APPUNTI DI TERMOLOGIA

1 – La temperatura

La ***temperatura*** è una grandezza che indica lo stato termico di un corpo e si misura con il ***termometro***, utilizzando una opportuna scala termometrica.

Una delle scale più utilizzate è la ***scala Celsius***, il nome dallo scienziato svedese Anders Celsius (1701-1744). Il grado Celsius si indica con il simbolo °C. La scala assegna, per convenzione, il valore 0°C alla temperatura alla quale l'acqua solidifica e 100°C alla temperatura alla quale l'acqua bolle al livello del mare e alla pressione atmosferica. La scala Celsius è anche detta ***scala centigrada***.

Il Sistema Internazionale ha scelto invece come unità di misura il kelvin (K), in onore dallo scienziato britannico Lord Kelvin (1824-1907), autore di ricerche innovative in questo settore. Essa fa riferimento alla cosiddetta ***scala assoluta***, così detta perché non fa riferimento a una sostanza specifica come l'acqua, ma pone lo zero, detto ***zero assoluto***, alla temperatura più bassa teoricamente possibile. Secondo la scala Kelvin, l'acqua solidifica a 273,15 K e bolle a 373,15 K. Per comodità non prenderemo in considerazioni i decimali e approssimeremo a 273 K.
L'intervallo tra le temperature di fusione e di ebollizione dell'acqua è quindi di cento unità in entrambe le scale termometriche, quindi possiamo dire che:
- l'ampiezza dell'unità di misura nelle due scale è la stessa;
- lo zero della scala Kelvin è spostato indietro rispetto a quello della scala Celsius di 273 gradi. Di conseguenza a x°C corrispondono (x + 273) K, ma Δx (in °C) = Δx (in K).

Nei paesi anglosassoni, specie negli Stati Uniti d’America, si utilizza la ***scala Fahrenheit***, che prende il nome dallo scienziato tedesco Daniel Gabriel Fahrenheit (1686-1736), la quale assegna il valore 0°F alla temperatura alla quale una ugual misura di ghiaccio e sale (NaCl) si sciogli. Fissò inoltre il punto di 96°F alla temperatura del sangue, usando inizialmente del sangue di cavallo. La sua scala conteneva originariamente solo 12 suddivisioni, ma in seguito divise ognuna di queste in 8, dando così un totale di 96 suddivisioni. Le sue misure non erano molto precise successivamente la scala venne ricalibrata in modo che la temperatura di congelamento dell'acqua fosse a 32°F e quella di ebollizione a 212°F (sempre al livello del mare e alla pressione atmosferica). Questo porta alla seguente relazione per la trasformazione da gradi Celsius a Fahrenheit e viceversa; indichiamo con x la misura di una temperatura di un corpo nella scala Celsius e y la misura della temperatura dello stesso corpo nella scala Fahrenheit, si ha:

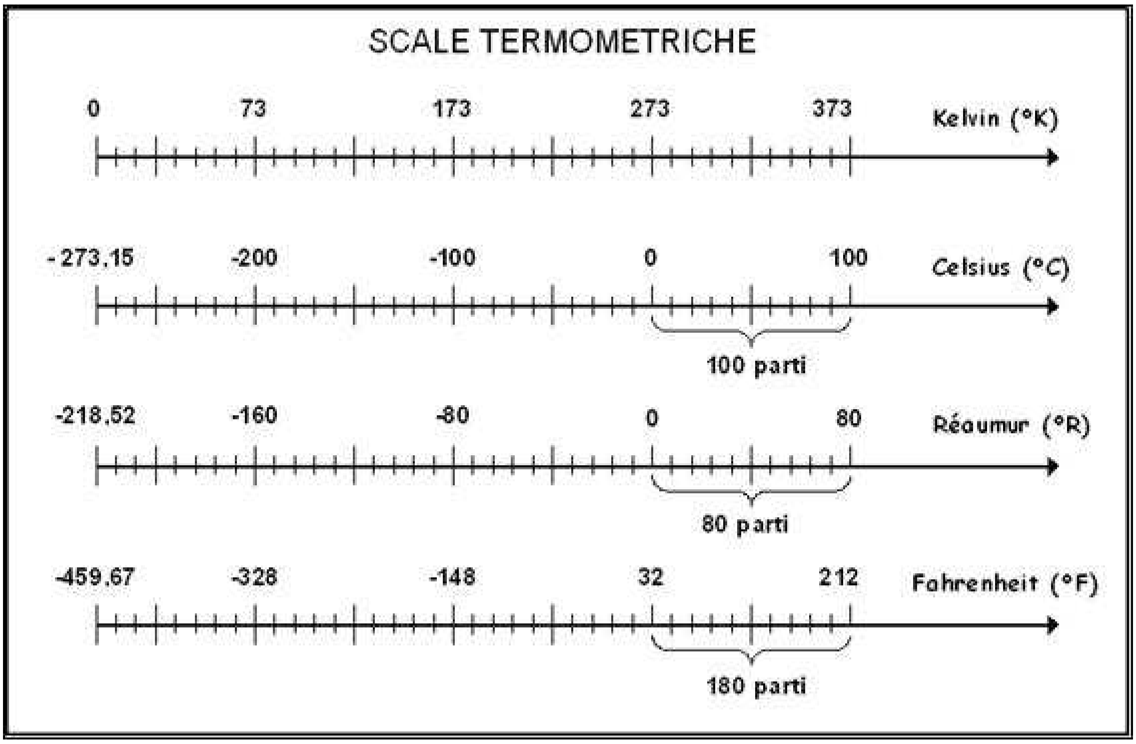
$$x:(y-32)=100:(212-32)$$

ossia

[1] $$x:(y-32)=100:180\,.$$

Un’altra scala che ha avuto una certa diffusione è la ***scala Réaumur***, introdotta nel 1732 dallo scienziato francese René-Antoine Ferchault de Réaumur (1683-1757). Il grado Réaumur è definito come l’ottantesima parte della differenza tra il punto di ebollizione dell'acqua pura e quello di congelamento della stessa, alla pressione standard e lo indichiamo con °R. I punti di riferimento fissati sono gli stessi della scala Celsius (la temperatura di fusione del ghiaccio e la temperatura di ebollizione dell’acqua), ma l'intervallo è suddiviso in 80 parti (anziché in 100), per cui se indichiamo con x la misura di una temperatura di un corpo nella scala Celsius e y la misura della temperatura dello stesso corpo nella scala Réaumur , si ha:

[2] $$x : y = 100 : 80\,.$$



2 – Il calore

L'esperienza ci dimostra che se abbiamo due corpi a diversa temperatura, spontaneamente il corpo a temperatura maggiore si raffredda e quello a temperatura minore si riscalda, facendo sì che dopo un tempo sufficientemente lungo i due corpi raggiungano la stessa temperatura, ossia quello che viene detto ***equilibrio termico***.
Sulla base di questa osservazione è stato formulato il PRINCIPIO ZERO DELLA TERMODINAMICA: ***se due corpi sono in equilibrio termico con un terzo, sono anche in equilibrio termico tra di loro***.
Tale principio esplicita ciò che si fa usando un termometro; infatti, due corpi sono in equilibrio termico quando hanno la stessa temperatura, cioè ciascuno di essi è in equilibrio termico con lo stesso termometro.

L'equilibrio termico viene raggiunto per il passaggio, dal corpo a temperatura maggiore a quello a temperatura minore, di una forma di energia che chiamiamo ***calore***, e in genere indichiamo con la lettera Q. Nel Sistema Internazionale il calore si misure in joule (J) in onore del fisico britannico James Prescott Joule (1818 – 1889); è ancora molto utilizzata la caloria (cal), si ha:

[3] $$1\text{cal} = 4{,}186\text{J}$$

A volte, più che il calore, è utile considerare la ***corrente termica*** I che viene definita nel modo seguente:

[4] $$I = \frac{Q}{\Delta t}$$

ossia la quantità di calore che viene scambiato nel tempo Δt. La corrente termica si misura in $\frac{J}{s}$ che nel Sistema Internazionale viene chiamato watt (W) in onore dello scienziato inglese James Watt (1736 – 1819). La corrente termica viene anche detta ***potenza termica***.

3 – Trasmissione del calore

Il passaggio del calore da un corpo ad un altro può avvenire per:

- ***conduzione*** nei solidi, cioè per passaggio da una molecola a quella vicina
- ***convezione*** nei fluidi, cioè mediante circolazione verso l'alto delle masse più calde e verso il basso di quelle più fredde, con formazione di correnti dette ***moti convettivi***
- ***irraggiamento***, cioè emissione da parte di un corpo caldo di raggi infrarossi che un altro corpo può assorbire, senza essere a contatto col primo.

3.1 – Conduzione

Consideriamo una parete che divide due ambienti uno a temperatura T_1 e l'altro a temperatura T_2 con $T_1 > T_2$. Supponiamo inoltre che la parete abbia una superficie S e uno spessore d. Essendo le due temperature diverse, ci sarà un flusso di calore che passa dall'ambiente più caldo all'ambiante più freddo. Come l'esperienza ci insegna non tutte le pareti si lasciano attraversare dal calore alla stessa maniera, definiamo pertanto ***resistenza termica*** la quantità:

[5] $$R = \frac{d}{\kappa \cdot S}$$

dove κ è il ***coefficiente di conducibilità termica*** e dipende dal materiale (più sotto si può vedere una tabella contenente la conducibilità termica di alcuni materiali).
La quantità di calore Q che fluisce attraverso la parete è data dalla relazione:

[6] $$Q = \frac{\Delta T}{R}\Delta t$$

dove $\Delta T = T_1 - T_2$ è la variazione di temperatura e Δt è l'intervallo di tempo durante il quale questo passaggio di calore viene considerato.

Dalla [6] si ricava che, nel Sistema Internazionale, l'unità di misura della resistenza termica è $\frac{K \cdot s}{J} = \frac{K}{W}$, per cui la conducibilità termica si misura (si deduce dalla [5]) in $\frac{W}{m \cdot K}$.

ESEMPIO – Supponiamo di avere la parete di una stanza che ha una superficie di 12 m^2, uno spessore di 30 cm ed è costituita da muratura il cui coefficiente di conducibilità elettrica è $\kappa = 0{,}8$ $\frac{W}{m \cdot K}$. Se la temperatura interna è di 25°C e quella esterna è di 15°C, si vuol sapere quanto calore viene disperso in 1 h.

Soluzione:
La resistenza termica della parete è: $R = \frac{0{,}3m}{\left(0{,}8\frac{W}{m \cdot K}\right)\cdot\left(12m^2\right)} = 0{,}03125\frac{K}{W}$, quindi il calore disperso in 1h = 3600s è $Q = \frac{(25-15)K}{0{,}03125\frac{K}{W}} \cdot 3600s = 1152000J \simeq 1{,}15MJ$

Supponiamo ora che la parete di separazione sia costituita da due parti, di superficie S_1 e S_2, di spessori d_1 e d_2 e di conducibilità termica κ_1 e κ_2. Le pareti sono una a fianco all'altra. Si vuol sapere quanto calore viene disperso complessivamente nell'intervallo di tempo Δt se la temperatura da una parte è T_1 e dall'altra T_2 con $T_1 > T_2$. E' intuitivo che il calore disperso Q è dato dalla somma del calore disperso dalla parete 1, Q_1, e da quello disperso dalla parete 2, Q_2:

[7] $$Q = Q_1 + Q_2$$

ma

[8] $$Q_1 = \frac{\Delta T}{R_1}\Delta t$$

[9] $$Q_2 = \frac{\Delta T}{R_2}\Delta t$$

quindi

[10] $$Q = \frac{\Delta T}{R_1}\Delta t + \frac{\Delta T}{R_2}\Delta t = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)\Delta T \cdot \Delta t$$

d'altra parte la parete avrà una resistenza complessiva R per la quale si ha

[11] $$Q = \frac{\Delta T}{R}\Delta t\,.$$

Confrontando la [11]con la [10], si ricava che deve essere

[12] $$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\,.$$

Questo significa che la parete, nella sua totalità ha una resistenza termica che si lega alle resistenze delle due parti che la compongono dalla relazione [12]. In questa situazione si parla di ***resistenza termica equivalente a due, o più, resistenze termiche in parallelo*** e l'espressione generale è data dalla relazione

[13] $$\frac{1}{R} = \sum \frac{1}{R_i}$$

R è la resistenza equivalente e R_i sono le singole resistenze.

Consideriamo ora una parete costituita da due strati diversi (per esempio la parete in muratura di una stanza rivestita da uno strato di legno); sia S la superficie (ovviamente uguale i due strati), d_1 e d_2 gli spessori e κ_1 e κ_2 le rispettive conducibilità termiche. Anche questa volta vogliamo sapere quanto calore viene disperso nell'intervallo di tempo Δt se la temperatura da una parte è T_1 e dall'altra T_2 con $T_1 > T_2$. Indichiamo con T la temperatura sulla superficie di separazione tra i due strati. La considerazione fondamentale che dobbiamo fare è che la corrente termica che attraversa uno strato è la stessa che attraversa il secondo strato, ossia che gli strati non assorbano calore. Si ha quindi:

[14] $$I = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{T_1 - T}{R_1} \quad \text{da cui ricaviamo} \quad T_1 - T = I \cdot R_1$$

[15] $$I = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{T - T_2}{R_2} \quad \text{da cui ricaviamo} \quad T - T_2 = I \cdot R_2$$

Se indichiamo con R la resistenza totale dei due strati possiamo scrivere che:

[16] $$I = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{T_1 - T_2}{R} \quad \text{da cui ricaviamo} \quad T_1 - T_2 = I \cdot R\,.$$

Se prendiamo ora [14] e la [15] e le sommiamo membro a membro, otteniamo:

$$(T_1 - T) + (T - T_2) = I \cdot R_1 + I \cdot R_2$$

da cui, semplificando, si ottiene:

[17] $$T_1 - T_2 = I \cdot (R_1 + R_2).$$

Confrontando la [16] con la [17] si ottiene che deve essere

[18] $$R = R_1 + R_2.$$

Questo significa che la parete, nella sua totalità ha una resistenza termica che si lega alle resistenze delle due parti che la compongono dalla relazione [18]. In questa situazione si parla di ***resistenza termica equivalente a due, o più, resistenze termiche in serie*** e l'espressione generale è data dalla relazione

[19] $$R = \sum R_i$$

R è la resistenza equivalente e R_i sono le singole resistenze.

Materiale	Conducibilità termica a 20 °C $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Acciaio	50
Acqua distillata	0,63
Alluminio	237
Argento	429
Aria secca (a 300 K, 100 kPa)	0,026
Calcestruzzo	1.6
Cartone	0,14 – 0,23
Cartongesso	0.21
Cemento armato	2,3
Ferro	80,4
Ghiaccio (269 K)	2,1
Granito	3,5
Idrogeno	0,174
Intonaco (malta) di cemento	1,4
Lana	0,05
Lana di vetro	0.04
Lana di roccia	0.033
Legno asciutto di abete o pino	0,11
Legno asciutto di quercia	0,18
Linoleum	0,18
Marmo	2,1 – 3,5
Mattone pieno	0,7
Neve (appena caduta e per strati fino a 3 cm)	0,06
Neve (soffice, strati da 3 a 7 cm)	0,12
Neve (moderatamente compatta, strati da 7 a 10 cm)	0,23
Neve (compatta, strati da 20 a 40 cm)	0,70
Oro	318
Ottone	120
Piombo	35,3
Platino	71,6
Polistirolo espanso	0,045
Poliuretano	0,026
Quarzo	8
Rame	390
Stagno	64
Sughero	0,052
Vetro	0,9
Zinco	116

3.2 – Convezione

Lo studio matematico dei moti convettivi è estremamente complesso e non alla portata della matematica che si conosce al secondo anno del Liceo Scientifico, per cui non tratteremo il problema.

3.3 – Irraggiamento

L'irraggiamento avviene anche nel vuoto e non c'è spostamento di materia. L'energia irradiata dipende dall'area della superficie, dalla temperatura e dal colore della superficie, oltre che ovviamente dal tempo. Vale la seguente relazione:

[20] $$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \cdot \Delta t$$

dove $0 \le \varepsilon \le 1$ è una costante che indica la capacità del corpo di irraggiare e come abbiamo visto in laboratorio dipende dal colore, $\varepsilon = 0$ significa che il corpo non irraggia, ossia che è perfettamente isolato dall'ambiente, $\varepsilon = 1$ significa che il corpo è perfettamente irraggiante (in questo caso si parla di ***corpo nero***); σ è la costante di Stephan-Boltzmann ed è $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \dfrac{W}{m^2 \cdot K^4}$, A è l'area della superficie che irraggia, T è la temperatura assoluta del corpo (ossia espressa in kelvin) e Δt è il tempo durante il quale si considera l'irraggiamento. Un corpo alla temperatura T_C irraggia sempre in un ambiente che ha una data temperatura T_A, quindi, piuttosto che la [20] si utilizza la relazione:

[21] $$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot \left(T_C^4 - T_A^4\right) \cdot \Delta t .$$

ESEMPIO – Un corpo perfettamente emittente ($\varepsilon = 1$) ha una superficie di 2 m^2 e una temperatura di 30°C se si trova in un ambiente alla temperatura di 20°C, quanto calore emette in 1 min? Qual è la sua potenza termica P?

Soluzione:

Per prima cosa trasformiamo tutte le grandezze nelle unità del Sistema Internazionale, per cui: $T_C = (30 + 273)K = 303K$, $T_A = (20 + 273)K = 293K$ e $1\min = 60s$. Quindi:

$$Q = 1 \cdot \left(5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}\right) \cdot \left(2m^2\right) \cdot \left[\left(303^4 - 293^4\right)K^4\right] \cdot (60s) = 7200J .$$

La potenza termica è

$$P = \frac{Q}{\Delta t} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot \left(T_C^4 - T_A^4\right) = 1 \cdot \left(5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}\right) \cdot \left(2m^2\right) \cdot \left[\left(303^4 - 293^4\right)K^4\right] = 120W .$$

Ovviamente si poteva anche fare:

$$P = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{7200J}{60s} = 120W .$$
