

## Temperatura e calore

La temperatura misura l'energia interna media di un corpo. Che si tratti di una energia *media*, indipendente quindi dalla quantità di materia considerata, dovrebbe esser chiaro dal fatto che l'acqua prelevata con un secchio da un lago è alla stessa temperatura dell'acqua nel lago.

L'energia di agitazione termica prende diverse forme, a seconda dello stato fisico del corpo. È energia cinetica (atomi, molecole di gas, atomi dei solidi), potenziale elastica (solidi), rotazionale (molecole di gas).

Si dice che l'energia è ripartita ugualmente nei vari gradi di libertà, cioè nelle varie forme di energia possibili per i componenti elementari della materia, atomi e molecole. Ad ogni grado di libertà compete un'energia pari a  $1/2kT$ .

Ad esempio, Un gas monoatomico come l'elio ha 3 gradi di libertà dati dalle tre velocità  $v_x, v_y, v_z$  e l'energia associata al moto della molecola è  $\frac{1}{2}m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)$ .

Una molecola biatomica ha due gradi di libertà in più, ovvero le velocità angolari di rotazione intorno al baricentro del sistema e la associata energia rotazionale  $\frac{1}{2}I(\omega_x^2 + \omega_y^2)$ . In totale quindi ha 5 gradi di libertà e l'energia è egualmente ripartita tra questi: infatti i corrispondenti calori specifici, cioè la misura di quanta energia termica (calore) occorre fornire per aumentare la temperatura di una certa quantità di sostanza, sono nelle stesse proporzioni, 3 a 5 da molecole monoatomiche a biatomiche.

Nei solidi i gradi di libertà sono sei, tre per il moto di vibrazione degli atomi intorno alla loro posizione di equilibrio e tre per il potenziale elastico, quindi il calore specifico è proporzionale a  $3kT$ .

## Calore

È il nome dato in passato all'energia termica, quella dovuta ai moti dei componenti microscopici della materia.

Che il calore sia proporzionale alla massa dovrebbe essere chiaro dal fatto che per scaldare un litro d'acqua si consuma un terzo del gas necessario a scaldarne tre litri.

Si tratta di una modellizzazione necessaria a trattare il problema, di grande importanza pratica, della quantificazione di questo tipo di energia.

Quando si parla di riscaldamento/raffreddamento e in generale di trasferimento di calore, si parla del modello macroscopico che permette di quantificare questi scambi e, ad esempio, stabilire che per i fondi della pentole è migliore il rame o l'alluminio, mentre per isolare una parete usiamo il poliuretano.

Il modello, attraverso il corredo di leggi che quantificano i fenomeni macroscopici, permette di calcolare il rendimento delle macchine termiche, le dispersioni termiche di una abitazione, il riscaldamento dei mari e dell'atmosfera, ecc.

Tuttavia occorre sempre ricordare che la natura dei fenomeni resta microscopica e statistica, visto il numero enorme di atomi o molecole contenuti in una sia pur minima quantità di materia.

### Legge dei gas

La legge fondamentale dei gas collega le tre grandezze macroscopiche *pressione*  $p$ , *volume*  $V$  e *temperatura*  $T$  nell'equazione detta dei *gas perfetti*<sup>(1)</sup>. È

$$pV = nRT$$

dove  $n$  è il numero di moli<sup>(2)</sup> di gas e  $R$  è una costante universale, detta costante dei gas perfetti.

Nell'equazione compaiono tre variabili. Fissata la temperatura  $T$ , si ha

$$pV = \text{costante}$$

la legge di Boyle che esprime la proporzionalità inversa tra pressione e volume. Fissando il volume si ricava la dipendenza della pressione dalla temperatura e analogamente fissando la pressione, si ottiene la dipendenza tra volume e temperatura.

$$p = p_0(1 + \alpha T) \quad V = V_0(1 + \alpha T)$$

dove il coefficiente  $\alpha$  vale circa  $1/273$ .

---

<sup>(1)</sup> Il comportamento di un gas reale coincide praticamente con quello del modello (gas perfetto) quando la pressione è inferiore a 2-3 atm. Quindi, ad esempio, i gas presenti nell'aria si comportano in pratica come gas perfetti.

<sup>(2)</sup> Per definizione, una mole corrisponde a quella quantità di gas che contiene il numero di Avogadro di atomi o molecole.

## Pressioni parziali - Legge di Dalton

La pressione delle singole componenti di una miscela di gas è la stessa che quel gas avrebbe se da solo occupasse tutto il volume disponibile. Questo, ad esempio, implica che nell'aria a livello del mare, la pressione dovuta all'azoto (80%) è circa 0.8 atm, mentre quella dovuta all'ossigeno è circa 0.2 atm, essendo l'ossigeno in percentuale il 20% dei gas che compongono l'aria.

## Postulato di Kelvin

Per il calore vale il postulato di Kelvin, equivalente al postulato di Clausius, che recita

È impossibile una trasformazione il cui *unico* effetto sia trasferire calore da una sorgente a temperatura minore ad una a temperatura maggiore.

Ciò parrebbe vietare l'esistenza dei frigoriferi domestici e industriali, ma appunto il frigorifero trasferisce calore dall'interno, a temperatura più bassa all'esterno del frigorifero, a temperatura più alta, mediante il compressore e il compressore consuma energia elettrica.

Una conseguenza del postulato è che i sistemi procedono *spontaneamente* verso l'equilibrio termico, cioè verso la stessa temperatura nel loro insieme. Situazioni in cui vi sono differenze di temperatura sono "anomale" rispetto al comportamento "spontaneo" dei sistemi termici.

D'altra parte appare chiaro che la differenza di temperatura è il "motore" degli scambi termici. Quindi, ad esempio, i fenomeni atmosferici sono manifestazioni di differenze di temperatura delle masse d'aria.

## Calore specifico

Il calore specifico è per definizione la quantità di energia termica necessaria per innalzare di un K la temperatura di un kg di una certa sostanza.

Qui occorre distinguere tra gas e liquidi o solidi. Mentre in solidi e liquidi l'aumento di temperatura è accompagnato da variazioni solitamente trascurabili di volume, nei gas gli effetti sono notevoli. Si distingue per i gas il calore specifico a volume costante da quello a pressione costante. Nel secondo, una parte dell'energia termica immessa nel sistema viene usata per aumentare il volume; quindi in generale il calore specifico a pressione costante, con il gas

che aumenta di volume e compie lavoro per espandersi è maggiore del calore specifico a volume costante. Il rapporto tra i due tipi di calore specifico è costante e dipende sostanzialmente dal tipo di molecola del gas: monoatomica, biatomica, o poliatomica. Per i gas vale la tabella

Gas	$C_{mp}$	$C_{mv}$	$C_{mp} - C_{mv}$
Monoatomici	20,79	12,52	8,27
Biatomici			
N <sub>2</sub>	29,12	20,80	8,32
O <sub>2</sub>	29,37	20,52	8,39
CO	29,04	20,49	8,30
Poliatomici			
CO <sub>2</sub>	36,62	28,17	8,45
NO <sub>2</sub>	36,90	28,39	8,51

### Misurare la temperatura

La temperatura viene quantificata mediante la misura della variazione di certe proprietà fisiche legate alla temperatura. Sono preferiti i comportamenti lineari, per cui le variazioni delle proprietà sono direttamente proporzionali alle variazioni di temperatura.

Volume e pressione di un gas variano con la temperatura e il termometro a gas a pressione costante è lo strumento che fissa la scala di temperatura, il riferimento per gli altri termometri. È uno strumento da laboratorio ingombrante usato solo per misure di grande precisione e per tarare altri termometri.

La variazione di volume e in generale la variazione delle dimensioni dei corpi (dilatazione lineare) è un altro effetto usato per misurare la temperatura (termometro ad alcool o a mercurio) o costruire dispositivi che cambino stato una certa temperatura (bimetalli).

La legge è *lineare*, cioè si ammette che la variazione della lunghezza  $\Delta L$  (rispettivamente del volume  $\Delta V$ ) sia proporzionale alla lunghezza  $L$  (al volume  $V$ ) iniziale e alla variazione di temperatura  $\Delta T$ . In formule

$$\Delta L = \alpha L \Delta T, \quad \Delta V = \gamma V \Delta T$$

Allora i coefficienti  $\alpha$ ,  $\gamma$  si ottengono come

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L \Delta T} \quad \gamma = \frac{\Delta V}{V \Delta T}$$

I coefficienti si misurano in  $K^{-1}$ . Infine si ricavano lunghezza e volume di un solido in funzione della temperatura come

$$L = L_0(1 + \alpha T) \quad V = V_0(1 + \gamma T)$$

rispettivamente per le dimensioni lineari e il volume. Risulta con buona approssimazione  $\gamma = 3\alpha$ . I coefficienti per i solidi sono in generale piccoli, dell'ordine di  $10^{-5}$ , con alcune sostanze che mostrano coefficienti molto piccoli, dell'ordine di  $10^{-6}$ .

Sostanza	$\alpha$
Alluminio	$24 \times 10^{-6}$
Ferro	$11 \times 10^{-6}$
Ghiaccio	$51 \times 10^{-6}$
Invar	$1 \times 10^{-6}$
Ottone	$19 \times 10^{-6}$
Rame	$17 \times 10^{-6}$
Vetro	$9 \times 10^{-6}$

Al confronto, i liquidi si dilatano circa 100 volte di piú, con coefficienti intorno a  $10^{-3}$ . I coefficienti in generale dipendono dalla temperatura, ma possono essere ritenuti praticamente costanti per piccole variazioni di temperatura.

Questo non è il caso dei gas per cui il coefficiente di dilatazione a pressione costante è inversamente proporzionale alla temperatura. Infatti, tenendo costante la pressione, dalla legge dei gas perfetti si ricava

$$p\Delta V = nR\Delta T \quad \text{ovvero} \quad \gamma = \frac{\Delta V}{V\Delta T} = \frac{nR\Delta T}{nRT\Delta T} = \frac{1}{T}$$

Alcuni valori approssimati di  $\gamma$  a temperatura ambiente (293 K, 20 °C) sono

Sostanza	$\gamma$
Acqua	$0.2 \times 10^{-3}$
Aria	$3.4 \times 10^{-3}$
Alcool	$1.1 \times 10^{-3}$

La variazione di resistività elettrica è l'effetto piú usato nella moderna misura di temperatura per il diretto interfacciamento con dispositivi elettronici. Tutte le sostanze mostrano questo comportamento, ma in alcune la variazione di resistività è lineare (platino) su un'ampia scala, oppure maggiore a parità di variazione di temperatura. (termistori).

Qui i coefficienti per i metalli in genere sono dell'ordine di qualche unità per  $10^{-3}$ . Alcune leghe esibiscono coefficienti praticamente nulli e vengono usate per costruire i campioni di resistenza.

Altri dispositivi possono venir assimilati a generatori di tensione. Le termocoppie vengono usate comunemente per temperature medio-alte (fino a  $1\,000 - 1\,500\text{ }^\circ\text{C}$ ), mentre sono disponibili dispositivi a semiconduttore con sensibilità dell'ordine dei  $10\text{ mV}/^\circ\text{C}$  nell'intervallo di temperature  $-25 + 75\text{ }^\circ\text{C}$ .

In ogni caso per misurare una temperatura occorre attendere che sia stato raggiunto l'equilibrio termico, cioè che la temperatura del termometro sia la stessa del solido, liquido o gas di cui si vuol misurare la temperatura. Poiché per raggiungere l'equilibrio termico occorre che una certa quantità di calore sia trasferita al termometro o al sensore, ecco che, minore la massa, maggiore la prontezza nella misura della temperatura.

La temperatura di un corpo può essere anche stabilita a distanza attraverso la misura dello spettro della radiazione termica che *ogni* corpo emette. In tal modo si misurano sia temperature molto alte come la temperatura dei forni industriali e della superficie delle stelle, ma anche le basse temperature tipiche di un edificio o del corpo umano (termografia).

### Scale termometriche

La scala termometrica del SI misura la temperatura in K (Kelvin) a partire dallo zero assoluto, ma l'ampiezza dell'intervallo di temperatura che corrisponde a 1 K è la stessa dell'usuale  $1\text{ }^\circ\text{C}$  della scala Celsius (centigrada). Le scale centigrada e assoluta sono soltanto "spostate" l'una rispetto all'altra di 273.15, essendo  $0\text{ }^\circ\text{C}$  pari a 273.15 K. Come riferimenti di temperatura sono stati scelti fenomeni fisici ben riproducibili. Tra questi vi è il punto triplo dell'acqua, la temperatura a cui "convivono" ghiaccio, acqua e vapor d'acqua, che è stato fissato a 273,16 K, cioè  $0,1\text{ }^\circ\text{C}$ .

La scala più comunemente in uso nei paesi anglosassoni e segnatamente negli USA, è la scala Fahrenheit (da x Fahrenheit). In questa scala l'intervallo tra il punto di fusione del ghiaccio e quello di ebollizione dell'acqua è suddivisa in 180 parti. La scala è lineare e quindi le formule che legano le scale Fahrenheit (in gradi

°F), la scala centigrada (in gradi °C) e la scala assoluta (in K) sono lineari. Si ha

$$T [^{\circ}\text{C}] = \frac{5}{9}(T [^{\circ}\text{F}] - 32) \quad \text{e} \quad T [\text{K}] = \frac{5}{9}(T [^{\circ}\text{F}] - 32) + 273.15$$

e inversamente

$$T [^{\circ}\text{F}] = \frac{9}{5}T [^{\circ}\text{C}] + 32 = \frac{9}{5}(T [\text{K}] - 273.15) + 32$$

## Misure

### Misure di posizione

Sino a poco meno di 15<sup>(3)</sup> anni fa', per stabilire la posizione geografica si utilizzavano i metodi trigonometrici, basati sulla *triangolazione*<sup>(4)</sup>, cioè la suddivisione del territorio in una griglia a maglia triangolare, che permette di calcolare con elevata precisione distanze, elevazioni, aree ... con la misura di angoli e l'applicazione di noti teoremi di trigonometria<sup>(5)</sup>, a partire da *capisaldi*, punti fissi di cui si conosce con piccolissimo errore, grazie a precedenti misure, posizione geografica e altezza.

Piú recentemente, a partire dal 1995 si ricorre quasi esclusivamente al GPS (*Global Positioning System*). Nato per scopi militari (guida sul bersaglio delle testate degli ICBM) il sistema GPS consiste in satelliti in orbita a circa 20 200 km<sup>(6)</sup> che emettono segnali radio (con frequenza  $\approx 1.6$  GHz, come quella del clock di un netbook) ricevibili in qualsiasi punto della superficie della Terra.

---

<sup>(3)</sup> Il sistema GPS è completamente operativo da 27 aprile 1995.

<sup>(4)</sup> Con questo metodo fu misurata, negli anni 1791–1798, la lunghezza dell'arco di meridiano da Dunquerque a Barcellona. La misura dell'arco di meridiano, frutto di otto anni di lavoro di un gruppo di scienziati e geografi francesi, portò a definire il metro come la quarantamilionesima parte del meridiano terrestre.

<sup>(5)</sup> Tra tutti, i teoremi dei seni e del coseno che, come si usa dire, risolvono un triangolo. È comunque necessario un elemento metrico, una distanza nota tra due punti fissi.

<sup>(6)</sup> Ogni satellite compie due orbite complete al giorno.

Gli orologi atomici nei satelliti<sup>(7)</sup> forniscono segnali temporali di altissima precisione<sup>(8)</sup> Il satellite manda continuamente (ogni 30 s) un messaggio a bassa velocità (50 bit/s) che contiene

- le marche temporali, costituite dal fronte dello stesso segnale codificato trasmesso dal satellite;
- la posizione del satellite nella sua orbita<sup>(9)</sup>;
- la posizione approssimativa di tutti i satelliti del sistema e informazioni sullo stato di salute del satellite stesso.

Un orologio contenuto nel ricevitore misura con elevata precisione i diversi tempi di ritardo con cui i segnali vengono ricevuti sulla Terra; questi dipendono dalla posizione del ricevitore sulla superficie terrestre. Algoritmi contenuti nel software del ricevitore convertono il ritardo del segnale nella posizione del punto rispetto alla posizione dei satelliti nota dalle effemeridi (latitudine, longitudine, elevazione) con un'incertezza che al massimo è di 10 m. Prima del 2000 fa il segnale veniva distorto dai gestori (i militari USA) per ragioni di sicurezza, cioè per non fornire coordinate troppo precise per guidare armi strategiche sul bersaglio. L'errore volutamente introdotto portava l'incertezza sulla posizione a  $\approx 100$  m. Per questo motivo era pratica comune determinare la correzione necessaria posizionando il ricevitore su un punto di coordinate note e confrontando la posizione letta sul GPS con la posizione geografica nota. Questa pratica è rimasta per misure di precisione anche dopo che, nel 2000, il disturbo è stato rimosso.

Inoltre l'incertezza sulla posizione viene ridotta posizionando il ricevitore nello stesso punto per un certo periodo di tempo. Facendo la media di  $n$  misure l'errore statisticamente si riduce come  $\sqrt{n}$  e quindi è possibile, ad esempio, avere risoluzioni dell'ordine del centimetro o migliori semplicemente lasciando il ricevitore

---

<sup>(7)</sup> In qualsiasi punto della Terra è si vedono almeno 6 e tipicamente 8 satelliti degli attualmente 30 in orbita, ma tra questi il ricevitore gps ne sceglie automaticamente, in base alla altezza sull'orizzonte, solo 4, il numero sufficiente per una misura accurata di posizione.

<sup>(8)</sup> Che tuttavia, a causa di effetti relativistici, vanno periodicamente corretti dal controllo a Terra.

<sup>(9)</sup> Sono le *effemeridi*, cioè le coordinate del punto dove si trova il satellite in quel momento.

in una stessa posizione per un sufficiente lasso di tempo, facendo poi la media dei valori.

Le fonti principali di errore sono

- il tempo di arrivo, ovvero la stima dell'intervallo di tempo misurato dall'orologio del ricevitore, all'incirca  $\pm 3\text{ m}^{(10)}$ ;
- gli effetti della ionosfera, lo strato ionizzato (conduttivo) che circonda la Terra da circa 120 km a circa 320 km di quota; l'errore è valutato in  $\approx \pm 5\text{ m}$ ;
- l'incertezza sulla *effettiva* posizione del satellite ricavata dalle effemeridi e valutata in  $\approx \pm 2\text{ m}$ ;
- l'errore dovuto all'orologio atomico del satellite, valutato in  $\approx \pm 2\text{ m}$ ;

Considerando il caso statisticamente peggiore<sup>(11)</sup>, le principali fonti di errore generano un'incertezza complessiva di circa 7 m.

In molti casi questo è un errore tollerabile e tutto sommato inferiore all'1% su un km. Ovviamente si tratta di *tenere conto* di questa incertezza, analogamente a quanto si fa con una qualunque quantità derivante da una misura.

Oltre alla posizione, altri algoritmi contenuti nel software del ricevitore permettono di calcolare la velocità media di spostamento del ricevitore come rapporto della distanza tra le posizioni successive e il tempo trascorso. Analogamente, la direzione del moto è la direzione del vettore che connette posizioni consecutive.

L'uso del GPS è molto diffuso. Oltre alla varietà di *navigatori* per uso automobilistico, ad esempio, nelle motrici del trasporto ferroviario regionale è installato un sistema GPS (?) che fornisce latitudine e longitudine con una precisione di una frazione di un grado d'arco. Il visore mostra 5 cifre decimali, quindi è possibile leggere  $1 \times 10^{-5}$  di grado; poiché  $1^\circ \approx 111\text{ km}$ , la risoluzione è di circa 1 m, piú che sufficiente a mettere in azione l'annuncio automatico dell'arrivo nella stazione di ...

### Misure di velocità – Effetto Doppler

La velocità rispetto al suolo può venir misurata con un radar o laser *doppler*, come quelli che misurano la velocità delle auto (autovelox e simili). La frequenza del fascio di ritorno è alterata, sia pur di poco, dalla velocità con cui si avvicina/allontana

<sup>(10)</sup> Equivale a un errore temporale di  $10\text{ ns} = 10 \times 10^{-9}\text{ s}$

<sup>(11)</sup> Quello in cui gli errori relativi o assoluti si sommano.

il bersaglio, un corpo che riflette l'onda elettromagnetica o ottica che lo colpisce.

Misurando questo spostamento si ricava la velocità istantanea del mobile rispetto al suolo o alla postazione autovelox.

Nel caso della luce e delle onde elettromagnetiche, la velocità di propagazione dell'onda è quella della luce e la variazione relativa della frequenza ricevuta rispetto alla frequenza emessa è

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{v}{c} \quad \text{dove} \quad c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Ad esempio, per un'auto che viaggia a  $v = 40 \text{ m/s}$  (144 km/h !!) la variazione relativa è

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{40}{3 \times 10^8} \approx 1.3 \times 10^{-7}$$

una differenza molto piccola, ma comunque rivelabile.

## Misure di forza

### Celle di carico

Una sostanza si dice *piezoelettrica* quando, in seguito ad una deformazione meccanica (compressione, flessione), sviluppa una differenza di potenziale elettrico dovute all'accumulo di cariche elettriche di segno opposto sulle facce del solido<sup>(12)</sup>

Nelle celle di carico usate per misurare forze, ad esempio, il peso di un container, una sostanza piezoelettrica traduce la forza applicata in un segnale elettrico che viene poi trattato e convertito in un dato numerico.

### Strain gauge

Nella forma piú semplice si tratta di resistori metallici depositati su un supporto isolante. Tipicamente il supporto viene incollato sul corpo di cui si vuole determinare la deformazione. Quando il resistore si allunga/accorcia la sua resistenza varia e la variazione è direttamente proporzionale alla deformazione.

La variante in cui i resistori sono depositati o integrati in un lamina sottile di silicio è il cuore di vari sensori come accelerometri e sensori di pressione.

I resistori vengono disposti in un circuito a *ponte*; fisicamente i quattro resistori sono posti in modo da rendere lineare la variazione della resistenza in funzione della deformazione.

<sup>(12)</sup> Si tratta di sostanze isolanti come il quarzo e certi tipi di ceramiche sintetiche.

## Misure di umidità

Come è noto, si distingue tra umidità assoluta e relativa: la prima è la quantità di vapor acqueo presente nell'aria, mentre la seconda è il rapporto tra l'umidità assoluta e la massima quantità di vapore che l'aria potrebbe contenere a quella temperatura, quando il vapore è saturo.

Esistono diversi dispositivi in grado di misurare l'umidità assoluta<sup>(13)</sup>. Sostanzialmente una matrice porosa (ossido di alluminio fatto crescere per ossidazione su un substrato di alluminio) cattura l'umidità presente nell'aria e la fa condensare in goccioline.

Sulla superficie del sensore sono posti degli elettrodi in oro in modo tale che, aumentando la superficie conduttiva per via della condensazione dell'umidità, aumenti anche la capacità (sensori capacitivi) oppure la conduttività (sensori resistivi).

Ovviamente non si tratta di sensori molto pronti come tempi di risposta: è normale parlare di tempi dell'ordine dei minuti; inoltre resta il problema di rimuovere l'umidità condensata prima di effettuare un'altra misura, a cui si provvede riscaldando il substrato.

Un dispositivo più complesso abbassa la temperatura di una superficie metallica lucida finché la condensazione diventa visibile, cioè la superficie diventa opaca per via delle goccioline condensate. La temperatura misurata è quella di vapor saturo e si può da una tabella risalire al contenuto di vapor acqueo nell'aria. Questo dispositivo è stato automatizzato: un raffreddatore/riscaldatore a effetto Peltier controlla la temperatura della superficie a specchio, un led e un fotodiodo sono la sorgente e il rivelatore di luce che avvertono quando lo specchio diventa opaco. Dopo aver misurato la temperatura lo specchio viene bruscamente riscaldato per far evaporare l'umidità e poter quindi effettuare un'altra misura.

---

<sup>(13)</sup> L'acqua incorporata durante l'incapsulamento del chip sotto forma di vapor acqueo contenuto nell'aria distrugge letteralmente un circuito integrato; di qui la necessità di misurarne accuratamente il livello assoluto durante il processo di fabbricazione.

### **Anemometri**

Sono dispositivi di varia natura capaci di misurare la velocità del vento e in generale di un gas.

I dispositivi che si vedono ruotare sopra una stazione meteo sono gli anemometri a palette, in cui il flusso d'aria mette in moto una ruota a palette, di solito in numero di tre e dotate di coppe emisferiche. Lo strumento viene tarato misurando la velocità di rotazione in corrispondenza a velocità del vento note.

### **Tubo di Pitot**

Funziona in base alla legge di Bernoulli: il gas (aria) in movimento ha una pressione dinamica a cui si sottrae la pressione statica dell'aria circostante. La differenza delle pressioni è proporzionale al quadrato della velocità con cui l'aria si sposta rispetto al tubo di Pitot. È il principale sistema di misura per un aeromobile. Anche qui il sistema necessita di una taratura: per ogni dispositivo si ricava una funzione empirica che lega pressione e velocità dell'aria.

### **Anemometri a filo caldo**

Il principio è semplice: per convezione l'aria in movimento asporta calore da un filo mantenuto a una temperatura di poco superiore a quella dell'aria stessa. Maggiore la velocità, maggiore la quantità di calore asportata. Il circuito collegato al filo misura la resistenza del filo, che dipende dalla temperatura con una legge che, per le piccole variazioni in gioco, si considera lineare. Vi sono più modi di procedere: misurare la quantità extra di energia che occorre dissipare nel filo per mantenerlo alla temperatura fissata, oppure misurare la variazione di temperatura del filo.

Tipicamente si usa un filo sottilissimo di tungsteno<sup>(14)</sup> di qualche mm di lunghezza. Questo tipo di sensore ha massa minima ed è quindi molto pronto, in grado di misurare rapide variazioni di velocità del vento; inoltre la resistenza del filo si misura agevolmente. Recenti dispositivi usano un filo fotoinciso di NiCr e vengono integrati direttamente con tutta la circuiteria necessaria.

---

<sup>(14)</sup> Il materiale dei filamenti delle lampadine a incandescenza.

## Misure di temperatura

Ciò che interessa in un termometro è

– la prontezza della risposta, cioè il tempo impiegato dal sensore per essere in equilibrio con l'ambiente o la sostanza di cui misurare la temperatura. Poiché questo dipende dalla massa del sensore, i sensori sono più piccoli possibile. Per i sensori impiegati solitamente (termistori ovvero resistenze a coefficiente negativo di temperatura, NTC) si giunge nella strumentazione scientifica fissa (gas cromatografi) a dimensioni di 1/10 di mm. Nelle radiosonde si usano termistori con diametro circa 1 mm.

– la linearità: i sensori a semiconduttore, pur avendo una massa più grande, mostrano una eccellente linearità e con sensibilità tipiche di 10 mV/K, permettono di risolvere 1/10 K.

– un ampio intervallo di temperatura misurabile: è la differenza tra la massima e minima temperatura rilevabili.

### Termoresistenze – NTC

Uno degli standard per misurare temperature su un ampio intervallo è la termoresistenza di platino, un filo sottile di platino avvolto su un supporto indeformabile. La variazione è lineare e comunque la resistività del platino è stata accuratamente studiata.

Più modernamente si usano resistenze a coefficiente negativo di temperatura, in cui la resistenza *diminuisce* all'aumentare della temperatura. Il coefficiente è relativamente grande rispetto a quello tipico dei metalli e quindi la variazione di resistenza è anche notevole. La contropartita di questa elevata sensibilità è il ridotto intervallo di temperature misurabili. Ma per misure nell'atmosfera l'intervallo è di circa 100 K, quindi ampiamente coperto da questo tipo di sensore che ha il vantaggio di avere massa ridottissima e semplicità d'uso.

## Misure di pressione

Un tipo di barometro per stazioni meteo sul territorio è il *barometro anecoico registratore*. Una scatola di lamierino in cui vien fatto il vuoto contiene una molla che ne impedisce lo schiacciamento. Quando la pressione atmosferica varia una leva amplifica i minimi spostamenti della parete della scatola e il pennino li registra sul tamburo di carta fatto ruotare da un meccanismo ad orologeria.

Più modernamente si usano barometri a semiconduttore dove la resistenza di una serie di resistori depositati su una lamina di

semiconduttore varia perché la lamina si flette al variare della pressione. La pressione del gas contenuto nella cavità sigillata sottostante la lamina è la pressione di riferimento del sensore. Il vantaggio sono le dimensioni minime e il fatto che il resto della circuiteria necessaria fornire un segnale direttamente digitalizzabile sono spesso integrate nel sensore. Il semiconduttore degrada se esposto direttamente all'atmosfera, per cui si usano contenitori chiusi da una lamina elastica sottile e riempiti di olio al silicone che trasmette le variazioni di pressione al sensore vero e proprio.

### Misure di pH - pHmetro

Misura la concentrazione di ioni idrogeno  $H^+$  nell'acqua. Normalmente l'acqua, anche se relativamente sporca o torbida, mostra un comportamento neutro e la concentrazione di ioni positivi  $H^+$  è la stessa di quelli negativi  $OH^-$ , convenzionalmente  $10^{-7}$  moli/litro<sup>(15)</sup> Se aggiungiamo un *acido*, un donatore di elettroni, la concentrazione di ioni negativi aumenta e di conseguenza è come diminuisse quella di  $H^+$  e il pH scende, mentre aggiungendo una *base*, un accettore di elettroni, la concentrazione di ioni positivi aumenta ed è come aumentasse quella di  $H^+$  e il pH sale. Il numero di pH è calcolato come il logaritmo decimale del numero di ioni  $H^+$ , quindi ogni numero di pH in più o in meno corrisponde a una variazione della concentrazione di ioni di un fattore 10. Ad esempio, se il pH varia da 7 a 6, gli ioni  $H^+$  in soluzione sono solo 1/10 di prima.

Sostanzialmente la sonda è una pila, il cui elettrodo è separato dalla soluzione da una provetta di vetro poroso abbastanza fragile e naturalmente portata a contaminarsi con le specie chimiche con cui viene a contatto. In particolare le basi forti corrodono il vetro . . . . Nell'apparecchio vi è un elettrodo di riferimento. Le differenze (minime) di potenziale tra elettrodo di misura e campione vengono rivelate da circuiti a ponte, bilanciati, in modo da non assorbire corrente dagli elettrodi di misura e riferimento. Quindi, accoppiando la sonda con l'adatta circuiteria elettronica, si ottiene uno strumento automatico che determina il pH con grande precisione.

---

<sup>(15)</sup> Una *mole* corrisponde alla massa pari al peso molecolare in grammi. Ad esempio, una mole di ossigeno pesa circa 32 grammi, una di carbonio circa 12 grammi, ma entrambe contengono il numero di Avogadro di atomi o molecole

Tuttavia spesso la precisione può essere un requisito successivo, rispetto alla necessità di stabilire se c'è o meno stato un inquinamento da acidi o basi.

Esistono indicatori molto semplici da usare sul campo, strisce di carta impregnata di un reagente che cambia colore a seconda del pH. Un tipo poco costoso e molto diffuso permette di stimare il pH in un intervallo da 1 a 11, certamente sufficiente a stabilire se l'acqua è inquinata da, ad esempio, lo scarico di una lavanderia industriale.

### Misure di pressione acustica - Fonometri

L'intensità della pressione acustica si misura in dB (*deciBel*). Il deciBel è una unità di misura relativa, è 10 volte il logaritmo del rapporto tra la potenza della sorgente acustica e la potenza della sorgente di riferimento. Si fissa come riferimento assoluto, 0 dB una potenza minima  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ , quella di un suono appena percepibile dall'orecchio umano, detta *soglia di udibilità*.

Quindi la scala dell'intensità acustica è logaritmica. Si tratta di un adattamento alla fisiologia dell'orecchio umano. Numerosi esperimenti condotti all'inizio dello sviluppo delle comunicazioni telefoniche hanno stabilito che il comportamento dell'orecchio è all'incirca logaritmico: per avere una sensazione fisiologica doppia, la potenza emessa dalla sorgente deve aumentare di un fattore 10.

$$\text{livello d'intensità acustica in dB} = 10 \log \frac{P}{P_0}$$

È il comportamento logaritmico che spiega come l'orecchio riesca a percepire suoni con una gamma di potenza enorme, da 0 a 120 dB (da  $10^{-12} \text{ W/m}^2$  a  $1 \text{ W/m}^2$ ). A un suono che raggiunge i 120 dB di intensità si associa la *soglia di dolore* perchè, se un rumore continuo a 70 dB può provocare irritabilità, nervosismo, ecc., uno a 80 dB può causare insonnia, depressione, ecc. e a 90 dB l'udito comincia ad essere compromesso, un'intensità acustica di 120 dB provoca un vero e proprio dolore fisico.

Esempio di sorgente	$P/P_0$	dB	Sensazione
respirazione normale	$10^1$	10	appena udibile
stormire di foglie	$10^2$	20	
parlare sottovoce a 5 m	$10^3$	30	silenzioso
classe durante un compito	$10^4$	40	silenzioso
conversazione normale a 1 m	$10^5$	50	

---

traffico cittadino	$10^6$	60	rumoroso
traffico intenso	$10^7$	70	molto rumoroso
officina, fabbrica	$10^8$	80	fastidioso
camion, trattore	$10^9$	90	
treno, scavatrice	$10^{10}$	100	
cantiere, lavori stradali	$10^{11}$	110	
concerto rock	$10^{12}$	120	soglia del dolore
martello pneumatico a 1 m	$10^{13}$	130	insopportabile

---

Un fonometro è essenzialmente costituito da un sensore di pressione acustica, in pratica un microfono di adatta sensibilità, risposta in frequenza, linearità, il cui segnale viene elaborato dalla circuiteria elettronica per convertire la pressione in livello in dB.

Più sofisticato è l'analizzatore di spettro acustico in cui, oltre alla potenza totale della sorgente in esame, viene misurata la distribuzione della potenza in funzione della frequenza, ottenendo lo spettro acustico della sorgente. Lo strumento risulta particolarmente utile nell'analisi del rumore emesso da sorgenti come, ad esempio, il traffico veicolare.

Spesso infatti il rumore, per quanto caotico, mostra una o più frequenze dominanti che dipendono dai principali fenomeni fisici come, per continuare con l'esempio, l'attrito dei pneumatici con l'asfalto, il rumore del motore, lo scivolamento dell'aria sulla carrozzeria. Ognuno di questi contribuisce al rumore, ma in bande di frequenza diverse.

Il segnale viene spesso direttamente campionato e digitalizzato da un convertitore AD per poi essere trattato con algoritmi matematici. Questa tecnica si chiama *Digital Signal Processing*, DSP, trattamento digitale del segnale. Come tale è presente in qualsiasi buona scheda audio per computer.

Usando gli adatti programmi, ogni discreta scheda audio, è in grado di analizzare e visualizzare lo spettro del suono emesso da una sorgente direttamente sullo schermo del PC.

### Campionamento

Il campionamento consiste nel acquisire un segnale non in tutto il tempo, ma soltanto in brevi intervalli presi periodicamente. Schematicamente un interruttore si chiude per un breve intervallo di tempo e il valore del segnale in quel breve intervallo viene "memorizzato" per poi essere trattato, tipicamente per essere digitalizzato.

Un celebre teorema dovuto a Shannon afferma che per ottenere una riproduzione fedele di un segnale qualsiasi, basta campionarlo ad una frequenza al minimo doppia della massima frequenza presente nel segnale. Per esempio, nei CD il suono è campionato a 44 kHz, un po' più del doppio della massima frequenza udibile 20 kHz. Il segnale elettrico viene convertito in un stream digitale che viene poi trattato con tecniche digitali, ad esempio, viene compresso, come avviene con l'MP3 o Mpeg4.

### Conversione analogico-digitale.

Molti trasduttori forniscono in uscita una grandezza elettrica (di solito una *differenza di potenziale*, ddp) che varia con continuità, una grandezza che si dice *analogica*.

Per trasmettere il segnale o per trattarlo con sistemi di calcolo occorre convertirlo in un numero, una grandezza che si dice *digitale*. Questo processamento standard di un segnale va sotto il nome di *conversione analogico-digitale*. Il dispositivo che la effettua si chiama *convertitore analogico-digitale*, convertitore A-D.

Dei convertitori A-D interessano *risoluzione*, intesa come la minima quantità che il trasduttore distingue e traduce in un numero e la *velocità* di conversione che corrisponde al numero di conversioni al secondo che il dispositivo riesce ad eseguire.

— La risoluzione del convertitore dipende dal numero di bit: molto comuni sono i convertitori a 8 bit (256 livelli) e a 10 bit (1024 livelli), il primo perchè 8 bit sono un byte, l'unità di elaborazione, un carattere, il secondo perché  $1024 \approx 10^3$  e cioè si hanno circa 1 000 punti di misura a disposizione. Ad esempio, volendo misurare la temperatura nell'intervallo  $-50 - +50^\circ\text{C}$  con 8 bit si ha una risoluzione di  $100/256 \approx 0.4^\circ\text{C}$ , mentre con 10 bit la risoluzione è  $100/1024 \approx 0.1^\circ\text{C}$ .

La conversione, trasformando un grandezza continua in un numero, introduce un errore detto di *quantizzazione*: se il livello della grandezza in ingresso può variare tra 0 e 1, un convertitore a  $n$  bit necessariamente è incapace di discriminare differenze di livello minori  $1/2^n$ , una situazione analoga a quella che si ha stimando la lunghezza di un segmento con una riga con tacche ogni millimetro: la risoluzione dello strumento di misura fissa l'incertezza che si deve assegnare al risultato della misura. Ovviamente si riduce l'errore aumentando il numero di bit: da 12 sino a 16 e più, ma altrettanto ovviamente l'errore rimane, anche se minore.

— La velocità di conversione è importante quando la grandezza di ingresso varia rapidamente, come in un segnale elettrico ad alta frequenza, e può essere, per dispositivi piuttosto costosi, molto elevata, anche decina di milioni di conversioni al secondo. La velocità richiesta per effettuare la conversione A-D dell'uscita di un trasduttore di grandezze fisiche come, ad esempio, la temperatura, è usualmente molto più bassa, per cui comunemente si usano dispositivi economici e soprattutto a basso consumo.

### Segnali analogici e digitali

I segnali sono all'origine in massima parte di natura continua. Ad esempio, pressione, temperatura, umidità sono grandezze a variazione continua che descrivono lo stato dell'aria. Nelle prime radiosonde queste variazioni venivano codificate in variazioni continue di frequenza sovrapposte alla frequenza-base del trasmettitore che inviava a terra il segnale.

Il segnale stesso però in tal modo era soggetto a tutti i disturbi di varia natura che ancor oggi accompagnano la ricezione di un segnale radio.

Nelle radiosonde recenti i dati sono convertiti in forma numerica e poi trasmessi a terra (telemetria). I vantaggi sono

- la relativa insensibilità al rumore;
- la digitalizzazione del dato che permette di scoprire e correggere gli errori di ricezione.

Al dato, per esempio a 2 byte, 16 bit, si aggiunge un bit supplementare detto bit di *parità*. La procedura da adottare è diretta: si contano i bit 1 e se il numero è pari, si pone a 0 il bit di parità, se il numero è dispari, si pone a 1 il bit di parità.

Questo semplice metodo fa scoprire solo se i dati sono corrotti, stimando che sia piccola la possibilità che due bit in diversa posizione siano contemporaneamente cambiati, compensando in tal modo i due errori. Aggiungendo al dato 8 bit di controllo si può con un semplice algoritmo scoprire dove il dato è stato alterato dal rumore e quindi riportarlo al valore originale. Questa *ridondanza* aumenta la quantità di bit da trasmettere di un fattore 3/2: invece di una stringa di 16 bit se ne trasmette una di 24, ma così un singolo errore viene completamente neutralizzato.

Il segnale viene degradato dal rumore associato ai dispositivi elettronici, cioè dal fatto che l'agitazione termica provoca

---

fluttuazioni imprevedibili nell'ampiezza del segnale. A questo rumore interno si aggiunge il rumore dovuto alle scariche elettrostatiche in atmosfera, le interferenze dovute ad altre sorgenti di radiofrequenza, ecc. Questo effetto viene modellizzato come un generatore di rumore posto in parallelo alla sorgente: il rumore si aggiunge al segnale utile. Quindi interessa il rapporto espresso ancora in dB, tra il segnale e il rumore. I segnali digitali hanno un rapporto segnale/rumore che risulta particolarmente alto, rendendo la trasmissione di segnali digitali in un canale piú sicura dell'equivalente canale analogico.