla temperatura della giunzione fredda, rispetto a quella di taratura. Una possibile soluzione è mostrata in fig. 12.4b. Inizialmente si tara il dispositivo sottoponendo la giunzione calda a una temperatura nota, con un grado di precisione commisurato a quello dello strumento. Si regola quindi il sensore di temperatura resistivo, predisposto in corrispondenza del giunto freddo, in modo che la tensione in uscita sia quella corrispondente alla temperatura di riferimento, come si è detto in genere pari a 0 °C. Quando variazioni della temperatura ambiente tendono a fare scostare la temperatura della giunzione fredda da quella di riferimento, la

FIGURA 12.5
Strumento digitale a termocoppia per la misura di temperatura

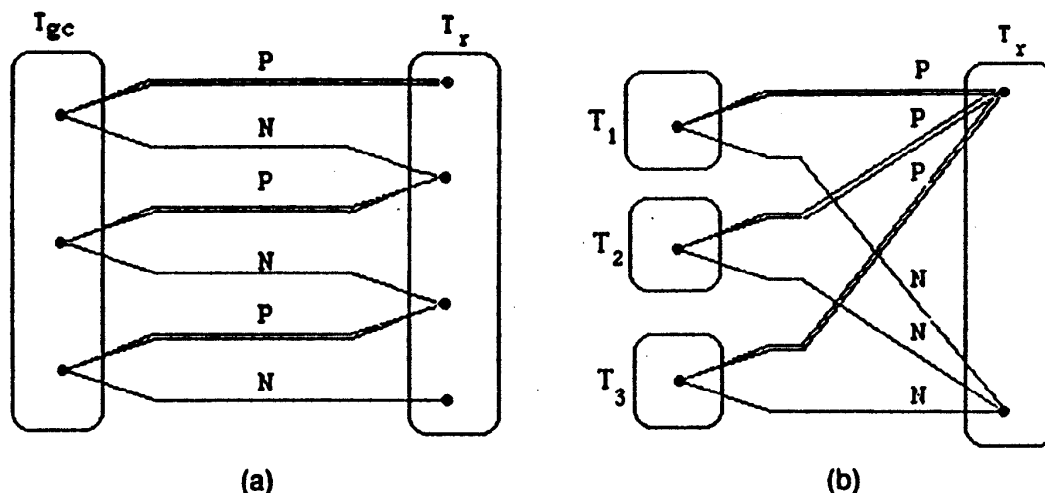


variazione di resistenza del sensore di temperatura determina uno squilibrio del ponte e crea una tensione errore che si somma algebricamente con quella in uscita alla termocoppia, consentendo la correzione della misura di temperatura. La resistenza R_b è uguale alla resistenza equivalente del circuito di compensazione, in modo da non alterare l'uguaglianza delle resistenze dei conduttori P e N.

Nella fig. 12.5 è riportato uno schema a blocchi di uno *strumento digitale* per la misura della temperatura, semplice, portatile e a basso costo, basato su un sensore a termocoppia. Una delle termocoppie utilizzate in commercio è quella di tipo K. Il convertitore ADC in genere è del tipo ad approssimazioni successive, e vi è un circuito di compensazione della non linearità della termocoppia. A tale scopo la funzione del secondo ordine è linearizzata a segmenti. La correzione della temperatura della giunzione fredda può essere eseguita utilizzando un sensore a semiconduttore.

Diverse termocoppie possono essere collegate elettricamente in *serie* o in *parallelo*, come mostrato in fig. 12.6. Quando sono connesse in serie (fig. 12.6a) prendono il nome di *termopila* e la f.e.m. totale in uscita è quella di una moltiplicata per il numero di termocoppie utilizzate. Lo scopo di una termopila è quello di ottenere un misuratore di temperatura più sensibile. I giunti caldi, pur nel rispetto della loro separazione elettrica, devono formare come un grappolo il più possibile unito, in modo da misurare la temperatura in un punto ben determinato. Le termocoppie in parallelo (fig. 12.6b) non hanno una denominazione particola-

FIGURA 12.6
Possibili connessioni di termocoppie



re e normalmente collegate, come in figura, forniscono un segnale di temperatura media fra quelle delle giunzioni calde.

12.6. Sensori a resistenza

Come si è detto nel capitolo undicesimo, materiali conduttori e semiconduttori sono comunemente utilizzati nei *sensori di temperatura a resistenza*. I dispositivi con materiale semiconduttore prendono anche il nome di *termistori*. Tra i materiali conduttori più utilizzati si ricordano il *nicel*, il *rame*, il *platino*, l'*argento* tra quelli semiconduttori gli *ossidi metallici di cobalto*, *manganese* e *nicel*. La maggiore differenza tra i due tipi di termometri è quella relativa alla *variazione di resistenza*, piccola e positiva in quelli metallici, grande e negativa in quelli a semiconduttore. Inoltre la *relazione* temperatura resistenza è *lineare* nei conduttori ed *esponenziale* nei semiconduttori. Il *campo di temperatura* è più esteso per i termometri metallici (compreso tra $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $1.000\text{ }^{\circ}\text{C}$) rispetto ai termistori ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $300\text{ }^{\circ}\text{C}$). Infine i sensori metallici a resistenza presentano *caratteristiche più stabili nel tempo* e anche il tempo di risposta è minore rispetto a quello che presentano gli elementi a ossido.

Le principali caratteristiche richieste ai materiali metallici impiegati nei sensori a resistenza sono un elevato coefficiente di temperatura, per aumentare la sensibilità, un'elevata resistività, per diminuire dimensioni e ingombro e per aumentare anche in tal modo la sensibilità. Altri fattori importanti sono la stabilità, la linearità, la duttilità; quest'ultimo requisito è richiesto per poter forgiare il materiale nel modo più idoneo. Le *forme* dei termometri a resistenza sono di vario tipo in base all'utilizzazione e alle temperature da misurare. Alcuni sono costituiti da un certo

numero di spire isolate su un supporto di materiale isolante e assomigliano molto nella forma agli estensimetri, misuratori di deformazioni meccaniche.

I materiali metallici più utilizzati sono riportati nella tabella 12.1.

TABELLA 12.1
Materiali per sensori di temperatura

Materiale	Coefficiente di temperatura $^{\circ}\text{C}^{-1}$	Resistività $10^{-6} \Omega\text{m}$
Alluminio	0,0042	2,69
Argento	0,0041	1,63
Costantina	0,00002	49
Ferro	0,00651	9,71
Manganina	-0,00002	43
Nichel	0,00681	6,844
Nichel-Cromo	0,0002	109
Oro	0,0039	2,3
Palladio	0,00377	10,8
Platino	0,00392	10,6
Rame	0,0043	1,673
Rodio	0,00457	4,7
Tungsteno	0,0046	5,5

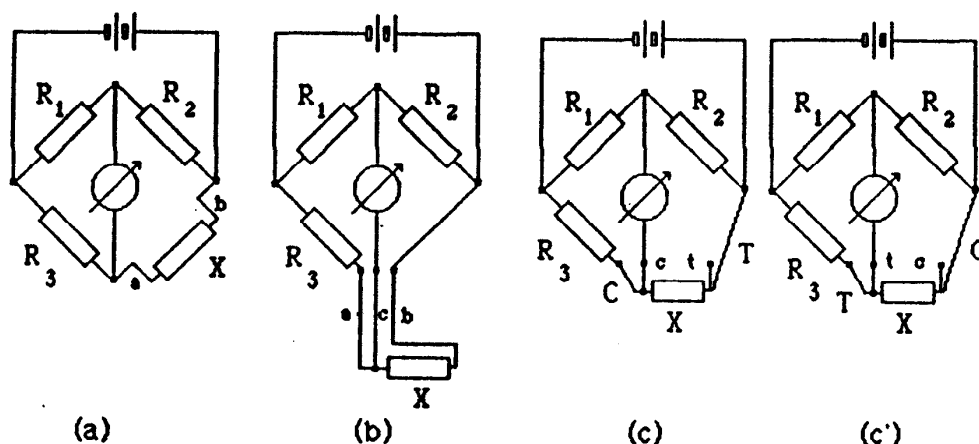
Il platino è molto usato sotto forma sia di spira avvolta, sia di film spesso, soprattutto nei *termometri campione*. Ha un campo di temperatura compreso tra -200°C e 800°C (anche se è possibile l'uso fin'oltre i 1.000°C purché per breve tempo) e una sensibilità intorno alle decine di milliohm per grado Celsius.

Per la misura della variazione di resistenza si possono impiegare diversi ponti sia in corrente continua sia in corrente alternata, del tipo ad azzeramento (per misure standard e in presenza di variazioni contenute e lente della temperatura) o a deflessione (per segnali rapidamente variabili). Molto usati sono il ponte di Wheatstone, di Callendar-Griffiths e quello a capacità.

I possibili modi di connessione del sensore termico al ponte sono indicati in fig. 12.7. Il *metodo dei due conduttori* è mostrato in fig. 12.7a. La resistenza incognita del sensore comprende anche quella dei cavetti di collegamento al ponte. Questi devono essere corti e di sezione quanto più possibile elevata, in modo da non causare un errore elevato nella misura della temperatura. In genere non si apporta la correzione che tenga conto delle resistenze di questi cavetti e delle loro variazioni con la temperatura e quindi il metodo è utilizzato solo quando non si richieda una accuratezza molto elevata.

In fig. 12.7b è rappresentato il circuito relativo al *metodo dei tre conduttori*, che è quello più diffuso. Come si evince dall'esame della figura, la resistenza del cavetto a si somma a quella R_3 del resistore, mentre la resistenza del cavetto b si somma a quella X del sensore. Se le resistenze

FIGURA 12.7
Collegamenti di un sensore X di temperatura al ponte



dei cavetti a e b sono uguali e soggette alle stesse sollecitazioni termiche, l'equilibrio del ponte non è influenzato dalla loro presenza. In tal caso non si richiede che le resistenze dei cavetti siano necessariamente piccole.

In fig. 12.7(c e c') è indicato lo schema relativo al *metodo dei quattro conduttori*, utilizzato solo quando è richiesto un elevatissimo grado di accuratezza, come nel caso dei termometri campione a resistenza al platino. Si eseguono due misure, controllando l'invarianza delle condizioni ambientali. Quando i collegamenti sono eseguiti come in fig. 12.7c e in fig. 12.7c' si ha rispettivamente:

$$\begin{aligned} R_2(R_{3a} + C) &= (X + T)R_1 \\ R_2(R_{3b} + T) &= (X + C)R_1 \end{aligned}$$

dalle quali, posto $R_1 = R_2$ si ha in definitiva:

$$[12.8] \quad X = \frac{R_{3a} + R_{3b}}{2}$$

Un ulteriore errore può essere causato dalla potenza dissipata per *effetto Joule* nel sensore. Questo errore è d'altra parte di segno opposto a quello causato dalla *conduzione* e dall'*irraggiamento* di calore dell'elemento stesso. Essendo inoltre l'effetto comune a tutte le resistenze presenti sui lati del ponte, l'equilibrio di questo non dovrebbe essere influenzato. Una stima dell'errore complessivo, dovuto al riscaldamento ohmico si ottiene eseguendo una serie di letture per diversi valori di corrente ed estrapolando il valore alla corrente zero.

I *termistori* sono i sensori di temperatura più diffusi tra quelli a semiconduttore. Il loro campo tipico di applicazione è tra -50°C e 300°C , la costante termica beta presente nelle equazioni [11.16] e [11.20] è variabile con il materiale ed è compresa tra 3000 e 4500 K. Mediante

un'opportuna scelta delle caratteristiche del termistore e del circuito elettrico, il sensore può essere utilizzato per la misura e il controllo della temperatura o come compensatore delle variazioni di resistenza con la temperatura dei circuiti metallici. L'elevata sensibilità dei termistori non crea particolari problemi nella misura delle variazioni di resistenza con la temperatura, ma nel caso si richiedano misure con un certo grado di accuratezza si può ricorrere a strumentazione digitale.

Oltre ai termistori i *semiconduttori* danno luogo ad altri sensori termici che sfruttano la dipendenza dalla temperatura nei transistor sia della corrente di collettore sia della tensione base-emettitore. È infatti noto che se un transistor è alimentato con una corrente di collettore costante, la *tensione base-emettitore* è proporzionale alla temperatura assoluta con una legge abbastanza lineare, almeno nel campo operativo normale. Il legame tra tensione base-emettitore e la temperatura dipende anche dal materiale utilizzato e dal modo in cui è realizzato il transistor. Un modo per meglio linearizzare la suddetta caratteristica e per renderla indipendente dal tipo di transistor utilizzato è quello di alimentare il collettore alternativamente con due livelli differenti di corrente. Il miglioramento così ottenuto nelle prestazioni del sensore va però a scapito della sensibilità. In genere i dispositivi a semiconduttore sensibili alla temperatura fanno parte integrante di uno strumento digitale dotato di ADC e display, direttamente tarato in gradi Celsius.

12.7. Sensori per applicazioni particolari

Sono stati realizzati *sensori di temperatura al quarzo*, impiegati soprattutto nel settore delle telecomunicazioni. Il campo di temperatura è compreso tra $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il cristallo di quarzo è tagliato secondo una particolare direzione, tale da consentire di ottenere una relazione lineare tra frequenza di risonanza e variazione di temperatura. La misura è eseguita inserendo il quarzo in un circuito oscillante a frequenze dell'ordine dei megahertz. Le sensibilità raggiungibili con questo tipo di sensore sono dell'ordine dei kilohertz per grado Celsius. Con un sistema a eterodina il segnale di uscita all'oscillatore è miscelato con un segnale di riferimento a frequenza fissa. La differenza di frequenza, proporzionale alla variazione di temperatura, è misurata con un contatore digitale.

Nel campo delle *temperature criogeniche*, inferiori a 20 K , si sono utilizzati dei *sensori a rumore termico*. Infatti è noto che applicando i principi della meccanica statistica si ottiene per la densità spettrale del rumore termico la seguente espressione:

$$[12.9] \quad W(f) = 4kTR\gamma(f) \quad \gamma(f) = \frac{\frac{hf}{kT}}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}$$

dove k è la costante di Boltzmann pari a $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{C}$, T è la temperatura assoluta, R la resistenza del resistore e h la costante di Plank, $6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$. Alla temperatura ambiente la funzione $\gamma(f)$, detta anche *funzione di Plank*, si mantiene molto vicina all'unità fino a frequenze nel campo delle microonde, oltre l'infrarosso (1 000 GHz). Infatti in questo campo risulta $hf \ll kT$ ed è possibile approssimare l'esponenziale con due soli termini del suo sviluppo in serie, pertanto:

$$[12.10] \quad W(f) = 4kTR$$

Allo scopo di amplificare il segnale di rumore si utilizzano amplificatori basati sull'*effetto Josephson*, ricorrendo a materiali superconduttori. È infatti noto che se una tensione continua V_0 è applicata a una giunzione Josephson si genera un segnale a una sola frequenza pari a $f_0 = 2eV_0/h$. La presenza di una tensione di rumore termico sovrapposta alla tensione V_0 dà luogo a una oscillazione in un campo di frequenza Δf_0 , la cui ampiezza è direttamente proporzionale alla temperatura T secondo la seguente relazione:

$$[12.11] \quad \Delta f_0 = \left(\frac{2e}{h}\right)^2 \pi 4kTR \left(1 + \frac{IR}{V_0}\right)$$

dove I è la corrente che attraversa la giunzione. Note R , I e V_0 e misurando Δf_0 si può risalire a T . La misura della variazione di frequenza deve essere eseguita con uno strumento a banda molto stretta, accordato sulla frequenza f_0 e con una banda passante $B \ll \Delta f_0$. Con sensori di questo tipo si è riusciti a misurare temperature inferiori a 1 K.

Per misure nel campo sia di temperature criogeniche sia delle alte temperature (superiori ai 10 000 K) specie per applicazioni sui plasmi si sono utilizzati *sensori acustici di temperatura*. La variazione di temperatura ha infatti influenza sulla velocità di propagazione di un suono che attraversi un solido, un liquido o un gas. In particolare all'aumentare della temperatura la velocità decresce nei solidi e nei liquidi, mentre cresce nei gas. Nei sensori acustici la variazione di velocità è convertita in una variazione di frequenza o nella variazione del tempo di transito di un impulso, più facili da misurare.

Anche *sensori capacitivi* possono essere utilizzati per misure di temperature, che influenzano la costante dielettrica o permittività dei materiali dielettrici. In base al campo di temperatura voluto si sceglie il materiale dielettrico che consenta di ottenere la massima sensibilità. In tal modo si è riusciti a realizzare sensori per temperature nel campo criogenico. Le forme di questi sensori sono abbastanza variegate, ma quelle più diffuse sono a film sottile, in quanto si riescono ad avere risposte abbastanza rapide con tempi anche inferiori al millisecondo. Il principale vantaggio di questi termometri è quello di essere immuni dall'influenza dei campi magnetici. Le maggiori applicazioni di questi sensori si hanno nei campi compresi tra frazioni di kelvin fino alle centinaia di kelvin. Molto spesso sul dielettrico vengono sovrapposti sottili film di ceramica metallizzata che costituiscono le armature del condensatore; in tal modo

il sensore ha dimensioni molto ridotte con lunghezze dell'ordine della decina di millimetri.

12.8. Pirometri

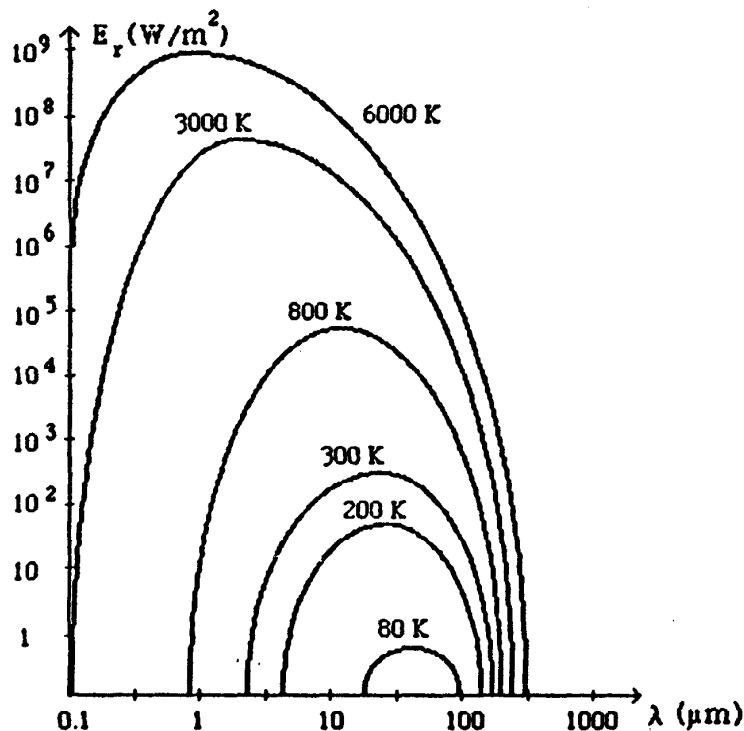
La particolarità di questi sensori di temperatura è quella di non richiedere un contatto meccanico con l'oggetto della misura, in quanto essi fanno uso dell'*energia irradiata* dall'oggetto caldo o freddo. Infatti tutti gli oggetti fisici irradiano energia e l'entità di questa radiazione dipende dalla loro temperatura e dal coefficiente di emissione o *emissività*. Al riguardo è bene ricordare alcune leggi fondamentali.

La legge di Stefan-Boltzmann stabilisce che l'energia irradiata dall'unità di area di una superficie in un determinato tempo è proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura assoluta. Indicato con Q_T il calore totale irradiato dalla superficie di un corpo nero ideale e con A l'area della superficie emettitrice, si ha:

$$[12.12] \quad Q_T = \sigma AT^4$$

dove σ è la costante di Stefan-Boltzmann pari a $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$. La legge si applica solo a emettitori totali ovvero ai corpi neri in grado di assorbire tutta l'energia che li colpisce per cui appaiono neri alla vista. In fig. 12.8 sono mostrate diverse curve che legano energia, temperatura

FIGURA 12.8
Energia irradiata da un corpo nero al variare della temperatura



e lunghezza d'onda di un emettitore ideale ovvero di un corpo nero. Le curve confermano la validità della legge di Stefan-Boltzmann e della legge di Wien, che afferma che la lunghezza d'onda massima nella radiazione emessa da un corpo nero è legata alla temperatura dalla seguente relazione:

$$[12.13] \quad T \lambda_{\max} = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{m}$$

I *pirometri* sono stati impiegati in origine per misure di temperature elevate, le uniche che consentono di avere energie irradiate di una certa intensità nel campo del visibile. Come mostrano le curve in fig. 12.8 tutti i corpi anche alle basse temperature irradiano energia. Un campo di frequenze in cui si hanno energie della radiazione di una certa intensità anche a basse temperature è quello dell'infrarosso (IR), utilizzato nei pirometri di realizzazione più recente.

Un'altra legge importante inerente al funzionamento dei pirometri è quella dovuta al Plank riguardante l'intensità della radiazione per unità di area di sorgente misurata in W/m^2 , in corrispondenza della lunghezza d'onda λ , misurata in m, in un campo spettrale $\Delta\lambda$, data da:

$$[12.14] \quad W_{\lambda} = \frac{C_1 \Delta\lambda \epsilon_{\lambda}}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{T\lambda}} - 1)}$$

dove ϵ_{λ} è l'emissività della sorgente alla lunghezza d'onda λ (risulta uguale all'unità per il corpo nero), T la temperatura assoluta, C_1 e C_2 la prima e seconda costante di radiazione pari a $3,7413 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2$ e $1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ K m}$ rispettivamente.

Purtroppo nessun materiale reale presenta una emissività pari all'unità. Per esempio il *carbone* ha una emissività compresa tra 0,8 e 0,94. Alcuni materiali presentano una emissività molto bassa e quindi una riflettanza molto elevata. L'*oro* in particolare ha una emissività pari all'incirca a 0,02 e quindi una *riflettanza* di $1 - 0,02 = 0,98$ il che lo rende particolarmente adatto all'utilizzazione nelle lamine per la riflessione delle radiazioni termiche.

I *pirometri a radiazione* sono di diverso tipo e per comprenderne il funzionamento è bene descrivere brevemente quello *a scomparsa di filamento*, anche se ormai ampiamente superato. Esso utilizza l'occhio umano come rivelatore di radiazione. L'occhio può essere assimilato a una fotocellula scarsamente capace di misurare il livello assoluto della radiazione, ma in grado di confrontare con buona accuratezza due sorgenti di radiazione della stessa frequenza nel campo visivo. Nel pirometro a scomparsa di filamento, l'occhio vede la sorgente attraverso un sistema di lenti e filtri in modo da ridurre la luminosità a un livello accettabile. Tra l'occhio e la sorgente è interposto un filamento riscaldato con possibilità di regolazione mediante un reostato che fa variare l'intensità della corrente elettrica nel filamento. Questa corrente è regolata fin tanto che il filamento non risulti più visibile. Il milliamperometro che misura la

FIGURA 12.9
Schema di massima di un pirometro

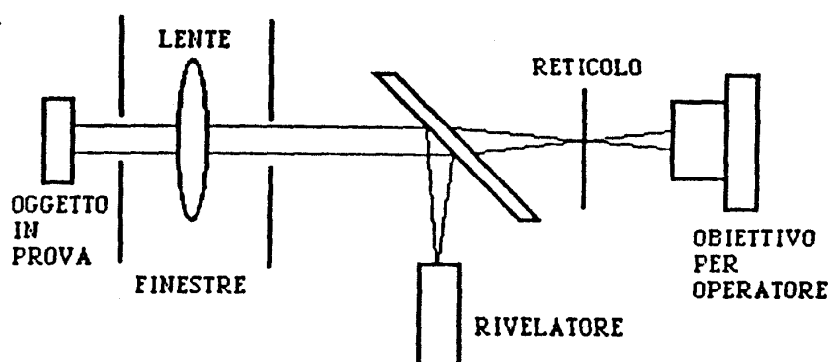
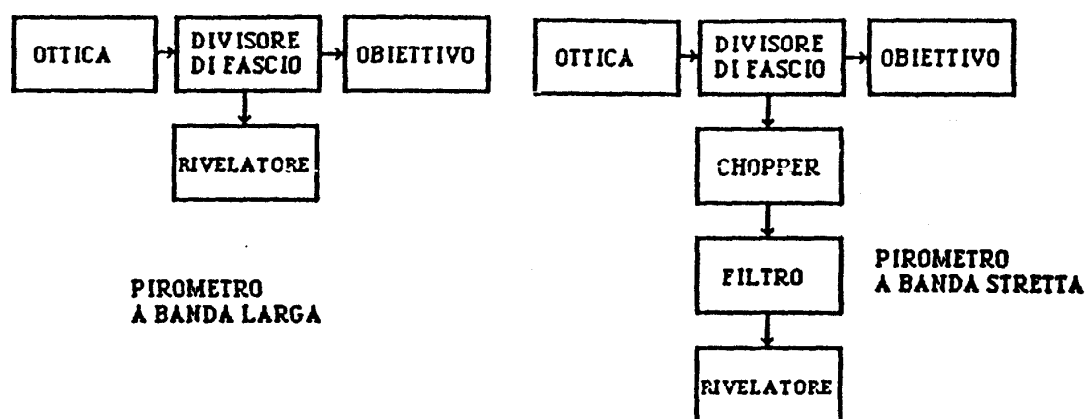


FIGURA 12.10
Schemi a blocchi di pirometri



corrente elettrica nel filamento è tarato direttamente in gradi Celsius. Per migliorare l'accuratezza si può ricorrere a un sistema di misura potenziometrico o a un sistema a microprocessore in grado tra l'altro di apportare la correzione relativa alla differenza di emissività tra sorgente e corpo nero. Nel caso di strumento automatizzato il costo è decisamente superiore, ma sono consentiti la ripetitività delle operazioni e un controllo continuativo.

Nei *pirometri più moderni* si è detto che si rilevano le radiazioni nel campo IR; vi è un sistema ottico che serve a focalizzare la radiazione incidente sul rivelatore e, utilizzando uno specchio dicroico e eventuali altri filtri, a rendere l'oggetto visibile all'occhio umano, in modo che l'operatore possa orientare nel modo migliore il pirometro. Uno schema di massima di un pirometro è mostrato in fig. 12.9.

La struttura del pirometro varia in dipendenza anche della banda di

frequenza che è in grado di esplorare. In fig. 12.10 sono riportati gli schemi a blocchi di due tipi di pirometri, uno a banda larga e uno a banda stretta. Come rivelatori nei pirometri a banda stretta si utilizzano sensori a fotoemissione o fotovoltaici (fotodiodi e fototransistor), in quelli a banda larga bolometri, a effetto piroelettrico in special modo, o termopile.