

MA0748 - FISICA PER I DISPOSITIVI IOT

Lorenzo Santi

AA 2022/23 – Lezione 17 30/05/2023

Argomenti della lezione di oggi

- Sensori di temperatura
 - Termoresistenze e termistori
- Un sensore di temperatura basato su un diodo a giunzione in polarizzazione inversa

Termoresistenze e termistori

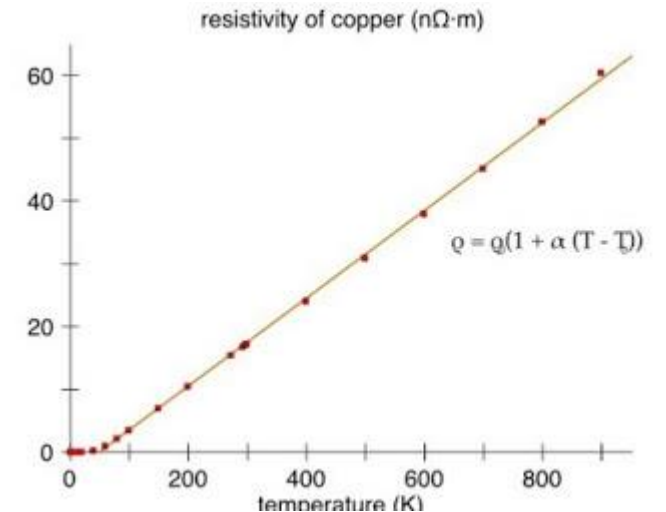
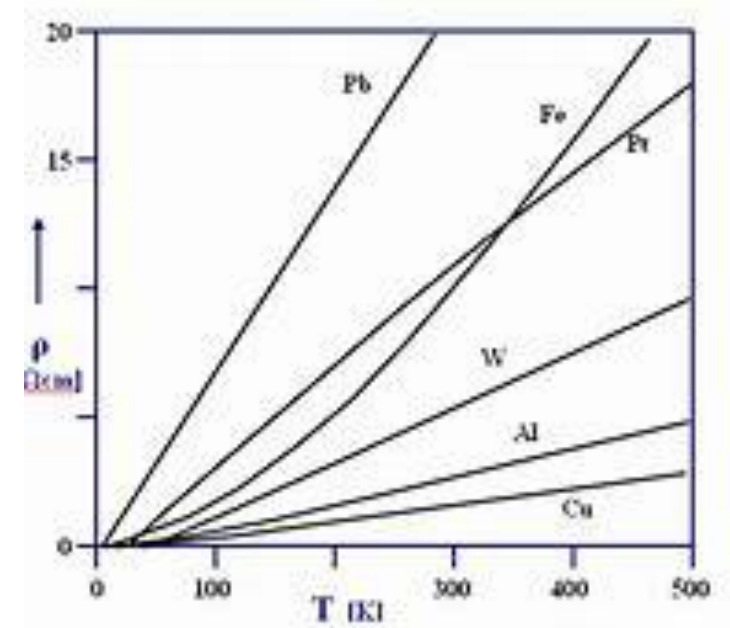
Le termoresistenze ed i termistori sono dei sensori di temperatura nei quali il processo di trasduzione viene effettuato sfruttando la proprietà che la resistenza di un conduttore dipende dalla sua temperatura.

I due tipi di sensori differiscono tra di loro per il materiale di cui sono fatti e per il segno della correlazione tra resistenza e temperatura.

Le **termoresistenze** sono fatte di materiale metallico puro.

In un conduttore metallico la densità di portatori di carica risulta costante con il variare della temperatura: la resistenza al flusso della corrente elettrica dipende dalle perdite di energia dei portatori di carica con le interazioni con i nodi del reticolo cristallino. Tali «urti» sono tanto più frequenti quanto più è irregolare il reticolo: l'agitazione termica aumenta tale irregolarità, facendo vibrare gli atomi posti nei nodi.

In questo modo la resistenza aumenta con l'aumentare della temperatura. Per una gran parte dei metalli, questa correlazione è ben approssimata da un andamento lineare, fino a temperature abbastanza basse (a bassa temperatura, prevale la resistenza dovuta alle irregolarità naturali del reticolo ed alle impurezze, per cui la resistività risulta essere costante)



Per la realizzazione delle termoresistenze usate come sensori di precisione viene usato tipicamente il platino come materiale, a causa del fatto che ha una relazione resistività-temperatura estremamente stabile e riproducibile, su un vasto intervallo di temperature ($-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $500\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Opportunamente tarati, questi sensori possono raggiungere precisioni dell'ordine del centesimo di grado e sono in tale senso superiori ad esempio alle termocoppie.

Lo svantaggio rispetto alle termocoppie è che, per evitare contaminazioni e fenomeni di strain gauge dovuti a stress meccanici, sono montati su supporti ed incapsulati in maniera tale da richiedere uno scambio di calore molto maggiore con il corpo di cui si vuole misurare la temperatura. Questo si traduce in una risposta molto lenta del sensore.

I **termistori** usati come sensori sono tipicamente dei semiconduttori formati da ossidi metallici.

Questa categoria di termistori utilizzano il comportamento di un semiconduttore intrinseco: all'aumentare della temperatura, si ha un aumento della frazione di elettroni di valenza alla banda di conduzione e quindi un aumento della densità di portatori di carica (sia elettroni e lacune).

Questo provoca una diminuzione della resistività ρ del materiale: la legge che regola la dipendenza di ρ dalla temperatura T (espressa in gradi Kelvin) deriva dal modello visto nella lezione 11

$$\rho \propto 1/n_i \propto T^{-\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{\Delta E}{\frac{1}{2}kT}\right)$$

Un termistore che ha una correlazione inversa tra resistenza e temperatura viene chiamato **NTC** (Negative Temperature Coefficient), poiché in una approssimazione lineare il coefficiente α di proporzionalità tra variazioni di resistenza e variazioni di temperatura è negativo

$$\frac{\Delta R}{R_{T=T_0}} = \alpha \frac{\Delta T}{T_0}$$

Poiché per il semiconduttore intrinseco, in un intervallo di temperature limitato, la variazione di resistività è dominata dal termine esponenziale, si ha per questo dispositivo una relazione fenomenologica tra la resistenza R e la temperatura T del tipo

$$R = R_{\infty} e^{B/T}$$

che costituisce la relazione fondamentale per tarare la funzione di trasferimento del sensore.

Tra i termistori ci sono anche dispositivi **PTC** (Positive Temperature Coefficient): sono tipicamente costituiti da materiali non omogenei, la cui resistenza dipende da come le strutture del materiale si modificano con la temperatura. In generale, i dispositivi PTC non sono adatti per l'uso come sensori: vengono impiegati come limitatori di corrente, sia in modo non distruttivo che distruttivo (fusibili).

Un sensore di temperatura basato su un diodo a giunzione in polarizzazione inversa

Come abbiamo visto nella lezione 12 la curva I-V di un diodo a giunzione risulta del tipo

$$I(V_{alim}) = I_s \left(\exp \left(\frac{eV_{alim}}{kT} \right) - 1 \right)$$

La dipendenza dalla temperatura però non si limita a quella esplicita nella precedente espressione: anche la corrente di saturazione dipende dalla temperatura, $I_s = I_s(T)$.

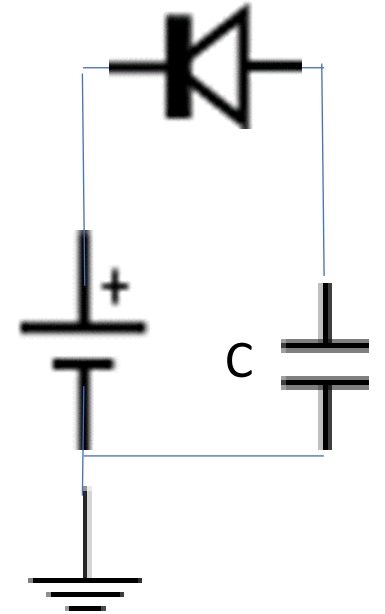
Questa dipendenza è ancora una volta di tipo esponenziale: una regola abbastanza semplice è che I_s raddoppia all'incirca per ogni aumento di 10°C.

Questo comportamento viene usato in alcuni particolari sensori di temperatura con un diodo alimentato in polarizzazione diretta ad una certa tensione prefissata.

Nell'esperienza di laboratorio n.7 vedremo invece un sensore di temperatura realizzato con un diodo al germanio, alimentato in polarizzazione inversa, in cui viene misurata la corrente di saturazione I_s .

Il problema di un sensore che operi in tale modo è che le correnti sono estremamente piccole (in un diodo normale sono dell'ordine del nA) e quindi risultano di difficile misurazione.

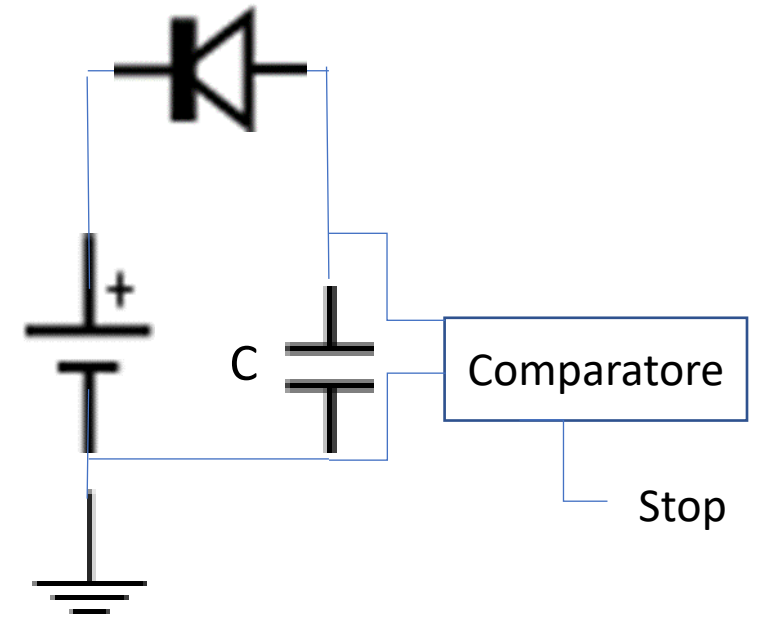
Nel dispositivo che vedremo il problema è stato risolto utilizzando un convertitore analogico-digitale che si basa sulla misura del tempo di caricamento di un condensatore per effetto della corrente circolante.



La corrente circolante nel circuito dipende dalla tensione ai capi del diodo: se però la tensione ai capi del condensatore non ha ancora raggiunto il valore della tensione erogata dall'alimentatore, la corrente è sostanzialmente pari a quella di saturazione I_s del diodo.

Si ha così che la tensione V_C sul condensatore dipende dalla corrente I_s e dall'intervallo di tempo Δt di carica considerato

$$V_C = \frac{Q}{C} = \frac{I_s \Delta t}{C}$$



La tensione V_C sul condensatore viene confrontata mediante un comparatore con una di riferimento V_{ref} : quando V_C supera tale valore viene generato un segnale logico «stop».

Se questo segnale viene usato per fermare un contatore il cui valore viene incrementato ad ogni ciclo fornito da un orologio (clock), si ottiene una misura del tempo Δt in termini di **numero n di cicli di clock** impiegato dal circuito a caricare il condensatore fino a V_{ref} . Questo numero n risulta così correlato al valore della corrente di saturazione I_s

$$I_s = \frac{C V_{ref}}{n}$$

Abbiamo così trasdotto la misura di corrente I_s (e quindi la temperatura T del diodo) in una misura digitale «numero di clock» n .

Ma quale è la relazione tra questi due valori?

Senza tediare ulteriormente con particolari, risulta che una relazione tra T e n adatta è

$$n = n_0 e^{-BT}$$

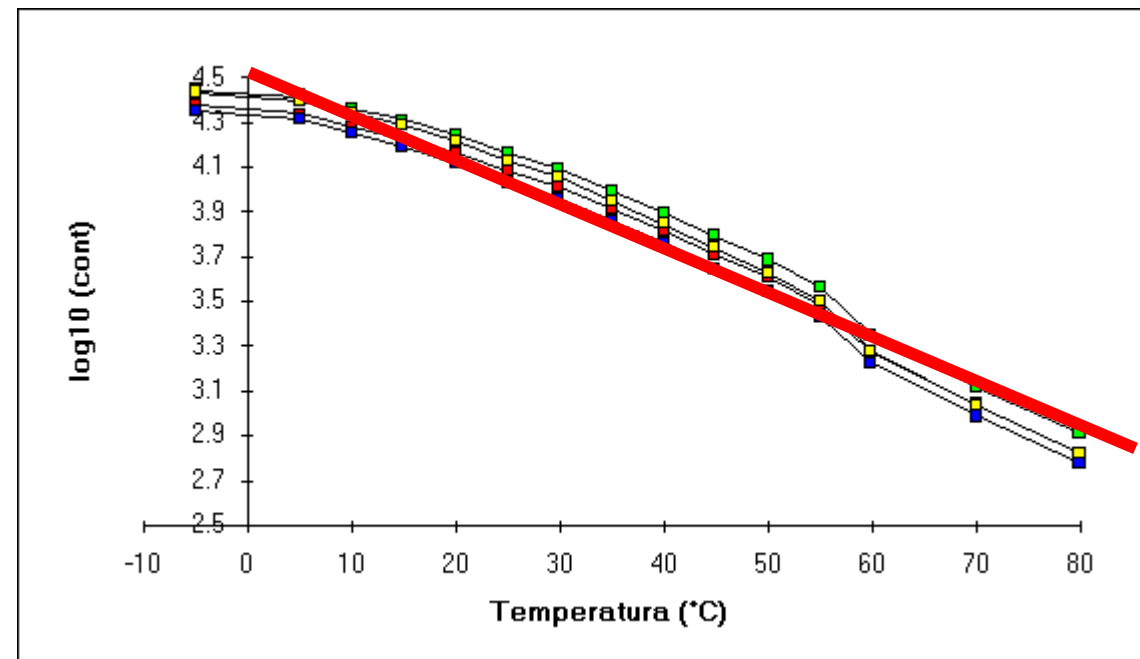
ove per semplicità supponiamo di esprimere le temperature in gradi centigradi (n_0 e B sono delle costanti da determinare).

Questa relazione esprime abbastanza bene il tipo di relazioni qualitative che abbiamo visto: all'aumentare della temperatura aumenta la corrente circolante e quindi diminuisce il tempo necessario per caricare il condensatore. Inoltre questa dipendenza scala risulta esponenziale, il che è in accordo col fatto che la corrente aumenta di un fattore per un aumento fisso di temperatura.

Ovviamente la relazione

$$n = n_0 e^{-BT}$$

è solo approssimata. Se effettuiamo una operazione di taratura, in cui andiamo a valutare il numero n di conteggi per una data temperatura T , avremo un risultato simile a quello riportato in figura.



Nel grafico sono riportati i valori di $\log_{10}n$ di quattro diversi sensori, in funzione della temperatura. La linea rossa mostra quella che dovrebbe essere la correlazione tra le due variabili, secondo la precedente relazione.

Usando una semplice correlazione lineare non assicura abbastanza precisione: è necessario effettuare una calibrazione su più punti di misura, usando poi una funzione di trasferimento interpolata (linearmente) tra le diverse coppie di punti di misura.

Tempo di risposta di un sensore di temperatura

Il processo di trasduzione alla base del funzionamento di un sensore di temperatura richiede che il dispositivo raggiunga l'equilibrio termico con il corpo soggetto alla misura.

Questo richiede tempo: vediamo perché.

In una interazione termica la temperatura T di un oggetto varia a causa di una quantità di energia Q (**calore**) ricevuta dall'ambiente circostante con una legge approssimata del tipo

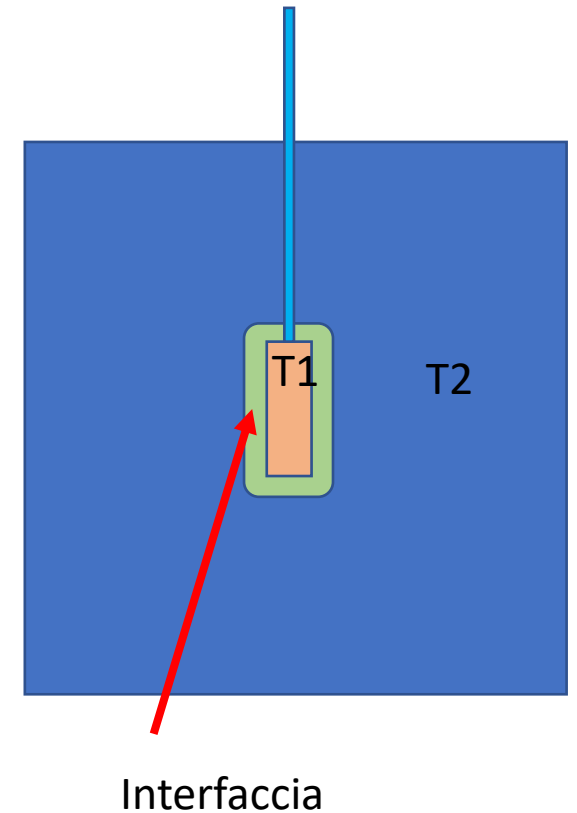
$$C \Delta T = Q$$

ove C è un parametro chiamato **capacità termica**, che dipende dal tipo di materiale di cui è fatto l'oggetto ed è proporzionale alla massa dell'oggetto stesso

Il calore che viene scambiato tra due oggetti a temperatura diversa T_1 e T_2 (ad esempio il nostro sensore e un bagno d'acqua in cui è immerso) dipende dalle caratteristiche dello strato che fa da interfaccia tra di essi: una relazione (chiamata legge di Newton della conduzione termica) mostra come il flusso di calore dipenda dalla differenza di temperatura tra i due oggetti

$$Q = A B (T_2 - T_1) \Delta t$$

ove Δt è l'intervallo di tempo considerato nello scambio termico, A è l'area della superficie di contatto tra i due oggetti e B un ulteriore parametro, dipendente dallo spessore dell'interfaccia tra i due oggetti e dal materiale di cui è costituita.



Se mettiamo assieme le due relazioni viste, abbiamo che la temperatura T_1 del sensore varia nel tempo secondo la legge

$$C \Delta T_1 = Q = A B (T_2 - T_1) \Delta t$$

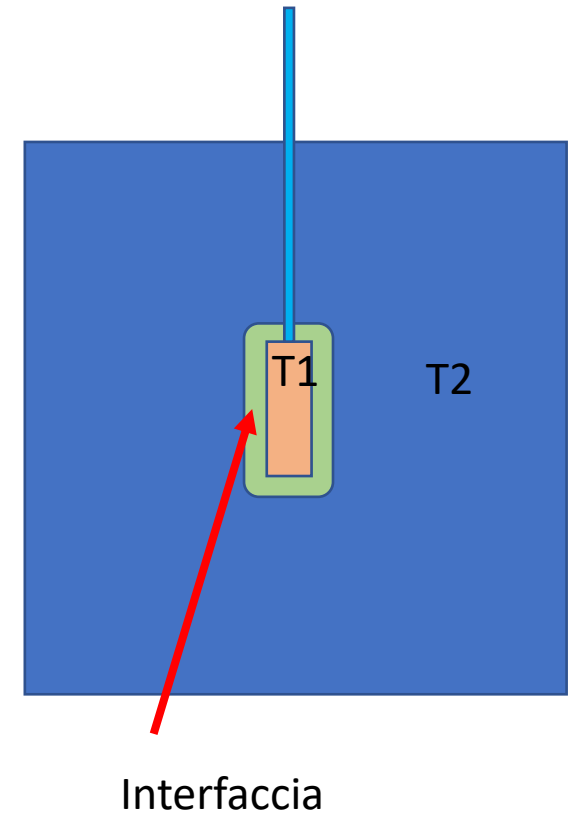
E quindi

$$\frac{\Delta T_1}{\Delta t} = -\frac{A B}{C} T_1 + \frac{A B}{C} T_2$$

Se la massa dell'acqua del bagno è talmente grande che la temperatura T_2 non varia significativamente nello scambio termico, la precedente relazione può essere riscritta come

$$\frac{\Delta(T_1 - T_2)}{\Delta t} = -\frac{A B}{C} (T_1 - T_2) = -\frac{1}{\tau} (T_1 - T_2)$$

Avendo posto $\frac{1}{\tau} = \frac{A B}{C}$.



La relazione

$$\frac{\Delta(T1 - T2)}{\Delta t} = -\frac{1}{\tau}(T1 - T2)$$

ci dice che la differenza di temperatura $T1-T2$ diminuisce esponenzialmente nel tempo, con una costante di tempo τ che dipende dalla capacità termica del sensore e dallo spessore dell'interfaccia con l'ambiente esterno.

Questo significa

$$T1(t) - T2 = (T1(t = 0) - T2)e^{-t/\tau}$$

Ciò significa che si ha effettivamente un equilibrio termico solo se il tempo in cui si effettua una misura è dell'ordine di grandezza del tempo di risposta τ del sensore.

Questo implica che sensore massivi (come i termistori, con i loro rivestimenti protettivi) sono tipicamente più lenti di altri, come le termocoppie, per i quali la regione attiva è molto più piccola e quindi meno massiva.

