

# La revisione del Sistema Internazionale di unità (SI): una rivoluzione in arrivo?

di Luca Mari - Vice-Presidente lato CEI della CT "Metrologia"

## Introduzione

Nella vita di ogni giorno facciamo costante ed esplicito riferimento alle unità di misura, siano esse relative alla massa (kg) di un cibo che intendiamo acquistare, al volume (l) di carburante che ci accingiamo a immettere nel serbatoio della nostra autovettura o ancora alla potenza elettrica (kW) che consumiamo in ambito domestico. È forse meno noto che gli scambi commerciali basati sulla misurazione di queste grandezze corrispondono a circa il 10 % del PIL di un Paese come il nostro e che dunque le regole e le convenzioni relative alle rispettive unità di misura hanno un ruolo critico, essendo frutto di progressivi sedimenti di conoscenza e accordi, stipulati nel tempo e su scala internazionale, che hanno un loro inquadramento in un vero e proprio sistema metrologico.

Il presente articolo introduce il Sistema Internazionale di unità, chiamato brevemente "SI", risultato della Convenzione del Metro. Invece di presentare l'evoluzione storica delle definizioni delle diverse unità di misura – si tratta di documentazione facilmente recuperabile – si propone qui qualche cenno sulle idee fondanti, in particolare 'unità di misura', 'campione di misura' e 'riferibilità metrologica', e sulle possibili strategie per la definizione di unità. È in corso di sviluppo una nuova versione del SI che può essere considerata rivoluzionaria, in quanto basata su una nuova strategia di definizione: l'articolo si conclude con una breve presentazione di questa possibile riforma.

## SI: Il Sistema Internazionale di unità

**Sistema Internazionale di grandezze:** sistema di grandezze, basato sulle sette grandezze di base: lunghezza, massa, tempo, corrente elettrica, temperatura termodinamica, quantità di sostanza, e intensità luminosa

[UNI CEI 70009:2008 (VIM3), punto 1.6]

**Sistema Internazionale di unità (SI):** sistema di unità, basato sul Sistema internazionale di grandezze, con i nomi e i simboli corrispondenti, inclusa una serie di prefissi con i rispettivi nomi e simboli e le regole per il loro impiego, adottato dalla Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure (CGPM)

[UNI CEI 70009:2008 (VIM3), punto 1.16]

Il Sistema Internazionale di unità (SI) ha un ruolo strategico per la metrologia, essendo il suo punto di contatto più esplicito e diretto con la fisica (e la chimica, attraverso la mole, e la fotometria, attraverso la candela). Attraverso le equivalenze insegnate alle scuole primarie (a quanti  $\text{cm}^2$  corrispondono  $3 \text{ m}^2$ ?), la differenza tra grandezze e unità di misura (a partire dalla considerazione che le leggi della fisica sono indipendenti dalle unità), e forse qualche cenno di analisi dimensionale (perché se  $X$  è una lunghezza l'equazione  $X+X^2$  è errata?), l'esistenza del SI potrebbe essere l'unica conoscenza di metrologia diffusa socialmente.

Le unità di misura hanno il compito strategico di mantenere una relazione tra "la teoria" e "la pratica", e quindi tra la matematica e la sperimentazione. È infatti solo attraverso le unità di misura che i valori numerici nelle equazioni che descrivono leggi fisiche mantengono un significato empirico, che poi passano anche all'uso quotidiano delle unità stesse, nelle transazioni commerciali e altro. Il ruolo del SI è dunque delicato: la misurazione è un processo sperimentale, come definisce il *Vocabolario Internazionale di Metrologia* [VIM3, 2.1], e in questo è diversa dal calcolo. In un'epoca di "diluvio informazionale", in cui si tende a ridurre la distinzione tra simulazione ed entità simulata, il ruolo della metrologia, "scienza della misurazione e delle sue applicazioni" [VIM3, 2.2], è critico e in questo si fonda appunto anche sul SI.

La presentazione ufficiale del SI è pubblica e liberamente accessibile via web [Brochure SI], ed è un documento con apprezzabili esplicite finalità di comunicazione, a partire dal suo titolo informale, la *Brochure SI*.

## Grandezze e unità di misura

**grandezza:** proprietà di un fenomeno, corpo o sostanza che può essere espressa quantitativamente mediante un numero e un riferimento

[UNI CEI 70009:2007 (VIM3), punto 1.1]

**unità di misura:** grandezza scalare reale, definita e adottata per convenzione, rispetto alla quale è possibile confrontare ogni altra grandezza della stessa specie al fine di esprimere il rapporto delle due grandezze come un numero

[UNI CEI 70009:2007 (VIM3), punto 1.9]

**campione di misura:** realizzazione della definizione di una grandezza, con un valore stabilito e con un'incertezza di misura associata, impiegata come riferimento

[UNI CEI 70009:2007 (VIM3), punto 5.1]

Il concetto di unità di misura [VIM3, 1.9] è sufficientemente semplice, e si può riassumere in poche parole. Alla base sta l'idea che conosciamo il mondo attraverso oggetti e proprietà. Per esempio, un tavolo è un oggetto e la lunghezza è una sua proprietà. Le proprietà ci consentono di confrontare oggetti (questo tavolo è più lungo di quest'altro tavolo) e in certi casi di comporre oggetti in modo che la proprietà dell'oggetto composto sia funzione delle proprietà degli oggetti componenti (l'oggetto ottenuto giustapponendo opportunamente i due tavoli è lungo quanto la somma delle lunghezze dei due tavoli). Le proprietà che ammettono la combinazione per addizione si chiamano *grandezze* [VIM3, 1.1] (e più precisamente "grandezze additive"). Come accade per esempio nel caso della lunghezza, l'oggetto  $b$  ottenuto allineando due copie di uno stesso oggetto  $a$  ha dunque lunghezza doppia di quella di ogni copia,  $l(b) = 2l(a)$ . Ciò significa che le lunghezze sono invarianti per rapporto: nelle condizioni indicate,  $l(b) / l(a) = 2$  è un fatto indipendente da convenzioni.

Le unità di misura sono invece introdotte per convenzione, attraverso una definizione che stabilisce la grandezza di confronto  $l(a)$  e le attribuisce un nome per identificarla. Per esempio  $l(b) = 2 \text{ m}$  significa  $l(b) / \text{m} = 2$ , cioè che la lunghezza dell'oggetto  $b$  è 2 volte la lunghezza identificata come metro.

Dunque le unità di misura sono grandezze, e si chiamano "campioni" (*measurement standards*) [VIM3, 5.1] gli oggetti che le realizzano (a volte si dice "materializzano").

## Campioni di misura e riferibilità metrologica

**riferibilità metrologica:** proprietà di un risultato di misura per cui esso è posto in relazione a un riferimento attraverso una documentata catena ininterrotta di tarature, ciascuna delle quali contribuisce all'incertezza di misura

[UNI CEI 70009:2007 (VIM3), punto 2.41]

**catena di riferibilità metrologica:** successione di campioni di misura e tarature usata per porre in relazione un risultato di misura a un riferimento

[UNI CEI 70009:2007 (VIM3), punto 2.42]

**taratura:** operazione eseguita in condizioni specificate, che in una prima fase stabilisce una relazione tra i valori di una grandezza, con le rispettive incertezze di misura, forniti da campioni di misura, e le corrispondenti indicazioni, comprensive delle incertezze di misura associate, e in una seconda fase usa queste informazioni per stabilire una relazione che consente di ottenere un risultato di misura a partire da un'indicazione

[UNI CEI 70009:2007 (VIM3), punto 2.39]

La condizione fondamentale che ci si attende da un'unità di misura è che essa consenta di garantire la *riferibilità metrologica* [VIM 2.41] dei risultati di misura: se con strumentazioni diverse impiegate da persone diverse in momenti diversi si ottiene uno stesso risultato di misura, tale risultato è riferibile a un'unità di misura se si può supporre che la grandezza misurata sia la stessa. In pratica, la riferibilità garantisce che oggetti la cui lunghezza misurata è 2 m abbiano effettivamente la stessa lunghezza. Ciò richiede che gli strumenti di misura siano opportunamente tarati, ma prima ancora che l'unità di misura sia definita in modo tale da essere realizzabile stabilmente da campioni molteplici in condizioni diverse.

Proprio a questo scopo nel corso del tempo i criteri di definizione delle unità sono stati raffinati. Possiamo identificare al proposito tre strategie di definizione: la loro presentazione, ancora nell'esempio della lunghezza, ci consentirà un rapido viaggio nel tempo, fino a un plausibile prossimo futuro.

In accordo alla prima strategia, si sceglie un oggetto che ha una determinata lunghezza e si definisce come unità di misura tale lunghezza: è il caso della barra di platino-iridio utilizzata come campione del metro dall'adozione della Convenzione del Metro, nel 1889, fino al 1960. La lunghezza realizzata dal campione primario [VIM3, 5.4] è per definizione a incertezza nulla, e le catene di riferibilità [VIM 2.42] partono tutte da tale campione, il cui possesso e la cui gestione sono dunque condizioni politicamente delicate. Questa

strategia è semplice da realizzare, ma si fonda sull'ipotesi che il campione primario non modifichi la sua lunghezza nel corso del tempo, condizione che a rigore nessun oggetto macroscopico può garantire. La conseguenza, al limite del paradossale, è che ogni instabilità del campione primario richiede la ritaratura di tutti i campioni derivati e quindi invalida tutte le misurazioni precedenti! Il kilogrammo è l'unica unità ancora definita in questo modo.

Questi gravi problemi giustificano la transizione alla seconda strategia, fondata su un modello che assume che tutti gli oggetti di un certo tipo abbiano esattamente la stessa lunghezza. Poiché è ragionevole mantenere la lunghezza dell'unità definita in precedenza (un metro dovrebbe rimanere lungo un metro anche quando la definizione cambia) e non è plausibile che si trovi in natura un tipo di oggetti la cui lunghezza sia esattamente e stabilmente rappresentativa dell'unità, nella definizione entra in gioco un fattore moltiplicativo di adattamento: il metro è  $x$  volte la lunghezza degli oggetti del tipo  $y$ . E così tra il 1960 e il 1983 il metro è stato definito come un certo numero (1 650 763.73) di lunghezze d'onda di una certa radiazione (quella corrispondente alla transizione fra i livelli  $2p^{10}$  e  $5d^5$  dell'atomo di kripton-86 nel vuoto), dunque assumendo appunto tale lunghezza d'onda come una caratteristica costante di tale radiazione. Fino a quanto, alla luce dello stato delle migliori conoscenze disponibili, questa ipotesi di costanza si mantiene valida, chiunque sia in grado di riprodurre un oggetto del tipo  $y$  specificato nella definizione può realizzare l'unità, secondo una procedura detta *mise en pratique*, cioè appunto realizzazione della definizione dell'unità.

Una versione modificata di questa strategia è quella alla base della definizione attuale del metro, la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in una certa frazione ( $1/299\,792\,458$ ) di secondo. Anche in questo caso si assume un modello, che ipotizza la costanza della velocità della luce, ma ora la grandezza costante non è più una lunghezza ma, appunto, una velocità. Il fatto che da una velocità si possa ottenere una lunghezza, fissando una durata temporale, non è banale, non ha nulla di convenzionale e precede la definizione delle unità: è conseguenza della conoscenza di un *sistema di grandezze* [VIM3, 1.3], cioè di un insieme di grandezze reciprocamente connesse attraverso relazioni, come appunto  $v = dl / dt$ . Tali relazioni, tipicamente nella forma di leggi fisiche, garantiscono la possibilità di definire l'unità di una grandezza in funzione di altre grandezze, per esempio appunto il metro in funzione di una velocità e di una durata. La presenza di un sistema di grandezze consente inoltre di definire l'unità di alcune grandezze in funzione di unità di altre grandezze, predefinite. Le prime, come il metro al secondo per la velocità, sono chiamate *unità derivate* [VIM3, 1.11]; le seconde, come il metro per la lunghezza e il secondo per il tempo, sono chiamate *unità di base* [VIM3, 1.10]. La distinzione tra unità di base e unità derivate è evidentemente convenzionale, e deriva dalla corrispondente distinzione, a sua volta convenzionale, tra grandezze di base [VIM3, 1.4] e grandezze derivate [VIM3, 1.5] in un sistema di grandezze, alla base della possibilità di stabilire la dimensione di una grandezza [VIM 1.7] appunto in riferimento alla sua relazione alle grandezze di base del sistema. Un sistema di unità di misura [VIM3 1.13] è definito come l'insieme delle unità di base e delle unità derivate delle grandezze di un sistema di grandezze, e il SI è il sistema di unità di misura sviluppato progressivamente dalla Convenzione del Metro.

Questa seconda strategia di definizione delle unità ha evidenti vantaggi rispetto alla prima, ma ha ancora un problema: dato che i tipi di oggetti che definiscono le unità hanno, per definizione, incertezza nulla, il valore delle costanti fondamentali della fisica è derivato dalle unità (per esempio la velocità della luce nel vuoto è  $299\,792\,458$  m / s), ma questa derivazione ha un'incertezza non nulla. Benché l'idea che il valore di una costante fondamentale sia noto con un'incertezza maggiore di zero non abbia nulla di contraddittorio, si potrebbe considerare auspicabile che le costanti fondamentali abbiano un valore stabilito e non incerto...

## Verso un nuovo SI?

È con questo obiettivo che da qualche anno si sta esplorando l'opportunità di adottare un'ulteriore, terza strategia, che implica una revisione strutturale del SI, politicamente in carico alla Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure (CGPM) e sviluppata operativamente dal Comitato Internazionale dei Pesi e delle Misure (CIPM). Presentata inizialmente solo come una "possibile ridefinizione di alcune unità" [CGPM 2007], è quindi stata riconosciuta come una "possibile futura revisione del SI" [CGPM 2011], e più recentemente come la "futura revisione del SI" [CGPM 2014]. Il fatto che il Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) stesso presenti questo come il "nuovo SI" mostra il grado di importanza attribuito a questa revisione che, in accordo agli auspici dichiarati, dovrebbe essere adottata dalla CGPM nel 2018. Sul sito del BIPM è disponibile una bozza dei primi tre capitoli della prospettata nuova versione della Brochure SI da cui ci si può formare un'idea della situazione.

La nuova strategia inverte la priorità: invece di definire le unità e quindi derivare da queste i valori delle costanti fondamentali, fissa i valori delle costanti e ne deriva la definizione delle unità. Dato che il

cambiamento non è completamente ovvio, può essere forse utile arrivare alle nuove definizioni per passi successivi.

Nel caso più semplice, se fosse nota una costante fondamentale  $k$  di lunghezza appropriata si potrebbe operare come segue: (i) si stabilisce che per definizione tale costante ha valore 1, con incertezza nulla, se specificata nell'unità di lunghezza del SI; (ii) l'unità di lunghezza del SI è il metro ed è dunque tale che  $k = 1$  m. Questa struttura a doppia definizione, prima si definisce il valore di una costante e poi l'unità, potrebbe apparire circolare, soprattutto se si considera la seconda definizione senza la prima, ma in effetti non lo è, come questo caso semplice mostra. Le cose diventano solo un poco più complesse introducendo un fattore moltiplicativo: data una costante di lunghezza  $k$ , per definizione (i) tale costante ha valore  $n$ , con incertezza nulla, se specificata nell'unità di lunghezza del SI, e quindi (ii) il metro, unità di lunghezza del SI, è dunque tale che  $k = n$  m. Le definizioni del "nuovo SI" sono in effetti ancora più complesse, dato che sfruttano, come nel caso della seconda strategia, la presenza di un sistema di grandezze. E così per esempio si propone di definire il metro a partire da una costante fondamentale di velocità. La doppia definizione è perciò: (i) la velocità della luce nel vuoto è esattamente 299 792 458 se specificata in unità di velocità del SI; (ii) il metro è dunque tale che la velocità della luce nel vuoto è esattamente 299 792 458 se specificata in metri al secondo.

Questa struttura di definizione è palesemente più complessa delle precedenti, e senza una presentazione chiara ed efficace potrebbe risultare poco comprensibile o circolare (il metro definito, apparentemente, in termini del metro). Delicata è anche la questione strutturale: il beneficio di costanti fondamentali a incertezza nulla è ottenuto al prezzo di rendere problematico l'eventuale aggiornamento dei valori di tali costanti a seguito di raffinamenti teorici o sperimentali. Anche secondo questa terza strategia, rimane possibile infatti una situazione in cui la disponibilità di nuova conoscenza, attraverso un confronto empirico che non coinvolge valori di grandezze, porti a concludere che la luce nel vuoto ha una velocità diversa da quanto precedentemente supposto. Avendo però fissato per definizione il valore della costante, tale variazione non sarebbe riferibile alla costante stessa, e nemmeno alle unità a essa agganciate: tutte le altre grandezze si ritroverebbero quindi modificate nei loro valori, cosa concettualmente e socialmente non poco problematica. Per risolvere questo problema, se un ulteriore incremento della complessità strutturale delle definizioni fosse considerato accettabile, le si potrebbe riscrivere in forma esplicitamente parametrica, per esempio: (i) la velocità della luce nel vuoto è esattamente  $n$  se specificata in metri al secondo; (ii) il metro è tale che la velocità della luce nel vuoto è esattamente  $n$  se specificata in metri al secondo; (iii) allo stato attuale della conoscenza  $n = 299\,792\,458$ .

Se, come oggi pare probabile, ci sarà un "nuovo SI" basato su questa terza strategia, è auspicabile che i benefici per la comunità scientifica siano comunque ottenuti mantenendo questa fondamentale componente della metrologia comprensibile anche per i non addetti ai lavori: una sfida non banale.

## Riferimenti bibliografici

BIPM, SI Brochure: The International System of Units (SI) [8th edition, 2006; updated in 2014];

<http://www.bipm.org/en/publications/si-brochure>.

BIPM, Draft Chapters 1, 2 and 3 of the 9th SI Brochure;

[http://www.bipm.org/utis/common/pdf/si\\_brochure\\_draft\\_ch123.pdf](http://www.bipm.org/utis/common/pdf/si_brochure_draft_ch123.pdf).

BIPM, On the future revision of the SI; <http://www.bipm.org/en/measurement-units/new-si>.

CGPM 2007, On the possible redefinition of certain base units of the International System of Units (SI), risoluzione 12 della 23a CGPM, 2007; <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/23/12>.

CGPM 2011, On the possible future revision of the International System of Units, the SI, risoluzione 1 della 24a CGPM, 2011; <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/24/1>.

CGPM 2014, On the future revision of the International System of Units, the SI, risoluzione 1 della 25a CGPM, 2014; <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/25/1>.

JCGM 200:2012, Vocabolario Internazionale di Metrologia (VIM) - Concetti di base e generali e termini associati, 3a ed (versione 2008 con correzioni minori), Joint Committee for Guides in Metrology, 2012; versione trilingue En, Fr, It: <http://www.ceiweb.it/it/lavori-normativi-it/vim.html>.

Wikipedia, Proposed redefinition of SI base units;

[http://en.wikipedia.org/wiki/Proposed\\_redefinition\\_of\\_SI\\_base\\_units](http://en.wikipedia.org/wiki/Proposed_redefinition_of_SI_base_units).