



## 0. RICHIAMI PRELIMINARI

### 0.1 RIEPILOGO SULLE UNITÀ DI MISURA DEL SISTEMA INTERNAZIONALE E FATTORI DI CONVERSIONE

Le unità fondamentali e supplementari del Sistema Internazionale (SI), nonché le unità derivate SI con nome e simbolo proprio, sono elencate nella Tabella 1. Si tralasciano le grandezze relative all'ottica e all'elettrotecnica, che qui non interessano.

Tab.1: Unità SI con nome e simbolo.

Grandezze	Unità SI		
	Nome	Simbolo	Relazione con altre unità SI
<u>Fondamentali</u>			
lunghezza	metro	m	-
massa	chilogrammo	kg	-
tempo	secondo	s	-
intensità di corrente elettrica	ampere	A	-
temperatura termodinamica	kelvin	K	-
intensità luminosa	candela	cd	-
quantità di sostanza	mole	mol	-
<u>Supplementari</u>			
angolo piano	radiante	rad	-
angolo solido	steradiano	sr	-
<u>Derivate con nome proprio</u>			
frequenza	hertz	Hz	$1\text{ Hz} = 1\text{ s}^{-1}$
forza	newton	N	$1\text{ N} = 1\text{ Kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$
pressione	pascal	Pa	$1\text{ Pa} = 1\text{ N}/\text{m}^2$
lavoro, energia, quantità di calore	joule	J	$1\text{ J} = 1\text{ N}\cdot\text{m}$
potenza, flusso termico	watt	W	$1\text{ W} = 1\text{ J}/\text{s}$

Per formare multipli e sottomultipli delle diverse unità del SI sono impiegate esclusivamente le potenze di 10, il cui esponente, positivo o negativo, è nella maggior parte dei casi un multiplo di 3. I nomi ed i simboli dei prefissi SI adottati a questo scopo sono riportati nella Tabella 2.



Tab.2: Prefissi dei multipli e sottomultipli decimali delle unità SI.

exa	E	$10^{18}$	deci	d	$10^{-1}$
penta	P	$10^{15}$	centi	c	$10^{-2}$
tera	T	$10^{12}$	milli	m	$10^{-3}$
giga	G	$10^9$	micro	$\mu$	$10^{-6}$
mega	M	$10^6$	nano	n	$10^{-9}$
kilo	k	$10^3$	pico	p	$10^{-12}$
etto	h	$10^2$	femto	f	$10^{-15}$
deca	d	$10^1$	atto	a	$10^{-19}$

E' da ricordare inoltre che non rientra nei multipli elencati il bar ( $= 10^5 \text{ N/m}^2$ ), pur accettato e raccomandato, essendo unità molto prossima all'atmosfera fisica e a quella tecnica.

Per evitare errori nella derivazione di unità secondarie, devono impiegarsi unità fondamentali senza prefissi; alle unità di misura secondarie, comunque, possono applicarsi i prefissi della Tabella 2.

L'impiego del Sistema Internazionale impone l'abbandono delle unità che di questo sistema non fanno parte, alcune delle quali tuttavia sono ancora assai diffuse. Fra queste il chilogrammo forza o chilogrammo peso ( $\text{kg}_p$ ), detto anche chilopond ( $\text{kp}$ ). L'unità di misura della forza SI è il newton, simbolo N ( $1 \text{ kg}_p = 9,80665 \text{ N}$ ), la forza che imprime alla massa di 1 kg l'accelerazione di  $1 \text{ m/s}^2$ . Nel sistema metrico gravitazionale o pratico (o tecnico), invece, le grandezze meccaniche fondamentali sono la lunghezza, il tempo, la forza-peso; le rispettive unità sono il metro, il secondo (sostituito frequentemente dall'ora) ed il chilogrammo peso. Quest'ultimo è definito come la forza d'attrazione esercitata dalla Terra sulla massa di 1 kg in un luogo ove l'accelerazione di gravità assume il valore standard  $g_0 = 9,80665 \text{ m/s}^2$ .

### Sistemi di misura anglosassoni

Grandezze fondamentali nel sistema anglosassone assoluto sono la lunghezza, la massa, il tempo, cui si aggiunge l'intervallo di temperatura. Le rispettive unità di misura sono:

- il *foot* (ft), pari a 0,3048 m;
- il *pound* (lb), pari a 0,4536 kg;
- il secondo (s), come nei sistemi metrici;
- il grado *Rankine* ( $^{\circ}\text{R}$ ), pari a  $5/9 \text{ K}$  (e, analogamente, il grado *Fahrenheit*, pari a  $5/9$  gradi Celsius).

Si ricorda poi, per la quantità di calore:

- la *British Thermal Unit* (Btu), pari a 0,252 kcal, ossia 1055 J.

Si distingue inoltre fra sistema anglosassone assoluto e sistema anglosassone gravitazionale o pratico; quest'ultimo assume la forza anziché la massa come grandezza fondamentale: l'unità di misura relativa è la libbra forza (lbf o semplicemente p).



Il sistema anglosassone non è decimale. Ad esempio, per la lunghezza, un sottomultiplo del *foot* è l'*inch* (i o in), pari a 1/12 ft, ossia a 0,0254 m; un multiplo è la *yard* (y o yd), pari a 3 ft, ossia 0,9144 m, e, ancora, il miglio, *mile* (m o mi), pari a 1609 m. Per la massa si ha l'*ounce* (oz), pari a 1/16 lb, ossia 0,02835 kg, lo *stone* (st), pari a 14 lb, ossia 6,35 kg.

Fra le misure delle varie grandezze nel sistema anglosassone giova ricordare la misura della pressione: essa è espressa in libbre forza per pollice quadrato (in lingua inglese: *pound per square inch*, abbreviato psi). Si trovano qualche volta le indicazioni psia e psig, ad indicare rispettivamente la pressione assoluta e quella relativa, a partire, cioè, dal valore della pressione atmosferica.

### Equazioni di conversione. Fattori di conversione

Accade spesso di dover convertire la misura di una grandezza, espressa in un certo sistema di unità, nella misura espressa in un altro sistema di unità. Si fa ricorso, allora, alle equazioni di conversione.

Ad esempio:

$$\begin{aligned}1 \text{ ft} &= 0,3048 \text{ m}, \\1 \text{ lb} &= 0,453 \text{ kg}, \\1 \text{ lbf} &= 0,453 \text{ kgp}, \\1 \text{ kgp} &= 9,81 \text{ N}.\end{aligned}$$

I due membri sono omogenei e le equazioni di conversione sono dimensionalmente corrette. A volte si preferisce riscriverle in modo da ottenere il primo membro unitario ed adimensionale:

$$\begin{aligned}1 &= 0,3048 \text{ m/ft}, \\1 &= 0,453 \text{ kg/lb}, \\1 &= 9,81 \text{ N/kgp}.\end{aligned}$$

I secondi membri prendono ora il nome di *fattori di conversione*.

Esempio: si voglia esprimere in km/h una velocità di 30 m/s.

a) Con le equazioni di conversione si procede come segue:

$$\begin{aligned}1 \text{ m} &= 10^{-3} \text{ km} \\1 \text{ s} &= 1/3600 \text{ h} \\30 \frac{\text{m}}{\text{s}} &= 30 \frac{1 \text{ m}}{1 \text{ s}} = 30 \frac{10^{-3} \text{ km}}{\frac{1}{3600} \text{ h}} = 108 \text{ km/h};\end{aligned}$$

b) con i fattori di conversione si procede come segue:

$$\begin{aligned}1 &= 10^{-3} \text{ km/m} \\1 &= 3600 \text{ s/h} \\30 \text{ m/s} &= 30 \text{ m/s} \cdot 1 \cdot 1 = 30 \text{ m/s} \cdot 3600 \text{ s/h} \cdot 10^{-3} \text{ km/m} = 108 \text{ km/h}.\end{aligned}$$

Equazioni di conversione tra le unità di misura di più comune impiego sono riunite nelle tabelle di conversione riportate a seguire (Tabelle 3-7).



Tab.3: Equazioni di conversione per unità di lunghezza.

Unità di misura	m	y (yd)	ft	in	mi
1 m =	1	1.0936	3.2808	$3.9370 \cdot 10^1$	$6.2137 \cdot 10^{-4}$
1 y (yd) =	0.9144	1	3	36	$5.6818 \cdot 10^{-4}$
1 ft =	0.3048	0.3333	1	12	$1.8939 \cdot 10^{-4}$
1 in =	$2.5400 \cdot 10^{-2}$	$2.7778 \cdot 10^{-2}$	$8.3333 \cdot 10^{-2}$	1	$1.5783 \cdot 10^{-5}$
1 mi =	$1.6093 \cdot 10^3$	$1.7600 \cdot 10^3$	$5.2800 \cdot 10^3$	$6.3360 \cdot 10^4$	1

Tab.4: Equazioni di conversione per unità di forza.

Unità di misura	N	dina	kgp	lbf
1 N =	1	$10^5$	$\sim 0.102$	$\sim 0.225$
1 dina =	$10^{-5}$	1	$\sim 1.02 \cdot 10^{-6}$	$\sim 2.25 \cdot 10^{-6}$
1 kgp =	9.80655 (*)	$\sim 9.81 \cdot 10^5$	1	$\sim 2.205$
1 lbf =	$\sim 4.44$	$\sim 4.44 \cdot 10^5$	$\sim 0.4536$	1

(\*) Valore “esatto” per convenzione internazionale, approssimato in generale a 9,81 nei calcoli pratici.

Tab.5: Equazioni di conversione per unità di pressione.

Unità di misura	Pa	bar	atm	torr	ata	kgp/m <sup>2</sup>	psi
1 Pa =	1	$10^{-5}$	$\sim 9.87 \cdot 10^{-6}$	$\sim 7.5 \cdot 10^{-3}$	$\sim 1.02 \cdot 10^{-5}$	$\sim 0.102$	$\sim 1.45 \cdot 10^{-4}$
1 bar =	$10^5$	1	$\sim 0.987$	$\sim 7.5 \cdot 10^2$	$\sim 1.02$	$\sim 102 \cdot 10^2$	$\sim 14.5$
1 atm =	101325	1.01325	1	760	$\sim 1.033$	$\sim 1.033 \cdot 10^4$	$\sim 14.696$
1 torr = (mm Hg)	$\sim 133.322$	$\sim 1.33 \cdot 10^{-3}$	$\sim 1.31 \cdot 10^{-3}$	1	$\sim 1.359 \cdot 10^{-3}$	$\sim 13.595$	$\sim 1.93 \cdot 10^{-2}$
1 ata =	98066.5	0.980665	$\sim 0.968$	$\sim 735.5$	1	$10^4$	$\sim 14.22$
1 kgp/m <sup>2</sup> = (mmH <sub>2</sub> O)	9.80665	$\sim 9.81 \cdot 10^{-5}$	$\sim 9.68 \cdot 10^{-5}$	$\sim 7.355 \cdot 10^{-2}$	$10^{-4}$	1	$\sim 1.42 \cdot 10^{-3}$
1 psi = (lbf/in <sup>2</sup> )	$\sim 6894.76$	$\sim 6.89 \cdot 10^{-2}$	$\sim 6.8 \cdot 10^{-2}$	$\sim 51.7$	$\sim 7.03 \cdot 10^{-2}$	$\sim 703.07$	1

Tab.6: Equazioni di conversione per unità di energia.

U.d.m.	J	erg	kgp*m	kWh	CVh	kcal	lbf*ft	Btu
<b>1 J =</b>	1	10 <sup>7</sup>	~ 0.102	~ 2.78*10 <sup>-7</sup>	~ 3.78*10 <sup>-7</sup>	~ 0.2388*10 <sup>-3</sup>	~ 0.783	~ 0.948*10 <sup>-3</sup>
<b>1 erg =</b>	10 <sup>-7</sup>	1	0.102*10 <sup>-7</sup>	~ 2.78*10 <sup>-14</sup>	~ 3.78*10 <sup>-14</sup>	~ 0.2388*10 <sup>-10</sup>	~ 0.783*10 <sup>-7</sup>	~ 0.948*10 <sup>-10</sup>
<b>1 kgp*m =</b>	9.80665	~ 9.81*10 <sup>7</sup>	1	~ 2.72*10 <sup>-6</sup>	~ 3.704*10 <sup>-6</sup>	~ 2.34*10 <sup>-3</sup>	~ 7.23	~ 9.3*10 <sup>-3</sup>
<b>1 kWh =</b>	3.6*10 <sup>6</sup>	3.6*10 <sup>13</sup>	~ 3.6*10 <sup>5</sup>	1	~ 1.3596	~ 859.845	~ 2.66*10 <sup>6</sup>	~ 3.41*10 <sup>3</sup>
<b>1 CVh =</b>	~ 2.648*10 <sup>6</sup>	~ 2.648*10 <sup>13</sup>	270000	~ 0.735	1	~ 632.4	~ 1.953*10 <sup>6</sup>	~ 2509.6
<b>1 kcal =</b>	4186.8	4186.8*10 <sup>7</sup>	~ 426.9	1.163*10 <sup>-3</sup>	~ 1.58*10 <sup>-3</sup>	1	~ 3.09*10 <sup>3</sup>	~ 3.97
<b>1 lbf*ft =</b>	~ 1.36	~ 1.36*10 <sup>7</sup>	~ 0.138	~ 3.77*10 <sup>-7</sup>	~ 5.12*10 <sup>-7</sup>	~ 3.24*10 <sup>-4</sup>	1	1.29*10 <sup>-3</sup>
<b>1 Btu =</b>	1055.06	1055.06*10 <sup>7</sup>	~ 107.6	~ 2.93*10 <sup>-4</sup>	~ 3.98*10 <sup>-4</sup>	~ 0.252	~ 778.169	1

Tab.7: Equazioni di conversione per unità di potenza.

U.d.m.	W	$\frac{\text{kgp} \cdot \text{m}}{\text{s}}$	CV	$\frac{\text{kcal}}{\text{h}}$	$\frac{\text{ft} \cdot \text{lbf}}{\text{s}}$	$\frac{\text{Btu}}{\text{h}}$	HP
<b>1 W =</b>	1	~ 0.102	~ 1.36*10 <sup>-3</sup>	~ 0.85984	~ 0.738	~ 3.414	1.341*10 <sup>-3</sup>
<b>1 <math>\frac{\text{kgp} \cdot \text{m}}{\text{s}}</math> =</b>	9.80665	1	~ 1.33*10 <sup>-2</sup>	~ 8.432	~ 7.23	~ 33.46	1.3151*10 <sup>-2</sup>
<b>1 CV =</b>	~ 735.5	75	1	~ 632.4	~ 542.5	~ 2509.6	0.98632
<b>1 <math>\frac{\text{kcal}}{\text{h}}</math> =</b>	1.163	~ 0.1186	~ 1.58*10 <sup>-3</sup>	1	~ 0.585	~ 3.97	1.5596*10 <sup>-3</sup>
<b>1 <math>\frac{\text{ft} \cdot \text{lbf}}{\text{s}}</math> =</b>	~ 1.36	~ 0.138	~ 1.84*10 <sup>-3</sup>	~ 1.166	1	~ 4.626	1.8182*10 <sup>-3</sup>
<b>1 <math>\frac{\text{Btu}}{\text{h}}</math> =</b>	~ 0.293	~ 2.988*10 <sup>-2</sup>	3.98*10 <sup>-4</sup>	~ 0.252	~ 0.216	1	3.93015*10 <sup>-4</sup>
<b>1 HP =</b>	7.4569*10 <sup>2</sup>	7.6040*10 <sup>1</sup>	1.0139	6.4119*10 <sup>2</sup>	5.5*10 <sup>2</sup>	2.5444*10 <sup>3</sup>	1



## 0.2 PROPRIETÀ DI ALCUNI GAS NELLO STATO IDEALE

Si riportano in Tabella 8, per alcuni gas supposti nello stato ideale, i valori delle seguenti proprietà fisiche:

- $MM$ , massa molecolare;
- $R$ , costante di elasticità;
- $k$ , esponente dell'evoluzione isentropica (rapporto tra i calori specifici a pressione e volume costante);
- $c_p$ , calore specifico a pressione costante;
- $c_v$ , calore specifico a volume costante.

Le condizioni di riferimento assunte per la pressione e la temperatura sono rispettivamente di 1 atm e 20°C.

Tab.8: Proprietà di alcuni gas ideali.

	<b>MM</b> [kg/kmol]	<b>R</b> [J/(kg*K)]	<b>k</b>	<b>c<sub>p</sub></b> [J/(kg*K)]	<b>c<sub>v</sub></b> [J/(kg*K)]
<b>Ammoniaca (NH<sub>3</sub>)</b>	17.03	488	1.304	2094	1606
<b>Anidride carbonica (CO<sub>2</sub>)</b>	44.01	189	1.285	852	663
<b>Argo (Ar)</b>	39.94	208	1.665	521	313
<b>Aria</b>	28.97	287	1.400	1005	718
<b>Azoto (N<sub>2</sub>)</b>	28.02	297	1.399	1042	745
<b>Elio (He)</b>	4.00	2079	1.665	5205	3126
<b>Idrogeno (H<sub>2</sub>)</b>	2.02	4116	1.404	14304	10188
<b>Metano (CH<sub>4</sub>)</b>	16.04	518	1.320	2138	1620
<b>Ossido di carbonio (CO)</b>	28.01	297	1.399	1041	744
<b>Ossigeno (O<sub>2</sub>)</b>	32.00	260	1.395	920	661
<b>Vapor d'acqua (H<sub>2</sub>O)</b>	18.02	461	1.329	1864	1403

A titolo d'esempio, in Tabella 9 si riportano le variazioni dei calori specifici a pressione costante in funzione della temperatura per alcuni gas ideali. I valori della tabella sono relativi alla pressione di 1 atm e l'unità di misura è J/(kg\*K).



Tab.9:  $c_p$  di alcuni gas ideali in funzione della temperatura.

t [°C]	CO <sub>2</sub>	Aria	N <sub>2</sub>	He	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
-50	785	1013	1042	5205	13779	914
0	835	1005	1042	5205	14176	918
50	884	1005	1042	5205	14370	924
100	919	1009	1045	5205	14461	935
200	995	1026	1054	5205	14503	964

### 0.3. COSTANTI FISICHE NOTEVOLI

Si riportano in Tabella 10 i valori delle costanti fisiche che più di frequente si incontrano nelle applicazioni energetiche.

Tab. 10: Costanti fisiche notevoli.

Costante universale del gas ideale	$\mathcal{R} = 8.31445 \pm 0.00034 \text{ kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$
Numero d'Avogadro	$N_A = (6.02293 \pm 0.00016) \cdot 10^{26}$ molecole/kmol
Volume molare del gas ideale in condizioni normali (1 atm, 273.15 K)	$v_0 = 22.4193 \pm 0.0006 \text{ m}^3/\text{kmol}$
Costante di Boltzmann	$k = (1.38045 \pm 0.00007) \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
Costante di Planck	$h = (6.62517 \pm 0.00023) \cdot 10^{-34} \text{ J/s}$
Velocità della luce nel vuoto	$c_0 = (2.997925 \pm 0.000003) \cdot 10^8 \text{ m/s}$
Accelerazione standard di gravità	$g_0 = 9.80665 \text{ m/s}^2$ (32.1740 ft/s <sup>2</sup> )