



Università degli Studi di Cassino
Facoltà di Ingegneria

Lezioni del Corso di
Sensori e Trasduttori

Sensori per misure di Temperatura

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:

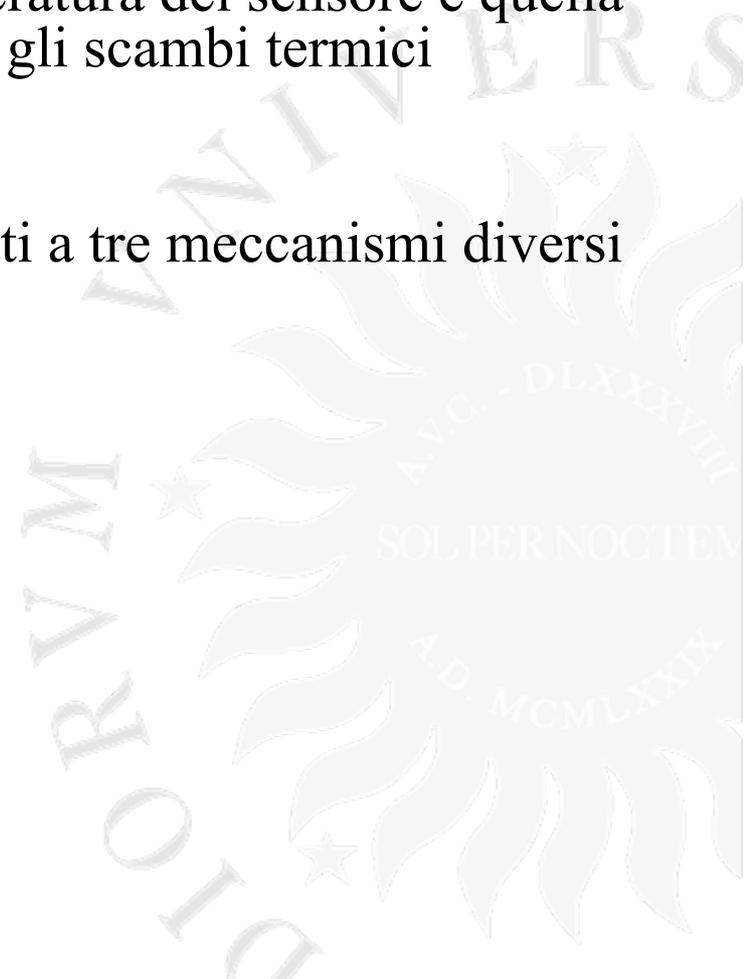
- come punti fissi il punto di solidificazione (0°C) e di ebollizione dell'acqua (100°C) alla pressione di 101325 Pa
- come fluido termometrico il mercurio
- come legge di dilatazione termometrica una relazione lineare

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.

Per poter valutare la differenza tra la temperatura del sensore e quella che si vuole misurare è necessario valutare gli scambi termici esistenti.

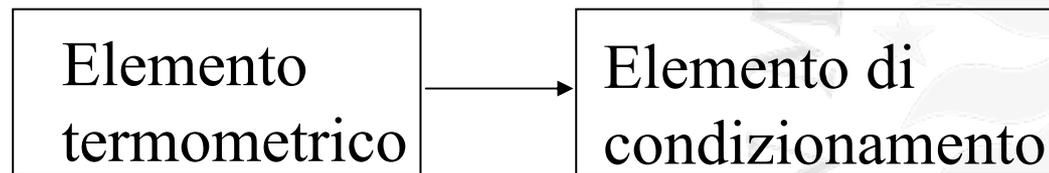
Gli scambi termici possono essere ricondotti a tre meccanismi diversi quali:

- conduzione
- convezione
- irraggiamento



Come misurare?

La temperatura viene solitamente misurata in ambito industriale mediante **elementi elettrici** (TC, termistori, TRP) e successivamente attraverso un **elemento di condizionamento** (trasmettitore) il segnale in uscita viene amplificato e condizionato in un segnale standard (3..15 psi, 0...10V, 4..20 mA, fieldbus)



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.	fotodiodo o fotomoltiplicatore	ottica, filtri, voltmetro

Termometri a BULBO

principio: dilatazione liquido

campo: $-50\div 400^{\circ}\text{C}$ (in funzione del liquido)

incertezza: $0.05\text{-}2^{\circ}\text{C}$

uscita: meccanica

Vantaggi

- elevata stabilità

Svantaggi

- elevata costante di tempo
- campo di misura ridotto



Termometri a RIEMPIMENTO

principio: variazione pressione di gas, vapore, liquido

campo: $-50\div 600^{\circ}\text{C}$

incertezza: $1-2^{\circ}\text{C}$

uscita: meccanica

Vantaggi

- lettura a distanza

Svantaggi

- elevata costante di tempo
- problematiche installazione



Termometri BIMETALLICI

principio: dilatazione di solidi

campo: 0÷600

incertezza: 1-5°C

uscita: meccanica

Vantaggi

- basso costo

Svantaggi

- scarsa precisione
- non utilizzabili a distanza



Termometri a RESISTENZA

principio: variazione resistenza elettrica di metalli

campo $-250\div 850^{\circ}\text{C}$

incertezza: $0.01-0.1^{\circ}\text{C}$

uscita: elettrica

Vantaggi

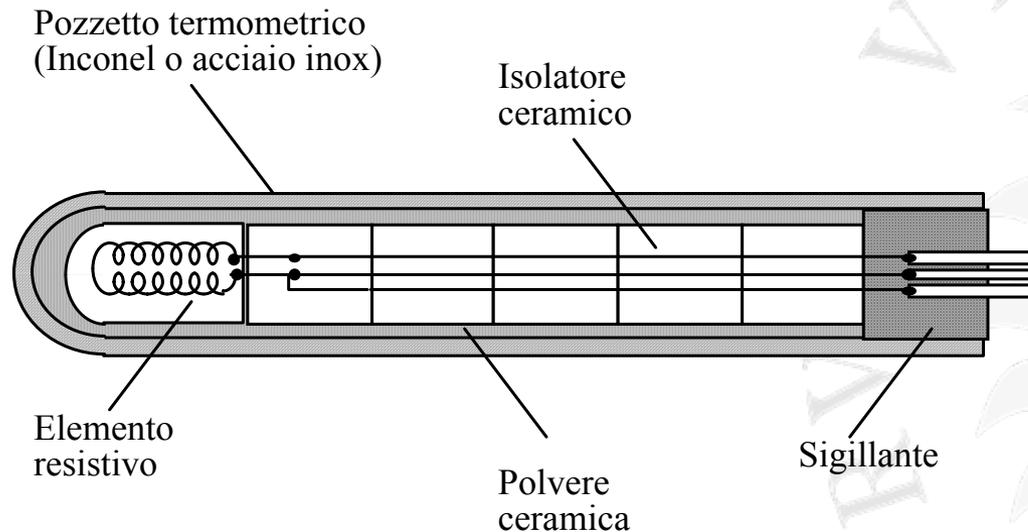
- elevata affidabilità
- linearità

Svantaggi

- elevato costo
- elevata costante di tempo



Un termometro a resistenza è generalmente costituito da un elemento metallico filiforme, avvolto o poggiato su di un supporto isolante (*framework*), il tutto contenuto in una guaina di protezione dell'elemento sensibile. Talvolta, per problemi di miniaturizzazione, il sensore è ottenuto per deposizione di un film metallico su di un supporto isolante.



Scelta del Materiale di un Termometro a Resistenza

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 il Platino (*metallo nobile, estremamente duttile, elevato punto di fusione, lavorabilità in uno stato purissimo e quindi elevata riproducibilità*), il Rame ed il Nichel.

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha T)$$

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

- Pt100
- Pt25
- Ni1000
- ...

Metallo	Intervallo °C	α [°C ⁻¹]
Pt	-220÷800	$3,85 \cdot 10^{-3}$
Cu	- 50÷150	$4,26 \cdot 10^{-3}$
Ni	- 60÷180	$6,17 \cdot 10^{-3}$

Sorgenti di incertezza in un Termometro a Resistenza

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



RESISTENZA DEI FILI

La misura della resistenza dell'elemento sensibile viene effettuata utilizzando fili di collegamento dal sensore al sistema di misura e trasduzione. Ciò crea l'inconveniente che la resistenza della linea di connessione viene e a trovarsi in serie con quella dell'elemento sensibile, senza poter valutare separatamente i due contributi

Si potrebbe correggere il valore ma occorre conoscere a priori la resistenza dei fili di collegamento, ma questo comporta problemi legati:

- alla variabilità della resistività dei materiali
- all'incertezza sulla lunghezza dei fili
- a possibili gradienti termici lungo i fili di collegamento (quando sono lunghi)

Si rende indipendente la misura dalla linea di connessione con accorgimenti sui collegamenti (del tipo a 3 o 4 fili, in luogo dei 2 strettamente necessari).

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.

Forza Elettromotrice 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 o 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.

Se tale fenomeno 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.

Deriva della CARATTERISTICA

E' un fenomeno legato alle caratteristiche meccaniche e termiche del sensore (es. deriva di 1°C su Pt 100 sottoposti 6000 h a 660°C)

Tempo di RISPOSTA

Presentano tempi di risposta (nell'ordine delle decine di secondi) abbastanza elevati rispetto agli altri misuratori di solito più piccoli e compatti

Profondità di IMMERSIONE

E' l'altezza minima di immersione di un termometro in un bagno liquido affinché la misura non risenta del valore della temperatura dell'ambiente.

Termistori

principio: variazione resistenza elettrica di semiconduttori

campo $-100\div 200^{\circ}\text{C}$

incertezza: $0.5-1^{\circ}\text{C}$

uscita: elettrica

Vantaggi

- basso costo
- elevata sensibilità

Svantaggi

- autoriscaldamento

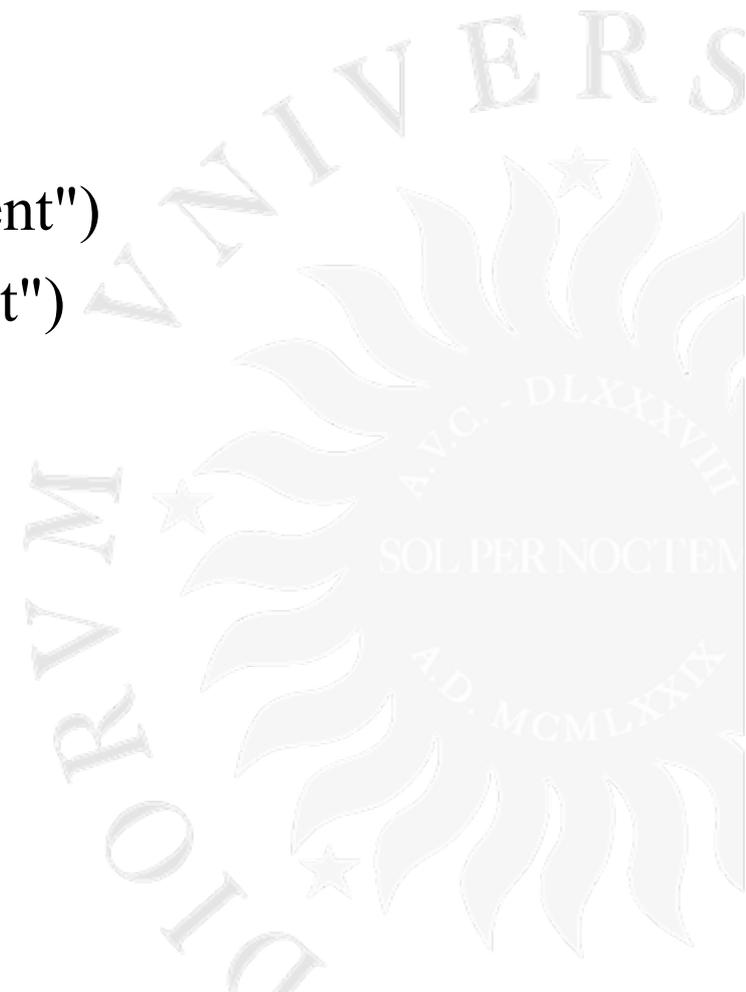


Caratteristiche dei Termistori

NTC ("Negative Temperature Coefficient")

PTC ("Positive Temperature Coefficient")

$$R = \alpha e^{\beta/T}$$

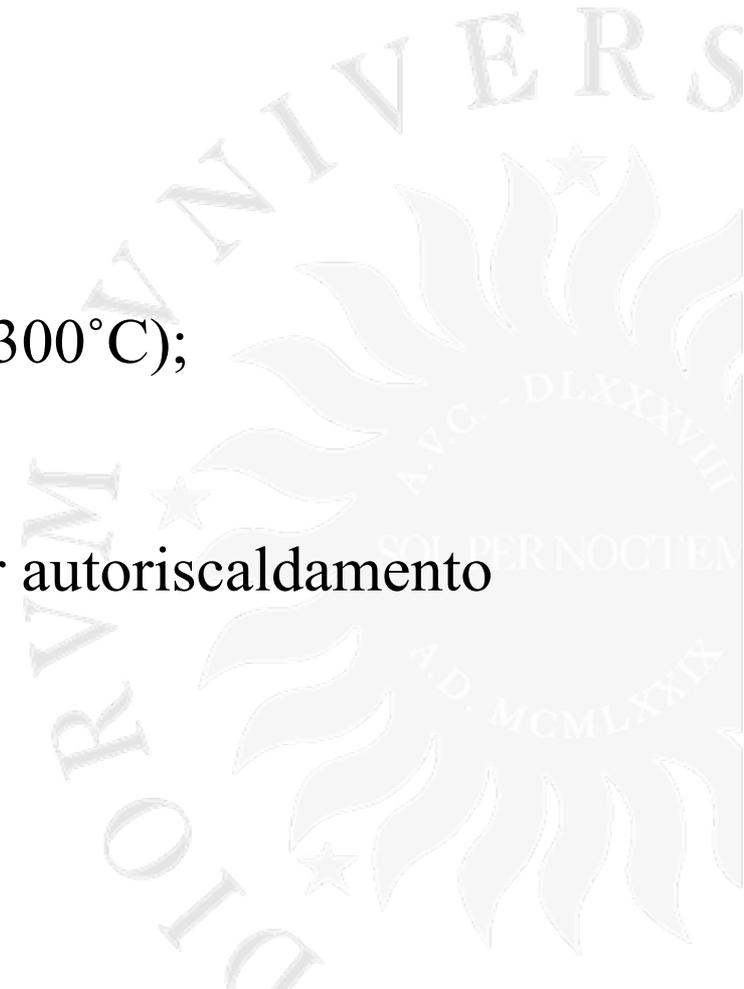


I vantaggi dei TERMISTORI :

- basso costo unitario;
- piccole dimensioni;
- piccoli tempi di risposta;
- segnale molto elevato.

Gli svantaggi dei TERMISTORI :

- campo di temperatura limitato (0-300°C);
- curva caratteristica non lineare;
- possibile deriva;
- valore di misura da correggere per autoriscaldamento



Termocoppie

principio: effetto Seebeck

campo $<350^{\circ}\text{C}$ (T) $<900^{\circ}\text{C}$ (E)

incertezza: $0.5\div 5^{\circ}\text{C}$

uscita: elettrica

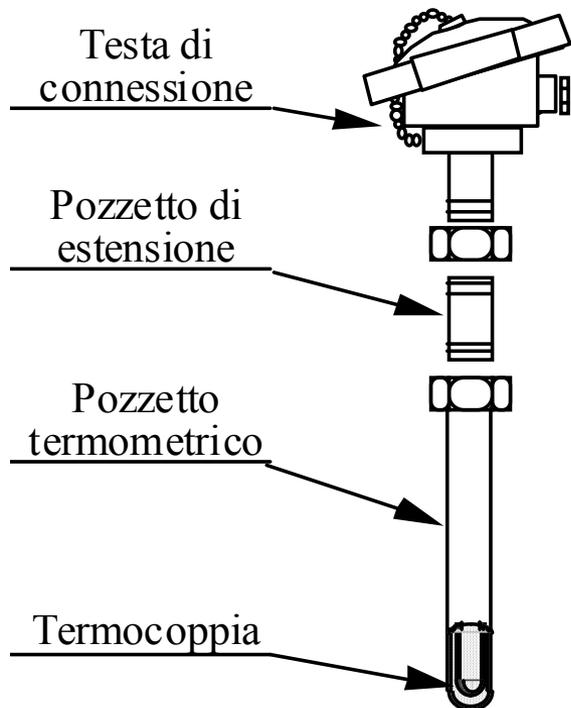
Vantaggi

- basso costo
- piccola costante di tempo

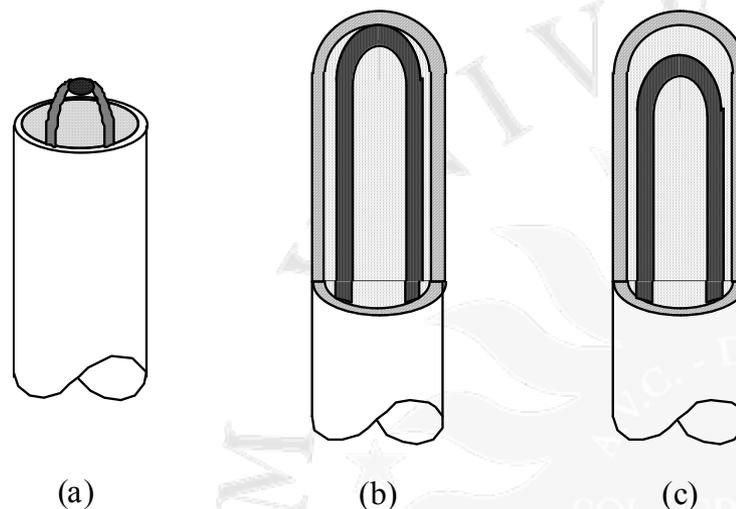
Svantaggi

- non linearità
- bassa sensibilità





Termocoppia assiemata

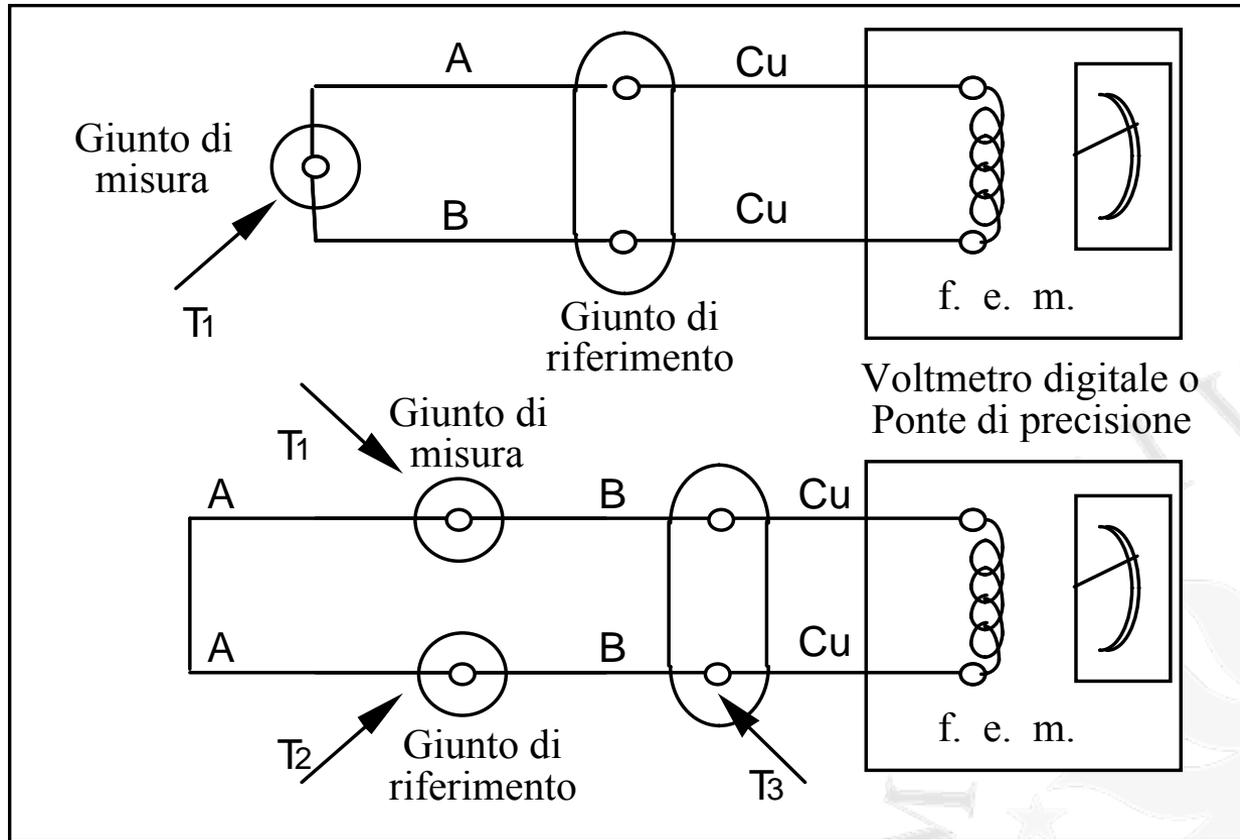


Tipi di giunto caldo:
a) esposto, b) a massa, c) isolato

la legge di Seebeck, lega il potenziale (la forza elettromotrice f.e.m.) E_s 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:

$$dE_s = \alpha_{A,B} \cdot dT$$

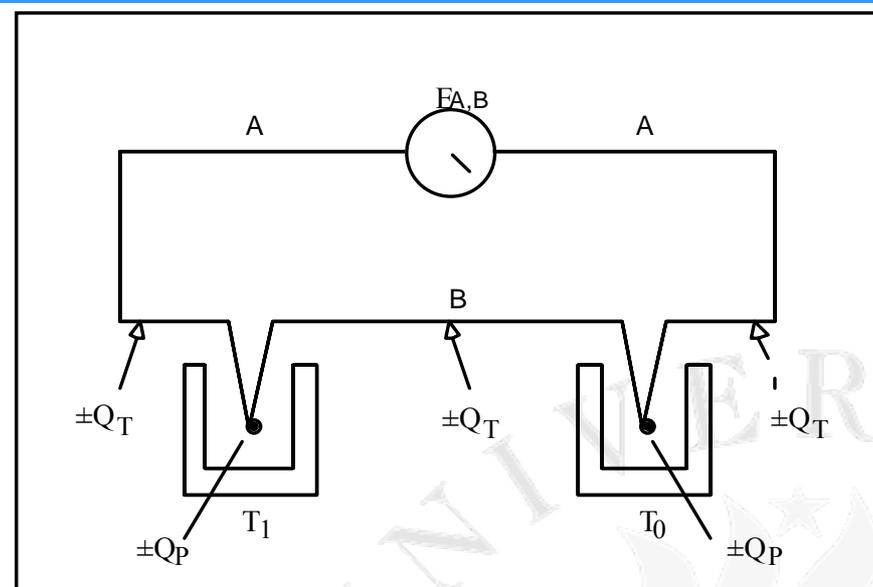
dove $\alpha_{A,B}$ rappresenta il coefficiente di Seebeck, più noto come potere termoelettrico della coppia A,B ed è funzione della sola temperatura T del giunto



Collegamenti elettrici delle termocoppie

Leggi dei circuiti termoelettrici

La legge del circuito omogeneo



In un circuito chiuso costituito da un solo materiale omogeneo non può circolare corrente termoelettrica per soli scambi termici. Quindi:

- se in un circuito costituito da un solo materiale circola corrente termoelettrica ciò è dovuto ad impurezze del materiale.
- in un circuito termoelettrico con due giunti a temperature diverse, la fem generata è indipendente dalla temperatura lungo i fili supposti omogenei.

Leggi dei circuiti termoelettrici

Ila legge dei metalli intermedi

La somma algebrica delle f.e.m. in un circuito costituito da un numero qualsiasi di metalli diversi è nulla se tutto il circuito è isoterma.

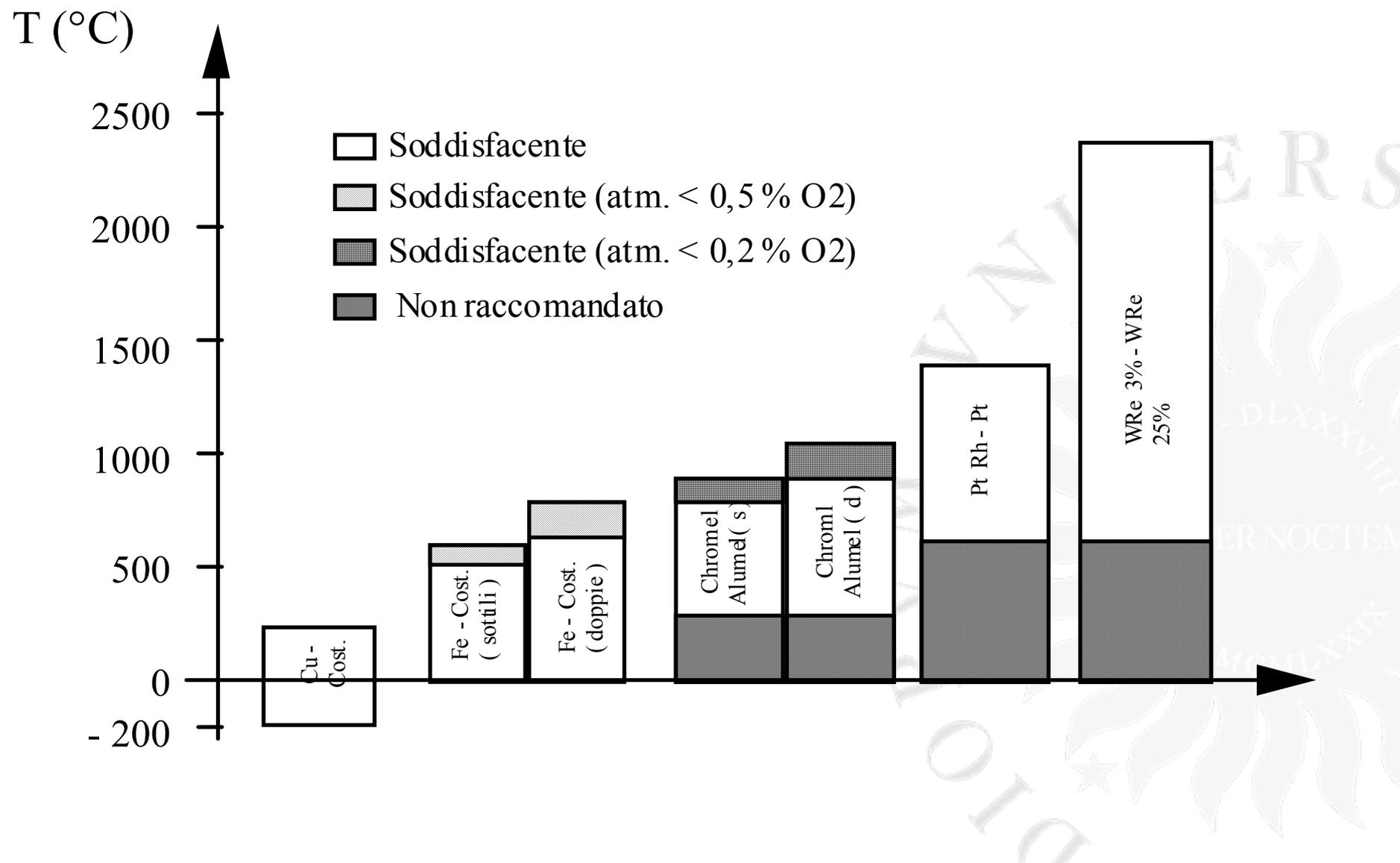
Quindi se un terzo metallo è inserito nel circuito e le estremità di tale metallo sono tenute isoterme non si verificano variazioni di fem

III legge delle temperature intermedie

La f.e.m. termica di una coppia avente i giunti a temperatura T1 e T2 è la somma algebrica delle f.e.m. delle stesse coppie aventi i giunti ordinatamente alle temperature T1, T3 e T3, T2

$$E_{T1,T2} = E_{T1,T3} + E_{T3,T2}$$

Termocoppie normalizzate





Termometri a Radiazione



Il **CORPO NERO** È il perfetto assorbitore ed il perfetto emettitore utilizzato come riferimento per le misure delle proprietà radiative del materiale.

L'equazione di Planck:

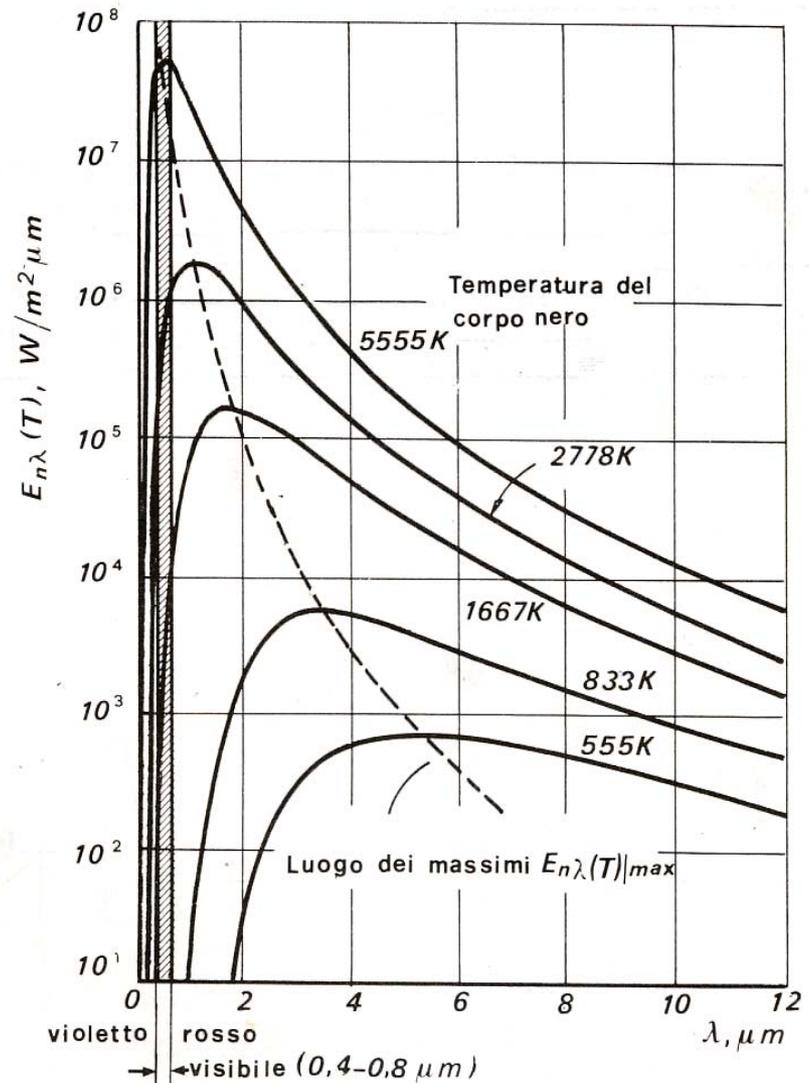
$$E_{n\lambda}(T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{c_2/\lambda T} - 1 \right)}$$

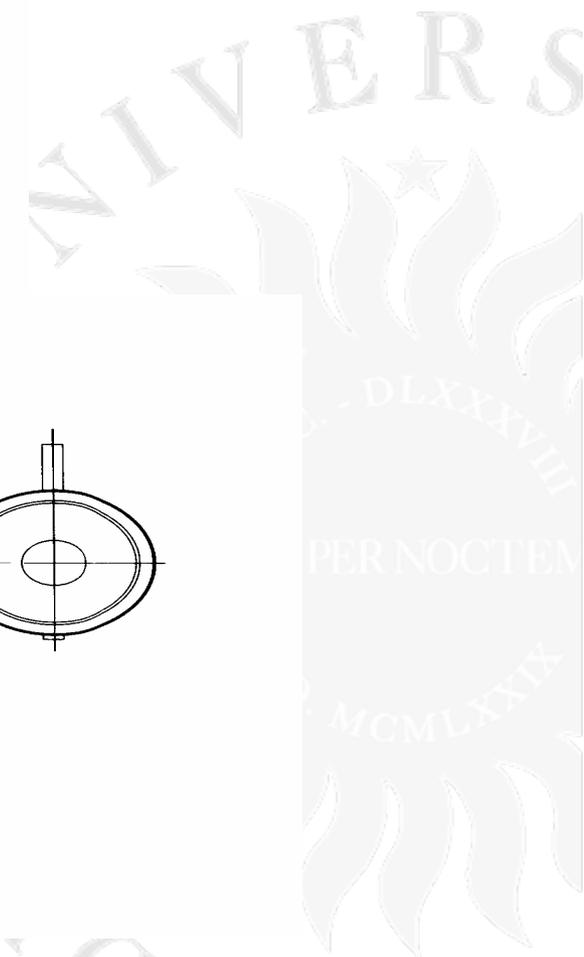
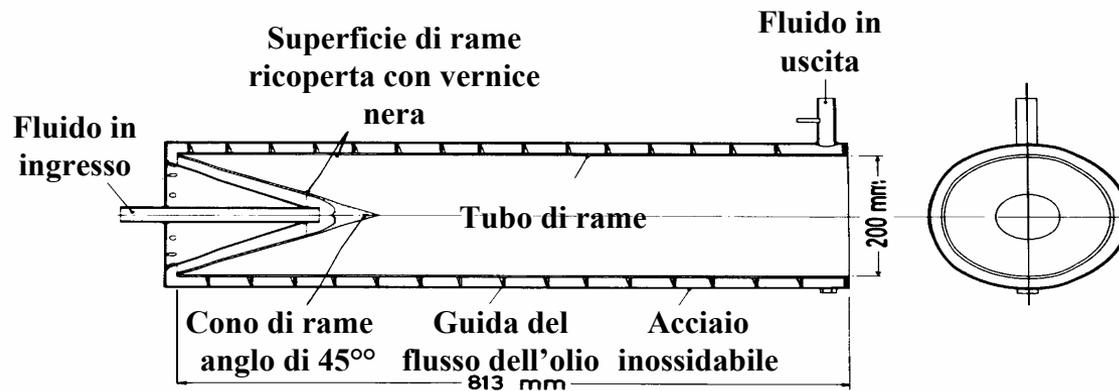
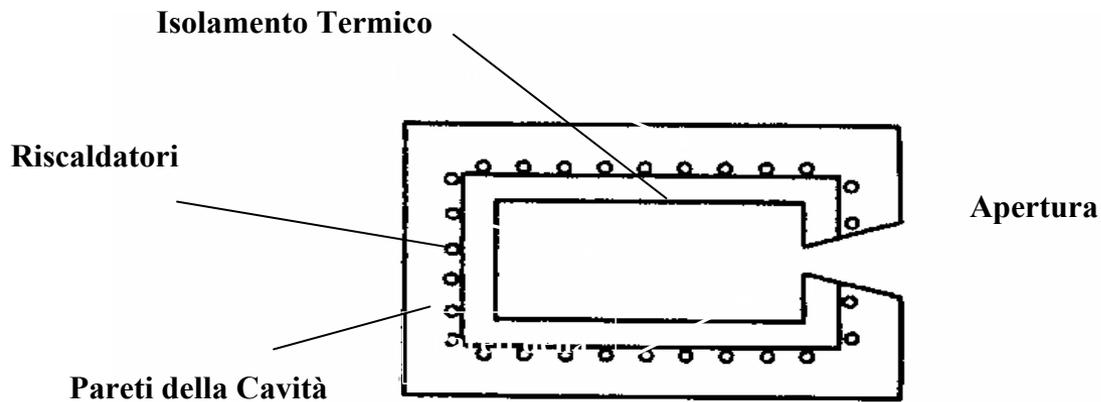
L'equazione di Wien:

$$\lambda_{\max} \cdot T = C^3$$

L'equazione di Stefan-Boltzmann:

$$E_n(T) = \sigma \cdot T^4$$





Emettitori diversi dal corpo nero:

I processi che impediscono ai corpi reali di comportarsi come un corpo nero sono tre:

- una frazione della radiazione incidente può essere assorbita α ,
- una frazione può essere riflessa ρ ,
- un'altra può essere trasmessa τ .

Per il principio di conservazione dell'energia:

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1$$

