

Parte II

Sensori e Trasduttori

Capitolo 5

Sensori e Trasduttori

Una delle ragioni della diffusione dell'elettronica in molti contesti è la possibilità di ricondurre molte grandezze fisiche a grandezze elettriche, tramite sensori o trasduttori. Trasduzione : la variazione di una grandezza fisica è tradotta in una variazione di tipo elettrico. Con riferimento alle tematiche del corso, noi possiamo parlare di uso dell'elettronica per l'effettuazione di misure. (v. *Fotocopia 9 Fig 26.3*)

5.1 Sensori di temperatura a termocoppia

5.1.1 Termocoppia

Consideriamo un circuito costituito da materiali (metallici) di tipo diverso.

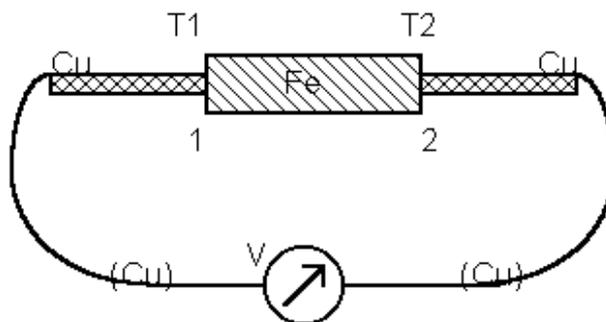


Figura 5.1: Circuito costituito da materiali di tipo diverso

Se la temperatura delle due giunzioni 1 e 2 è la stessa, per la seconda legge di Volta la differenza di potenziale misurata è nulla. Se viceversa le temperature $T1$ e $T2$ differiscono, avremo una tensione $V \neq 0$: la catena non è isoterma. Si parla di "effetto termoelettrico" o "effetto Seebeck". La differenza di potenziale dipende dai materiali, dalla differenza $T2-T1$, ma non dalla variazione di temperatura lungo i materiali. Diversi sono i fenomeni che intervengono a determinare V : la struttura elettronica, il livello di Fermi, variazioni dei coefficienti di diffusione, ecc... Possiamo riassumere tali fenomeni

nella seguente descrizione: dati due materiali A e B, alla giunzione tra essi si localizza una differenza di potenziale legata alla temperatura:

$$E_t^{AB} = a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + \dots \quad (\text{termine lineare prevalente})$$

Es. ferro-costantana (lega Cu-Ni) :

$$E_t^{AB} = 50.37T + 3.43T^2 + 8.57 \cdot 10^{-5}T^3 + \dots$$

Nel caso in cui nella catena ci siano giunzioni a temperatura diversa :

$$E_{T_1, T_2}^{AB} = E_{T_1}^{AB} - E_{T_2}^{AB} = a_1(T_1 - T_2) + a_2(T_1^2 - T_2^2) + \dots$$

5.1.2 5 Leggi di impiego della termocoppia

1. La differenza di potenziale dipende dalla differenza di temperatura alle giunzioni, e non dalle temperature intermedie.

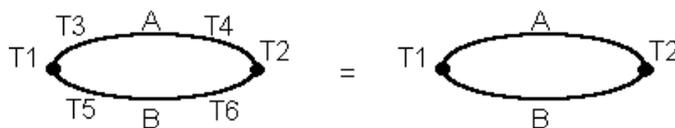


Figura 5.2: Prima legge di impiego della termocoppia

2. Se le due giunzioni ai capi del materiale C sono alla stessa temperatura, la differenza di potenziale resta invariata (come se C non ci fosse) :

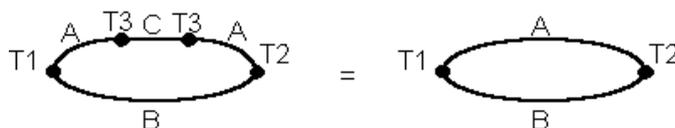


Figura 5.3: Seconda legge di impiego della termocoppia

3. Lo stesso discorso della 2) vale se C è posto dalla parte di una delle due giunzioni:

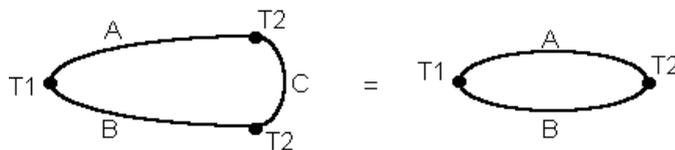


Figura 5.4: Terza legge di impiego della termocoppia

4. La somma delle differenze di potenziale delle due termocoppie distinte che operano alla stessa temperatura è pari alla differenza di potenziale tra i materiali A e B della prima e seconda rispettivamente (legge del materiale intermedio) :

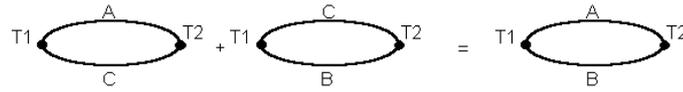


Figura 5.5: Quarta legge di impiego della termocoppia

5. Legge della temperatura intermedia :

$$E_{T_1, T_3}^{AB} + E_{T_3, T_2}^{AB} = E_{T_1, T_2}^{AB}$$

$$\text{Se } T_2 = 0^\circ C \implies E_{T_1, 0}^{AB} = E_{T_1, T_3}^{AB} + E_{T_3, 0}^{AB}$$

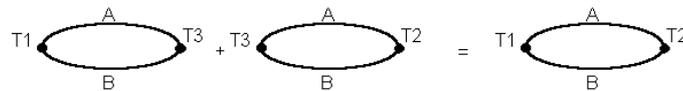


Figura 5.6: Prima legge di impiego della termocoppia

Tipicamente si forniscono tabelle di differenze di potenziale con un riferimento di tensione a zero gradi Celsius. La tabella di *figura 26.25 (fotocopia 10)* indica alcune delle più diffuse termocoppie, le loro denominazioni standard (colonna 'Type') ed gli intervalli di temperatura di funzionamento. Nella *figura 26.26* sono invece indicate le tensioni prodotte a diverse temperature dalle medesime termocoppie (con riferimento ad una temperatura di 0 °C).

5.1.3 Esempio di impiego di una termocoppia

Vogliamo osservare la temperatura di un fluido in un tubo: all'interno di esso porremo una giunzione della termocoppia; determiniamo la differenza di potenziale sfruttando la terza legge.

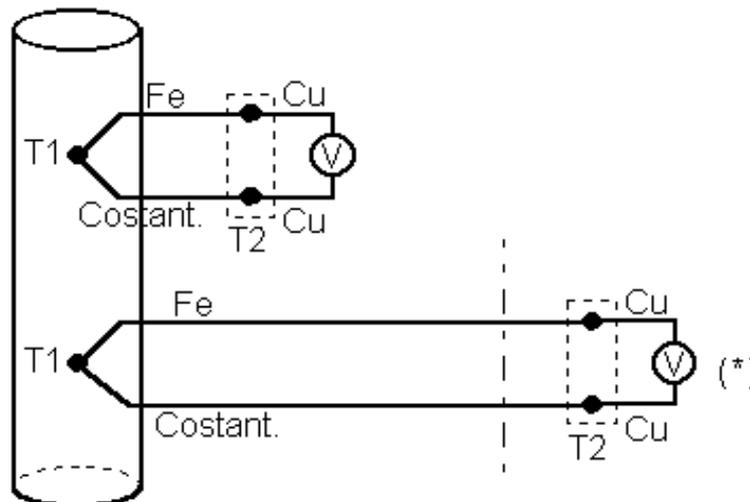


Figura 5.7: Esempio di impiego della termocoppia

La misura è corretta se le due giunzioni che interessano il rame sono alla stessa temperatura (ad esempio disponendole a contatto termico). Sarà particolarmente importante il controllo termico di T2; se non siamo in grado di assicurare un valore di T2 sufficientemente stabile, saremo costretti ad effettuare la connessione a lunga distanza con gli stessi materiali della termocoppia (*). Non ha importanza la temperatura lungo i fili. (la soluzione più adeguata sarebbe quella di fissare T2 al riferimento della termocoppia : 0 °C - acqua-ghiaccio).

$$\underbrace{E_{T_1, T_2}^{AB}}_{\text{misurato}} = E_{T_1, 0}^{AB} - E_{T_2, 0}^{AB}$$

Ci interessa T1, quindi dobbiamo conoscere T2 : noto e costante nel tempo. Consideriamo il circuito in figura 26.27 (fotocopia 10).

∂_M = temperatura misurata

∂_R = temperatura di riferimento

Il valore di temperatura di riferimento determina una tensione che si somma a quella misurata, dovuta alla temperatura ignota. L'amplificatore ha il compito di riportare il coefficiente di temperatura della giunzione ferro-costantana, ad un coefficiente confrontabile con quello legato al riferimento.

$$51.7 \frac{\mu V}{^{\circ}C} (\partial_M - \partial_R) \quad \longrightarrow \quad 10 \frac{mV}{^{\circ}C} (\partial_M - \partial_R)$$

Nel circuito di figura 26.28 si provvede ad effettuare la compensazione mediante un sensore di temperatura che genera una tensione proporzionale alla temperatura stessa. Il primo amplificatore è di guadagno 192 ed ha il compito visto in precedenza; il secondo amplificatore ha guadagno unitario e provvede ad isolare le tensioni misurate permettendone la lettura. All'ingresso dell'operazionale abbiamo la somma di $10 \frac{mV}{^{\circ}C} (\partial_M - \partial_R)$ e $10 \frac{mV}{^{\circ}C} (\partial_R)$ quindi, come volevamo, una tensione proporzionale alla temperatura da misurare : $10 \frac{mV}{^{\circ}C} (\partial_M)$

E' possibile uno schema differente che compensi il circuito prima di amplificare il segnale della termocoppia :

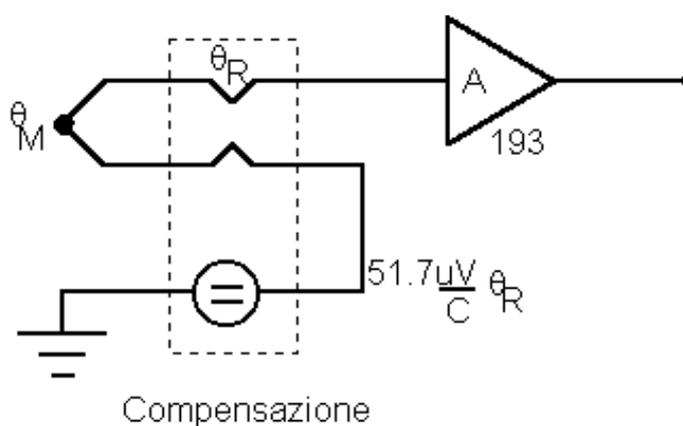


Figura 5.8:

La misura di una temperatura richiede la conoscenza di una temperatura di riferimento, altrimenti si applica una compensazione togliendo al contributo della termocoppia quello legato alla temperatura di riferimento.

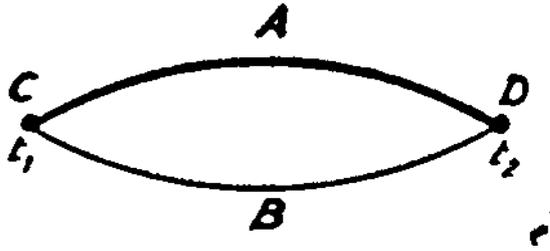


Figura 5.9:

5.2 Termocoppie-Complementi

5.2.1 Generalità.

L'*effetto termoelettrico*, scoperto da T.J. Seebeck nel 1821, consiste nel fatto che si collegano fra loro due metalli diversi si stabilizza una f.e.m. a cavallo della giunzione.

Si considerino ora due metalli, che per comodità riterremo sotto forma di due fili A e B (Fig. 5.9), saldati alle estremità C e D, rispettivamente a temperatura t_1 e t_2 : ne deriverà quanto segue.

1. Se i metalli sono di natura diversa, supposte diverse le due temperature delle due giunzioni, il circuito costituito dai due fili è sede di una f.e.m. e risultante delle f.e.m. che nascono a cavallo delle due giunzioni.
2. Se i metalli sono diversi ma $t_1 = t_2$ le due f.e.m. a cavallo fra le due giunzioni sono eguali ed opposte, per cui la f.e.m. e risultante è nulla.
3. Infine se i due fili sono dello stesso metallo nessuna f.e.m. nasce a cavallo delle giunzioni per cui non si avrà nessuna f.e.m. e risultante, qualsiasi siano i valori di t_1 e t_2 .

I due fili di materiale diverso costituiscono una *coppia termoelettrica* che si presta molto bene alla misura di temperatura dato il legame esistente fra la e e la differenza di temperatura fra i due punti.

5.2.2 Caratteristiche di una termocoppia.

La curva caratteristica di una termocoppia è la curva che viene ricavata mantenendo una delle giunzioni ad una temperatura t_0 costante (ad esempio al punto del ghiaccio), portando l'altra a temperature successive t note, e misurando le f.e.m. e corrispondenti.

Il giunto della coppia posto nel ghiaccio fondente viene detto *giunto caldo o di misura*.

Si definisce *potere termoelettrico* π della coppia l'espressione

$$\pi = \frac{de}{dt} \quad (5.1)$$

che fornisce il valore della tangente locale alla curva caratteristica.

In generale si osserva sperimentalmente che esiste una temperatura t_i in corrispondenza della quale si ha $\pi = 0$; per temperature maggiori di t_i , π diviene negativo. La t_i viene detta, secondo le norme del C.T.I., *temperatura d'inversione*: la coppia dovrà perciò essere impiegata per $t < t_i$. Detta t_0 la temperatura cui si trova il giunto di riferimento, la caratteristica della termocoppia può evidentemente esprimersi mediante la legge generale:

$$e = (t - t_0)f(t, t_0) \quad (5.2)$$

dove la funzione $f(t, t_0)$ può essere anche molto complessa: molte volte, almeno nel suo tratto iniziale la caratteristica può con buona approssimazione essere assunta lineare per cui l'eq. 5.2 diviene

$$e = \pi_m(t - t_0) \quad (5.3)$$

dove π_m è il potere termoelettrico medio della coppia.

Per misure più precise occorrono leggi più complesse.

5.2.3 Legge delle temperature successive.

Questa legge, dovuta al Becquerel, può così esprimersi .

Se una termocoppia sviluppa una f.e.m. e_1 quando i giunti sono posti alle temperature rispettivamente t_1 e t_2 , ed una f.e.m. e_2 quando i giunti sono posti rispettivamente alle temperature t_2 e t_3 , essa svilupperà una f.e.m. $e_3 = e_1 + e_2$ qualora i giunti siano posti rispettivamente alle temperature t_1 e t_3 . Si può perciò scrivere

$$e(t_1, t_3) = e(t_1, t_2) + e(t_2, t_3) \quad (5.4)$$

Questa legge è importante agli effetti dell'impiego della coppia perchè permette il suo uso senza disporre di un termostato al punto del ghiaccio fondente, ponendo semplicemente il giunto di riferimento a temperatura ambiente t_a nota. In tal caso, detta t la temperatura da misurare, la eq. 5.4 diviene

$$e(0, t) = e(0, t_a) + e(t_a, t) \quad (5.5)$$

per cui in definitiva per ottenere la temperatura effettiva, ammessa la eq. 5.3, si deve sommare semplicemente la t_a alla indicazione fornita dalla termocoppia.

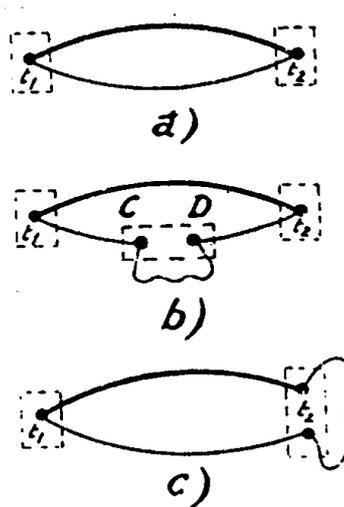


Figura 5.10:

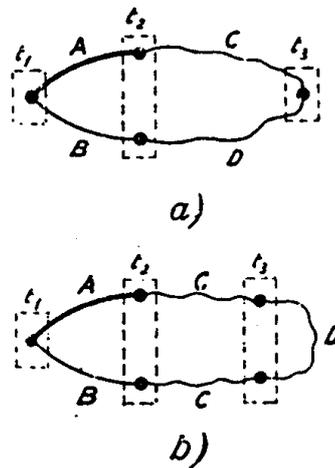


Figura 5.11:

5.2.4 Legge dei metalli interposti.

L'inserzione nel circuito di una termocoppia di un terzo metallo non altera la f.e.m. e, a patto che le due nuove giunzioni dovute alla presenza del terzo metallo siano alla medesima temperatura.

Nella Fig. 5.10 in a) è riportato lo schema teorico di una coppia termoelettrica, in b) l'inserzione nella coppia di un filo di un terzo metallo lungo uno dei due fili originari, lecita, per quanto detto, se i giunti C e D sono alla medesima temperatura. È questo il caso dell'inserzione di un galvanometro, ovviamente necessario per poter effettuare la lettura.

Infine in c) il terzo filo è inserito fra i due fili originari in corrispondenza di un giunto; in tal caso si può ritenere che quest'ultimo sia costituito dalle due giunzioni nelle quali è stato sdoppiato. Ciò rende possibile tra l'altro di effettuare la saldatura con un materiale di apporto diverso dai precedenti (stagno, ottone, ecc.), o di inserire in questo punto lo strumento di misura.

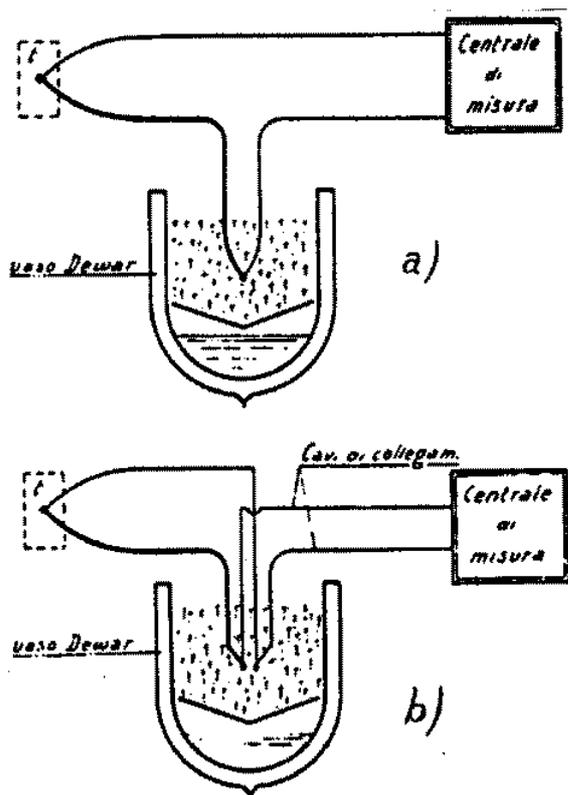


Figura 5.12:

Si abbia ora la coppia di Fig. 5.11a) nella quale, in corrispondenza del giunto a temperatura t_2 , sono stati introdotti due nuovi cavi C e D collegati tra loro, e tale nuova giunzione sia posta alla temperatura t_3 .

Indicando con $e_{AB}(t_1, t_2)$ la f.e.m. generata dalla coppia originaria AB e con $e_{CD}(t_2, t_3)$ la f.e.m. generata dalla coppia costituita dai cavi C e D, la f.e.m. e totale presente nel circuito di Fig. 5.11a) varrà ovviamente

$$e = e_{AB}(t_1, t_2) + e_{CD}(t_2, t_3) \quad (5.6)$$

Da tale formula si nota come, affinché l'inserzione dei due metalli C e D non alteri l'indicazione della coppia, occorre alternativamente che t_2 sia uguale a t_3 , oppure che i due cavi siano del medesimo metallo.

Occorrerà perciò evitare di inserire più cavi di materiale diverso secondo tale schema se non si è sicuri che $t_2 = t_3$.

Se invece l'inserzione dei due metalli C e D è fatta secondo lo schema di Fig. 5.11b), allora basta che la temperatura dei due nuovi giunti sia la medesima, pur essendo $t_3 \neq t_2$, affinché, per la legge prima esposta, l'indicazione non venga alterata. È perciò possibile inserire cavi di materiale diverso secondo tale schema anche per $t_2 \neq t_3$.

5.2.5 Circuiti e metodi di misura.

La misura della f.e.m. fornita da una coppia termoelettrica viene effettuata o attraverso la misura della corrente circolante direttamente con un galvanometro o, più generalmente, con l'ausilio di un circuito potenziometrico che permette misure per azzeramento (vedi metodi potenziometrici), o con soluzioni elettroniche.

I metodi di laboratorio per l'impiego di termocoppie implicano, data la elevata precisione generalmente richiesta, l'uso di un bagno d'acqua e ghiaccio (possibilmente in un termostato normalizzato) per mantenere la temperatura del giunto di riferimento rigorosamente costante. Gli schemi comunemente usati sono riportati in Fig. 5.12.

Lo schema in a) può essere adattato qualora la termocoppia non debba essere installata molto lontana dalla strumentazione di misura e i materiali della termocoppia non siano molto costosi. In caso contrario si ricorre allo schema in b) che del resto è il più usato, nel quale i cavi in rame (*cavi di collegamento*) essendo meno costosi e appositamente costruiti allo scopo, permettono un più facile ed economico collegamento alla strumentazione.

Per l'impiego industriale delle termocoppie il bagno di acqua e ghiaccio non viene quasi mai adottato e si ricorre perciò agli schemi di Fig. 5.13, dove con t_a si indica la temperatura ambiente.

In ogni caso occorre effettuare la misura della temperatura a cui trovasi il giunto di riferimento che, per la legge delle temperature successive, dovrà essere aggiunta a quella indicata dallo strumento per ottenere la temperatura del giunto di misura. Alcuni circuiti permettono la correzione automatica della lettura.

Se si desidera aumentare l'intensità del segnale, qualora quest'ultimo sia troppo debole, si può ricorrere a più termocoppie disposte in serie, coi giunti di riferimento tutti alla medesima temperatura. Più rara l'applicazione di termocoppie in parallelo per ottenere un valore medio della temperatura misurata in vari punti.

Per ridurre ulteriormente il costo dello strumento e per poter ancora più facilmente collegare fra loro gli elementi del circuito, si può ricorrere allo schema di Fig. 5.14 dove sono stati introdotti due cavi (*cavi di prolungamento o di compensazione*) tra i fili della coppia e il giunto di riferimento.

I materiali costituenti i due cavi di compensazione vanno scelti in modo da fornire al giunto freddo una f.e.m. di contatto molto vicina a quella che sarebbe prodotta dai fili della coppia e in modo che le f.e.m. ai giunti 1 e 2 siano trascurabili; naturalmente occorre che le giunzioni 1 e 2 siano alla medesima temperatura. Così facendo l'errore viene ridotto al minimo: si ottiene per contro il vantaggio, oltre a quello di un minor costo, di impiegare fili più adatti ad un collegamento elettrico, in quanto i cavi di prolungamento qualora si facessero funzionare come giunto di riferimento le giunzioni 1 e 2.

Tali giunzioni si trovano però ad una temperatura che, data la vicinanza della sorgente di calore, può subire variazioni notevoli e incontrollate per cui si preferisce in genere ricorrere allo schema della Fig. 5.14

Nella Tabella I sono descritti alcuni tipi di termocoppia; si noti che i tipi B e G sono non lineari al punto che il coefficiente di temperatura medio non può essere specificato.

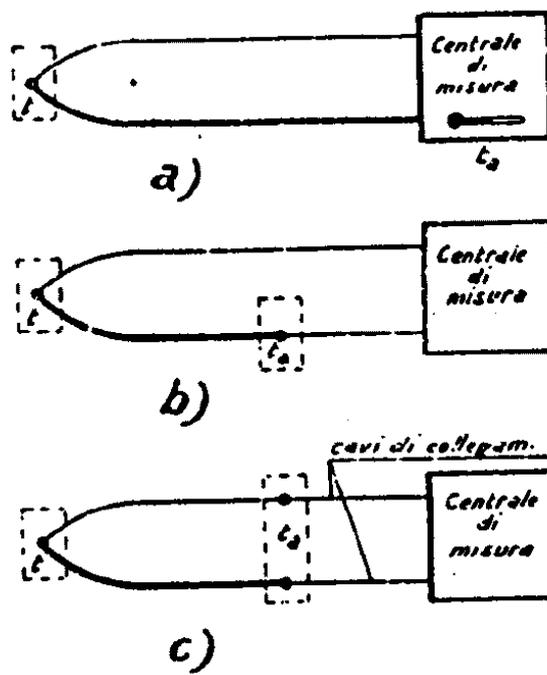


Figura 5.13:

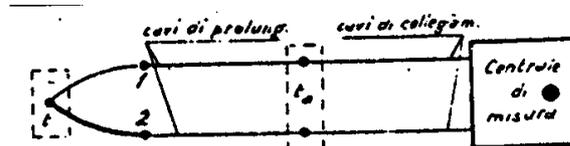


Figura 5.14:

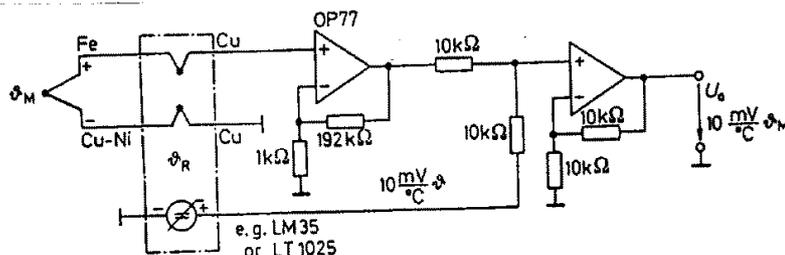


Figura 5.15:

Tabella I.-Esempi di termocoppie .

Type	Metallo 1	Metallo 2	coeff. di temperatura medio	Range di temperatura di utilizzo
T	Rame	Costantana	$48.2 \mu V/^{\circ}C$	$-200 \div + 400^{\circ}C$
J	Ferro	Costantana	$51.7 \mu V/^{\circ}C$	$-200 \div + 700^{\circ}C$
E	Cromo	Costantana	$60.9 \mu V/^{\circ}C$	$-200 \div + 1000^{\circ}C$
K	Cromo	Alluminio	$40.5 \mu V/^{\circ}C$	$-200 \div + 1300^{\circ}C$
S	Platino	Platino - 10% Rodio	$6.4 \mu V/^{\circ}C$	$0 \div + 1500^{\circ}C$
R	Platino	Platino - 13% Rodio	$6.4 \mu V/^{\circ}C$	$0 \div + 1600^{\circ}C$
B	Platino - 6% Rodio	Platino - 30% Rodio		$0 \div + 1800^{\circ}C$
G	Tungsteno	Tungsteno - 26% Renio		$0 \div + 2800^{\circ}C$
C	Tungsteno - 5% Renio	tungsteno - 26% Renio	$15 \mu V/^{\circ}C$	$0 \div + 2800^{\circ}C$

Per l'interfacciamento di una termocoppia posso utilizzare un blocco isotermico con una temperatura di riferimento θ_R . Per valutare la tensione termoelettrica, deve essere aggiunta una tensione corrispondente alla temperatura di riferimento θ_R . Questa correzione puó essere effettuata come mostrato in Fig. 5.15 dopo lo stadio di amplificazione. Questo é stato ottenuto con un circuito ad amplificatori operazionali in configurazione non invertente. Il primo amplificatore ha il compito di riportare il coefficiente di temperatura della giunzione ferro-costantana, ad un coefficiente confrontabile con quello legato al riferimento che é pari a $10 \text{ mV}/^{\circ}C$.

$$A = \frac{10 \text{ mV}/^{\circ}C}{51.7 \mu \text{V}/^{\circ}C} = 193 \quad (5.7)$$

Nella relazione é stato inserito un coefficiente di temperatura medio di $51.7 \mu \text{V}/^{\circ}C$ che é quello relativo alla termocoppia nello schema utilizzata (ferro-costantana). Il secondo amplificatore ha guadagno unitario e provvede ad isolare le tensioni misurate permettendone la lettura. All'ingresso dell'operazionale abbiamo la somma di $10 \text{ mV}/^{\circ}C(\theta_M - \theta_R)$ e $10 \text{ mV}/^{\circ}C(\theta_R)$ quindi, come volevamo, una tensione proporzionale alla temperatura da misurare: $10 \text{ mV}/^{\circ}C(\theta_M)$.

La Fig. 5.16 illustra il principio alternativo per mezzo del quale il valore relativo al punto di ghiaccio é sommato alla f.e.m. della termocoppia prima dello stadio amplificatore.

In Fig. 5.17 é mostrato un interfacciamento tramite amplificatore integrato per termocoppie.

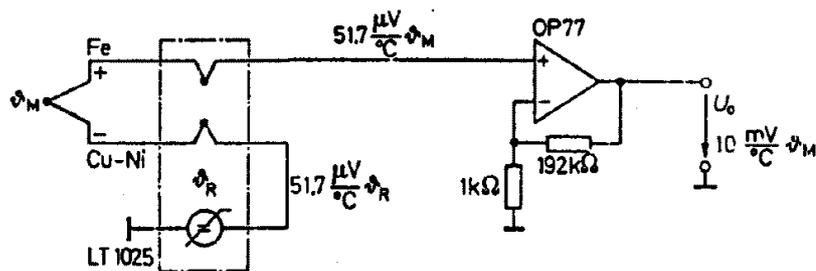


Figura 5.16:

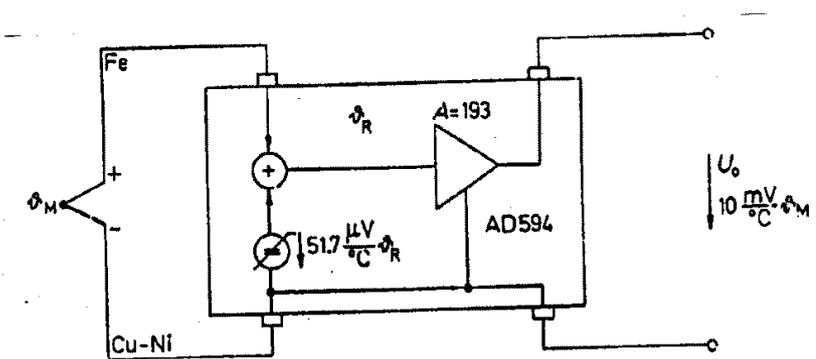


Figura 5.17:

Si nota che i fili della termocoppia sono connessi direttamente al circuito integrato .

5.2.6 Serie termoelettrica.

Dalle norme del C.T.I. riportiamo la Tabella II nella quale viene fornito per ogni materiale il valore (inteso come valore medio di quelli che si trovano nella letteratura sull'argomento) della f.e.m. che viene generata quando il materiale in esame costituisce una coppia termoelettrica col platino e quando una giunzione è mantenuta a $0^{\circ}C$ (punto del ghiaccio) e l'altra a $100^{\circ}C$ (punto dell'acqua bollente).

A questa f.e.m. viene assegnato per convenzione il segno + quando è tale per cui al giunto caldo la corrente passa dal metallo considerato al platino. Il valore della f.e.m. diviso per 100 equivale al potere termoelettrico medio π_m fra 0 e $100^{\circ}C$ della coppia costituita dal materiale e dal platino.

Una coppia costituita da due metalli generici della serie avrà una f.e.m. uguale alla differenza algebrica fra i valori indicati per i rispettivi metalli. Ne risulta anche che uno dei due metalli è positivo rispetto all'altro. Nell'indicare la coppia si indica di norma per primo il metallo positivo, e ciò sta a significare che, per quanto detto prima, al giunto caldo la corrente passa dal primo metallo elencato al secondo. I valori della f.e.m. indicati nella tabella sono però solo orientativi in quanto fortemente influenzati dalla purezza del metallo.

Nella scelta dei metalli per le termocoppie intervengono varie considerazioni. Fra di esse citiamo: a) la coppia deve fornire una f.e.m. sufficientemente elevata, che aumenti monotonamente con la temperatura (possibilmente in modo lineare) e che rimanga costante nel tempo: b) sia ottenibile sotto forma di

filì di sufficiente resistenza meccanica a costo relativamente basso: c) sia ottenibile con una sufficiente purezza, per garantire la stabilità del materiale, sia nel tempo, sia a temperature elevate.

Speciali trattamenti termici sono previsti per rendere più stabile la coppia (ad esempio riscaldamento al calor rosso per almeno un'ora).

5.2.7 Termocoppie di uso più frequente.

Le termocoppie più frequentemente usate nella pratica corrente sono le seguenti.

1. *Coppia Fe/Costanteana.*-Presenta i vantaggi di un basso costo e di una notevole f.e.m. La temperatura di impiego va da $-250^{\circ}C$ a $500^{\circ}C$.

A $500^{\circ}C$ incomincia l'ossidazione del ferro e a $600^{\circ}C$ quella della costanteana. con i fili di diametro superiore ai 3 mm si può rimanere a $800^{\circ}C$ per circa 300 ore, e a $900^{\circ}C$ per circa 120 ore. L'atmosfera ossidante o riducente ha scarsa influenza sulla precisione della misura.

Come fili di compensazione possono usarsi fili di Fe e Costanteana scartati dall'impiego come termocoppie.

2. *Coppia NiCr/Ni.*-Fornisce una f.e.m. inferiore a quella della coppia Fe/Costanteana. La temperatura di funzionamento raggiunge i $900^{\circ}C$ e, con fili di diametro superiore ai 3 mm, anche fino a $1300^{\circ}C$. A partire da $350 \div 400^{\circ}C$ occorre prevedere una opportuna protezione chimica contro eventuali gas corrosivi.

Il ramo di Ni non è di nichel (si altererebbe ad elevata temperatura) ma di lega contenente almeno il 94% di Ni.

Quali fili di compensazione possono impiegarsi un filo di Fe o di Cu e uno di Costanteana.

3. *Coppia Cu/Costanteana.*-Presenta proprietà e caratteristiche di impiego simili a quella di Fe/Costanteana.

Come cavi di prolungamento è generale l'impiego di fili di Cu e Costanteana scartati dall'impiego come termocoppie.

4. *Coppia NiCr/Costanteana.*-Fra le coppie di uso corrente sono quelle che forniscono la f.e.m. più elevata. Il costo e le temperature di funzionamento sono intermedie fra le coppie Fe/Costanteana e NiCr/Ni.

5. *Coppia Chromel/Alumel.*-La lega Chromel è costituita da Ni(89%), Cr(9.8%), Fe(1%), Mn(0.2%), mentre la lega Alumel è composta da Ni(94%), Al(2%), Si(1%), Fe(0.5%), Mn(2.5%). Il comportamento è molto simile a quello delle coppie NiCr/Ni ma sono di maggior costo: in compenso presentano una maggior costanza, linearità e danno misure di maggior precisione. Si possono raggiungere i $1300^{\circ}C$ con maggior tranquillità. Come fili di prolungamento vengono impiegati cavi di Cu e Costanteana.

6. *Coppia PtRh/Pt.*-Questa coppia risulta di notevole costo e fornisce una f.e.m. non molto elevata; in compenso presenta una notevole stabilità e sicurezza di impiego e permette misure fino anche a $1600^{\circ}C$. Deve essere protetta accuratamente da possibili agenti chimici (gas e vapori).

Materiali	f.e.m. [mV]
Bismuto parallelo all'asse	-7.7 ÷ -7.2
Bismuto perpendicolare all'asse	-5.2
Costantina (55Cobalto)	-1.99 ÷ -1.52
Nichel	-1.94 ÷ -1.20
Palladio	-0.28
Platino	0
Mercurio	-0.07 ÷ +0.04
Grafite	+0.22
Tantalio	+0.34 ÷ +0.51
Stagno	+0.40 ÷ +0.44
Piombo	+0.41 ÷ +0.46
Magnesio	+0.40 ÷ +0.43
Alluminio	+0.37 ÷ +0.41
Tungsteno	+0.65 ÷ +0.90
Platinorodio (da 10Argento)	+0.67 ÷ +0.79
Rame	+0.72 ÷ +0.77
Zinco	+0.60 ÷ +0.76
Manganina (Cu, Mn, e Ni)	+0.57 ÷ +0.82
Iridio	+0.65 ÷ +0.68
Oro	+0.50 ÷ +0.80
Cadmio	+0.85 ÷ +0.92
Molibdeno	+1.16 ÷ +1.31
Ferro	+1.87 ÷ +1.89
Nichelcromo (90Antimonio)	+4.70 ÷ +4.86
Germanio	+33.9
Silicio	+44.8
Tellurio	+50

Per temperature molto elevate possono essere impiegate termocoppie speciali quali: *iridio-rodio/iridio* (fino a $2000^{\circ}C$), *tungsteno/molibdeno* (fino a $2000^{\circ}C$), *tungsteno/iridio* (fino a $2100^{\circ}C$), *tungsteno/grafite* (fino a $1650^{\circ}C$), *grafite/carburo di boro* (fino a $2500^{\circ}C$).

Le saldature tra i fili al giunto di misura vengono in genere effettuate in uno dei modi esposti in Fig. 5.18.

5.2.8 Protezione delle termocoppie.

Le protezioni che possono rendersi necessarie per una termocoppia sono essenzialmente tre: elettrica, chimica, meccanica.

La *protezione elettrica* è necessaria quando è possibile che i fili della termocoppia vengano a contatto fra di loro: in tal caso si ricorre ad uno dei sistemi riprodotti in Fig. 5.19.

In a) si impiegano anellini di materiale isolante infilati su fili; in b) gli anelli sono singoli con due fori nei quali passano i fili della coppia; in c) infine l'isolamento è continuo, eventualmente realizzato in

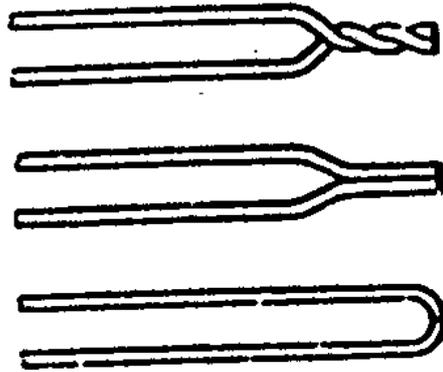


Figura 5.18:

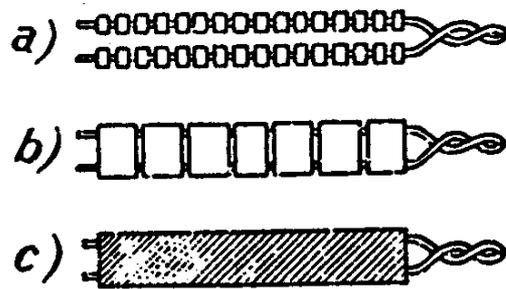


Figura 5.19:

materiale flessibile.

Il materiale isolante varia a seconda della temperatura e può andare dalla seta all'amianto.

La *protezione chimica* va impiegata ogni qualvolta vi è pericolo che i fili della coppia siano intaccati da agenti chimici presenti nell'ambiente, o anche quando i vapori che vengono emanati da uno dei fili possono essere assorbiti dall'altro; è quest'ultimo il caso caratteristico della coppia PtRh/Pt nella quale, a temperatura elevata (sopra i 1000°C), il Rh sublima e può inquinare il filo di platino.

Per questo tipo di protezione vengono usati tubi di quarzo, porcellana, magnesio, carborundum, grafite, ecc. a seconda della temperatura e degli agenti chimici.

La *protezione meccanica* è costituita da tubi di metalli vari (ferro, acciaio, alluminio, ecc.) nei quali viene alloggiata la termocoppia.

5.3 Sensori di temperatura a resistenza elettrica

5.3.1 Generalità.

Nei termometri a resistenza si sfrutta il fenomeno della variazione della resistenza elettrica in funzione della temperatura in alcuni materiali: questi ultimi possono suddividersi, da questo punto di vista, in due gruppi di caratteristiche e proprietà completamente differenti, e precisamente i *metalli* e i *semiconduttori*, questi ultimi così chiamati perchè hanno resistenza elettrica intermedia fra quella dei materiali conduttori e quella dei materiali isolanti.

I termometri a resistenza elettrica metallici sono normalmente indicati come *termometri a resistenza*, mentre quelli a semiconduttori assumono il nome di *termistori*.

5.3.2 Materiali e caratteristiche dei termometri a resistenza.

I metalli impiegati nella costruzione dei termometri a resistenza devono rispondere ad alcuni requisiti quali : coefficiente di temperatura elevato, stabilità nel tempo, resistenza elettrica complessiva abbastanza elevata, caratteristica resistenza-temperatura il più possibile vicina alla linearità.

In pratica, tenuto conto di queste esigenze, i metalli che vengono impiegati sono quasi esclusivamente il *platino*, il *nicel*, il *rame*.

Le caratteristiche R/R_0 (dove R è la resistenza alla temperatura t e R_0 quella a 0°C) in funzione della temperatura per tali metalli sono riportate in Fig. 5.20.

Detta R_{100} la resistenza a 100°C , si definisce coefficiente medio di temperatura fra 0°C e 100°C il valore

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0} \quad (5.8)$$

Esso vale:

per il platino $\alpha_m = 3.8510^{-3} \Omega/\Omega^\circ C$
 per il nichel $\alpha_m = 6.1810^{-3} \Omega/\Omega^\circ C$
 per il rame $\alpha_m = 4.2110^{-3} \Omega/\Omega^\circ C$

Per misure di tipo industriale si può ritenere lineare la relazione fra R/R_0 e t : si può scrivere

$$R = R_0(1 + \alpha_m t) \quad (5.9)$$

Per misure di maggiore precisione occorre assumere leggi più complesse, come avviene per il termometro a resistenza destinato a realizzare la scala internazionale delle temperature.

Le temperature di normale impiego sono le seguenti:

platino.....da -200 a 600° C
 nichel.....da -100 a 200° C
 rame.....da -100 a 150° C

Il platino, malgrado il coefficiente di temperatura inferiore a quello del nichel e del rame, e malgrado il suo prezzo elevato, è il metallo più impiegato per i notevoli vantaggi che esso presenta: è inattaccabile dagli

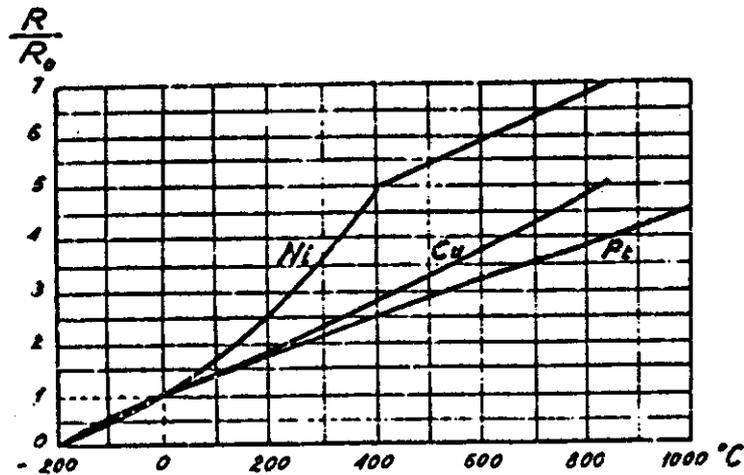


Figura 5.20:

agenti chimici, ha un punto di fusione molto elevato per cui può in casi eccezionali essere impiegato fino a 1000 °C, ha una caratteristica abbastanza lineare, può essere ottenuto con un grado di purezza molto elevato e risulta molto stabile nel tempo. Ricordiamo che appunto in platino è il termometro primario richiesto dalla scala internazionale.

5.3.3 Conformazione dei termometri a resistenza.

Il metallo viene generalmente impiegato sotto forma di filo. Questo viene avvolto su un supporto di materiale elettricamente isolante (in genere ceramico) che può essere cilindrico, a sezione circolare o a croce, o piatto, oppure può essere montato su un supporto simile a quello degli estensimetri a resistenza elettrica.

È in genere necessaria anche una protezione esterna, pure isolante.

Si hanno anche termometri costituiti da lamine sottili rettangolari in platino, destinati a misure di temperature di superfici.

Le dimensioni di ingombro di questi termometri possono variare notevolmente potendo essere realizzati i più piccoli sotto forma di cilindretti del diametro di 3 mm e della lunghezza di 30 mm, i più grandi sottoforma di grosse sonde pirometriche per forni (Fig. 5.21): in quest'ultimo caso è però da notare che l'elemento sensibile vero e proprio è di dimensioni molto minori occupando solo la parte terminale della sonda.

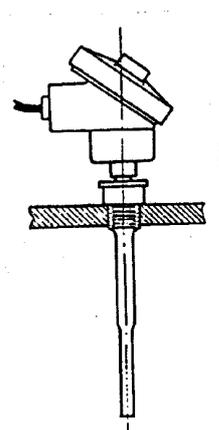


Figura 5.21:

5.3.4 Termistori.

I termistori sono costituiti da materiali semiconduttori (quali il germanio, il silicio, ecc. in presenza di piccole quantità di impurità) la cui resistenza varia con la temperatura con una legge che può, con buona approssimazione, assumersi esponenziale del tipo

$$R_T = ae^{\frac{b}{T}} \quad (5.10)$$

dove R_T è la resistenza alla temperatura assoluta T , a un coefficiente dipendente dalla forma e dalle dimensioni del termistore, b un coefficiente dipendente dal materiale. La resistenza, al contrario dei metalli, diminuisce perciò con l'aumentare della temperatura.

La costante a presente nella eq. 5.10 può essere eliminata introducendo il valore della resistenza R_0 a una temperatura T_0 di riferimento, per cui si ha

$$R_T = R_0 e^{\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}} \quad (5.11)$$

La costante di temperatura α del semiconduttore vale

$$\alpha(T) = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{b}{T^2} \quad (5.12)$$

o anche

$$\alpha(T) = \alpha(T_0) \frac{T_0^2}{T^2} \quad (5.13)$$

Un termistore può perciò venir definito mediante il valore della resistenza e della costante α ad una data temperatura (in genere 25 °C).

La costante α varia a seconda del materiale fra 0,05 e 0,012 $\Omega/\Omega^\circ C$ e diminuisce con la temperatura, per cui i termistori risultano più sensibili alle basse temperature che non alle alte, come del resto è ovvio data la struttura della eq. 5.13; inoltre essi risultano più sensibili dei termometri a resistenza metallica.

I termistori di tipo classico possono essere impiegati fra -100 °C e +400 °C; alcuni tipi speciali possono però arrivare anche fino a 1200 °C.

5.3.5 Protezione dei termometri a resistenza.

I termometri a resistenza devono essere adeguatamente protetti, specie alle alte temperature, dagli agenti chimici che possono danneggiarli e alterarne le caratteristiche. A tale scopo si impiegano guaine di vetro, di ceramica o anche metalliche, a patto che il metallo non venga a contatto col filo. Meglio ancora, per le sonde pirometriche la doppia protezione vetro, o ceramica, e guaina metallica.

5.3.6 Circuiti di misura e precisioni raggiungibili.

Le variazioni di resistenza del termometro vengono misurate con un circuito potenziometrico o a ponte. Notiamo solo che per misure di grande precisione si rende necessario tener conto del riscaldamento per effetto Joule prodotto dalla corrente che passa nella resistenza. Nel caso di misure effettuate con strumenti di tipo industriale si hanno precisioni dell'ordine : per il platino di $\pm 0,5$ °C a 100 °C, di $\pm 0,8$ °C a 150 °C, e di ± 3 °C a 500 °C; per il nichel di ± 1 °C a 100 °C, e di $\pm 1,4$ °C a 150 °C. Per misure di tipo industriale può impiegarsi anche un ohmetro a bobine incrociate.

5.3.7 Schema di utilizzo di un sensore resistivo

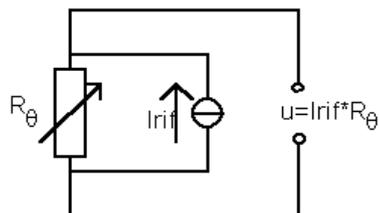


Figura 5.22: Schema di utilizzo di un sensore resistivo

Eventuali resistenze nel circuito di misura della corrente non hanno effetto, così come la resistenza nel circuito di lettura della tensione, poichè tale lettura è fatta a circuito aperto. Si introduce una resistenza di linearizzazione :

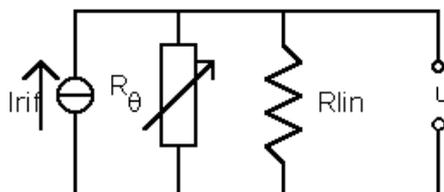


Figura 5.23: Introduzione della resistenza di linearizzazione

$$u = I_{rif} R_{lin} \parallel R_{\theta}$$

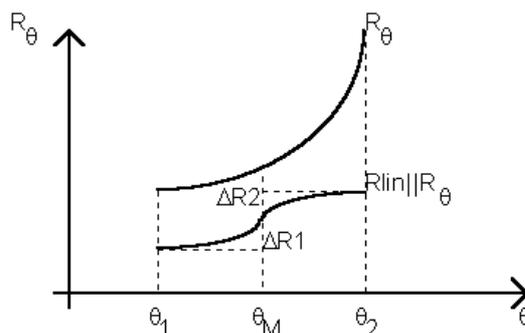


Figura 5.24: Grafico

Imponiamo $\Delta R_1 = \Delta R_2$

$$R_1 = R(\theta = \theta_1), \quad R_2 = R(\theta = \theta_2), \quad R_M = R(\theta = \theta_M)$$

$$\Delta R_1 = \frac{R_{lin} R_M}{R_{lin} + R_M} - \frac{R_{lin} R_1}{R_{lin} + R_1} = \Delta R_2 = \frac{R_{lin} R_2}{R_{lin} + R_2} - \frac{R_{lin} R_M}{R_{lin} + R_M}$$

Avrò una relazione di secondo grado (ma una soluzione è $R_{lin} = 0$)

$$r_{lin} = \frac{R_M(R_1 + R_2) - 2R_1R_2}{R_1 + R_2 - 2R_M} \implies \text{stabilisco il valore della resistenza di compensazione}$$

La variazione di resistenza sarà dunque distribuita linearmente. $R \parallel (\theta_M)$ sarà valor medio di $R \parallel_1$ e $R \parallel_2$. (v.fotocopia 11; 26.4,6,7)

In figura 26.5a,b sono indicati due possibili schemi di linearizzazione. Inseriremo nel circuito un amplificatore per non caricare la tensione ai capi della resistenza e per riportare la scala dell'uscita tra 0 e 2 volt : usiamo lo schema in figura 26.8. Vogliamo determinare le resistenze R_1, R_2, R_3 in modo tale che la tensione di misura sia 0V a 0C e 2V a 100C.

$$\begin{aligned} i_1 &= i_2 + i_3 \\ i_1 &= \frac{U_\theta}{R_1} = \frac{V_{ref} - U_\theta}{R_2} + \frac{U_{mis} - U_\theta}{R_3} \\ U_{mis} &= U_\theta R_3 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) - V_{ref} \frac{R_3}{R_2} \end{aligned}$$

(Le tensioni alle quali ci riferiamo sono opposte a quelle indicate in fotocopia)

$$U_{mis} = U_{theta} \left(1 + \frac{R_3}{R_1 \parallel R_2} \right) - V_{ref} \frac{R_3}{R_2}$$

Guadagno relativo a U_θ

$$A = \frac{U_{mis-alto} - U_{mis-basso}}{U_{\theta-alto} - U_{\theta-basso}} = \frac{2V}{0.935 - 0.555} \text{ (fig. 26.9) } = 5.26 \text{ (*)}$$

L'altra condizione da imporre è $U_{mis} = 0$ per $T = 0^\circ C$; quindi :

$$\left(1 + \frac{R_3}{R_1 \parallel R_2} \right) U_{\theta-basso} - V_{ref} \frac{R_3}{R_2} = 0 \text{ (**)}$$

(*) e (**) sono due vincoli per le tre resistenze R_1, R_2, R_3 : scegliamo $R_2 = R_{lin}$.

5.4 Circuiti di compensazione e misura per sensori a termistorei *

Dalla fig.26.12(fotoc.11) notiamo come la variazione della resistenza sia esponenziale, con buona approssimazione (dunque lineare nella scala semilogaritmica):

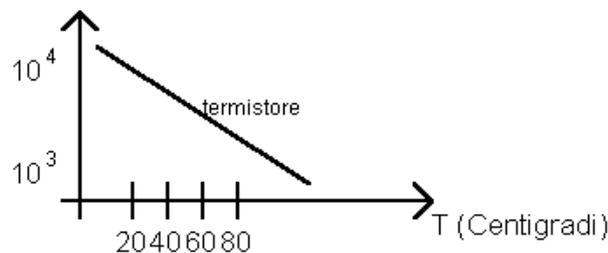


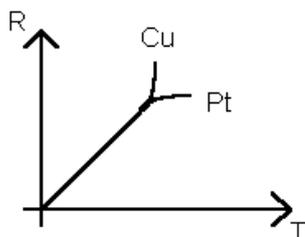
Figura 5.25: Grafico della variazione della resistenza

$$R(\theta) = R(T_0)e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

Il valore della resistenza lineare è qui positivo. Ricorriamo allo schema circuitale (f.11, 26.13), dove si è provveduto ad invertire la posizione della R_{lin} con R cosicchè la funzione di uscita risulti crescente con la temperatura. (diminuisce R , quindi aumenta la caduta di tensione su R_{lin} ,..... - situazione opposta a prima) fig.26.8 : PTC --- 26.13 : NTC.

5.5 Circuiti di compensazione e misura per sensori resistivi al platino *

Consideriamo inizialmente la variazione di resistenza del rame e del platino, il primo mostra una concavità verso l'alto, il secondo verso il basso \Rightarrow la resistenza di linearizzazione del platino dovrebbe essere minore di zero:



Consideriamo il seguente schema :

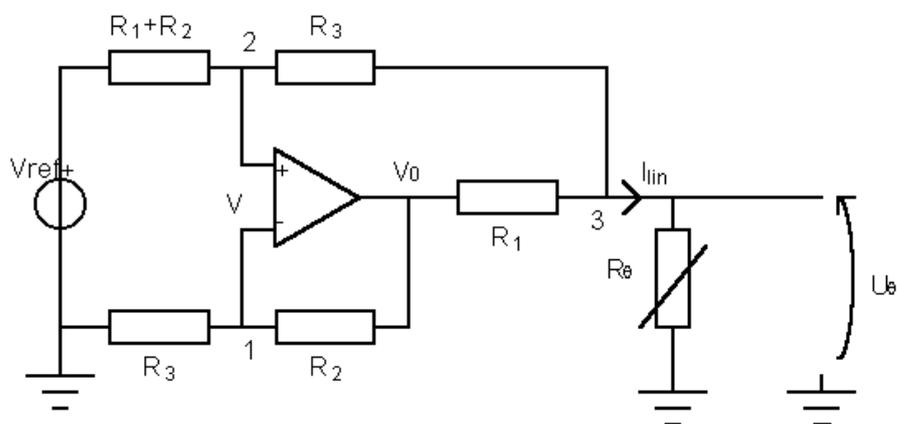


Figura 5.26:

Tutto ciò serve per realizzare la resistenza lineare negativa : a questo schema seguirà quello di misura visto in precedenza. Al nodo 1 abbiamo che :

$$\frac{V_0 - V}{R_2} = \frac{V}{R_3}$$

Al nodo 2 :

$$\frac{V_{ref} - V}{R_1 + R_2} = \frac{V - U_\theta}{R_3}$$

Al nodo 3 :

$$\frac{V_0 - U_\theta}{R_1} + \frac{V - U_\theta}{R_3} = I_{lin}$$

Abbiamo poi che

$$I_{lin} = \frac{V_{ref}}{R_1} + \frac{R_2^2 - R_3^2}{R_1 R_3 (R_2 + R_3)} U_\theta$$

se $R_2 = R_3$ l'impedenza è nulla (rispetto a U_θ), mentre per $R_2 > R_3$ abbiamo la resistenza negativa.

$$r_{diff} = -\frac{\Delta U_\theta}{\Delta I_{lin}} = -\frac{R_1 R_3 (R_2 + R_3)}{R_2^2 - R_3^2} = +R_{lin} \quad \leftarrow \text{determinata secondo il criterio di compensazione}$$

$$\left[V_{ref} - R_{lin} I_{lin} = U_\theta ; \quad \Delta V_{ref} - R_{lin} \Delta I_{lin} = \Delta U_\theta ; \quad R_{lin} = -\frac{\Delta U_\theta}{\Delta I_{lin}} \right]$$

Realizziamo la sorgente di tensione compensata:

5.6 Transistori come sensori di temperatura *

(f. 11,26.14)

La variazione di U_{BE} (opposta a quella in figura) con la temperatura è di $-\frac{2mV}{^\circ K}$. Questa relazione è molto variabile da un transistor all'altro, quindi si renderà necessario uno schema più elaborato: f.11,26.16 (consideriamo tensioni opposte a quelle indicate nel grafico). $I_c = (\text{area emettitore})(\text{corrente di saturazione}) \exp(U_{be}/V_t)$.

$$\begin{aligned} I_c &= A J_{cs} e^{\frac{U_{BE}}{V_T}} & V_T &= \frac{kT}{q} \\ \Delta U_{BE} &= U_{BE2} - U_{BE1} = V_T \ln \left(\frac{I_{c2}}{J_{cs} A_2} \right) - V_T \ln (I_{c1} J_{cs} A_1) \\ \Delta U_{BE} &= V_T \ln \left(\frac{I_{c2} A_1}{I_{c1} A_2} \right) = V_T \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \\ \Delta U_{BE} &= V_T \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right) = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right) = \frac{k300^\circ}{q} \frac{T}{300^\circ} \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \\ A_1 &= 10 A_2 \implies \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right) = 2.3 \\ \Delta U_{BE} &= 200 \left(\frac{\mu V}{^\circ K} \right) \end{aligned}$$

Ai capi di R_2 ho una caduta $2R_2 I_c = 10I_c R_1 = 10\Delta U_{BE}$

$$U_{temp} = 2 \left(\frac{mV}{^\circ K} \right) T$$

Quando $T = 273^\circ K = 0^\circ C \implies U_{temp} = 546mV$

Questo circuito può essere utilizzato per la misura di temperatura, in particolare come sorgente di una tensione proporzionale alla temperatura. Vorremmo in particolare che U_{temp} sia nulla a zero °C.

$$\begin{aligned}\frac{dU_{BE}}{dT} &= \frac{U_{BE}}{T} - \frac{U_{BG}}{T} \\ (U_{BG} &= U \text{ Band Gap - banda proibita}) \\ U_{BE} &= U_{BG} - 2 \left(\frac{mV}{^{\circ}K} \right) T \\ U_{ref} &= U_{temp} + U_{BE} = U_{temp} + U_{BG} - 2 \left(\frac{mV}{^{\circ}K} \right) T\end{aligned}$$

(dimensionamenti tali che $U_{temp} = \frac{2mV}{^{\circ}K}$)

$$\Rightarrow U_{ref} = U_{BG}$$

Abbiamo a disposizione sul circuito un valore della tensione pari ad U_{BG} , questo ci da una tensione di riferimento : possiamo usare la sorgente costante U_{BG} e la tensione variabile U_{temp} per ottenere il circuito che realizza una proporzionalità con i gradi centigradi :

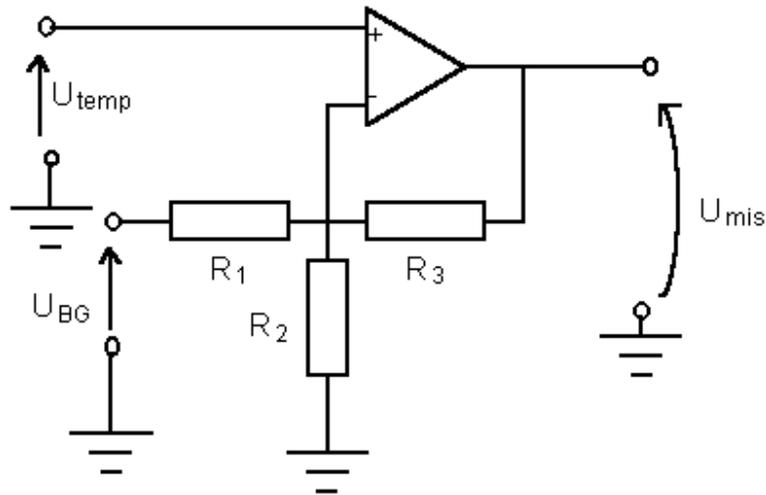


Figura 5.27: Circuito che realizza una proporzionalità con i gradi centigradi

$$\begin{aligned}\frac{U_{BG} - U_{temp}}{R_1} &= \frac{U_{temp}}{R_2} + \frac{U_{temp} - U_{mis}}{R_3} \\ U_{mis} &= R_3 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) U_{temp} - \frac{R_3}{R_1} U_{BG}\end{aligned}$$

Voglio $U_{mis} \propto 10 \frac{mV}{^{\circ}C} T$ e $U_{mis} = 0$ per $T = 273^{\circ}K$.

$$R_3 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = 5$$

$$U_{mis} = 5U_{temp} - 2.22U_{BG}$$

5.7 Sensori di pressione

$$1 \text{ Pascal} = [Pa] = \frac{1 \text{ Newton}}{1 \text{ metro}^2} = \left[\frac{N}{m^2} \right], \quad \text{Bar} \cong 10^5 \text{ Pa}$$

Tipicamente nei sensori di pressione si impiegano tre passaggi di grandezza fisica :

Pressione → Deformazione → Variazione di Resistenza → Variazione di tensione

(nella fotocopia 12, fig. 26.34 a e b si notano rispettivamente un sensore di pressione differenziale e uno di pressione assoluta; in fig. 26.35 a e b è indicato un tipo di sensore composto da un filo a serpentina saldato ad un substrato ed integrato sulla superficie di un diaframma il quale è in grado di deformarsi, e di trasmettere al filo un effetto di allungamento o accorciamento che ne varia la resistenza; in fig. 26.36 è mostrato un circuito a ponte per la misura della pressione con il dispositivo di fig. 26.35).

5.8 Misure di deformazione

5.8.1 Generalità.

In questo capitolo vengono raggruppati e descritti gli strumenti impiegati per la misura delle deformazioni di elementi costruttivi sottoposti a carichi sia statici sia dinamici. In pratica, come vedremo, la misura che si effettua è quella della dilatazione $e_L = \frac{\Delta l}{l}$: ad ogni modo con dispositivi appositi può ricavarsi lo stato completo di deformazione o almeno il suo valore medio in una zona limitata della superficie del pezzo. Gli strumenti che misurano la dilatazione vengono detti *estensimetri*: essi sono sensibili, in genere, agli spostamenti relativi fra due punti della superficie lungo la direzione della loro congiungente. La distanza fra i due punti è fissata dall'estensimetro stesso, del quale è una caratteristica costruttiva, e viene detta *base* dell'estensimetro: dalla misura dello spostamento fra i punti delimitanti la base, si risale facilmente alla dilatazione media esistente nel tratto limitato dalla base stessa, e questo viene fatto tarando direttamente lo strumento. Ne deriva che è opportuno, qualora si abbiano a temere concentrazioni di sforzi in determinate zone, impiegare estensimetri con una base piccola, in modo da avvicinarsi il più possibile al valore locale reale della deformazione; per contro, minore è la base, maggiore è ovviamente l'amplificazione necessaria per ottenere la medesima sensibilità dello strumento, col rischio di aumentare eccessivamente gli errori, per cui in definitiva occorrerà di volta in volta scegliere il valore della base in modo da ottenere un compromesso accettabile fra le due esigenze. Gli estensimetri possono classificarsi, secondo il loro principio di funzionamento, come segue:

1. *estensimetri a resistenza elettrica*

2. *altri estensimetri*

- *estensimetri meccanici*
- *estensimetri acustici*
- *estensimetri pneumatici*
- *estensimetri ottici*

Gli estensimetri vanno mantenuti a contatto con la superficie dell'elemento, del quale si vogliono misurare le deformazioni, mediante viti, nastri o molle (ad eccezione di quelli a variazione di resistenza elettrica che vanno incollati con speciali collanti). Una buona precisione nella misura é quindi condizionata dal fatto che l'estensimetro segua fedelmente le deformazioni della superficie. Ove si possano escludere fenomeni che facciano temere concentrazioni locali di sollecitazioni (ad esempio di fatica), si puó aiutare l'aderenza fra estensimetro e superficie, prevedendo delle piccole nicchie in corrispondenza dei coltelli (quando vi sono) coi quali l'estensimetro tocca il pezzo. Da tener presente che, con l'avvento degli estensimetri elettrici, gli altri tipi di estensimetri hanno perso molto della loro utilità: molti di essi sono caduti completamente in disuso, mentre altri, pur essendo meno usati, mantengono ancora una certa importanza per alcune peculiari proprietà. Un estensimetro di questo tipo é quello di figura 5.28, il cui funzionamento é ovvio. Con i dati in figura l'amplificazione dello strumento, per allungamenti limitati, vale (detta ΔL la lettura corrispondente allo spostamento Δl) $\frac{\Delta L}{\Delta l} = \frac{a}{b}$.

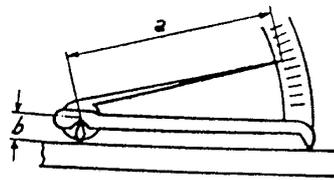


Figura 5.28:

5.8.2 Estensimetri a resistenza elettrica.

Gli estensimetri elettrici a resistenza consistono in un filo (figura 5.29 e figura 5.30) di lega speciale, di resistenza elettrica nota e di diametro molto piccolo (da 0.01 a 0.03mm), disposto a serpentina su un supporto di carta o resina sintetica al quale aderisce. Il supporto viene a sua volta incollato al pezzo nella zona nella quale si desidera conoscere la deformazione.

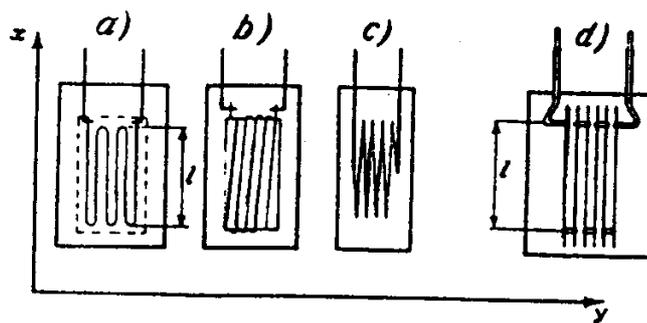


Figura 5.29:

Se, una volta incollato l'estensimetro, si mette il pezzo sotto carico, l'estensimetro seguirá le deformazioni del pezzo presentando le medesime dilatazioni di questo. Il filo viene perciò allungato o accorciato, e a seguito di ciò varia la sua resistenza elettrica a causa di due fenomeni: l'allungamento (o accorciamento) accompagnati da una diminuzione (o aumento) di sezione, e la variazione di resistività che si ha in un materiale al variare della sollecitazione. Per molti tipi di estensimetri a costante elevata

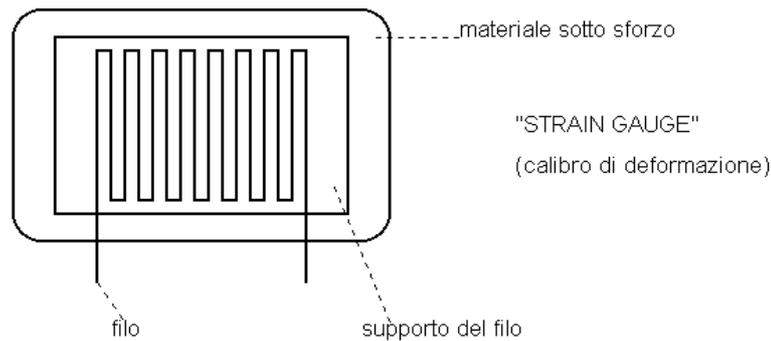


Figura 5.30: STRAIN GAUGE

tale fenomeno é preponderante. Data la conformazione dell'estensimetro, esso é molto sensibile alle dilatazioni lungo la direzione x , e poco alle dilatazioni in direzione y perpendicolare a questa. Perciò esso andrà evidentemente montato in modo che la direzione privilegiata di sensibilità coincida con quella della dilatazione da misurare. Inoltre, poiché il fatto che l'estensimetro sia sensibile anche alla dilatazione in direzione y a causa delle anse presenti nella serpentina é evidentemente di disturbo nella misura (perché diminuisce in definitiva la sensibilità nella direzione x), si preferisce in genere costruire l'estensimetro secondo lo schema di figura 5.29c e d: nel caso d , la resistenza non é piú costituita da un filo continuo, ma da piú fili paralleli collegati in serie con altri piccoli tratti di filo di sezione maggiore e di materiale di elevata conduttività elettrica (cioé di resistenza molto bassa) in modo che le variazioni di resistenza (anche percentuali) di questi tratti risultino trascurabili. La lunghezza l (figura 5.29) é la base dell'estensimetro: essa non va confusa con l'ingombro longitudinale dell'estensimetro, che é sempre maggiore della base a causa delle maggiori dimensioni del supporto e dell'esistenza dei terminali della resistenza. Le lunghezze piú comuni della base sono 5 mm, 10 mm, 20 mm: esistono però estensimetri con base anche maggiore o minore.

I valori piú comuni della resistenza vanno da 120Ω a 1000Ω : essi sono forniti dal costruttore con una certa tolleranza (ad es. resistenza $350 \pm 3 \Omega$). Il valore della resistenza é riportato sulle bustine che contengono ognuna un certo numero di estensimetri (5 o 10): la tolleranza sul valore della resistenza significa che tutti gli estensimetri contenuti nella busta hanno un valore della resistenza contenuto entro i limiti da essa stabiliti.

Variazioni di resistenza indotte da deformazione.

Esponiamo alcuni richiami di teoria dell'elasticità :

Nel regime elastico l'allungamento é proporzionale alla forza per unità di superficie ed alla lunghezza.

$$\Delta l = \frac{1}{E} \left(\frac{F}{S} \right) l$$

$\frac{1}{E}$ =coefficiente di allungamento, E =modulo di Young (di allungamento).

$$[E] = \frac{\text{Forza}}{\text{Superficie}} = \frac{N}{m^2}$$

(per $\frac{F}{S} = E$, in regime elastico, $\Delta l = l \implies$ raddoppio l)

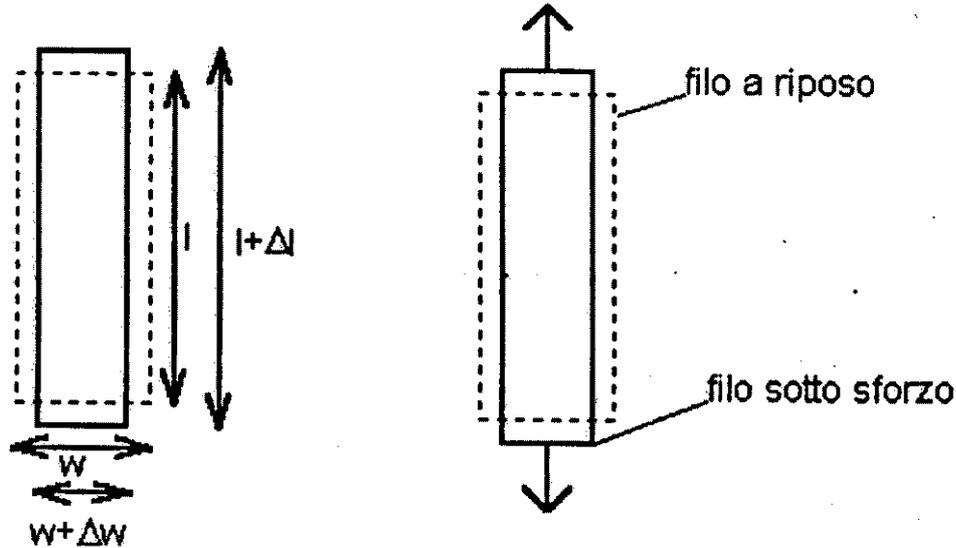


Figura 5.31: Il filo cambia dimensione longitudinale e trasversale in seguito all'applicazione di forze.

Per ogni dimensione lineare trasversale vale :

$$\Delta w = -\frac{1}{B} \left(\frac{F}{S} \right) w$$

$\frac{1}{B}$ =coefficiente di contrazione, B=modulo di contrazione trasversale.

Si definisce un rapporto tra la variazione trasversale e longitudinale :

$$v = \frac{\left(-\frac{\Delta w}{w} \right)}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{\frac{1}{B}}{\frac{1}{E}} = \frac{E}{B} = \text{fattore - modulo di Poisson}$$

Nota

Consideriamo il volume del filo (ad esempio a sezione circolare - w=diametro). Il volume è uguale a $l\pi\left(\frac{w}{2}\right)^2$. Consideriamo le variazioni di volume conseguenti alla deformazione:

$$\begin{aligned} \Delta V &= \Delta l \pi \left(\frac{w}{2} \right)^2 + l \pi \frac{w}{2} \Delta w \\ \frac{\Delta V}{V} &= \frac{\Delta l}{l} + 2 \frac{\Delta w}{w} = (1 - 2v) \frac{\Delta l}{l} \end{aligned}$$

Se v è pari ad $\frac{1}{2}$ allora $\Delta V = 0$. E', questa, un'indicazione sul significato del fattore di Poisson. Se $v < 0.5$ il volume del filo teso è aumentato rispetto a quello iniziale.

- Acciaio : $v=0.3$
- Gomma : $v = 0.48-0.50$

Costante dell'estensimetro.

Si definisce *costante* dell'estensimetro a resistenza elettrica il rapporto

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = \frac{\Delta R/R}{e_L}$$

dove e_L deformazione longitudinale; fornisce il rapporto tra la variazione relativa di resistenza e la deformazione longitudinale (variazione relativa di lunghezza). La resistenza elettrica dell'estensimetro vale

$$R_{filo} = \rho \frac{l}{A}$$

dove l é la lunghezza attiva del filo, A la sezione, ρ la resistività elettrica. Differenziando si ha

$$\begin{aligned} \Delta R &= \left(\frac{\partial R}{\partial l}\right) \Delta l + \left(\frac{\partial R}{\partial A}\right) \Delta A + \left(\frac{\partial R}{\partial \rho}\right) \Delta \rho = \frac{\rho}{A} \Delta l - \frac{\rho l}{A^2} \Delta A + \frac{l}{A} \Delta \rho \\ \frac{\Delta R}{R} &= \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \end{aligned}$$

Ponendo $A = wt = \text{larghezza} \cdot \text{spessore}$, si ha

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta w}{w} - \frac{\Delta t}{t} = -2v \frac{\Delta l}{l}$$

ovvero

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2v) \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

osservando che

$$\frac{\Delta R}{R} = \left[\underbrace{(1 + 2v) + \frac{\Delta \rho/\rho}{e_L}}_K \right] e_L$$

Si potrà quindi scrivere

$$K = \left[\left(1 + 2 \underbrace{v}_{\simeq 0.3} \right) + \underbrace{\frac{\Delta \rho/\rho}{e_L}}_{\simeq 0.4} \right] \simeq 2$$

Il termine $\frac{\Delta \rho/\rho}{e_L}$, che é la variazione di resistività in funzione della deformazione, quantifica la **piezoresistività** del materiale: piccola nei metalli ($\simeq 0$) e prevalente nei semiconduttori (± 100 , vedi pagine seguenti). Come si vede, se fosse presente solo il fenomeno di variazione di resistenza a causa della variazione di forma, la costante dell'estensimetro si aggirerebbe attorno a $1.50 \div 1.70$. Invece la costante K é diversa da tale valore: in genere é superiore, se vi é un effetto, che può essere anche notevole, di variazione di resistività in funzione della sollecitazione. *La costante K viene determinata mediante taratura ed il suo valore é fornito dal costruttore con una tolleranza che normalmente é del $\pm 1\%$.*

Influenza della temperatura.

La temperatura influenza il funzionamento dell'estensimetro sotto piú aspetti, e principalmente:

- Vi é un limite di temperatura che non puó essere sorpassato, pena il danneggiamento dell'estensimetro.
- La resistenza del filo varia al variare della temperatura.
- L'estensimetro, sottoposto ad una variazione di temperatura, si dilata: se queste dilatazioni sono impedito, del tutto o in parte, nasce nell'estensimetro uno stato di sollecitazione che si aggiunge a quello dovuto ai carichi.
- La costante dell'estensimetro varia con la temperatura: ciò é spiegabile con il fatto che il modo di variare della resistività, al variare della deformazione, dipende dal valore della temperatura.

Per quanto riguarda la temperatura limite, é da osservare che essa dipende non solo dalla lega con la quale é costituito il filo, ma anche dalla natura del supporto e dall'adesivo impiegato. Si é visto che il supporto puó essere in carta, e in tal caso la temperatura limite non puó essere molto elevata ($50\div 60^{\circ}\text{C}$), o in bachelite o altre resine, e in tal caso, con collanti appropriati, ad esempio a base di resine polimerizzanti con additivi o a caldo (resine termoindurenti), si raggiungono temperature limiti piú elevate (150°C e anche piú). Inoltre il limite di temperatura puó essere piú elevato nel caso di misure dinamiche che nel caso di misure statiche, poiché sotto sollecitazioni costanti sono piú facilmente presenti fenomeni di scorrimento fra filo, supporto e adesivo, e, se la temperatura é abbastanza elevata, anche fenomeni di rilassamento delle sollecitazioni nel filo: vi é quindi da temere una riduzione della sollecitazione del filo stesso, con conseguenti errori nella misura. Si noti infine che il riscaldamento puó essere prodotto sia dalla temperatura elevata del pezzo, sia dalla corrente che passa nell'estensimetro. Per quanto riguarda il variare della resistenza al variare della temperatura, si definisce *COEFFICIENTE DI TEMPERATURA* dell'estensimetro il rapporto fra la variazione di resistenza, riferita alla unitá di resistenza, e la variazione di temperatura di 1°C . Se si hanno a temere variazioni di temperatura, occorre quindi che tale coefficiente risulti il piú possibile basso. Per quanto riguarda le eventuali dilatazioni impedito, vi é da tener presente che tali impedimenti possono sorgere sia perché solo l'estensimetro subisce la differenza di temperatura (perché in esso vengono fatte passare correnti elettriche eccessive), sia perché il pezzo in esame non puó dilatarsi, sia infine perché tanto il pezzo quanto l'estensimetro sono sottoposti alla variazione di temperatura, ma i loro coefficienti di dilatazione sono diversi. In tal caso l'estensimetro sará sottoposto ad una sollecitazione di compressione o di trazione a seconda che il suo coefficiente di dilatazione sia rispettivamente maggiore o minore di quello del pezzo. Infine per quanto riguarda la variazione della costante dell'estensimetro con la temperatura, essa in genere si mantiene praticamente costante fino a $60\div 70^{\circ}\text{C}$ per poi calare bruscamente per valori superiori della temperatura. I mezzi per ovviare a questi inconvenienti prodotti dalla temperatura sono sostanzialmente i seguenti:

1. Impiegare nel circuito a ponte di misura un secondo estensimetro (*estensimetro compensatore*) montato su un pezzo non sollecitato, dello stesso materiale del pezzo in esame, e inserito nel ponte in modo che un vertice del ponte stesso sia comune ai due estensimetri: in tal caso se l'estensimetro ha lo stesso coefficiente di temperatura, ed é portato alla stessa temperatura di quello di misura, il ponte non risente delle variazioni di resistenza dovuta alla variazione di temperatura, come pure delle dilatazioni impedito.

2. Impiegare estensimetri autocompensati. Essi possono essere costituiti con materiale che presenta un coefficiente di temperatura e un coefficiente di dilatazione (in rapporto con quello del pezzo in esame) tali che non si risenta praticamente delle variazioni di temperatura, almeno nel campo di temperatura di utilizzo. Altri tipi di estensimetri autocompensati hanno invece un tratto di filo di materiale apposto in serie col filo principale (figura 5.32a), avente un coefficiente di temperatura diverso da quello del filo principale.

3. Impiegare estensimetri autocompensati universali, corrispondenti allo schema di figura 5.32b. Il filo posto in serie a quello dell'estensimetro vero e proprio ha, anche in questo caso, un andamento del coefficiente di dilatazione in funzione della temperatura diverso da quello dell'estensimetro. Tale filo viene messo in parallelo ad una resistenza, eventualmente regolabile, in modo che il comportamento globale dell'estensimetro al variare della temperatura possa adattarsi a quello del materiale sul quale é destinato a lavorare. Poiché tale regolazione é fatta in funzione della temperatura, in alcuni casi é incorporata nell'estensimetro una coppia termoelettrica che permette appunto il rilievo diretto della temperatura alla quale si trova l'estensimetro.

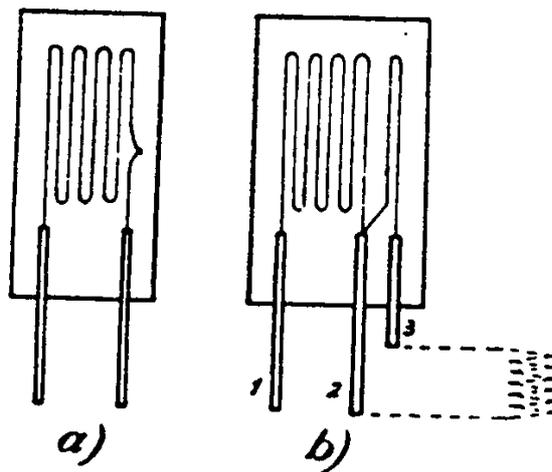


Figura 5.32:

Nella tabella I sono riportate le caratteristiche di alcuni materiali impiegati nella costruzione degli estensimetri a resistenza elettrica. I dati riportati in tabella sono solo indicativi in quanto influenzati da vari fattori (ad esempio il procedimento di fabbricazione).

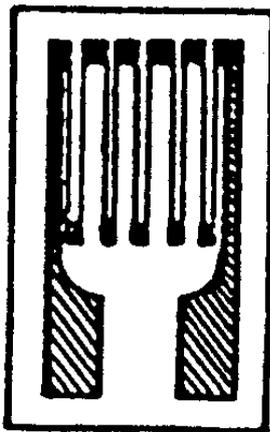


Figura 5.33:

Tabella I.- *Caratteristiche di alcuni materiali per estensimetri*

Lega o metallo	Composizione in %	Costante	Coeff. di temperatura $\frac{m\Omega}{\Omega}$	Resistività $\frac{\Omega}{mm^2}$
Nicromo	Ni 80, Cr 20	+2	+0,3	390
Manganina	Ni 4, Mn 12, Cu 84	+0,5	+0,01	160
Advance	Ni 45, Cu 55	+2,1	$\pm 0,002$	195
Copel	Ni 45, Cu 55	+2,4	$\pm 0,002$	195
Costantana	Ni 60, Cu 40	+2,1	$\pm 0,02$	195
Isoelastic	Ni 36, Cr 8, Fe 52, Mo 0,5	+3,5	$\pm 0,470$	415
Karma	Ni 73, Cr 20, Al, Fe, ed altri	+2,4	+0,020	6200
Nichel		-12	+6,000	44

Nella tabella II sono riportati alcuni esempi di estensimetri e loro caratteristiche principali. Infine da notare che, per quanto detto nei paragrafi precedenti, é opportuno conoscere il valore della corrente massima sopportabile dall'estensimetro, normalmente di qualche decina di mA: tale dato é fornito dal costruttore e dipende evidentemente dalla temperatura d'impiego.

Estensimetri stampati.

Una particolare tecnica di realizzazione di estensimetri a resistenza elettrica consiste nello stampare, con procedimento di fotoincisione, un foglio sottile di metallo su un supporto di carta o di bachelite, dandogli la forma desiderata (figura 5.33). In alcuni casi il supporto é solo provvisorio e viene tolto al momento dell'applicazione dell'estensimetro: si ottiene con ciò fra l'altro la possibilità di impiego dell'estensimetro a temperatura molto elevata (anche fino a 1100° C). Gli estensimetri stampati presentano i seguenti vantaggi, in confronto a quelli a filo:

1. A causa della superficie maggiore, a parità di sezione, dissipano meglio il calore e sopportano perciò correnti più elevate.
2. Il supporto può essere molto più sottile e quindi l'estensimetro risulta più flessibile in modo che la sua applicazione su superfici curve viene facilitata.

3. I raccordi trasversali possono essere fatti senza difficoltà a sezione elevata.
4. I terminali sono costituiti da una espansione della parte sensibile e presentano perciò una maggiore resistenza meccanica.
5. È facile ottenere estensimetri di forma qualsiasi e dimensioni anche molto piccole (lunghezza della base $\simeq 1\text{mm}$).
6. Per la possibilità di essere incollati al pezzo senza supporto, si possono raggiungere temperature molto elevate.

Ditta costruttrice	Tipo	Supporto	Base mm	Resistenza Ω	Costante K
Baldwin (U.S.A.)	A-1	carta	20.638	120 \pm 0.2	2
	A-5	carta	12.700	120 \pm 0.2	2
	A-7	carta	6.350	120 \pm 0.3	2
	A-19	carta	1.588	60 \pm 0.5	1.7
	C-10	carta	7.938	1000 \pm 5	3.2
	C-14	carta	1.588	2000 \pm 0.5	2.7
	AB-1	bachelite	22.225	350 \pm 3	2
	AB-5	bachelite	12.700	75 \pm 0.3	-
	AB-11	bachelite	3.175	120 \pm 0.5	1.9
CB-1	bachelite	25.400	1000 \pm 5	3.5	
Philips (Olanda)	PR-9210	carta	25	600 \pm 0.5%	2 \div 2.11
	PR-9211	carta	12	120 \pm 0.5%	2 \div 2.11
	PR-9212B	bachelite	8	600 \pm 0.5%	2 \div 2.11
	PR-9214B	bachelite	4	120 \pm 0.5%	2 \div 2.11
Tepic, Huggenbergen (Svizzera)	PB1-120	carta	10	120	2.35 \div 2.55
	PB2-120	carta	20	120	2.35 \div 2.55
	BL1-120	resina trasp.	10	120	2.35 \div 2.55
	BL2-500	resina trasp.	20	500	2.35 \div 2.55
	BL6-350	resina trasp.	60	350	2.35 \div 2.55
Tinsley (Gran Bretagna)	6 C	carta	17	200	2.25
	6 H	carta	8	50	2
	8 A	carta	46	2000	2.35
	16 C	carta	24	1500	2.10
	2 C	bachelite	17	250	1.95 \div 2.1
	1 A	araldite	6.35	110	2.2 \div 2.3
A.O.I.P. (Francia)	12 B 5	carta	5	120	2
	8 B 11	carta	11	120	2.05
	18 B 25	carta	25	600	2.1
	12 B 5P	resina	5	120	2
Boano (Italia)	Z F 1	carta	21	120 \pm 0.2	2
	S F 1	bachelite	8	120 \pm 0.2	1.9
	S C 6	bachelite	20	600 \pm 0.1	2

Alcune considerazioni nell'impiego degli estensimetri.

L'estensimetro a resistenza elettrica, al momento della misura, fa parte di un circuito elettrico alimentato con corrente continua o oscillante (1000 \div 10000 Hz). Ciò premesso, e tenuto presente quanto già detto nei paragrafi precedenti, riportiamo qui le principali precauzioni che vanno prese nell'uso di questi estensimetri.

1. L'incollaggio dell'estensimetro sulla superficie del pezzo deve essere perfetto e non lasciare possibilità di scorrimenti relativi.
2. Le saldature dei terminali dell'estensimetro devono essere condotte con somma cura, in modo da ridurre al minimo la resistenza parassita.

3. L'estensimetro incollato deve presentare verso il pezzo (in genere a massa) una resistenza elevata (di qualche decina di $M\Omega$) per assicurare l'isolamento elettrico ed evitare dispersioni di corrente che altererebbero la misura.
4. Grande cura deve essere posta nel riparo l'estensimetro, specie quelli con supporto di carta, dall'umidità, che lo danneggerebbe e ne diminuirebbe l'isolamento.
5. I cavi di collegamento devono essere di sezione non troppo piccola e di lunghezza la minima possibile, per ridurre le resistenze e le capacità parassite.

Le rosette di estensimetri. *

Le *rosette* sono insiemi di piú estensimetri a resistenza elettrica montati sul medesimo supporto, e servono alla determinazione dello stato di deformazione e di sollecitazione in un punto della superficie di un elemento costruttivo. Esse possono essere di vario tipo; con riferimento alla figura 5.34, si hanno in *a*) e *b*) rosette composte di tre estensimetri a 45° fra di loro (*rosette rettangolari*); in *c*) una rosetta composta di tre estensimetri a 120° (*rosetta a delta*); in *d*) tre estensimetri a 120° piú uno a 90° rispetto a uno dei precedenti (*rosetta a delta T*); in *e*) e *f*) rosette composte da due estensimetri a 90° fra loro (*rosette rettangolari a due estensimetri*).

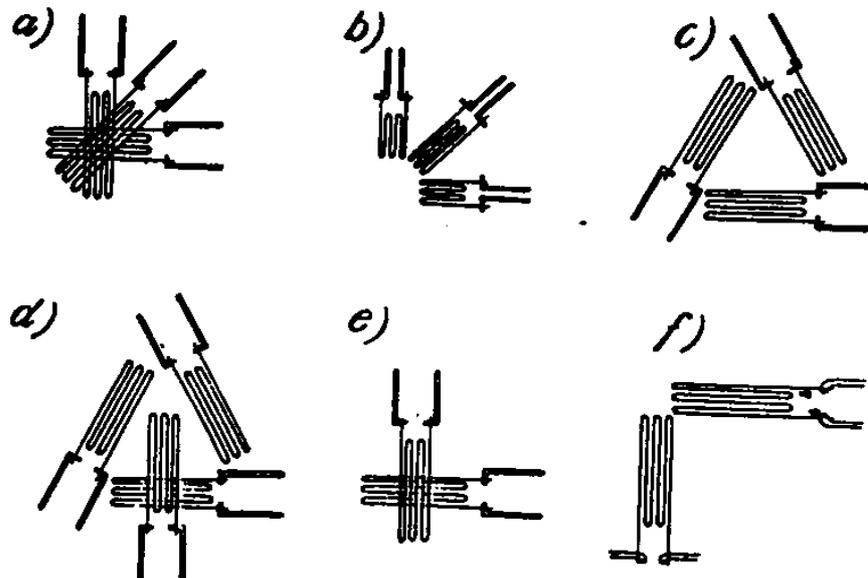


Figura 5.34:

Estensimetri a resistenza di semiconduttori.

Gli estensimetri a resistenza elettrica vengono realizzati anche con materiali semiconduttori (silicio, germanio, ecc.). Essi presentano il vantaggio di avere delle costanti K di valore molto elevato.

Tabella III.-Esempi di estensimetri in materiale semiconduttore.

Ditta costruttrice	Tipo	Base mm	Resistenza Ω	Costante K	Coeff. di temper. $\Omega/\Omega^{\circ}C$	Variazione di K con temp. $\%/100^{\circ}C$
Budd(U.S.A.)	DB-102	6.4	120	+105	-	-21
	DB-106	6.4	5000	+115	-	-55
	DB-107	2.5	250	+140	-	-34
	DB-108	6.4	10000	+195	-	-41
	DB-111	6.4	60	+ 45	-	0
	DBN-102	6.4	120	-100	-	-60
	DBN-104	6.4	500	-130	-	-50
	DBN-105	6.4	1000	-140	-	-65
	MP-103-4	6.4	350	+230	-	-39
	MP-102-6	6.4	120	+220	-	-41
Kyowa (Giappone)	KS-1	7	120	-110	3.5	48
	KS-2	7	120	- 80	3.5	45
	KS-3	7	120	+130	2.0	33
	KS-6	3.5	120	-120	3.5	48
	KS-9	7	120	+200	0.2	40

Tali estensimetri sono costituiti da un filamento molto sottile, ottenuto tagliando un monocristallo di materiale semiconduttore: il diametro del filamento é dell'ordine di 0,02-0,1mm. Alle due estremitá sono saldati due fili di nichel che servono da terminali. L'insieme é incorporato in un sottile foglio di plastica che serve da supporto: l'incollaggio e i collegamenti elettrici sono effettuati come nel caso degli estensimetri a resistenza di conduttori metallici. Il maggiore valore del diametro e la maggiore rigidezza del materiale rendono tali estensimetri meno adatti al loro impiego su superfici a forte curvatura. La temperatura massima raggiungibile é dell'ordine di 100-170°C a seconda dei tipi. Nella Tabella III sono riportati alcuni esempi di tali estensimetri.

La costante dell'estensimetro é:

$$K_{semiconduttori} = \left[\left(1 + 2 \underbrace{\quad}_{\simeq \text{come nei metalli}} \right) + \frac{\Delta\rho/\rho}{\underbrace{e_L}_{\pm 100-200, +tipop, -tipon}} \right]$$

La $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ nei semiconduttori dipende dalla struttura a bande, legata a sua volta alle dimensioni del reticolo cristallino. Si modifica la mobilitá ed il numero di portatori, deformando il cristallo. Questi effetti vengono utilizzati su fili sottili lunghi, disposti a serpentina su un supporto legato ad un materiale campione sotto sforzo.

5.8.3 Altri tipi di estensimetri. *

Estensimetri ottici.

Gli estensimetri di questa categoria possono suddividersi in estensimetri basati sul principio della leva ottica, ed estensimetri a confronto indiretto per via ottica.

Estensimetri a leva ottica. In figura 5.35 é riportato lo schema dell'estensimetro tipo Martens; esso é costituito da uno specchietto A solidale col coltello mobile B, in modo che, ruotando quest'ultimo, ruota anche lo specchietto. Mediante il cannocchiale C si legge, con l'aiuto di un vetrino a reticolo, la scala D riflessa dallo specchietto. Il rapporto di amplificazione risulta eguale a $2\frac{b}{a}$: si hanno normalmente amplificazioni dell'ordine di 500. La lunghezza della base é variabile da pochi centimetri a qualche decina di cm. L'impiego di tale strumento risulta piuttosto delicato in quanto sono presenti varie cause possibili di errore.

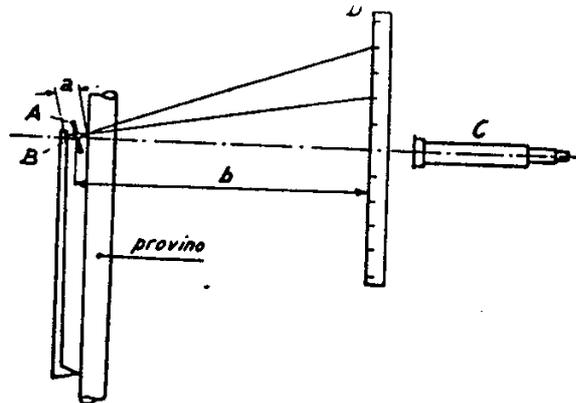


Figura 5.35:

Poiché l'estensimetro é fissato sul pezzo (ad esempio un provino posto sulla macchina a trazione) mentre la scala e il cannocchiale sono montati su un supporto separato, occorre che non si verifichino spostamenti relativi fra provino e gruppo scala-cannocchiale. Inoltre la scala deve essere messa in un piano parallelo a quello dello specchio, a provino scarico.

Estensimetri ottici a confronto diretto. Sono strumenti meccanici, in genere basati sul principio dell'amplificazione a leva, nei quali lo spostamento dell'estremo della leva viene letto per via ottica (ottenendo così un'ulteriore amplificazione). Altri sistemi misurano, con una cellula fotoelettrica, l'energia luminosa che passa in una fessura che si allarga all'aumentare dello spostamento del coltello mobile. Da ultimo ricordiamo anche gli estensimetri nei quali si misura l'inclinazione della leva con metodo interferometrico utilizzando un vetro ottico a facce piane posto sopra l'estremo della leva stessa e rilevando la distanza fra le frange di interferenza: l'inclinazione della leva vale, detta λ la lunghezza d'onda scelta e d la distanza misurata

$$i = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\lambda}{4d}$$

Estensimetri a variazione di induttanza.

Il piú semplice estensimetro di questo tipo é costituito da una bobina il cui nucleo magnetico (cilindrico o conico) puó muoversi lungo l'asse della bobina stessa: l'avvolgimento é solidale con un coltello, mentre il nucleo é solidale con l'altro (figura 5.36a). La presenza di una dilatazione provoca un moto relativo fra avvolgimento e nucleo, e conseguentemente quest'ultimo penetrerá piú o meno nella bobina, in modo da variarne l'induttanza. L'avvolgimento della bobina costituisce un lato di un circuito a ponte alimentato in corrente oscillante.

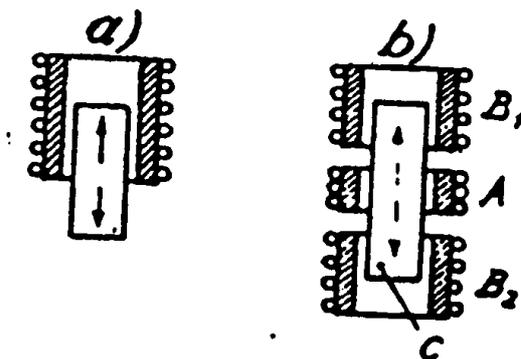


Figura 5.36:

Dispositivi piú complessi sono costituiti da avvolgimenti posti sullo stesso asse in modo che l'unico nucleo magnetico, uscendo da uno di essi ed entrando nell'altro, provochi una variazione eguale e di segno opposto nell'induttanza dei due avvolgimenti che costituiscono in tal caso due lati contigui del ponte. Infine da ricordare l'estensimetro di figura 5.36b.

Esso é costituito da un avvolgimento primario A alimentato a corrente oscillante ($4000 \div 10000\text{Hz}$), e da due avvolgimenti secondari B_1 , B_2 coassiali col primario, e ad esso accoppiati con un nucleo magnetico C costituito da un cilindretto di lunghezza opportuna e mobile lungo il proprio asse. Spostando il cilindretto variano le mutue induttanze fra il primario e i due secondari, nel senso che una aumenta mentre l'altra diminuisce. I due avvolgimenti secondari costituiscono i due lati contigui di un circuito a ponte, e sono collegati in modo che le f.e.m. in essi generate abbiano segno opposto; queste f.e.m., e quindi la tensione ai capi delle diagonali di misura, dipendono perció dalla posizione del nucleo magnetico. Il cilindretto che costituisce tale nucleo, é reso solidale con uno dei coltelli, mentre gli avvolgimenti sono solidali con l'altro coltello; in tal modo, una volta montato l'estensimetro sul pezzo, la posizione del nucleo dipenderá dall'allungamento del pezzo, e ai vertici di misura comparirá un segnale proporzionale alla dilatazione del pezzo stesso.

5.8.4 Taratura degli estensimetri.

Gli estensimetri meccanici, ottici, acustici, e a variazione di induttanza, vengono tarati misurando la lunghezza della base con uno strumento di misura di sensibilità appropriata a tale lunghezza (cioé tanto maggiore quanto minore é la base), e provocando una variazione nota di tale lunghezza, misurata con apparecchi micrometrici o a controllo ottico, che possono assicurare una precisione di misura di

$\pm 0.2\mu m$. Per gli estensimetri a variazione di resistenza elettrica la taratura consiste nel ricavare statisticamente la costante di una data serie o partita di estensimetri di resistenza nota: ciò avviene incollando uno o più estensimetri della serie su un provino e provocando su questo una dilatazione e_L nota. La dilatazione può essere data ad esempio mediante un dispositivo nel quale il provino è una barra a sezione rettangolare di acciaio appoggiata su due coltelli: alle estremità della barra, poste ad eguale distanza dai coltelli, vengono applicati due pesi eguali, in modo che nel campo fra i coltelli il momento flettente della barra sia costante. Uno dei coltelli è montato su un supporto incernierato per rendere isostatica la trave. Gli estensimetri vengono applicati dal lato teso della barra, in corrispondenza del quale può facilmente calcolarsi per via indiretta la dilatazione e_L .

5.8.5 Osservazioni.

Nei paragrafi precedenti sono stati descritti i principali tipi di estensimetri. È utile ricordare che esistono altri metodi per valutare le deformazioni e le sollecitazioni. Ad esempio può essere il metodo della *fotoelasticità*, mediante prove effettuate su modelli in resine sintetiche o mediante uno strato di resine di tale tipo che diventano birifrangenti quando vengono sollecitate, applicato direttamente alla superficie del pezzo: come pure osservazioni estensimetriche possono essere condotte anche mediante *reticoli* riportati sulla superficie del pezzo, osservandone la deformazione una volta applicato il carico, o mediante l'impiego di *vernici criccanti*. Per tutti questi metodi rimandiamo a testi specializzati.

5.9 Piezoelettricità

$e_L = (\text{coefficiente di allungamento}) \cdot (\text{sforzo}) = s \cdot z$. Polarizzazione elettrica :

$$P = \chi \varepsilon_0 E \quad (\chi \text{ suscettività dielettrica, } E \text{ campo elettrico})$$

Induzione elettrica :

$$D = \varepsilon_r \varepsilon_0 E \quad (\varepsilon_r \text{ costante dielettrica relativa})$$

$$D = P + \varepsilon_0 E$$

e_L = deformazione del reticolo cristallino.

P = polarizzazione delle cariche positive-negative nel reticolo cristallino.

Quando un corpo viene deformato si spostano gli atomi, quando viene polarizzato, le cariche. Sono vere le seguenti relazioni :

$$P = \chi \varepsilon_0 E + dz \quad \text{effetto piezoelettrico DIRETTO}$$

dz = eventuale contributo a P per deformazione del reticolo cristallino sotto l'azione dello sforzo z.

Se questo contributo è presente, il campo elettrico che sposta le cariche può corrispondentemente indurre uno spostamento.

$$e = sz + dE \quad \text{effetto piezoelettrico INVERSO}$$

de = eventuale contributo alla deformazione del reticolo cristallino per l'azione del campo E; d è lo stesso di prima : se c'è il contributo prima menzionato allora c'è anche questo e viceversa.

L'effetto piezoelettrico è presente soltanto nei materiali cristallini con basso grado di simmetria ; ovvero se il reticolo presenta una disposizione simmetrica delle cariche , la deformazione non induce alcun effetto :

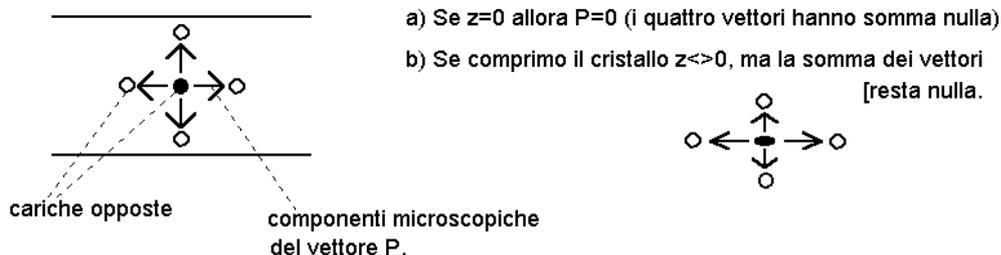


Figura 5.37:

Qualora la situazione non sia simmetrica (o sia a basso grado di simmetria), con caratteristiche di tipo ionico, la struttura deformata non è più bilanciata elettricamente.

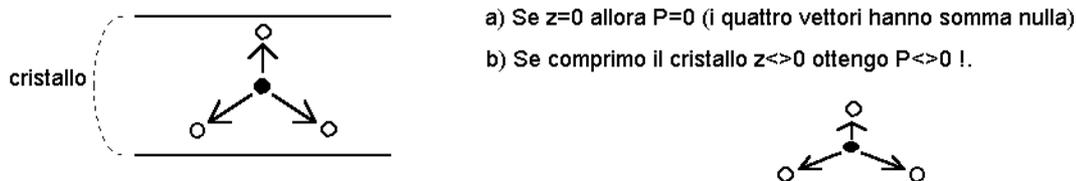


Figura 5.38:

Il silicio non è piezoelettrico, lo sono il quarzo, la tormalina, il sale di Rochelle,...

$$\begin{aligned}
 [Z] &= \frac{N}{m^2} \\
 [P] &= \frac{\text{Coulomb}}{m^2} \\
 [d] &= \frac{\text{Coulomb}}{\text{Newton}} = \frac{\text{Coulomb Volt}}{\text{Newton Volt}} = \frac{J}{N \cdot V} = \frac{m}{V} \\
 [e] &= \text{adimensionale} \\
 [E] &= \frac{V}{m} \\
 [d] &= \frac{m}{V}
 \end{aligned}$$

5.10 Dispositivi piezoelettrici

Ricaviamo il circuito equivalente di un dispositivo piezoelettrico.

La carica superficiale che si localizza sulla superficie del cristallo è di valore uguale alla componente

		d	ϵ_r	Modulo di Young
(naturali)	Quarzo	$2.3 \cdot 10^{-12}$	4.5	$80 \cdot 10^9$
	Tormalina	$1.9 \div 2.4^{(*)} \cdot 10^{-12}$	6.6	$160 \cdot 10^9$
(artificiali- ceramiche piezoelettriche)	Titanato di Pb	$265 \cdot 10^{-12}$	2500	$79 \cdot 10^9$
	Niobato di Pb	$80 \cdot 10^{-12}$	250	$47 \cdot 10^9$

(*) a seconda degli orientamenti del cristallo

Figura 5.39: Materiali piezoelettrici

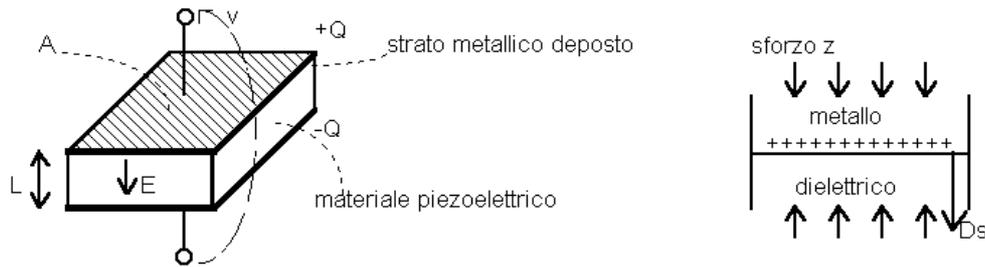


Figura 5.40: Dispositivo piezoelettrico

normale del vettore D . $D_s =$ densità di carica superficiale. Nel nostro caso $D_s = D$.

$$Q = (\text{densità di carica})(\text{area}) = D_s A = A(\epsilon_r \epsilon_0 R + dz) = \epsilon EA + dzA$$

Assumo che il campo elettrico sia uniforme :

$$Q = \epsilon El \frac{A}{l} + dzA = \epsilon \frac{A}{l} v + dzA$$

$\epsilon \frac{A}{l}$ è una capacità $\implies Q = CV + dzA$.

$zA =$ forza totale applicata al dispositivo = F .

$$Q = CV + dF$$

Questa relazione vale ancora se le grandezze sono variabili nel tempo.

$$Q(t) = Cv(t) + df(t)$$

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} + d \frac{df(t)}{dt}$$

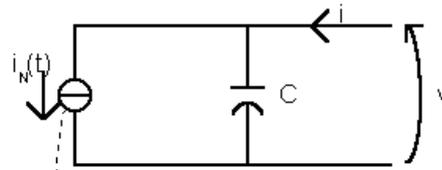
Interpretiamo circuitalmente questa relazione :

Se non è applicata forza $i_N(t) = 0$.

$$i_N(t) = d \frac{df(t)}{dt}$$

Aspetti dinamici dell'effetto piezoelettrico : l'effetto piezoelettrico è associato a moti del cristallo , a vibrazioni del reticolo cristallino , quindi abbiamo fenomeni di inerzia e di attrito viscoso.

$$F(\text{esterne, elastiche, attrito}) = ma$$



generatore indipendente di corrente, funzione delle variazioni temporali della forza applicata $f(t)$.

Figura 5.41: Schema elettrico

$$\underbrace{m \frac{d^2 x}{dt^2}}_{inerzia} + \underbrace{\lambda \frac{dx}{dt}}_{attrito viscoso} + \underbrace{kx}_{elastica} = F_{esterna}$$

(x è lo scostamento dalla posizione di equilibrio)

$$\underbrace{\frac{m}{k}}_{\frac{1}{\omega_n^2}} \frac{d^2 x}{dt^2} + \underbrace{\frac{\lambda}{k}}_{\frac{2\xi}{\omega_n}} \frac{dx}{dt} + x = \frac{F_{est}}{k}$$

ω_n = pulsazione caratteristica, ξ = coefficiente di smorzamento. Applicando la trasformata di Laplace :

$$x(s) = \frac{\frac{1}{k}}{1 + s \frac{2\xi}{\omega_n} + \frac{s^2}{\omega_n^2}} F_{est}(s) = G(s) \frac{1}{k} F_{est}(s)$$

La deformazione del cristallo segue dunque le leggi di oscillazione meccanica con smorzamento. Valori tipici del materiale piezoelettrico sono : $\omega_n = 2\pi f_n$, $f_n = 27kHz$, $\xi = 0.01$.

Questo porta ad avere una risposta oscillatoria stabilizzata :

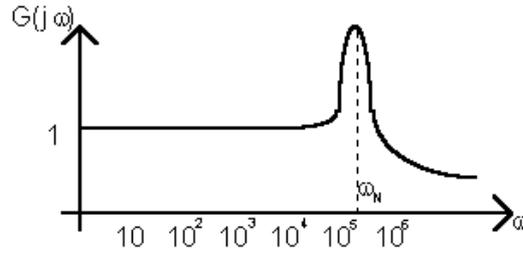


Figura 5.42: Risposta oscillatoria stabilizzata

Tenendo conto della presenza della capacità nel nostro circuito, determiniamo il valore di i e Q .

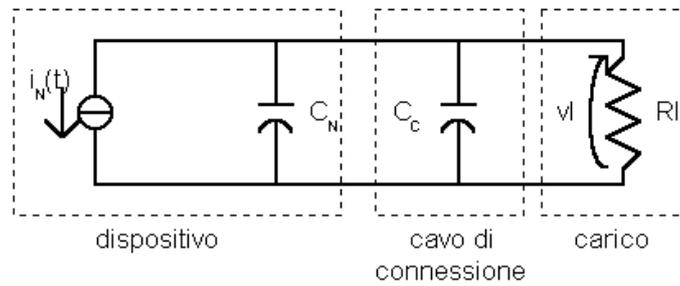


Figura 5.43:

Valori tipici : $C_N = 1600pF$, $C_c = 600pF$, $R_L = 1M\Omega$.

$$V_L(s) = -I_N(s) \frac{1}{\left[\frac{1}{R_L} + s(C_N + C_c)\right]} = -\frac{R_L}{1 + sR_L(C_N + C_c)} I_N(s)$$

Con i valori dati : $2\pi R_L(C_N + C_c) = (72Hz)^{-1} \implies$ abbiamo un limite in frequenza.

Relazione corrente-forza :

$$I_N(s) = \underbrace{K \left(-\frac{1}{k}\right)}_d sG(s)F(s) = dsG(s)F(s) \quad (I_N = K \frac{dx}{dt})$$

$$V_L(s) = d \frac{sR_L}{1 + sR_L(C_N + C_c)} G(s)F(s) \implies V_L(s) = \frac{d}{(C_N + C_c)} \frac{s\tau}{1 + s\tau} G(s)F(s)$$

Possiamo estendere il funzionamento alle basse frequenze con il seguente schema:

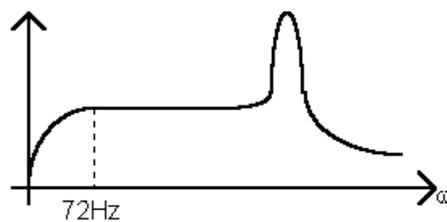


Figura 5.44:

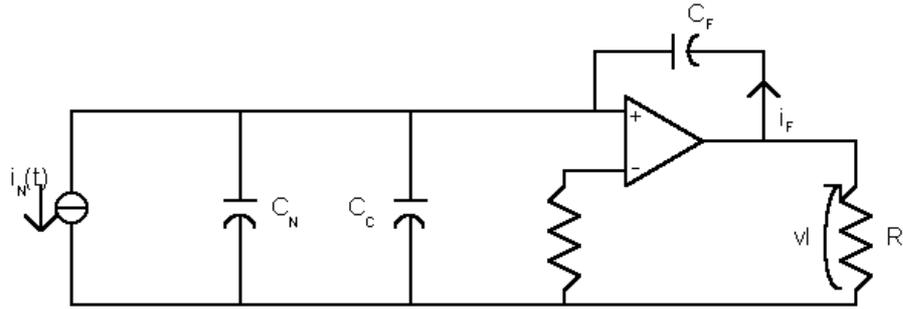


Figura 5.45:

$$V_L s C_F = i_F = i_N = dsF(s)$$

$$\Rightarrow V_L = \frac{d}{C_F} F(s) = sQ \text{ proporzionale alla forza, ovvero alla carica localizzata}$$

Se poniamo una resistenza in parallelo a C_f (es 100M) per avere un percorso verso massa, introduciamo una costante di tempo di qualche secondo estendiamo alle basse frequenze l'impiego del trasduttore. Complessivamente il trasduttore piezoelettrico correla la forza applicata F alla tensione V_L . Il campo di frequenze si estende da alcuni Hz ($\frac{1}{\tau f}$, $\tau f = R_f C_f$) ad alcuni kHz (ωn).

Fotocopia 13 : fig.8.12 a)..d) sistemi di misura di accelerazione lineare , pressione, accelerazione angolare, torsione, con le relative funzioni di trasferimento nel dominio di Laplace. fig.8.13 a)...d) Esempi di applicazione degli strain gauges per la misura di deformazione di una mensola (cantilever), la deformazione longitudinale e trasversale di un pilastro, per la misura di coppia e di accelerazione.

5.11 Accelerometri

Facciamo riferimento alla *fig.8.12 a)* ; osserviamo il moto relativo di una massa connessa elasticamente ad un contenitore: sono rappresentate simbolicamente le forze che si scambiano tra la massa m ed il contenitore stesso. Consideriamo il moto rispetto ad un osservatore inerziale esterno :

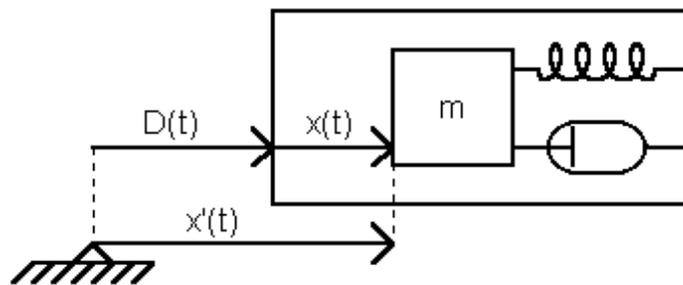


Figura 5.46:

$$Xx'(t) = x(t) + D(t)$$

$$\frac{d^2 x'(t)}{dt^2} = \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \underbrace{\frac{d^2 D(t)}{dt^2}}_{a(t)}$$

Equazione del moto della massa m nel riferimento inerziale :

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 x'(t)}{dt^2} &= F \\ m \frac{d^2 x'(t)}{dt^2} &= F - ma \\ m \frac{d^2 x'(t)}{dt^2} &= F + F_{pseudo} \quad (*) \end{aligned}$$

(*) equazione del moto nel sistema non inerziale dove compare la pseudo forza $F_{pseudo} = -ma$

Il moto della massa relativo al contenitore è descritto da :

$$\begin{aligned} F = \text{forza elastica} + \text{forza d'attrito} &= -kx - \lambda \frac{dx}{dt} \\ m \frac{d^2 x'(t)}{dt^2} + \lambda \frac{dx}{dt} + kx &= F_{pseudo} = -ma(t) \end{aligned}$$

Il moto relativo massa-contenitore è un moto inerziale smorzato elastico sotto una forza proporzionale all'accelerazione.

$$a(t) = 0 \implies x = \text{cost}$$

$$\frac{m}{k} = \frac{1}{\omega_n^2}, \quad \frac{\lambda}{k} = \frac{2\xi}{\omega_n} \implies \frac{x(s)}{a(s)} = \frac{-\frac{1}{\omega_n^2}}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n}s + \frac{1}{\omega_n^2}s^2}$$

Aumentando la massa aumenta la sensibilità ma diminuisce la frequenza di funzionamento. *fig.14 fig.3.17 Mensola utilizzabile all'interno di uno strumento di misura di deformazione o di un accelerometro; fig.3.25 Accelerometro di tipo integrato : la massa di silicio (grigia) si deflette e varia la propria resistività.*

5.12 Elementi capacitivi sensibili allo spostamento

(*fig.15 fig.8.5*)

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$

Possiamo agire su A, d, ε per variare la capacità, ottenendo :

- agendo su A

$$C = \varepsilon \frac{A - xw}{d} \quad (\text{x=spostamento, w=spessore})$$

- agendo su d

$$C = \varepsilon \frac{A}{d + x}$$

- agendo su ε

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_1 \frac{A_1}{d} wx + \varepsilon_0 \varepsilon_2 \frac{A_2}{d} w(l-x) = \frac{w}{d} \varepsilon_0 [\varepsilon_2 l - (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)x]$$

Uno schema interessante è quello relativo alla variazione di d (f.15 fig.8.5) :

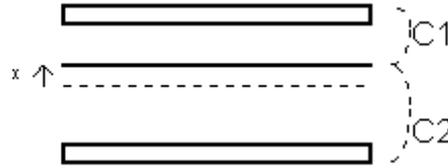


Figura 5.47: Schema relativo alla variazione di d

$$C_1 = \frac{\varepsilon A}{d-x}, \quad C_2 = \frac{\varepsilon A}{d+x}$$

Se la misura di capacità è effettuata impiegando un ponte di Wheatstone...

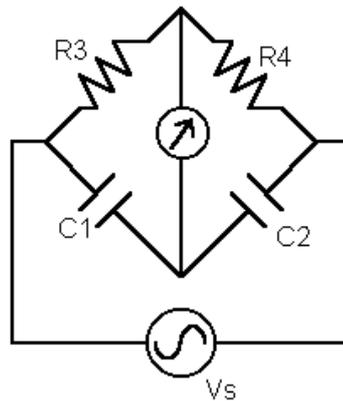


Figura 5.48: Misura della capacità usando un ponte di Wheatstone

... la tensione sullo strumento indicatore è

$$V_i = V_s \left[\frac{C_2}{C_1 + C_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right]$$

Se $R_1 = R_2$ e C_1, C_2 sono quelle date :

$$V_i = V_s \left[\frac{\frac{1}{d-x}}{\frac{1}{d+x} + \frac{1}{d-x}} - \frac{1}{2} \right] = V_s \frac{x}{2d} \implies \text{relazione lineare } \frac{V}{x}$$

Sensibilità :

$$\frac{\Delta V_i}{V_s} = \frac{\Delta x}{2d} \implies \Delta x = 2d \left(\frac{\Delta V_i}{V_s} \right)$$

Misurando direttamente la capacità, la sensibilità è

$$\Delta C = -\frac{\varepsilon A}{(d+x)^2} \Delta x = -\frac{\varepsilon A}{d} \frac{\Delta x}{d} \implies \Delta x = -d \frac{\Delta C}{C} \quad \left(\frac{\Delta C}{C} = -\frac{\Delta x}{d} \right)$$

f.15 fig.8.5(**) Strumento per la conversione : Pressione→Deformazione→Variazione di capacità
 fig.8.5(***) Misura del livello di liquido (non conduttore, con costante dielettrica ϵ):

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon h}{\ln\left(\frac{a}{b}\right)} + \frac{2\pi\epsilon_0(l-h)}{\ln\left(\frac{a}{b}\right)} + \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{a}{b}\right)}[l + (\epsilon - 1)h]$$

Si può usare uno schema a ponte per tramutare in tensione la misura di capacità:

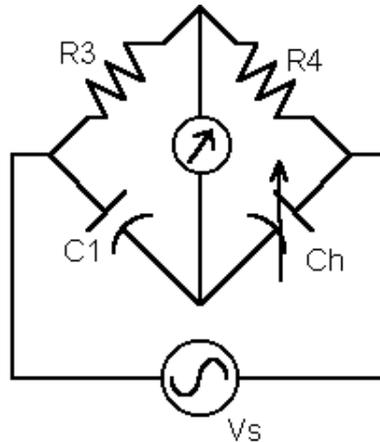


Figura 5.49: Schema a ponte per tramutare in tensione la misura di capacità

$$V_i = V_s \left[\frac{C_h}{C_1 + C_h} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right]$$

Si sceglie che nella condizione di livello minimo : $C_{h-min} \implies V_i = 0$ (ponte in equilibrio)
 $\implies C_1 R_3 = C_{h-min} R_4 \quad Z_1 R_4 = Z_h R_3$

$$\implies V_i = V_s \left[\frac{1}{1 + \frac{C_{min} R_4}{C_h R_3}} - \frac{1}{1 + \frac{R_4}{R_3}} \right]$$

Se inoltre poniamo $\frac{R_4}{R_3} \gg 1$ possiamo scrivere la relazione come :

$$V_i = V_s \frac{R_3}{R_4} \left[\frac{C_h}{C_{h-min}} - 1 \right]$$

Che dipende linearmente da h e da una relazione V_i -h lineare. Tutto ciò avviene a discapito della sensibilità poichè $\frac{R_3}{R_4} \ll 1$.

f.15 8.5(#)
 Condensatore per la misura di umidità.

5.13 Dispositivi di tipo induttivo per la misura dello spostamento

Facciamo riferimento al concetto di **circuito magnetico**. Pensiamo ad un anello di materiale magnetico, sul quale è avvolta una spira percorsa da corrente :

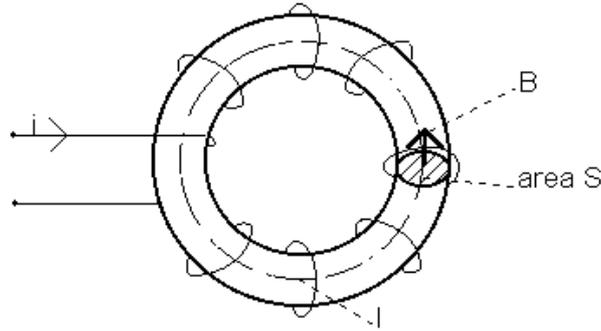


Figura 5.50: Anello di materiale magnetico avvolto da una spira percorsa da corrente

Se la permeabilità magnetica dell'anello è molto maggiore di quella dell'aria, il flusso disperso è circa nullo : le linee di flusso sono concentrate all'interno.

Flusso di induzione magnetica $\Phi = SB = (B \perp S) = S\mu H$ (μ =permeabilità magnetica).

Non abbiamo messo coordinate spaziali perchè il campo è uniforme lungo tutto l'anello. La circuitazione di H (prodotto H - spostamento) all'interno dell'anello è pari al numero di spire (n) concatenate per la corrente :

$$\oint \vec{H} d\vec{s} = ni \implies lH = ni \quad l = \text{lunghezza del percorso di integrazione}$$

$$\Phi = \frac{D\mu}{l} ni = \frac{1}{\frac{l}{S\mu}} ni$$

dove $R = \frac{l}{S\mu}$ = RILUTTANZA del circuito magnetico. ni = forza magneto motrice.

Circuito magnetico	Circuito elettrico
Φ	corrente
R	resistenza
ni	tensione

Dato un sistema magnetico - anche disomogeneo - individuato il flusso Φ si può scrivere una relazione nella forma :

$$\underbrace{\sum n \cdot i}_{\text{forze magneto motrici}} = \Phi(R_1 + R_2 + \dots)$$

Esempio (f.15 8-6 b)

Abbiamo tre regioni :

	nucleo (core)	traferro(air gap)	armatura (armature)
Permeabilità	μ_c	μ_o	μ_a
Riluttanza	R_c	R_o	R_a
Forza magneto-motrice	ni	0	0
Flusso	Φ	Φ	Φ
Lungh./Sez.	l_c, S_c	l_o, S_o	l_a, S_a

$$\oint \vec{H} d\vec{s} = ni \implies H_c l_c + H_0 l_0 + H_a l_a = ni$$

$$\left(H_c = \frac{B_c}{\mu_c} = \frac{\Phi}{\mu_c S_c} ; B_c = \frac{\Phi}{S_c} \right)$$

$$\implies \Phi \left(\frac{l_c}{\mu_c S_c} + \frac{l_0}{\mu_0 S_0} + \frac{l_a}{\mu_a S_a} \right) = ni \Leftrightarrow \Phi (R_c + R_o + R_a) = ni$$

Lo spostamento da misurare modifica $l_0 \implies$ modifica R_o .

$$L = \text{induttanza} = \frac{\text{Flusso concatenato}}{\text{Corrente}} = \frac{n\Phi}{i}$$

$$= \frac{n}{i} \left(\frac{ni}{R_c + R_o + R_a} \right) = \frac{n^2}{R_c + R_o + R_a} = \frac{n^2}{(R_c + R_a) + R_o(x)}$$

La variazione di x si riflette sull'induttanza ($x = \frac{l_0}{2} = d$ - nel disegno 8-6) R_o dipende linearmente dalla lunghezza.

Abbiamo ottenuto una relazione tra la grandezza da misurare (spostamento) ed una grandezza elettrica misurabile (induttanza).

$$R_{totale} = R_c + R_o + R_a = (R_c + R_a) + \left(\frac{2}{\mu_t S_t} \right) x$$

(ricordiamo la relazione analitica $R = \frac{1}{\mu S}$, approssimata se il tubo di flusso non è a sezione uniforme S.)

$$\implies L = \frac{n^2}{(R_c + R_a) + \left(\frac{2}{\mu_t S_t} \right) x}$$

Con riferimento alla figura, diamo alcuni indici di grandezza :

- $n=500$ spire
- $R=2$ cm
- $r=0.5$ cm
- $t=0.5$ cm
- $\mu_c=100$

$$\implies (R_c + R_a) = 1.3 \cdot 10^7 \left[\frac{1}{H} \right], \quad \frac{2}{\mu_0 S_t} = 2 \cdot 10^{10} \left[\frac{1}{Hm} \right]$$

f.16 fig.8.8 Misuratore di velocità angolare. La variazione del flusso concatenato con la bobina avvolta sul magnete è dovuta alla variazione di posizione della ruota dentata; quando la bobina è vicino al

dente la riluttanza è elevata, viceversa è bassa. Il flusso varia in senso contrario alla riluttanza; la variazione di flusso genera una forza elettromotrice:

$$\begin{aligned} V &= -\frac{d\Phi_{concat.}}{dt} \\ \Phi_{concat.} &= a + b \cos n\theta \quad (a \text{ costante, } n=\# \text{ denti della ruota}) \\ V &= -bn \sin n\theta \frac{d\theta}{dt} \end{aligned}$$

Se $\theta = \omega t \implies V = -bn\omega \sin n\omega t$.

Sia l'ampiezza che la frequenza della forza elettromotrice variano con ω . Si può dunque risalire alla misura di ω misurando l'ampiezza o la frequenza (quest'ultima è meno affetta da errori e disturbi).

5.14 Trasformatore differenziale per la misura di spostamenti lineari (LVDT)

(f.16 fig.8.7, f.14 fig.10.22)

Si fa riferimento alla posizione di un elemento magnetico che influenza l'accoppiamento primario-secondario del trasformatore; nella posizione centrale i due avvolgimenti (opposti fra loro) danno la stessa risposta. L'accoppiamento sarà migliore con V_1 (V_2) spostando l'elemento verso V_1 (V_2). La dipendenza dell'accoppiamento sullo spostamento è non lineare per grossi spostamenti. Si misurano così spostamenti da 0.25mm a 10cm con una relazione di linearità valida a meno di qualche punto percentuale.

5.15 Sonde di corrente ad effetto Hall

Si sfrutta l'influenza del campo magnetico sul moto delle particelle mobili dei conduttori-portatori di carica (es. elettroni-lacune).

Legge di Ohm microscopica :

$$\vec{E} = \rho \vec{J}$$

(rispettivamente campo elettrico = resistività · densità di corrente). In presenza di campo magnetico ρ viene a dipendere da \vec{B} (vettore induzione magnetica).

Si può dimostrare che la dipendenza da ρ da \vec{B} presenta due componenti :

- una simmetrica $\rho_{sim} = \rho_0 + \beta_1 B^2 + \dots$ (potenze pari di B)
- una antisimmetrica $\rho_{antisimm} = R_H \vec{B} \wedge + \beta_2 B^2 \vec{B} + \dots$ (potenze dispari di B)

(R_H è il coefficiente di Hall e \wedge è il simbolo di prodotto vettore)

Di entrambe le componenti consideriamo solo il primo termine, trascurando i rimanenti:

$$\vec{E} = \rho_0 \vec{J} + R_H \vec{B} \wedge \vec{J}$$

(relazione valida in presenza di un piccolo campo B; il coefficiente di Hall è circa $\frac{\Omega m}{T}$ nei semiconduttori)

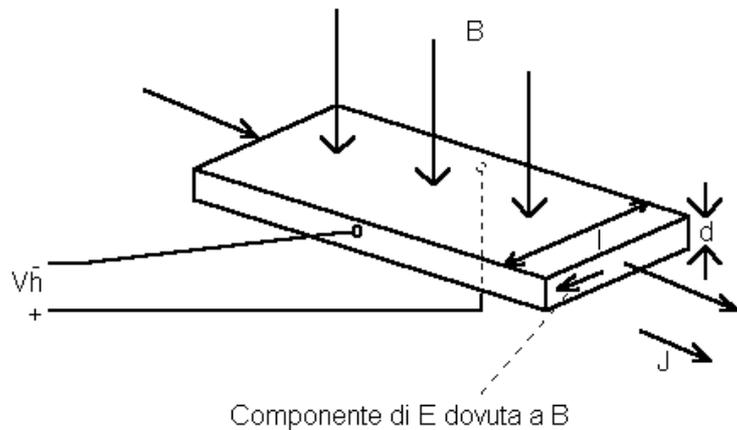


Figura 5.51: Lamina percorsa dalla corrente misurata nella sonda (diversa dalla corrente che voglio conoscere)

Misuriamo la componente aggiuntiva di campo elettrico come differenza di potenziale.

$$E_H = R_H B J$$

$$V_H = E_H l = \left(R_H B \frac{I}{d} \right) l$$

La sonda fornisce una tensione che dipende dal campo magnetico B e dalla corrente di eccitazione della sonda stessa (I). Questa è quindi una sonda di campo che risponde al prodotto B*I.

5.16 Sensori di umidità **

Sono basati sull'influenza dell'assorbimento -adsorbimento (*) - di vapore acqueo, sulle caratteristiche dielettriche o resistive del materiale impiegato; nel primo caso -il più comune - si studia una variazione di capacità, nel secondo una variazione di resistenza.

(*) Si parla di adsorbimento con riferimento al fenomeno di legame delle particelle di gas o vapore al materiale, mediante forze fisiche e non chimiche, cioè senza reazione chimica.

E' possibile integrare un sensore di umidità capacitivo realizzando un condensatore con dielettrico a resina porosa in un circuito integrato (f.15,fig.8.5).

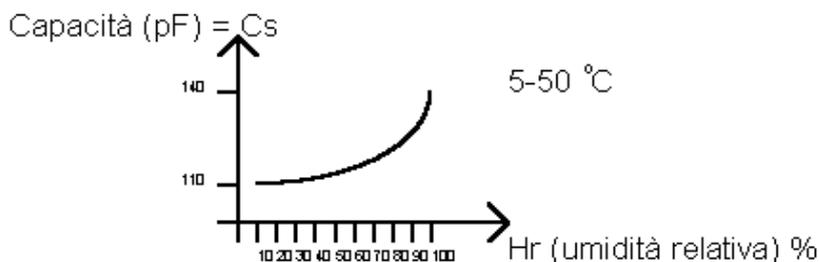


Figura 5.52: Grafico

$$C_s = C_0 \left[1 + 0.4 \left(\frac{H_r \%}{100} \right)^{1.4} \right] \quad \text{hbox(relazione empirica)}$$

H_{ass} = umidità assoluta = densità di vapore acqueo = $\frac{\text{quantità di vapore}}{\text{volume}}$.

H_r = umidità relativa = $\frac{H_{ass}}{H_{ass-max}} \% = \frac{\text{quantità presente}}{\text{quantità massima che può essere presente}} \%.$

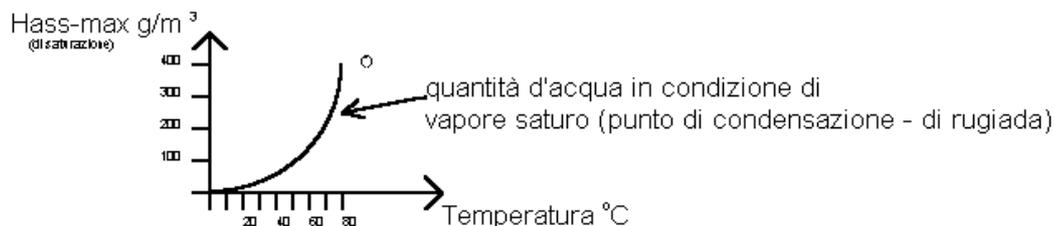


Figura 5.53:

L'umidità relativa è una frazione percentuale della massima quantità di vapore alla temperatura di lavoro.

Determinazione di H_r % :

1. occorre conoscere la temperatura di lavoro.
2. dalle tabelle (curva (*)) si determina Hass-max alla temperatura di lavoro.
3. si determina Hass : si raffredda l'aria nel suo contenitore finchè non si osserva l'inizio della condensazione, e si rileva la temperatura corrispondente a tale evento. Ancora dalle curve di saturazione si determina Hass.

Il rapporto tra le due quantità trovate fornisce H_r .

Esempio

Lavoriamo a $50^\circ \implies H_{sat(50)} = A.$

Raffreddando il campione ho condensazione a $30^\circ \implies H_{sat(30)} = B.$

$$H_r = \frac{A}{B} \%$$

(Esistono dispositivi integrati che effettuano queste operazioni, raffreddando mediante effetto Peltier, ed individuando la condensazione grazie a misurazioni acustiche).

