



Misure di Temperatura

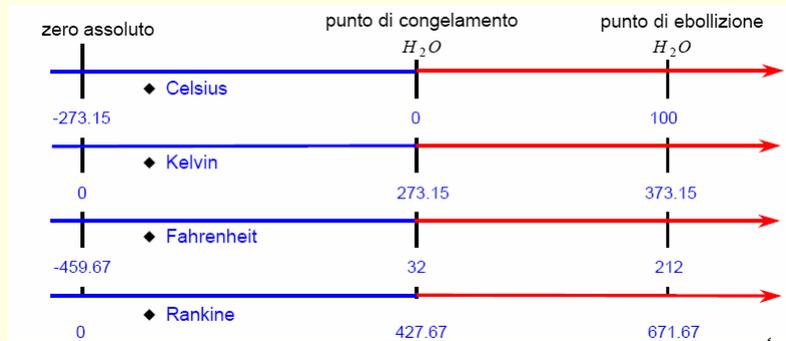
Scala Internazionale ITS'90

La scala di temperatura internazionale (*ITS - International Temperature Scale*) che ha subito ulteriori revisioni nel corso di conferenze successive (1948, 1954, ..., 1990) è lo standard che:

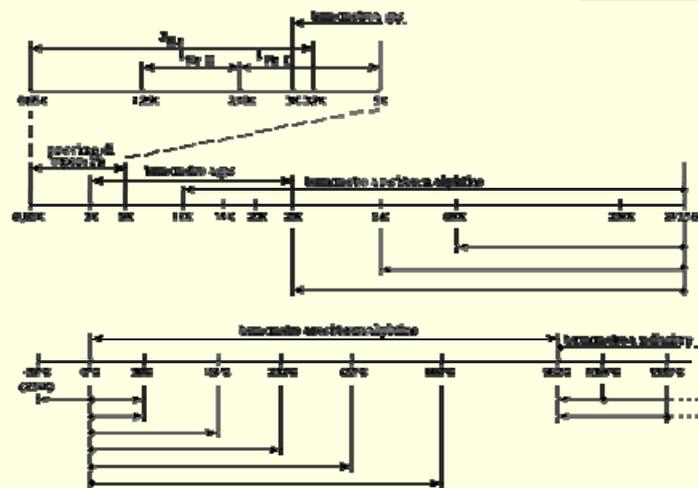
- fissa i punti di riferimento per la taratura (punto di congelamento, punto triplo, ecc.)
- definisce le equazioni ed i metodi da utilizzare per calcolare le temperature intermedie (interpolazione)
- definisce gli strumenti da usare per la realizzazione della scala di temperatura

Sostanza	Stato	T (K)
Elio	Punto di ebollizione	
Idrogeno	Punto triplo	13.8033
Neon	Punto triplo	24.5561
Ossigeno	Punto triplo	54.3584
Argon	Punto triplo	83.8058
Mercurio	Punto triplo	234.3156
Acqua	Punto triplo	273.16
Gallio	Punto di fusione	302.9146
Indio	Punto di solidificazione	429.7485
Stagno	Punto di solidificazione	505.078
Zinco	Punto di solidificazione	692.677
Alluminio	Punto di solidificazione	933.473
Argento	Punto di solidificazione	1234.93
Oro	Punto di solidificazione	1337.33
Rame	Punto di solidificazione	1357.77

Altre Scale



Scala Internazionale ITS'90



Leggi fondamentali: temperatura empirica e termodinamica

- La temperatura è stata storicamente definita sulla base della dilatazione termica di un fluido tra due punti fissi scelti arbitrariamente. La più diffusa scala Celsius sceglie:
 - come punti fissi il punto di solidificazione (0°C) e di ebollizione dell'acqua (100°C) alla pressione di 101325 Pa
 - come fluido termometrico il mercurio
 - come legge di dilatazione termometrica una relazione lineare

- In un sistema chiuso in equilibrio la termodinamica classica definisce la temperatura termodinamica come il divisore integrale dell'energia interna rispetto all'entropia (a volume costante):

$$T = \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_{V,m}$$

- La teoria cinetica interpreta inoltre la pressione come la portata netta della componente normale della quantità di moto che attraversa una superficie elementare



Leggi fondamentali: trasmissione del calore

- Ogni misura della temperatura è un problema di trasmissione del calore. Infatti il sensore non legge mai la temperatura da misurare, ma la propria temperatura. Pertanto per poter valutare la differenza tra la temperatura del sensore e quella che si vuole misurare è necessario spesso valutare gli scambi termici esistenti.

- Gli scambi termici possono essere ricondotti a tre meccanismi diversi quali:
 - conduzione
 - convezione
 - irraggiamento

Conduzione



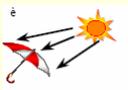
$\dot{Q}_K = -k A \frac{dT}{dx}$

Convezione

$\dot{Q}_c = \bar{h}_c A (t - t_a)$



Irraggiamento

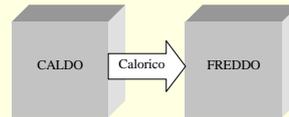


$\dot{Q}_i = \varepsilon \sigma A T_s^4$



Leggi fondamentali: termodinamica

- *Equilibrio termodinamico* (legge zero)
Un qualunque sistema in seguito alla rimozione dei vincoli interni raggiunge uno stato di equilibrio. Se due sistemi (1 e 2) sono in equilibrio tra loro ($T_1=T_2$) e nello stesso tempo il sistema (2 e 3) sono in equilibrio tra loro ($T_2=T_3$) allora anche i sistemi 1 e 3 sono in equilibrio tra loro ($T_1=T_3$)
- *Primo Principio* (principio di conservazione dell'energia)
L'energia non può essere né distrutta né creata
$$\Delta E = Q - L$$
- *Secondo Principio* (enunciato di Clausius)
L'energia fluisce spontaneamente solo da un sistema a temperatura superiore ad uno a temperatura inferiore



Dove misurare?

- Interno all'ambiente di misura (disuniformità)
- Lunghezza di immersione (scambi conduttivi)
- Temperatura media radiante (scambi radiativi)
- Temperatura di ristagno (conv.energia cinetica)



Metodi di misura

TIPO	PRINCIPIO FISICO	GRANDEZZA TRASDOTTA	SENSORE	STRUMENTO ASSOCIATO
Termometro a liquido	dilatazione termica	spostamento del liquido	mercurio, toluene o alcool bulbo	capillare graduato
Termometro a gas	legge dei gas perfetti	pressione gas	gas in bulbo e capillare	manometro
Termometro a vapore	variazione della pvs	tensione vapore	bulbo metallico e capillare	manometro
Termometro Bimetallico	differente dilatazione termica	differente dilatazione metalli	due placchette avvolte a spirale o elica	amplificatore meccanico
Termometro a resistenza	variazione resistenza dei conduttori	resistenza elettrica	fili di platino, rame, nickel, etc.	ponte in DC o AC, potenz., voltmetro
Termistore	variazione resistenza semiconduttori	resistenza elettrica	semiconduttore	multimetro
Termocoppia	effetto Seebeck	f.e.m.	coppia termoelettrica	potenziometro, millivoltmetro
Term. a radiazione monocromatico	legge di Planck	f.e.m.	fotodiodo, fotomoltiplicatore occhio umano	ottica, lampada a filamento, filtro
Term. a radiazione infrarosso	legge di Planck	f.e.m.	fotodiodo o fotoconduttore	ottica, filtro ottico, volt. o potenziometro
Term. a radiazione Totale	legge di Stefan-Boltzmann	f.e.m.	termopila, bolometro o sens.piroelettrico	ottica, voltmetro o potenziometro
Term. a radiazione bicolore	legge di Planck (rapp. radiazioni)	f.e.m. Università di Cassino	fotodiodo o fotomoltiplicatore	ottica, filtri, voltmetro

Termometri a bulbo

Principio di misura:

dilatazione liquido

Campo di misura:

-25 -100 (tipico)

-150+500°C (applic. speciali)

Precisione: 0.05-2°C

Uscita: meccanica

Norme: UNI 6893

Vantaggi:

- elevata stabilità

Svantaggi:

- elevata costante di tempo

- campo di misura ridotto



Sostanza	$\alpha(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C})$
Ghiaccio	51
Piombo	29
Alluminio	23
Ottone	19
Rame	17
Acciaio	11
Vetro comune	9
Vetro Pyrex	3.2
Lega invar	0.7
Quarzo fuso	0.5

Termometri a bulbo

$$\Delta V = 3\alpha V \Delta T$$



Termometri a riempimento

Principio di misura:
variazione pressione di gas, vapore, liquido

campo:
-50+600°C

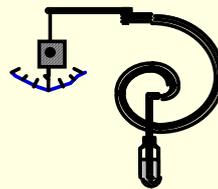
Precisione:
0.1-2°C

uscita:
meccanica

norme
UNI- CTI 9010

Vantaggi
- lettura a distanza

Svantaggi
- elevata costante di tempo
- problematiche installazione



Termometri bimetallici

Principio di misura: dilatazione di solidi (striscia di metallo con coefficiente di dilatazione termica elevato, solitamente saldate insieme in forma di spirale per ottenere maggior lunghezza in minor spazio)

Campo di misura:

0-600°C

Precisione:

1-5°C

uscita:

meccanica

norme

UNI- CTI 9010

Vantaggi

- basso costo

Svantaggi

- scarsa precisione

- non utilizzabili a distanza



Termometri a resistenza

Principio di misura:

variazione resistenza elettrica di metalli

campo di misura

-250+850°C

Precisione:

0.01-0.1°C

uscita:

resistenza elettrica

Norme

IEC 751

Vantaggi

- elevata affidabilità

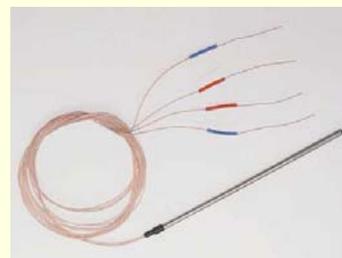
- linearità

Svantaggi

- elevato costo

- elevata costante di tempo

$$R = R_0 (1 + \alpha t)$$



Tecnologia costruttiva

Le termoresistenze con isolamento tradizionale sono costituite da:

1- elemento sensibile L'elemento sensibile è la parte più importante di tutto l'assieme, un elemento sensibile di scarsa qualità pregiudica il corretto funzionamento dell'intero sensore. Questo, una volta connesso con i fili di collegamento, viene posto all'interno della guaina di protezione..

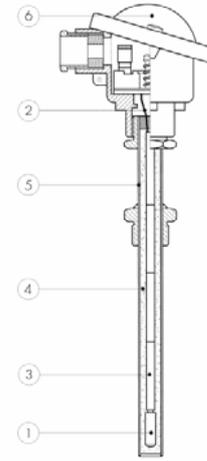
2- fili di collegamento Il collegamento dell'elemento sensibile può essere effettuato a 2,3 o 4-fili, il materiale degli stessi dipende dalle condizioni di impiego della sonda.

3- Isolatori Gli isolatori possono essere di tipo ceramico. Essi servono a prevenire corti circuiti e isolano i fili di collegamento dalla guaina di protezione.

4- Riempitivo Il riempitivo è generalmente composto da polvere di allumina finissima, essiccata e vibrata, la quale va a riempire qualunque interstizio proteggendo quindi il sensore dalle vibrazioni.

5- Guaina di protezione La guaina di protezione serve per proteggere l'elemento sensibile e fili di collegamento. Essendo a diretto contatto con il processo è importante che questa sia costituita dal giusto materiale e abbia le giuste dimensioni. In condizioni particolari è bene ricoprire la stessa con una ulteriore protezione (pozzetto termometrico).

6- Testa di connessione La testa di connessione contiene una morsettiera di materiale isolante (normalmente ceramica) che permette il collegamento elettrico della termoresistenza; in funzione delle condizioni di impiego possono essere usate custodie antideflagranti. Al posto della morsettiera è possibile installare un trasmettitore (ad es. con uscita 4-20 mA).



15

Norma CEI EN IEC 60751

$$R_t = R_o [1 + At + Bt^2 + C (t - 100) t^3] \quad \text{nel campo } -200^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}$$

$$R_t = R_o (1 + At + Bt^2) \quad \text{nel campo } 0^\circ\text{C} - 850^\circ\text{C}$$

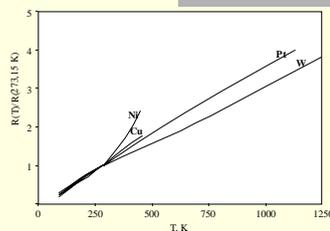
La normativa IEC 751 prevede:

- valore nominale di *alfa* pari a $3,85 \times 10^{-3}$
- valore di resistenza R_o compreso tra 5 e 1000 ohm (i valori più comunemente utilizzati sono 25, 100, 500 e 1000 ohm)
- tolleranze in **Classe A** = $0,15 + 0,002 | t | (^\circ\text{C})$ e **Classe B** = $0,3 + 0,005 | t | (^\circ\text{C})$

Tecnologia costruttiva

Scelta del Materiale di un RTD

- I requisiti che portano a scegliere un materiale per la realizzazione dei termometri a resistenza sono in generale:
 - - la costanza delle caratteristiche elettriche nel tempo, anche se il materiale è sottoposto a cicli termici variabili;
 - - la riproducibilità della caratteristica: Resistenza/Temperatura;
 - - l'elevato valore del coefficiente di temperatura α , che è indice della sensibilità del termometro.
- A questi requisiti rispondono molto bene, come detto, il Platino, il Rame ed il Nichel. In tabella V.1 sono riportate, in termini di campo di applicazione e coefficiente α , le caratteristiche termometriche di questi metalli.



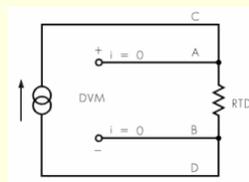
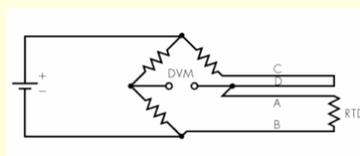
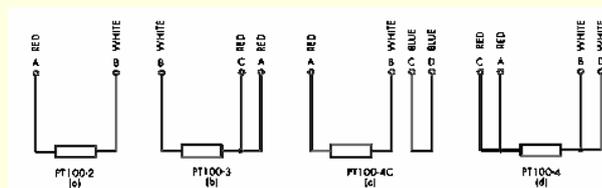
Metallo	Intervallo di temperatura °C	α [°C ⁻¹]
Pt	-220÷800	3,85 10 ⁻³
Cu	-50÷150	4,26 10 ⁻³
Ni	-60÷180	6,17 10 ⁻³

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{1}{100^\circ\text{C}} \frac{R_{100} - R_0}{R_0}$$

Pt100
Pt25
Ni1000
...

Tecnologia costruttiva

Fili di collegamento



Fattori di affidabilità di un TRP

- resistenza dei fili di collegamento
- autoriscaldamento;
- f.e.m. termiche nei collegamenti;
- resistenza di isolamento;
- deriva della caratteristica;
- tempo di risposta;
- profondità di immersione



Autoriscaldamento

- L'incertezza dovuta all'auto-riscaldamento è connessa alla inevitabile presenza di corrente elettrica che attraversa il termometro durante la misura, cioè dalla generazione interna RI^2 che si verifica nell'elemento sensibile e dal modo con cui tale calore viene dissipato.
- La misura di resistenza avviene alla temperatura del sensore e non a quella del mezzo di cui si vuole effettuare la misura, per cui bisogna fare ogni possibile sforzo per far coincidere le due temperature.
- E' comunque estremamente difficile calcolare a priori l'aumento di temperatura dovuto all'autoriscaldamento. Si può, ad esempio, effettuare una doppia misura con correnti diverse ed estrapolare i risultati a corrente nulla, tenendo conto che l'effetto varia con il quadrato della corrente.



F.E.M. nei collegamenti

- L'incertezza dovuta alle forze elettromotrici termiche che si generano ai capi dell'elemento sensibile dei TRP, per la presenza di giunti di materiali diversi, tipo Pt-Cu, è facilmente determinabile con sistemi di alimentazione che permettono l'inversione del verso della corrente nell'elemento sensibile.
- Facendo infatti la media fra le due letture (con versi opposti) è possibile eliminare l'influenza di tali f.e.m.. Ovviamente l'ideale sarebbe alimentare i TRP in corrente alternata.
- Nei casi in cui quanto su esposto è impossibile, bisogna misurare il valore di tali f.e.m. a freddo ed estrapolarne i valori alle temperature di esercizio. Se, comunque, all'interno della guaina di protezione le saldature ai capi dell'elemento sensibile sono state realizzate in maniera tale da risultare in una posizione che ne garantisce la isotermità i valori probabili delle f.e.m. saranno $<10\mu\text{V}$, che ad esempio in un sensore tipo Pt 100 a 650°C corrisponderebbe ad un errore di $0,03^\circ\text{C}$, del tutto trascurabile



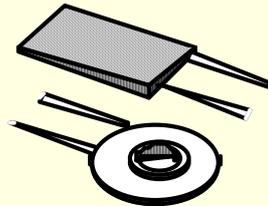
Resistenza di isolamento

- Se si verifica una perdita di isolamento elettrico tra il filo sensibile e la guaina esterna od il supporto isolante del termometro a resistenza, ciò provoca formazione di uno shunt parallelo alla resistenza del termometro (elemento sensibile) e di conseguenza un errore di valutazione della resistenza del TRP.
- Ad esempio, una resistenza d'isolamento di $2,8\text{MW}$ posta in parallelo ad una Pt 100 a 650°C provoca un errore di $0,1^\circ\text{C}$. Se la resistenza d'isolamento è presente nel termometro durante la taratura, l'errore è compensato, tranne nel caso in cui la taratura viene effettuata ad una sola temperatura e la resistenza d'isolamento non è stabile e varia con la temperatura .
- E' molto difficile valutare la resistenza di isolamento senza materialmente sezionare il termometro, distruggendolo quindi completamente; la valutazione viene di solito effettuata in maniera grossolana, misurando la resistenza di isolamento tra i terminali del filo metallico in uscita dal termometro ed un punto (di solito la punta) della guaina esterna.
- Il valore misurato nel modo descritto, senza dubbio varia al variare della temperatura in quanto varia la resistenza del supporto isolante su cui il filo metallico sensibile è avvolto o poggiato, e, a differenza di quanto avviene per il filo sensibile, la resistenza del supporto diminuisce all'aumentare della temperatura.



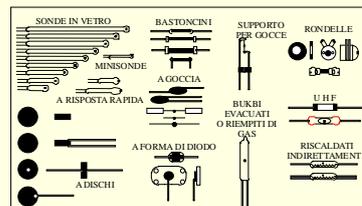
Termistori

Principio di misura:
 variazione resistenza elettrica di semiconduttori
campo di misura
 -100÷200°C
precisione:
 0.5-1°C
uscita:
 elettrica



Caratteristiche termistori

- NTC ("Negative Temperature Coefficient")
- PTC ("Positive Temperature Coefficient")
- $R = \alpha e^{\beta/T}$



Vantaggi/Svantaggi

Vantaggi :

- - basso costo unitario;
- - piccole dimensioni;
- - piccoli tempi di risposta;
- - elevata sensibilità

Svantaggi :

- campo di temperatura limitato (0-300°C);
- non linearità;
- deriva;
- autoriscaldamento



Termocoppie

Principio di misura:

effetto Seebeck

Precisione:

0.5+5°C

Uscita:

elettrica

Norme

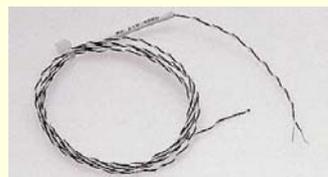
IEC 584-1/2/3

Vantaggi

- basso costo
- piccola costante di tempo

Svantaggi

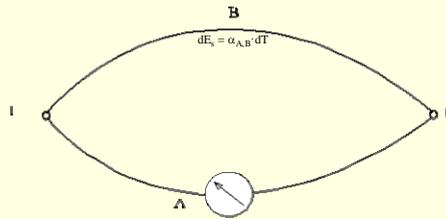
- non linearità
- bassa sensibilità



Legge di Seebeck

- la legge di Seebeck, lega il potenziale (la forza elettromotrice f.e.m.) Es che si genera ai capi di un giunto di metalli diversi, alla temperatura T del giunto ed ai due metalli A-B costituenti il giunto stesso:

- dove $\alpha_{A,B}$ rappresenta il coefficiente di Seebeck, più noto come potere termoelettrico della coppia A,B ed è funzione della sola temperatura T del giunto



Legge di Peltier

- la legge di Peltier, descrive l'assorbimento o la cessione di calore Q_p che avviene in un giunto di metalli diversi attraversato, in un verso o in quello opposto (reversibilmente), da una corrente I:

$$dQ_p = \pm \pi_{A,B} \cdot I \cdot d\theta$$

- dove $\pi_{A,B}$ rappresenta il coefficiente di Peltier, il cui valore dipende, per una determinata coppia A-B, dalla sola temperatura T del giunto.
- Il coefficiente $\pi_{A,B}$ può variare in valore e segno al variare della T, nel senso che, a parità di verso della corrente I, in uno stesso giunto ci può essere assorbimento o cessione di calore Q_p a seconda della temperatura del giunto. Ovviamente esiste una temperatura T alla quale tale effetto è nullo.
- Sulla base della fenomenologia ad effetto Peltier descritta sono stati sviluppate sistemi di raffreddamento di ridotta potenza il cui maggiore pregio, oltre alla sicurezza intrinseca, è quello di non presentare organi in movimento e quindi di non essere soggetti a fenomeni di usura. Tali dispositivi hanno trovato applicazione nel raffreddamento di ambienti di ridotte dimensioni e nella termostatazione di elementi nella strumentazione;

Legge di Thomson

- la legge di Thomson, descrive l'assorbimento o la cessione di calore Q_T , che avviene in un conduttore omogeneo lungo il quale vi è un gradiente di temperatura, al passaggio di una corrente I (anche di tipo termoelettrico):

$$dQ_T = \pm \left[\int_{T_1}^{T_2} \sigma dT \right] I d\theta$$

- dove s rappresenta il coefficiente di Thomson, il cui valore dipende dal materiale del conduttore, dal gradiente di temperatura e dalla temperatura stessa. Si noti che il coefficiente di Thomson viene spesso anche definito "calore specifico elettrico" in quanto rappresenta la quantità di calore ceduta od assorbita in un singolo conduttore sottoposto ad un gradiente unitario quando è percorso da una corrente unitaria.



Potere termoelettrico

Bismuto	-72	Alluminio	+ 3.5
Costantana	-35	Rodio	+ 7.0
Alumel	-15	Rame	+ 7.5
Nickel	-15	Ferro	+18.5



