

Appendice D. Unità di misura adottate in navigazione aerospaziale

D.1. Introduzione

Nel 1960, durante l'undicesima Conferenza internazionale dei pesi e delle misure a Sèvres (Francia), furono definite le unità di base del Sistema Internazionale (SI, *Système Internationale d'Unités*): il metro (*m*), il chilogrammo (*kg*), il secondo (*s*), l'Ampère (*A*)¹. La Fig. D.1 riassume le relazioni tra le unità di base del SI e le grandezze derivate.

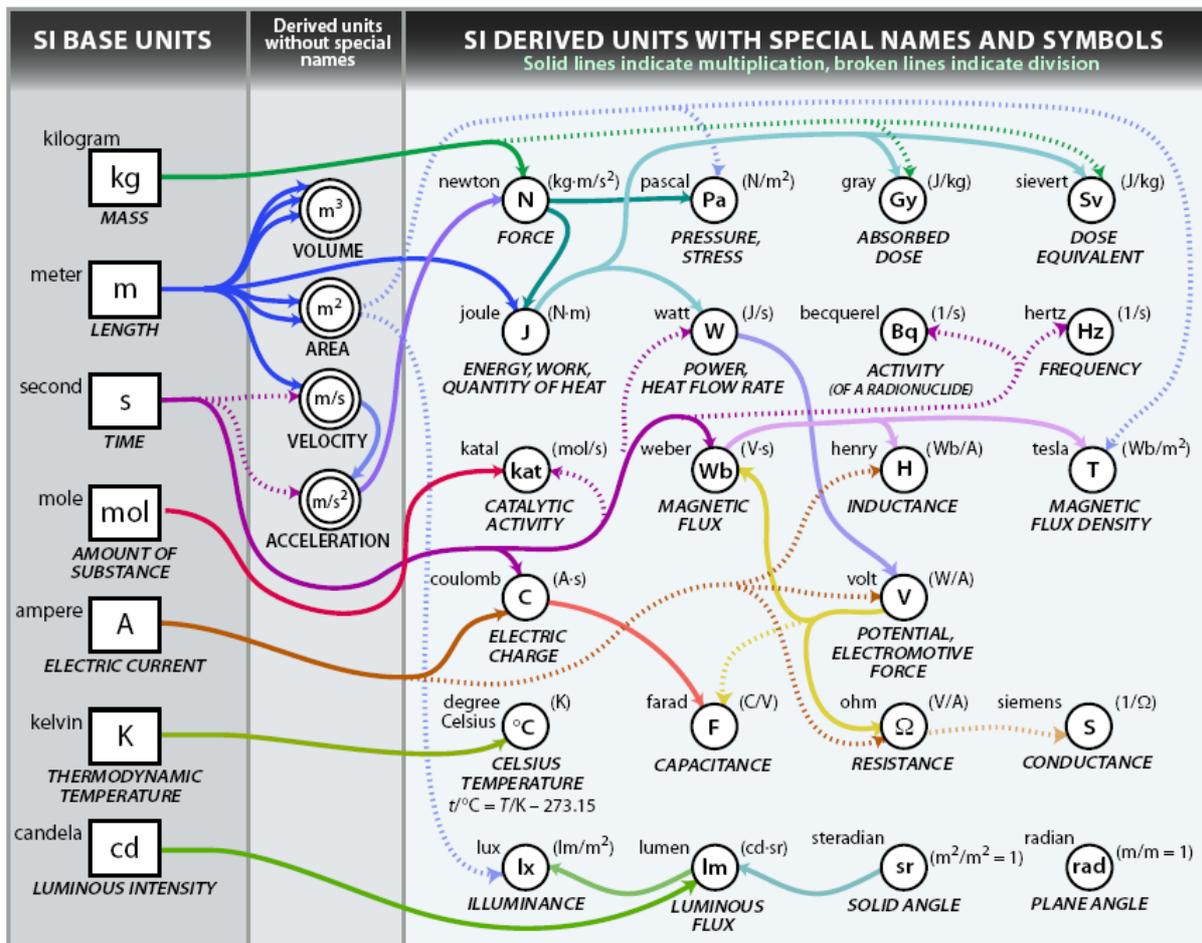


Fig. D.1. Unità fondamentali e derivate del SI.

Dalle unità MKSA possono essere derivate tutte le altre misure di interesse aerospaziale. Nonostante si cerchi di introdurre in tutte le applicazioni di navigazione le unità di misura del sistema internazionale, per ragioni storiche o di praticità d'impiego, ve ne sono alcune che difficilmente scompariranno. Lo stesso Annex 5 della Convenzione sull'Aviazione Civile Internazionale dell'ICAO, ratificata il 7 dicembre 1944 da 52 nazioni, e oggi alla sua 8ª edizione (2000) (*"Units of measurement to be used in air and ground operations"*, la cui prima edizione fu adottata nel 1948), consente delle deroghe alle unità di misura del sistema internazionale.

¹ Il SI è anche noto come "sistema MKSA", dalle iniziali delle unità "di base". Altre unità fondamentali sono il Kelvin (K) per la temperatura assoluta, la candela (cd) per l'intensità luminosa, e la mole (mol) per la quantità di sostanza.

D.2. Unità di misura di distanza

L'unità di misura di distanza è il metro (m)². Tale unità dovrebbe essere utilizzata per le misure di quota mentre il suo multiplo, il chilometro, dovrebbe essere utilizzato per le misure di distanza lineare.

Per la quota viene invece adottato il piede (*foot*, pl. *Feet*, abbreviato con "ft"), più piccolo del metro, che ha il vantaggio di consentire una più precisa valutazione della quota. Un piede, equivalente a 0.3048 m, è una unità di misura anglosassone multipla del pollice (*inch*, abbreviato con "in"): un piede equivale a 12 pollici, mentre un pollice è equivalente a 2.54 cm. Il piede è, a sua volta, un sottomultiplo del *fathom*, unità di misura utilizzata per esprimere le profondità marine sulle carte nautiche. Un *fathom* è equivalente a 6 ft.

Nella separazione verticale tra i diversi aeromobili si utilizzano i livelli di volo, che sono ottenuti dividendo per 100 la quota in piedi riferita ad una superficie convenzionale; ad esempio il livello di volo 240, indicato con la denominazione FL240 (FL = *Flight Level*) equivale ad una quota relativa di $240 \times 100 = 24\,000$ ft. Per la trasformazione di piedi in metri, o viceversa, sono disponibili tabelle, regoli o calcolatori tascabili; tuttavia se si vuole effettuare la conversione mnemonicamente si può approssimare il piede a 0.3 m e ricordare le seguenti regole:

Per passare da piedi a metri occorre dividere per 10 il numero dei piedi e poi moltiplicare il risultato per 3. Per esempio 2500 ft equivalgono a 750 m.

Viceversa, per passare dai metri ai piedi, è necessario prima moltiplicare per 3 il numero dei metri e poi aggiungere la decima parte del risultato ottenuto. Per esempio 3000 m equivalgono a 9900 ft.

Per le misure lineari di distanza, invece di essere usato il chilometro, viene adottata come unità di misura il miglio nautico. Il termine miglio deriva dal latino *mille* (il miglio originario corrispondeva a mille passi di un soldato romano).

Su un modello sferico della Terra, il miglio può definirsi come l'arco di meridiano (o di una qualsiasi circonferenza massima) che sottende un angolo al centro pari a un primo d'arco. Avendo una circonferenza massima un'ampiezza angolare di 360° (un angolo giro) ed essendo un grado uguale a 60 primi, la lunghezza dell'intera circonferenza equivale a 21600 miglia; un miglio, pertanto, è uguale alla lunghezza della circonferenza massima ($2\pi R$), con R uguale al raggio della Terra, diviso 21600. Considerando un valore del raggio terrestre pari a $R = 6371.2$ km, il miglio dovrebbe essere uguale a 1853.3 m. Questa è la misura che i paesi anglosassoni adottarono, esprimendola in piedi (6080 ft). La lunghezza del miglio dipende dal valore assegnato al raggio terrestre.

Se ci si riferisce all'ellissoide terrestre, si definisce **miglio nautico** (NM, *nautical mile*) l'arco di ellisse meridiana compreso tra due normali formanti tra loro l'angolo di un primo. Mentre per il meridiano della sfera terrestre il raggio è costante, per l'ellissoide terrestre il raggio del meridiano è variabile: massimo ai poli (6399.9 km), minimo all'equatore (6335.5 km);

² La moderna definizione di metro, nel SI, è: "Il metro è la lunghezza del tragitto compiuto dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo di 1/299 792 458 di secondo". È così fissata, per definizione, la velocità della luce in 299 792 458 m/s.

pertanto anche il miglio nautico varia con la latitudine (cfr. Tab. D.1) L'*International Hydrographic Bureau* nel 1929 raccomandò l'adozione di un valore standard per il miglio nautico, e propose il valore di 1852 m; tale valore è stato man mano adottato da tutte le nazioni e dalla stessa ICAO.

μ (gradi)	Raggio di curvatura (km)	Lunghezza del miglio (m)
0	6335.5	1842.9
10	6337.4	1843.5
20	6343.0	1845.1
30	6351.5	1847.6
40	6362.0	1850.6
50	6373.2	1853.9
60	6383.7	1857.0
70	6392.3	1859.5
80	6398.0	1861.1
90	6399.9	1861.7

Tabella D.1. Raggio di curvatura dell'ellisse meridiana e lunghezza del miglio in funzione della latitudine μ .

Anche per la conversione da km a NM o viceversa sono disponibili tabelle, regoli o calcolatori tascabili. Se si vuole effettuare la conversione mnemonicamente si può approssimare il miglio nautico a 1.850 km e ricordare le seguenti regole.

Per convertire miglia nautiche in chilometri occorre moltiplicare per 2 il numero delle miglia e dal risultato sottrarre la decima parte (il 10%) delle miglia ed ancora la metà di questa decima parte. Infatti il numero delle miglia dovrebbe essere moltiplicato per 1.850. Ad esempio 1500 NM equivalgono a:

$$1500 \times 1.850 = 1500 \times (2 - 0.1 - 0.1/2) = 2775 \text{ km}$$

Viceversa, per passare dai chilometri alle miglia nautiche è necessario prima dividere per due il numero dei chilometri e poi aggiungere la centesima parte del quadruplo dei chilometri stessi. Infatti il numero dei chilometri dovrebbe essere diviso per 1.850 (o moltiplicato per il suo inverso 0.54). Ad esempio 2000 km equivalgono a:

$$2000 \times 0.54 = 2000 \times (0.5 + 0.04) = 2000 \times (1/2 + 4/100) = 1080 \text{ NM}$$

Per completezza, ricordiamo che è in uso un altro miglio denominato "miglio statutario" (*statute mile*), uguale a 5280 ft, o a 1609.35 m. Questo miglio, detto anche *miglio terrestre*, fu introdotto nel Regno Unito da un editto della regina Elisabetta. Un miglio nautico è uguale a circa 1.15 miglia statutarie.

D.3. Unità di misura di tempo

L'unità di misura di tempo è il secondo, definito con grande approssimazione come l'86400^a parte del giorno solare medio³. A sua volta, il giorno solare medio è l'intervallo di tempo trascorso tra due successivi passaggi al meridiano dell'osservatore di un astro fittizio: il Sole medio. Rispetto al Sole medio, il Sole vero non si muove sulla volta celeste con velocità costante. Dal 1968, per decisione del *Bureau International des Poids et Mesures* (www.bipm.fr), è stata assegnata una nuova definizione di secondo basata sulla durata di un numero finito di periodi della radiazione dell'atomo del Cesio 133 (cfr. nota a piè di pagina). Multipli del secondo sono il minuto, uguale a 60 secondi, e l'ora, uguale a 60 minuti o a 3600 secondi.

D.4. Unità di misura della velocità

Nel sistema internazionale le velocità lineari dovrebbero misurarsi in metri al secondo (m/s); per la velocità dell'aeromobile si utilizza, invece, come unità di misura il nodo ($kt = knot$) definito come la velocità espressa in miglia nautiche all'ora. Il termine nodo deriva dal sistema utilizzato in navigazione marittima all'epoca dei velieri per la determinazione della velocità della nave. Veniva lanciata dalla nave un'ancora galleggiante collegata ad un cavo graduato con tanti nodi ad uguale distanza l'uno dall'altro. Il numero dei nodi che veniva filato in mare in un assegnato intervallo di tempo, misurato con una clessidra, indicava la velocità della nave. Alcune velocità, come ad esempio in meteorologia la velocità del vento, sono indicate in km/h o in m/s.

Per convertire una velocità da m/s a kt è sufficiente moltiplicare per 2 il numero dei m/s. Il risultato è approssimato in quanto al rapporto tra 3600 (numero dei secondi contenuti in un'ora) e 1852 (numero dei metri contenuto in un miglio) si è assegnato il valore 2.

Analogamente, per passare da una velocità in m/s ad una velocità in km/h si moltiplica per 3.6 il numero dei m/s.

Talvolta la velocità è espressa in miglia statutarie per, ora; in tal caso essa è indicata con il simbolo mph (*miles per hour*). La velocità di salita o di discesa di un aeromobile viene espressa o in m/s o in ft/min.

Per passare da una velocità in piedi al minuto (ft/min) ad una velocità in metri al secondo (m/s) è necessario dividere per 2 la centesima parte dei piedi.

Viceversa, per passare da metri al secondo a piedi al minuto occorre moltiplicare per 100 i metri ed il risultato ottenuto ancora per 2. Per esempio, una velocità di 2.5 m/s equivale a 500 ft/min, mentre 600 ft/min equivalgono a 3 m/s.

³ La definizione SI è la seguente: "Il secondo è l'intervallo di tempo che contiene 9 192 631 770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133".

D.5. Unità di misura angolari

Un angolo può essere misurato in radianti (rad), in gradi sessagesimali (deg), in gradi centesimali (grad).

Il radiante è l'angolo al centro di una circonferenza che sottende un arco di lunghezza uguale al raggio; la misura in radianti di un angolo è quindi data dal rapporto tra la lunghezza dell'arco sotteso dall'angolo ed il suo raggio. Poiché la circonferenza ($2\pi r$, dove r è il raggio, e π è la costante 3.14159265358...) sottende un angolo giro, l'angolo giro corrisponde a 2π radianti, un angolo piatto a π radianti, un angolo retto a $\pi/2$ radianti.

Il grado sessagesimale è la 360^{a} parte dell'angolo giro; ne deriva che un angolo giro corrisponde a 360° , un angolo piatto a 180° , un angolo retto a 90° . Un grado si divide in $60'$ (primi) ed un primo in $60''$ (secondi).

Il grado centesimale, invece, è la 400^{a} parte dell'angolo giro; di conseguenza un angolo retto corrisponde a 100° . Quest'unità di misura non è mai usata per le applicazioni di navigazione.

Per convertire la misura di un angolo α da gradi in radianti e viceversa basta risolvere la proporzione: $\alpha : \alpha_r = 360^{\circ} : 2\pi$ o anche $\alpha : \alpha_r = 180^{\circ} : \pi$. Un radiante corrisponde a $57^{\circ}.29578$ (ottenuto dal quoziente tra 180 e π) ovvero a $57^{\circ} 17' 44''.8$.

Se è dato il raggio r ed un angolo α , la lunghezza l dell'arco è data da $r\alpha$, con α espresso in radianti.

Per esempio: ricavare la distanza tra due località poste sullo stesso meridiano sapendo che il raggio di curvatura è uguale a 6360.5 km e che le rispettive verticali formano tra loro un angolo di $7^{\circ} 42' 30''$. L'angolo α deve essere prima trasformato in gradi e parti decimali e poi in radianti:

$$7^{\circ} 42' 30'' = 7^{\circ} + (42 + 30/60)/60 = 7^{\circ}.70833$$

$$\alpha_r = 7^{\circ}.70833 \pi/180 = 0.1345358\dots$$

La distanza tra i due punti è data da:

$$l = 6360.5 \times 0.1345358 = 855.715 \text{ km}$$

Il procedimento ora descritto corrisponde a quello seguito da Eratostene per ricavare la lunghezza della circonferenza terrestre. La distanza tra i due punti poteva essere facilmente ricavata scegliendo come unità di misura il miglio nautico; infatti per la definizione di miglio è sufficiente calcolare la distanza angolare tra i due punti espressa in primi:

$$l = (7^{\circ} \times 60) + 42' + 30''/60 = 462.5 \text{ NM}$$

È evidente il vantaggio conseguito nell'adottare il miglio nautico come unità di misura delle distanze; la distanza ricavata è pari a 856.55 km, diversa dalla precedente in quanto la lunghezza del miglio (Tab. D.1) varia con la latitudine. Il valore 1852 è relativo ad una latitudine di $44^{\circ} 20'$.

D.6. Unità di misura di velocità angolari

La velocità angolare nel sistema SI si esprime in radianti al secondo. Per esempio la velocità

angolare terrestre Ω_e (talvolta indicata con σ) è data da:

$$\Omega_e = 2\pi / 86164 = 0.000072921 \text{ rad/s}$$

essendo 86164 il numero dei secondi impiegato dalla Terra a fare un giro (2π) intorno al proprio asse.

Talvolta la velocità angolare si esprime in gradi all'ora; nel caso dell'esempio precedente si ha:

$$\sigma = 360^\circ / 23.9344 = 15^\circ.041/\text{h}$$

essendo 23.9344 il numero di ore impiegato dalla Terra a fare un giro (360°) intorno al proprio asse.

Per alcune applicazioni le elevate velocità angolari si esprimono in giri al minuto. Per passare dai giri al minuto ai radianti al secondo basta moltiplicare per 2π (numero dei radianti per ogni giro) e dividere per 60 (numero dei secondi in un minuto). Ad esempio, se il rotore di un giroscopio compie 24 000 giri/min, la sua velocità angolare ω è data da:

$$\omega = 24\,000 \times 2\pi / 60 = 2513.27 \text{ rad/s}$$

D.7. Misure di parametri atmosferici

L'aria è un miscuglio di gas di cui i componenti più importanti sono l'azoto, presente in una percentuale del 78%, e l'ossigeno, presente al 21%. Dell'aria è possibile misurare la temperatura (con i termometri) e la pressione (con apposite capsule barometriche). La temperatura normalmente viene misurata usando la scala centigrada che è basata sull'uso di due punti fissi: il punto di fusione del ghiaccio ed il punto di ebollizione dell'acqua (in condizioni normali), punti le cui temperature sono fatte corrispondere rispettivamente a 0 e a 100. Il grado della scala centigrada viene indicato con $^\circ\text{C}$. Nei paesi anglosassoni è invece utilizzata la scala Fahrenheit, in cui il punto di fusione del ghiaccio è fatto corrispondere a 32 ed il punto normale di ebollizione dell'acqua a 212. Il grado della scala Fahrenheit viene indicato con $^\circ\text{F}$.

Per passare da una scala all'altra si ricorre alla proporzione:

$$(t_f - 32) : t_c = (212 - 32) : 100$$

da cui si ricavano le formule di conversione:

$$t_f = 9/5 t_c + 32$$

$$t_c = 5/9 (t_f - 32)$$

Nel sistema SI adottato dall'ICAO, tuttavia, la temperatura deve essere misurata utilizzando la scala assoluta o scala Kelvin nella quale lo zero della scala centigrada è fatto corrispondere a 273.16. Pertanto, per passare dalla scala centigrada alla scala assoluta è necessario sommare 273.16 alla temperatura centigrada.

La temperatura centigrada viene indicata con “t” mentre quella assoluta con “T”. La pressione atmosferica nel sistema SI deve essere espressa in Newton/m² (detto anche Pascal o Pa). In condizioni normali (alla temperatura di 0 °C, al livello del mare ed alla latitudine di 45°) la pressione atmosferica è uguale alla pressione esercitata da una colonna di mercurio alta 760 mm (0.76 m). Come è ben noto, la pressione normale è data da:

$$p = h \rho g$$

Essendo l'altezza h pari a 0.76 m, la densità ρ del mercurio uguale a 13 596 kg/m³ e l'accelerazione di gravità g pari a 9.806 m/s², la pressione normale, indicata con p_0 , sarà uguale a 101325 Pa.

In meteorologia la pressione atmosferica è anche indicata in millibar; quest'unità di misura deriva dal vecchio sistema di misura c.g.s. (centimetro–grammo–secondo) usando il quale la relazione precedente darebbe alla pressione normale il seguente valore:

$$p_0 = 76 \text{ cm} \times 13.596 \text{ g/cm}^3 \times 980.6 \text{ cm/s}^2 = 1013\,250 \text{ dine/cm}^2$$

L'unità di pressione del sistema c.g.s., dine su cm², è anche detta *baria*, mentre si definiscono bar e millibar le pressioni corrispondenti ad un milione ed a mille barie; pertanto la pressione normale corrisponde a 1013.25 millibar.

Il millibar è anche detto ettopascal in quanto ad ogni millibar corrispondono 100 pascal (1 mb = 1 hPa). In navigazione aerea la pressione può ancora, sebbene raramente, essere indicata dall'altezza della colonna di mercurio espressa in millimetri o in pollici; in tali casi la pressione normale equivarrebbe a 760 millimetri di mercurio oppure a 29.92 pollici di mercurio.

L'unità di misura della densità ρ dell'aria è kg/m³; se sono note la temperatura e la pressione, la densità può ricavarsi dalla relazione:

$$p = \rho R T$$

nota come “equazione caratteristica dei gas perfetti”, essendo R la costante universale dei gas, riferita alla massa di un kg, pari a 287.04 ed esprimendo la pressione in Pa e la temperatura in K. La densità corrispondente ad una temperatura di 15 °C (288.16 K) ed alla pressione normale è uguale a:

$$\rho = p / RT = 101325 / (287.04 \times 288.16) = 1.225 \text{ kg/m}^3$$

D.8. Altre unità di misura

L'unità di misura della massa è, nel sistema SI, il chilogrammo; gli anglosassoni usano tutt'ora la libbra o *pound* pari a 0.45359 kg. L'unità di misura del volume, nel sistema SI, è il metro cubo; gli anglosassoni usano il gallone (*Imperial Gallon*) che corrisponde a 4.5459 litri, volume occupato da 10 libbre di acqua distillata a 62 °F alla pressione di 30 pollici di mercurio. Il gallone inglese non è da confondere col gallone USA (*US Gallon*) che invece corrisponde a 3.7854 litri.