

LA REGOLAZIONE NEGLI IMPIANTI TERMOTECNICI

INTRODUZIONE

Questa pubblicazione vuole fornire ai tecnici e futuri tecnici del settore termotecnico una cultura completa ed aggiornata sulla regolazione degli impianti termotecnici .L'argomento non è certo nuovo e non mancano riferimenti nella letteratura tecnica ma si è voluto raccogliere sotto uno spirito unitario argomentazioni e spunti forniti da questi riferimenti e dal vasto panorama industriale .

Lo svolgimento dei contenuti presuppone che siano a conoscenza del lettore contenuti minimi di base di termotecnica su argomenti quali l'idraulica, la termodinamica, la psicrometria. Una trattazione , anche sintetica , di questi argomenti , avrebbe appesantito troppo il testo allontanandolo dal suo scopo. E' logico, comunque, che chi è interessato alla regolazione degli impianti termotecnici debba necessariamente avere conoscenze di base degli stessi impianti termotecnici.

L'ampio ricorso a grafici e tabelle scaturisce dalla volontà di presentare al lettore i risultati di simulazioni numeriche o dati di laboratorio , e quindi dati che siano realistici o reali delle variabili in gioco.

Gli undici capitoli del testo vogliono coprire tutti temi della regolazione.

I primi due capitoli trattano tutti i sensori –trasduttori di tipico interesse del settore, e rilievo particolare hanno ovviamente i sensori di temperatura. Il testo vuol essere completo anche dal punto di vista pratico, riportando dati di laboratorio sui sensori di temperatura .

I successivi capitoli dal terzo al quinto hanno come tema gli attuatori , dagli azionamenti elettrici alle valvole di regolazione, all'elettronica digitale. L'elettronica svolge ormai un ruolo fondamentale nella regolazione sia per quanto riguarda l'acquisizione dei segnali e la loro elaborazione , che nella implementazione delle azioni di controllo , con il governo degli attuatori. E nell'elettronica l'hardware si accompagna inevitabilmente con il software cui viene delegato la realizzazione dell'intelligenza delle azioni di controllo. Alcune piccole realizzazioni vogliono introdurre il lettore nella logica teorica e pratica dell'acquisizione dei dati e della realizzazione delle azioni di controllo.

Il capitolo sesto è un capitolo fondamentale che tratta la teoria della regolazione e quindi è la base teorica di ogni sistema di controllo. Nondimeno la teoria è accompagnata da esempi numerici e relativi grafici che meglio rendono l'idea dell'evoluzione delle variabili che il sistema di controllo è chiamato a governare. Il capitolo settimo completa questa parte teorica con applicazioni numeriche e realizzazioni pratiche complete hardware e software di controlli elementari.

I successivi capitoli ottavo, nono e decimo entrano nel contesto dell'impiantistica e componentistica nei settori rispettivamente del riscaldamento, degli impianti frigoriferi, degli impianti di condizionamento. Si è voluto prendere in esame argomenti su cui recentemente si è sviluppato un particolare interesse quali la parzializzazione dei compressori degli impianti frigoriferi. Si è voluto anche approfondire e cercare di realizzare una simulazione numerica per argomenti quali la regolazione flottante, che molta importanza ha nel campo termotecnico. Il ricorso a dati numerici in forma di tabelle o grafici ha l'intendimento di presentare al lettore valori che, anche se non reali, siano realistici e significativi della dinamica delle variabili in gioco.

L'ultimo capitolo, l'undicesimo, completa l'argomento con il tema dell'automazione nella climatizzazione. Il processo di controllo non è più un fatto locale ed isolato ma viene a far parte di una architettura più o meno complessa di acquisizione e controllo di dati. Quello che era il vincolo della vicinanza fisica delle apparecchiature, viene superato con la realizzazione di sistemi di telegestione.

Eventuali aggiornamenti o reperibilità di materiali utili o contatti con l'autore sono possibili alla pagina web:

www.termoinrete.com/hoepli/regolazione.htm

Insieme al libro viene fornito un CD in cui sono raccolti una serie di software applicativo sugli argomenti oggetto della trattazione. Il software vuole estendere dinamicamente i limiti del supporto cartaceo permettendo al lettore di agire interattivamente con le variabili dei processi di regolazione, secondo i modelli numerici illustrati nel testo. Sono inoltre contenuti il software del PLC trattato.

Un ringraziamento particolare alla COSTER di Milano, ed in particolare al Sign. Massimiliano Magri, che ha reso disponibili materiali e documentazione.

INDICE

CAPITOLO PRIMO: I TRASDUTTORI ,I TRASDUTTORI DI TEMPERATURA

1.1 GENERALITA' SUI TRASDUTTORI CARATTERISTICHE DEI TRASDUTTORI

1.2 I TRASDUTTORI DI TEMPERATURA

1.2.1 LE TERMOCOPPIE

L'EFFETTO TERMOELETTRICO.

TIPI DI TERMOCOPPIA

CAVI DI ESTENSIONE E DI COMPENSAZIONE.

CONVERTITORI

NOTE DI CALCOLO.

1.2.2 TERMISTORI

1.2.3 LE TERMORESISTENZE

- 1.2.4 TRASDUTTORI A SEMICONDUTTORI
- 1.2.5 I PIROMETRI
- 1.2.6 LE LAMINE BIMETALLICHE
- 1.2.7 I TERMOMETRI DATALOGGER
- 1.3 L'INERZIA TERMICA DEI TERMOMETRI
- 1.4 PROVE SPERIMENTALI SUI TERMOMETRI

Riferimenti WEB

CAPITOLO SECONDO: ALTRI TRASDUTTORI

2.1 I TRASDUTTORI DI PRESSIONE

I PARAMETRI DI UN TRASDUTTORE DI PRESSIONE

2.2 I TRASDUTTORI DI PORTATA E VELOCITA'

2.2.1 Il Venturimetro

2.2.2 DISCO CALIBRATO OD ORIFIZIO TARATO

2.2.3 Tubo di Pitot

2.2.4 I Misuratori magnetici di portata

2.2.5. Misuratori di portata ad impulsi

2.2.6 L'ANEMOMETRO A FILO CALDO.

2.2.7 Misura di portate con sensore CMOSens® .

2.2.8 MISURATORI A VENTOLINA

2.3 I TRASDUTTORI DI LIVELLO

2.3.1 I LIVELLOSTATI

2.3.2 Sensori di livello a sonda di pressione

2.3.3 Sistema a microonde.

2.3.4 Trasduttori di livello capacitivi

2.4 TRASDUTTORI DI UMIDITA'

2.5 SENSORI DI GAS

2.5.1 *Sensori elettrochimici di ossigeno*

2.5.2 SENSORE CON OSSIDO DI ZIRCONIO

2.5.3 SENSORI PER CO

2.5.4 SENSORI ALL'INFRAROSSO

2.6 I SENSORI DI PROSSIMITA'

2.6.1 Sensori di prossimità Capacitivi

2.6.2 Sensori di Prossimità Induttivi

2.6.3 Laser a Triangolazione

2.6.4 FOTORESISTENZA.

2.6.5 SENSORI DI PROSSIMITA' A CONTATTI REED

2.6.6 I sensori PIR

2.7 I SENSORI DI SPOSTAMENTO

2.7.1 LVDT.

2.7.2 Sensori di posizione a potenziometro (resistivi) .

2.7.3 ENCODER INCREMENTALE.

2.8 I sensori di velocità angolare

LA DINAMO TACHIMETRICA.

2.9 PIEZOELETTRICITA'

2.10 GLI ESTENSIMETRI

2.11 CELLE DI CARICO

CAPITOLO TERZO:LA CREGLAZIONE DELLA VELOCITA' NEI MOTORI

- 3.1 La regolazione della velocità nei motori in corrente continua
 - 3.1.1 Il pilotaggio on/off.
 - 3.1.2 Il pilotaggio lineare.
 - 3.1.3 Il pilotaggio pwm.
 - 3.1.4 Il ponte ad H.
- 3.2 I MOTORI PASSO-PASSO.
- 3.3 INVERTER A FREQUENZA VARIABILE.
- 3.4 VARIAZIONE DI VELOCITÀ NELLE MACCHINE IDRAULICHE ED AEREAULICHE
 - 3.4.1 Pompe centrifughe.
 - 3.4.2 I VENTILATORI.

CAPITOLO QUARTO:LE VALVOLE DI REGOLAZIONE

- 4.1 GENERALITÀ
- 4.2 LE VALVOLE A TRE VIE NEGLI IMPIANTI TERMICI
 - 4.2.1 LA TEORIA
 - 4.2.2 Dimensionamento della valvola a tre vie .
- 4.3 ANALISI DELLE VALVOLE A 3 VIE.
- 4. 4 LA CAVITAZIONE NELLE VALVOLE A TRE VIE.
- 4.5 ESEMPIO DI APPLICAZIONE VALVOLE A TRE VIE MISCELATRICI
- 4.6 IL PROGRAMMA TREVIE

CAPITOLO QUINTO:I SISTEMI A MICROPROCESSORE

- 5.1 I Transistor
- 5.2 Il relay
- 5.3 IL PONTE DI WHEATSTONE E GLI AMPLIFICATORI OPERAZIONALI

AMPLIFICATORE DI SEGNALE PER TERMOCOPPIA

- 5.4 IL MICROCONTROLLORE
 - 5.4. 1INGRESSO DIGITALE
 - 5.4.2 USCITA DIGITALE
 - 5.4.3 I Convertitori analogici digitali(ADC)
 - 5.4.4 INGRESSO ANALOGICO
 - 5.4.5 IL PROGRAMMA START-STOP
 - 5.4.6 CONTROLLO DI LIVELLO CON PLC
 - 5.4.7 UN TERMOSTATO
 - 5.4.8 Contagiri con Sensore GP1A57HRJ00F(Fotointerruttore a forcella)
 - 5.4.9 termometro digitale con LM35 e scheda ARDUINO
 - 5.4.10 MOTORE AVANTI INDIETRO CON INTEGRATO 298

CAPITOLO SESTO-LA TEORIA DELLA REGOLAZIONE

- 6.1 LA REGOLAZIONE

6.2 Corpo esposto alla radiazione solare e alla temperatura esterna.

6.3 STUDIO DI UN SISTEMA CON 2 MASSE

6.4 VARIAZIONE DELLA TEMPERATURA DEL CORPO AL VARIARE DELLA TEMPERATURA ESTERNA CON LEGGE SINUSOIDALE

6.5 Riscaldamento-Raffreddamento di un corpo

6.6 LA SERRA

6.7 LA REGOLAZIONE ON-OFF

6.7.1 IL CASO DELLE DUE MASSE

6.7.2 REGOLAZIONE ON-OFF IN UN SERBATOIO

6.7.3 IL SERBATOIO DI ARIA COMPRESSA

6.7.4 LA REGOLAZIONE IN CASCATA NEI COMPRESSORI DEGLI IMPIANTI FRIGORIFERI

6.7.5 CLIMATIZZAZIONE AD ARIA

6.8 LA REGOLAZIONE PROPORZIONALE

6.8.1 ESEMPIO 1-RISCALDAMENTO DI UNA MASSA

6.8.2 REGOLAZIONE DI LIVELLO(figura 27)

6.9 L' AZIONE INTEGRALE

6.9.1 Esempio 3 – regolazione PI

6.10 L'AZIONE DERIVATIVA

6.11 I PARAMETRI DELLA REGOLAZIONE

6.12 Ottimizzazione del regolatore secondo le regole di Ziegler e Nichols

CAPITOLO SETTIMO-APPLICAZIONI DELLA TEORIA DELLA REGOLAZIONE

7.1 LO SCAMBIATORE DI CALORE

7.2 LA BATTERIA ALETTATA

7.3 APPLICAZIONI CON I MICROCONTROLLORI,IL REGOLATORE PROPORZIONALE

IL COMANDO PWM

RISCALDAMENTO CON REGOLAZIONE PROPORZIONALE

7.4 IL REGOLATORE UNIVERSALE

7.5 LA REGOLAZIONE FLOTTANTE



7.6 Il programma MASSASOLA

7.7 IL PROGRAMMA CONTROLLOLIVELLO

7.8 il programma DUE MASSE

CAPITOLO OTTAVO:LA REGOLAZIONE NEGLI IMPIANTI DI RISCALDAMENTO

8.1 LE CALDAIE

GENERALITÀ

LE CALDAIE A CONDENSAZIONE

LE CALDAIE A PREMISCELAZIONE

CALDAIE A TEMPERATURA SCORREVOLE

8.2 LA REGOLAZIONE CLIMATICA

CONFRONTO FRA REGOLAZIONE CLIMATICA E PI

8.3 IL RENDIMENTO DELLE CALDAIE E LE CALDAIE IN SEQUENZA

8.4 LA REGOLAZIONE FLOTTANTE

8.5 LE VALVOLE TERMOSTATICHE

8.6 CIRCUITO AD INIEZIONE PER PANNELLI RADIANTI

8.7 CONTROLLO DELLA COMBUSTIONE

OTTIMIZZAZIONE DELLA COMBUSTIONE

REGOLAZIONE DELLA COMBUSTIONE

8.8 IL REGOLATORE DI CENTRALE TERMICA PER DUE CALDAIE XTE

611 COSTER

Schemi di regolazioni

CAPITOLO NONO:GLI IMPIANTI FRIGORIFERI

9.1 IL Controllo di capacità nei compressori

9.1.1 COMPRESSORI ALTERNATIVI

9.1.2 COMPRESSORI SCROLL

Principio di funzionamento del compressore Digital Scroll impiegato nei sistemi MDS

9.1.3 COMPRESSORI A VITE

9.1.4 I TURBOCOMPRESSORI CENTRIFUGHI

9.2 LE VALVOLE DI LAMINAZIONE TERMOSTATICHE

VALVOLA CON EQUILIBRATORE ESTERNO DELLE PRESSIONI

LA VALVOLA DI ESPANSIONE ELETTRONICA PROPORZIONALE

DIMENSIONAMENTO VALVOLA TERMOSTATICA

9.3 VALVOLE PRESSOSTATICHE PER ACQUA

9.4 La regolazione dei compressori negli impianti frigoriferi

Regolazione della potenza frigorifera

Circuiti frigoriferi senza parzializzazione

Circuiti frigoriferi con parzializzazione

Gruppi frigoriferi con 2 gradini di parzializzazione

CIRCUITI FRIGORIFERI CON SISTEMI DI PARZIALIZZAZIONE

CONTINUA

9.5 Gli indici di efficienza energetica stagionale

L'indice IPLV proposto dall'ARI

L'indice energetico EMPE

ESEMPIO DI CALCOLO DELLA PRESTAZIONE STAGIONALE

9.5 REGOLAZIONE DEI COMPRESSORI IN PARALLELO

9.6 IL DIMENSIONAMENTO DEI SERBATOI INERZIALI

9.7 LA REGOLAZIONE NEGLI IMPIANTI AD ACCUMULO DI GHIACCIO

9.8 TORRI EVAPORATIVE

CAPITOLO DECIMO:GLI IMPIANTI FRIGORIFERI

10.1 IL Controllo di capacità nei compressori

10.1.1 COMPRESSORI ALTERNATIVI

10.1.2 COMPRESSORI SCROLL

Principio di funzionamento del compressore Digital Scroll impiegato nei sistemi MDS

10.1.3 COMPRESSORI A VITE

10.1.4 I TURBOCOMPRESSORI CENTRIFUGHI
10.2 LE VALVOLE DI LAMINAZIONE TERMOSTATICHE
VALVOLA CON EQUILIBRATORE ESTERNO DELLE PRESSIONI
LA VALVOLA DI ESPANSIONE ELETTRONICA PROPORZIONALE
DIMENSIONAMENTO VALVOLA TERMOSTATICA
10.3 VALVOLE PRESSOSTATICHE PER ACQUA
10.4 La regolazione dei compressori negli impianti frigoriferi
Regolazione della potenza frigorifera Circuiti frigoriferi senza
parzializzazione
Circuiti frigoriferi con parzializzazione
Gruppi frigoriferi con 2 gradini di parzializzazione
CIRCUITI FRIGORIFERI CON SISTEMI DI PARZIALIZZAZIONE
CONTINUA
10.5 Gli indici di efficienza energetica stagionale
L'indice IPLV proposto dall'ARI
L'indice energetico EMPE
ESEMPIO DI CALCOLO DELLA PRESTAZIONE STAGIONALE
10.5 REGOLAZIONE DEI COMPRESSORI IN PARALLELO
10.6 IL DIMENSIONAMENTO DEI SERBATOI INERZIALI
10.7 LA REGOLAZIONE NEGLI IMPIANTI AD ACCUMULO DI
GHIACCIO

10.8 TORRI EVAPORATIVE

Capitolo undicesimo: I SISTEMI DI REGOLAZIONE

SCADA

BACNET

IL SISTEMA COSTER

CAPITOLO PRIMO:GENERALITA' SUI TRASDUTTORI, I TRASDUTTORI DI TEMPERATURA

1.1 GENERALITA' SUI TRASDUTTORI

I trasduttori sono componenti che rilevano una grandezza fisica producendo un corrispondente segnale generalmente elettrico .Il trasduttore comprende un elemento sensibile (il sensore) in cui al variare della grandezza fisica varia una grandezza caratteristica dello stesso (ad esempio la resistenza elettrica). Se il segnale è adatto ad essere trasmesso a distanza, si parla allora di trasmettitori. Un circuito generalmente elettronico converte la variazione della grandezza caratteristica del sensore in un segnale in tensione o corrente. Il segnale in corrente è più adatto ad essere trasmesso su lunghe linee; infatti il segnale in tensione presenta una caduta per la resistenza elettrica dei fili di collegamento. Il trasduttore può comprendere un amplificatore che adatta il segnale, di piccolo valore ,ai valori standard.

Gli standard dei segnali sono ,se in corrente 4÷20 mA,se in tensione 0-5 Volt oppure 0-10 Volt. Il minimo valore della corrente diverso da zero (4 mA) serve per individuare una avaria della linea, nel qual caso la corrente sarebbe zero.

Recentemente sono usciti sul mercato trasduttori che inglobando un microprocessore sono "intelligenti " ,producendo una uscita digitale di tipo seriale che può essere direttamente interfacciata ad un microcontrollore.Il segnale prodotto di tipo digitale e non più analogico presenta una elevata immunità al rumore .

CARATTERISTICHE DEI TRASDUTTORI

Caratteristica di trasferimento.Tra il segnale d'uscita del trasduttore e la grandezza fisica rilevata c'è una relazione , generalmente fornita dal fornitore. Si parla di trasduttore **lineare** quando questa relazione può essere approssimata con una retta di equazione :

$$y(x)=mx+n$$

Assegnati i dati sperimentali la pendenza m e il termine n possono essere ottenuti, ad esempio, con le funzioni di Excel .

L'errore di linearità è la massima deviazione tra il valore rilevato dal trasduttore e quello teorico derivante dalla caratteristica lineare .

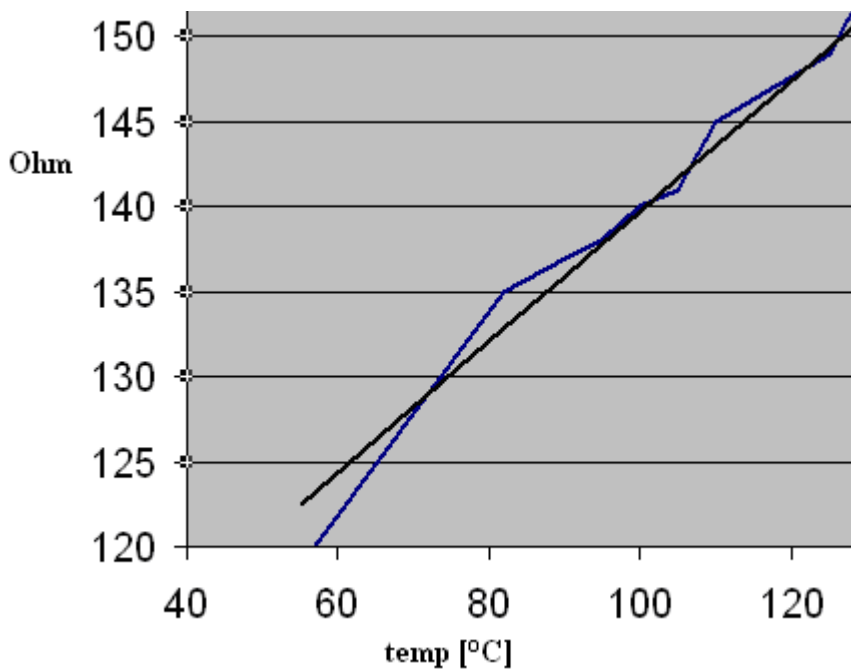


Figura 1 valori teorici e sperimentali di una PT 100 al variare della temperatura

ESEMPIO. Nella figura 1 viene riportata il valore rilevato di resistenza elettrica di una PT100 al variare della temperatura ,curva spezzata, e il valore teorico ,linea diritta. Per $t=82^{\circ}\text{C}$ il valore rilevato è 135 ohm mentre il valore teorico secondo la relazione lineare è 133 ohm. L'errore di linearità è pertanto $-2 \times 100 / 135 = -1,5\%$

Sensibilità: è il rapporto fra la variazione del segnale di uscita (*signal*) e la corrispondente variazione della grandezza fisica rilevata, che è costante per un trasduttore a caratteristica lineare. Quanto è più grande la sensibilità tanto meno influenti saranno i disturbi (*noise*)

Insensibilità. E' l'intervallo dei valori della variabile misurata che non produce alcuna uscita dello strumento. Questa si manifesta soprattutto negli strumenti meccanici ed è dovuta all'attrito ed ai giochi meccanici degli elementi dello strumento stesso.

Accuratezza: lo strumento fornisce valori la cui media è molto vicina al valore della variabile fisica reale, anche se lo scostamento relativo dei loro valori può essere elevato.

Precisione: Si parla di **precisione** di uno strumento se lo strumento , con lo stesso ingresso, fornisce valori molto vicini fra di loro, anche se non necessariamente vicini al valore reale della variabile misurata.

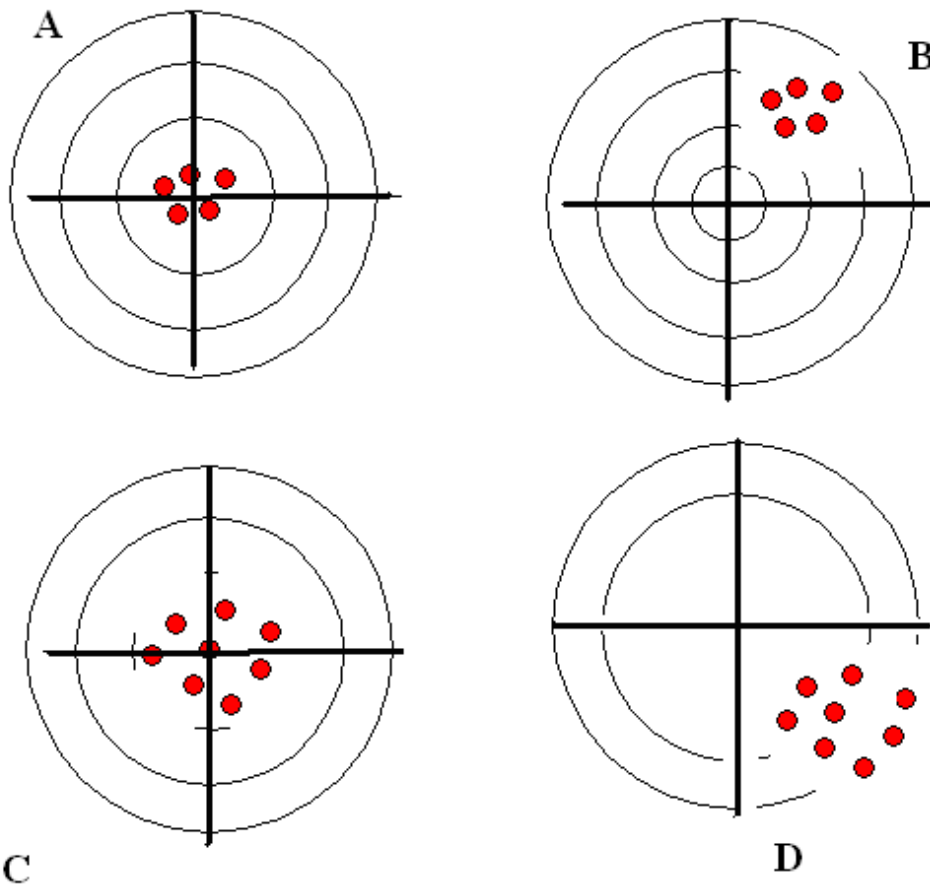


Figura 2: precisione ed accuratezza

Con riferimento alla figura 2:

- A. I valori sono vicini fra di loro e quindi la precisione è elevata ,il loro valore medio è vicino al valore reale e quindi anche l'accuratezza è elevata
- B. I valori sono vicini fra di loro e quindi la precisione è elevata ,mentre si discostano dal valore reale e quindi l'accuratezza è scarsa
- C. I valori sono lontani fra di loro e quindi la precisione è scarsa ,mentre il loro valore medio è vicino al valore reale e quindi l'accuratezza è elevata
- D. I valori sono lontani fra di loro e quindi la precisione è scarsa , il loro valore medio è lontano dal valore reale e quindi anche l'accuratezza è scarsa

Range di funzionamento. Il range di funzionamento o *span* rappresenta l'intervallo dei valori della grandezza fisica rilevata dal trasduttore. Al di fuori di questo campo non sono più garantite le caratteristiche del trasduttore, o ,addirittura, si può rischiare di danneggiare il componente.

Il fondo scala. Rappresenta il limite superiore del campo di misura ed è anche la portata dello strumento.

Deriva termica (thermal drift):La rilevazione della grandezza fisica può essere influenzata dalla temperatura .Generalmente è espressa in percentuale del fondo scala . I componenti a semiconduttore hanno una elevata deriva termica.

Risoluzione : la minima variazione apprezzabile della grandezza fisica rilevata nel campo di misura

Isteresi: L'uscita può essere differente ed influenzata dal fatto che la variabile fisica sia crescente o decrescente, dando luogo a due valori distinti dell'uscita.

Sensori attivi e passivi.Un sensore è passivo quando non è necessaria alimentazione od energia per il suo funzionamento . Un sensore è attivo quando è necessaria alimentazione od energia per il suo funzionamento .

Errore di zero (offset) .E' l'errore che si riscontra quando la variabile rilevata ha valore nullo mentre il trasduttore ha una uscita non nulla.

Caratteristica statica e dinamica. Il valore rilevato dal trasduttore può essere differente in fase statica(ossia quando la variabile fisica è costante) oppure dinamica(la variabile fisica sta variando). L'errore statico è quindi dovuto alle caratteristiche di precisione dello strumento mentre quello in fase dinamica è dovuto alla costante di tempo o tempo di risposta dello strumento.

Trasduttori analogici e digitali.I segnali la cui variazione è continua vengono denominati analogici,mentre quelli che variano secondo gradini vengono detti digitali. I segnali digitali possono quindi assumere ,nell'intervallo di misura, solo una serie discreta di valori.

TIPOLOGIE DI TRASDUTTORI

Le categorie principali di trasduttori possono essere:

trasduttori meccanici a deformazione meccanica od elastica.

Una forza o una pressione produce una deformazione del corpo sul quale agisce (diaframmi,soffietti,molla di Bourdon,membrane)

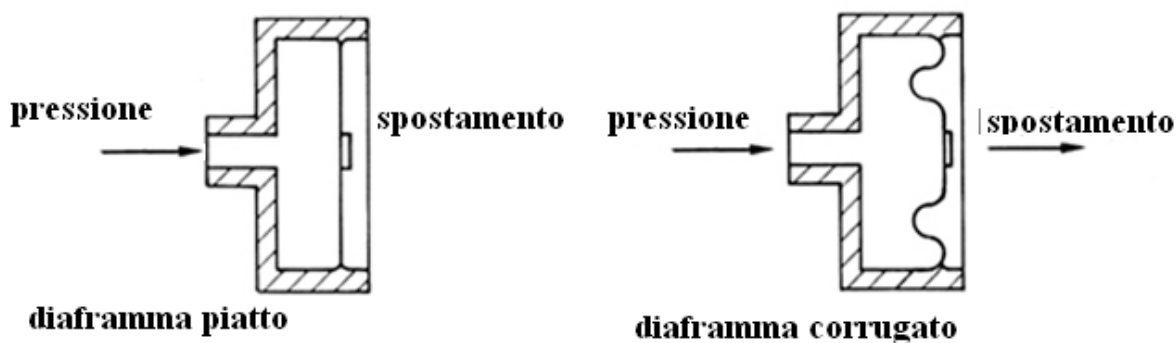


Figura 3: diaframmi

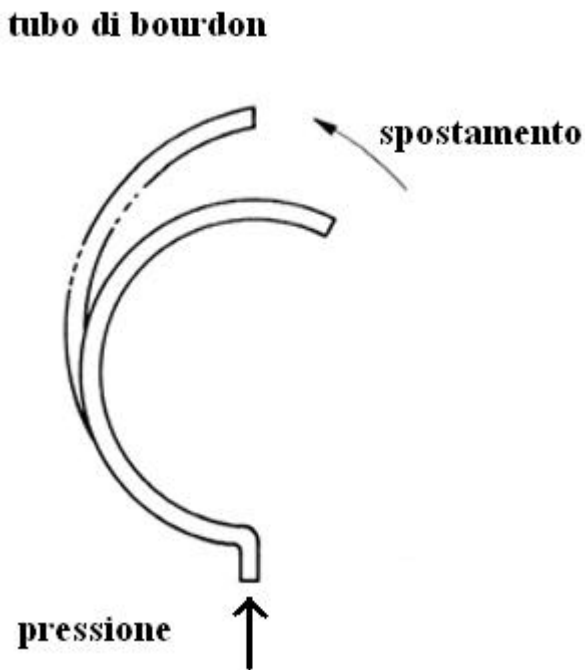


Figura 4: Molla di Bourdon

trasduttori meccanici a dilatazione termica.

E' il caso dei bimetalli (figura 5) in cui una variazione di temperatura produce una deformazione del corpo

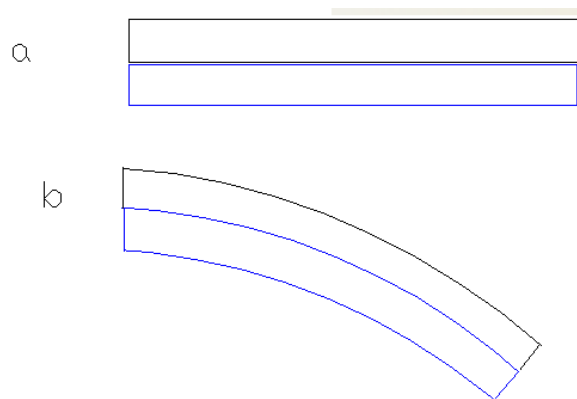


Figura 5: bimetallo

Trasduttori elettrici resistivi. Una deformazione meccanica o una variazione di temperatura o di altra grandezza fisica produce una variazione di resistenza del sensore. In questa categoria rientrano gli estensimetri , i termistori, gli igroresistori, i potenziometri

TRASDUTTORI OTTICI.

Sono trasduttori basati sulla radiazione emessa da una sorgente luminosa che a seconda della frequenza della radiazione può operare nel campo del visibile o dell'infrarosso.

TRASDUTTORI SONICI

Il principio di funzionamento è basato sulle proprietà dei materiali di propagare il suono con una velocità di propagazione che è funzione della massa volumica, della pressione e della temperatura del mezzo attraversato. Impieghi tipici sono quelli della misura di livelli di liquidi e di portate. Un impulso elettrico applicato ad un elemento trasmettitore elettro-acustico (tipicamente piezoelettrico) che genera un impulso di energia sonora che si propaga nel mezzo oggetto della misura fino al ricevitore.

TRASDUTTORI CHEMIOELETRICI

Sono dei trasduttori di grandezze chimiche in grandezze elettriche. Tra i vari trasduttori si possono evidenziare due famiglie:

- **Elettrochimici**

Una tensione o una corrente è prodotta da un processo chimico

- **A semiconduttore**

Il principio di funzionamento dei trasduttori chimici a semiconduttori è basato sull'adsorbimento superficiale della sostanza da misurare su opportuni film catalitici che variano le caratteristiche elettriche di funzionamento dei semiconduttori siano essi passivi che attivi. L'adsorbimento è un fenomeno di interazione fisico-chimica tra le molecole che incidono sulla superficie del solido e gli atomi della superficie. L'adsorbimento superficiale sia esso fisico o chimico, altera le caratteristiche della superficie catalitica in riguardo a:

- variazioni del volume
- variazioni della conducibilità superficiale

TRASDUTTORI CAPACITIVI

I trasduttori capacitivi si basano sulla legge che mette in relazione la capacità elettrica del condensatore con :

- la permittività. (costante dielettrica) del mezzo che è interposto tra gli elettrodi (armature)
- la distanza fra le armature
- l'area affacciata delle armature

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

dove:

- C = Capacità elettrica
- ϵ_r = Permettività relativa del mezzo
- ϵ_0 = Permettività assoluta del vuoto = $8.8541853 \cdot 10^{-12}$
- A = Area delle superfici affacciate delle armature
- d = Distanza degli elettrodi

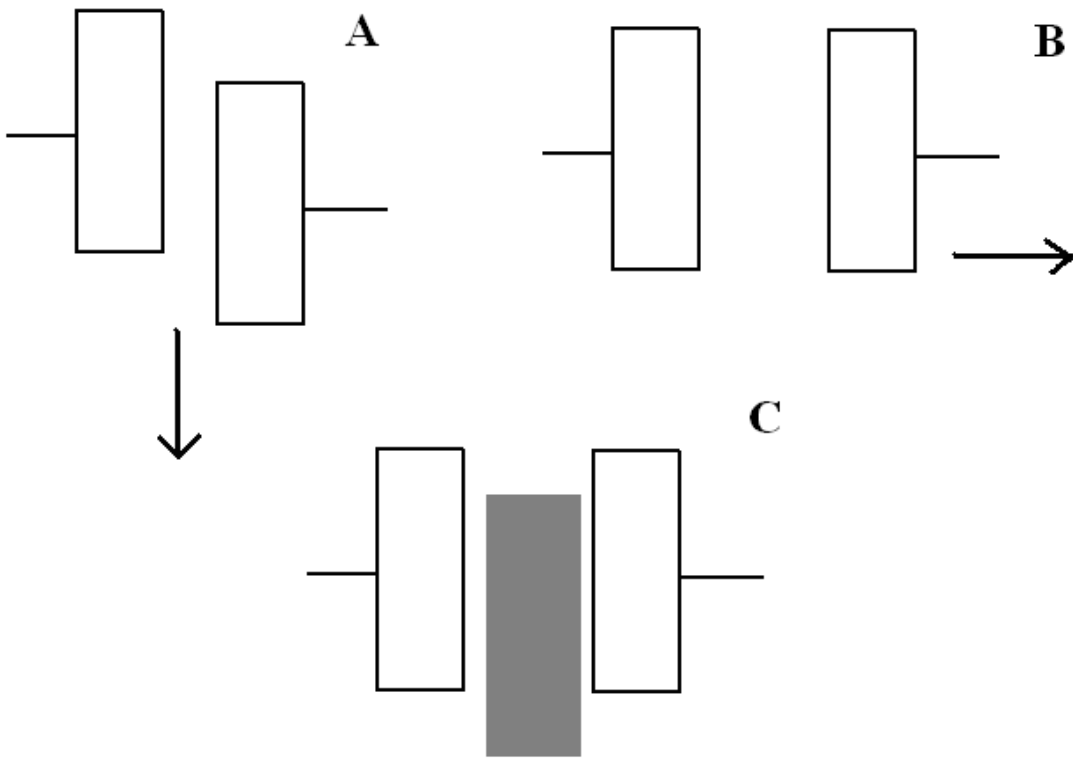


Figura 6:variazione capacità

I tipi illustrati nella figura 6 evidenziano le variazioni possibili delle grandezze

A. A variazione di area affacciata:sono basati sulla variazione di

area affacciata tra gli elettrodi

- B. A variazione di distanza: sono basati sulla variazione di distanza tra le armature . Sono impiegati in particolar modo per il rilievo anche di microspostamenti.
- C. A variazione di permittività: sono basati sulla variazione di permittività del mezzo interposto tra le armature .Tipico esempio la misura di livello di liquidi.

TRASDUTTORI INDUTTIVI

I trasduttori induttivi sono basati sulla legge che mette in relazione l'induttanza elettrica di un induttore con la permeabilità del mezzo, l'area, la lunghezza e il numero di spire dell'induttore:

$$L = \mu_R \cdot \mu_0 \cdot n^2 \frac{A}{l}$$

- L= Induttanza elettrica
- μ_R =Permeabilità relativa del mezzo
- μ_0 =Permeabilità assoluta del vuoto
- A=Area della bobina
- l=Lunghezza della bobina
- N= numero di spire della bobina

I tipi di trasduttori induttivi possono pertanto essere:

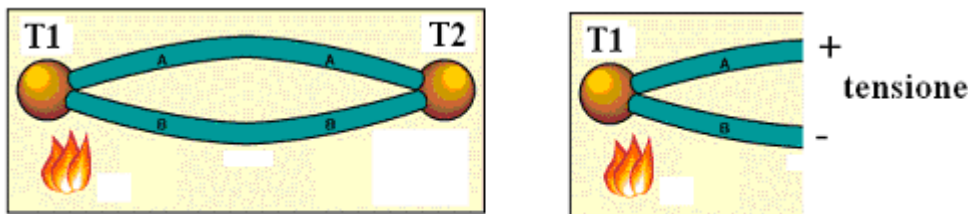
1. a variazione di permeabilità
2. a variazione di lunghezza
3. a variazione del numero di spire

1.2 I TRASDUTTORI DI TEMPERATURA

1.2.1 LE TERMOCOPPIE

L'EFFETTO TERMOELETTICO.

Consideriamo due fili a e b (figura 7) di materiale metallico diverso collegati ai loro capi, denominati giunti . Se i 2 giunti sono immersi in ambienti a diversa temperatura ($T_1 > T_2$) nel circuito composto dai 2 fili viene generata una corrente proporzionale alla differenza di temperatura dei 2 giunti, denominati rispettivamente *giunto caldo* e *giunto freddo*. Se il giunto freddo viene aperto ai capi dei fili liberi si crea una differenza di tensione proporzionale alla differenza di temperatura fra il giunto caldo, che costituisce quindi il punto di misura e l'ambiente nel quale sono collegati i terminali del giunto



freddo.

TIPI DI TERMOCOPPIA

La distinzione fondamentale fra le varietà di termocoppie è quella in 2 gruppi : quella di metalli comuni e quelle di metalli preziosi ,più stabili.

- **K** Chromel (Ni-Cr) (+) Alumel (Ni-Al) (-)

Sono termocoppie di uso generale, economiche e disponibili in una grande

Figura 7: il giunto termoelettrico

varietà di formati. Il loro intervallo di misura va da -200 °C a 1260 °C. La sensibilità è di circa 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

- **Tipo J** (Ferro (+)/Costantana (Cu-Ni) (-)

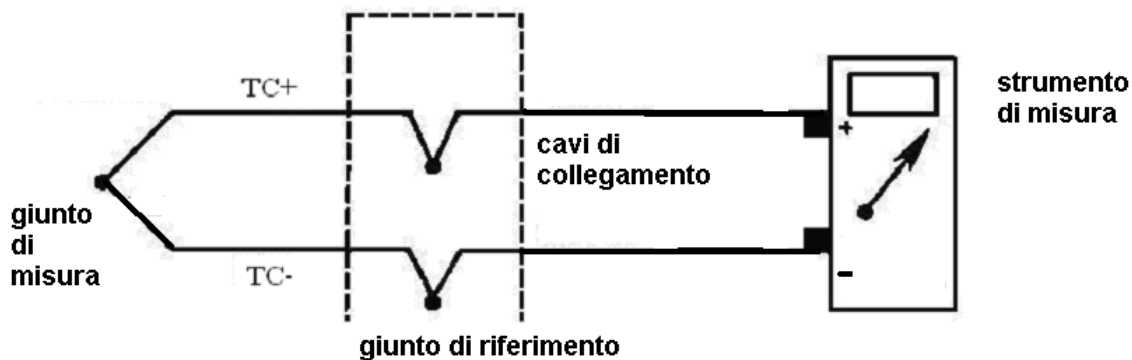
L' intervallo di misura va da -40 °C a 750 °C ,quindi più limitato del tipo K.Questo le rende meno diffuse di queste ultime. Le termocoppie tipo J sono caratterizzate dalla loro economicità ed una buona sensibilità (50 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$), ma non possono essere utilizzate sopra i 750 °C a causa di una transizione magnetica .

- **Tipo N** (Nicrosil (Ni-Cr-Si) (+)/Nisil (Ni-Si) (-)

L'intervallo di misura utile è compreso tra i 650 °C e i 1250 °C. Le loro caratteristiche di stabilità e resistenza all'ossidazione a caldo le rendono un ottimo sostituto a basso costo delle termocoppie a base di platino (tipi B, R, S) per le misure di alta temperatura.

Le termocoppie **B, R, S**, sono tutte composte da metalli nobili ed hanno caratteristiche simili. Sono le più stabili fra le termocoppie, ma la loro bassa sensibilità ($10 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$) ne limita l'uso a misure di alte temperature ($>300 \text{ }^\circ\text{C}$).

La scelta delle termocoppie va fatta sulla base sul valore di temperatura media da misurare. Se il campo di temperatura non è elevato sono convenienti termocoppie caratterizzate da elevato coefficiente termoelettrico (il tipo J ferro-costantana. Per temperature alte sono adatte le termocoppie K o addirittura quelle



tipo R che però sono molto costose.

La termocoppia viene isolata dal fluido oggetto della misura con una guaina di protezione. La guaina produce un aumento della costante di tempo della termocoppia (figura 13). Se infatti la misura venisse fatta, ad esempio, in acqua, che è mezzo conduttivo elettrico, la misura viene inevitabilmente disturbata. A seconda di come viene realizzato il giunto di misura (figura 9) la termocoppia ha una costante di tempo diversa (figure 10 ed 11). Per il significato della costante di tempo vedi paragrafo 1.3

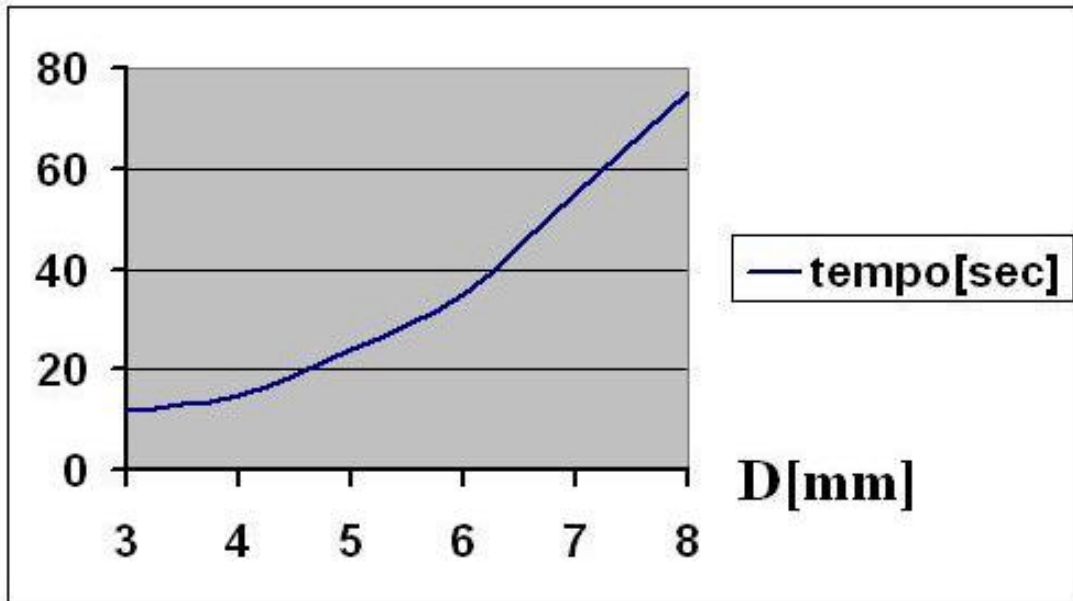
Figura 8: giunto di misura e giunto di riferimento

La termocoppia con la sua guaina di protezione viene immersa nel fluido oggetto della misura di temperatura. Subito all'esterno, i due conduttori sono connessi ad una morsettiera di porcellana contenuta dentro una testina di protezione. Da questo punto, altri due conduttori elettrici di metallo uguali a quelli della termocoppia prolungano il collegamento elettrico fino ad una sala controllo centralizzata, e vengono collegati alla morsettiera di uno strumento indicatore o registratore di temperatura (figura 8). In tal modo il giunto freddo si trova fisicamente sottoposto alla temperatura presente su tale morsettiera. Questa temperatura viene misurata tramite un termistore o una termoresistenza e utilizzata, all'interno dello strumento, per correggere elettricamente il segnale proveniente dalla termocoppia. In questo modo, qualsiasi sia la temperatura presente in tale zona, è come se il giunto freddo si trovasse alla temperatura di zero gradi centigradi. Quest'azione si chiama *compensazione* della temperatura ambiente ed assicura la massima precisione di misura. Lo strumento misuratore avrà sulla sua scala o sul suo display l'indicazione direttamente in gradi centigradi (e non in mV), in quanto al suo interno esistono sistemi che tengono conto anche della non



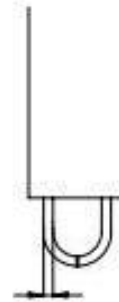
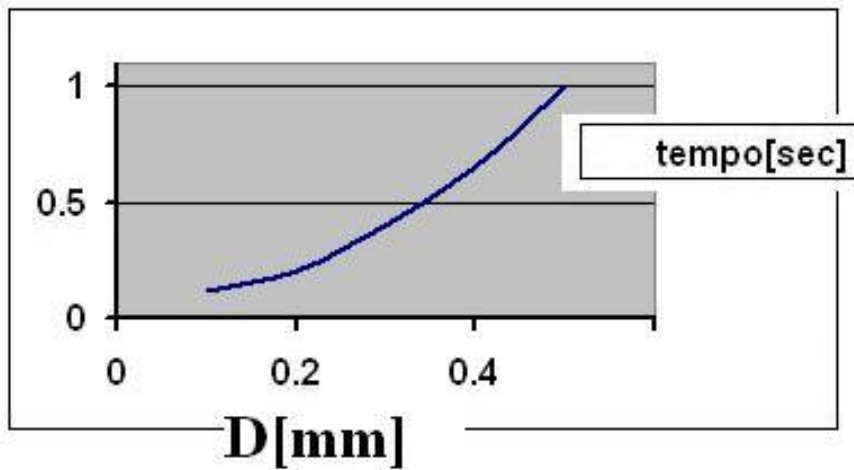
linearità del segnale in ingresso.

Figura 9 : Tipi di giunti di termocoppie



D

Figura 10 :costante di tempo in funzione del diametro D del sensore



D

Figura 11 :costante di tempo in funzione del diametro d del filo della termocoppia

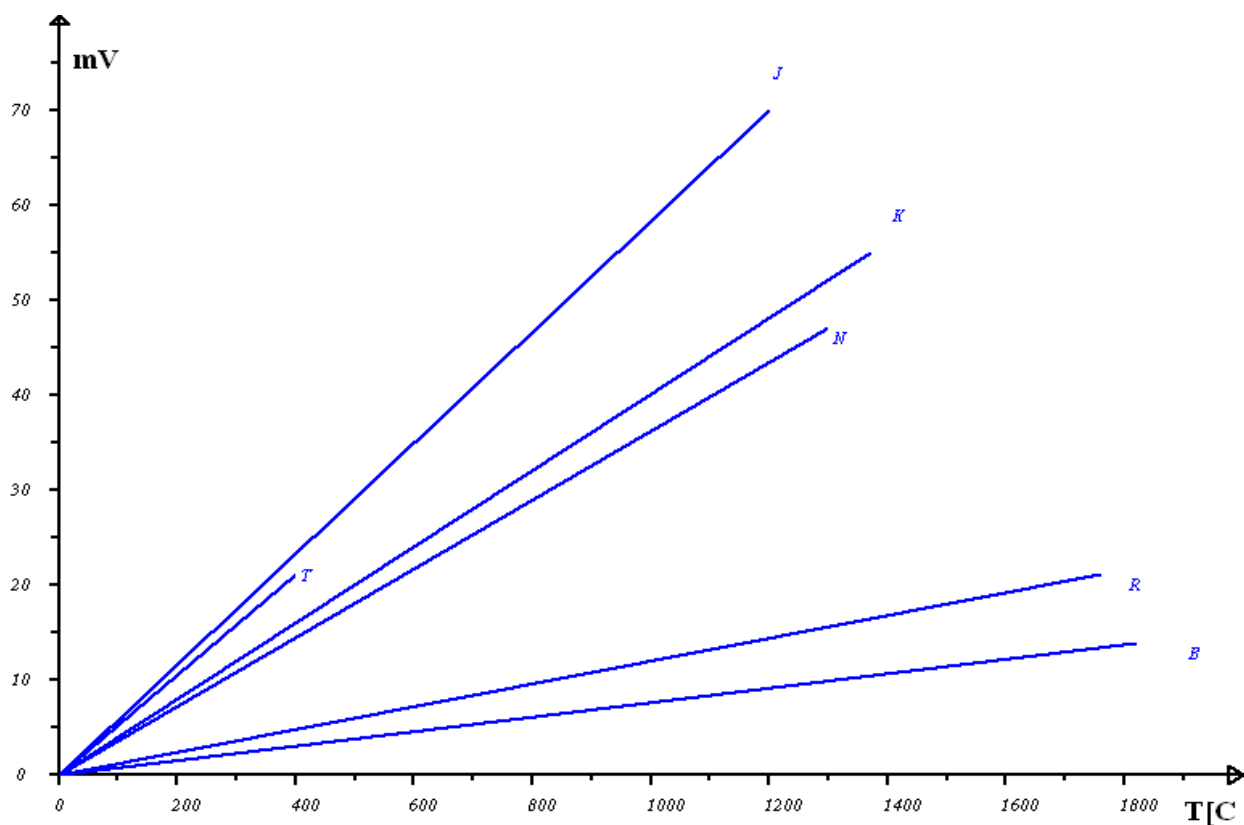


Figura 12: fem in millivolt in funzione della temperatura per i vari tipi di termocoppie

Differenza di temperatura in °C	Tensione in mV	
	termocoppia k	termocoppia j
50	2.023	2,585
75	3.06	3.918
100	4.096	5,269
125	5.124	6.634
150	6.138	8,010
175	7.100	9.337
200	8.138	10,779
225	9.141	12.167
300	12.209	16,327
350	14.293	19.366
400	16.309	21,848
450	18.516	24.887
500	20.644	27,393
550	22.776	30.502
600	24.905	33,102
650	27.025	36.373
700	29.129	41,645

Tabella 1 :Valori delle fem per termocoppie J e K in millivolt

Esempio: una termocoppia ha il giunto caldo a $T_1=600\text{oC}$ e il giunto freddo a 100oC .Le tabelle delle termocoppie danno la tensione prodotta ai capi della termocoppia quando il giunto freddo è mantenuto ad una temperatura di 0°C pari a 1.792mV . Sul voltmetro si trova una tensione di 1.759 mV . Il giunto freddo è a 100 oC ; sulla tabella a 100 oC corrisponde una emf di 0.033 mV . Infatti $1,792\text{ mV}-1.759\text{ mV} = 0.033\text{ mV}$ (vedi termocoppia tipo B, normativa ASTM)

Relazione tra temperatura e differenza di potenziale

La relazione tra la differenza di temperatura e la differenza di potenziale prodotta non è perfettamente lineare. Essa può essere approssimata da una equazione polinomiale del tipo :

$$V = \sum A_i T^i$$

per termocoppia J fermandosi all'equazione polinomiale di 4' grado:

termine	
A1	50.38
A2	0.03047
A3	-0.00008568
A4	1.322E-07

Tabella 2:Termini polinomio

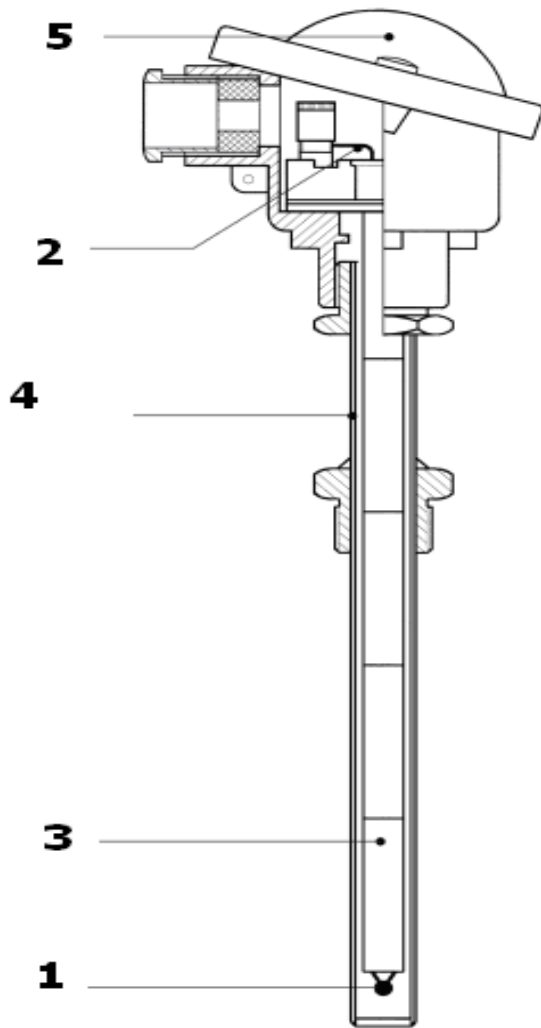


Figura 13:sezione di termocoppia industriale

LEGENDA DELLA FIGURA 13

- 1- Giunto di misura
- 2- Fili della termocoppia
- 3- Isolatori ceramici
- 4- Guaina di protezione
- 5- Testa di connessione

CAVI DI ESTENSIONE E DI COMPENSAZIONE.

I cavi di estensione delle termocoppie sono fili conduttori della stessa natura della termocoppia di misura , e quindi non alterano la misura, e prolungano il collegamento fra la termocoppia ed il punto in cui è

inserita la strumentazione. Vengono utilizzati in quanto più economici delle termocoppie stesse.

I cavi di compensazione sono formati da materiali aventi caratteristiche termoelettriche simili a quelle delle termocoppie di misura e quindi meno precisi ma più economici.

**ingresso da termocoppia tipo j
uscita 4-20 mA linearizzata**



Figura 14: convertitore del segnale della termocoppia

CONVERTITORI

La termocoppia costituisce il solo elemento sensibile della misura di temperatura e genera un segnale in tensione troppo piccolo per poter essere interfacciato con un microprocessore . Il convertitore di figura 13 permette la trasformazione del segnale proveniente dalla termocoppia in un segnale standard in corrente (4-20 mA) linearizzato che può essere , ad esempio, trasformato in una tensione 1-5 Volt con una resistenza da 250 Ω inserita fra i capi dell'uscita.

La tensione riportata nel grafico di figura 15 è quella di uscita da un amplificatore operazionale il cui ingresso è la tensione in uscita dalla termocoppia. La tensione segue la legge lineare: $\Delta V = 0,0262 \Delta t - 0,7421$ oppure $\Delta T = 38,12 \Delta V + 49,3$

NOTE DI CALCOLO.

La ricerca dei termini della retta di cui sopra può essere fatta attraverso l'uso delle funzioni di EXCEL .

L'equazione di una retta è:

$$Y = MX + N$$

M=pendenza della retta

N=termine noto

Si utilizza la funzione =**INDICE(REGR.LIN(E3:E17;D3:D17);1)**

Dove:

E3:E17 = dati Y

D3:D17=dati X

1=valore di M

Se invece si vuole ottenere N allora si scrive:

=**INDICE(REGR.LIN(E3:E17;D3:D17);2)**

Nel nostro caso i valori X sono quelli delle differenze di temperature mentre i valori Y quelli della tensione di uscita. Si ottiene:

M= 0.0262

N= -0.7421

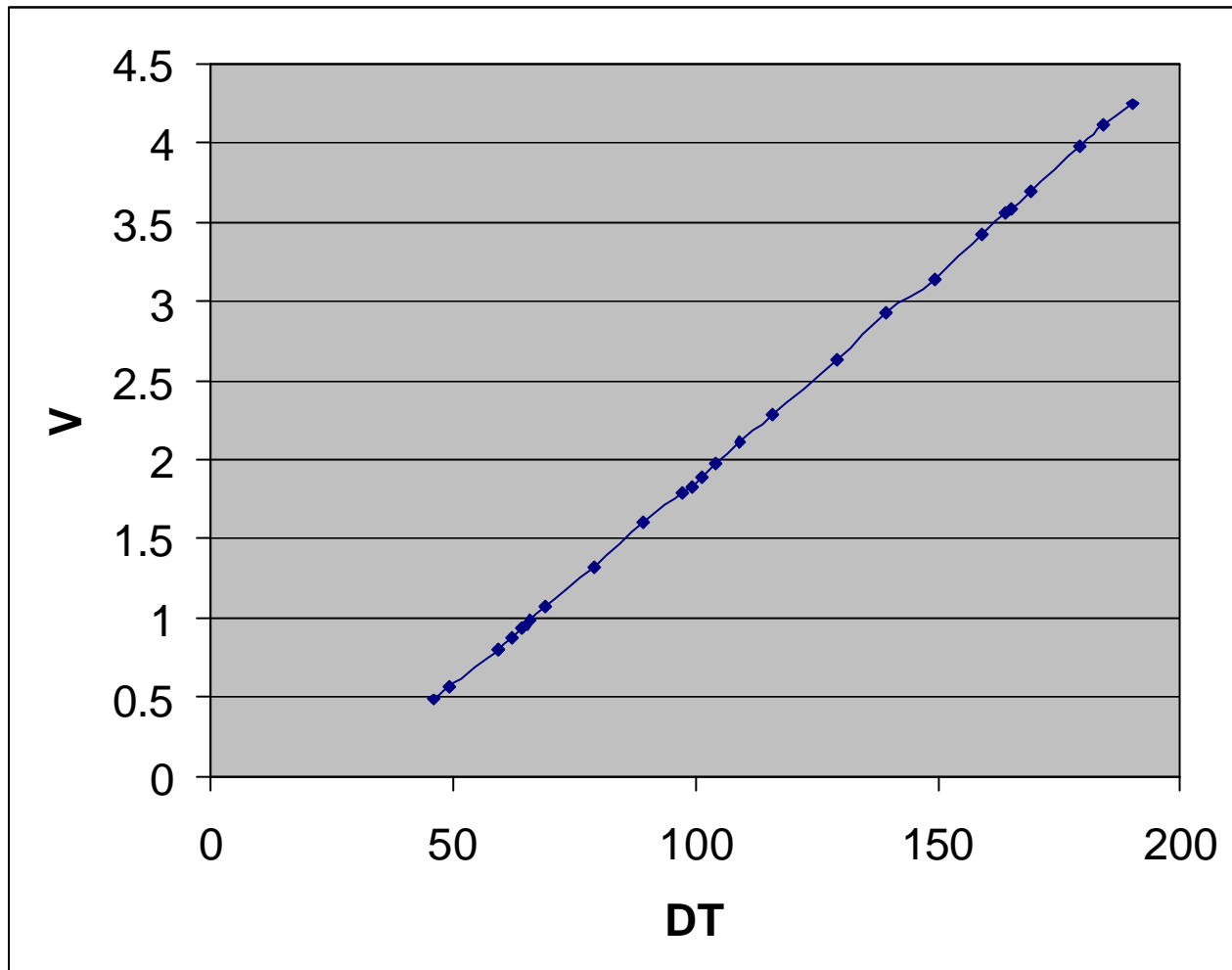


Figura 15: rilievo sperimentale della curva tensione-differenza di temperatura di una termocoppia J con amplificatore di tensione

1.2.2 TERMISTORI

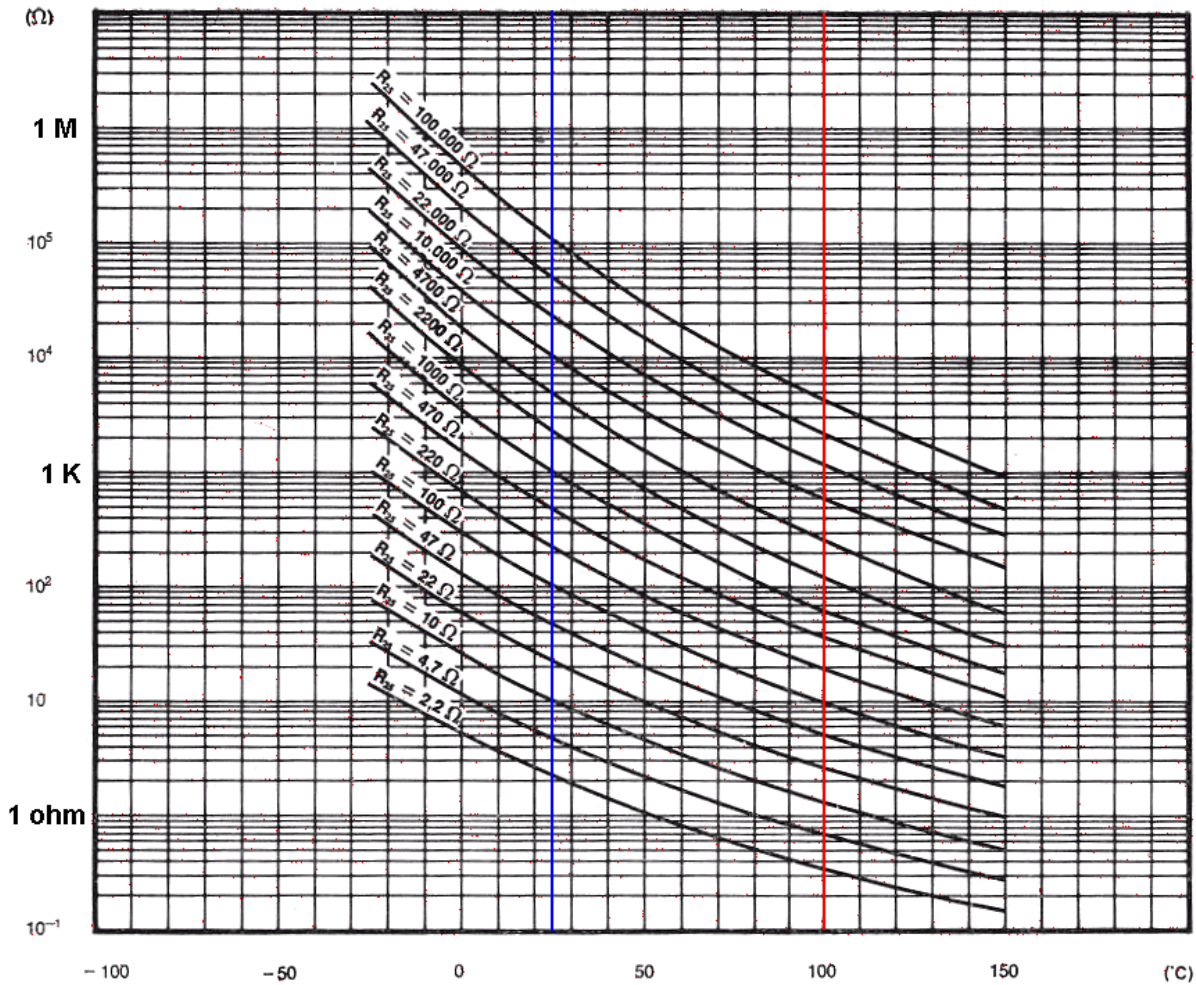


Figura 16: curve di termistori in funzione della temperatura

Utilizzando varie miscele di ossidi (Fe, Ni, Co, Mn e Cr) si ottengono dei resistori caratterizzati da un coefficiente di temperatura negativo (il coefficiente di temperatura decresce con l'aumentare della temperatura). Il termine **termistore** deriva dalla parola inglese *thermistor* che è una combinazione delle seguenti parole: thermal, sensitive, resistors. I "termistori" sono dispositivi per il rilevamento della temperatura utilizzati in applicazioni soprattutto industriali e di automazione. Sfruttano il noto principio conosciuto come effetto Joule, secondo il quale al variare della temperatura varia la dissipazione di energia entro un materiale (conduttore o semiconduttore), per il passaggio di corrente elettrica, cioè sulla variazione della resistenza.

Come le termoresistenze seguono dunque questo principio, ma la principale differenza sta nel materiale che effettua il rilevamento:

- le termoresistenze sono composte da materiali conduttori metallici (per esempio platino);
- i termistori sono composti da materiali semiconduttori.

La caratteristica dei conduttori è quella di aumentare la propria resistenza all'aumento della temperatura, quella dei semiconduttori è opposta, ossia produce una diminuzione della resistenza all'aumento di temperatura. Questo fenomeno fisico è dovuto essenzialmente al fatto che con l'aumento della temperatura, aumentano, nei semiconduttori le cariche libere di conduzione.

Esistono tuttavia particolari trattamenti definiti tecnicamente drogaggio, che modificano la struttura atomica dei semiconduttori e li rendono soggetti alla temperatura in modo analogo ai conduttori (nei confronti del passaggio di corrente) ma molto più sensibili alle variazioni. Poiché tanto più è alta la resistenza di un materiale tanto maggiore è l'effetto Joule (che produce una dissipazione di energia sotto forma di calore) e quindi caduta di tensione agli estremi dell'elemento attraversato da corrente, proporzionalmente alla variazione di tensione agli estremi dell'elemento è possibile risalire alla temperatura dell'ambiente o del liquido in cui si trova il termistore. Ciò è possibile essendo noto il coefficiente di variazione della resistenza, specifico per ogni materiale, il quale consente il calcolo ad una determinata temperatura e di conseguenza il calcolo approssimativo della temperatura. La resistenza dei termistori segue una legge del tipo:

$$R = R_0 e^{b(1/T - 1/T_0)} \quad [1]$$

dove R_0 è la resistenza alla temperatura di riferimento T_0 , b è una costante caratteristica del materiale del termistore. La temperatura t [°C] può essere ricavata dall'espressione:

$$t = 1 / [(1/b) \ln (R/R_0) + 1/T_0] - 273,15 \quad [2]$$

Ricerca del valore ottimale di β a partire dai valori sperimentali.

Se nell'equazione del NTC [1] poniamo: $y = R/R_0$ essa diventa:
 $y = e^{\beta(1/T - 1/T_0)}$

Poiché R_0 e T_0 sono definiti dal costruttore si potrebbe ricavare sperimentalmente il valore di β . La teoria matematica dei minimi quadratici asserisce che il valore ottimale di β è quello che rende minimo la sommatoria estesa agli N valori sperimentali, delle differenze al quadrato fra i valori teorici di y e quelli sperimentali y_i ossia:

$$\sum (y - y_i)^2 = \min$$

E sostituendo il valore di Y prima ricavato:

$$\sum (e^{\beta(1/T_i - 1/T_0)} - y_i)^2 = \min$$

Esplicitando diventa:

$$y_i = 2\beta(1/T_i - 1/T_0) + y_i^2 - 2\beta(1/T_i - 1/T_0) \cdot y_i = \text{minimo}$$

IL minimo valore dell'espressione di cui sopra si ottiene ponendo la derivata dell'espressione, rispetto a β pari a zero:

$$2(1/T_i - 1/T_0) - 2\beta(1/T_i - 1/T_0)^2 + \ln y_i = 0$$

Passando ai logaritmi:

$$\ln [2(1/T_i - 1/T_0) - 2\beta(1/T_i - 1/T_0)^2 + \ln y_i] = \ln [2(1/T_i - 1/T_0) - 2\beta(1/T_i - 1/T_0)^2 + \ln y_i + \beta(1/T_i - 1/T_0)]$$

$$\ln [2(1/T_i - 1/T_0) - 2\beta(1/T_i - 1/T_0)^2 + \ln y_i] = \ln [2(1/T_i - 1/T_0) - 2\beta(1/T_i - 1/T_0)^2 + \ln y_i + \beta(1/T_i - 1/T_0)]$$

Semplificando:

$$\beta(1/T_i - 1/T_0) = \ln y_i$$

da cui:

$$\beta = \ln y_i / (1/T_i - 1/T_0) \quad [3]$$

Nella figura 17 sono rappresentati i valori sperimentali della resistenza di un NTC commerciale da 10 kohm (R_{sp}) e quelli teorici secondo l'equazione [1] secondo un valore di β pari a 3445 trovato con l'equazione [3].

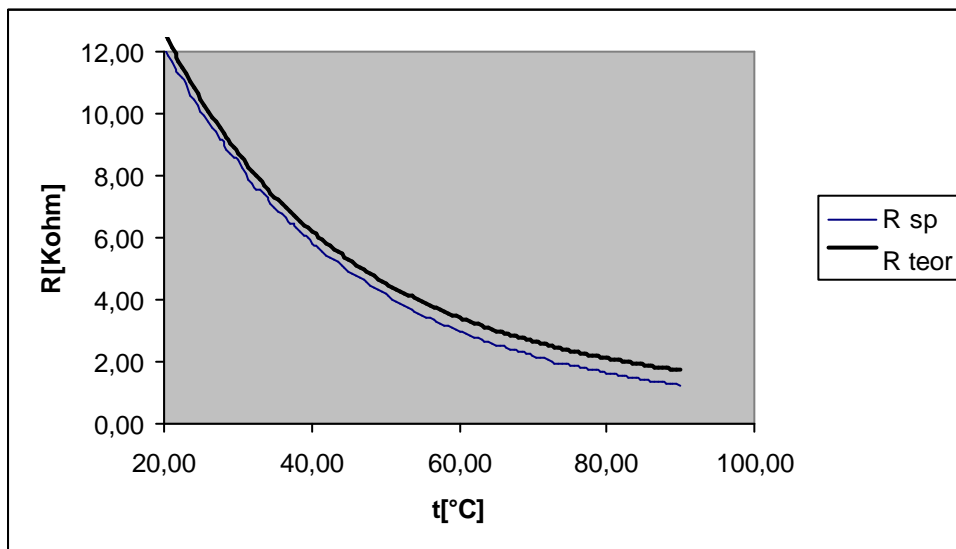


Figura 17: rilievo sperimentale della curva resistenza(in kΩ) – temperatura(in °C) di un termistore da 10 kΩ.

1.2.3 LE TERMORESISTENZE

Le **termoresistenze**, note anche come **RTD** dall'acronimo inglese **Resistance Temperature Detector**, sono sensori di temperatura che sfruttano la variazione della resistività di alcuni materiali al variare della temperatura. In particolare per i metalli esiste una relazione lineare che lega resistività e temperatura:

$$R(T) = R_0 [1 + \alpha (T - T_0)] \quad [4]$$

La resistenza è legata alla resistività ? dalla legge:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

dove:

- T è la temperatura,
- $R(T)$ è la resistenza del materiale alla temperatura T ,
- R_0 è la resistenza del materiale alla temperatura T_0
- α un coefficiente che dipende dal materiale.
- S sezione del materiale
- L = lunghezza

In realtà la legge resistenza-temperatura è un po' più complessa, poiché anche la sezione e la lunghezza del conduttore aumentano con la temperatura, ma in modo o meno significativo. Sfruttando quest'ultima relazione si può dunque risalire alla temperatura a partire da una semplice misura di resistenza. Esistono in commercio diversi tipi di termoresistenza, generalmente abbastanza resistenti agli agenti corrosivi, con un ampio range di temperatura (anche se inferiore a quello delle termocoppie) e soprattutto caratterizzate da ottima linearità. Molto diffusi sono le cosiddette *PT100* e *PT1000*, ovvero termoresistenze a filamento in platino in cui la resistenza del filamento alla temperatura di 0°C è pari rispettivamente a 100 Ω e 1000 Ω .

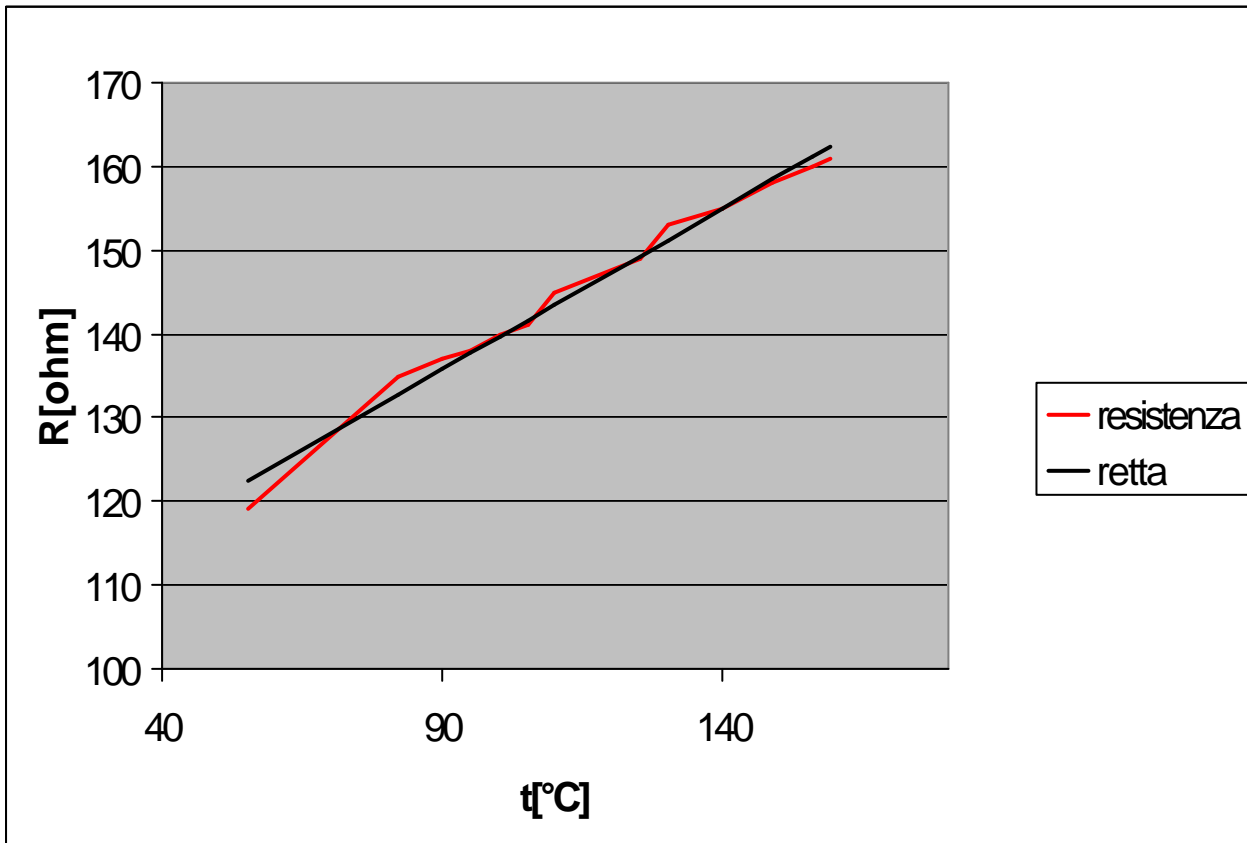


Figura 18: rilievo sperimentale della curva resistenza(ohm)-temperatura(°C) di una PT100 .

Nella figura 18 il rilievo sperimentale dei valori di una PT100 al variare della temperatura in ascissa(°C) . La spezzata rappresenta i valori sperimentali mentre la retta il valore teorico lineare , trovato con il metodo illustrato in precedenza con le termocopie, secondo l'equazione:

$$R = 0.3830973 t + 101.37588$$

1.2.4 TRASDUTTORI A SEMICONDUTTORI

Vi sono oggi molti sensori a semiconduttore che con pochissima componentistica aggiuntiva permettono misure di temperature anche molto precise. Uno di questi è LM35.



Figura 19: LM35

Questo integrato e' un sensore di temperatura di precisione, con uscita lineare, in tensione (10 mv/°C] proporzionale in scala Celsius (gradi centigradi). LM35 non necessita di nessun tipo di taratura e fornisce un'accuratezza di $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$.

Caratteristiche tecniche LM35:

- Range misurabile 0° to $+100^{\circ}\text{C}$
- Adatto ad applicazioni remote
- Basso costo (circa 1 euro)
- Tensione di alimentazione da 4 a 30 Volts

Il gemello LM335 è analogo ma fornisce una uscita a partire da 0 K. Pertanto a 0°C ha una uscita di 2,73 V.

Trasduttori di temperatura con segnale digitale. IL DS18B20 (figura 20) è un termometro digitale fino a 12 bit. Ha funzioni di allarme programmabili con una memoria non volatile. Comunica con il microcontrollore su un bus ad una sola linea con un campo di temperatura da -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$. Ogni DS18B20 ha un codice seriale a 64-bit che lo identifica e permette l'interfacciamento con più componenti dello stesso tipo. Il segnale digitale del sensore viaggia su unica linea che è condivisa da più sensori dello stesso tipo.

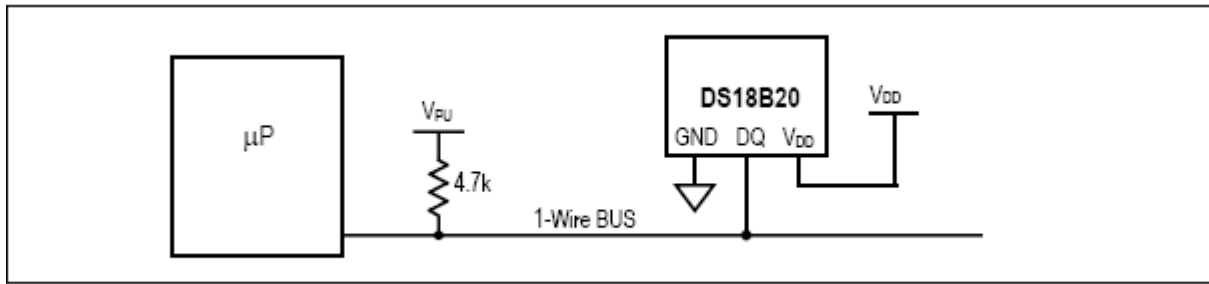


Figura 20:collegamento fra DS18B20 ed il microcontrollore

1.2.5 I PIROMETRI

Il **pirometro** è uno strumento per la misura di temperatura utilizzato prevalentemente per temperature elevate. Il principio di misura si basa sulla rilevazione dell'energia termica di radiazione W , esprimibile con la relazione:

$$W = s T^4$$

Dove s è la costante di Stefan-Boltzmann e T la temperatura assoluta del corpo. I pirometri possono misurare temperature fino a 3000 °C. Il pirometro contiene un'ottica che riceve l'energia radiante emessa dalla sorgente termica e la focalizza su uno speciale sensore. Il sensore converte l'energia in segnale



Figura 21 :termometro a raggi infrarossi

elettrico che viene poi amplificato, convertito in segnale digitale e visualizzato. Un puntatore laser centra l'oggetto della misura.

1.2.6 LE LAMINE BIMETALLICHE

Una lamina bimetallica è costituita da due lamine di metalli diversi saldati insieme (figura 5). Un aumento della temperatura, per via del diverso coefficiente di dilatazione, produce una curvatura dell'insieme. Lo spostamento dell'estremità libera della lamina ha il suo classico impiego nei termostati meccanici, avendo il vantaggio di non

utilizzare alimentazione elettrica. L'espressione che lega la curvatura a della lamina alle proprie grandezze geometriche e fisiche è:

$$a = (s_1 + s_2) \frac{3}{6 K \Delta t s_1 s_2}$$

dove:

s_1, s_2 = gli spessori dei due materiali della lamina, generalmente uguali

s = lo spessore totale della lamina

b = larghezza della lamina

E = modulo di elasticità della lamina

Δt = differenza di temperatura

K = differenza dei coefficienti di dilatazione dei due materiali.

Comunemente si sceglie materiali aventi massima differenza nei coefficienti di dilatazione. Il valore tipico di K è $3 \cdot 10^{-6}$.

La freccia o deflessione f della lamina è:

$$f = K \Delta t L^2 / s$$

mentre la forza F sviluppata dalla lamina è:

$$F = 4 E \Delta t b^2 / L$$

1.2.7 I TERMOMETRI DATALOGGER



Figura 22: termometro datalogger (TC Direct Torino)

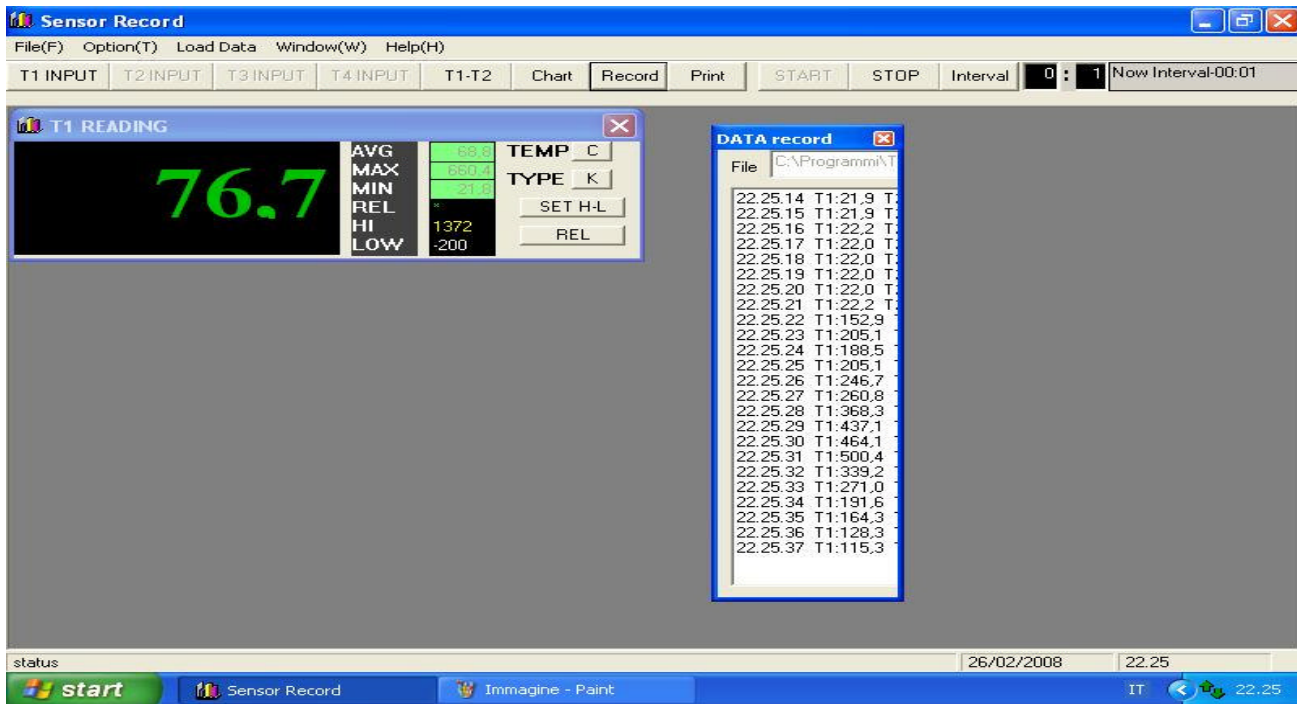


Figura 23:output del programma abbinato al termometro con funzione di datalogger

I termometri digitali ,basati su sonde di temperatura come termocoppie ,termistori o PT 100,hanno capacità non solo di misura ma anche di memorizzazione ed elaborazione delle stesse misure. Riportiamo (figura 22) un tipico strumento del genere con funzione di DATALOGGER(misura ad intervalli prefissati e memorizzazione degli stessi dati) .Questo accetta ,tramite selezione, termocoppie di tipo K, T, J, N, E, R o S ed è disponibile in versione a uno, due, tre o quattro canali. Lo strumento può memorizzare fino a 10.000 letture per canale, e tramite un'interfaccia RS232 e il software per Windows®, si possono effettuare le rilevazioni sul campo e, simultaneamente o successivamente, trasferire i dati su un computer,tracciando il grafico temperatura-tempo oppure esportare le misure in formato Excel . Si può registrare il segnale di ciascun canale oppure la differenza di temperatura tra due canali. Un programma apposito, tramite l'orologio interno, consente di effettuare misurazioni automatiche a intervalli variabili. Dispone di tasti per visualizzare o memorizzare i valori massimo, minimo e medio, per trasformare °C/°F/K e di un timer .Sono configurabili allarmi relativi a valori minimi o massimi. Altre caratteristiche:

- Accuratezza: $\pm 0,1\%$ della lettura $+0,7^{\circ}\text{C}$ (da -100°C a 1300°C)
- Risoluzione: $0,1^{\circ}\text{C}$

1.3 L'INERZIA TERMICA DEI TERMOMETRI

Consideriamo un corpo di massa M , tutto alla stessa temperatura iniziale t_{INIZ} che è uguale a quella t_{AMB} dell'ambiente nel quale è situato. Se al corpo è applicata una potenza termica scaldante W costante, l'equazione di equilibrio termico, nell'intervallo di tempo Δt è:

$$-M \cdot c \cdot \Delta t + W \cdot \Delta t - K \cdot S \cdot (t - t_{amb}) \cdot \Delta t = 0$$

[5]

dove :

- M =massa del corpo
- c =calore specifico del corpo
- Δt =variazione di temperatura del corpo nell'intervallo di tempo Δt
- W =la potenza termica dell'elemento scaldante
- K = trasmittanza termica del corpo
- S = superficie esterna del corpo
 - $K \cdot S \cdot (t - t_{amb}) \cdot \Delta t$:rappresenta l'energia termica scambiata dal corpo verso l'ambiente
 - $M \cdot c \cdot \Delta t$: rappresenta l'energia accumulata dal corpo
 - $W \cdot \Delta t$:l'energia termica ceduta dalla potenza scaldante

Se il processo di riscaldamento non è controllato il corpo partendo dalla temperatura iniziale seguirà una curva asintotica, rispetto alla temperatura finale t_{fin} , come in figura 24 (dove $t_{amb}=t_{iniz}=0^\circ\text{C}$).

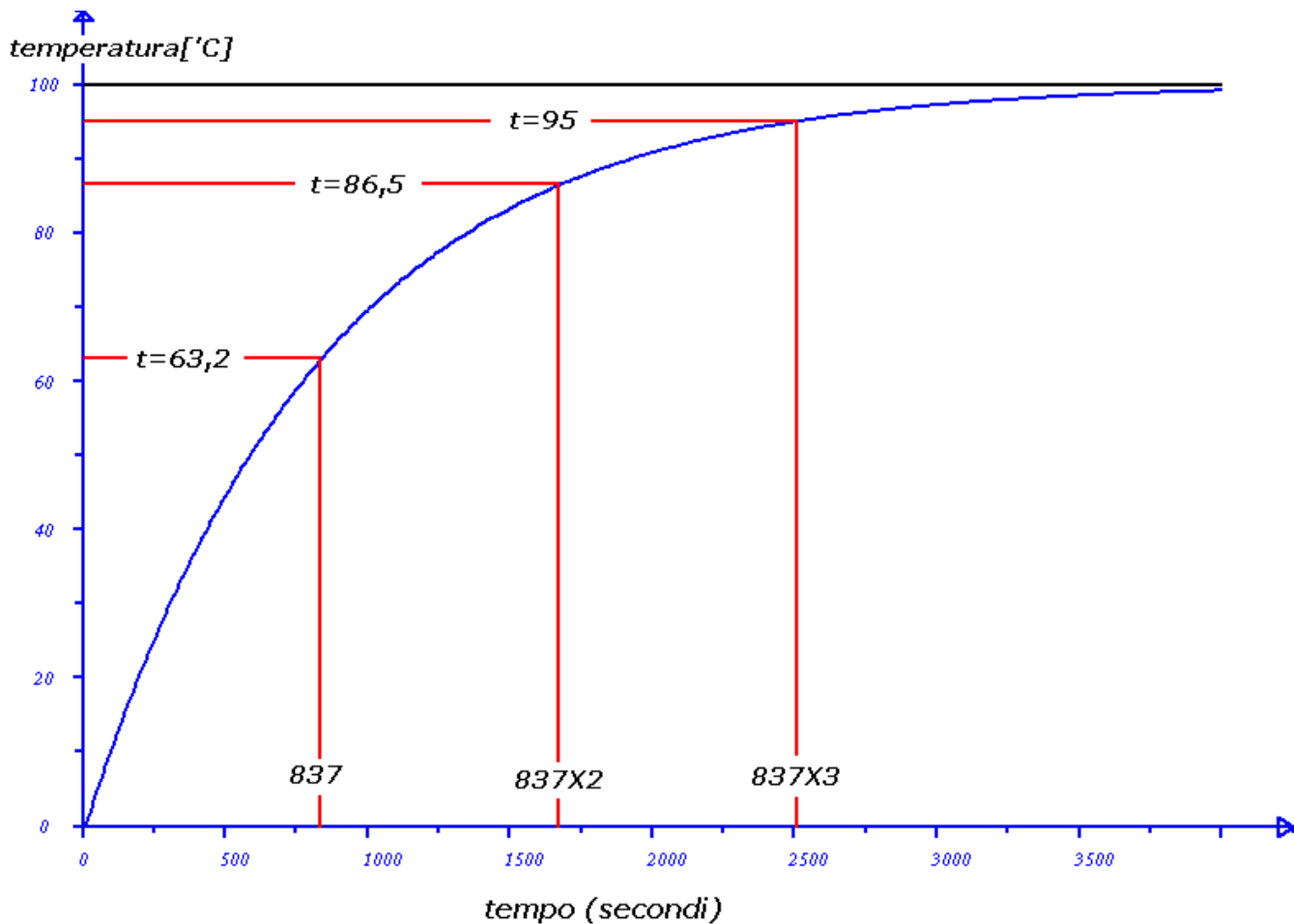


Figura 24: grafico della temperatura di un corpo riscaldato

E' intuitiva la determinazione di questa temperatura finale in quanto il grafico di figura 24 mette in risalto come l'aumento di temperatura Δt si fa sempre minore, tendendo a zero. Nella [4] il termine $M \cdot c \cdot \Delta t$ si annulla e la temperatura t_{fin} sarà determinata in base all'equazione :

$$W - KS(t - t_{amb}) = 0$$

E quindi:

$$t_{fin} = t_{amb} + W/KS \quad [6]$$

La legge matematica della temperatura t , in funzione del tempo τ è:

$$t = t_{fin} + [t_{iniz} - t_{fin}] e^{-t/CT}$$

Dove $CT = M \cdot c / K \cdot S$. Le conclusioni che possiamo trarre sono :

- L'aumento di temperatura sarà tanto maggiore quanto maggiore è il rapporto **W/KS**
- Il tempo per raggiungere la temperatura **t_{fin}** dipende invece dal rapporto che è definito come la **costante di tempo CT** del sistema.
- Definendo inoltre $\Delta t = t_{fin} - t_{iniz}$ (essendo in questo esempio $t_{iniz} = 0^\circ\text{C}$ e $t_{fin} = 100^\circ\text{C}$)
- La temperatura $= t_{iniz} + 0,632\Delta t = 63,2^\circ\text{C}$ si raggiunge al tempo $t_1 = CT$
- La temperatura $= t_{iniz} + 0,865\Delta t = 86,5^\circ\text{C}$ si raggiunge al tempo $t_2 = 2 \cdot CT$
- La temperatura $= t_{iniz} + 0,95\Delta t = 95^\circ\text{C}$ si raggiunge al tempo $t_3 = 3 \cdot CT$

Nell'esempio di figura 24 la costante di tempo è 837 secondi. L'equazione [5] è ancora valida se la potenza termica **W** è nulla e se il corpo a temperatura $t = t_{iniz}$ viene immerso improvvisamente in un ambiente a $t = t_{amb}$ (in questo caso diventa $t_{fin} = t_{amb}$). La massa **M** si porterà alla temperatura finale t_{amb} con la stessa legge seguendo la curva che sarà di riscaldamento o di raffreddamento secondo che sia t_{amb} maggiore o minore della temperatura iniziale. Il corpo di massa **M** di cui all'equazione [5] potrebbe rappresentare un ambiente da riscaldare. La costante di tempo influenza il tempo di messa a regime, ossia il tempo per raggiungere la temperatura prefissata, ma non la temperatura finale, che è legata solo alla potenza scaldante ed al termine **KS**. La massa **M** potrebbe rappresentare un sensore di temperatura immerso in un ambiente di cui si intende effettuare la misura di temperatura. L'interesse del tecnico di regolazione sarà allora sapere la velocità di risposta del sensore che influenzerà tutta la catena di regolazione e quindi la grandezza significativa sarà la costante di tempo della sonda ed i termini che la influenzano. Una mancata conoscenza del tipo di sonda più adatto al processo od una collocazione fisica scorretta può comportare il malfunzionamento del sistema. Nella figura 25 sono rappresentate due collocazioni di una sonda. Nel primo caso l'immersione non è adeguata e quindi lo scambio termico liquido-sonda non è completamente efficace. Inoltre lo scambio termico che avviene nella guaina altera l'effettiva temperatura rilevata. La figura 26 raffigura l'influenza della sola trasmittanza **K** sulla curva della temperatura, non variando tutti gli altri parametri già definiti. Come può notarsi la curva della temperatura si fa sempre più ripida all'aumentare di **K**. L'ascissa del punto di intersezione delle curve delle temperature con la retta orizzontale avente valore $t = 63,2^\circ\text{C}$ (con i valori di temperatura iniziale e finale

della figura 24) definisce la relativa costante di tempo che è sempre minore per valori di K maggiori.

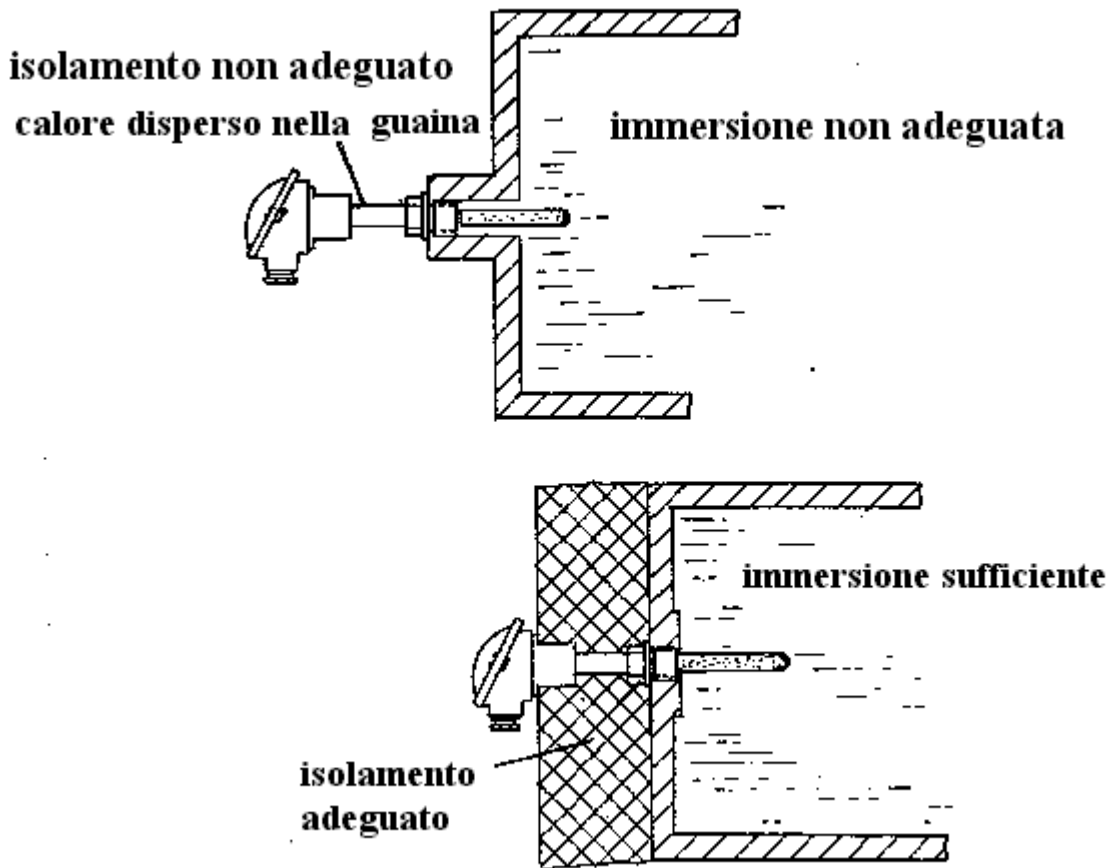


Figura 25: confronto di posizionamento di una sonda di temperatura

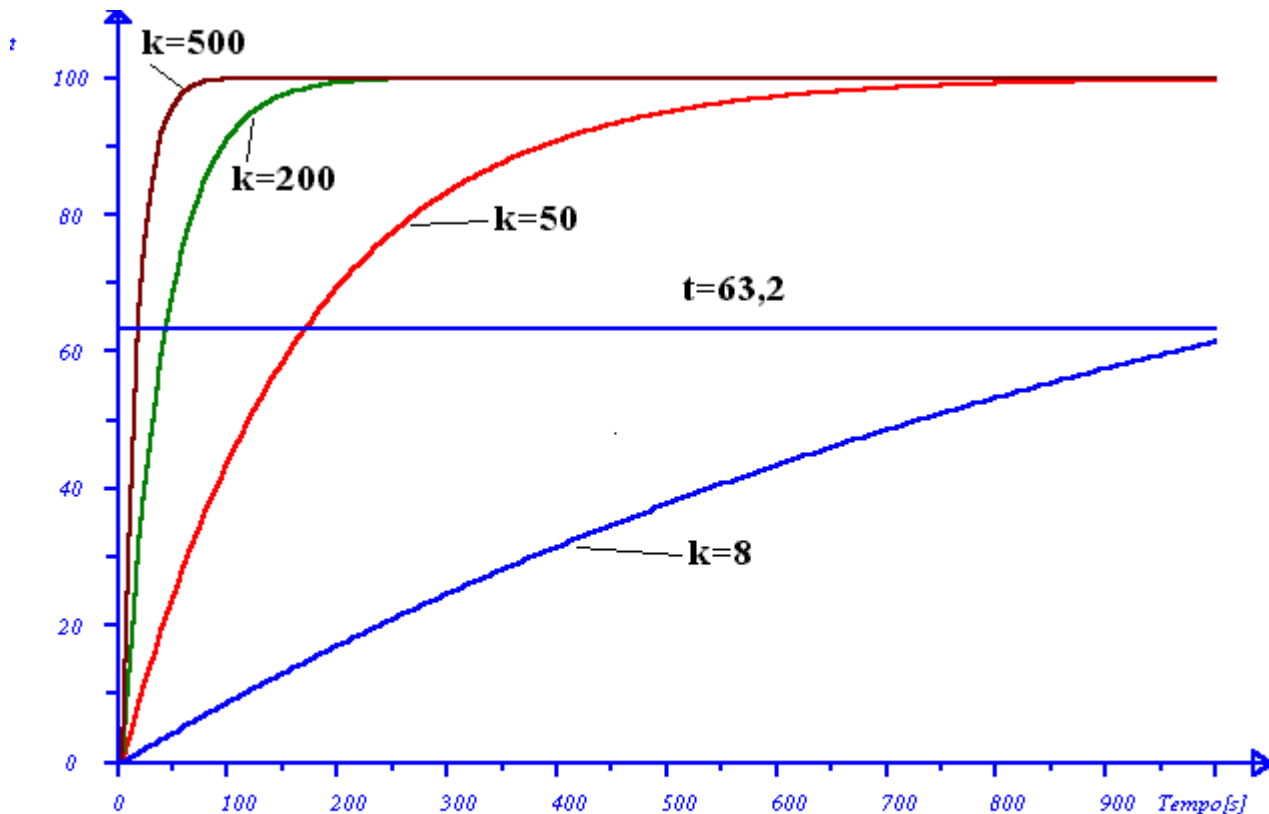


Figura 26: curve temperature tempo in funzione di K

Esempio numerico:

trovare quanto vale la costante di tempo di una sfera di acciaio avente $D=8$ cm immersa in aria ($K=10$ w/m²°C) ed in acqua ($K=150$ w/m²°C). Calcolare la costante di tempo nei due casi.

- Il volume della sfera è: $V=4/3 \pi R^3$
- La superficie esterna è: $S=4 \pi R^2$
- la massa volumica è 7850 kg/m³
- La massa $M= 7850 \times 0,00214357 \text{ m}^3=16,82$ kg
- La superficie $S=0,080$ m²
- Il calore specifico c dell'acciaio è : 460 j/kg °C
- $CT=MC/KS= 9671$ secondi(in aria)
- $CT=MC/KS= 644$ secondi(in acqua)

1.4 PROVE SPERIMENTALI SUI TRASDUTTORI DI TEMPERATURA

Si presentano alcune prove sperimentali sui sensori di temperatura volte a determinare la costante di tempo e capire le differenze fra diverse situazioni. Le prove sono state effettuate secondo queste modalità:

- il corpo viene portato ad una temperatura iniziale stabile
- il corpo viene successivamente riportato nell'ambiente
- Si misura $\Delta t = t_{iniziale} - t_{finale}$. e si determinano le tre temperature
 - $t_1 = t_{iniz} - 0,632 \Delta t$
 - $t_2 = t_{iniz} - 0,865 \Delta t$
 - $t_3 = t_{iniz} - 0,95 \Delta t$
- Dalle curve temperature -tempo si ricavano i tempi corrispondenti T_1, T_2, T_3 , che dovrebbero essere, per la teoria prima esposta uguali a, rispettivamente, $CT, 2CT, 3CT$.

Una costante di tempo media può ricavarsi come:

$$CT = (T_1 + T_2 + T_3) / 6$$

Prova n.1 :La costante di tempo sperimentale mediata sui 3 tempi indicati è: $(7+27+51)/6=14,2$ secondi

	Tempo[secondi]	Temperatura[°C]
tempo=T	7	94
tempo=2T	27	46,3
tempo=3T	51	28,7
Temperatura iniziale °C=223.6	Temperatura ambiente 20,6°C	$\Delta T = 204,8^\circ\text{C}$

Tabella 3: dati della prova 1

Prove nr 2 e 3 . Le prove sono state effettuate per lo stesso sensore ,confrontando i valori della costante di tempo quando il mezzo con cui uno stesso corpo scambia calore sia aria o acqua.

- prova 2:portando il sensore dalla temperatura dell'acqua calda in aria calma .Si ottiene una costante di tempo media di 116 secondi
- prova 3:portando il sensore immerso nell'acqua calda in acqua fredda . Si ottiene una costante di tempo di 5.8 secondi.

Queste due prove evidenziano la forte differenza, come noto dalla teoria, fra la trasmittanza in aria e la trasmittanza in acqua.

	Tempo in secondi	Temperatura °C
tempo=T	102	47
tempo=2T	227	32
tempo=3T	367	26
Temperatura iniziale =89°C	Temperatura ambiente 23°C	$\Delta T = 66^\circ\text{C}$

Tabella 4: dati della prova 2

	Tempo in secondi	Temperatura °C
tempo=T	3	48
tempo=2T	10	31
tempo=3T	22	25
Temperatura iniziale °C=95°C	Temperatura acqua = 21°C	DT =74°C

Tabella 5: dati della prova 3

Prova su una termocoppia j per differenti salti di temperatura.

In tal caso si vuol dimostrare la quasi costanza della costante di tempo , per uno stesso corpo, al variare del salto termico. Una termocoppia j ,portata ad una certa temperatura viene poi trasferita in aria calma (tabelle 4,5,6) . Dalle tre prove effettuate si può dedurre che la costante di tempo è sostanzialmente la stessa .La variazione fra i tre valori è comunque pienamente ammissibile in quanto le grandezze fisiche , calore specifico e trasmittanza ,che fanno parte della definizione teorica della costante di tempo sono variabili con la temperatura . Infatti:

- **prova 4:**La costante di tempo media è di 12,1 secondi
- **prova 5:**La costante di tempo media è di 11,9 secondi
- **prova 6:**La costante di tempo media è di 14,1 secondi

	Tempo in secondi	Temperatura °C
tempo=T	12	131
tempo=2T	26.5	62
tempo=3T	34	36.8
Temperatura iniziale=318°C	Temperatura ambiente =21°C	DT =297°C

Tabella 6: dati della prova 4

	Tempo in secondi	Temperatura °C
tempo=T	13	77,7
tempo=2T	26	42,7
tempo=3T	32	29,9
Temperatura iniziale=172,7°C	Temperatura ambiente=22.4°C	DT =150,3°C

Tabella 7: dati della prova 5

	Tempo in secondi	Temperatura °C
tempo=T	8,5	200,5
tempo=2T	27	86,8
tempo=3T	49	45,4
Temperatura iniziale =508,8°C	Temperatura ambiente =21°C	DT =487,8°C

Tabella 8: dati della prova 6

Riferimenti WEB

Termocoppie e termoresistenze

<http://www.gefran.com>

http://www.centigrado.it/ita/pag_it_termocoppie.htm

http://www.watlow.it/prodotti/sensori/se_therm.htm

<http://www.tcdirect.it/deptprod.asp>

lamine bimetalliche

www.selinmilano.it

Il costo del libro completo(350 pagine circa) è di 15,00 euro

Richiedere all'autore

taraschi_nicola@libero.it

