

# Frigoria

La *frigoria* (pronuncia: [fri-go-rì-a], simbolo Fr o frig) è un'unità di misura della quantità di calore (e quindi dell'energia) definita come la quantità di calore che deve essere sottratta da un chilogrammo d'acqua per abbassarne la temperatura da 15,5 °C a 14,5 °C alla pressione di 1 atmosfera. E' stata sostituita dalla *caloria*.

In termini numerici, la frigoria è equivalente alla chilocaloria (in simboli: 1 Fr = 1 Kcal), ma il significato è in un certo senso opposto per via della definizione, in quanto fornire 1 frigoria vuol dire sottrarre 1 kcaloria.

Tale unità di misura spesso utilizzata per i sistemi di raffreddamento e condizionatori.

Per valutare la capacità di raffreddamento di un condizionatore si utilizza la potenza frigorifera, che ha come tipica unità di misura la frigoria per ora: Fr/h.

Unità di misura della potenza frigorifera sono la frigoria e la British thermal unit (BTU) all'ora e il watt . Tra le tre unità valgono le seguenti equivalenze:

$$1 \text{ w} = 3,413 \text{ BTU/h} = 0,85985 \text{ Fr/h}$$

# Ghiaccio secco

Con il termine **Ghiaccio Secco** viene comunemente denominata Anidride Carbonica (CO<sub>2</sub>) allo stato solido che a pressione atmosferica si trova ad una temperatura di circa -80°C. Il ghiaccio secco viene prodotto per espansione dell'anidride carbonica allo stato liquido, da cui si ottiene la neve carbonica. La CO<sub>2</sub> liquida è prelevata da un serbatoio di stoccaggio alla pressione di 16 bar ed alla temperatura di - 25°C. L'Anidride Carbonica Liquida, espandendosi alla pressione atmosferica, si trasforma in neve Carbonica con temperatura - 78°C circa. Tale neve è compattata ad alta pressione e trasformata, attraverso una filiera, in pellets di ghiaccio secco di varie dimensioni.

Quando il ghiaccio secco scambia calore con l'ambiente circostante, esso si trasforma dalla forma solida in forma gassosa senza passare per la fase liquida.

Tale processo di trasformazione è chiamato **sublimazione**.

Per tale motivo esso è denominato "ghiaccio secco"; infatti nel riscaldarsi non produce né liquido, né acqua o umidità quindi è "secco".

Ogni kilogrammo di ghiaccio secco, nel sublimare, cioè per passare dallo stato solido allo stato gassoso, assorbe 136 Fr.

Il gas generatosi dalla sublimazione del solido, è caratterizzato da una temperatura di circa -78°C; tale gas, quindi, nel cedere frigorie verso l'ambiente esterno, riesce a assorbire ancora circa 14-15 Fr.

Pertanto si può affermare che la quantità totale di frigoriferie **Fr** (energia termica a bassa T) contenute in un 1 kg di Ghiaccio Secco è pari a 150 Fr (può assorbire una quantità di energia termica pari a  $150 \text{ Fr} * 0,001163 = 0,175 \text{ Kwh}$ ).

E' interessante notare come tale contenuto di frigoriferie sia da considerarsi interessante per le applicazioni successive; infatti a parità di peso, il ghiaccio secco fornisce una capacità refrigerante che equivale al 170 % rispetto al tradizionale ghiaccio d'acqua.

Essendo, inoltre, la densità del ghiaccio secco pari a circa 1,5 kg/dm<sup>3</sup> e la densità del ghiaccio d'acqua pari a circa 0,95 kg/dm<sup>3</sup>, ne risulta che a parità di volume di ghiaccio utilizzato, il ghiaccio secco fornisce una capacità refrigerante che equivale al 270 % rispetto al tradizionale ghiaccio d'acqua.

Ciò implica che nelle applicazioni nelle quali il volume occupato dal ghiaccio è un fattore critico, il Ghiaccio Secco costituisce certamente la scelta migliore.

$$1 \text{ watt} = 3,413 \text{ BTU/h} = 0,85985 \text{ Fr/h} = 0,85985 \text{ Kcal/h}$$

$$1 \text{ Fr} = 1 \text{ KCal} = 4186 \text{ Joule} = 0,001163 \text{ Kwh}$$

### ESERCIZIO

Un contenitore da 30 litri di poliuretano da 10 cm, posto in un ambiente a 20°C, contiene 1 litro di vaccino COVID circondato da ghiaccio secco a -80°C.  
Per quanto tempo la temperatura interna resta a -80°C?

Tint	-78 °C	
Test	20 °C	
Volume contenit.	30 litri	
Area lat.	2 m <sup>2</sup> circa	
V. vaccino Covid	1 litro	
V. GS	29 litri	
densità GS	1,5	
Cap. Frigo 1 Kg GS	150 Fr	0,174 KWh

massa GS	43,5 Kg	
Capacità Fr tot.	7,58858 Kwh	
U contenitore	0,228 w/m <sup>2</sup> k	
Dispersioni	44,7 watt	
En. dispersa 1h	0,0447 Kwh	
Tempo Cap. FR	169,9 h	7,1 gg

*In realtà man mano passa il tempo e il ghiaccio secco diventa gas la temperatura interna aumenta e le dispersioni verso l'esterno si riducono e quindi il tempo ottenuto e sottostimato. Si tratta di un problema di TRANSITORIO termico non sempre studiabile con semplici formule.*

## ESERCIZI Transitorio termico a PARAMETRI CONCENTRATI

In questi problemi si può ipotizzare che il corpo che si raffredda (o scalda) abbia temperatura omogenea in tutto il volume e disperda uniformemente su tutta la superficie esterna. Ciò è vero se il numero di Biot  $< 0.1$ .

### EX. CORPO SURGELATO

Un pesce inizialmente a temperatura ambiente  $T_0=20^\circ\text{C}$  viene refrigerato mediante immersione in una miscela di acqua di mare e ghiaccio a temperatura  $T_\infty=0^\circ\text{C}$ . Modellizzando il pesce come un cilindro avente diametro  $D=4$  cm e lunghezza  $L=30$  cm, assumendo per le proprietà termofisiche i valori  $\lambda=15$   $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ,  $\rho=1000$   $\text{kg m}^{-3}$ ,  $c=3,3$   $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ , e che lo scambio termico avvenga con coefficiente di scambio termico convettivo  $h_c=100$   $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ , determinare il tempo necessario perché il pesce raggiunga la temperatura  $T=10^\circ\text{C}$ .

È necessario verificare se è possibile applicare con buona approssimazione il metodo a parametri concentrati, ovvero se la resistenza conduttiva è molto minore della resistenza convettiva esterna, occorre cioè verificare se:

$$B_i = \frac{h \cdot L_{\text{caratt}}}{\lambda} < 0,1$$

Poiché

$$V = \pi \frac{D^2}{4} L = 0,04^2 \frac{\pi}{4} 0,3 = 3,77 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$A = \pi D L = \pi \cdot 0,04 \cdot 0,3 = 0,0376 \text{ m}^2$$

$$L_{\text{caratt}} = \frac{V}{A} = \frac{3,77 \cdot 10^{-4}}{0,0376} = 0,01 \text{ m}$$

$$\Rightarrow B_i = \frac{100 \cdot 0,01}{15} = 0,067 < 0,1$$

Possiamo ricavare la distribuzione di temperatura utilizzando il modello a parametri concentrati:

$$T(t) = T_\infty + (T_0 - T_\infty) e^{-\frac{t}{RC}}$$

Dove:

$$R = \frac{1}{h_c A} = \frac{1}{15 \cdot 0,0376} = 1,77 \text{ K W}^{-1}$$

$$C = c \cdot \rho \cdot V = 3300 \cdot 1000 \cdot 3,77 \cdot 10^{-4} = 1244,1 \text{ J K}^{-1}$$

$$RC = 2202 \text{ s}$$

Il tempo necessario perché la temperatura della barra si porti al valore  $T=10^\circ\text{C}$  è:

$$T(t_1) = 10^\circ\text{C}$$

$$\frac{T(t_1) - T_\infty}{(T_0 - T_\infty)} = e^{-\frac{t}{RC}} \Rightarrow \frac{t}{RC} = -\ln \frac{T(t_1) - T_\infty}{(T_0 - T_\infty)} \Rightarrow t = -RC \cdot \ln \frac{T(t_1) - T_\infty}{(T_0 - T_\infty)}$$

$$\text{a) } t = -2202 \cdot \ln \left( \frac{10 - 0}{20 - 0} \right) = 1526 \text{ s} \approx 25 \text{ min}$$

## Riscaldamento di una bibita in lattina

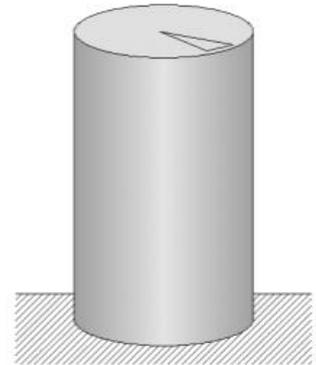
### – Problema

Una lattina cilindrica, riempita per il 93% di una bibita a base acqua, presenta diametro 63 mm ed altezza 114 mm. Stimare approssimativamente per quanto tempo la bibita, dopo essere stata prelevata da un frigorifero a 9°C ed appoggiata verticalmente su un tavolo posto in un ambiente a 30°C, si mantiene ad una temperatura inferiore a quella massima gradevole, assunta pari a 15°C.

Il valore del coefficiente di convezione superficiale si può valutare pari a 5 W/(m<sup>2</sup>·°C). Al liquido, che rimane fermo nella lattina e può essere perciò assimilato ad una sostanza solida, si possono attribuire le proprietà termofisiche dell'acqua alla temperatura considerata: conduttività termica  $\lambda = 0.59$  W/(m·°C), densità  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup>, calore specifico  $c = 4190$  J/(kg·°C). Volume e capacità termica del recipiente metallico sono trascurabili in virtù del ridottissimo spessore di parete.

### – Dati

$D = 63$ mm = 0.063 m	(diametro della lattina)
$H = 114$ mm = 0.114 m	(altezza della lattina)
$C_r = 93\%$ = 0.93	(coefficiente di riempimento in volume)
$T_0 = 9^\circ\text{C}$	(temperatura iniziale della bibita)
$T_\infty = 30^\circ\text{C}$	(temperatura ambiente)
$T_{\max} = 15^\circ\text{C}$	(temperatura massima gradevole)
$\lambda = 0.59$ W/(m·°C)	(conduttività termica dell'acqua)
$\rho = 1000$ kg/m <sup>3</sup>	(densità dell'acqua)
$c = 4190$ J/(kg·°C)	(calore specifico dell'acqua)
$h = 5$ W/(m <sup>2</sup> ·°C)	(coefficiente di convezione)



### – Determinare

$t_T$  (tempo per raggiungere la massima temperatura gradevole)

### – Ipotesi

Liquido fermo, proprietà termofisiche omogenee e indipendenti dalla temperatura, coefficiente di scambio termico convettivo uniforme, effetti radiativi trascurabili, tempo di immersione pressoché nullo, capacità termica del recipiente metallico trascurabile, superficie inferiore termicamente isolata.

### – Soluzione

Per verificare se si può assumere uniforme la temperatura nella lattina durante il transitorio occorre stimare il numero di Biot. È a tal scopo necessario calcolare il volume del liquido, la superficie esposta all'aria della lattina e, quindi, la lunghezza caratteristica del problema.

Il volume del liquido vale:

$$V = C_r \pi \frac{D^2}{4} H = 0.93 \cdot \pi \cdot \frac{0.063^2}{4} \cdot 0.114 = 3.3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 = 33 \text{ cl}$$

Dato il loro piccolo spessore, si è trascurata la presenza delle pareti metalliche del recipiente.

Nel calcolo della superficie su cui hanno luogo gli scambi termici convettivi, si può assumere che la base di appoggio della lattina sia termicamente isolata. Si potrebbe considerare tale anche la superficie superiore, sotto la quale il gas contenuto nel recipiente (7% in volume) va a raccogliersi e a formare uno strato stagnante a ridotta conducibilità termica, ma, nel caso in esame trascurare l'effetto isolante dell'aria permette di operare in favore di sicurezza (sovrastimando la superficie di scambio, si sovrastima infatti anche la velocità di raffreddamento). In definitiva, la superficie di scambio vale:

$$A \cong \pi \frac{D^2}{4} + \pi DH = \pi \frac{0.063^2}{4} + \pi \cdot 0.063 \cdot 0.114 = 0.0257 \text{ m}^2$$

La lunghezza caratteristica del problema ed il numero di Biot valgono:

$$L_c = \frac{V}{A} = 0.0129 \text{ m}$$

$$Bi = \frac{hL_c}{\lambda} = \frac{5 \cdot 0.0129}{0.59} = 0.11$$

Bi è minore dell'unità, ma non del valore limite sotto il quale si assumono generalmente valide le analisi a parametri concentrati, pari a 0.1. Si può tuttavia pensare di procedere ugualmente nello studio, in virtù del fatto che non si è molto distanti dal suddetto valore limite e che, comunque, si vuole effettuare solo una stima approssimativa del tempo di riscaldamento.

Il tempo caratteristico del problema,  $t_c$ , vale:

$$t_c = \frac{\rho c L_c}{h} = \frac{1000 \cdot 4190 \cdot 0.0129}{5} = 10785 \text{ s}$$

Il periodo di tempo  $\Delta t$  durante il quale la temperatura si mantiene sotto il valore considerato massimo gradevole si può effettuare esplicitandolo nella relazione:

$$T = T_\infty + (T_0 - T_\infty) \cdot e^{-\Delta t/t_c}$$

Si ottiene così:

$$\Delta t = -t_c \ln \left( \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} \right) = -10785 \cdot \ln \left( \frac{15 - 30}{9 - 30} \right) = 3629 \text{ s} \cong 60 \text{ min}$$

### Commenti

In realtà, il coefficiente di convezione esterno è stato leggermente sottostimato.

Si può agevolmente verificare che la presenza del recipiente metallico della bibita è pressoché ininfluenza. Infatti, assumendo che il recipiente sia realizzato in lega di alluminio, con conducibilità termica  $170 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ , densità  $2790 \text{ kg}/\text{m}^3$  e calore specifico  $880 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ , e che presenti una massa pari a 30 g, la sua capacità termica rappresenta una frazione della capacità termica del liquido valutabile mediante il rapporto:

$$\frac{\rho_{Al} c_{Al} V_{Al}}{\rho c V} \cong \frac{c_{Al} m_{Al}}{\rho c V} = \frac{880 \cdot 0.020}{1000 \cdot 4190 \cdot 3.3 \cdot 10^{-4}} = 0.019 < 2\%$$

Inoltre, assumendo uno spessore  $s_{Al}$  della parete del recipiente pari a 0.4 mm ed un coefficiente di scambio termico convettivo lato liquido,  $h_{\text{liquido}}$ , pari a circa  $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , si ottiene un coefficiente globale di scambio tra liquido e aria pari a:

$$h_{\text{globale}} = \frac{1}{1/h + s_{Al}/k_{Al} + 1/h_{\text{liquido}}} = 4.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \approx 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$