

Sensori di Temperatura

Indice

- ◆ Introduzione
- ◆ Temperatura termodinamica e scale di temperatura
- ◆ Conduzione del calore
- ◆ Capacità termica e indeterminazioni nella misura
- ◆ Misure di temperatura
 - Analisi del segnale di misura (in equilibrio / predittiva)
 - Metodi di misura (per contatto / senza contatto)
- ◆ Sensori resistivi
 - termoresistenze (RTD)
 - termistori (NTC e PTC)
- ◆ Sensori termoelettrici (termocoppie)
- ◆ Sensori semiconduttivi (a semiconduttore o IC)
- ◆ Sensori ottici
- ◆ Sensori piezoelettrici
- ◆ Conclusioni e applicazioni

Introduzione (1/2)

- ◆ La **temperatura termodinamica** (assoluta) è un indicatore del grado di energia termica contenuta in un corpo.
[E' una grandezza fisica intensiva (non additiva)]
- ◆ Per misurare la temperatura termodinamica si usa la **scala di temperatura assoluta** (Kelvin), che è comunque posta in relazione con altre scale di uso pratico/comune.
- ◆ La **misura di una temperatura** comporta sempre un trasferimento di calore (energia termica in transito) dal misurando/processo al sensore. In generale l'inserzione del sensore di temperatura nel processo da controllare **modifica le condizioni di misura iniziali**; questo "effetto di carico" è conseguenza dell'estrazione di una certa quantità di calore dal processo stesso.
[E' chiaro, quindi, che il sensore deve essere scelto in modo appropriato, per "non caricare il sistema" e rispondente alle specifiche di misura]

Introduzione (2/2)

- ◆ La **propagazione del calore** avviene in tre modi differenti e combinati (conduzione, convezione, e irraggiamento): nella pratica, qualsiasi descrizione matematica dei vari fenomeni di trasporto del calore è sempre un'approssimazione del caso reale.
Pertanto, il sensore migliore (il metodo di misura) e le sue modalità di installazione devono essere scelti con molta attenzione e richiedono una conoscenza approfondita degli effetti fisici da utilizzare.

- ◆ La **scelta del sensore** (e del metodo di misura) richiede di conoscere:
 - specifiche della misura
 - tempi di risposta
 - capacità termica, dimensioni, e geometria del sistema e del sensore
 - errori di approssimazione commessi dal sensore nel rilevare/trascurare effetti di conduzione, convezione, e irraggiamento
 - interazioni del dispositivo con l'ambiente di misura
 - possibilità di usare la sua uscita per il controllo, la regolazione, e eventuali altre funzioni richieste
 - costo, reperibilità e integrabilità del sensore

Che cos'è la temperatura?

Da un punto di vista qualitativo, si può dire che la **temperatura di un oggetto** è ciò che determina la **sensazione di caldo o freddo** quando entriamo in contatto con esso

Quando due oggetti sono posti in contatto termico (non necessariamente in contatto fisico) l'oggetto con temperatura più elevata si raffredda, e quello a temperatura più bassa si riscalda sino a quando i due corpi raggiungono l'**equilibrio termico** (assenza di scambi termici netti). La temperatura è quella proprietà che ha lo stesso valore per tutti i sistemi all'equilibrio termico

La temperatura termodinamica indica il grado di agitazione termica (energia termica) di un corpo

Se uno strumento (**termometro**), tarato per misurare la temperatura, viene posto in **contatto termico con un oggetto e raggiunge l'equilibrio termico**, allora la **temperatura letta dallo strumento è la temperatura dell'oggetto**

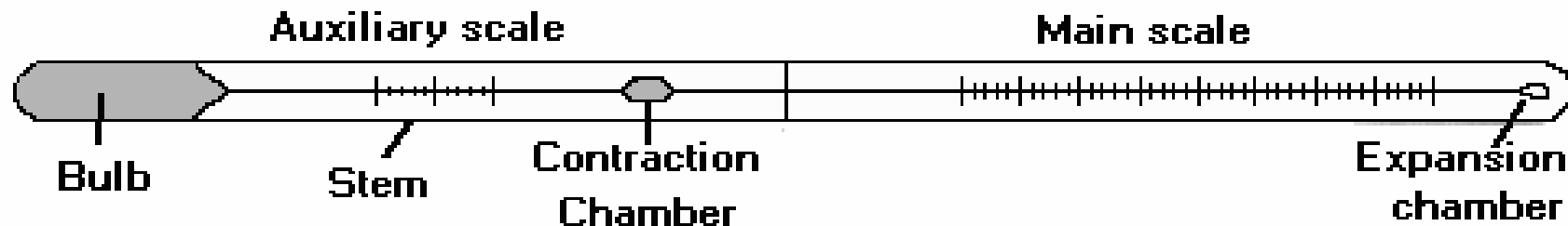
Che cos'è un termometro?

Un termometro è uno strumento che misura la temperatura in maniera quantitativa. Il modo più semplice per ottenere ciò è di avere una **grandezza G che varia linearmente con la temperatura t** e conoscere i coefficienti della relazione lineare:

$$G = f(t) = at + b$$

Naturalmente il termine a (coefficiente angolare della retta) è il coefficiente di sensibilità della grandezza G rispetto alla temperatura t mentre il termine noto b individua lo zero della scala.

Le costanti a e b dipendono dalla grandezza G (o dalla sostanza termometrica impiegata) e sono determinate una volta fissati 2 punti sulla scala di temperatura

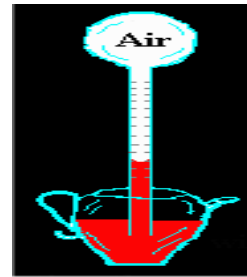


Per esempio il **mercurio (Hg)** è allo stato liquido nell'intervallo di temperature tra $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+356\text{ }^{\circ}\text{C}$ e la sua **dilatazione (lineare con la temperatura)** può essere impiegata per realizzare un termometro a mercurio.

Sviluppo dei Termometri e delle Scale di Temperatura

Uno dei primi tentativi di realizzare una scala di temperatura è datato **170 DC** quando il medico **Galeno** propose uno **standard di temperatura** "neutra" fatta di parti uguali di acqua bollente e ghiaccio e prevedendo **quattro gradi di temperatura** sia al di sopra che al di sotto di questa temperatura neutra (di fatto lo zero della scala)

Nel **1606 Galileo Galilei** inventa il **termoscopio**.
Un'ampolla di vetro contenente aria (in depressione) che attraverso un capillare graduato era inserita in una brocca contenente vino rosso



Il livello del liquido nel capillare indica la temperatura dell'aria.

Nel **1724 Fahrenheit** usò il **mercurio** come fluido termometrico e definì la sua **scala**:
"placing the thermometer in a mixture of sal ammoniac or sea salt, ice, and water a point on the scale will be found which is denoted as **zero**. A second point is obtained if the same mixture is used without salt. Denote this position as **30**. A third point, designated as **96**, is obtained if the thermometer is placed in the mouth so as to acquire the heat of a healthy man." (D. G. Fahrenheit, Phil. Trans. (London) 33, 78, 1724) [96=1/12×1/8]

Il processo di **standardizzazione delle scale di temperature** è stato lungo e laborioso (1700-1900). Esso ha riguardato la scelta dei **punti di calibrazione** e la suddivisione delle scale. Oggi le scale più comuni sono quelle *Celsius*, *Kelvin*, *Fahrenheit* e *Rankine* anche se le più utilizzate, in campo scientifico e tecnico, sono certamente le prime due.

Scale di Temperatura

Le diverse scale di temperatura prendono solitamente il nome dallo scienziato che le ha originariamente proposte e definite (è importante conoscere i due punti di riferimento della scala e l'estensione dell'intervallo elementare di temperatura - **grado di temperatura** -)

Temperature Scale Ranges

°C: degree Celsius (centigrade), °Re: Réaumur, °F: degree Fahrenheit, K: Kelvin, °Ra: Rankine

Scale Factor	°C	°Réaumur	°F	K	°Rankine
Boiling point of water at 1 atmosphere	100	80	212	373.15	671.67
Freezing point of water at 1 atmosphere	0	0	32	273.15	491.67
Absolute zero	-273.15	-218.52	-459.67	0	0

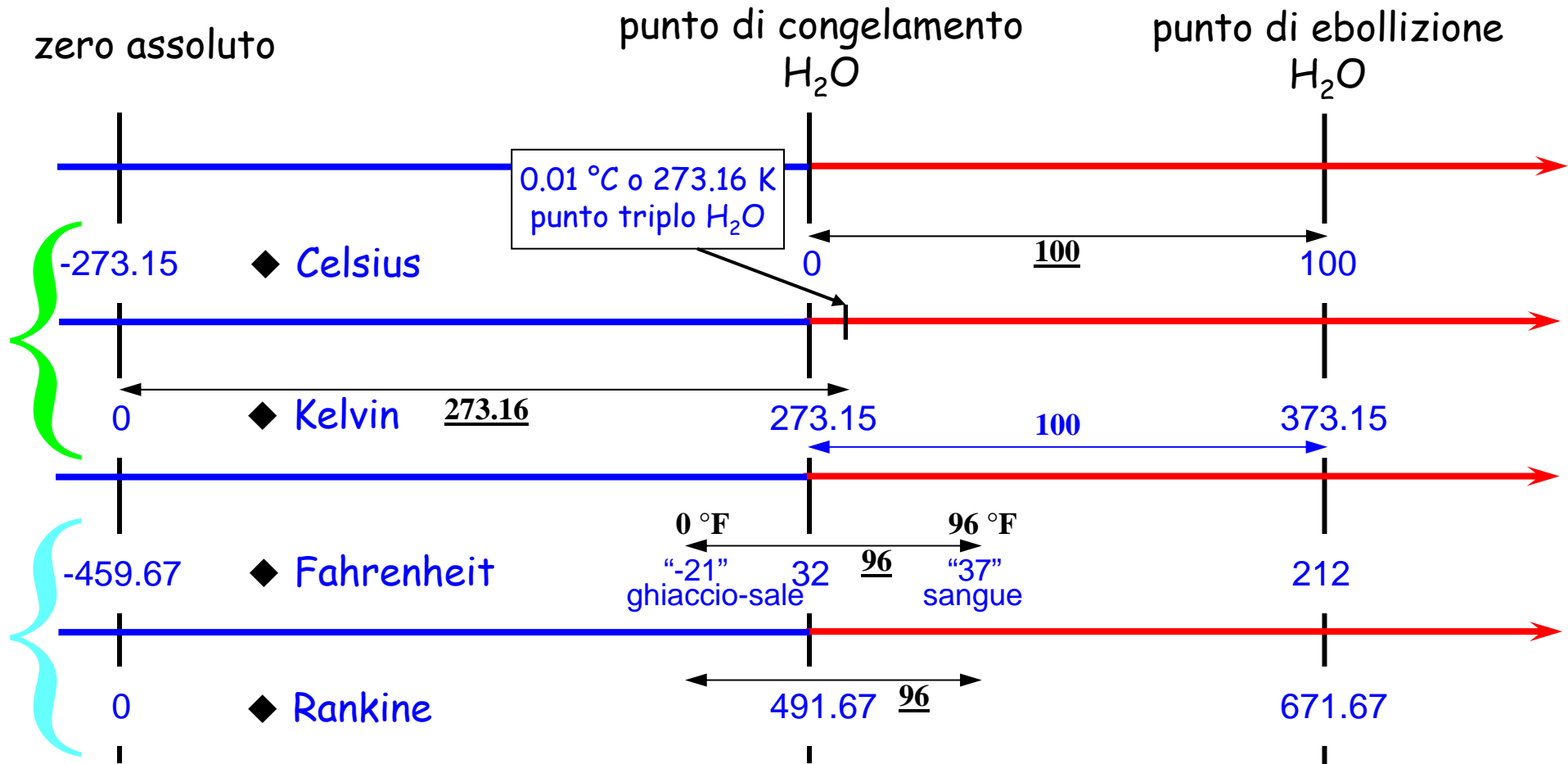
Il grado centigrado ha ampiezza pari al kelvin ($\Delta T = 1\text{ }^{\circ}\text{C} = 1\text{ K}$)

Grado Fahrenheit e grado Rankine hanno pari ampiezza ($\Delta T = 1\text{ }^{\circ}\text{F} = 1\text{ }^{\circ}\text{R}$)

Il grado Réaumur è di ampiezza 80 % rispetto al grado centigrado

$$\Delta T = 1\text{ }^{\circ}\text{C} = 5/9\text{ }^{\circ}\text{F} = 1/1.8\text{ }^{\circ}\text{R} = 1.25\text{ }^{\circ}\text{R}$$

Confronti tra le Scale di Temperatura



La Scala Internazionale di Temperatura (1/2)

Il problema della realizzazione di una scala di temperature univoca è stato affrontato per la prima volta a livello internazionale solo nel 1927 (CIPM). In quella occasione fu stabilita la costituzione di una **scala di temperature internazionale** (*IPTS - International Practical Temperature Scale*) che ha subito ulteriori revisioni nel corso di conferenze successive (1948, 1954, 1960, ..., 1990).

In pratica l'**IPTS** è lo standard a cui i vari paesi devono riferirsi per le misure di temperatura. Questo **standard internazionale**:

- fissa i **punti di riferimento** per la calibrazione (punto di congelamento, punto triplo, *etc.*) dei riferimenti e termometri
- definisce le **equazioni e i metodi** da utilizzare per calcolare le temperature intermedie (**interpolazione**)
- definisce gli **strumenti (termometri e altri dispositivi fisici) da usare** nei diversi intervalli di temperatura

La Scala Internazionale di Temperatura (2/2)

L'IPTS suddivide il campo di variazione della temperatura in quattro intervalli (*range*) predefiniti; per ognuno di essi precisa i punti fissi, le equazioni di interpolazione e gli strumenti per la misura:

- *Range I:* da **13.8 K** (-259.34 °C)-H a **273.15 K** (0 °C)
- *Range II:* da **273.15 K** (0 °C)-H₂O a **903.89 K** (630.74 °C)
- *Range III:* da **903.89 K** (630.74 °C)-Sb a **1337.58 K** (1064.43 °C)
- *Range IV:* oltre **1337.58 K** (1064.43 °C)-Au

Naturalmente che i valori che delimitano gli intervalli e le formule di interpolazione da utilizzare hanno subito molte variazioni nel corso degli anni (e nel susseguirsi delle riunioni del CIPM) in conseguenza del fatto che con il progredire della tecnica **si sono ottenuti punti di riferimento sempre più ripetibili e accurati.**

Trasmissione del Calore (1/2)

Proprietà fondamentali del **calore** ($Q = \text{ENERGIA TERMICA IN TRANSITO}$):

- 1) una volta prodotto è impossibile risalire alla sua origine
- 2) non può essere contenuto ma fluisce spontaneamente dalla parte più calda a quella più fredda del sistema

La **trasmissione** del calore può avvenire in **tre modi distinti**:

- **conduzione**



sfrutta il **contatto fisico** fra i corpi: le particelle nel corpo più caldo (agitate termicamente) si muovono e trasferiscono (raffreddandosi) energia cinetica a quelle del corpo più freddo (riscaldandolo).

La **potenza termica** dQ/dt è proporzionale al salto di temperatura ($T_0 - T$) e alla superficie di contatto A del materiale. Il fattore di proporzionalità è la **conducibilità termica** σ della superficie che separa i due corpi (e.g. l'oggetto, O , dall'ambiente o dal sensore di temperatura)

$$dQ = \sigma A (T_0 - T) dt$$

$\sigma \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$ conducibilità termica dell'interfaccia oggetto-sensore

A (m^2) superficie di contatto/scambio termico

T_0 (K) temperatura (assoluta) dell'oggetto

T (K) temperatura (assoluta) del sensore

Osserviamo che $\Delta T = (T_0 - T)$ in K coincide con $\Delta \theta = (\theta_0 - \theta)$ in $^{\circ}C$

Trasmissione del Calore (2/2)

- **convezione**

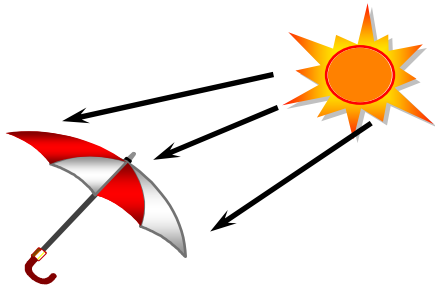


sfrutta un fluido intermedio (liquido o gas) per trasportare il calore da un corpo più caldo ad un corpo più freddo. La convezione può essere naturale o forzata.

La potenza termica dQ/dt è proporzionale al gradiente termico ΔT e all'area A tramite il coefficiente convettivo α (che è legato al calore specifico, alla viscosità e alla velocità del fluido)

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \quad \alpha \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right)$$

- **irraggiamento**



è legato alle **vibrazioni degli atomi** e delle molecole che hanno una energia cinetica media (rappresentata appunto dalla loro temperatura assoluta); questa vibrazione è **sorgente di un campo elettromagnetico**; la generazione di "luce" è governata dalla *legge di Planck*, la densità spettrale, per unità di lunghezza d'onda λ , della potenza elettromagnetica irradiata, per unità di superficie è proporzionale alla emissività $\varepsilon(\lambda)$ dell'oggetto

$$I_\nu(\nu, T) = \frac{2h}{c^2} \cdot \frac{\nu^3}{[\exp(h\nu / k_B T) - 1]} \cdot \varepsilon(\nu)$$

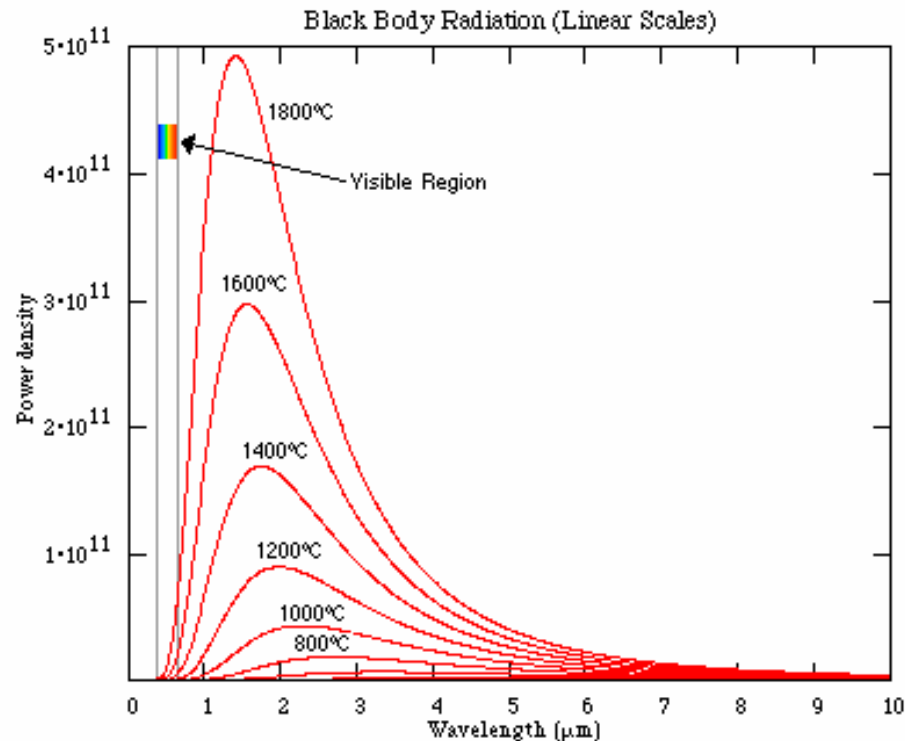
$$I_\lambda(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{1} \cdot \frac{1}{\lambda^5 [\exp(hc / k_B T \lambda) - 1]} \cdot \varepsilon(\lambda)$$

Intensità I (W/m²)

$$0 \leq \varepsilon(\lambda) \leq 1$$

[1 \equiv corpo nero]

Equazione di Planck e legge di Stefan-Boltzmann per l'emissione del corpo nero



$$I = \int_{-\infty}^{+\infty} I_{\lambda}(\lambda, T) d\lambda$$

$$I_{(W/m^2)} = \sigma_B T^4$$

legge di Stefan-Boltzmann

$$\lambda_{\text{peak}}(\mu\text{m}) = 2897 / T$$

legge Wien

La legge di Stefan-Boltzmann, ricavata integrando l'equazione di Planck su tutte le lunghezze d'onda, indica che la potenza per unità di superficie (**intensità**) del corpo nero a temperatura T è **proporzionale a T^4** attraverso la costante $\sigma_B = 5.671 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ (costante di Stefan-Boltzmann)

La legge di Wien lega la **lunghezza d'onda di picco** $\lambda_{\text{peak}}(\mu\text{m})$ dello spettro e.m. irradiato alla temperatura assoluta T del corpo (cost. di Wien = 2897 K/ μm)

Capacità Termica ed "effetti di carico"

La **temperatura** è la grandezza fisica più comunemente misurata in ambito industriale; le differenze di temperatura determinano la **direzione del flusso di calore**; la misura di temperatura avviene in modo statistico - valore medio - ed è fortemente influenzata da diverse variabili (contatto termico, risposta nel tempo, *etc.*).

E' chiaro che il dispositivo utilizzato per la misura deve influire il meno possibile sulla grandezza da rilevare (devono così essere ridotti gli "effetti di carico").

Questo significa che la misura della temperatura con un sensore sarà tanto più accurata quanto minore risulta la **capacità termica** (a volte detta **massa termica**) del sensore rispetto alla capacità termica del misurando.

Il **calore specifico** di una sostanza è, per unità di massa (m), il rapporto tra il calore scambiato (dQ) e la corrispondente variazione di temperatura (dT):

$$c = (1/m) \cdot (dQ/dT)$$

La **capacità termica** di un oggetto rappresenta la quantità di calore che esso può immagazzinare sotto forma di energia termica. E' il prodotto tra la massa m (kg) dell'oggetto e il suo calore specifico c ($J/kg \cdot K$):

$$C = m \cdot c$$

Indeterminazioni nella Misura

Sono molte le cause che possono produrre **errori nella misura di temperatura**. Per rendersene conto basta tenere presente che la temperatura rilevata:

- è una media della temperatura del corpo
- dipende dagli errori dello strumento
- è legata al tempo di misura
- dipende dalla lettura dell'operatore
- è influenzata dalle capacità termiche del sensore e del corpo
- è comunque influenzata dalle condizioni ambientali

E' chiaro che solo una comprensione completa delle tecniche di rilevazione e trasduzione può produrre una misura di temperatura estremamente accurata. Oggi, in **prossimità della temperatura ambiente (~ 300 K)**, si misurano le **temperature con incertezza di qualche mK ($\sim 10^{-5}$)**.

Misure di Temperatura

- ◆ La misura di temperatura richiede la **trasmissione di una piccola quantità di energia termica dall'oggetto al sensore**. Nei trasduttori elettrici l'energia termica è convertita in un segnale elettrico (*sensori piroelettrici, sensori termoelettrici, sensori ottici, etc.*).
- ◆ Ci sono **due modi di procedere** nella misura della temperatura: **per equilibrio** e **predittivo**. Nel primo metodo (più lento) la misura è completata quando non c'è più gradiente termico fra corpo e sensore; nel secondo la temperatura del corpo è ricavata attraverso la velocità di variazione della temperatura del sensore senza che il punto di equilibrio sia mai raggiunto.
- ◆ I **sensori** possono effettuare misure di temperatura **per contatto** o **senza contatto**; ai primi, che funzionano per conduzione (o convezione) termica, è richiesto un basso calore specifico e un'alta conducibilità termica; ai secondi, che funzionano misurando l'irraggiamento termico, sono richiesti spessori ridotti (bassa capacità termica) e superfici sensibili estese.

Flusso di calore e variazione termica di un sensore

- ◆ In una misura di temperatura per contatto, la quantità di calore ceduto dall'oggetto al sensore (conduzione) è proporzionale alla differenza tra la temperatura T_1 dell'oggetto (che per ipotesi non è alterata dal sensore), e la temperatura istantanea T del sensore. Nell'intervallo elementare di tempo dt si ha: $dQ = \sigma A (T_1 - T) dt$.
- ◆ Se il sensore (con differenza di temperatura iniziale $\Delta T_0 = T_1 - T$ per $t=0$) ha massa m e calore specifico c , il calore assorbito dal sensore è: $dQ = mc dT$.

In assenza di dissipazioni verso l'ambiente esterno, si ottiene l'equazione differenziale del primo ordine: $\sigma A (T_1 - T) dt = mc dT$

Definiamo la costante di tempo del sistema (costante termica): $\tau_T = \frac{mc}{\sigma A}$

l'equazione differenziale diventa: $\frac{dT}{T_1 - T} = \frac{dt}{\tau_T}$

con soluzione: $T = T_1 - \Delta T_0 \exp(-t/\tau_T)$

$mc = C$
capacità
termica

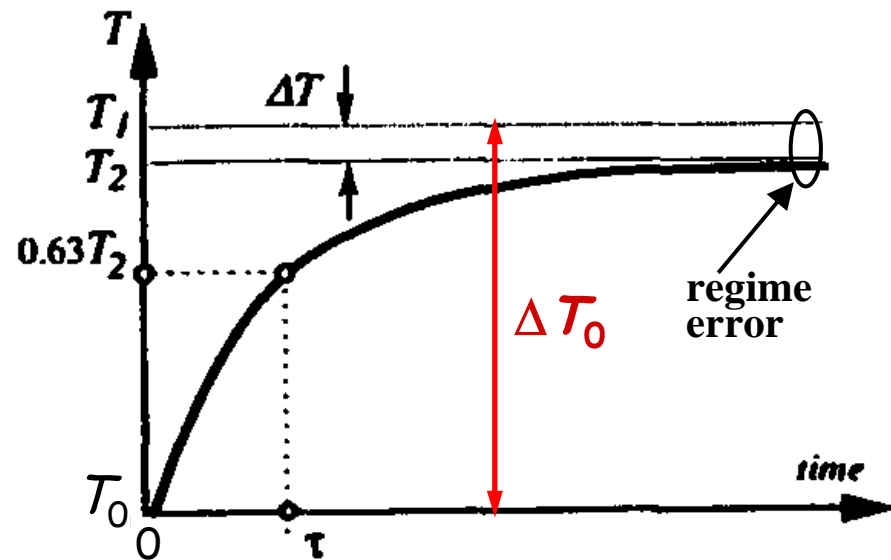
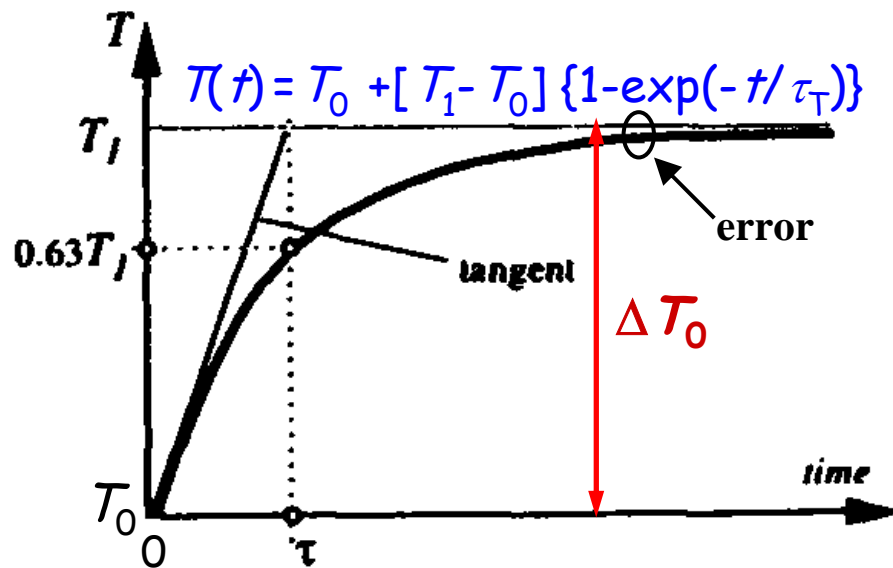
Transitori di temperatura di un sensore

$$T = T(t) = T_1 - [T_1 - T_0] \exp(-t/\tau_T)$$

La costante di tempo τ_T indica il tempo in cui la temperatura T del sensore raggiunge il 63.2 % del gradiente di temperatura iniziale ΔT_0 .

$$T(\tau_T) = T_1 - 37\%[T_1 - T_0] = 37\%T_0 + 63\%T_1 = T_0 + 63\%[T_1 - T_0]$$

L'errore $E = T - T_1$ vale 0.7% ΔT_0 per $t = 5\tau_T$ e vale 0.005% ΔT_0 per $t = 10\tau_T$.



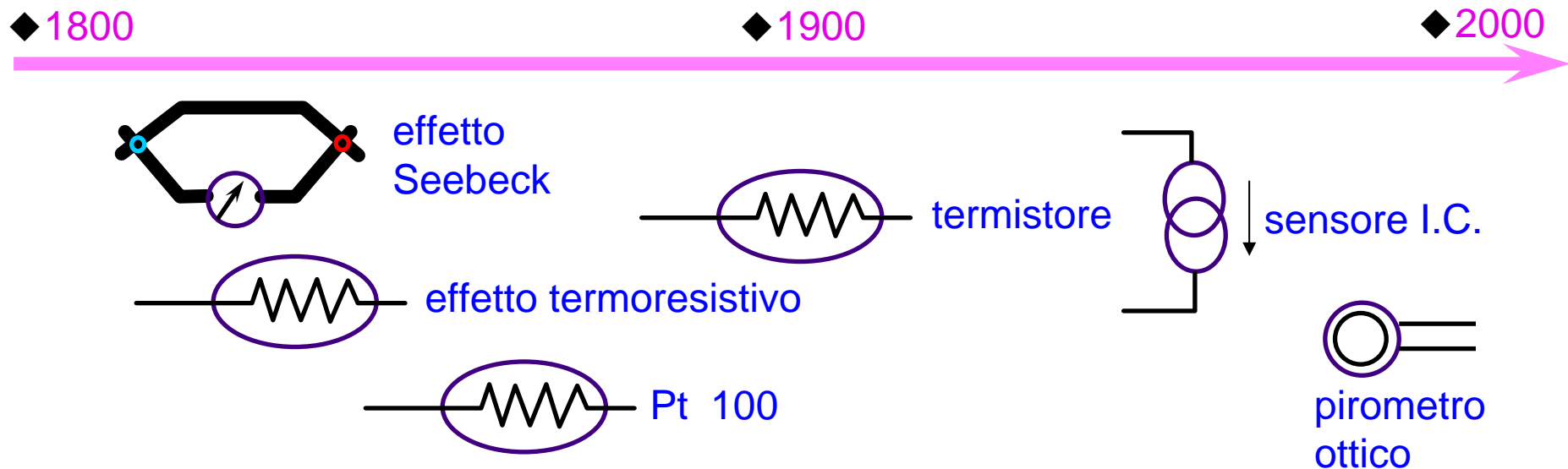
Se il sensore dissipa calore (e.g. attraverso i suoi cavi) verso l'ambiente (a temp. $< T_1$) la temperatura di regime diviene $T_2 < T_1$ con un errore di misura (a regime) $E = T_1 - T_2$.

Cenni storici sui Sensori di Temperatura

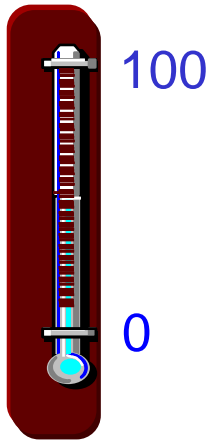
Anche se il primo sensore di temperatura si può far risalire a *Galileo* (termoscopio - 1606), dovranno passare circa duecento anni per assistere alle grandi scoperte che porteranno alla **realizzazione di sensori di temperatura elettrici**.

Nel 1821 viene scoperto che due **giunzioni dissimili** a diversa temperatura possono generare una tensione/corrente elettrica (**Seebeck**); in quegli stessi anni si osserva che la resistenza elettrica dei metalli varia con la temperatura (*Davy*) e nel 1871 viene realizzato il primo prototipo di **termometro al platino** (*Siemens*).

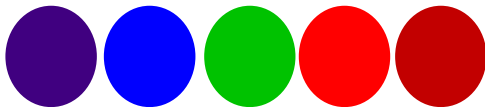
Intorno al 1900 si scoprono le proprietà dei **semiconduttori** e più tardi si cominciano a realizzare sensori di temperatura con **circuiti integrati** per arrivare infine ai **pirometri ottici**



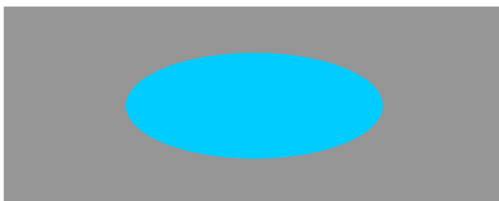
Termometro a liquido e a colori termosensibili



- ◆ a liquido: è il sensore di temperatura ("termometro") per antonomasia e sfrutta la **dilatazione termica di un liquido in un bulbo con stelo**; è fragile, lento nella risposta ed ha una risoluzione che dipende dalla sua lunghezza. E' ben **lineare** ma la sua uscita non è un segnale utilizzabile direttamente da circuiti elettronici.



- ◆ a colori termosensibili: si realizza con superfici ricoperte di **pigmenti** finemente suddivisi **che si oscurano quando viene raggiunta la loro temperatura di fusione**. E' utilizzato per misure in luoghi pericolosi o difficili da raggiungere; ha una bassa risoluzione e produce un'irreversibile variazione di colore quando si supera la temperatura di soglia. Non è riusabile.

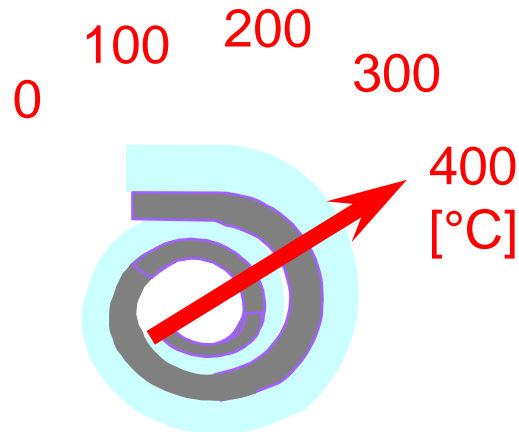
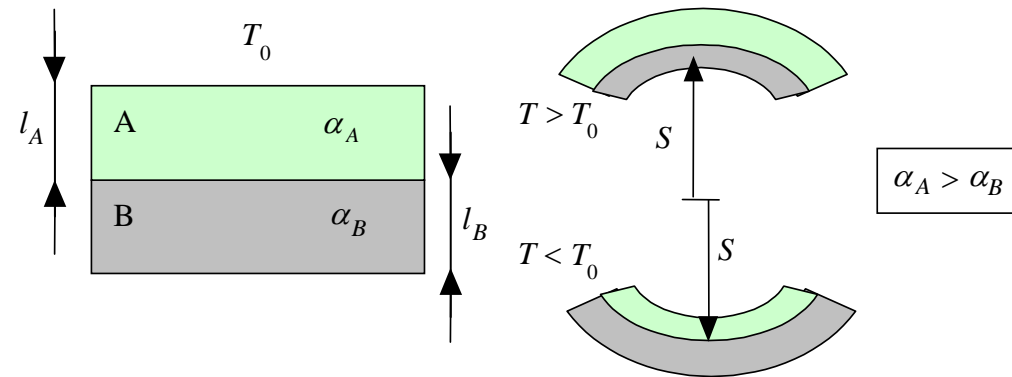


Esistono anche cartine (**materiali plastici**) **termosensibili** che alterano, **in maniera reversibile**, il proprio colore in funzione della temperatura.

Sensori di Temperatura Bimetallici (o a lamina bimetallica)

Si tratta di **trasduttori meccanici a dilatazione termica** che si realizzano saldando fra loro due metalli diversi e collocando ad una estremità una lancetta. Dato che i due metalli esibiscono coefficienti di espansione termica differenti, **una variazione di temperatura produce una curvatura S della lamina** che dipende dal suo spessore l_A+l_B , dalle costanti di elasticità $K_{A/B}$ dei materiali e dai corrispondenti coefficienti di espansione termica $\alpha_{A/B}$.

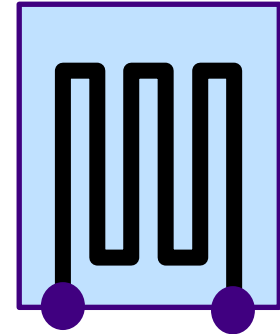
$$S = f(l_A, l_B, K_A, K_B, \alpha_A, \alpha_B)$$



Questi sensori sono **economici** ma presentano problemi di **isteresi** e sono comunque **poco accurati**. Vengono quindi utilizzati per misure grossolane: spesso nei termostati per regolare la temperatura non critica di un ambiente (e.g. ufficio del DEI).

Sensori a Variazione di Resistenza (RTD)

Si tratta di trasduttori elettrici che sfruttano la proprietà dei metalli di variare la conducibilità elettrica con la temperatura. I **termoresistori** o *RTD* (*Resistance Temperature Detector*) usano in genere come materiale sensibile il platino, proprio per le sue caratteristiche di lunga durata, stabilità e riproducibilità.



In generale la resistenza di un metallo è una funzione complessa della temperatura ma solitamente un semplice sviluppo in serie di potenze produce buoni risultati.

Nel caso del platino l'equazione utilizzata è quella di *Callendar e van Dusen* (corretta in base all'IPTS-68):

$$R = R_0 \left[1 + A\theta + B\theta^2 + C(\theta - 100)\theta^3 \right]$$

θ è la temperatura in gradi centigradi

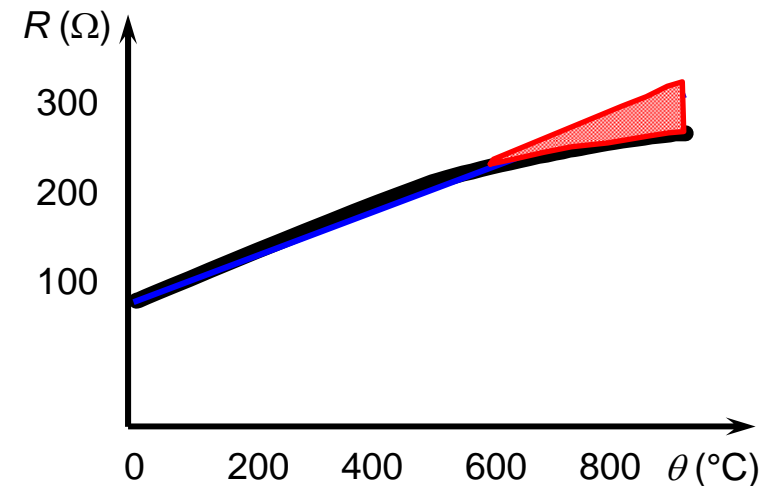
con A , B e C costanti dipendenti dalle proprietà del platino utilizzato per realizzare il sensore e $R_0 = 100 \Omega$ (nel caso del sensore Pt-100)

Per temperature sotto il punto di congelamento dell'acqua e fino a $-200 \text{ }^\circ\text{C}$ occorre portare in conto la correzione di *van Dusen* e considerare le potenze fino al quarto ordine.

Equazioni semplificate per i sensori al platino

E' utile osservare che per l'intervallo di temperatura che va da 0 °C a 630 °C, la funzione di trasferimento del platino non dipende significativamente dalle potenze più elevate della temperatura e si riduce all'equazione di *Callendar* che si compone di un termine lineare e di un termine quadratico (significativo solo ad alte temperature):

$$R = R_0 \left[1 + A\theta + \cancel{B\theta^2} \right]$$



I sensori al platino sono sensori di temperatura per misure assolute (non occorre un riferimento): hanno una **buona sensibilità** ($S_{\text{Pt}} = \partial R / \partial \theta = 0.39 \text{ } \Omega / ^{\circ}\text{C}$ per $R_0 = 100 \text{ } \Omega$, $S_{r,\text{Pt}} = (1/R) dR/d\theta \cong 4 \times 10^{-3} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), sono **molto stabili** e richiedono un **circuito di interfaccia semplice** (lettura di resistenza).

Problematiche degli RTD

Purtroppo su ampi intervalli di temperatura questi **sensori** sono **"non lineari"** e in generale hanno **bassi valori di resistenza**.

Per ridurre il primo inconveniente si utilizzano tecniche di compensazione o di **correzione digitale dei valori letti**;
per superare il secondo inconveniente bisogna fare molta attenzione alla procedura di misura (*e.g.* **collegamento a 4 fili e metodi a ponte**).

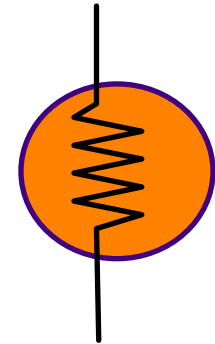
Caratteristiche metrologiche degli RTD

Un RTD al platino è il **dispositivo più accurato e stabile** nell'intervallo di temperatura **tra 0 °C e 500 °C** (*e.g.* incertezze tipiche di 0.025 °C, 10 mΩ, o anche meno per un Pt-100).

La Pt-100 Può misurare temperature fino a 800 °C ma in genere per valori maggiori di 600 °C si usano RTD al tungsteno.

Termistori (1/3)

Sono trasduttori elettrici che sfruttano le proprietà dei semiconduttori di variare la conducibilità elettrica con la temperatura. I **termistori** (*Thermal Resistor*) possono avere coefficienti di temperatura negativi (**termistori NTC**) o positivi (**termistori PTC**).



In generale la funzione di trasferimento di un **termistore NTC** può essere approssimata da una funzione esponenziale a quattro parametri, piuttosto complessa, anche se molto spesso si ricorre a un'espressione semplificata:

$$R = R_0 \exp \left[-\beta \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

a due parametri (β, T_0),
dove R_0 è il valore di resistenza
alla temperatura di riferimento di 25 °C ($T_0 = 298$ K)

Il coefficiente di temperatura dell'NTC è dato da:
(solitamente $\beta = 3000 \div 5000$ K e $R_0 = 1, 5, 10$ k Ω)

$$\alpha_{\text{NTC}} = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\beta T^{-2} < 0$$

Con $\beta = 3600$ K si ha $\alpha \approx 0.04$ K⁻¹ a T_{ambiente} .

((si noti come $\alpha_{\text{NTC}} \approx 4 \times 10^{-2}$ K⁻¹ mentre $\alpha_{\text{PT}} \approx 4 \times 10^{-3}$ K⁻¹ con una differenza di un'ordine di grandezza))

Dall'espressione del coefficiente di temperatura α_{NTC} si evince chiaramente che i termistori sono **più sensibili per bassi valori di T** .

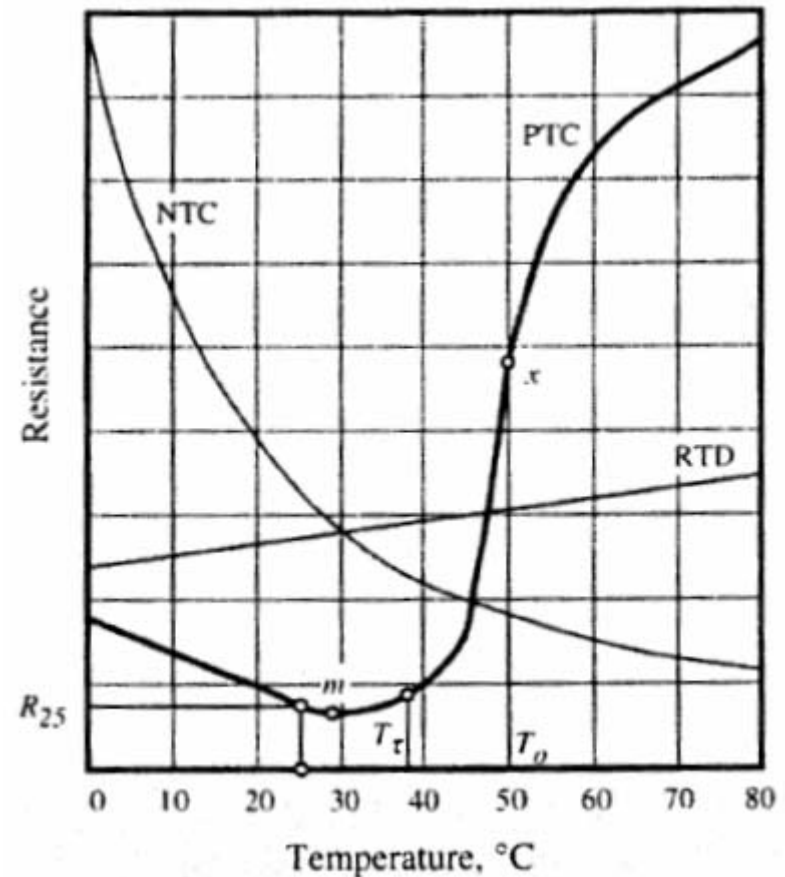
Per le misure più accurate si ricorre all'equazione di *Steinhart-Hart* (exp. a 4 parametri) che porta ad accuratezze fino all'ordine di 0.02 °C.

Termistori (2/3)

Il termistore PTC, invece, ha una curva difficilmente approssimabile con un'equazione matematica per cui essa è definita dai costruttori mediante un certo numero di punti prestabiliti e con i valori di:

- Temperature Coefficient of Resistivity
TCR definito come $\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$
- resistenza a temperatura ambiente R_{25}
- valore minimo di resistenza R_m
- temperatura di transizione T_τ
(R comincia a salire rapidamente)
- capacità termica e tensione massima

Autoriscaldamento: NTC vs. RTD e PTC



I termistori PTC hanno un intervallo di funzionamento ristretto e sono usati per la **protezione da sovraccarichi e da surriscaldamento** (il loro valore di resistenza "scatta" da un valore basso a un valore alto per T che supera $T_0 > T_\tau$).

Termistori (3/3)

Mentre i termistori **PTC** trovano impiego in applicazioni di **termoregolazione**, per la **misura di temperatura** si utilizzano quasi sempre i termistori **NTC** con andamento più regolare e "analitico" e quindi **linearizzabili**.

I termistori sono **molto più sensibili degli RTD** (da 10^3 a 10^6 volte superiore per i PTC e di circa un fattore 10 per gli NTC).

I termistori NTC funzionano in un intervallo di temperature che va da **-100 °C a 500 °C circa**.

Presentano una impedenza elevata e non richiedono particolari cure nella procedura di misura (è sufficiente un collegamento a 2 fili).

Purtroppo sono fortemente non lineari e meno stabili dei sensori RTD.

Si prestano molto bene alla realizzazione di anelli di controllo della temperatura.

Termocoppie (1/6)

Sono trasduttori che utilizzano le proprietà termoelettriche derivanti dall'accoppiamento di due conduttori dissimili (materiali diversi) posti a temperature differenti.

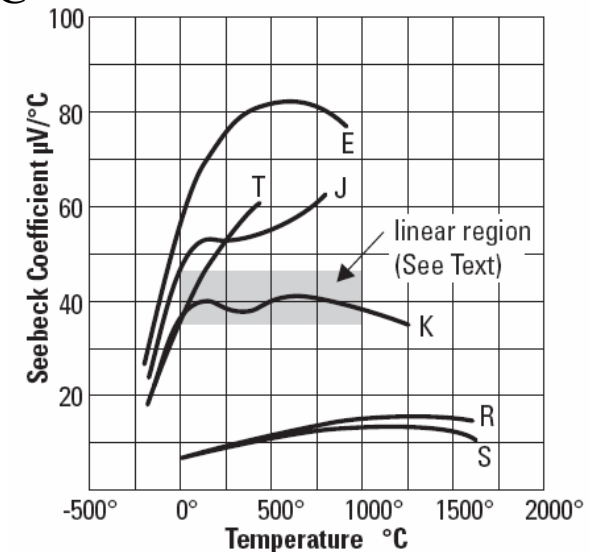
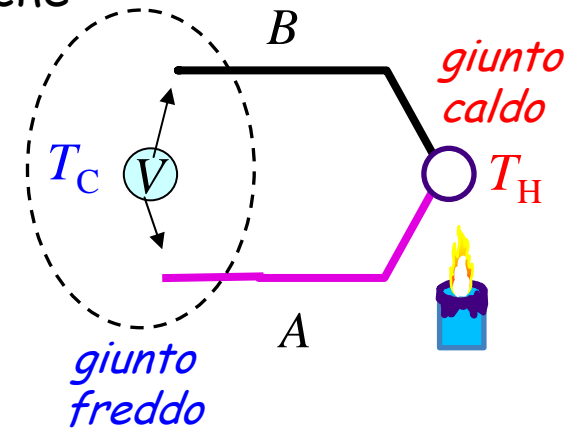
Il loro funzionamento è basato sull'effetto Seebeck

$$V_{S_{AB}} = K_{S_{AB}}(T) \cdot \Delta T \quad \text{con } \Delta T = T_H - T_C$$

secondo cui la **tensione (tra i due fili) al giunto freddo è proporzionale alla differenza di temperatura fra le due giunzioni.**

Purtroppo, la dipendenza del coefficiente di Seebeck dalla temperatura, finisce per inficiare la relazione di "linearità" fra temperatura e tensione.

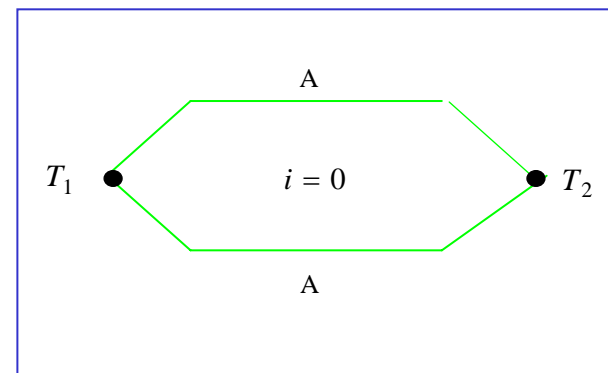
Per un uso adeguato di questi sensori e per una loro connessione corretta è utile fare riferimento alle **tre leggi fondamentali delle termocoppie**, che tornano utili in molte situazioni pratiche:



Termocoppie (2/6)

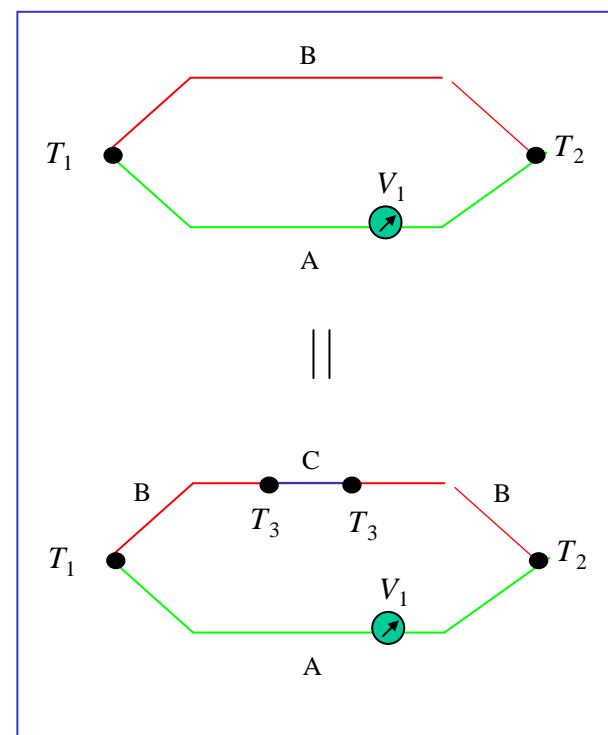
1. Legge dei circuiti omogenei

*in un circuito omogeneo (stessi materiali)
nessun gradiente di temperatura potrà
produrre una tensione netta e quindi una
corrente termoelettrica*



2. Legge dei conduttori intermedi

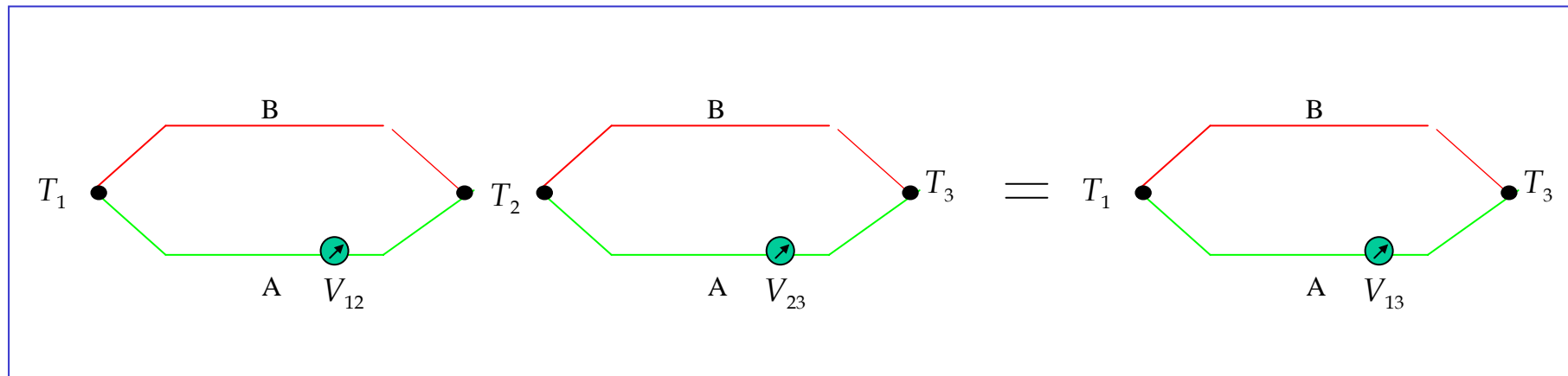
*in un circuito composto da un qualsiasi
numero di materiali dissimili la tensione netta
sarà nulla se tutte le giunzioni sono alla
stessa temperatura*



Termocoppie (3/6)

3. Legge delle temperature successive

Se V_{12} è la tensione di Seebeck prodotta da due giunzioni a temperature T_1 e T_2 e V_{23} è la tensione di Seebeck prodotta da due giunzioni a temperature T_2 e T_3 allora la tensione di Seebeck prodotta da due giunzioni a temperatura T_1 e T_3 sarà pari a $V_{13} = V_{12} + V_{23}$



Termocoppie (4/6)

La realizzazione e l'uso delle termocoppie presenta due problemi fondamentali:

- la necessità di inserire il **blocco di condizionamento e misura** (e quindi delle ulteriori giunzioni) senza alterare il risultato; (Pb.1)
- la necessità durante la misura di mantenere la temperatura del **giunto freddo a un valore costante e noto**. (Pb.2)

Questi problemi si possono risolvere:

Pb.1) ponendo le giunzioni derivanti dal collegamento (giunto freddo) alla stessa temperatura (che per la II legge non produrrà alcuna tensione netta)

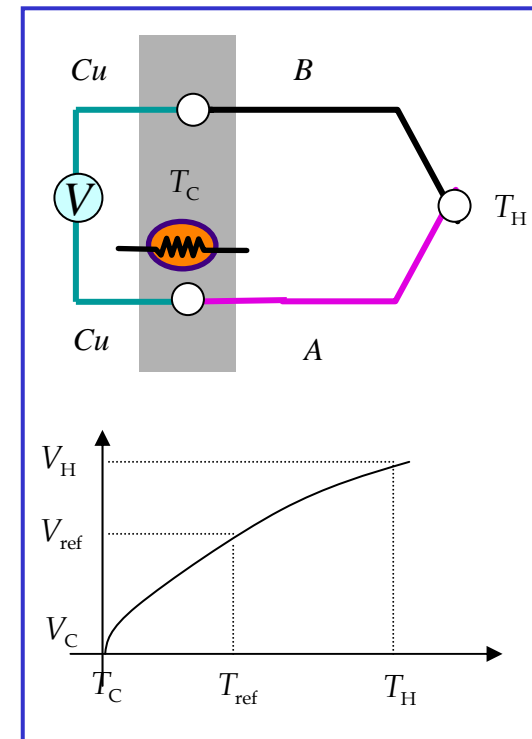
Pb.2) misurando la temperatura di riferimento del giunto freddo, e.g. con un sensore IC, oppure forzandola a 0 °C tramite un bagno in acqua e ghiaccio (o altra T_{nota})

•) senza conoscere la T_C del giunto freddo si possono fare 2 misure: una prima a una T_{ref} nota, da cui si può dedurre il valore di T_C , e quindi si può misurare la T_H incognita utilizzando il valore di T_C appena ricavato

$$V(T_{ref}) = K_S (T_{ref} - T_C) \Rightarrow T_C = T_{ref} - (1/K_S)V(T_{ref})$$

$$V(T_H) = K_S (T_H - T_C) \quad \text{o anche} \quad V(T_H) - V(T_{ref}) = K_S (T_H - T_{ref})$$

$$\text{e quindi } T_H = T_{ref} + (1/K_S) \cdot [V(T_H) - V(T_{ref})]$$



Termocoppie (5/6)

Le termocoppie possono essere suddivise in due gruppi fondamentali: quelle a metallo nobile e a metallo vile. Le prime sono più costose ma stabili e presentano

Tipo	Metalli	Coefficiente di Seebeck [$\mu V / ^\circ C$]	Range di Funzionamento [$^\circ C$]
T	Cu-Con	38	0 ÷ 370
K	Ni-Cr	40	-200 ÷ 1260
J	Fe-Con	50	0 ÷ 760
E	Ni/Cr-Con	59	-200 ÷ 900
R,S	Pt/Rh-Pt	10	0 ÷ 1480

coefficiente di Seebeck basso mentre le seconde hanno un coefficiente più elevato.

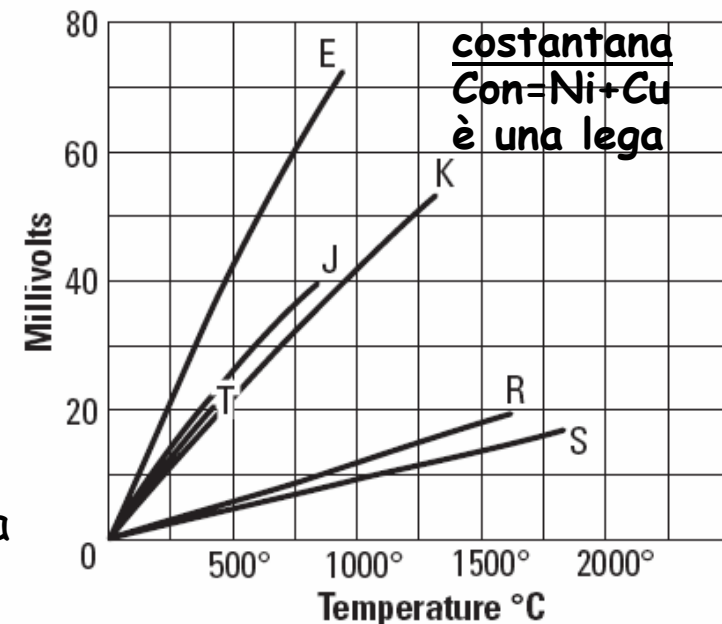
In entrambi i casi occorre agire con molta cautela poiché **la presenza del rumore può**

inficiare il risultato della misura dato che l'uscita in tensione è dell'ordine dei mV.

A causa dell'andamento non lineare della curva $\theta = f(V)$ è necessario ricorrere ad un opportuno **algoritmo interpolatore**

$$\theta = a_0 + a_1 V + a_2 V^2 + \dots$$

per ricavare in maniera accurata la temperatura dalla tensione V letta sulla termocoppia



Termocoppie (6/6)

L'ordine dell'equazione di interpolazione varia con il tipo di termocoppia e i suoi **coefficienti** vengono in genere **ricavati per via empirica**. Nel caso in cui si debba operare **in intervalli ristretti** il metodo più semplice ed utilizzato è quello della **linearizzazione della curva**.

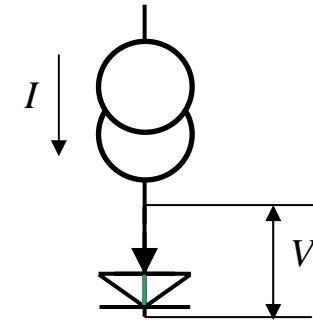
L'utilizzo delle **termocoppie** è indicato per l'**ampio intervallo di temperatura misurabile** e per la loro **notevole resistenza meccanica**, oltre che per le **piccole dimensioni e robustezza** del "giunto caldo".

D'altronde la possibilità di ricorrere ad un numero elevato di metalli permette il loro **uso anche in ambienti ostili**.

Le **basse tensioni d'uscita** richiedono particolare attenzione nel condizionamento del segnale di misura.

Sensori Integrati (1/3)

Sono trasduttori che utilizzano le **proprietà di giunzioni a semiconduttore** (diodi e transistor) di avere una tensione o corrente fortemente dipendente dalla temperatura; questa **dipendenza è peraltro estremamente lineare**.



In un **diodo** la relazione corrente-tensione, $I = I_0 \exp(V / V_T) = I_0 \exp(qV / kT)$, porta a una relazione tensione-temperatura del tipo: $V = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$

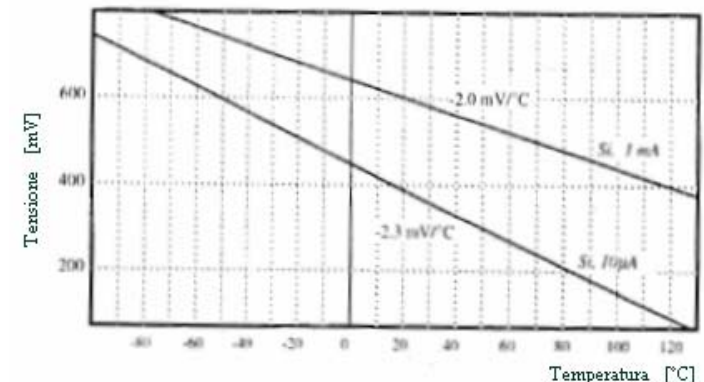
$$V = \frac{E_g}{q} - \frac{kT}{q} (\ln K - \ln I)$$

$V = A + BT$

dove E_g è il *l'energy gap*, K è una costante del materiale indipendente dalla temperatura, q è la carica dell'elettrone e k è la costante di Boltzmann.

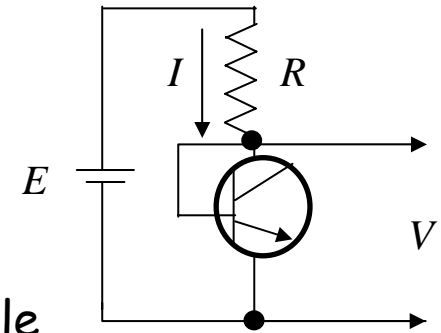
Quando la giunzione è alimentata a corrente costante la **tensione dipende linearmente dalla temperatura**. La sensibilità del dispositivo è:

$$S = \frac{\partial U_{out}}{\partial U_{in}} = \frac{\partial V}{\partial T} = B = -\frac{k}{q} (\ln K - \ln I) \approx -2 \text{ mV/}^\circ\text{C per un diodo al Si}$$



Sensori Integrati (2/3)

Il discorso è equivalente nel caso di un **transistor** anche se per un corretto funzionamento è richiesto un opportuno circuito di polarizzazione. **Risulta** $V = V_{BE} \propto T$ se I è costante. D'altronde, visto che la corrente nel transistor è data dalla relazione $I = (E - V)/R$, una resistenza R stabile è raccomandabile (e.g. *MTS102* della Motorola Semiconductor).



Partendo da queste semplici configurazioni e sfruttando le proprietà dei semiconduttori vengono realizzati **sensori di temperatura più complessi** (*Integrated Circuit Sensor*) che contengono specifici circuiti integrati.

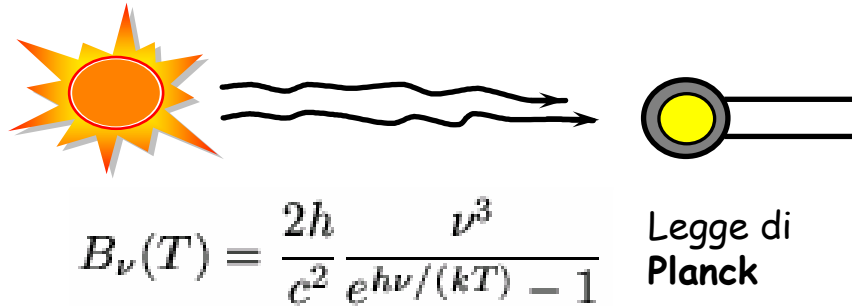
Questi circuiti integrati impiegano un certo numero di **transistor identici connessi fra loro** e sfruttano la relazione fra la tensione base-emettitore e la corrente di collettore:

$$\Delta V_{BE(1-2)} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{C_1}}{I_{C_2}}$$

di modo che **per valori fissati di corrente la tensione dipende solo dalla temperatura.**

Pirometri ottici per misure "senza contatto" (1/2)

Sono trasduttori elettrici a infrarossi che si fondano sulla trasmissione del calore per **irraggiamento** elettromagnetico e sulla **legge di Planck** che la regola.



Teoricamente questi sensori dovrebbero misurare la temperatura quando tutto lo spettro della radiazione termica della sorgente colpisce (inalterato) il sensore.

Di conseguenza, per essi occorre far riferimento alla legge di Stefan-Boltzmann, ottenuta dalla legge di Planck per integrazione su tutte le lunghezze d'onda. Tale legge esprime la **potenza ottica emessa per unità di superficie in funzione della temperatura T dell'oggetto irradiante** (o del ΔT tra l'oggetto e il sensore):

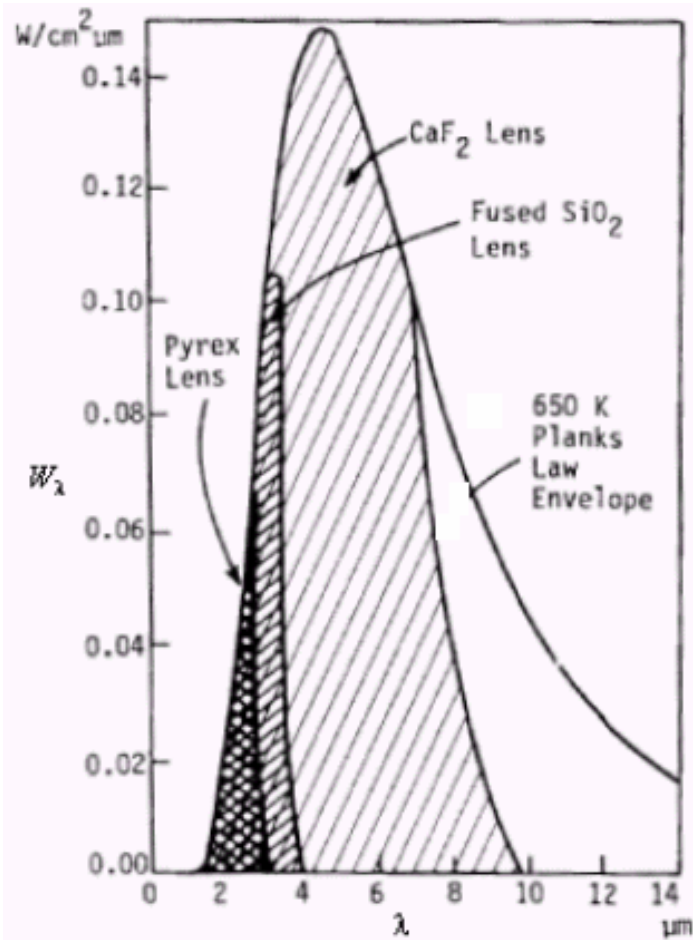
$$P = \varepsilon \sigma T^4$$

dove $\varepsilon < 1$ è il potere emissivo dell'oggetto radiante e $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ è la costante di Stefan-Boltzmann

In realtà il pirometro non funziona (misura) allo stesso modo per tutte le lunghezze d'onda poiché lenti, specchi, e finestre ottiche utilizzati per convogliare la radiazione sul sensore costituiscono dei **filtri ottici**.

Pirometri ottici per misure "senza contatto" (2/2)

Le ottiche del pirometro sono generalmente opache per le onde lunghe e le onde corte ma sono trasparenti nel visibile e nel vicino infrarosso: pertanto la legge di Planck non viene mai integrata su tutte le lunghezze d'onda.




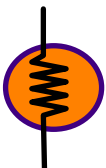
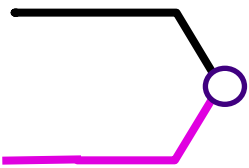
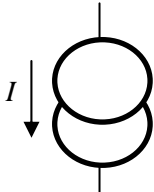
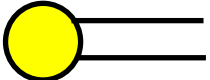
I pirometri ottici producono una **risposta** approssimativamente **proporzionale a T^4** e sono quindi **inerentemente non lineari**.



Sono sensori **non invasivi, costosi, e molto stabili** che permettono di misurare **anche temperature elevate**; la loro sensibilità è più accentuata alle alte temperature.

Sono usati per **temperature anche superiori ai 1450 °C** dove altri sensori hanno vita breve; sono molto utili nel **controllo di processi** la cui temperatura varia da 200-1450 °C e dove è essenziale l'**assenza di contatto** con il sistema.

Caratteristiche dei sensori di temperatura

 RTD	 Termistore	 Termocoppia	 S. Integrato	 Pirometro
<ul style="list-style-type: none"> • sensibile • molto stabile • <u>molto accurato</u> • abbastanza <u>lineare</u> 	<ul style="list-style-type: none"> • veloce • <u>molto sensibile</u> • collegamento a <u>2 fili</u> • economico 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>economico</u> • <i>range</i> esteso • ampia scelta • <u>robusto</u> • veloce 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>accurato</u> • <u>economico</u> • <u>lineare</u> 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>non invasivo</u> • <u>molto stabile</u> • <u>temperature elevate</u> • <u>range esteso</u>
<ul style="list-style-type: none"> • lento • <u>costoso</u> • collegamento <u>a 4 fili</u> 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>non lineare</u> • <u>range limitato</u> • fragile 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>non lineare</u> • misure relative (<u>2 giunti</u>) 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>range molto limitato</u> • scelta limitata 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>non lineare</u> • <u>costoso</u>

Applicazioni dei sensori di temperatura

Sensori

- RTD
- Termistori
- Termocoppie
- Sensori Integrati
- Pirometri

Misure

- Processi fotochimici, monitoraggio temperatura sostanze alimentari
- Sistemi di riscaldamento, elettronica industriale e di consumo, telecomunicazioni controllo di temperatura diodi laser
- Forni a induzione, forni per uso alimentare, applicazioni industriali
- Celle frigorifere, compensazione di temperatura in dispositivi di qualità
- Vetro/quarzo fondente, acciaierie, alte temperature in genere

Note

Occorre evidenziare che i sensori di temperatura descritti, anche se rappresentano la maggioranza dei dispositivi utilizzati in ambito industriale, non coprono di certo **l'ampio ventaglio** delle offerte oggi disponibili sul mercato **per le misure di temperatura**.

Ad esempio, si osserva che in determinate condizioni (ambienti ostili, presenza di campi magnetici o elettrici consistenti, situazioni pericolose, *etc.*) e per particolari applicazioni (biomedicina, energia nucleare, temperature criogeniche, *etc.*) si ricorre a particolari **sensori di temperatura che utilizzano specifici effetti fisici** (sensore di temperatura piezoelettrico, acustico, interferometrico, termografico, *etc.*).