
Sensori di temperatura

After time, temperature is the second most measured physical unit

(Dopo il tempo, la temperatura è l'unità fisica più misurata)



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Meccanismi di trasduzione della temperatura

- Modifiche delle dimensioni fisiche
 - Termometri bimetallici (*bimetallic thermometers*)
 - Termometri a bulbo (*filled-bulb thermometers*)
- Modifiche delle proprietà elettriche
 - Termocoppie (*thermocouples*)
 - Termoresistenze (RTD, *Resistance Temperature Detectors*)
 - Termistori (*thermistors*)
 - Sensori a circuito integrato (IC, *integrated circuit transistors and diodes*)
- Modifiche della fase chimica
 - Termometri ai cristalli di quarzo (*quartz crystal thermometers*)
- Modifiche della radiazione termica emessa
 - Pirometri a radiazione/infrarossi (*radiation/infrared pyrometers*)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie (*thermocouples*)

- Grandezza misurata: differenza di temperatura
- Grandezza in uscita: tensione
- Tipo di sensore:
 - autoeccitante (termoelettrico)
 - non linearità sistematica (compensazione con tabelle o polinomi interpolanti)

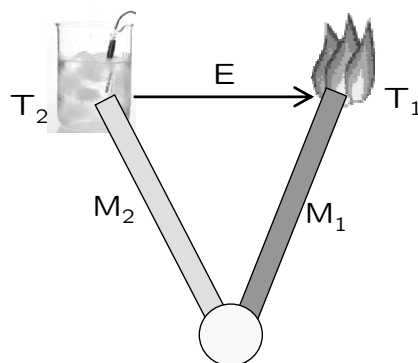


- temperature: $-200 \div 2760 \text{ }^\circ\text{C}$
- tensioni in uscita: $-10 \div 50 \text{ mV}$
- sensibilità: $10 \div 50 \text{ } \mu\text{V}/^\circ\text{C}$

È il sensore più usato nell'industria per le misure di temperatura

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: Principio di funzionamento



- Le termocoppie operano secondo il principio per cui in un circuito costituito dalla connessione di **due metalli diversi** si produce una differenza di potenziale elettrico (o forza elettromotrice, *emf-electromotive force*) qualora le due estremità siano poste a **temperatura diversa**

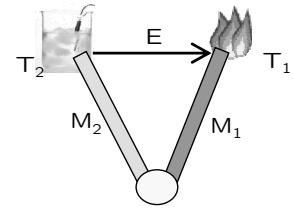
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: Principio di funzionamento



Thomas Johann Seebeck (1770-1831)

Nel 1821 Seebeck osservò l'esistenza di una tensione elettrica ai capi di una giunzione di metalli di diverso tipo quando gli estremi sono sottoposti a diverse temperature (effetto Seebeck)



William Thomson (Lord Kelvin) (1824 - 1907)

Thomson osservò che un conduttore, con una estremità posta ad una temperatura T_1 e con l'altra ad una temperatura T_2 , attraversato da una corrente elettrica, sviluppa calore (1857).



Jean-Charles-Athanase Peltier (1785 - 1845)

Peltier scoprì che quando una corrente elettrica percorre un circuito a due conduttori uno dei punti di contatto genera calore e l'altro assorbe calore (1834). È il duale dell'effetto Seebeck.



L'effetto Thomson di solito è molto minore dell'effetto Peltier

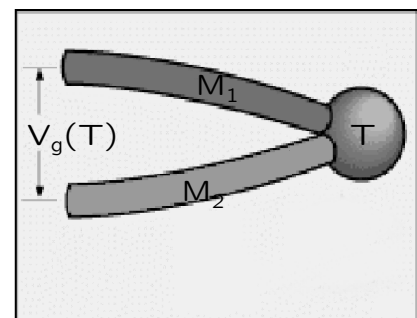
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: Effetto Seebeck

Differenza di potenziale ai capi della giunzione:

$$V_g(T) = \frac{1}{e}(P_1(T) - P_2(T))$$

- $P_1(T)$ = potenziale elettrochimico metallo M_1
- $P_2(T)$ = potenziale elettrochimico metallo M_2
- e = carica dell'elettrone

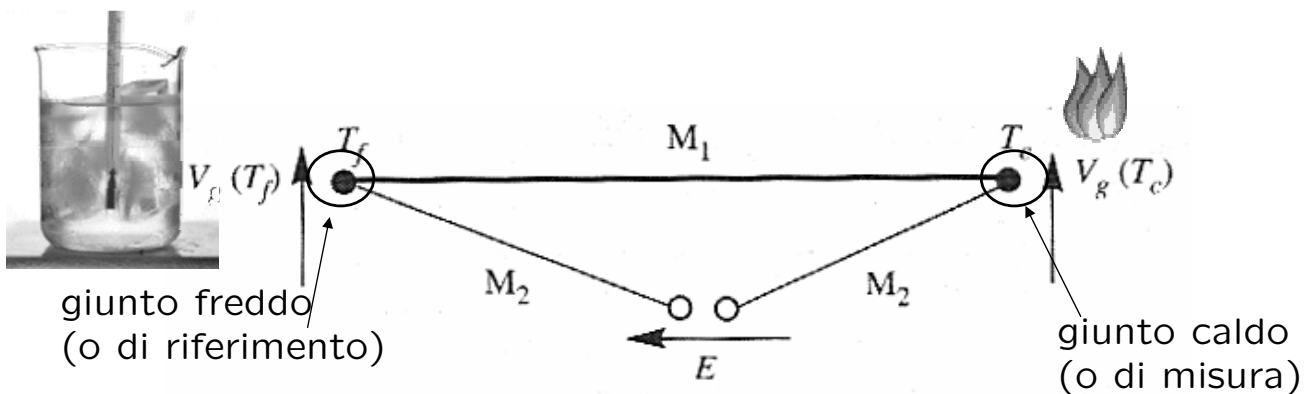


V_g non è facilmente rilevabile, perché collegando un voltmetro si formano altre giunzioni che influiscono sulla misura

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: Effetto Seebeck

- Due giunzioni a temperature diverse T_c , T_f :



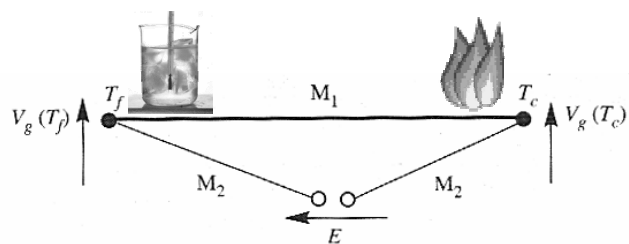
$$E(T_c)|_{T_f=T_f} = V_g(T_c) - V_g(T_f) = \frac{1}{e} [P_1(T_c) - P_2(T_c) + P_2(T_f) - P_1(T_f)]$$

- Il collegamento di un voltmetro ai morsetti, se i terminali del voltmetro sono dello stesso materiale metallico M_3 e i morsetti sono alla stessa temperatura T_3 , non influisce sulla misura di E

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: Calcolo della tensione

- La funzione $E(T_c)$ è riportata nei data sheet, in forma tabellare e con risoluzione di $1\text{ }^\circ\text{C}$, per $T_f=0\text{ }^\circ\text{C}$



- Come calcolare $E(T_c)$ per $T_f \neq 0\text{ }^\circ\text{C}$?

$$\begin{aligned} E(T_c)|_{T_f=\bar{T}_f} &= V_g(T_c) - V_g(\bar{T}_f) \\ &= V_g(T_c) - V_g(0) + V_g(0) - V_g(\bar{T}_f) \\ &= E(T_c)|_{T_f=0} - E(\bar{T}_f)|_{T_f=0} \end{aligned}$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: Calcolo della tensione

- Esempio:

Temperatura giunto freddo: $\bar{T}_f = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

Dal voltmetro: $E(T_c)|_{T_f=\bar{T}_f} = 17.994 \text{ mV}$

Dalle tabelle: $E(30 \text{ }^\circ\text{C})|_{T_f=0} = 1.536 \text{ mV}$

Da cui si ricava: $E(T_c)|_{T_f=0} = 1.536 + 17.994 = 19.530 \text{ mV}$

Dalle tabelle si ricava: $T_c = 358 \text{ }^\circ\text{C}$



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: Alcune semplici regole

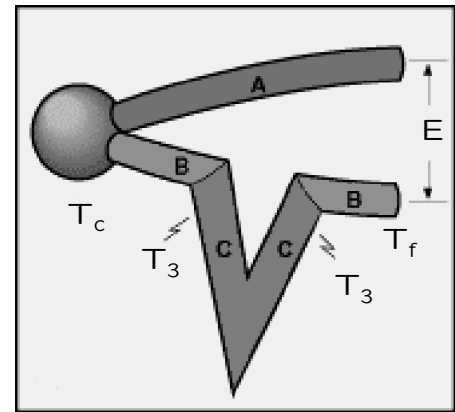
1) Per avere una tensione di uscita utilizzabile nelle applicazioni, una termocoppia deve contenere (almeno):

- due metalli di tipo diverso
- due giunzioni
- due temperature diverse

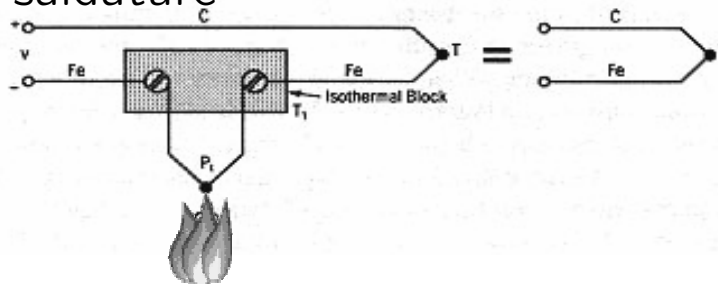
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Legge del metallo intermedio

2) L'inserimento di un terzo metallo all'interno del circuito della termocoppia non cambia la tensione in uscita, purché le due nuove giunzioni siano alla stessa temperatura e il materiale inserito sia omogeneo



Esempio: saldature



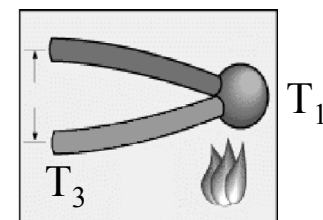
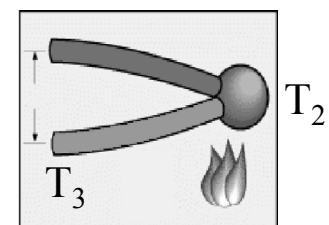
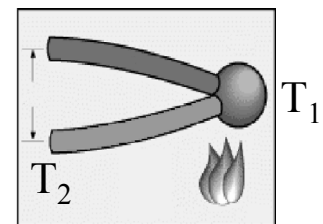
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Legge delle temperatura intermedia

3) Se una termocoppia sviluppa una tensione E_{12} quando la giunzione è alle temperature T_1 , T_2 , e una tensione E_{23} quando alle temperature T_2 , T_3 , allora quando posta alle temperature T_1 , T_3 svilupperà una tensione

$$E_{13} = E_{12} + E_{23}$$

$$\begin{aligned} E(T_1)|_{T_f=T_3} &= V_g(T_1) - V_g(T_3) \\ &= V_g(T_1) - V_g(T_2) + V_g(T_2) - V_g(T_3) \\ &= E(T_1)|_{T_f=T_2} - E(T_2)|_{T_f=T_3} \end{aligned}$$



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

- 4) Se una termocoppia composta dai metalli A e C, sottoposta alle temperature T_1, T_2 , genera una tensione E_{AC} , e una termocoppia composta dai metalli C e B, sottoposta alle medesime temperature, genera una tensione E_{CB} , allora una termocoppia composta dai metalli A e B, sottoposta alle medesime temperature, svilupperà una tensione

$$E_{AB} = E_{AC} + E_{CB}$$

Talvolta è utile in fase di calibrazione

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

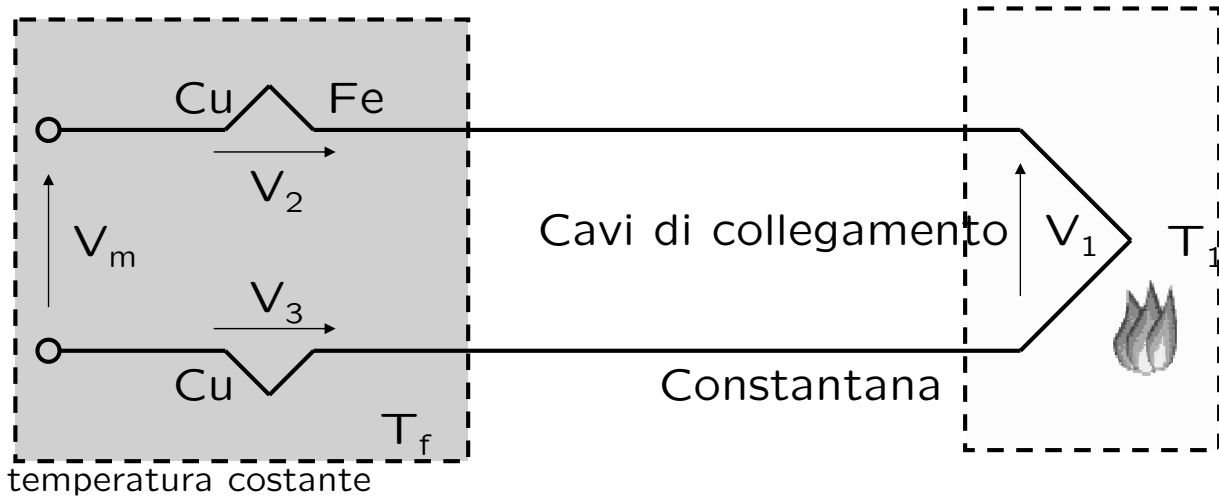
- 5) Variazioni di temperatura nei cavi di collegamento non alterano la tensione di uscita, purché i cavi di collegamento siano di materiale omogeneo

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: problemi di collegamento

Problemi:

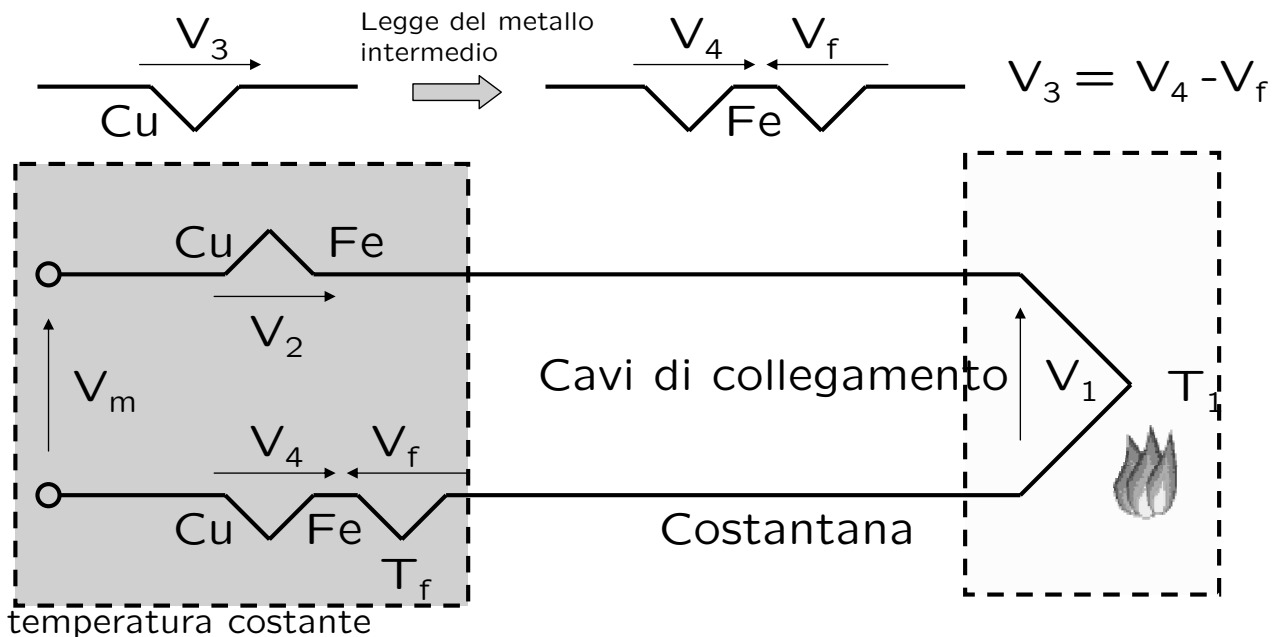
- Giunzioni parassite dovute ai collegamenti
- Necessità di conoscere T_f



$$V_m = V_1 - V_2 + V_3$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: problemi di collegamento



$$V_m = V_1 - \cancel{V_2} + \cancel{V_4} - V_f \rightarrow V_1 = V_m + V_f$$

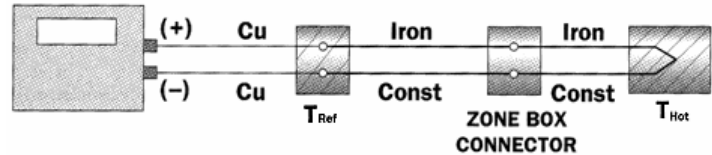
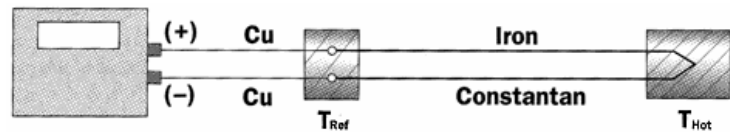
- V_f = tensione generata da una termocoppia (dello stesso tipo di quella di misura) a temperatura T_f

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Temperatura di riferimento e *zone box*

Problema: occorre conoscere la temperatura T_f !

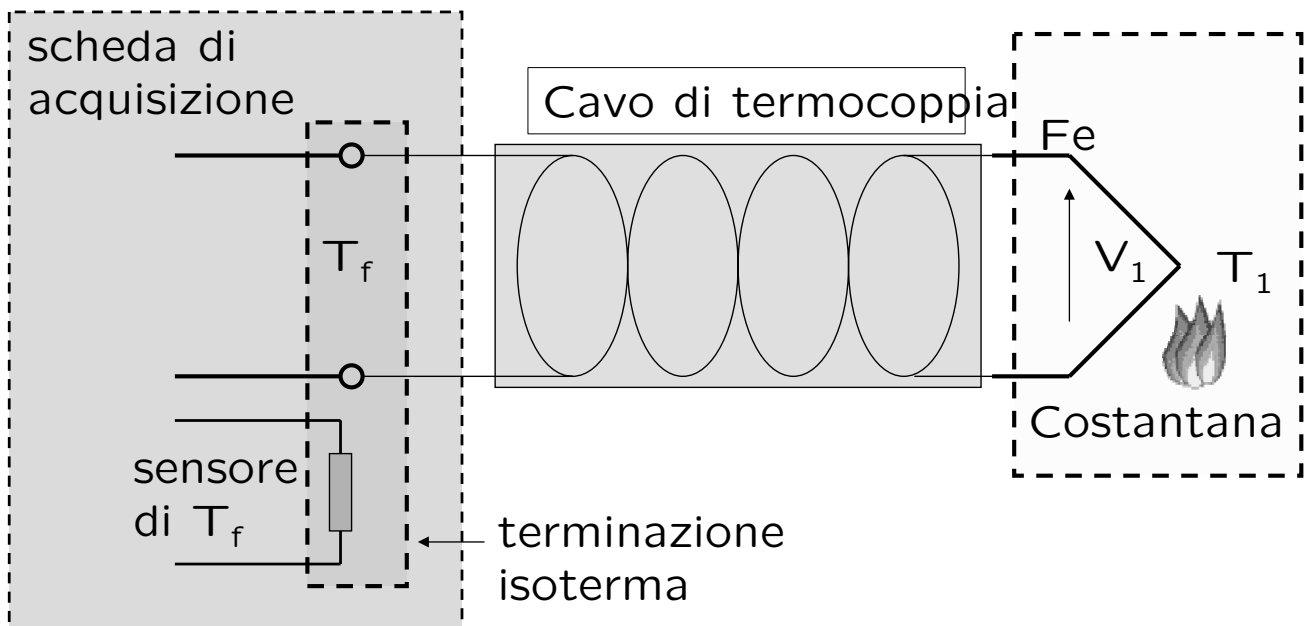
- Bagno di ghiaccio (*ice bath*)
 - Accurato ed economico
- Riferimento controllato elettronicamente
 - Richiede una calibrazione periodica. Non così stabile come il bagno di ghiaccio, ma senz'altro più semplice
- Sistema di compensazione della temperatura di riferimento (compensazione del "giunto freddo")
 - Un sensore di temperatura all'interno dello chassis misura la temperatura del giunto freddo. Tale misura viene utilizzata per calcolare la temperatura misurata dalla termocoppia



Zone box: è una zona a temperatura uniforme che assicura che tutte le connessioni all'interno della zona stessa siano alla stessa temperatura

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: compensazione del giunto freddo



Cavi di termocoppia: cavi omogenei con quelli della termocoppia (per non generare tensioni al contatto). Più costosi dei normali cavi di rame per vincoli di purezza, omogeneità, resistenza alla temperatura

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: Compensazione del giunto freddo

Algoritmo di compensazione del giunto freddo

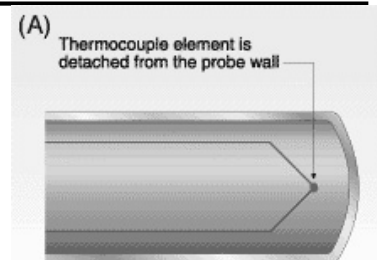
- si misura T_f con un sensore a semiconduttore
- si converte la T_f in una tensione equivalente V_f mediante la tabella (o polinomio) della termocoppia di misura
- alla tensione misurata V_m si somma V_f ricavata dalla tabella per trovare la tensione equivalente V_1 della termocoppia di misura con giunzione fredda a $0\text{ }^\circ\text{C}$
- si converte la tensione V_1 nella corrispondente temperatura mediante la tabella (o il polinomio)
- misura di temperatura (alta) ottenuta mediante un'altra misura di temperatura (bassa)
- più semplice perchè a valori prossimi a T_{amb}

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sonda protettiva o pozzetto (*probe*)

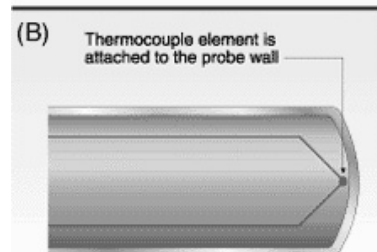
A. Giunzione protetta isolata (*ungrounded*)

- La giunzione non è attaccata alla sonda. Si ottiene l'isolamento elettrico, al prezzo però di un aumento del tempo di risposta



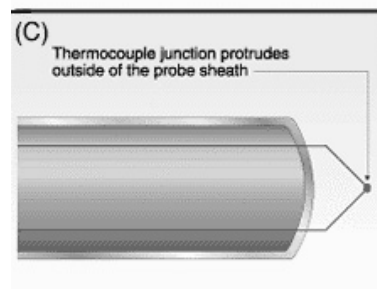
B. Giunzione protetta a massa (*grounded*)

- La giunzione è fisicamente attaccata alla sonda. Si ha un buon trasferimento di calore e quindi tempo di risposta più breve



C. Giunzione esposta (*exposed*)

- La giunzione è esposta all'ambiente circostante. Si ha il tempo di risposta migliore, ma non è utilizzabile in ambienti corrosivi o sotto pressione.



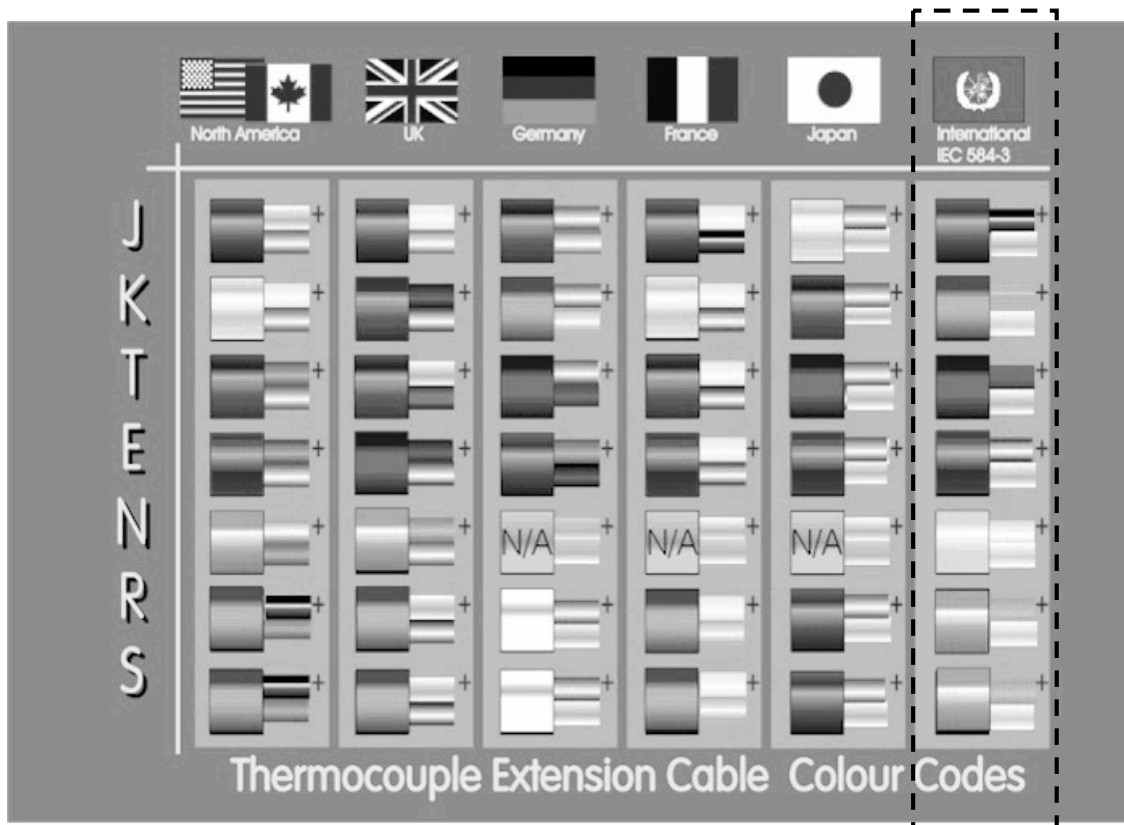
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

- Dipende da diversi requisiti:
 - Range di temperatura
 - Accuratezza desiderata
 - Problemi di compatibilità chimica
 - Resistenza all'abrasione e alla vibrazione
 - Vincoli di installazione (dimensioni dei cavi)
 - Conduzione termica desiderata

Termocoppie: pro e contro

- Difetti:
 - relativamente poco accurate (per disomogeneità)
 - necessità delle sonde protettive
 - tempi di risposta lunghi (a causa della sonda)
 - caratteristica non lineare (su ampi intervalli di T)
- Pregi:
 - autoeccitante
 - poco costose
 - funzionamento in ambienti critici
 - range di temperature molto ampio (versatilità)
 - cavi di collegamento anche lunghi
- Sensore di temperatura standard:
 - Nelle applicazioni ad altissima temperatura
 - Nelle applicazioni a basso costo (es: domestiche)

Codice dei colori



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Codice dei colori

Colour Code Cross Reference

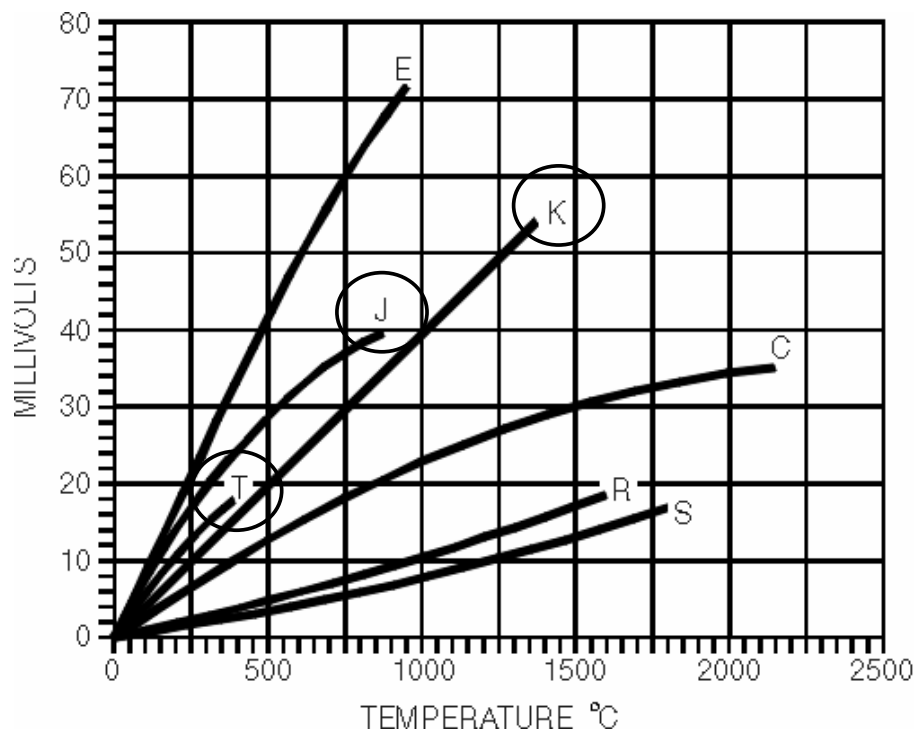
Type (Cable Code)	Conductors (+/-)	Insulation colour codes					
		British BS 1843:1952 (obsolete)			IEC 584-3		
		Sheath	+ve	-ve	Sheath	+ve	-ve
E (EX)	NICKEL CHROMIUM/CONSTANTAN <small>(nickel Chromium/Copper-Nickel, Chromel/Constantan, T1/Advance, NiCr/Constantan)</small>	Br	Br	Bl	Pp	Pp	Wh
J (JX)	IRON*/CONSTANTAN <small>(Iron/Copper-Nickel, Fe/Konst, Iron/Advance, Fe/Constantan, I/C)</small>	Bk	Yw	Bl	Bk	Bk	Wh
K (KX)	NICKEL CHROMIUM/NICKEL ALUMINIUM* <small>(NiCrNA, Chromel/Alumel, C/A, T1/T2, NiCr/Ni, NiCr/NiAl)</small>	Rd	Br	Bl	Gn	Gn	Wh
N (NX), (NC)	NICROSIL/NISIL	Og	Og	Bl	Pk	Pk	Wh
T (TX)	COPPER/CONSTANTAN <small>(Copper/Copper-Nickel, Cu/Con, Copper/Advance)</small>	Bl	Wh	Bl	Br	Br	Wh
VX (KCB)	COPPER/CONSTANTAN (LOW NICKEL) <small>(Cu/Constantan) Compensating for 'K' (Cu/Constantan)</small>	Rd	Wh	Bl	Gn	Gn	Wh
U (RCA), (SCA)	COPPER/COPPER NICKEL <small>Compensating for Platinum 10% or 13% Rhodium/Platinum (Code S and R respectively) Copper/Cupronic, Cu/CuNi, Copper/No. 11 Alloy)</small>	Gn	Wh	Bl	Og	Og	Wh

KEY : Bl-Blue Bk-Black Br-Brown Gn-Green Og-Orange Pk-Pink Pp-Purple Rd-Red Wh-White Yw-Yellow

Note : For THERMOCOUPLE CONNECTORS body colours are as outer sheath colours above.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Grafici temperatura-tensione



Le termocoppie di tipo T, J, e K sono le più utilizzate

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Thermocouple Material

Copper-Constantan (T Curve)

- The Copper-Constantan thermocouple, with a positive copper wire and a negative Constantan wire is recommended for use in mildly oxidizing and reducing atmospheres up to 400°C. They are suitable for applications where moisture is present. This alloy is recommended for low temperature work since the homogeneity of the component wires can be maintained better than other base metal wires. Therefore, errors due to the non-homogeneity of wires in zones of temperature gradients are greatly reduced.

Iron-Constantan (J Curve)

- The Iron-Constantan thermocouple with a positive iron wire and a negative Constantan wire is recommended for reducing atmospheres. The operating range for this alloy combination is 870°C for the largest wire sizes. Smaller wire sizes should operate in correspondingly lower temperatures.

Chromel-Alumel (K Curve)

- The Chromel-Alumel thermocouple, with a positive Chromel wire and a negative Alumel wire, is recommended for use in clean oxidizing atmospheres. The operating range for this alloy is 1260°C for the largest wire sizes. Smaller wires should operate in correspondingly lower temperatures.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Thermocouple Materials

Chromel-Constantan (E Curve)

- The Chromel-Constantan thermocouple may be used for temperatures up to 870°C in a vacuum or inert, mildly oxidizing or reducing atmosphere. At sub-zero temperatures, the thermocouple is not subject to corrosion. This thermocouple has the highest emf output of any standard metallic thermocouple.

Platinum-Rhodium (S and R Curve)

- Three types of noble-metal thermocouples are in common use. They are:
 - 1. The S curve shows a positive wire of 90% platinum and 10% rhodium used with a negative wire of pure platinum,
 - 2. The R curve indicates a positive wire of 87% platinum and 13% rhodium used with a negative wire of pure platinum, and
 - 3. (not shown) a positive wire of 70% platinum and 30% rhodium used with a negative wire of 94% platinum and 6% rhodium.
- They have a high resistance to oxidation and corrosion. However, hydrogen, carbon and many metal vapors can contaminate a platinum-rhodium thermocouple.
- The recommended operating range for the platinum-rhodium alloys is 1540°C, although temperatures as high as 1780°C can be measured with the Pt-30% Rh Vs Pt-6% Rh alloy combination.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Thermocouple Materials

Tungsten-Rhenium (C Curve)

- Three types of tungsten-rhenium thermocouples are in common use for measuring temperatures up to 2760°C. These alloys have inherently poor oxidation resistance and should be used in vacuum, hydrogen or inert atmospheres.

Tipo	Coppie metalli/leghe	Range normale [°C]	Range esteso [°C]
J	ferro/costantana*	-100÷750	-200÷1100
K	chromel**/alumel***	0÷1100	-100÷1370
E	chromel/costantana	-150÷500	-200÷1000
T	rame/costantana	-200÷300	230:400
B	Pt80/Rh20/Pt94-Rh6	600÷1650	100÷820
S	Pt90-Rh10/Pt	550÷1500	0÷1700
R	Pt90-Rh13/Pt	550÷1500	0:1700
N	Nicrasil-nichel	0÷1300	

* Costantana: lega rame-nichel

** Chromel: lega nichel-cromo

*** Alumel: lega nichel-alluminio-silicio

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Caratteristiche tecniche principali

		J	K	T	B	E	S	R	N
T_{min}	°C	0	-200	-200	100	-200	0	0	0
T_{max}	°C	750	1250	350	820	900	1700	1450	1300
$*V_{max}$	mV	42	51	18		69		17	
Errore	°C	2.2	2.2	0.8		1.7		1.4	
Altro	<ul style="list-style-type: none"> • basso costo • sensibilità alta • accuratezza moderata <ul style="list-style-type: none"> • basso costo • sensibilità moderata • bassa accuratezza • resistenza all'ossidazione <ul style="list-style-type: none"> • costo contenuto • sensibilità moderata • alta accuratezza • adatta a basse temp. 								

*Le V_{max} sono riportate ipotizzando la giunzione di riferimento a 0 °C

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

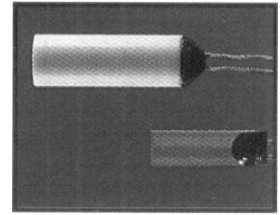
Sensori di temp. resistivi e a semiconduttore

- La resistenza elettrica di diversi materiali cambia con le variazioni di temperatura, in maniera riproducibile. Questo è il principio alla base del funzionamento sia delle termoresistenze che dei termistori
- Termoresistenze (RTD, *resistance temperature device or detector*): sono sensori di temperatura di precisione. Utilizzano un metallo conduttore (tipicamente un filo (*wire*) o uno strato metallico di platino) e ha un coefficiente di temperatura positivo (PTC, *positive temperature coefficient*): all'aumentare di T, la resistenza cresce pressoché linearmente.
- Termistori (thermistors): sono di materiale semiconduttore, hanno un elevato coefficiente di temperatura negativo (NTC, *negative temperature coefficient*): all'aumentare di T, la resistenza decresce.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

- Grandezza misurata: temperatura
- Grandezza in uscita: variazione di resistenza
- Tipo di sensore:
 - modulante (termoresistivo)
- Richiede un circuito per la trasformazione della resistenza in tensione

- Temperature: $-200 \div 700 \text{ }^\circ\text{C}$



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termoresistenze: principio di funzionamento

- Ogni metallo ha una resistività specifica ρ che varia con la temperatura

$$\rho(T) = \rho_0 \left(1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \gamma(T - T_0)^3 \right)$$

α , β , γ sono determinate sperimentalmente
 ρ_0 è la resistività misurata alla temperatura di riferimento T_0
(solitamente $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$)

- Per piccole variazioni di temperatura, β e γ sono trascurabili
- La resistenza di un filo metallico risulta:

$$R(T) = \rho(T) \frac{L}{A}$$

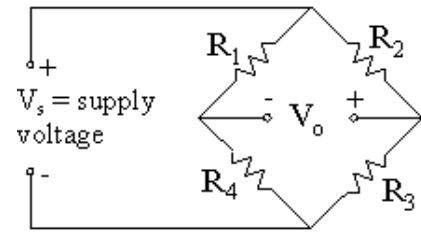
L = lunghezza del filo metallico
 A = area della sezione

- Esempio (platino, Pt100): $R_0 = 100 \text{ } \Omega$
Sensitività: $\frac{\Delta R}{\Delta T} = \rho_0 \alpha \frac{L}{A} = 0.392 \text{ } \Omega / \text{ }^\circ\text{C}$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Ponte di Wheatstone (*Wheatstone Bridge*)

- Circuito costituito da quattro resistori (R_1, R_2, R_3, R_4), alimentato da una tensione V_s
- Ipotesi: lo strumento che misura V_0 ha impedenza infinita



- Si hanno due partitori di tensione:

$$V_0 = V_s \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} - \frac{R_4}{R_1 + R_4} \right)$$

- Il ponte si dice bilanciato se $V_0=0$:

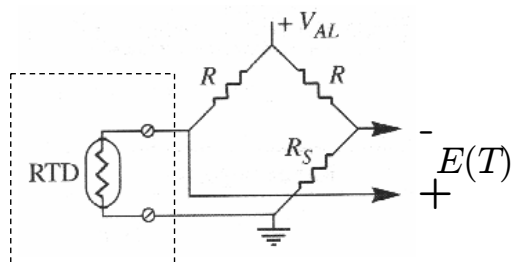
$$0 = V_s \frac{R_3 R_1 - R_4 R_2}{(R_2 + R_3)(R_1 + R_4)}$$

a. Risulta $R_3 R_1 = R_4 R_2$, ossia $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$

b. I resistori sono identici: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Trasduzione con ponte di Wheatstone



$$E(T) = V_{AL} \left(\frac{R(T)}{R + R(T)} - \frac{R_S}{R + R_S} \right)$$

- per bilanciare il ponte per $T=T_0$: $R_S = R(T_0)$
- definendo $\Delta R(T) = R(T) - R_S$:

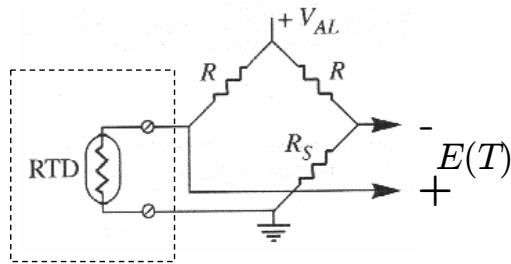
$$E(T) \approx V_{AL} \frac{\Delta R(T)}{R + R_S}$$

Nota: la RTD è percorsa da una corrente I e quindi dissipa una potenza $R(T)I^2$. Pertanto la temperatura T sarà maggiore della temperatura da misurare. Occorrerà quindi avere I molto piccola (es: 1 mA).

Regola empirica per calcolare la differenza di temperatura dovuta alla dissipazione termica: $\Delta T \approx \frac{R(T)I^2}{80 \div 100 \text{ mW}/^\circ\text{C}}$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Trasduzione con ponte di Wheatstone



$$E(T) \approx V_{AL} \frac{\Delta R(T)}{R + R_S}$$

• Esempio (Pt100):

- Range di temperatura: 0÷500 °C

- $T_0 = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ • $V_{AL} = 24 \text{ V}$ $\Delta R(500) \approx 200 \text{ } \Omega$

- $R_S = 100 \text{ } \Omega$ • $R = 24 \text{ k}\Omega$

$$I \approx 1 \text{ mA}$$

$$E(T) \approx 0.2 \text{ V}$$

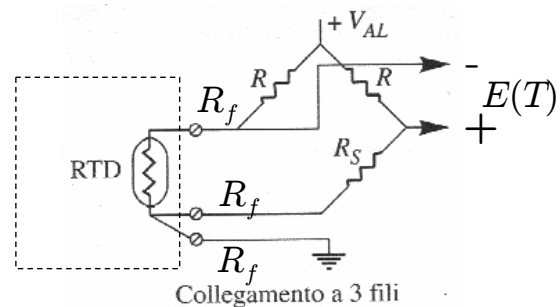
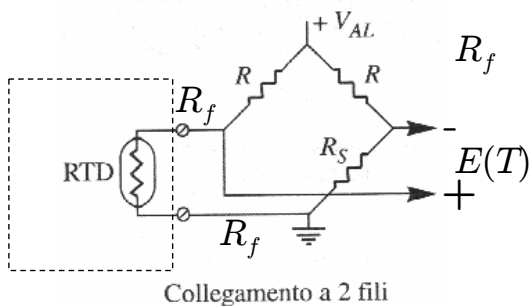
Sensitività (media):

$$S(T) = \frac{E(T) - E(T_0)}{T - T_0} = V_{AL} \frac{\Delta R(T)}{R + R_S} \frac{1}{T - T_0} \approx 4 \cdot 10^{-4} \text{ V}/^\circ\text{C}$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Trasduzione con ponte di Wheatstone

- Consideriamo adesso che la resistenza R_f dei fili di collegamento sia $\neq 0$:



- 2 fili:
$$E(T) = V_{AL} \left(\frac{R(T) + 2R_f}{R + R(T) + 2R_f} - \frac{R_S}{R + R_S} \right)$$

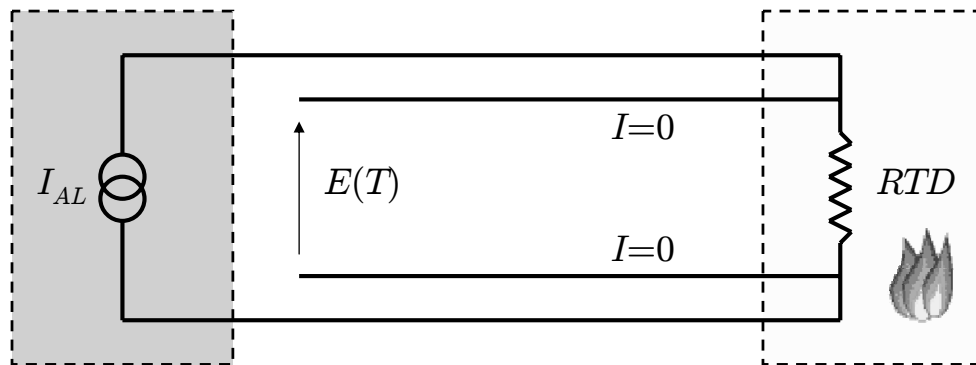
per bilanciare il ponte: $R_S = R_0 + 2R_f$
(R_S dipende da R_f)

- 3 fili:
$$E(T) \approx V_{AL} \frac{\Delta R(T)}{R + R_S + 3R_f}$$

Il ponte è ancora bilanciato per $R_S = R_0$
(R_S non dipende da R_f)

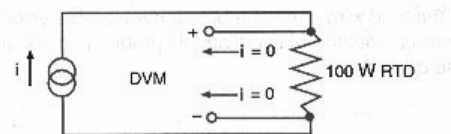
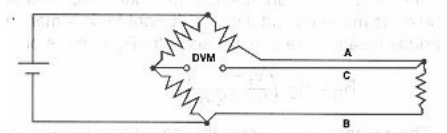
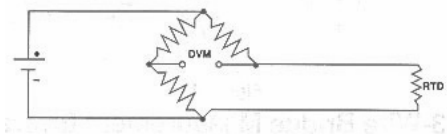
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

- 4 fili:



Termoresistenze: caratteristiche

- La resistenza dei cavi può essere non trascurabile
 - 2-fili: se i cavi di collegamento sono molto corti (o non ci sono)
 - 3-fili: compensa bene la resistenze parassite dei cavi.
 - 4-fili: si ottiene la accuratezza/precisione migliore.
- Tempi di risposta lenti
- Sensibile a shock e vibrazioni
- Autoriscaldamento



Termoresistenze: caratteristiche

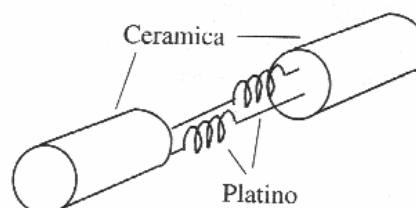
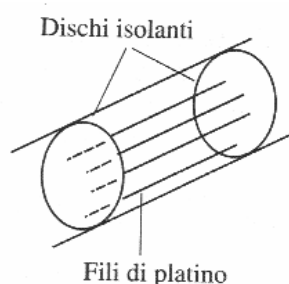
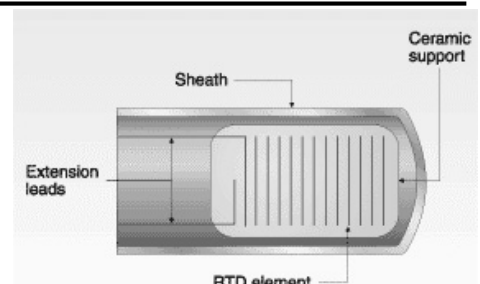
RTD	Range normale
Pt: 100 Ω DIN (4376)	-180÷800 °C
Pt: 100 Ω JIS (C-1604)	-180÷650 °C
Ni: 120 Ω Ed#7	-45÷315 °C
Cu: 10 Ω	-20÷250 °C

- Bassa resistenza
 - da 100 Ω (tipico) fino a 1000 Ω
- Range operativo piuttosto ampio: (-200 °C to 850 °C)
- Sensitività elevata (rispetto alle termocoppie)
- Accuratezza elevata (da ± 0.0006 °C a 0.1°C)
- Ripetibilità e stabilità ottime
 - Deriva (*drift*) anche molto bassa (0.0025 °C/year)
 - Nei componenti industriali: drift < 0.1 °C/year

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termoresistenze: caratteristiche

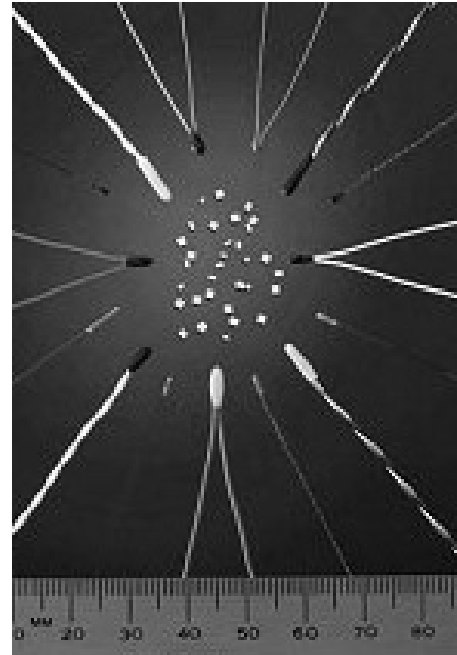
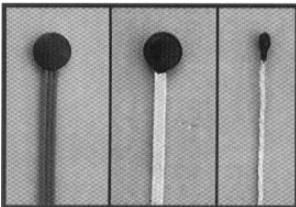
- Tipi di metallo:
 - Platino (high cost, highly linear, most common)
 - Tungsteno (highly linear)
 - Rame (*Copper*) (lower temperature ranges)
 - Nichel (lower temperature, low cost, nonlinear)
 - Leghe di nichel (lower temperature, low cost)



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termistori (*Thermistors*)

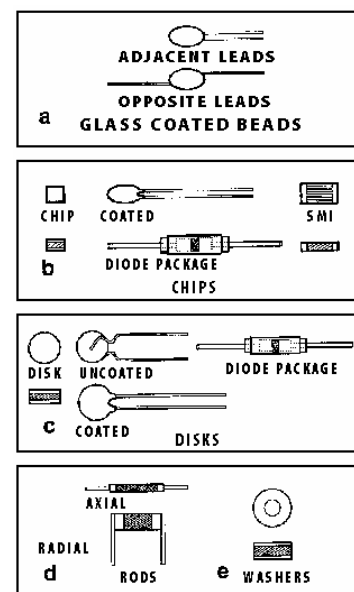
- Resistenza elevata: da 1 k Ω a 100 k Ω
 - Non ci sono grossi problemi di resistenze parassite dei cavi
- R(T) altamente non lineare
 - Solitamente NTC (ossidi metallici), ma anche di tipo PTC (miscela di titanato di stronzio e bario)
- Piccole dimensioni (ordine del mm)
 - Tempi di risposta molto brevi
- Costano meno delle termoresistenze
- Sensibilità e risoluzione molto elevate
 - Fino a 1000 volte più sensitive delle RTD
- Accuratezza fino a 0.1 °C



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termistori: svantaggi

- Range di temperatura di un singolo componente abbastanza piccolo
(es: 0÷100 °C)
 - I termistori misurano un range di temperature compreso di solito fra -50 °C e 250 °C
(ma si arriva anche a -200÷1000 °C)
- L'autoriscaldamento è più problematico che nelle RTD
- Meno stabili delle RTD



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Relazione resistenza-temperatura (NTC)

$$R(T) = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

- R_0 = resistenza di riferimento misurata alla temperatura T_0

- T = temperatura misurata (K)

- β = costante del materiale

- Invertendo: $\log R = \log R_0 + \beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$

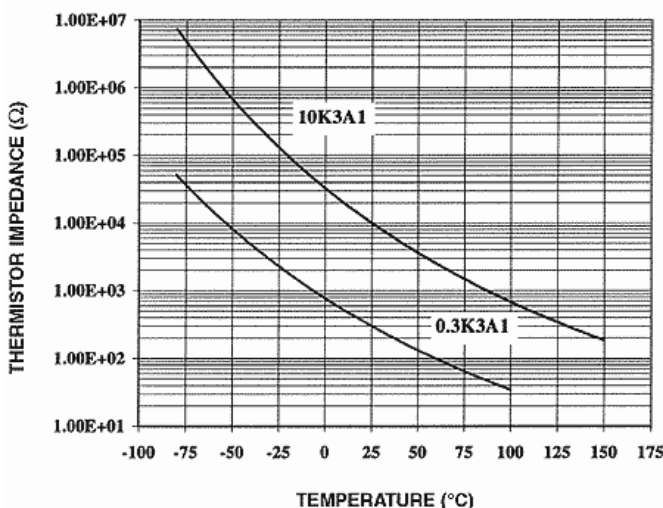
$$\Rightarrow \frac{1}{T} = \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{\beta} \log R_0 \right) + \frac{1}{\beta} \log R$$

$$\Rightarrow \frac{1}{T} = A + B \log R$$

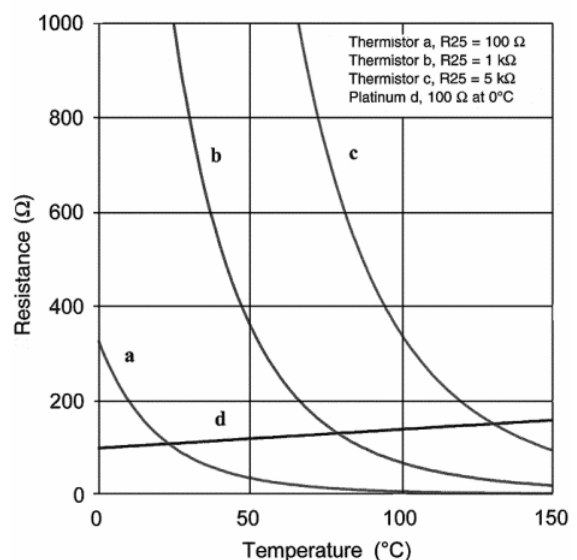
- Sensitività $S(T) = \frac{dR}{dT} = -\frac{R_0 \beta}{T^2} e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di temp. resistivi e a semiconduttore



Comparative Resistance Graph
Thermistor vs. RTD



Schema di collegamento:

- ponte di Wheatstone
- collegamento a 4 fili

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori a circuito integrato (*IC thermometer*)

- I sensori a circuito integrato contengono un sensore di temperatura e la relativa circuiteria per il condizionamento del segnale. Viene talvolta usato nei circuiti di compensazione della temperatura.
- La tensione (o corrente) di uscita è molto lineare nella temperatura.
 - Richiede una tensione di ingresso al sensore
 - Alcuni dispositivi digitalizzano il segnale e lo rendono disponibile su un'uscita seriale
- Accuratezza: circa 0.5 °C
- Basso costo
- Poco sensibile a rumori di tensione e alle resistenze parassite dei cavi di collegamento
- Range temperature: < 200 °C
- Dinamica: lenta
- Problemi dovuti all'autoriscaldamento

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori a circuito integrato (*IC thermometer*)

LM35, LM45 Celsius Sensors

The LM35 and LM45 are three-terminal devices that produce output voltages proportional to °C (10mV/°C), so the nominal output voltage is 250mV at 25°C and 1.000V at 100°C. These sensors can measure temperatures below 0°C by using a pull-down resistor from the output pin to a voltage below the "ground" pin (see the "Applications Hints" section). The LM35 is more accurate ($\pm 1^\circ\text{C}$ from -55°C to $+150^\circ\text{C}$ vs. $\pm 3^\circ\text{C}$ from -20°C to $+100^\circ\text{C}$), while the LM45 is available in the "Tiny" SOT-23 package. The LM35 is available in the plastic TO-92 and SO-8 packages, and in the TO-46 metal can.

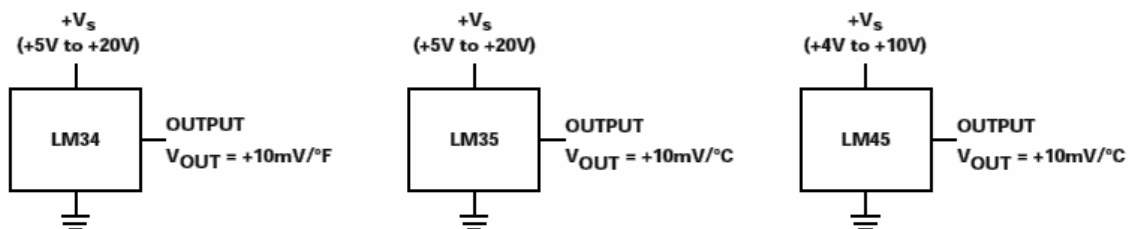
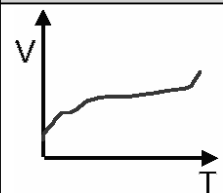
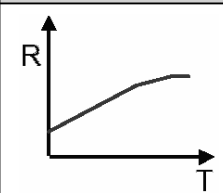
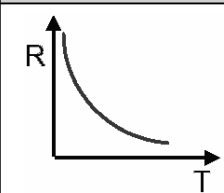
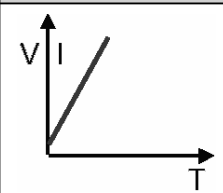


Figure 3.2. LM34, LM35, LM45 Typical Connections. Each IC is essentially a 3-terminal device (supply, ground, and output), although some are available in packages with more pins.



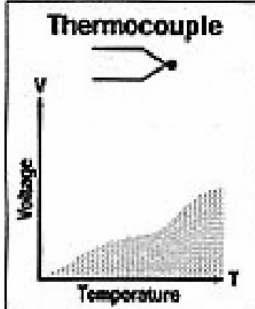
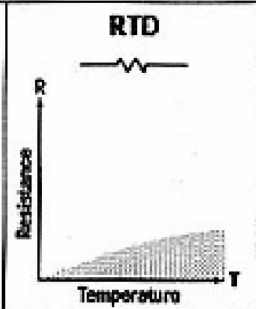
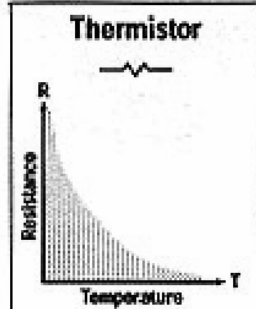
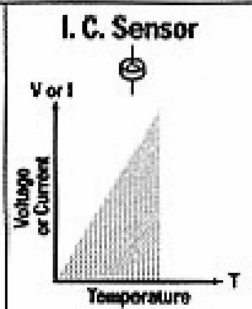
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di temperatura: Confronti

	Termocoppie	RTD	Termistori	Sensori IC
				
Pro	<ul style="list-style-type: none"> •autoeccitante •semplice •robusto •economico 	<ul style="list-style-type: none"> •stabile •accurato •lineare 	<ul style="list-style-type: none"> •sensibile •veloce •misura a 2 fili 	<ul style="list-style-type: none"> •lineare •output elevato •Economico
Contro	<ul style="list-style-type: none"> •non lineare •bassa V out •richiede T_{ref} •sensibilità 	<ul style="list-style-type: none"> •costosa •R bassa •autoriscald. 	<ul style="list-style-type: none"> •non lineare •range •autoriscald. 	<ul style="list-style-type: none"> •$T < 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ •alimentazione •lento •autoriscald.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di temperatura: Confronti

	Thermocouple	RTD	Thermistor	I. C. Sensor
				
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> • Self-powered • Simple • Rugged • Inexpensive • Wide variety of physical forms • Wide temperature range 	<ul style="list-style-type: none"> • Most stable • Most accurate • More linear than thermocouple 	<ul style="list-style-type: none"> • High output • Fast • Two-wire ohms measurement 	<ul style="list-style-type: none"> • Most linear • Highest output • Inexpensive
Disadvantages	<ul style="list-style-type: none"> • Non-linear • Low voltage • Reference required • Least stable • Least sensitive 	<ul style="list-style-type: none"> • Expensive • Slow • Current source required • Small resistance change • Four-wire measurement 	<ul style="list-style-type: none"> • Non-linear • Limited temperature range • Fragile • Current source required • Self-heating 	<ul style="list-style-type: none"> • $T < 250^{\circ}\text{C}$ • Power supply required • Slow • Self-heating • Limited configurations

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di temperatura: Confronti

Table 1. Temperature Sensor Ranges

Sensor	Temperature Range (°C)	Temperature Range (°F)
Type K thermocouple	-200 to 1250	-328 to 2282
Type J thermocouple	0 to 750	32 to 1382
Type T thermocouple	-200 to 350	-328 to 662
Type E thermocouple	-200 to 900	-328 to 1652
Pt 100 RTD ($\alpha=0.00385$)	-200 to 850	-328 to 1562
Thermistor	-40 to 200	-40 to 392
IC sensor	-40 to 125	-40 to 257
Infrared thermometer	-18 to 1370	0 to 2500

Source: Omega Engineering

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di temperatura: Confronti

A Guide to Choosing between Thermocouples, Resistance Thermometers and Thermistors

Thermocouples Resistance Thermometers and Thermistors are in effect electrical temperature transducers and not direct-indicating thermometers such as mercury-in-glass devices.

In the majority of industrial and laboratory processes, the measurement point is usually remote from the indicating or controlling instrument. This may be due to necessity (e.g. an adverse environment) or convenience (e.g. centralised data acquisition). Devices are required which convert temperature into another form of signal, usually electrical and most commonly thermocouples, resistance thermometers and thermistors.

Alternative indirect techniques for sensing and measuring temperature include optical pyrometry, other non-contact (infra red), fibre-optic and quartz oscillation systems.

The use of thermocouples, resistance thermometers and thermistors requires some form of physical contact with the medium. Such contact can be immersion or surface depending on the sensor construction and the application.

Thermocouples Resistance Thermometers and Thermistors

Thermocouples essentially comprise a thermoelement (a junction of two specified dissimilar metals) and an appropriate two wire extension lead. A thermocouple operates on the basis of the junction located in the process producing a small voltage which increases with temperature. It does so on a reasonably stable and repeatable basis.

Resistance Thermometers utilise a precision resistor, the Ohms value of which increases with temperature (in the case of a positive temperature coefficient). Such variations are very stable and precisely repeatable.

Thermistors are an alternative group of temperature sensors which display a large value of temperature coefficient of resistance (usually negative, sometimes positive). They provide high sensitivity over a limited range

In practical terms, the alternative types of assembly utilise similar (in some case identical) construction but must be used in different ways depending on the application.

	Platinum Resistance Thermometer	Thermocouple	Thermistor
Sensor	Platinum-wire wound or flat-film resistor	Thermoelement, two dissimilar metals/alloys	Ceramic (metal oxides)
Accuracy (typical values)	0.1 to 1.0°C	0.5 to 5.0°C	0.1 to 1.5°C
Long term Stability	Excellent	Variable, prone to ageing	Good
Temperature range	-200 to 650°C	-200 to 1750°C	-100 to 300°C
Thermal response	Wirewound - slow Film - faster 1-50 secs typical	Sheathed - slow Exposed tip - fast 0.1 to 10 secs typical	Generally fast 0.05 to 2.5 secs typical
Excitation	Constant current required	None	Constant current required
Characteristic	PTC resistance	Thermovoltage	NTC resistance (some are PTC)
Linearity	Fairly linear	Most types non-linear	Exponential
Lead resistance effect	3 & 4 wire - low 2 wire - high	Short cable runs satisfactory	Low
Electrical "pick-up"/Interface	Rarely susceptible/ Bridge 2,3 or 4 wire	Susceptible/ Potentiometric input. Cold junction compensation required	Not susceptible/ 2 wire resistance
Vibration effects/shock	Wirewound - not suitable Film - good	Mineral insulated types suitable	Suitable
Output/characteristic	approx. 0.4 Ohms/°C	From 10µV/°C to 40µV/°C depending on type	-4% / °C
Extension Leads	Copper	Compensating cable	Copper
Cost	Wirewound - more expensive Film - cheaper	Relatively low cost	Inexpensive to moderate

Comments and values shown in this chart are generalised and nominal. They are not intended to be definitive but are stated for general guidance. The information given shows average application experience, but some of the considerations can be modified by special design or selection.

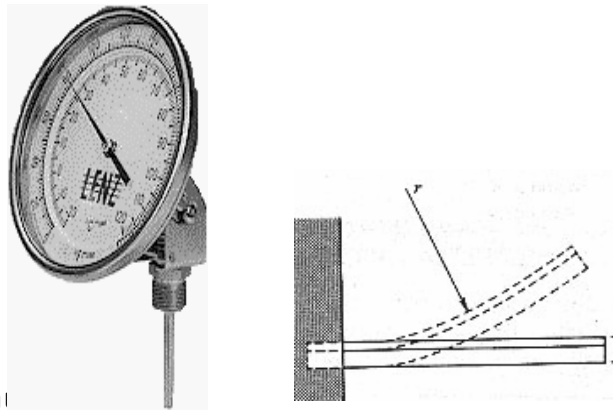
<http://www.labfacility.co.uk/temperature/guide.html>

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termometri bimetallici (*bimetal thermometers*)

- Costituiti da due lamine di metalli aventi coefficienti di temperatura diversi. Al variare della temperatura, la diversa espansione dei metalli provoca un'incurvatura. Fissando una delle due estremità, si può misurare la variazione di temperatura misurando la deflessione
 - Forma: a spirale o a elica
 - Usati spesso nei termostati (*thermostats*) [controllo on/off della temperatura]
 - Materiali: M_1 = ottone o nichelcromo, M_2 = invar (ferro con 36% nichel)

- Range di utilizzo:
 - Da -65 a 430 °C
- Accuratezza:
 - Da ± 0.5 a 12°C
- Vantaggi:
 - Basso costo
 - Manutenzione praticamente nulla
 - Stabile nel tempo

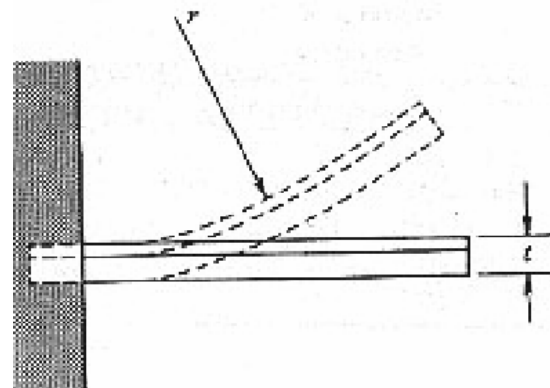


Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termometri bimetallici

- r = raggio di curvatura
- t = spessore totale
- m = rapporto fra gli spessori:
 - Spessore materiale con bassa espansione / spessore materiale ad alta espansione
- n = rapporto dei moduli di Young
 - modulo materiale con bassa espansione / modulo materiale ad alta espansione
- α_1 = coefficiente di espansione termica (1/°C), materiale a bassa espansione
- α_2 = coefficiente di espansione termica (1/°C), materiale ad alta espansione
- T = temperatura (°C)
- T_0 = temperatura con lamina bimetallica a riposo (°C)

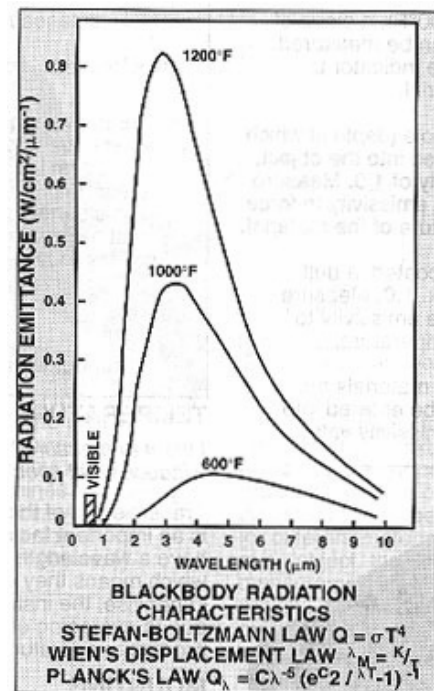
$$r = \frac{t\{3(1+m)^2 + (1+mn)[m^2 + (mn)^{-1}]\}}{6(\alpha_2 - \alpha_1)(T - T_0)(1+m)^2}$$



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termometri a infrarossi (Infrared Thermometers)

- L'infrarosso è la porzione dello spettro compresa fra lunghezze d'onda di 0.7 e 1000 μm
- Si basano sul principio che tutti gli oggetti a temperatura $> 0\text{ K}$ emettono energia nell'infrarosso
- I termometri all'infrarosso permettono di determinare la temperatura di un oggetto **SENZA CONTATTO**, misurando la quantità di energia emessa nell'infrarosso dall'oggetto.
- Gli attuali strumenti IR permettono di misurare il range compreso fra 0.7 e 20 μm



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Infrared Cameras



Operating Temperature	5 to 122 °F (-15 to 50 °C)
Measuring Temperature	-40 to 3630 °F (-40 to 2000 °C)
Accuracy	±2% of range or ±4 °F (±2 °C)
Sensitivity	0.2 °F (0.1 °C)
Image Storage Capacity	700 (14 bit) on 100 MB Card
Digital Voice Recorder for Active Documentation	yes, 30 sec per image
Camera Weight	5 lbs.

Modern infrared cameras are light weight, portable, and can accurately measure dynamic temperature changes in equipment and processes. They have the ability to measuring thermal variations of less than 0.1 °C and are non-invasive.

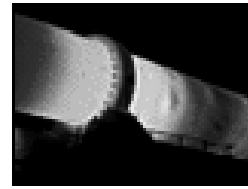
Attaching thermocouples, RTD's, or thermistors is seldom an option in moving components. In addition, thermocouples cannot be attached at every location on the component.

The biggest advantage over conventional temperature measurement techniques is that a total picture of the component or system is possible.

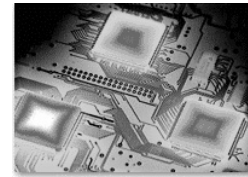
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Infrared Camera Examples

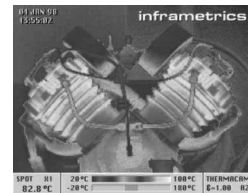
- Piping →
 - Heat transfer coils
 - Valve operation



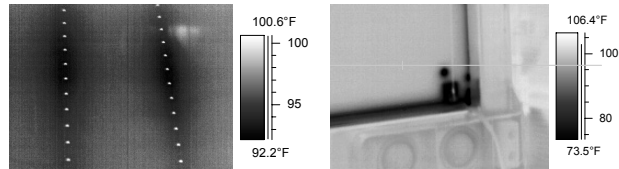
- Electronics →



- Engines/Compressors →



- Building/Structures →



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Single-point Infrared Temperature Sensors

- Non-contact infrared thermometers uses:
 - Facility maintenance
 - Utilities and electrical inspection
 - Medical industry
 - HVAC/R maintenance and inspection
 - Food safety
 - Automotive and diesel maintenance
 - Asphalt, cement, and construction materials.
- Infrared thermometers measure the surface temperature of objects within their field of view. Focal length of instrument is important consideration.



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Infrared Thermocouples (IRt/c)

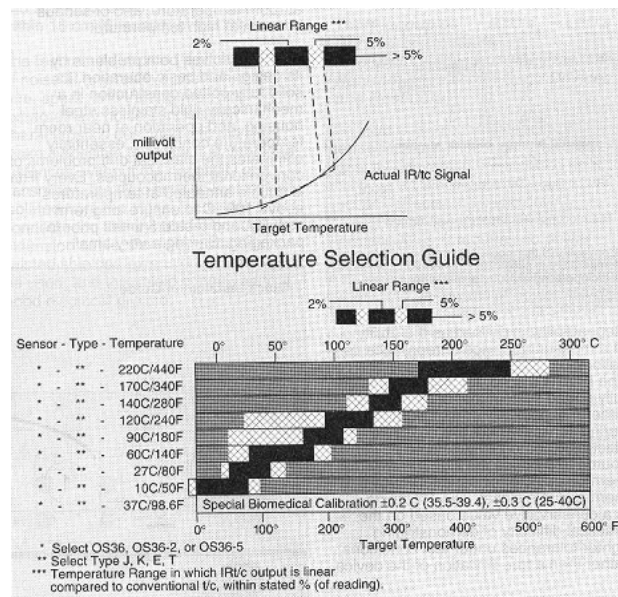
- New method of surface temperature measurement
 - Unpowered
 - Low cost
 - Non-invasive
 - They can be installed on conventional thermocouple controllers.
- How do they work?
 - Receives heat energy from the object that it is aimed at and converts the heat to an electrical potential.
 - Millivolt output signal is produced. This signal is scaled to the desired thermocouple characteristics.
 - Adhere to the same laws as other infrared thermometers.



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

IR Thermocouples

- Even though the overall governing equations are nonlinear, the infrared thermocouples output is linear over a small enough range
- Uses:
 - Monitoring process temperatures.
 - Web roller temperature control.
 - Asphalt temperature monitoring.
 - Processing oven temperatures.



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Summarize IR Thermometer Advantages

- IR thermometers can measure objects that move, rotate, or vibrate.
- They can measure temperatures >1500 °C
- They do not damage or contaminate the surface of the object of interest (food, painted surfaces)
- Response time is in the millisecond range.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di temperatura

Fine

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08