Trasduttori di temperatura
la maggior parte dei trasduttori di temperatura sono basati sul fatto che la conduttività di un materiale (conduttore o semiconduttore) dipende più o meno fortemente dalla temperatura.

Termoresistenze o RTD (Resistance Temperature Detector)
Nel conduttori metallici la conduttività decresce all'aumentare della temperatura (cioè la loro resistenza aumenta). Una termoresistenza è semplicemente un conduttore metallico, in cui la dipendenza della resistenza dalla temperatura è del tipo (approssimato):

$$R(T) = R(To) [1 + \alpha (T - To)] = Ro (1 + \alpha \Delta T)$$

dove R (To) = Ro è la resistenza alla temperatura di riferimento (es. 0 °C), R (T) è la resistenza alla temperatura T in °C, α è il coefficiente di temperatura, misurato in $°C^{-1}$. E', come evidente, una relazione lineare; la pendenza della retta definisce la sensibilità della termoresistenza, che risulta:

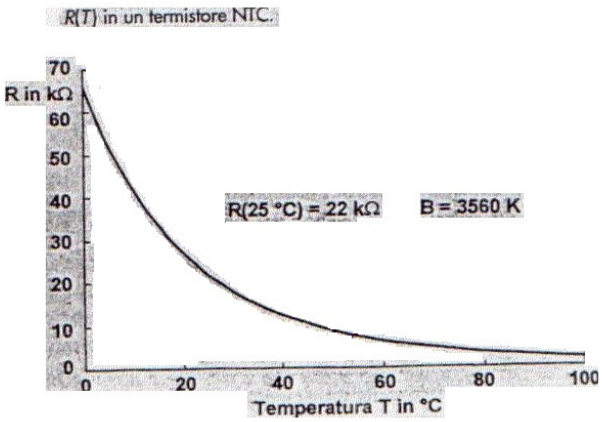
$$S = dR(T) / dT = \alpha R(To) \quad [\Omega / °C]$$

In realtà, come si è anticipato, la dipendenza è solo approssimata: R dipende anche da potenze di T di ordine superiore al primo.
Nel platino α è dell'ordine di $3.85\ 10^{-1}\ °C^{-1}$, per tale materiale lo scostamento dalla linearità è piccolo, almeno per temperature non troppo lontane da 0 °C.
Prestazioni: le termoresistenze sono, in generale, utilizzabili su range di temperatura piuttosto vasti e hanno buone caratteristiche di precisione e di stabilità a lungo termine; i materiali usati sono il rame, il nickel e soprattutto il platino, che permette campi di misura da circa -300 a +1500 °C e che ha ottime caratteristiche di linearità, inoltre non corrode, presenta però un alto tempo di risposta, è sensibile alle sollecitazioni meccaniche e alle vibrazioni, ha bassa sensibilità, per cui sono necessarie forti amplificazioni; inoltre per misurare una resistenza è necessario farvi scorrere corrente, il che comporta problemi di autoriscaldamento per effetto Joule, con conseguente scadimento della precisione.

Termistori NTC e PTC
Resistori sensibili alla temperatura, si realizzano con miscele sinterizzate di ossidi che opportunamente drogati acquistano proprietà semiconduttrici; utilizzando ossidi di cromo o manganese la resistività presenta un **coefficiente di temperatura negativo** (NTC), di modo che, a differenza di un metallo, la sua resistenza diminuisce al crescere della temperatura; la variazione è peraltro notevole (dell'ordine dell'8%), quindi la sensibilità è elevata. Se si usano ossidi di titanio o di bario ($BaTiO_3$) la resistività presenta un **coefficiente di temperatura positivo (PTC);** anche i materiali semiconduttori fortemente drogati possono presentare un coefficiente di temperatura positivo, a causa della riduzione della mobilità dei portatori al crescere della temperatura stessa. La caratteristica resistenza - temperatura di un termistore è di tipo esponenziale

$$R(T) = R(To) \exp [b (1/T - 1/To)]$$

dove T è la temperatura assoluta in K, To una temperatura assoluta di riferimento (usualmente 298K=25 °C) e b una costante (misurata in K). Il coefficiente di temperatura è $\alpha = +- R b / Ro To$
Relazione tra gradi centigradi e Kelvin: K = 273 + °C; zero assoluto: -273 °C = 0 K
Prestazioni - I termistori sono molto sensibili (presentano in genere un'alta variazione di resistenza per unità di temperatura), ma la loro caratteristica è pesantemente non lineare, se non su intervalli piuttosto piccoli di temperatura; per ridurre tale difetto si deve prevedere qualche metodo di linearizzazione; inoltre sono poco costosi e presentano un basso tempo di risposta (usato in campo automobilistico).
Gli NTC si prestano bene per applicazioni dove la linearità non è molto importante, come in controlli di temperatura o per misure su range ristretti (tipicamente in termometria clinica, dove il campo utile è dell'ordine della decina di °C), un esempio di sonda NTC adatta per uso medico è della Philips, montata in vetro che presenta le seguenti caratteristiche (fig.5): R(25 °C) = 22 KΩ b = 3560 K
I PTC si usano nei circuiti di protezione, stabilizzatori e limitatori.



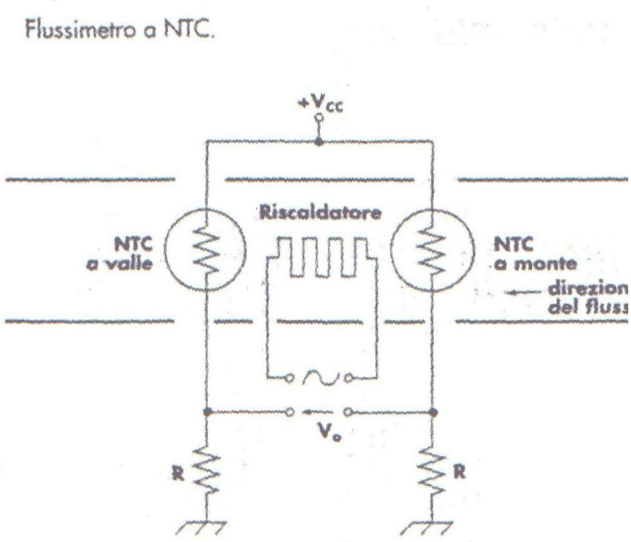


Fig. 5 fig. 6

Flussimetro a NTC

Gli NTC sono estesamente usati anche per stabilizzare in temperatura il punto di lavoro dei transistor a giunzione. specie negli amplificatori di potenza.

Trovano inoltre applicazione in alcuni trasduttori secondari. Ad esempio nei misuratori di flusso per fluidi.

Una resistenza percorsa da corrente riscalda debolmente un fluido in cui sono immersi due termistori distanziati tra loro: a fluido fermo, entrambi gli NTC sentono la stessa temperatura e il ponte costituito dai due NTC è bilanciato; quando il fluido è in movimento il trasporto di energia termica è maggiore nella direzione del moto, il resistore NTC a valle si scalda maggiormente di quello a monte e il ponte si sbilancia. La tensione di uscita è, entro certi limiti, proporzionale al flusso (fig.6).

Sensori di temperatura a giunzione semiconduttrice

Quando la creazione di coppie buche-elettroni per effetto termico avviene nella zona di svuotamento di una giunzione PN polarizzata direttamente, l'effetto risultante è una diminuzione della tensione diretta Vd ai capi della giunzione. Se la corrente nella giunzione viene mantenuta costante, è possibile dimostrare che la diminuzione della tensione è lineare su un range molto ampio di temperatura. Per il silicio si ha: $dV / dT = -2.5$ mV/°C

abbastanza indipendentemente dal valore della corrente, purché costante.

Un diodo a giunzione al Si per piccoli segnali, tipo 1N914 o 1N4148, è un ottimo sensore di temperatura, anche perché la sua piccola massa gli conferisce una capacità termica ridotta, con conseguente alta velocità di risposta e piccolo carico termico per l'ambiente sotto misura. Il difetto principale sta nella scarsa riproducibilità: non essendo specificatamente progettato come trasduttore, le sue caratteristiche di temperatura variano, sia pur di poco, da esemplare a esemplare e ciascuno richiede pertanto una taratura specifica.

Sensori di temperatura integrati

La moderna tecnologia dei circuiti integrati ha determinato già da qualche anno l'immissione sul mercato di trasduttori. finalizzati alla misura delle più diverse grandezze fisiche che incorporano, oltre il sensore vero e proprio, circuiterie più o meno consistenti per l'amplificazione del segnale del sensore, la sua normalizzazione e la sua linearizzazione. I sensori integrati di temperatura sono tra i più diffusi. Il tipo AD590, fornendo in uscita una corrente, presenta il vantaggio di rendere il sistema di misura insensibile a cadute di tensione e quindi ai disturbi indotti; permette pertanto di porre il sensore molto lontano dall'apparato di misura.

Bimetalli
Sono in genere costituiti da due lamine di materiali aventi diverso coefficiente di dilatazione termica, saldati tra loro; sotto l'azione della temperatura la lamina si inflette dalla parte del metallo avente minore coefficiente di dilatazione, provocando uno spostamento all'estremità, che può comandare la chiusura o l'apertura di un microinterruttore. Sono trasduttori robusti, costanti nel tempo, con uscita di tipo digitale; il campo di temperature va da –100 °C a 500 °C.

Termocoppie
Quando due metalli diversi vengono messi a contatto ad una estremità, tra di essi (ai capi dell'altra estremità) si localizza una differenza di potenziale causata dal diverso valore dei potenziali elettrochimici dei due materiali (effetto termoelettrico o Seebeek). La scelta della coppia di materiali è fatta anche in funzione del campo di temperature da misurare. Detti Tc la temperatura dei giunto caldo e Tf quella del giunto freddo, la tensione generata vale: V = k (Tc - Tf)
con k = costante termoelettrica.

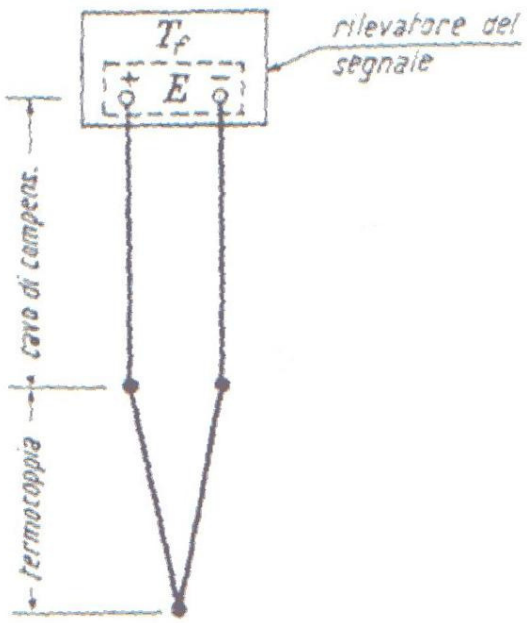


Fig. 7 – Introduzione dei fili di compensazione tra termocoppia e rilevatore di segnale.

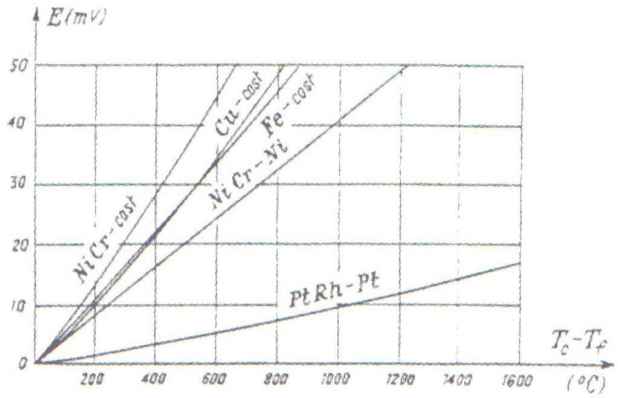


Fig. 8 – Caratteristiche termoelettriche di diversi tipi di termocoppia.

Una termocoppia molto usata perché economica è costituita da ferro - costantana (Cu - Ni): sensibilità 50 µV / °C, incertezza 1% e portata 0 - 750 °C. Per una corretta misura di Tc è importante che Tf rimanga costante (fig.7-8-9). Per avere basso tempo di risposta il diametro del giunto deve essere piccolo.
Prestazioni: ampio campo di temperature (con platino si arriva fino a 1600 °C), bassa sensibilità, problemi di compensazione; usati in termometri digitali ed acquisizione dati.

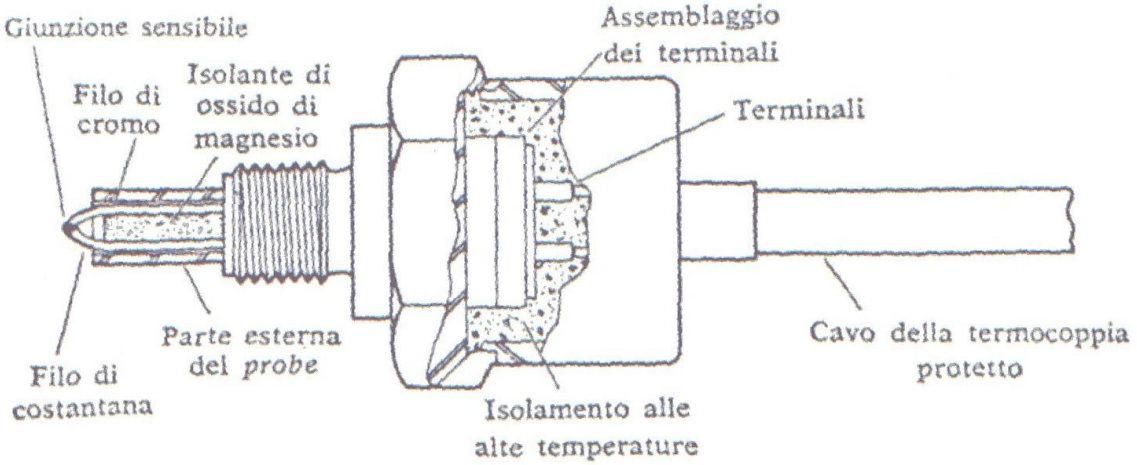


FIG. 9. - Trasduttore a termocoppia a stelo con elemento sonda esposto, e alta pressione interna.

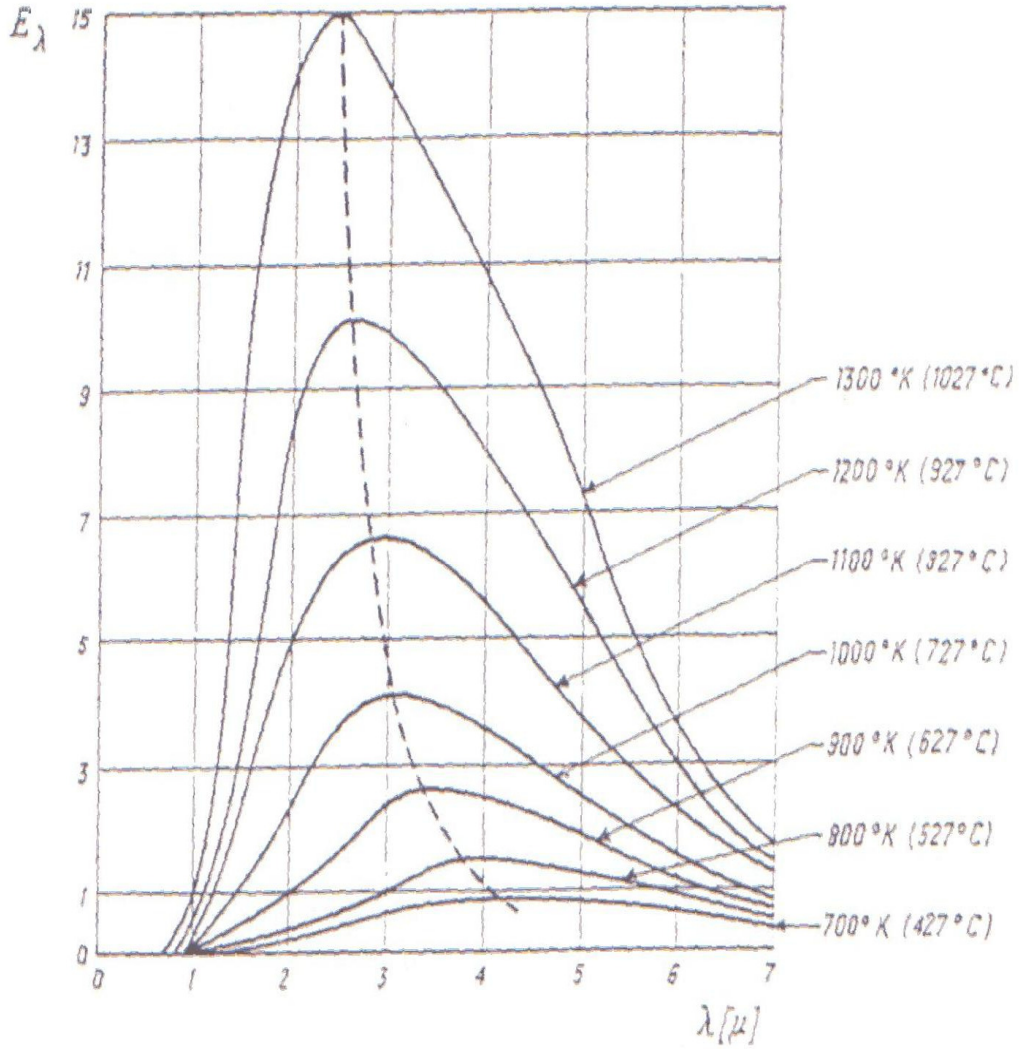


Fig. 10 - Diagramma di emissione di un corpo nero a diverse temperature.

Pirometri

Qualsiasi corpo che si trova ad una temperatura superiore allo zero assoluto (-273 °C = 0 K) emette radiazioni energetiche (fig. 10) che, all'aumentare della temperatura, passano dall'infrarosso al visibile (es. il filamento di una lampada ad incandescenza). Esse sono regolate dalla legge di Stefan - Boltzmann: energia emessa nell'unità di tempo dall'unità di superficie di un corpo dotato di temperatura T vale $E = \sigma T^{-1}$ (σ=5.7 10^{-8} J/m^2 s K^{-4}) e dalla legge di Wien: λ (Emax) T = b = 2,9 mm K: dalla misura dell'energia irradiata da tale corpo si può risalire alla sua temperatura (pirometri all'infrarosso).

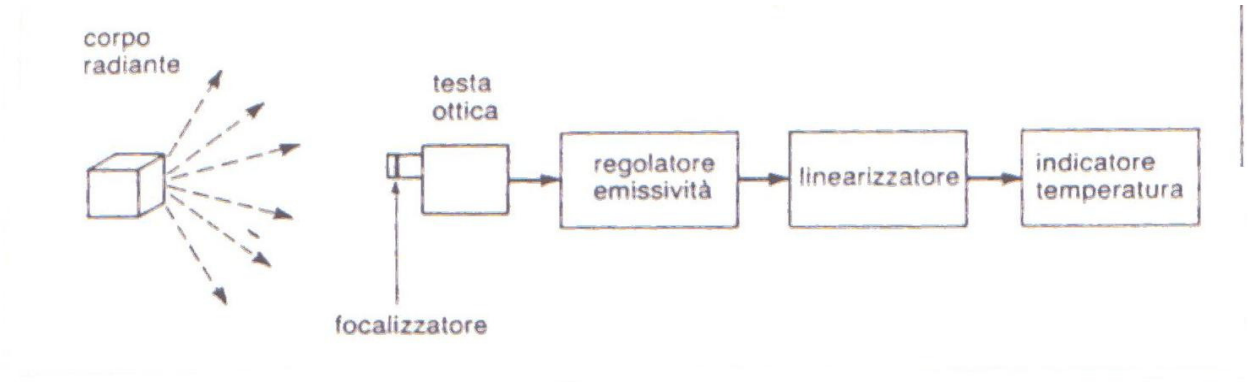


Fig. 11 - Schema a blocchi di un termometro a radiazione (pirometro ottico). L'elettronica dello strumento fornisce un segnale in tensione, che viene tradotto in un'indicazione di temperatura, la quale è a sua volta proporzionale alla radianza dell'oggetto inquadrato dalla testa ottica.

Lo strumento convoglia, mediante una lente, le radiazioni, proporzionali alla temperatura del corpo in esame, sul sensore il cui segnale di uscita, opportunamente elaborato, si presenta come una tensione proporzionale alla temperatura del corpo.
I pirometri hanno il vantaggio dell'assenza di contatto con l'oggetto sotto misura, che può essere anche di natura delicata, in moto e a grande distanza (uso di fibre ottiche per il trasporto), misurano distribuzioni di temperatura su superfici, si possono misurare temperature fino a 6000 °C (fig. 11).
Esistono due tipologie di sensori comunemente utilizzati: termocoppie, termoresistori, termistori e materiali ceramici piroelettrici, in cui si rileva la temperatura prodotta dall'energia irradiata, e fotodiodi, sensibili al flusso totale di fotoni prodotto dall'energia irradiata (alta sensibilità, migliore risposta dinamica ma sensibili ad una stretta banda di frequenza).
I **sensori piroelettrici** presentano una polarizzazione spontanea (momento di dipolo elettrico) decrescente con la temperatura fino ad annullarsi in corrispondenza della temperatura di Curie che rappresenta il limite estremo di utilizzazione di questo materiale; al crescere della temperatura del materiale ceramico le cariche elettriche legate alla struttura reticolare cristallina tendono a diminuire di numero per accrescere il numero delle cariche indotte sulla superficie S degli elettrodi, sottoposti ad una certa differenza di potenziale; si ha: $\Delta Q = Kp\ S\ \Delta T$.
Nei rivelatori di radiazioni infrarosse per aumentare l'effetto piroelettrico deve diminuire lo spessore della ceramica, che è collocata in un contenitore (con finestra per ricevere la radiazione) e collegata ad un amplificatore a basso rumore ed alta impedenza. E' molto usato nei sistemi antifurto.
Il **rivelatore ad infrarossi** passivo controlla, attraverso un sistema ottico (lenti di Fresnel) una zona volumetrica protetta: il passaggio attraverso tale zona di un corpo con spettro di emissione diverso da quello ambientale genera l'allarme. Il rivelatore piroelettrico fornisce un segnale in uscita solo se la radiazione infrarossa che lo investe subisce una variazione. Tali sensori presentano un tempo di risposta basso e riescono a rilevare variazioni di temperatura dell'ordine di 10^{-6} °C; per queste caratteristiche vengono utilizzati nel campo chimico, es. nei processi di adsorbimento e desorbimento, di atomi o molecole, con sviluppo di calore.