CARMELO CAPUTO

Alla ricerca di un più razionale sistema di unità di misura (*)

Riassunto: Dopo brevi note introduttive, l'A. critica i sistemi di misura attualmente in uso, rilevandone pregi e difetti. Tale disamina porta alla conclusione che un sistema pienamente razionale, ai fini scientifici e tecnici, dovrebbe avere una sola unità fondamentale con definizione primitiva e le altre con definizione condizionata.

A titolo di esempio, l'A. espone lo schema di un nuovo sistema di unità di misura così concepito sottolineandone i vantaggi rispetto ai sistemi attuali. Egli afferma infine la convenienza di studiare, per l'adozione in sede internazionale, un sistema diverso da quelli ora impiegati, informato ai concetti esposti nella memoria e meglio rispondenti alle esigenze pratiche, piuttosto che ripiegare su soluzioni esistenti e, sotto molti aspetti, manchevoli.

1. — Considerazioni preliminari.

Non vale la pena di spendere parole per illustrare qui la travagliata serie — a tutti ben nota [1, 6, 10] delle innumerevoli proposte, modifiche e normalizzazioni in cui il mondo tecnico si è dibattuto per oltre un secolo, a proposito della scelta di un conveniente sistema di unità di misura.

Sta di fatto che, prescindendo dal sistema CGS — riconosciuto ufficialmente dal Congresso Internazionale di Parigi del 1881 ed oggi applicato limitatamente a certi settori della fisica — sono attualmente accreditati tre fondamentali sistemi di unità di misura, che hanno soppiantati i numerosi altri, incoerenti o poco pratici, impiegati per il passato [2, 3, 9, 13, 14, 22, ecc.]. Essi sono:

— il sistema MKS o « Giorgi » (ora S.I.);
— il sistema « tecnico » o « pratico »;
— il sistema « imperiale inglese » (**)

(*) Memoria presentata dall'Accademico Giovanni Battista Bonino.

(**) Con tale dizione si vuole intendere il sistema assoluto che ammette, come unità fondamentali, il piede, la libbra ed il secondo (Weight and Measures Act, 1878).

tutti e tre assoluti, in quanto anche il secondo (nato come sistema relativo e così da molti ancora chiamato) lo è divenuto quando, a seguito della 5ª Conferenza Internazionale di Pesi e Misure (Parigi, 1913), fu definito e reso convenzionale il valore di riferimento dell'accelerazione di gravità.

Dei tre, quello oggi più usato (*) è certamente il sistema inglese, prevalentemente per ragioni economiche, commerciali e di tradizione, nonostante i tecnici di tutto il mondo siano concordi nel ritenerlo il meno razionale, per le sue numerose unità non coerenti.

Gli altri due sistemi sono invece impiegati, soprattutto in Europa, pressoché in egual misura: il secondo è ancora radicato specialmente nel mondo della produzione, mentre il primo è decisamente preferito nel mondo scientifico ed in quello tecnico di un certo livello.

Al sistema MKS, ufficialmente accettato dalla Commissione Elettrotecnica Internazionale del 1936 a Stoccolma e divenuto «definitivo» in base alle deliberazioni del Comitato Internazionale dei Pesi e delle Misure, nel corso delle riunioni parigine del 1946 ([10, 11, 14, 15, ecc.), vanno sempre più le simpatie dei tecnici di tutto il mondo; tanto che esso è stato più volte, nell'ultimo ventennio ed anche in epoca recentissima (dal momento in cui l'International Standard Organisation — I.S.O. — ha ufficialmente riconosciuto le conclusioni della XII Conferenza Internazionale dei Pesi e delle Misure) elevato alla dignità di «sistema internazionale» (S.I.).

Non v'è dubbio, infatti, che dei sistemi di misura dianzi ricordati il Giorgi si presenti come il più razionale, ma è anche lecito domandarsi: è esso il sistema più razionale che si possa concepire?

La domanda sembra quanto mai attuale ed importante. Attuale, perché ci troviamo certamente ad una svolta decisiva nella storia della metrologia, ora che il sempre più frequente e rapido scambio di informazioni tra i diversi Paesi aggiunge alla iniziale veste accademica del problema un pressante significato applicativo. Importante perché, in sede di convergenza di metodologie metrologiche verso un traguardo comunitario, una scelta non sufficientemente ponderata costituirebbe un danno economico ingentissimo per tutta l'umanità.

A questa domanda si vuol fornire, nelle pagine che seguono, una risposta (anche se opinabile) e — si spera — un sia pur modesto contributo alla soluzione del delicato problema.

(*) È difficile fare delle statistiche al riguardo. Alcuni calcolano tuttavia, con larghissima approssimazione, che il sistema inglese sia adottato da oltre il doppio degli individui che si servono di sistemi metrici. Valutando invece in termini economici la produzione annua dei paesi che impiegano i due tipi di sistemi, il rapporto salirebbe probabilmente a 3 o addirittura a 4 [v. anche ([5, 11)].

2. — Razionalità di un sistema. Considerazioni sulle unità di misura, sui loro multipli e sottomultipli.

Si è posto poc'anzi l'accento sulla *razionalità* di un sistema di unità di misura e sembra necessario precisare innanzitutto che cosa si vuole intendere con tale locuzione; la qual cosa richiede le seguenti definizioni, a cui si ritiene di poter dare significato assiomatico:

— un sistema di misura è un insieme *coerente* di unità di misura;

— un'unità di misura è un *campione convenzionale* del valore di una grandezza fisica;

— la misura di una grandezza fisica consiste nel confronto metrologico della stessa con la corrispondente unità di misura, di modo che il *numero puro* che ne esprime il rapporto costituisce il « valore » della grandezza sottoposta a misura.

Ciò premesso, sembra logico affermare che un sistema può definirsi tanto più razionale (nell'accezione più generale della parola):

a) quanto più le sue unità hanno significato sensibile per l'uomo, inteso come entità psicologica fisicamente operante;

b) quanto più prossimo ad 1 è il rapporto tra gli scostamenti assoluti degli effettivi valori rispettivamente massimi e minimi delle grandezze da misurare rispetto a quello della relativa unità di misura: vale a dire quanto più « centrate » sono le unità di misura nel quadro delle attività umane;

c) quanto minore è il numero di cifre significative necessario per esprimere il valore della grandezza da misurare.

In ordine a questi concetti, sembra opportuno discutere subito l'argomento al punto *c*), rinviando quelli enunciati ai punti *a*) e *b*) (più sostanziali) ai successivi capitoli.

Mentre le attività umane si esplicavano in passato limitatamente all'ambito delle « possibilità fisiche » dell'uomo o di gruppi di uomini, oggi le energie e gli strumenti d'indagine disponibili sono tali da consentire di operare nel campo dell'enormemente piccolo e dell'enormemente grande, di gran lunga oltre i limiti del « direttamente sensibile » e del « fisicamente intuibile ».

Il valori delle grandezze da misurare coprono così gamme spesso tanto dilatate (e ancor più sentita sarà tale situazione nel futuro) che il problema della « rappresentazione » numerica diventa, in molti casi, estremamente importante; ed è noto ed evidente che tale problema si risolve soltanto con l'impiego di una base sufficientemente grande della numerazione.

La base 10, ora quasi universalmente accettata, ha costituito, fino a qualche decennio fa, il miglior compromesso tra le predette esigenze di rappresentazione e quella del calcolo, che vuole tavole d'addizione e di moltiplicazione semplici e quindi basi piccole (gli elaboratori elettronici operano in base 2 !).

In un'epoca in cui i problemi del calcolo sono sempre più semplificati dagli elaboratori automatici, il problema della rappresentazione s'impone in misura crescente e non a caso si diffonde la rappresentazione letterale, che corrisponde, sostanzialmente, ad una numerazione in base 24.

Per quanto attiene ai sistemi di misura, si è dell'opinione che una base di numerazione pari almeno a 12 (per le ragioni suaccennate e non certo per certi oziosi discorsi, che spesso si leggono circa presunti problemi di divisibilità !) sarebbe forse più adatta della base 10. Nello stesso tempo, tuttavia, l'ufficiale e generale riconoscimento di cui attualmente gode la base 10 fa dubitare che i vantaggi conseguibili con una modifica di base giustifichino (soprattutto economicamente) gli oneri connessi con l'operazione e pertanto si è dell'avviso che un sistema di misura internazionale non possa concepirsi, oggi, se non come un sistema decimale. Tanto più che il problema della rappresentazione può essere facilitato :

— dall'adozione di unità omogenee, purché coerenti [v.anche ([20])], di valore adatto a specifici campi di attività. Sono ad esempio di uso comune, attualmente, la « tonnellata » coerente col chilogrammo, l'« angstrom » coerente col metro, ecc. Sono del pari usate, però, l'« ora » non coerente col secondo, il « chilowattora » non coerente col joule, ecc. (!) ;

— dal generale riconoscimento di multipli e sottomultipli sistematici, per i quali siano convenzionalmente definiti i simboli ed i « fattori di molteplicità » ([20]).

Su quest'ultimo argomento c'è da osservare che la ragione 100, nella sequenza dei fattori di molteplicità, trova solide radici nell'antichità e — in molti casi — nella consuetudine (ettogrammo, quintale, centimetro, ecc.). Ciò nondimeno, in un moderno sistema di misura, essa porterebbe ad un numero troppo grande di multipli e sottomultipli riconosciuti da denominare e da ricordare, in relazione alla gamma di valori attualmente assai dilatata di molte grandezze fisiche. Perciò la Commissione Elettrotecnica Internazionale del 1936 giustamente ratificò — come pure i successivi Enti normalizzatori — la ragione 1000, che, in considerazione di tutto quanto precede, appare come la soluzione più conveniente.

In tale intesa risultano dunque multipli e sottomultipli fondamentali quelli che rispondono ai fattori di molteplicità

$$10^{3n}$$

con n intero, positivo o negativo e di valore assoluto non superiore a 4. Per ragioni di tradizione è sembrato (e sembra) opportuno mantenere anche (pur sconsigliandoli) i fattori $10^{\frac{1}{2}}$ e $10^{\frac{1}{3}}$.

Al riguardo un'unica critica sembra si possa muovere — di natura formale, ma certamente importante ai fini pratici — a tale strutturazione. Secondo le convenzioni vigenti, i simboli dei predetti multipli e sottomultipli sono quelli riportati nella Tab. I [v. ad es. norma CIM-UNI n. 0002 ([20, 21])] con la precisazione che ogni iniziale debba essere minuscola, tranne che per « mega », « giga », « tera ». Ne consegue che, per quanto concerne i multipli, l'eccezione riguarda 3 dei 4 multipli principali (!) e dei 6 complessivi e, peraltro, il simbolo di « deca » dev'essere

necessariamente costituito da due lettere (ed è l'unico), per evitare confusione con quello di « deci ».

Sarebbe preferibile invece, a parere dello scrivente, una norma che prescrivesse *maiuscoli tutti i simboli dei multipli e minuscoli tutti quelli dei sottomultipli*. Questi

TABELLA I.

Denominazione			Fattore di molteplicità	Simbolo	
				attuale	proposto
SOTTOMULTIPLI	secondari	deci	10^{-1}	d	d
		centi	10^{-2}	c	c
	principali	milli	10^{-3}	m	m
		micro	10^{-6}	μ	μ
		nano	10^{-9}	n	n
		pico	10^{-12}	p	p
MULTIPLI	secondari	deca	10^{+1}	da	D
		etto	10^{+2}	h	H
	principali	chilo	10^{+3}	k	K
		mega	10^{+6}	M	M
		giga	10^{+9}	G	G
		tera	10^{+12}	T	T

ultimi non subirebbero così variazioni, mentre il simbolo di « deca » diventerebbe D, quello di « etto » H (*) e quello di « chilo » K. E ciò con i seguenti vantaggi:

— si eliminerebbero scomode eccezioni e si distinguerebbe chiaramente la classe dei multipli da quella dei sottomultipli;

— si condurrebbe ad un'unica lettera, senza possibilità di equivoci, il simbolo di « deca »;

(*) Non sembra valida, al riguardo, l'eventuale obiezione d'una presunta confusione tra il simbolo H di « etto » e quello dell'unità di induttanza elettromagnetica « henry », come pure tra il simbolo K di « chilo » e quello di « grado Kelvin ». Attualmente, ad es., non risulta che si lamenti confusione tra i simboli m del prefisso « milli » e dell'unità di lunghezza « metro », ben più frequenti dei precedenti.

— il simbolo K (chilo), dalla maggioranza scritto ancora con lettera maiuscola (si pensi ai segnali stradali, ai contachilometri delle vetture, ecc. ...) entrerebbe nella norma, invece di costituire — come attualmente — un frequentissimo esempio di irregolarità.

A questo criterio ci si uniformerà, nel seguito, per le unità del nuovo sistema che verrà proposto.

3. — Unità fondamentali, derivate, primitive, condizionate.

Nell'ambito della meccanica, le *unità fondamentali* sono, come noto, soltanto tre : nel senso che tutte le altre possono dedursi da esse e perciò prendono il nome di *unità derivate*. La scelta delle unità fondamentali può ovviamente essere del tutto arbitraria, purché le unità stesse risultino tra di loro indipendenti.

Giova osservare subito che, in tutti i sistemi di unità di misura finora proposti, la sequenza con cui è stata praticata tale scelta risulta di natura più storica che logica e pertanto non necessariamente aderente alle esigenze razionali dell'attualità scientifica. Ci si è sempre preoccupati, cioè, di definire innanzi tutto l'unità di lunghezza, nell'intento di soddisfare i problemi metrologici della geometria ; poi quella di tempo, allo scopo di risolvere le questioni cinematiche. Infine, quale ultima, si è introdotta la « terza unità » (massa o peso), in considerazione dei problemi dinamici.

Non è difficile intravvedere, in una siffatta impostazione, una strutturazione di concetti improntata ad una logica di tipo squisitamente kantiano, che implicitamente afferma — prima di ogni altro argomento — il dualismo e la contemporanea indipendenza formale delle due categorie sensibili : quella spaziale e quella temporale, entrambe rispondenti — in una tale dinamica del pensiero, che ha certamente precluso una visione più spregiudicata del problema — a concetti primitivi.

All'unità di lunghezza si è così sempre conferito il significato di *unità tipicamente primitiva* : di unità, cioè, da definire come fine a sé stessa, secondo un qualsiasi criterio convenzionale. Con riferimento alle dimensioni umane (il che è discutibile) nacquero nell'antichità il « braccio », il « piede », il « passo », ecc. ... nonché, successivamente, il « pollice » e il « piede » dell'attuale sistema inglese ; con riferimento invece alle dimensioni terrestri (il che, apparentemente più razionale, è — come si vedrà — almeno altrettanto discutibile) fu definito il « metro » (*).

(*) Il « metro » fu infatti inizialmente definito come la quarantamilionesima parte della lunghezza del meridiano terrestre ed in conformità con tale definizione fu costruito dall'Accademia Francese delle Scienze, per incarico dell'Assemblea Costituente ai tempi della Rivoluzione, il primo campione convenzionale, successivamente sostituito con il campione di platino-iridio oggi conservato a 0° C nel padiglione di Breteuil a Sèvres. Quest'ultimo risulta, a seguito dei più recenti rilievi geodetici, in difetto dello 0,228‰ rispetto alla primitiva definizione e ad esso pertanto si è convenuto di fare universalmente riferimento, indipendentemente dal predetto legame con le dimensioni terrestri. Per comodità di confronto, il campione internazionale del metro è stato recentemente messo in rapporto con la lunghezza d'onda della radiazione rossa del cadmio.

Del pari, significato primitivo è stato dato alla unità di tempo, dedotta sempre dall'ora solare media, senza alcun rapporto concettuale con la precedente.

Viceversa, la terza unità (massa o peso), sempre in ossequio alla precedente impostazione logica, non ha mai goduto — per quanto risulta — del ruolo di unità primitiva. Nel sistema MKS essa fu ad es. definita — salvo qualche rimaneggiamento numerico — come la massa di 1 dm^3 d'acqua a 4° C (massima densità), mentre nel sistema tecnico essa è il peso del medesimo volume d'acqua nelle stesse condizioni (*).

Conseguentemente quelle di massa o di peso sono *solo apparentemente* unità fondamentali, perché, in realtà, lo sono rispettivamente quelle di densità e di peso specifico. In altre parole si può affermare che, nei predetti sistemi, la terza unità, non più primitiva, è *condizionata* all'esigenza che il valore numerico della densità (o del peso specifico) dell'acqua a 4° C risulti pari a 1000 unità.

Non è chi non veda l'utilità pratica di tale condizione, che, oltre a favorire l'intuizione fisica, consente di operare con numeri comodi nelle calcolazioni tecniche, molto più che se l'unità di massa fosse stata fissata con i criteri adottati per le altre due (ad es. come una frazione della massa dell'uomo medio o del globo terrestre).

Estendendo questo concetto, se si riconoscono i vantaggi che offrono le unità condizionate rispetto alle primitive, non è forse conveniente, nella strutturazione di un nuovo, più efficiente sistema di misura, condizionare a fatti fisici facilmente intuibili e particolarmente importanti per le attività umane tutte le unità fondamentali, lasciandone una sola — ovviamente — quale primitiva ?

4. — Schema esemplificativo di un nuovo sistema di misura delle grandezze meccaniche con un'unica unità primitiva.

In ordine a quanto esposto, le unità fondamentali del sistema perdono il loro significato originario, dovendo soltanto consentire la facile costruzione di campioni di riferimento ; pertanto non v'è alcuna ragione di modificare la terna « lunghezza-massa-tempo », certamente razionale ed ormai universalmente accettata.

Il problema centrale si concretizza invece nella scelta dell'*unica unità primitiva* (sia essa fondamentale o meno), la quale deve rispondere soprattutto ad esigenze di universalità, di intuibilità e di facilità di determinazione ovunque.

La scelta non può ricadere sulla lunghezza o sulla massa, né sulla maggior parte delle grandezze meccaniche. Per le prime due, ad es., qualora si legasse l'unità primitiva alle dimensioni umane si peccherebbe di relativismo (e cadrebbe il requisito

---

(*) Il campione di massa in platino-iridio conservato a 0° C a Sèvres, a suo tempo costruito secondo questi concetti, risulta pertanto affetto, rispetto alla cosiddetta « unità naturale », da un errore connesso allo scostamento del metro convenzionale rispetto alla corrispondente unità naturale : pari precisamente a 27 mg in eccesso.

Il fatto che quale campione di massa si consideri oggi quello convenzionale anziché quello naturale nulla toglie, però, al significato fisico originario dell'unità in parola.

di universalità, a meno di non mantenerlo in forza di una convenzione artificiosa); qualora invece si legasse l'unità primitiva alle dimensioni terrestri (enormi rispetto a quelle dell'uomo !), mancherebbe certamente il beneficio dell'intuizione.

Tra tutte le grandezze fisiche, la più adatta per la scelta dell'unità primitiva è certamente *il tempo*. Esso ammette infatti riferimenti universali, universalmente accettabili perché *umanamente sensibili*; riferimenti, cioè, connessi a fenomeni astronomici (e perciò da tutti ovunque controllabili), che si svolgono in intervalli sufficientemente piccoli perché l'uomo ne possa avere piena coscienza, tanto da uniformare ad essi ogni sua attività. Tali sono l'anno solare e il giorno. Tale è pure l'ora, che — da millenni riconosciuta come la 24ª parte del giorno (*) — si è sempre mostrata un'unità di tempo pienamente valida per le esigenze umane e comoda, quindi, anche agli scopi tecnici, al punto di consigliare di introdurre o mantenere perfino unità non coerenti con i sistemi in uso (kWh, m^3/h, km/h, ecc. ...).

Ai fini della scelta dell'unità di tempo in un razionale sistema di misura delle grandezze fisiche, tuttavia, l'ora appare inaccettabile, perché di valore troppo elevato, nel senso che produrrebbe unità derivate non centrate. Perciò tutti i sistemi vigenti ammettono come unità fondamentale il minuto secondo, che è la 60ª parte del minuto primo: a sua volta 60ª parte dell'ora.

Tale divisione sessagesimale dell'ora, seppure convalidata dalla tradizione, è però estremamente gravosa in un « mondo tecnico decimale »; né — in definitiva — se ne vede una precisa ragione funzionale. Perciò la prima proposta che qui si avanza (benché non originale) è la divisione *centesimale* dell'ora.

Siano dunque il *minuto primo centesimale* la centesima parte dell'ora ed il *minuto secondo centesimale* la centesima parte del precedente: vale a dire la decimillesima parte dell'ora.

Si propone, ancora, di assumere quest'ultimo come unità fondamentale del tempo (u_t) nel sistema di cui si sta esponendo la traccia (**):

$$u_t = 10^{-4} h = 0{,}36\ s\ .$$

Risulterebbe $1\ K\,u_t = \frac{1}{10}\ h$; $1\ Mu_t = 100\ h$; $1\ Gu_t = 100.000\ h$ e troverebbero così posto nel sistema, quali multipli di un'unità fondamentale, valori temporali invero assai usati nella tecnica attuale.

Le altre unità fondamentali saranno, come detto, condizionate.

Per quanto riguarda la lunghezza, una delle condizioni che si potrebbero imporre è, ad esempio, il valore unitario dell'accelerazione di gravità in un punto convenzionale della superficie terrestre. L'unità fondamentale di lunghezza verrebbe

---

(*) L'ora, con tale significato, era infatti adottata fin dai periodi assiro-babilonese, egizio, greco e romano, anche se, a causa di diversi criteri di suddivisione dell'anno solare in giorni, essa non aveva inizialmente valore esattamente costante. Da circa un millennio, però, l'ora ha ormai significato assoluto e non v'è certamente altra unità di misura che possa vantare un più antico ed unanime riconoscimento.

(**) A questa unità di tempo si potrebbe, ad es., dare il nome di *kronos*; però qui non è certo il caso di entrare nel merito delle denominazioni delle unità proposte e si userà pertanto sempre il simbolo u, ponendo a pedice il simbolo della grandezza a cui si riferisce l'unità (v. Tab. II e III).

così definita — in maniera « naturale » — come il doppio dello spazio percorso, a quella latitudine e nell'unità di tempo, da un grave inizialmente fermo che cada nel vuoto, ad un'altitudine prossima a quella del mare.

La scelta predetta potrebbe invero sollevare forti obiezioni per ciò che riguarda in primo luogo l'« assolutezza » e poi l'« universalità » del sistema. Entrambe le obiezioni però cadrebbero una volta che, scelto ai fini metrologici il punto più adatto del geoide a cui fare riferimento, dell'unità di lunghezza derivante fosse costruito un campione, eventualmente rapportato alla lunghezza d'onda d'una certa radiazione d'un certo elemento, che sicuramente non sarebbe difficile reperire.

Per contro, la scelta in discussione permetterebbe di conseguire numerosi vantaggi e principalmente :

— l'aderenza alla coscienza fisica che l'uomo possiede dell'accelerazione di gravità, tale da condurlo a rapportare ad essa tutte le accelerazioni che in qualche modo coinvolgono l'organismo umano (ascensori, veicoli terrestri e spaziali, ecc. ...).

Sono sempre più frequenti i casi, infatti, in cui le accelerazioni vengono oggi misurate in « g », nonostante quest'unità non appartenga *ad alcuno* dei sistemi attualmente accettati. Né giova discutere sulla convenienza di vincolare, in... un'era spaziale, l'unità di lunghezza al « g » della terra, dato che l'uomo, ovunque vada, avrà certamente per millenni la stessa costituzione psicofisiologica ! ;

— l'utilità pratica di esprimere con lo stesso numero, *nel medesimo sistema* — almeno per gli scopi industriali — le masse ed i pesi, nonché le grandezze specifiche : riferite che siano alla massa o al peso (ad es. il volume specifico) (*).

Posto che si accettasse, riconoscendo valide le ragioni esposte, il criterio testé suggerito, si potrebbe ad es. fare riferimento all'accelerazione di gravità alla latitudine di 45° (**) dalla qual cosa risulterebbe :

$$u_l = 9{,}8062\ (0{,}36)^2\ \mathrm{m} = 1{,}270884\ \mathrm{m}\ .$$

La scelta fatta dell'unità di tempo — pur razionale in sé stessa — porterebbe dunque, con la condizione dianzi applicata, ad un'unità di lunghezza certamente accettabile in sede internazionale perché prossima al metro, ma (quel che più conta !) tale che *la sua centesima parte* (1 cu_l) *sarebbe praticamente uguale a mezzo pollice inglese* (v. Tab. II). L'errore tra 2 cu_l e 1 inch sarebbe infatti appena lo 0,6 per mille

(*) Non occorre ricordare come la diversità numerica tra massa e peso in ciascuno degli attuali sistemi sia annosa fonte di continui errori ed equivoci. Si giunge oggi perfino al punto di leggere, in autorevoli trattati, formule... dichiarate valide « nel sistema x » o « nel sistema y », nonostante sia ovvio che una formula (la quale rappresenta l'interpretazione fisica di un fenomeno) è sempre indipendente dal sistema. Uno degli esempi più frequenti è l'espressione della velocità caratteristica adiabatica di un fluido (detta anche semplicemente velocità del suono) :

$$c_s = \sqrt{kpv} \text{ ovvero } c_s = \sqrt{kgpv}$$

nel primo caso (v riferito all'unità di massa) ritenuta valida per il sistema MKS e nel secondo (v riferito all'unità di peso) per il sistema tecnico.

(**) Ove $g = 9{,}8062\ \mathrm{m/s^2}$. Si ricordano, per inciso, i valori di g definiti nelle principali convenzioni : 9,812 m/s (valore di Londra) ; 9,806650 $\mathrm{m/s^2}$ (valore convenzionale della 5ª Conferenza Internazionale del 1913) (7, 21).

e ciò permetterebbe di far entrare nel sistema, quale *sottomultiplo coerente*, il « mezzo pollice », che è oggi, senza dubbio, un'unità di lunghezza tra le più frequenti nel mondo tecnico. E qualora si desiderasse una perfetta coincidenza tra il cu_l ed il mezzo pollice basterebbe ritoccare di poco il valore di riferimento dell'accelerazione di gravità, senza apportare con ciò alcun pregiudizio a quanto precede.

Sulle altre unità geometriche (raccolte nella Tab. II) che derivano dalla precedente scelta non sembrano necessari commenti, salvo a sottolineare la circostanza che l'unità di volume risulta prossima a 2 m^3 (+ 2,58 %), molto comoda nella tecnica; mentre 1 mu_v vale circa 2 litri e rappresenta perciò un compromesso tra il litro ed i galloni americano ed imperiale.

Le unità cinematiche si trovano anch'esse raccolte nella Tab. II, con i relativi coefficienti di conguaglio con quelle del sistema MKS e di altri sistemi, oltre che con diverse unità di uso pratico. Su di esse si può osservare che:

a) l'unità di velocità (pari a circa 12,7 km/h) risulta adattissima per la misura delle velocità dei veicoli umani ed inoltre sembra meglio centrata per tutte le applicazioni, giacché è certamente oggi più frequente misurare velocità superiori che inferiori al m/s;

b) l'unità di velocità angolare sembra del tutto adatta ai fini tecnici (**);

c) l'unità di portata volumetrica sembra adatta alle necessità industriali, essendo 1 Ku_Q pari a poco più di 20 m^3/h.

Per la scelta della terza unità fondamentale (quella di massa) sembra a chi scrive che non si possa seguire criterio migliore di quello adottato nel sistema MKS e cioè di condizionarla al fatto che risulti pari a 1000 il valore numerico della densità dell'acqua a 4° C. Si conseguirebbe così il vantaggio di ottenere un'unità di densità centrata e, nello stesso tempo, *di mantenere inalterati i valori attuali di densità Giorgi di tutte le sostanze*, oltre che (metrologicamente) quelli di peso specifico del sistema tecnico.

Risulta, in tali condizioni:

$$u_m = 2{,}052660 \text{ kg}$$

vale a dire un'unità anch'essa del tutto accettabile ai fini scientifici e tecnici: pari a circa 2 kg e, con ottima approssimazione, a 4,5 libbre (**).

(*) Non si è finora accennato all'unità di misura dell'angolo, nella tacita intesa che, trattandosi di una grandezza in realtà adimensionale, il radiante appare insostituibile. Ai fini di una razionalizzazione numerica dell'angolo giro sembrerebbe tuttavia accettabile la divisione di quest'ultimo in ore, così come si fa per il giorno, secondo una prassi già da secoli impiegata nell'arte nautica. Il grado orario che ne deriva (pari a 15 gradi sessagesimali) è già utile in numerose applicazioni geodetiche, geometriche e trigonometriche; esso potrebbe poi essere diviso in ragione centesimale.

(**) Ci si riferisce, ovviamente, alla libbra « avoir du pois » (correlata al kg dal Weight and Measures Act 1897 - S.R. & O. 1898 n. 411), che costituisce l'unità di massa del sistema ft lb s, in cui l'unità di peso è il « poundal ». Comunque, lo stesso rapporto prossimo a 4,5, per le ragioni predette, viene ad esistere tra u_p e la libbra, quando quest'ultima sia considerata unità di peso del sistema ft lbf s, che ammette quale unità di massa lo « slug ».

TABELLA II.

Grandezza	Simbolo	Equivalenza dell'unità con quella del sistema MKS	Equivalenze dell'unità con quelle di altri sistemi o di pratico impiego
		GRANDEZZE GEOMETRICHE	
lunghezza	l	$1\ u_l = 1{,}270884$ m	$1\ u_l = 4{,}169569$ ft $= 50{,}034683$ in.
area	A	$1\ u_A = 1{,}615144\ m^2$	$1\ u_A = 17{,}385257$ sq.ft.
volume	V	$1\ u_V = 2{,}052660\ m^3$	$1\ u_V = 72{,}489309$ cu.ft.
		GRANDEZZE CINEMATICHE	
tempo	t	$1\ u_t = 0{,}360000$ s	$1\ u_t = 10^{-4}$ h; $1\ K\ u_t = 6$ min $= 1/10$ h
velocità	c	$1\ u_c = 3{,}530232$ m/s	$1\ u_c = 12{,}708835$ km/h $= 7{,}896909$ miglia/h
velocità ang.	ω	$1\ u_\omega = 2{,}777778$ rad/s	$1\ u_\omega = 26{,}525764$ giri/min
accelerazione	a	$1\ u_a = 9{,}806200\ m/s^2$	$1\ u_a = 1''\ g''$
accelerazione ang.	α	$1\ u_\alpha = 7{,}716050\ rad/s^2$	
portata volum.	Q	$1\ u_Q = 5{,}701835\ m^3/s$	$1\ u_Q = 0{,}342110 \cdot 10^3\ m^3/min =$ $= 0{,}342110 \cdot 10^6$ l/min $= 20.526{,}6\ m^3/h$
		GRANDEZZE DINAMICHE	
massa	m	$1\ u_m = 2{,}052660$ kg	$1\ u_m = 4{,}525341$ lb
momento d'inerzia di massa	y	$1\ u_y = 3{,}315344\ kg\ m^2$	$1\ u_y = 78{,}674221$ lb.sq.ft.
densità	ρ	$1\ u_\rho = 1\ kg/m^3$	
portata massica	M	$1\ u_M = 5{,}701835$ kg/s	
forza (o peso)	F	$1\ u_F = 20{,}129727$ N	$1\ u_F = 2{,}052660$ kp $= 4{,}525341\ lb_f$
peso specifico	γ	$1\ u_\gamma = 9{,}806650\ N/m^3$	$1\ u_\gamma = 1\ kp/m^3$
portata in peso	G	$1\ u_G = 55{,}915908$ N/s	$1\ u_G = 5{,}701836$ kp/s
pressione	p	$1\ u_p = 12{,}46311\ N/m^2$	$1\ u_p = 1{,}270884\ kp/m^2$; $1\ ku_p = 93{,}473362$ Torr
momento di forza	$\mathfrak{M}$	$1\ u_{\mathfrak{M}} = 25{,}58253$ Nm	$1\ u_{\mathfrak{M}} = 2{,}608692$ kpm; $1\ u_{\mathfrak{M}} = 2{,}677724\ \frac{kW}{1000\ giri/min}$
lavoro	L	$1\ u_L = 25{,}58253$ J	$1\ u_L = 2{,}608692$ kpm; $1\ M_{u_L} = 9{,}661825$ cvh $= 7{,}106261$ kWh
potenza	P	$1\ u_P = 71{,}062606$ W	$1\ u_P = 7{,}246369$ kpm/s $= 0{,}09661825$ cv $\simeq$ $\simeq 0{,}1$ cv

Sulle unità dinamiche che ne derivano (v. Tab. II) si possono fare i seguenti commenti:

d) l'unità di densità risulta pari — per definizione — a quella del sistema MKS ed all'unità di peso specifico del sistema tecnico, con i vantaggi già accennati;

e) l'unità di portata massica appare del tutto centrata, come pure — ovviamente — quella della portata in peso;

f) l'unità di forza, pari a circa 2 kp, è adattissima ai fini pratici (nella tecnica attuale è infatti più usato il daN, prossimo al kp, che il N); i valori dei pesi, per le condizioni poste, eguagliano metrologicamente quelli delle masse. L'unità di pressione resta prossima al kp/m^2;

g) l'unità di lavoro risulta notevolmente più grande del « joule » (circa 25 volte) e questo è da ritenersi un fattore positivo, almeno ai fini tecnici; lo stesso può dirsi dell'unità di potenza, che è pari a circa 71 watt. È anche comodo che u_P risulti *dell'ordine di grandezza di un decimo di cv* (scostamento del 3,4 %) e cioè pari a quella che, nella tecnica, viene considerata la « potenza umana » in esercizio continuativo e che si assume a base dei calcoli, ad es., per il progetto dei meccanismi azionati a mano.

5. — Estensione del sistema alla termotecnica ed alla elettrotecnica.

Come è noto, ogni sistema di misura meccanico si estende alla termotecnica ed all'elettrotecnica introducendo in ciascun caso una quarta unità fondamentale, che, per gli attuali sistemi inizialmente ricordati, sono rispettivamente quelle di temperatura e di resistenza o di intensità di corrente elettrica (*).

L'unità di temperatura è stata sempre assunta finora come unità primitiva e con criteri non certo uniformi da parte del mondo scientifico, il quale — abbandonata praticamente ormai la scala ottantigrada di Réamur — impiega il grado Celsius e quello Fahrenheit, con una certa prevalenza del secondo, anche se i più sono d'accordo sull'utilità di servirsi del primo.

In conformità con i principi esposti, volendo estendere alla termotecnica il sistema di cui si è indicata la traccia, conviene rendere condizionata anche l'unità

(*) La questione non è in verità così semplicista, ma poiché in questa sede ci si propone soltanto di tracciare le linee fondamentali di un sistema, si trascurano le sottigliezze che raffinati studiosi hanno sollevato in merito all'estensione di un sistema meccanico al campo della termotecnica e dell'elettrotecnica.

Così, si rinuncia alla discussa possibilità di evitare l'introduzione di una quarta unità per la termotecnica, rendendo adimensionale la costante universale dei gas oppure la costante di Boltzmann, nella convinzione che l'introduzione dell'unità di temperatura, anche se non rigorosamente necessaria (ma ciò — come detto — è opinabile !) è certamente comoda.

Per quanto riguarda l'elettrotecnica, non si entra nemmeno nel merito delle definizioni di unità fondamentali assolute o internazionali, razionalizzate o meno, né si contempla l'eventualità di dimensionare, in modo primitivo, la permeabilità o la permittività.

Non si prende qui in considerazione, infine, il campo della fotometria.

di temperatura e sembra che non vi possa essere scelta migliore di imporre che il calore specifico dell'acqua (per es. in istato di densità massima) abbia valore unitario, o meglio — per ottenere un'unità più centrata — valore 100.

Deve essere, per ciò:

$$100 \frac{u_L}{u_m \, u_T} = 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$$

da cui:

$$u_T = 0{,}2977 \, ^\circ\text{C} = 0{,}5358 \, ^\circ\text{F} \, .$$

L'unità di temperatura così ottenuta sembra di grandezza adatta ai fini scientifici e tecnici. Appare anche logico assumere lo zero della scala allo zero assoluto (— 273,16 °C), cosicché lo zero Celsius risulterebbe a 917,43 u_T ed 1 Ku_T corrisponderebbe a 24,58 °C: cioè ad un valore adattissimo ad essere industrialmente assunto come valore « tipo » di riferimento (gli attuali sono appunto di quest'ordine di grandezza).

Non occorre sottolineare i vantaggi della scelta di cui sopra: vantaggi che si riassumono principalmente nell'ottenimento di valori comodi dei calori specifici e delle entropie specifiche (perché calcolabili moltiplicando per 100 quelli attuali espressi in kcal/kg °C), nella circostanza che — come detto — la temperatura ambiente risulterebbe prossima a 1000 unità, nel fatto che l'unità di temperatura sarebbe notevolmente inferiore al °C, che in verità è troppo grande per molte esigenze.

Senza spendere ulteriori parole sulla estensione del sistema alla termotecnica, conviene accennare ai problemi che si presentano nel campo dell'elettrotecnica, laddove le attuali unità del sistema Giorgi sono — salvo qualche riserva per i fenomeni elettromagnetici — quasi universalmente accettate, nonostante molte di esse non si possano dire del tutto centrate (farad. weber/m², ecc. ...).

La quarta unità, dopo le negative esperienze degli incongruenti sistemi C.G.S. elettrostatico ed elettromagnetico, è stata giustamente ricercata, nell'ultimo sessantennio, nella terna di grandezze: tensione, intensità di corrente, resistenza. Il successo delle ultime due — e soprattutto della seconda — è dovuto alla facilità di definizione. Oggi, nel sistema MKSA, ovvero S.I. — il più ben visto dai tecnici — la quarta unità è l'ampère, definito però in maniera condizionata, scarsamente significativa (*). Le unità che ne derivano (volt, ohm, ecc. ...) sono tuttavia ormai così radicate nella tecnica, da consigliare la scelta di una nuova « quarta unità » capace di alterare il meno possibile — compatibilmente con le scelte fatte in precedenza — l'attuale edificio metrologico.

(*) A seguito delle decisioni prese nei Congressi di Chicago (1893), St. Louis (1904), Berlino (1905), Londra (1908), Washington (1910), l'ampère internazionale risulta definito come l'intensità di corrente che, attraversando una soluzione di nitrato d'argento, in particolari condizioni, deposita 1,11800 mg di Ag per secondo.

La vera unità primitiva risulta però, da tale definizione, quella della quantità di elettricità e non occorre sottolineare l'assenza di significato applicativo della convenzione. In maniera egualmente insignificante, ai fini tecnici, venne definito, nelle predette Conferenze di St. Louis e di Berlino, l'ohm internazionale, quale unità di resistenza elettrica.

L'inconveniente che buona parte delle esistenti unità elettrotecniche sono poco centrate deriva indubbiamente dal fatto che il « secondo » è un'unità di tempo troppo grande e l'« ohm » e il « volt » sono unità, rispettivamente di resistenza e di tensione, troppo piccole. Il minor valore di u_t rispetto al « secondo » contribuisce già ad alleggerire il problema, ma la soluzione spetta alla scelta di unità decisamente più grandi per le ultime grandezze testé menzionate.

Sembra a chi scrive che la strada più conveniente (per quanto certamente opinabile) sia di imporre un'unità di tensione $u_v = 100$ V. Si conseguirebbe così il vantaggio di avere il « volt » quale sottomultiplo di u_v e, nello stesso tempo, di portare a valori prossimi ad 1 le tensioni con le quali l'uomo, nella sua vita d'ogni giorno, ha continua dimestichezza.

L'unità di intensità di corrente, inoltre, resterebbe dell'ordine di grandezza dell'ampère ($1\ u_I = 0{,}710626$ A) e potrebbe essere assunta ancora quale unità fondamentale con criteri analoghi a quelli attuali, sempre che non si preferisca — e sarebbe certamente meglio — elevare ad unità fondamentale quella della carica elettrica. L'unità u_R di resistenza risulterebbe pari a circa 141 Ω, con l'evidente vantaggio di essere così più centrata per le applicazioni tecniche.

Le principali unità elettriche ed elettromagnetiche derivate sono raccolte, con le corrispondenti equivalenze, nella Tab. III. Salvo quelle di flusso e di densità di

TABELLA III.

Grandezza	Simbolo	Equivalenza dell'unità con quella del sistema MKSA
Resistenza	R	$1\ u_R = 140{,}72098\ \Omega$
Tensione (d.d.p.)	V	$1\ u_v = 100$ V
Intensità di corrente	I	$1\ u_I = 0{,}71062606$ A
Carica elettrica	q	$1\ u_q = 0{,}255825$ C
Intensità di campo magnetico	H	$1\ u_H = 0{,}55159$ A/m
Flusso	Φ	$1\ u_\Phi = 36$ Wb
Densità di flusso	B	$1\ u_B = 22{,}289023$ Wb/m²
Induttanza	L	$1\ u_L = 50{,}659555$ H
Capacità	C	$1\ u_C = 2{,}558254 \cdot 10^{-3}$ F

flusso, anch'esse appaiono meglio centrate delle attuali: soprattutto quella di capacità, che risulta pari a circa 2/1000 del « farad ».

6. — Conclusioni.

Nelle pagine che precedono si é voluto tracciare l'esempio di un sistema di unità di misura ottenuto partendo dal principio, inizialmente enunciato, che afferma la razionalità e l'utilità di accettare *un'unica unità fondamentale con definizione primitiva* e di condizionare le altre a fatti fisici di facile intuizione e di indiscussa importanza per le attività umane.

Quale unità primitiva è stata assunta quella di tempo e sembra che al riguardo non si possano sollevare forti obiezioni. Le condizioni per ottenere le rimanenti unità derivano poi da scelte che sono certamente opinabili, ma alle quali, in verità, non si intende attribuire soverchia importanza, bensì soltanto — come si diceva — significato esemplificativo. È scontato, infatti, che con eventuali scelte più felici si possano ottenere sistemi di unità meglio rispondenti ai fini che si desiderano.

Quel che preme è piuttosto richiamare l'attenzione sul principio informatore dianzi richiamato, che si pensa meriti d'esser preso in considerazione per il fatto evidente che al ridursi del numero delle unità « primitive » d'un sistema, aumenta necessariamente quello delle unità « condizionate » e con esso la « versatilità » del sistema, vale a dire la possibilità di adattarlo meglio alle esigenze umane.

È indiscusso che l'applicazione del precedente concetto, quale che ne sia la forma, conduce ad una sostanziale modifica della maggior parte delle unità di misura dei sistemi oggi impiegati, i quali accettano tutti *due* unità fondamentali con definizione primitiva anziché una. Ciò, scendendo sul terreno pratico, desta logicamente in chiunque un giustificato scetticismo sulla effettiva convenienza di introdurre un sistema come quello testé esposto, malgrado la sua razionalità ed i numerosi pregi già messi in luce.

Sta di fatto tuttavia che, come detto all'inizio, il mondo anglosassone, il quale vanta una produzione industriale certamente maggiore dei paesi con mentalità metrica, è venuto nella determinazione di modificare il proprio sistema di misura, perché lo ritiene inadatto alle attuali esigenze scientifiche ed industriali. Lo stesso Lord Kelvin definì infatti il sistema inglese « absurd, ridicolous, time-wasting, brain-destroying» (!) ([12]) e si leggono nei trattati britannici frasi come quella che qui si riproduce ([14]): « To express quantitative relations exclusively in the English units is to conceal their meaning, to a great extent, from all but English speaking peoples; and also to discredit them scientifically, by implications ». Il parlamento britannico ha preso in considerazione fin dal lontano 1864 il problema della trasformazione del sistema di misura e successivamente nel 1868 ed ai primi del 1900; poi nel 1948 ed in epoca recentissima, in forma decisamente positiva. Alcuni valutano il costo della trasformazione in oltre 40.000 milioni di sterline.

In queste circostanze, è logico far convergere tutto il mondo tecnico, deciso a così radicali trasformazioni, verso un sistema (MKS), adottato — in definitiva —

da una sia pur qualificata minoranza, ma certamente in molti versi manchevole, per il solo beneficio della sua esistenza ? Non sarebbe preferibile, per ragioni psicologiche, oltre che scientifiche e tecniche, studiare e portare alla dignità di « sistema internazionale » — con un sacrificio economico relativamente non molto più elevato ed *equidistribuito* — una nuova struttura metrologica decimale, diversa, più razionale e più soddisfacente di tutte quelle attuali ?

Roma - Facoltà di Ingegneria dell'Università - Gennaio 1968.

BIBLIOGRAFIA

(1) M. Denis Papin e J. Vallot, Métrologie Générale. Ed. Dunod, Paris.

(2) O. Vocca, Un vecchio argomento sempre attuale : Unità e sistemi di unità di misura, Istituto Tecnico, n. 1, 1964.

(3) R. Glazebrook, Standards of Measurement : their history and development. Supplemento a Nature, n. 3218, 4 luglio 1931.

(4) R. W. Smith, The federal basis for weights and measures. National Bureau of Standard, Circ. n. 593, 1958.

(5) G. Falchi, Il sistema metrico. Traduzione integrale dell'editoriale apparso nel fascicolo del 30-9-1949 di « Engineering », pubbl. nella Rassegna Tecnica e bibliografica del « Bollettino Sardo degli Ingegneri », 1950.

(6) A. Ferraro, Piccolo dizionario di metrologia generale. Ed. Zanichelli, Bologna.

(7) Ministero della Difesa - Aeronautica (Dir. Gen. Costruzioni ed Approvvigionamenti ; Divisione Studi), Sistemi ed unità di misura delle grandezze fisiche, Ed. Min. della Difesa, Roma.

(8) A. Ferry, Grandeurs et Unités. Exposé critique des principaux systèmes - Système Giorgi. Ed. Gautier Villar, Paris.

(9) A. Querques, Sistemi ed unità di misura. Sistema Giorgi. Ed. Hoepli, Milano.

(10) J. Wennengerg, Il sistema Giorgi di unità di misura. Ed. Studium Urbis, Roma.

(11) E. Bodea, Giorgis rationels MKS-Mass - System mit Dimensioskohärenz. Ed. Verlag Birkhäuser, Basel.

(12) V. M. Faires, Applied Thermodynamics. Ed. The MacMillan Co., New York.

(13) C. Rimini, Elementi di elettrotecnica generale. Ed. Zanichelli, Bologna.

(14) F. F. Fowle, Electrical Engineers Handbook. Ed. Mc Graw Hill, New York.

(15) G. Giorgi, Dati e valori per la fisica e l'elettromagnetismo. Ed. S.E.I., Torino.

(16) G. Giorgi, Grandezze e Unità elettriche. Ed. R. Accademia d'Italia, Roma.

(17) J. Sudria, Les Unités électriques. Ed. Librarie Unibert, Paris.

(18) G. Foddis, Il sistema Giorgi di unità di misura elettriche e magnetiche. Ed. Istituto Poligrafico dello Stato, Roma.

(19) P. Cornelius, L'électricité selon le système Giorgi rationalisé. Ed. Dunod, Paris.

(20) Norme U.N.I. - C.I.M., Unità fisiche fondamentali, principali e derivate ; progr. da 0001 a 0046. Ed. U.N.I., Milano.

(21) Norme U.N.I.-C.T.I., Unità di misura e simboli per le grandezze fisiche. Ed. U.N.I., Milano.

(22) E. Perucca e G. Albenga, Dizionario d'Ingegneria. Ed. U.T.E.T., Torino.

(23) E. Giovene, Tabelle per conversione di misure. Ed. Hoepli, Milano.