



Paolo Agnoli
**STORIA DEL SISTEMA
METRICO DECIMALE**

APRILE 2003 - SxT Scaffali N°1



INDICE

	Pagina
INTRODUZIONE	3
1. CHE COSA SIGNIFICA MISURARE?	4
2. DAI PRIMI SEGNI AL SISTEMA METRICO	6
2.1 Gli inizi: il numero come misura	7
2.2 I Greci e i Romani	10
2.3 Medioevo e Rinascimento	13
2.4 Il Seicento e l'osservazione <i>accurata</i>	14
2.5 Il Settecento e la nascita del <i>sistema metrico decimale</i>	15
2.6 L'Ottocento, il Novecento e la normalizzazione delle tecnologie	20
BIBLIOGRAFIA	24

INTRODUZIONE

L'obiettivo di questo scritto è quello di introdurre criticamente il significato delle *misure*, presentando brevemente il processo storico che ha portato alla formazione dei concetti e delle consuetudini metrologiche attuali, con particolare riferimento alla nascita del sistema metrico decimale.

Le misure, fatto di cui tutti dovremmo avere consapevolezza, sono fondamentali non solo in ambito scientifico ma nei processi produttivi di qualsiasi tipo, nelle questioni medico-sanitarie, nello sport, nei problemi di natura giuridica, finanziaria e commerciale. Misurare è un atto sociale di primaria importanza: dipendiamo dalle misurazioni e usiamo gli strumenti di misura quando facciamo la spesa al mercato, compriamo servizi da strutture private o pubbliche, guidiamo la macchina, etc.... Di fatto, tutti gli aspetti della nostra vita coinvolgono delle attività di misurazione che, nella maggior parte dei casi, compiamo senza rendercene conto.

La metodologia della misura come la intendiamo attualmente è stata sviluppata in un periodo relativamente recente. Una delle prime definizioni teoriche di misura la possiamo ritrovare proprio nell'*Enciclopedia* di Diderot e d'Alembert dove, alla voce "misurare", si può leggere: *nella sua accezione matematica il termine significa prendere una certa quantità ed esprimere i rapporti che tutte le altre quantità dello stesso genere hanno con la prima*. Tuttavia metodi primitivi di misurazione sono stati sin dall' antichità alla base della capacità dell'uomo di interagire e soprattutto di *incidere sul mondo circostante*. Si può dire che da sempre la misura è stato uno dei procedimenti della vita quotidiana necessari alla sopravvivenza e alle relazioni sociali. L'utilizzo delle provviste, il raccolto, la caccia, il baratto, la definizione del suolo da coltivare, etc..., sono tutte attività in cui è facile ritrovare la necessità di misurare.

Sin dagli albori gli uomini hanno dovuto affrontare problemi pratici, a cominciare dal più importante di tutti: rimanere vivi. Gli stessi organismi viventi, nella loro grande diversità, sono soluzioni differenti al problema di sopravvivere in un ambiente che cambia.

Come afferma il fisico e divulgatore scientifico Alan Cromer:

E' la produzione di utensili, piuttosto che il bipedismo, a distinguere gli esseri umani dagli animali.[...]Un'attività così complessa come la manifattura di utensili, che deve essere tramandata di generazione in generazione, richiede come condizione preliminare lo sviluppo di una caratteristica distintiva dell'uomo ancora più fondamentale: la cultura. (Cromer, 1993, 67)

Ma cosa si deve intendere qui, in prima istanza, per *cultura*? La comune premessa a tutti i differenti sforzi creativi dell'uomo è stata sempre quella di *osservare il mondo circostante e conservare e gestire le informazioni considerate pertinenti allo scopo prefissato*.

La metodologia della misura, oltre ad un'ovvia importanza pratica, presenta quindi implicazioni concettualmente fondamentali nei processi conoscitivi. Il processo attraverso cui si sono formati i concetti sulle misure è una componente molto importante dell'evoluzione delle rappresentazioni umane del mondo, della formazione dei sistemi di classificazione e dei concetti astratti.

Forse non è inutile ricordare che in greco *logos* significa anche proporzione, *legge dei rapporti*. Ed è la ricerca di queste leggi che apre alla misura, *ovvero alla sapienza*. La proporzione, la misura del visibile apre per i Greci, se così posso dire, alla misura dello spirito.

Si può quindi davvero affermare con il sociologo Kula che:

La nozione di misura, il modo di intenderla, perfino la sua concreta grandezza, sono tutte categorie fondamentali del pensiero umano. (Kula, 1987, 268)

All'interno del percorso storico ho cercato di sottolineare *l'importanza dell'avvento del sistema metrico decimale*. Sono sempre rimasto sorpreso nello scoprire quante persone decisamente istruite, e perfino scienziati di professione, sottovalutino tale evento o addirittura ignorino come la nascita di tale sistema sia storicamente legata all'avvento del movimento e della cultura illuministi. Già prima di essere adottato in Francia, il sistema metrico fu visto come una futura istituzione internazionale: ci si riprometteva - e il tempo sta confermando questa speranza - di farlo accettare in tutti i paesi del mondo. Doveva essere, secondo il linguaggio tipico della Rivoluzione francese, un sistema di misure "à tous les temps, à tous les peuples" (per tutti i tempi, per tutti i popoli).

Condorcet continuò a considerare come principale obiettivo della riforma la sua universalità: a suo parere, cioè, la riforma non doveva avere alcun carattere particolare o nazionale specificatamente francese, così da poter essere accettata dal mondo intero. Proprio per questa ragione le misure dovevano essere «prese dalla natura»: questa, infatti, specie per i filosofi dell'Illuminismo, era comune a tutti i popoli e ne costituiva l'elemento unificante. (ivi, 282)

L'eterogeneità delle misure e dei metodi di misurazione, che esiste fin da quando gli uomini hanno iniziato a misurare, ha da sempre lasciato campo libero alle controversie. Perciò il potere, che di volta in volta, nel particolare sistema di forze vigenti, abbia conquistato il diritto di stabilire e controllare le misure, viene a trovarsi nella posizione privilegiata per rivestire i panni di arbitro assoluto.

«Un re, una legge, un peso e una misura!», gridavano i contadini alla vigilia della Rivoluzione in tutta la Francia. Gridavano spinti da aspirazioni e sogni riformisti e patriottici. Unificando le istituzioni, volevano nient'altro che libertà, uguaglianza e fraternità. (ivi, 301)

Ma come mai un sistema per la prima volta realmente universale cominciò ad affermarsi solo con l'avvento della Rivoluzione?

Molti studiosi ritengono plausibile l'ipotesi che l'unificazione degli standard metrologici abbia iniziato ad avere successo in una fase storica in cui tale unificazione era ormai divenuta auspicabile e compatibile rispetto a quegli ideali di *universalità* e di *razionalità economica* che hanno così fortemente caratterizzato la nascita della società moderna. In altre parole è postulabile che il processo di standardizzazione delle misure sia fortemente legato tanto allo spirito e ai valori del capitalismo moderno quanto alla sua storica affermazione nel mondo occidentale, che ci ha accompagnato fino al processo di globalizzazione economica in atto.

Credo che anche nel compito che mi sono prefissato in questo lavoro si possa quindi *misurare* quanto la Storia della Scienza debba non solo tener conto del contenuto puramente scientifico del problema che affronta, ma debba anche prestare attenzione agli aspetti filosofici, sociali, politici che ad esso sono legati e che permettono di coglierne tutta la complessità.

1. CHE COSA SIGNIFICA MISURARE?

Prima di affrontare direttamente il processo storico che ha portato agli attuali sistemi di misura, cercherò ora di discutere il concetto stesso di misura. Com'è stato rilevato, il termine misura copre innumerevoli campi d'attività. In un senso molto generale potremmo dare (vedi Campbell 1957, Mandel 1964, Toulmin, 1960) la seguente definizione: *la misura è l'assegnazione di numerali per rappresentare delle proprietà*. In un senso più ristretto, qui tratterò principalmente *il concetto di misura nelle scienze fisiche*, comprendendo in questa categoria, in ogni caso, le applicazioni tecnologiche della fisica e i vari campi d'ingegneria. Normalmente con l'espressione "fenomeno fisico" si suole indicare qualsiasi oggetto, fatto o avvenimento esterno percepito o osservato direttamente, oppure per mezzo di dispositivi particolari. Più precisamente

un *fenomeno* è una variazione dello stato di cose che ci circonda e che i nostri sensi, o direttamente o per mezzo di strumenti, ci permettono di *osservare*; è quindi una *transizione* da uno stato diciamo *A* a uno *B* in qualche cosa diverso da *A*. (Bernardini, 1974, 4)

Si suole anche partire dal presupposto che la conoscenza della natura, cioè del mondo esterno, possa essere oggettiva, ovvero indipendente dalla persona che la acquisisce.

Che i metodi per conseguire la conoscenza debbano avere questo carattere di oggettività discende da un postulato fondamentale dell'indagine scientifica (postulato di invarianza spazio-temporale) che afferma che i fenomeni naturali sono indipendenti, a parità di condizioni, dal luogo e dal momento in cui vengono osservati. E quindi un'esperienza correttamente eseguita e descritta oggi, deve poter esser domani sempre riproducibile e dare sempre, nei limiti degli errori di osservazione, lo stesso risultato.

Presupporre questa *oggettività* non è certamente scontato: basti pensare che l'osservatore è parte attiva nel processo conoscitivo, *con tutto il suo complesso di informazioni preesistenti* perché derivanti da esperienze precedenti. Inoltre, si può evidentemente supporre che l'osservazione della realtà modifichi la realtà stessa, come anche che l'acquisizione di una mole sufficiente di informazioni richieda del tempo, e non è certo detto che, mentre si svolge questa indagine, tutto rimanga perfettamente costante.

Relativamente allo scopo di questo scritto, prendiamo comunque per buono questo presupposto.

Si può schematizzare allora, anche se in prima approssimazione, la metodologia della Fisica nel modo seguente:

- è necessario inizialmente individuare o definire il fenomeno che si vuole studiare;
- questo risulta descritto da un certo numero di sue caratteristiche, dette *grandezze fisiche* (p.e. lunghezza, massa, tempo, forza, velocità, densità, temperatura, carica elettrica), ognuna delle quali deve potersi valutare quantitativamente per mezzo di operazioni di confronto con una grandezza ad essa omogenea, assunta come unitaria. Tali operazioni di confronto si chiamano *operazioni di misura* ed i risultati ottenuti si dicono *misure*. Per definire un dato fenomeno, quindi, occorre anche individuare le grandezze necessarie a descriverlo;
- le misure effettuate, opportunamente elaborate, forniscono le informazioni mediante le quali si possono determinare le modalità con cui ogni grandezza, nell'ambito di quel fenomeno, è legata alle altre;
- in questo modo si giunge a determinare le relazioni esistenti fra le grandezze che intervengono in modo essenziale in un fenomeno, stabilendo fra esse dei rapporti, quantitativi, di causa ed effetto. Quando queste relazioni sono legittimamente estendibili a tutta una classe di fenomeni (per es. alla generica caduta di un grave) si enunciano in forma generale e si dicono *leggi*.

Va inoltre sottolineato (anche se in questo lavoro non approfondirò questo tema) che *qualsiasi operazione di misura implica un certo grado di incertezza del suo risultato.*

Saper valutare correttamente l'incertezza di misura è essenziale sia in campo scientifico, per fissare i limiti di validità delle teorie con cui si descrivono i fenomeni naturali, sia in campo tecnologico, per asserire il grado di affidabilità di prodotti e procedure (vedi per esempio Agnoli et al., 1993).

Occorre ora approfondire alcuni dei concetti introdotti, iniziando con il definire in maniera univoca il concetto di "grandezza fisica".

Una "grandezza fisica" può essere definita come una caratteristica misurabile di un sistema, completamente individuata dal risultato di una ben determinata operazione di misura. Il complesso delle operazioni da eseguire per effettuare una misura si chiama *operazione metrica*. Va forse ricordato che il nome metro deriva dal greco *metron*, latino *metrum* = misura (in senso generale, non specificatamente di lunghezza). La *metrologia* è appunto la scienza della misura. Quanto è stato finora detto sta a significare che una grandezza si definisce tramite l'insieme di regole atte a misurarla.

Cominciamo col considerare un tipo di misura, non sempre possibile, che chiamiamo *misura diretta*. Una misura diretta è un'operazione che si effettua confrontando la grandezza da misurare con un'altra grandezza ad essa *omogenea*, presa come *campione*; misurare una grandezza significa cioè trovare un numero che dica quante volte tale grandezza è più grande o più piccola del campione. Può rivestire un certo interesse ricordare che una delle prime definizioni teoriche di misura la possiamo ritrovare proprio nell'*Enciclopedia* di Diderot e d'Alembert dove, alla voce "misurare", si può leggere: *nella sua accezione matematica il termine significa prendere una certa quantità ed esprimere i rapporti che tutte le altre quantità dello stesso genere hanno con la prima.*

Analizziamo questa definizione: innanzi tutto si deve considerare presupposta, per grandezze soggette ad essere misurate direttamente, la definizione operativa di confronto (uguaglianza o disuguaglianza) e somma. In secondo luogo, va precisato il significato di grandezze fisiche omogenee. Sono omogenee quelle grandezze che possono essere misurate attraverso *lo stesso tipo di operazioni e con le medesime regole*; ciò evidentemente significa che sono definite allo stesso modo.

Infine va scelto il campione con cui confrontare le grandezze ad esso omogenee. La scelta è completamente arbitraria, purché soddisfi ad alcuni requisiti di carattere pratico. In definitiva, misurare una grandezza significa associare ad essa un numero che, riferito a un ben precisato campione, cioè a una ben precisata *unità di misura*, ne fornisce il valore. Ciò vale in generale e non solo per le misure dirette prima definite. Per le misure direttamente ottenibili per confronto, cioè le misure dirette, tale numero rappresenta il rapporto tra il valore della grandezza in esame e quello, assunto come unitario, del campione. Per mettersi in grado di eseguire correttamente una misura, il significato astratto di misura come rapporto va precisato nella seguente maniera: fissato il campione, il confronto con esso fornisce due numeri che delimitano l'intervallo entro cui è compreso il valore della grandezza che stiamo misurando. Come già detto non mi soffermerò su questo punto. In maniera intuitiva, comunque, possiamo dire che il risultato della misura è tanto più preciso quanto più è piccolo tale intervallo. Per comodità si usa introdurre multipli e sottomultipli dell'unità di misura, fino ad avere unità arbitrariamente grandi ed arbitrariamente piccole, purché operativamente definibili. Per operativamente definibili si intende semplicemente, qui e sempre, misurabili. Le precedenti considerazioni sono un tipico

esempio del carattere operativo che viene attribuito ai concetti della Fisica. Le grandezze fisiche non vengono definite in termini di proprietà astratte, bensì in modo concreto: la definizione di ogni singola grandezza fisica consiste nell'enunciazione dettagliata delle operazioni che consentono di misurarla.

Per questo le definizioni delle grandezze fisiche sono *definizioni operative*. In Fisica non è importante tanto chiedersi "che cos'è?", quanto "come si misura?".

2. DAI PRIMI SEGNI AL SISTEMA METRICO

Le unità di misura e i relativi campioni di cui oggi uno scienziato o un tecnico dispongono per poter esprimere i risultati relativi alle osservazioni di un qualsiasi fenomeno sono il frutto di un lungo e faticoso lavoro, di cui non sempre ci si rende conto. Diversi sono stati, infatti, i problemi che gli studiosi hanno dovuto affrontare e superare per giungere ad ottenere quel sistema di cui oggi tutti disponiamo. Primo fra tutti *la scelta di un numero adeguato di grandezze fisiche indipendenti* da assumere come *fondamentali* e dalle quali poter derivare tutte le altre cosiddette *grandezze derivate*. Alla scelta di tali grandezze, fondamentali per la descrizione di un qualsivoglia fenomeno, ha fatto seguito la necessità di dover adottare un opportuno *sistema di unità di misura*, che permettesse la misurazione delle grandezze in gioco. L'ultimo ma non meno importante problema è stato quello relativo *all'istituzione e costruzione di campioni rappresentativi* delle unità di misura scelte, in modo tale da poter disporre di un riferimento attendibile, preciso e controllabile in ogni momento. Il righello di uno studente, il metro di una sarta o i pesi da 1 kg delle bilance a piatti sono tutti esempi di copie più o meno precise di alcuni dei suddetti campioni. In questo modo è facile comprendere l'importanza rivestita dalle unità di misura e dai loro campioni anche in ambiti diversi da quello puramente scientifico di ricerca, quali ad esempio quello industriale o commerciale.

Il processo storico che ha portato infine alla scelta di un sistema internazionale di misura è stato davvero lungo e complesso. In questo capitolo voglio così accennare, brevemente e davvero a grandi linee, ad alcune delle tappe culturali più importanti che hanno reso possibile tale standardizzazione certamente, ed inevitabilmente, non conclusa.

2.1 Gli inizi: il numero come misura

I numeri hanno esercitato il loro fascino sin dall'alba della civilizzazione, ed una grande parte della prima preistoria della scienza e della tecnologia può essere riassunta nella scoperta, da parte di diverse civiltà, di ciò che oggi chiamiamo numeri.

Pitagora scoprì, già nel VI secolo a.C., che l'armonia musicale dipendeva da rapporti di piccoli numeri interi e concluse che ogni cosa nell'universo era Numero. *"Tutte le cose che si conoscono hanno numero; senza questo non sarebbe possibile pensare, né conoscere nulla."* Ma la nascita della matematica (vedi per esempio Menninger, 1969), pur tenendo ben presente che il problema della natura dei relativi concetti è sicuramente dibattuto, si può far risalire almeno in larga parte a problemi pratici di vita quotidiana.

La nascita dei numeri come concetto astratto è un processo che si sviluppa gradualmente, parallelamente all'evoluzione della specie umana ed ai suoi rapporti con l'ambiente circostante.

E' durante la fase del Paleolitico superiore (da 40000 fino a 12000 anni fa) che i progressi tecnologici iniziano ad influenzare decisamente la sfera intellettuale e spirituale. Ed è appunto in questo periodo che si sviluppò dapprima la capacità degli esseri umani di tipo moderno di elaborare sistemi di segni: in un'epoca in cui procacciarsi il cibo iniziò a non essere più un problema di sopravvivenza fu possibile lo sviluppo delle attività non produttive.

L'evoluzione della società umana è avvenuta in modo costante, subendo talvolta rallentamenti e talaltra notevoli accelerazioni, al presentarsi di condizioni opportune.

Il risultato più importante di una simile evoluzione è il linguaggio articolato accanto a diversi altri mezzi di comunicazione. Ciò ha reso possibile lo scambio di dati dell'esperienza, di informazioni [...] Accanto alle linee o tacche isolate presenti sulle ossa o sugli oggetti in pietra, si osserva la comparsa di segni [...] (Klima, 2002, 202)

Queste forme di *annotazione* rappresentano le prime *rudimentali misurazioni* e precedono nel loro contenuto concettuale l'invenzione stessa della scrittura. Dalla scoperta, avvenuta oltre un secolo fa in giacimenti del Paleolitico superiore, in Francia, di frammenti ossei recanti serie di incisioni, gli archeologi (vedi per esempio D'Errico, 2002) hanno proposto un gran numero di ipotesi per interpretare questi oggetti: si tratterebbe di annotazioni di caccia (per tenere il conto delle prede uccise), indicazioni del numero di persone partecipanti a una cerimonia o anche primitivi sistemi di notazione o di calcolo. Per usare una espressione di Denise Schmandt-Besserat, un'esperta delle espressioni che hanno preceduto la scrittura vera e propria, *sembra proprio che l'uomo abbia imparato prima a far di conto che a scrivere il proprio nome.*

Durante i cinque millenni di evoluzione del Neolitico in Europa (da circa 12000 a circa 6000 anni fa), periodo caratterizzato dalla produzione di cibo, l'agricoltura e l'allevamento si svilupparono notevolmente e ciò favorì a sua volta lo sviluppo della cultura. La coltivazione dei campi, la cura e la distribuzione del raccolto esigevano in particolare che si facesse ricorso a differenti tipi di misura. Anche nell'ambito di un'economia semplice, di tipo familiare o tribale, come poteva essere quella iniziale della produzione agricola, i consumi, le scorte, le sementi, la distribuzione dei prodotti etc. dovevano essere sottoposti a periodica verifica.

Il sistema tradizionale del baratto venne progressivamente sostituito da scambi *basati sulla quantità* prendendo come unità di misura simboli astratti di cui rimane testimonianza nelle prime tavolette scritte.

Ed è così appunto che sono nate le prime tecniche di *rappresentazione delle misure*. Mi soffermo ancora un attimo su questo passaggio decisivo.

I numeri più semplici sono quelli che usiamo per contare. In effetti l'attività del contare iniziò molto prima di quando furono inventati simboli quali 1, 2, 3... perché è possibile contare senza usare alcun simbolo, per esempio contando con le dita. Si può calcolare che "ho due mani ed un pollice di cammelli" alzando le dita man mano che gli occhi passano in rassegna i cammelli. Si può anche memorizzare, come appena introdotto, il conteggio attraverso graffi o segni su un pezzo di legno o di osso. Si possono anche usare pezzi di argilla con disegnata una figura di pecora per contare pecore, o con figura di cammello per contare cammelli. L'uso di semplici simboli per i numeri si sviluppò circa 3 mila anni or sono, quando tali contatori venivano messi in speciali contenitori anch'essi di argilla. Era però un fastidio rompere il "coperchio" ogni qual volta si volesse controllare il contenuto, e ricostruirne un altro quando finito. Così le persone impararono a mettere speciali segni all'esterno del contenitore per riassumere ciò che era dentro. Si resero quindi conto che in effetti non avevano bisogno di nessun contatore fisico all'interno: potevano quindi utilizzare gli stessi segni su semplici tavolette di argilla. I primi campioni universali di misura di cui si ha traccia (riferiti ad una lunghezza) sono una canna di bambù cinese (vedi Fazio, 1995) del 2700 a.C., che dava il campione di lunghezza quando la

distanza tra due nodi era tale che soffiando nella canna veniva emessa una particolare nota, ed il *cubito egiziano*, lunghezza di un avambraccio dal gomito alle dita (standardizzato intorno al 2500 a.C. in un pezzo di marmo di circa 50 centimetri). Cinque o seimila anni fa nacquero le prime civiltà: fu in quel periodo, infatti, che fecero la loro comparsa le prime città-stato, situate nelle valli del Tigri, dell'Eufrate e del Nilo, che rappresentavano realtà del tutto autosufficienti. Erano circondate da fattorie e i loro abitanti esercitavano il commercio e l'artigianato, utilizzavano veicoli provvisti di ruote, raffinavano i metalli, tagliavano la pietra ed erano abili architetti. Tutte queste attività necessitavano di strumenti di misura: non è un caso, allora, che pesi e misure standardizzati siano stati ritrovati nei siti archeologici. Le radici dei nostri sistemi moderni di pesi e misure vanno quindi cercati proprio in queste culture.

Fu soprattutto quindi il bisogno di contabilizzare i prodotti di scambio che portò infine alla nascita del linguaggio scritto, che a sua volta contribuì a sviluppare in maniera più progredita il commercio. Col sorgere dei primi imperi, la pesatura e la misurazione divennero scienza applicata. Ed è così che furono gettate le basi non solo di tante nuove tecnologie ma appunto di ciò che possiamo già definire come scienza primitiva.

In questo contesto il termine "scienza" designa una forma particolare di attività sociale che, attraverso l'osservazione, la raccolta, l'analisi, l'organizzazione di fatti empirici [...] produce risultati che si rivelano utili ed efficaci nell'interazione fra uomo ed ambiente e che rappresentano la più avanzata generalizzazione delle comuni attività umane. Questi risultati portano all'elaborazione di un sistema di conoscenze definite da una serie di termini, proposizioni, teorie [...] regole nelle quali si esprime e si conserva il sapere accumulato nelle epoche passate. [...] I risultati dell'attività scientifica servono a mantenere e a sviluppare la produzione e la riproduzione di un bene, sia esso di natura materiale o immateriale e possono inoltre diventare strumenti di potere. (Reineke, 2002, 57)

La necessità di conservare campioni di pesi e misure, come unità di riferimento nazionali recanti iscrizioni in nome del re e depositate nei templi principali, fu riconosciuta almeno fin dal 2000 a.C.

I manufatti, ritrovati durante gli scavi in Egitto o in tante altre località di periodi molto antichi, confermano proprio quanto fosse importante, da un punto di vista pratico, avere a disposizione standard di pesi e di misure di spazio e di tempo nell'ambito degli scambi commerciali.

E' universalmente accettato poi che la prima importante tappa nello sviluppo dei concetti metrologici dell'uomo sia stata *antropomorfica*: in essa le principali unità di misura sono le parti del corpo umano.

L'uomo misura il mondo con se stesso. E' un sistema antichissimo.

Su un timpano greco del V secolo a.C., conservato nell'Ashmolean Museum di Oxford, si trovano raffigurate in rilievo la testa, il petto, le braccia allargate e l'impronta del piede di un uomo. Qualunque possa essere l'esatta interpretazione dal punto di vista della metrologia di questa rappresentazione (che, del resto, è ancora oggi argomento di discussione), essa è testimone di quanto, in passato, si fosse già consapevoli dell'importanza delle misure ricavate dal corpo umano.

Certo, perfino i primi utenti di queste unità dovevano essere coscienti che la lunghezza del proprio piede o del proprio dito era diversa da quella del vicino di casa, ma agli inizi le differenze individuali non sembravano importanti *considerato il basso livello di precisione* richiesto per le misurazioni di quei tempi. Con il tempo, comunque, questo sistema raggiunse un *primo livello di astrazione*.

Per misurare oggetti a lui estranei, gli servono le varie parti del corpo: il piede, il braccio, il dito, il palmo, le braccia tese, il passo. E le possibilità sono molte, dato il gran numero di elementi nel corpo umano utilizzabili per misurare.

Ma la cesura intellettuale consiste nel passaggio dalle rappresentazioni concrete a quelle astratte, dal «dito mio o tuo» al «dito in generale». Le misure del tipo «cubito», «palmo» o «spanna», «piede», sono state usate nella nostra

civiltà in tempi ancora relativamente recenti, fino alla piena egemonia del sistema metrico. Ma erano ormai concetti astratti. Era il «passo in generale», di una lunghezza stabilita, valida in ogni occasione (benché nel corso del tempo questa lunghezza potesse mutare), di una lunghezza un po' più grande o un po' più piccola del passo «mio» o «tuo». (Kula, 1987, 24)

Tuttavia anche quando si arrivò a concepire le unità di misura come concetti astratti non vennero affatto eliminate le differenze nello stabilire il valore di queste unità, a seconda soprattutto delle regioni o del tempo. In Egitto il sistema delle unità di misura di lunghezza era basato sul cubito reale (corrispondente a circa 52,3 cm) i cui sottomultipli erano: il *palmo* (equivalente alla larghezza del palmo escluso il pollice) e il *dito* (pari alla larghezza di un dito). Alcuni storici (vedi per esempio Dilke, 1993) hanno stabilito le seguenti relazioni, valide di massima almeno nell'ultimo periodo degli imperi egizi:

4 dita = 1 palmo, circa 7,5 cm

7 palmi = 1 cubito, circa 52,3 cm

100 cubiti = 1 *ht* o *khet*, circa 52,3 m

Presso i Sumeri il sistema delle unità di misura di lunghezza era basato sul *cubito* sumero equivalente a 49,5 cm. Abbiamo questa informazione grazie ad una statua risalente al 2170 a.C., che rappresenta Gudea, re di Lagash. Oggi questa statua è conservata al Louvre.

Quando le lunghezze sono estremamente elevate -pensiamo a distanze su scala geografica- gli standard basati sull'anatomia umana non sono evidentemente sufficienti. In questi casi erano allora utilizzate stime basate sul tempo calcolato per uno spostamento, quali "un giorno di cammino" o "un'ora a piedi", insieme ad analoghe stime "equestri", quali "a un giorno di cavallo" o "a mezz'ora di piccolo galoppo". Una misura spesso usata in questo contesto dai Romani era la distanza tra due *mutationes*, stazioni dove era possibile ristorarsi e cambiare i cavalli durante i lunghi viaggi su una *via strata* (via lastricata) romana, termine da cui deriva l'odierno *strada* o l'inglese *street* (la lunghezza variava approssimativamente tra i 40 e i 45 km odierni circa).

Tra i Greci spesso era usato lo *stadio*. Lo stadio greco oscillava tra i 150 e i 200 metri ed in origine equivaleva alla lunghezza di una pista da corsa. Fu anche ripreso dai Romani, dove valeva circa 180 metri. Poiché, nel mondo antico, i Greci erano abili marinai e i Romani ottimi viaggiatori terrestri, la distanza marittime erano normalmente misurate in stadi e quelle terrestri in miglia (vedi prossimo paragrafo e Dilke, 1993).

A noi sembra che il sistema metrico permetta di esprimere tutte le proporzioni, perfino fra grandezze non commensurabili. Una cosa tuttavia è certa: le misure antropometriche, i cui inizi risalgono alla preistoria dell'umanità e che si sono perfezionate nel corso di decine di secoli, dal momento in cui composero un sistema coerente hanno assolto bene al proprio compito e hanno servito bene l'uomo nel suo lavoro.

2.2 I Greci e i Romani

Col progredire della civiltà, le città-stato, un tempo indipendenti, furono inglobate negli imperi. Quelli dell'antica Grecia e di Roma offrirono, come noto, enormi contributi alla nostra cultura moderna: *tra questi molti nuovi elementi di tecnologia della misura.*

L'insegnamento della matematica rappresentava nel mondo greco uno degli aspetti più importanti dell'istruzione, mentre per i Romani tale disciplina era considerata *un aiuto necessario alla tecnologia*. Il sostantivo *mathēma* deriva dal verbo *manthanō* e significa "argomento legato all'apprendimento", il che dimostra che la matematica in Grecia era una materia posta alla base dell'istruzione. I termini utilizzati per definire due rami in cui essa era suddivisa nei tempi antichi, l'aritmetica e la geometria, significano rispettivamente "materia dei numeri" (*arithmos* = numero) e "misurazione (*metrein*) della terra (*gē*)". È interessante notare (vedi per esempio Russo, 2001) che storici greci ed antichi (anche Erodoto, nel capitolo II delle sue *Historiae*) fanno risalire la nascita della geometria agli Egizi, spiegandone l'origine nell'esigenza di misurare le variazioni nell'estensione delle proprietà dovute all'erosione del Nilo *per fini fiscali*.

Nell'agorà di Atene sono stati ritrovati i pesi e le misure di ispettori ufficiali (*metronomoi*).

Tuttavia, ci si trovava sempre di fronte allo stesso problema: *gli standard delle misure differivano in varia forma, in relazione alle diverse città-stato e al periodo storico*. Per esempio la lunghezza del piede (*pous*) oscillava nelle diverse regioni tra i 27 e i 35 cm.

Va sottolineato come un grande contributo alle problematiche della misurazione venne dagli sviluppi dell'astronomia e dell'idrostatica, in particolare ad Alessandria e soprattutto sotto il regno di Tolomeo II.

La situazione dello scienziato assunse, in quel periodo, una fisionomia nuova, molto diversa da quella che aveva durante il periodo greco precedente, e già premonitrice di future trasformazioni. Con uomini come Archimede e Tolomeo appaiono studiosi dediti unicamente al lavoro scientifico; i loro unici oggetti di studio sono *l'osservazione della natura e la memorizzazione dei risultati* tramite la scienza dei numeri.

Eratostene per esempio, oltre ad aver prodotto la prima carta scientifica del mondo conosciuto riuscì per primo, come noto, a fornire una prima stima della lunghezza del meridiano terrestre basata su una misura decisamente "precisa". Il principio utilizzato da Eratostene fu quello della triangolazione: in base a questo principio si determina la distanza di un punto inaccessibile misurando le direzioni in cui è visto da due punti a distanza nota. Nella pratica il metodo utilizzato da Eratostene può essere così ben riassunto:

Si sapeva che Siene (l'odierna Assuan) era quasi sul Tropico: il Sole vi era infatti circa allo zenit a mezzogiorno del solstizio d'estate. L'angolo (misurato con una meridiana) che nello stesso momento i raggi del Sole formavano con la verticale di Alessandria poteva quindi fornire l'angolo tra le verticali delle due città. Conoscendo anche la distanza lineare tra Alessandria e Siene, se ne poteva dedurre la distanza corrispondente a un grado di cerchio massimo. La difficoltà di sapere ad Alessandria il momento in cui era mezzogiorno a Siene era superata dall'assunzione che Siene fosse esattamente a sud di Alessandria e che quindi nelle due città il mezzogiorno fosse contemporaneo. (Russo, 2001, 93)

Ad una prima valutazione questo metodo può apparire semplice e ovvio. In effetti richiede presupposti teorici tutt'altro che banali.

[...] si tratta di un metodo inaccessibile alle civiltà prescientifiche e in tutta l'antichità nessuno scrittore latino è mai riuscito a riferirlo in modo accettabile. La difficoltà non è evidentemente nel ragionamento geometrico, che in sé è semplicissimo, ma nel capire che ragionando su un disegno si possono trarre conclusioni valedoli sull'intera Terra. (*Ibidem*)

In questa maniera Eratostene riuscì a stabilire la lunghezza di un grado di meridiano terrestre in 700 stadi, e la lunghezza totale del meridiano in 252.000 stadi. In effetti gli storici non sono sicuri di quale valore sia stato usato per lo stadio, ma se si accetta un valore di circa 159 metri, come afferma la maggioranza degli studi, l'errore è dell'ordine dell'1%. Il risultato non può non essere giudicato straordinario, anche se oggi si tende a pensare che sia anche stato il frutto

di una casuale e fortunata compensazione di errori. Lo studio di questa vicenda può suggerire un'importante considerazione, anche alla luce della misurazione del meridiano terrestre avvenuta durante la Rivoluzione Francese.

E' stato osservato che la misura del meridiano ottenuta da Eratostene, 252.000 stadi, ha la proprietà di essere divisibile per tutti numeri naturali da 1 a 10 (il loro minimo comune multiplo è infatti 2520). Si tratta naturalmente di una proprietà molto utile ed è improbabile che sia frutto del caso. Eratostene potrebbe avere alterato i dati per ottenere un valore così comodo. [Un] passo di Plinio sul valore dello stadio "secondo il rapporto di Eratostene" può però suggerire anche un'altra possibilità: quella che Eratostene avesse introdotto il nuovo "stadio" proprio come un conveniente sottomultiplo del meridiano, anticipando il procedimento usato in epoca moderna per definire il metro. (Russo, 2001, 297)

Sulle vicende moderne di misurazione del meridiano terrestre mi soffermerò nel par. 2.5, e queste ultime considerazioni risulteranno più chiare.

L'espansione del commercio tra gli imperi richiedeva la navigazione sui mari. La geometria, la fisica, la medicina, la botanica e la zoologia ebbero basi scientifiche. I Romani introdussero l'uso della forza idrica per macinare il grano. Il continuo evolversi della civiltà comportò una sempre crescente gamma di attività che necessitavano di misure e la natura tecnica di tali misurazioni rappresentò una sfida sempre più affascinante. Per i Romani l'aspetto pratico delle misurazioni predominava su tutti: la costruzione di strade, le misurazioni topografiche, l'organizzazione militare, i rifornimenti di acqua e il miglioramento delle condizioni igieniche dipendevano tutti da un sistema di misure ben definito.

I sistemi di pesi e misure degli antichi imperi orientali, sorti nelle valli del Tigri e dell'Eufrate, furono adottati dai Greci e, in seguito, passarono ai Romani. Questi, a loro volta, estesero le loro procedure per la misurazione a tutto il continente europeo: di conseguenza, molte caratteristiche dei sistemi di misura utilizzati in epoche moderne riflettono il sistema romano. Ad esempio, i Romani dividevano il piede e la libbra in 12 parti e tale convenzione sopravvive tuttora nell'oncia (*troy pound*), un'unità di misura usata soprattutto per le monete. L'abbreviazione moderna della libbra negli Stati Uniti (lb) deriva dalla parola latina *libra* che significa "bilancia"; anche la parola "miglio" ha origine nell'espressione latina *mille passus*, che significa "mille passi". Il passo romano corrisponde a circa cinque piedi inglesi. (McCoubrey, 1983, 585)

A Roma la più piccola unità di misura, proprio come in Grecia, era il *digitus*, che equivaleva alla lunghezza del dito. Quindi, analogamente alla Grecia, ma anche in altre regioni, generalmente quattro dita formavano un palmo e 4 palmi costituivano un piede, cosicché c'erano 16 dita in ogni piede. Riassumendo si può ricordare che le nove unità di lunghezza più usate dai Romani in ordine crescente erano le seguenti: il *digitus*, l'*uncia*, il *palmus*, il *pes*, il *palimpes*, il *cubitus*, il *passus*, lo *stadium* e il *milliare*.

Dal *digitus* deriva il nail inglese, mentre dall'*uncia* l'*inch* (pollice); la controparte del *pes* è invece il *foot* (piede), diversamente chiamato in tutto il mondo. Il *pes*, che corrisponde normalmente alla lunghezza di circa trenta centimetri, rimanda ad un piede umano piuttosto lungo.

Il *passus*, in origine, corrispondeva al passo di un legionario romano durante una lunga marcia. La sua lunghezza, corrispondente a circa 1,5 metri o a poco più di 50 pollici inglesi, potrebbe sembrare eccessiva, ma è, tuttavia, fuor di dubbio che il ciclo completo sinistra-destra-sinistra o destra-sinistra-destra equivalesse al doppio di un passo singolo di circa 29 pollici inglesi o 0,75 metri.

Il *milliare*, che corrispondeva ad una lunghezza di 1.000 passi, fu anche chiamato *mille passuum*, vale a dire "mille passi": da qui ha origine il nome dell'attuale miglio inglese, che, equivalendo a 1.609,35 metri, è di circa il 9 per cento più lungo del miglio romano. (Klein, 1988, 56)

Anche il cubito, come quello egiziano, equivaleva in origine alla lunghezza dell'avambraccio, ottenuta misurando la distanza tra il gomito e la punta del dito più lontano a mano aperta.

Sono stati individuati ben otto diversi cubiti: misurano in media poco più di 50 centimetri di oggi. Si può anche ricordare che un multiplo del piede utilizzato in molte occasioni era l'*actus*. In pratica 120 *pedes* formavano 1 *actus*, equivalente a circa 35 m; l'*actus*, (pl. *actus*), che deriva da verbo latino *agere*, cioè condurre, era in origine la distanza percorsa da un bue che tirava un aratro prima di girarsi.

Diversi secoli di confusione politica succedettero al declino dell'impero romano e in Europa il sistema di misura si sviluppò in modo disomogeneo. Tuttavia, l'influenza della cultura romana rimase evidente nei nomi delle unità di misura, dei loro multipli e dei loro sottomultipli usati in tutta Europa e la sua eredità fu sfidata solo nel XVIII secolo, con l'introduzione del sistema metrico.

2.3 Medioevo e rinascimento

Dopo che i Romani, conquistatori della Gran Bretagna, furono partiti, gli invasori Anglosassoni iniziarono ad utilizzare i campi e le colonie che dai primi erano stati abbandonati. In questi luoghi gli Angli ed i Sassoni stabilirono le loro roccaforti tribali e i loro centri fortificati di difesa detti *buhrs* (che in seguito sarebbero stati chiamati *boroughs* e che avrebbero dato origine ad un consistente numero di località il cui nome termina per *-bury* o *-borough*).

Una data da menzionare è sicuramente quella del giugno 1215. Re Giovanni, sotto le insistenti pressioni dei baroni, appose il suo sigillo alla famosa Magna Charta. Tra le riforme che in essa sono promesse vi era anche un'importante politica metrologica: da allora in poi avrebbero dovuto esserci unità uniformi, riconosciute, riproducibili sulle quali sia gli acquirenti che i venditori avrebbero potuto fare affidamento.

Sfortunatamente, i raggiri, le evasioni e le frodi tendono a rendere la storia molto più colorita di quanto non riesca a fare l'abituale osservanza della legge e dell'ordine. La registrazione delle unità di peso e di misura utilizzate in Inghilterra è, nonostante la Magna Charta, contraddittoria, complessa, vivace, piena di errori, inganni, stratagemmi, la maggior parte dei quali servono ad arricchire mercanti truffatori, funzionari locali e re avidi di denaro, alle spalle di quanti sono più onesti, ma sicuramente meno influenti. (Klein, 1988, 29)

Nel secolo XIII nasce una nuova economia a livello europeo: vengono incrementati lo scambio delle merci e l'uso della moneta. Dalle città marinare (dove arrivano spezie e sete di provenienza orientale e dai centri della pianura padana (luoghi di lavorazione della lana), le direttrici del commercio attraversano Francia e Renania per giungere nelle Fiandre e in Inghilterra.

Gli abitanti delle città, prendendo coscienza di avere interessi comuni da difendere e da sviluppare, si coalizzano e ottengono sempre maggiori autonomie di governo: nascono così i Comuni. In questo clima è sentito in maniera sempre più pressante il problema di migliorare il *supporto tecnico all'attività commerciale*, in particolare per ciò che riguarda il *problema delle misure*.

Questa situazione, favorevole a differenti sviluppi in ambito tecnologico, cambiò nei secoli successivi. Il sogno umanistico della concordanza delle fedi sotto il segno della ragione lasciò il posto alla drammatica realtà delle guerre di religione che insanguinarono l'Europa. In questo clima mettere in discussione i dogmi religiosi ed il principio di autorità diventò, come noto, sempre più pericoloso e ciò influenzò lo spirito di qualsiasi tipo di ricerca. Anche coloro che credevano intimamente possibile l'acquisizione di verità scientifiche - di solito i maestri delle

arti - erano costretti dal cambiamento di tendenza ad esprimere le loro conclusioni in un linguaggio ipotetico.

I pensatori più coraggiosi del '500 finirono poi vittime del potere. Altri preferirono ritirarsi nella propria interiorità venata di scetticismo. La situazione cambiò di nuovo solo quando, tra il '500 ed il '600, la cosmologia classica venne messa sperimentalmente in discussione da quella che è stata universalmente definita la rivoluzione copernicana.

In un clima nuovo, premonitore dell'imminente rivoluzione scientifica, anche le attività pratiche riacquistarono una dignità culturale e conoscitiva.

Sapere tecnico e scienza si uniscono per capire e vincere la natura. Inizia ad essere superata la separazione, tipica della cultura medievale, fra le arti meccaniche e la conoscenza vera e propria.

Comincia ad affermarsi così l'idea del "conoscere" come "fare", come "costruire", che avrà un'enorme influenza in futuro.

2.4 Il Seicento e l'osservazione accurata

Organizzazione e descrizione matematica dei dati osservati e ricerca delle leggi che descrivono e spiegano i fenomeni naturali sono, insieme alla verifica sperimentale, le componenti fondamentali della scienza moderna.

Estendere l'osservazione e la misurazione al di là delle capacità dei sensi diventa sempre più un obiettivo primario. E' evidente che lo scienziato moderno è un uomo di laboratorio.

In questo clima non sono davvero rari i tentativi di miglioramento delle tecniche di misurazione (vedi per esempio Fazio, 1995).

Gli storici sono -in genere- concordi nell'asserire che Gabriel Mouton, vicario a Lione, fece il *primo tentativo di sistema metrico*: Mouton infatti propose che tutte le distanze venissero misurate attraverso un sistema decimale di unità basate sulle dimensioni della terra stessa.

Nel suo lavoro del 1670, *Observationes diametrorum solis et lunae apparentium*, egli suggerì in particolare come unità di lunghezza l'arco di 1 minuto di un meridiano terrestre; in seguito lo stesso Mouton suggerì di adottare come campione di lunghezza 1/10000 di tale arco.

Nel 1670, Mouton propose un sistema decimale di pesi e misure usando, per la prima volta, un'unità di base presa dal mondo fisico piuttosto che dal corpo umano. La sua unità di base era la lunghezza di un minuto di arco di un grande circolo della terra, per esempio l'equatore. Mouton divise questa unità di base di lunghezza per multipli di dieci al fine di ottenere delle sotto unità, con lo scopo di sostituire il piede francese. Propose anche l'uso di un pendolo, la cui lunghezza era stata calcolata in questo modo, per definire l'unità di tempo. E' interessante ricordare che il miglio nautico, comunemente usato oggi, fu inizialmente definito come lunghezza di un minuto di arco di un grande circolo terrestre. (McCoubrey, 1983, 588)

L'abate Mouton era ben consapevole che l'accurata misurazione di un minuto di arco di un meridiano della terra era un'impresa difficile da realizzare. Di conseguenza, esaminò un modo alternativo per arrivare ad una lunghezza standard, non rinunciando ad utilizzare le caratteristiche fisiche della terra stessa: fece allora ricorso a pendoli con precise oscillazioni di tempo.

Questa volta, la relazione generale tra la lunghezza di un vero pendolo e il periodo della sua oscillazione era nota. Un vero pendolo è formato da una cordicella molto leggera, con un fulcro a bassa frizione all'estremità superiore e con tutta, o quasi tutta la sua massa concentrata all'estremità inferiore.

Quando questo pendolo oscilla liberamente in avanti e indietro, più lungo sarà, più tempo impiegherà a compiere una completa oscillazione, ma il tempo, o periodo, di tale oscillazione aumenterà in proporzione alla radice quadrata della lunghezza dal fulcro al centro della massa.

Questo tempo, o periodo, è anche inversamente proporzionale alla radice quadrata dell'intensità gravitazionale – più correttamente chiamata accelerazione di gravità – in cui il pendolo sta oscillando.

A livello del mare, ad una latitudine di 45°, a metà strada tra il polo e l'equatore, l'accelerazione standard dovuta alla gravità è di 9,80621 metri al secondo per secondo. A queste condizioni, un puro pendolo lungo appena 0,993577 metri compirà il suo ciclo di oscillazione (andata e ritorno) in soli 2 secondi: 1 secondo per l'oscillazione in una direzione e 1 secondo per tornare indietro.

Mouton mise in evidenza che un pendolo standard di secondi poteva definire anche una lunghezza di base – la sua. (Klein, 1988, 109-110)

Nel 1675 Tito Livio Burattini propose di chiamare *metro cattolico* (cioè universale) il campione realizzato col pendolo.

2.5 Il Settecento e la nascita del sistema metrico decimale

Gli interessi tecnici della scienza settecentesca, fiorita in piena rivoluzione industriale e quindi stimolata a rispondere a sempre crescenti domande pratiche, è troppo ovvia per dover essere sottolineata. Diderot in uno dei suoi famosi passi introduttivi all'“Enciclopedia” afferma esplicitamente che “non avremo mai uno sviluppo scientifico finché tutti gli artigiani tengono i loro segreti”.

E' l'epoca delle prime applicazioni della macchina a vapore (nel 1769 Watt brevettò il modello perfezionato di una macchina di tal genere, in cui per la prima volta viene sfruttato, anziché il ciclo termico, il principio della forza meccanica del vapore condensato), dei primi studi teorici e delle prime applicazioni pratiche dell'elettricità... In una parola, nasce la grande industria meccanica, e con essa tutta la problematica fisico-sperimentale che vi si connette, con ovviamente dirette ricadute sulla tecnologia della misura.

James Watt realizzò una macchina in grado di trasformare l'energia del vapore in lavoro meccanico nel 1780: il 26 agosto del 1789, l'Assemblea Nazionale francese approvava la *Dichiarazione dei diritti dell'uomo e del cittadino* sancendo solennemente il sacro e inviolabile diritto alla proprietà privata. Ed anche se naturalmente non è possibile formulare imputazioni causali di tipo unidirezionale fra questi fenomeni, possiamo tuttavia constatare che *solo quando una serie di invenzioni e una serie di pratiche sociali, politiche ed economiche si incontrano abbiamo vera innovazione in ambito scientifico e tecnologico*.

E' con l'avvento del metodo sperimentale da una parte e la spinta alla collaborazione internazionale dall'altra che venne così per la prima volta fortemente sottolineata la necessità di disporre di unità di misura unificate in sostituzione dell'enorme numero di unità in uso nei diversi paesi, situazione che rendeva pressoché impossibile qualsiasi confronto dei risultati ottenuti da ricercatori di diversa nazionalità nell'osservazione dello stesso fenomeno fisico. Il problema *fu tuttavia affrontato in maniera seria* solo ai tempi della Rivoluzione Francese quando, nel 1790, l'Assemblea Nazionale avviò il primo tentativo di costruire un *sistema di unità di misura universale* incaricando del compito di fissare le unità di misura e i campioni delle grandezze fondamentali lunghezza e massa una commissione della quale fecero parte insigni scienziati.

Uno dei membri dell'Assemblea era il vescovo di Autun, Charles Maurice de Talleyrand-Perigord, passato alla storia semplicemente col nome di Talleyrand. Era entrato in politica

come rappresentante della chiesa negli Stati Generali, ma nel 1789 si oppose all'ingresso del clero nell'Assemblea Nazionale.

Quando la prima Costituente stava volgendo al termine nel 1791, Talleyrand si espresse in favore dell'istruzione gratuita fino all'università e sostenne che la religione – ma non un particolare dogma o una fede specifica – doveva essere insegnata nelle nuove scuole pubbliche.

Circa un secolo dopo la proposta di Mouton, l'iniziativa per una riforma del sistema dei pesi e delle misure fu sostenuta a livello politico nell'Assemblea Nazionale Rivoluzionaria di Francia dal vescovo Autun, più noto come Charles Maurice de Talleyrand. Nell'aprile del 1790, Talleyrand propose all'Assemblea un progetto basato su un'unità di lunghezza determinata da un pendolo che batteva secondi di tempo. Nuove e più precise indagini scientifiche erano necessarie per stabilire questa lunghezza. Tale progetto fu accolto favorevolmente dall'Assemblea e Luigi XVI approvò una legge in proposito il 22 agosto 1790. (McCoubrey, 1983, 588)

Questa legge prevedeva che il re suggerisse anche al parlamento inglese di procedere in tal senso e che la Royal Society di Londra e l'Accademia delle Scienze di Parigi collaborassero al fine di sviluppare la ricerche scientifiche necessarie a determinare definitivamente questa unità di base.

L'Accademia delle Scienze viene invitata a contattare la Royal Society. Non giunge alcuna risposta e la Francia continua da sola sulla strada metrica.

L'Accademia delle Scienze nomina una prima commissione che adotta una scala decimale per tutti i pesi e le monete; una seconda commissione, della quale fanno parte Laplace, Lagrange, Monge e Condorcet, ebbe l'incarico di fissare l'unità di lunghezza tra le tre che avevano fino ad allora destato maggior interesse: il pendolo al secondo, il quarto di equatore e il quarto di meridiano.

Scartato il pendolo perché legato a misure di tempo, scartato il quarto di equatore perché scomodo da misurare, l'Assemblea Nazionale, su proposta dell'Accademia delle Scienze, adotta il quarto di meridiano terrestre come base di un istituendo *nuovo sistema metrico e definisce il metro*, affidando a Delambre e a Méchain il compito di misurare la lunghezza del meridiano e a Lavoisier quello di misurare la massa di un volume d'acqua noto e di definirne operativamente l'unità, precedentemente chiamata *grave*. (Fazio, 1995, 190)

Riprenderò fra breve il resoconto di questa importantissima vicenda. Voglio però subito sottolineare che l'obiettivo di universalità che fu alla base di tutti i lavori proposti dall'Assemblea Nazionale era tipico dello spirito illuminista.

Talleyrand proponeva di rinunciare all'idea (diffusa sotto l'Ancien Régime e cara alla monarchia) di estendere a tutta la Francia le misure di Parigi. Proponeva, invece, di fissare un nuovo prototipo che doveva essere scelto nella natura («pris dans la nature») e poteva perciò essere accettato da tutte le nazioni. [...] L'8 maggio 1790 queste proposte furono approvate dall'Assemblea Nazionale, che affidò l'esecuzione della riforma all'Accademia delle Scienze, ordinando al tempo stesso che a questa fossero inviate dalle province tutte (!) le misure in uso. Si pensava che l'operazione sarebbe stata semplice: si prevedeva, infatti, che entro sei mesi dall'invio dei nuovi campioni «le vecchie misure sarebbero abolite e sostituite dalle nuove».

Apparentemente si trattava di un passo importante verso la realizzazione di un'antica aspirazione della monarchia. E tuttavia il re pareva non avere alcuna fretta di apporre la sua sanzione al progetto. Lo fece soltanto il 22 agosto 1790, mentre l'11 novembre dello stesso anno affidò a Condorcet, allora segretario dell'Accademia, il compito di condurre in porto l'operazione. (Kula, 1987, 243)

In particolare voglio anche far osservare che l'obiettivo di universalità era *del tutto nuovo e rivoluzionario*.

Nel secolo XVIII le unificazioni premetriche non hanno obiettivi universali; al contrario, come di regola fin dal tempo della dinastia carolingia, le misure sono attributo del sovrano e devono essere in vigore fin dove si estende il suo potere. Obiettivi universali, globali se li pone la riforma metrica. (ivi, 130)

I sistemi di misura tradizionali più conosciuti risalgono a tempi antichi e sono il risultato dell'evoluzione di pratiche tradizionali usate in quelle società. *Il sistema metrico, invece, fu creato dal niente*: ebbe come base i principi scientifici più certi disponibili all'epoca della sua invenzione e fu ideato con lo scopo di soddisfare le nuove esigenze emerse a seguito dello sviluppo del commercio e dell'industria. L'impegno civile che caratterizza l'illuminismo, per cui la cultura filosofica deve scendere alla considerazione dei concreti problemi della società, commisurarsi con questi ultimi indicando nel contempo le soluzioni più confacenti ai veri interessi della società, è certamente alla base di questo imponente sforzo.

Date ascolto alla vostra passione per la scienza dice la natura, ma cercate che la vostra scienza sia umana e tale che possa avere un legame diretto con l'azione e la società[...]Sii filosofo, ma in mezzo a tutta la tua filosofia resta pur tuttavia un uomo. (Hume, 1957, 8)

In questa prospettiva si evidenzia lo scopo eminentemente pratico della filosofia, cioè il suo impegno civile volto a diffondere nella società uno *spirito di precisione* indissolubilmente legato all'attività economica in base alla quale si sviluppa, e che costituisce la reale promotrice del progresso e della sempre maggiore diffusione *della civiltà, cioè della razionalità*.

Ciò che si rimproverava alla molteplicità dei gerghi veniva rimproverato anche alla diversità di pesi e misure: la legna da ardere era venduta a corde, il carbone di legna a carrate, il carbon fossile a carra, l'ocra a botti, e il legname per carpenteria al marco o alla solive. Si vendevano i frutti di cedro alla poinçonée, il sale al moggio, al sestario, a mine, a mezze mine, a staia, a once; la calce si vendeva al poinçon, e i minerali alla raziera. Si comprava l'avena a profenda e il gesso a sacchi; il vino a pinta, a mezza pinta, a caraffa, a roquille, a boccale e a mezzetta. L'acquavite si vendeva a brente, il grano a moggi e a salme. Le stoffe, i tappeti e la tappezzeria si compravano ad aune; boschi e prati venivano misurati in pertiche, i vigneti in daureés. L'arpento valeva dodici hommées, misura che indicava una giornata di lavoro di un uomo; altrettanto valeva per l'ouvrée. Gli speciali pesavano in libbre, once, dramme e scrupoli; la libbra valeva dodici once, l'onda otto dramme, la dramma tre scrupoli, e lo scrupolo venti grani.

Le lunghezze erano misurate in tese e in piedi del Perù, che equivalevano a un pollice, una logne, e otto punti di piede del Re, il quale piede poteva essere quello del re di Macedonia o di Polonia, e anche quello delle città di Padova, di Pesaro e Urbino. Era, molto approssimativamente, l'antico piede della Franca Contea, del Maine e del Perche, e il piede di Bordeaux per l'agrimensura. Quattro di questi equivalevano più o meno all'auna di Laval, cinque formavano l'esapodo dei Romani, che era pari alla canna di Tolosa e alla verga di Norai. C'era poi quella di Raucourt, e anche la corda di Marchenoir en Dunois. A Marsiglia, la canna per le lenzuola era di circa un quattordicesimo più lunga di quella per la seta. Che confusione: sette-ottocento nomi!

«Due pesi e due misure!» era il simbolo stesso dell'ineguaglianza. (Guedj, 2001, 24)

Ed in effetti la diversità delle misure nell'età feudale aveva lasciato evidentemente libero campo alle dispute e alle ingiustizie sociali.

Le misure premetriche - proprio perché hanno un carattere non convenzionale ma significativo, perché sono un attributo del potere e uno strumento per imporre il privilegio di classe e perché attorno ad esse si è accesa spesso violenta la lotta di classe - posseggono un ricco e concreto contenuto sociale, che la metrologia storica avrebbe il compito di portare alla luce. (Kula, 1987, 109)

E' in questa cornice storica e politica quindi che la Commissione composta da Borda, Lagrange, Laplace, Monge e Condorcet (a stretto contatto con loro, fino a quando venne

ghigliottinato per ordine della Convenzione, vi fu, come visto, anche il grande chimico Antoine Lavoisier) ebbe il merito di dare a tutte le generazioni che seguirono il primo sistema di misura scientifico. Gli Accademici presentarono il loro rapporto il 19 marzo del 1791, e il 26 dello stesso mese l'Assemblea Costituente istituì la Commissione Generale dei Pesi e delle Misure, «per far cessare - diceva il decreto - la stupefacente e scandalosa diversità delle nostre misure» (cit. in Mondini, 1977, 334).

Come già visto, il principio guida implicato nella fase iniziale dell'elaborazione del sistema metrico riconosceva la necessità di definire alcune unità base di misura secondo criteri universalmente accessibili e collegati alla Natura, oltre al bisogno di far derivare tutte le altre unità di misura necessarie, utilizzando regole logiche. Durante il discorso all'Assemblea del 26 marzo 1791 Condorcet affermò:

Abbiamo ritenuto che non fosse necessario attendere la partecipazione delle altre nazioni, né per decidere sulla scelta dell'unità di misura, né per cominciare le operazioni. Infatti, abbiamo escluso da questa scelta ogni determinazione arbitraria, ammettendo soltanto quegli elementi che appartengono allo stesso modo a tutte le nazioni. Dunque non appaiono motivi che diano adito al rimprovero di aver voluto ostentare una sorta di preminenza. In una parola, se la memoria di questi lavori dovesse cancellarsi, se ne restassero soltanto i risultati, essi non ci offrirebbero niente che possa servire a far conoscere quale nazione ne ha concepito l'idea e ne ha realizzato l'esecuzione. (citazione in Guedj, 2001, 38)

Si pensò che l'unità di base più appropriata fosse la lunghezza.

L'Accademia delle Scienze francese creò diverse commissioni che svolsero le ricerche e proposero dei rapporti il 27 ottobre 1790 e il 19 marzo 1791. Il primo di questi rapporti accoglieva le raccomandazioni e sollecitava l'adozione di un sistema decimale. Il secondo rapporto prendeva in considerazione diverse alternative possibili per definire l'unità di lunghezza e consigliava l'adozione di un'unità corrispondente a un decimilionesimo di distanza sulla superficie della terra dal Polo Nord all'Equatore. A questa unità venne dato il nome di "metro", che deriva dalla parola greca *metron*, che, a sua volta, significa "una misura". L'unità della massa sarebbe stata rappresentata dalla massa d'acqua necessaria a riempire un volume corrispondente a quell'unità. L'unità del tempo sarebbe stata calcolata in base ai battiti di un pendolo che avesse la lunghezza di un'unità [...] l'idea di porre un insieme costituito dal più piccolo numero possibile di unità di base come fondamento per la derivazione di tutte le altre unità di misura richieste dalla società, fa parte oggi del nostro moderno sistema di unità di misura [...] (McCoubrey, 1983, 588)

L'unità di massa adottata fu il *chilogrammo*, definito come la massa di un decimetro cubo di acqua distillata alla temperatura della sua massima densità (3,98 °C). Il comitato decise infatti che l'unità di peso (massa), sarebbe equivalsa alla quantità di acqua contenuta in un cubo il cui lato corrispondesse a un centesimo del metro che ancora non era stato individuato. In tal modo il peso di un centimetro cubo di acqua distillata fu chiamato *grammo*. Era noto che il peso di un certo volume d'acqua variava in base alla temperatura. Inizialmente si decise di utilizzare la temperatura dell'acqua in cui il ghiaccio inizia sciogliersi (0° C nella scala moderna). In seguito, si ritenne necessario cambiare quella temperatura e di sostituirla con quella in cui l'acqua raggiunge il massimo della sua densità, cioè circa 4° C. (Sebbene possa sembrare strano, l'acqua è più densa a quella temperatura di quanto non lo sia a temperature inferiori a 0° C).

Le proposte del comitato furono subito accettate dall'Assemblea Costituente nel 1791. Successivamente venne adottato come unità di capacità o di volume il *litro*, ovvero il volume di un chilogrammo di acqua distillata a 3,98 °C, che risultò essere pari a 1,000028 dm³. Era nato in questo modo (e fu istituito poi con decreto legge del 7 aprile 1795) il *Sistema Metrico*

Decimale (SMD). Con la rapidità tipica dei tempi in cui tutto cambia velocemente, l'Assemblea procedette ad attuare le raccomandazioni del comitato dell'Accademia.

E' così quindi che *fu definito per la prima volta in maniera ufficiale il metro, come la frazione $1/10^7$ dell'arco di meridiano terrestre dal polo all'equatore*. Il rapporto dell'Accademia Francese del marzo 1791 raccomandava anche un metodo per determinare il modello per l'unità di base di lunghezza. Due astronomi e topografi furono nominati per affiancare Borda sulla misurazione della lunghezza di un quadrante di meridiano (come già introdotto): J. B. J. Delambre e P. F. A. Méchain. Non vi fu bisogno di dividere in triangoli un intero quadrante partendo dal Polo Nord fino all'Equatore: i tre scienziati scelsero un settore pari a circa un nono di quadrante (10 gradi di latitudine) che si estendeva da Dunkerque, sulla Manica, fino ad una località situata nei pressi di Barcellona, sulla costa meridionale della Spagna. Questa misurazione infatti, associata ad accurate osservazioni astronomiche nelle due città, permetteva di calcolare la lunghezza dell'intero quadrante del meridiano dal Polo all'Equatore.

Uno dei vantaggi della scelta era che entrambe le estremità dei settori erano a livello del mare. Questo lavoro durò dal 1792 al 1799. I ricercatori incontrarono ostacoli di varia natura, alcuni divertenti altri drammatici (*vedi per i dettagli, anche tecnici, di questa importante vicenda Guedj, 2001, e Alder, 2002*), ma le prime informazioni fornite consentirono di stabilire un modello di lunghezza preliminare.

Come già ricordato, le nuove unità di misura furono ufficialmente adottate con obbligo di legge nel 1795. Riporto gli articoli più significativi di quello storico provvedimento.

ART.II. *Non vi sarà che un solo tipo o modello di pesi e misure per tutta la Repubblica; e questo tipo sarà un regolo di platino sul quale sarà tracciato il metro che è stato adottato come unità fondamentale di tutto il sistema delle misure.*

Questo tipo sarà eseguito colla massima precisione, giusta le esperienze e le osservazioni dei commissari incaricati della determinazione, e sarà depositato presso il Corpo Legislativo, in un col processo verbale delle operazioni che avranno servito a determinarlo, affinché possano essere verificati in ogni tempo.

ART.III. *In ogni capoluogo di distretto sarà mandato un esemplare conforme al campione prototipo di cui sopra, ed inoltre un modello di pesi esattamente dedotto dal sistema delle nuove misure. Questi modelli serviranno alla fabbricazione di tutte le misure adoperate negli usi dei cittadini.*

ART.IV. *L'estrema precisione che sarà data al campione di platino, non potendo influire sull'esattezza delle misure d'uso comune, coteste misure continueranno ad essere fabbricate secondo la lunghezza del metro adottata dagli anteriori decreti.*

ART.V. *Le nuove misure saranno quindi distinte col soprannome di repubblicane; la loro nomenclatura è definitivamente adottata come segue.*

Si chiamerà:

Metro, la misura eguale alla diecimillesima parte dell'arco del Meridiano terrestre compreso fra il polo boreale e l'equatore;

Ara, la misura di superficie pei terreni, eguale ad un quadrato di dieci metri di lato.

La nuova ricerca fu completata nel novembre del 1798 e, sulla base delle definizioni, la costruzione dei modelli definitivi per la lunghezza e la massa venne completata nel giugno del 1799. Il 22 giugno 1799 i prototipi del metro e del chilogrammo furono presentati al Consiglio degli Anziani e dei Cinquecento. Giustamente Napoleone affermò, riferendosi al sistema metrico decimale: «*Les conquêtes passent, mais ces opérations restent*».

Il decreto che stabiliva le nuove misure di lunghezza, peso e capacità definiva anche una nuova unità monetaria: il franco. Unificazione di misure, unificazione di moneta, sistema decimale per entrambi.

Fu solo dopo molti anni che vennero adottate anche l'unità di tempo, *il secondo*, definito inizialmente come *la frazione $1/86400$ della durata del giorno solare medio* (scartata l'idea di definire l'unità di tempo in base ai battiti di un pendolo lungo un metro, con la scoperta che l'accelerazione di gravità g cambia a seconda di alcune condizioni) e l'unità di temperatura, il

grado Celsius, definito come la centesima parte dell'intervallo compreso tra i punti di solidificazione (0 °C) e di ebollizione (100 °C) dell'acqua alla pressione di 1 atm. Per quanto riguarda il giorno solare medio, ricordo solo che è pari alla media di tutti i valori che assume durante l'anno il giorno solare vero. Esso è il giorno che avrebbe la terra se si muovesse con velocità angolare costante intorno al sole in un'orbita circolare e avesse il suo asse di rotazione perpendicolare a quest'orbita. Il giorno solare medio si divide a sua volta in 24 ore medie, un'ora in 60 minuti, un minuto in 60 secondi.

La disputa su come misurare il tempo in effetti si era protratta per un lungo periodo. Come già visto, la nuova filosofia della misura era basata su due cardini: il sistema decimale e la natura. La natura come legittimità, il sistema decimale come effettività. La misura dello spazio si fondava sulla terra stessa: e perché la misura della durata non si sarebbe dovuta ancorare anch'essa al corso della natura? E il sistema decimale, che quantificava l'uno, avrebbe registrato l'altro. C'erano cento centimetri in un metro, perchè non inserire cento minuti in un'ora? Ma per questo sarebbe stato necessario distruggere e ricostruire tutti gli orologi esistenti. E ciò non fu considerato realistico neppure dai rivoluzionari! (vedi Guedj, 2001).

Napoleone non mostrò mai particolare entusiasmo per la riforma metrica in quanto tale. Dall'inizio del suo governo come Primo Console fino al 1812, l'anno del suo fallito tentativo di diventare anche dittatore della Russia, il sistema metrico ebbe un ruolo in qualche modo ambiguo in Francia. Fu usato da scienziati, uomini di cultura e burocrati e, grazie al sistema dell'istruzione pubblica unificato e rigidamente controllato, una nuova generazione di alunni si familiarizzò man mano con le sue unità e le sue basi teoriche. Ma la gente comune, negli scambi commerciali quotidiani, continuò ad utilizzare le vecchie unità, ben più note, quali *pieds, pouces, livres, bosseaux* e tante altre. Solo nel 1837 la Francia abolì tutte le unità non metriche e impose multe nel caso fossero ancora adoperate.

Di per sé il sistema metrico non ha un particolare valore. Le misure primitive, come in generale tutte quelle esistenti fino agli inizi del capitalismo, hanno un carattere significativo, significano cioè qualche cosa, esprimono qualcosa di umano, legato alla persona umana o alle condizioni della sua vita e del suo lavoro. Il sistema metrico no.

E non è affatto vero che sia naturale e facile da usare.

Tutto il nostro modo di pensare in termini quantitativi si fonda sul sistema decimale. Esso ci appare perfetto nella sua semplicità e incredibilmente facile da usare.

Eppure [...] tale sistema apparve alle masse incredibilmente difficile.

Già Leibniz aveva dimostrato, in verità, che non era tanto il sistema decimale a rivelarsi così perfetto, quanto l'invenzione della cifra «zero», e che è possibile costruire un sistema altrettanto o persino più perfetto basandosi su raggruppamenti per otto o per dodici. Ma non si tratta adesso di questo.

Quando si parla di tali problemi, si sente spesso dire che il sistema decimale è «privilegiato dalla natura», dal momento che l'uomo incolto conta sulle dita e queste sono per l'appunto dieci. Chi dice una cosa del genere è da compatire. Personalmente io non ho dieci, ma venti dita. I nostri interlocutori si dimenticano delle altre dieci, perché nella vita quotidiana esse sono per noi, diciamolo francamente, di difficile accesso. Ma tali non erano per coloro che un tempo andavano scalzi o in sandali e stavano per lo più seduti «alla turca». Al contrario: era più facile contare sulle dita dei piedi, perché con una stessa mano si poteva contare fino a dieci.

Non deve quindi stupirci se, nonostante questo apparente fondamento «naturale», il raggruppamento decimale si incontra relativamente di rado presso le popolazioni primitive. Più di frequente si incontra invece la numerazione per venti. (Kula, 1987, 90)

Dal punto di vista storico e sociale però il sistema metrico decimale segna una tappa importantissima dell'umanità verso l'obiettivo di un linguaggio comune globale, per la comprensione, la comunicazione e la collaborazione reciproca.

2.6 L'Ottocento e il Novecento

Nel XIX secolo si consolidò una stretta unione tra scienza e tecnologia. La seconda rivoluzione industriale infatti si avvale in maniera decisiva del contributo della scienza (fisica, chimica, biologia, mineralogia) e delle sue applicazioni tecnologiche.

Le tappe più significative riguardanti il problema della standardizzazione delle misure in questo secolo possono essere così riassunte (vedi Fazio, 1995, Kula, 1987 e Klein, 1988).

Nel 1816 Belgio, Olanda e Lussemburgo adottarono il SMD. Nel 1832 Gauss propose un sistema basato su millimetro, milligrammo e secondo. Nel 1849 anche la Spagna adottò il SMD. Nel 1863 Kelvin propose un sistema metro, grammo, secondo.

In Germania la riforma metrica entrò in vigore nel 1863; seguirono in breve tempo l'Austria e la Cecoslovacchia (1871) e l'Ungheria (1874). Negli stati dell'Europa orientale e nei paesi baltici il metro arrivò con la conquista dell'indipendenza: in Serbia nel 1863, in Romania nel 1883, in Bulgaria nel 1888, in Polonia nel 1919, nell'Unione sovietica nel 1918 (quindi sin dagli inizi!), in Jugoslavia ugualmente nel 1919, in Lituania e in Lettonia nel 1920. Ad eccezione della Cecoslovacchia, negli altri paesi l'introduzione del sistema metrico fu facilitata dal fatto che le vecchie misure abbandonate rappresentavano per le popolazioni il simbolo dell'occupazione straniera.

Lo stesso significato ebbe la riforma anche in altri paesi con situazioni e regimi totalmente diversi: come in Giappone, dove il metro entrò in vigore nel 1921, o in Cina, dove il sistema metrico venne adottato subito dopo la vittoria della rivoluzione, o ancora in India, dove la decisione fu presa, sia pure con qualche incertezza, dopo aver raggiunto l'indipendenza.

Passò molto tempo prima che il carattere internazionale del sistema metrico trovasse una sua forma organizzativa. Ciò sarebbe avvenuto in una conferenza tenuta a Parigi che si concluse l'8 maggio 1875 con una convenzione internazionale e con la creazione, a spese di tutti i partecipanti, di un ufficio internazionale dei pesi e delle misure a Parigi. La convenzione fu sottoscritta in un primo momento da Russia, Germania, Impero austro-ungarico, Belgio, Brasile, Argentina, Danimarca, Spagna, Stati Uniti, Francia, Italia, Perù, Svezia, Norvegia, Svizzera, Turchia e Venezuela. Ma ciò aveva avuto una lunga preparazione. Nel 1869 il governo francese aveva proposto la Commissione Internazionale del Metro per la costruzione dei campioni internazionali, che tentò di riunirsi nel 1870. La riunione andò però deserta per lo scoppio della guerra tra Francia e Germania. Nel 1873 il governo francese decise di convocare di nuovo a Parigi una conferenza diplomatica sui problemi della metrologia. Nel 1875 infine avvenne la firma della Convenzione del Metro e la nascita dell'*Ufficio Internazionale dei Pesì e Misure* (BIPM, Bureau International des Poids et Mesures) come organo scientifico permanente con sede a Parigi. Furono contemporaneamente creati la *Conferenza Generale dei Pesì e Misure* (CGPM) e il *Comitato Internazionale dei Pesì e delle Misure* (CIPM).

Nel 1881 avvenne l'adozione del sistema c.g.s. (in cui le unità fondamentali della meccanica sono il centimetro, il grammo e il secondo) al I Congresso Internazionale di Elettricità (tale sistema, completato poi con le due versioni elettrostatica ed elettromagnetica, fu usato prevalentemente dai fisici, essendo le sue unità meccaniche troppo piccole per le esigenze industriali). Nel 1889 la I CGPM ufficializzò i nuovi campioni internazionali in platino-iridio da distribuire ai paesi membri della Convenzione. Nel 1893 il IV Congresso Internazionale di Elettricità di Chicago adottò le unità internazionali, definite in funzione delle unità c.g.s. elettromagnetiche. Si decise anche che l'Ohm (unità di resistenza) fosse definito come la resistenza offerta ad una corrente continua da una colonna di mercurio lunga 106.3 centimetri

con una massa di 14.4521 grammi, con sezione uniforme e una temperatura di zero gradi centigradi.

Il campione artificiale del metro verrà sostituito da un campione naturale, il metro ottico, definito come un multiplo della lunghezza d'onda della luce emessa dall'isotopo 86 del kripton solo nel 1960. In quella occasione l'undicesima CGPM ribattezzerà il sistema metrico con il nome di *Sistema Internazionale* (S.I.). Nel 1983 la 17ª CGPM ridefinirà ancora una volta il metro come la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un ben definito intervallo di tempo. Anche la definizione dell'unità di tempo, il secondo (definito inizialmente, come visto, come la frazione 1/86400 della durata del giorno solare medio) fu poi rivista. *Vediamo brevemente come si è arrivati a queste nuove definizioni.*

La necessità di disporre di campioni rigorosamente invariabili, riproducibili e universali spinse i primi studiosi di metrologia, come abbiamo visto, a ricercare tra le caratteristiche della Terra qualcosa che si prestasse allo scopo. Successivamente, essendosi scoperte variazioni di entità non trascurabile nelle caratteristiche di forma e di moto della Terra, fu la fisica atomica a suggerire per alcune delle grandezze fondamentali l'adozione di campioni atomici *di elevata precisione*. Già nel 1870 Maxwell sottolinea che le lunghezze d'onda, i periodi di vibrazione e le masse dei sistemi atomici danno ben altre garanzie di eternità, invarianza, identità e disponibilità delle analoghe grandezze relative a sistemi macroscopici.

Piuttosto recentemente è stato scoperto che i cristalli di quarzo possono essere tagliati in modo tale da risuonare a precise frequenze di oscillazioni elettriche. Gli orologi meccanici, corretti e controllati attraverso l'interazione tra cristalli e oscillazioni elettriche, hanno portato a numerosi progressi all'interno della strumentazione utilizzata per misurare il tempo.

E' ormai risaputo che sotto certe condizioni le molecole emettono radiazione elettromagnetica a frequenze fisse. La radiazione appare come una linea visibile sullo spettro all'incirca a 5×10^{14} cicli per secondo (cps). Se si trova il metodo per contare tali cicli, è possibile creare un orologio atomico. Ciò non è stato fatto per la luce visibile perché le frequenze sono troppo alte, ma linee spettrali invisibili all'occhio nudo esistono per le onde di radio a lunghezza d'onda corta -circa un centimetro (0,4 pollici)- chiamate *microonde*. Per una lunghezza d'onda di 3 centimetri (1,2 pollici) la frequenza è di circa 10^{10} cps. Gli apparecchi per generare microonde e per contare i cicli divennero disponibili intorno al 1940.

Durante la Seconda Guerra Mondiale infatti, lo sviluppo di radar sofisticati e di circuiti a microonde ebbe grande impulso e ciò aumentò le possibilità di controllo sulle oscillazioni ad alta frequenza. Tali oscillazioni, provocate dell'uomo e identiche a quelle delle onde radio corte, furono sintonizzate in modo da corrispondere a specifici cambiamenti di energia nelle molecole e negli atomi. Questi cambiamenti furono accuratamente misurati nei termini delle oscillazioni elettromagnetiche che emettevano o assorbivano. *Ogni oscillazione, che può essere mantenuta ad una frequenza uniforme, può servire come base per un orologio. Questo è vero sia nel caso in cui l'oscillazione sia quella di un pendolo o quella di una molecola che emette energia alla frequenza determinata dalla sua struttura.* Nei successivi e più efficaci apparecchi realizzati per misurare il tempo furono utilizzati fasci di atomi al posto di molecole. Un orologio atomico combina un orologio elettronico con un oscillatore atomico. La radiazione elettromagnetica viene prodotta quando un atomo o molecola cade da uno stato più elevato di energia (E_1) ad uno stato più basso (E_2).

Il migliore tra questi strumenti moderni si serve degli atomi di un comune isotopo di Cesio, noto come Cesio 133. Il Cesio 133 ha un nucleo composto da 54 protoni, 79 neutroni (particelle prive di carica), e attorno, disposti in orbite, 54 elettroni, il più esterno dei quali è solo nella sua orbita. Nel 1955 è stato creato un oscillatore atomico ad altissima precisione al Laboratorio Nazionale di Fisica a Teddington in Inghilterra, usando un raggio d'atomi di cesio (nonostante tali orologi "da raggi di cesio" siano complessi in teoria, sono stati prodotti commercialmente

da varie ditte in versioni altamente precise e leggere; la frequenza rimane stabile intorno a circa ± 2 parti in 10^{12} , e la frequenza assoluta è corretta per circa ± 5 parti in 10^{12}).

Un orologio moderno al cesio, accuratamente costruito e con un'adeguata manutenzione, può misurare il tempo con una stabilità tale che se dovesse essere utilizzato per un intero secolo, la deviazione rispetto all'ora precisa non sarebbe più grande di 3 millisecondi. Gli standard di cesio più precisi si trovano nei laboratori nazionali; le loro incertezze sono stimate in alcune parti su 10^{15} . Può essere anticipato che *i nuovi sviluppi in orologi che impiegano atomi o ioni intrappolati o raffreddati stanno portando a ulteriori rilevanti miglioramenti.*

Nel 1967 la XIII Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure ha sostituito così con l'atomo di Cesio 133 tutti gli altri corpi celesti che precedentemente erano stati utilizzati come base dell'unità di tempo.

Ecco la frase, davvero storica, che fu pronunciata in quell'occasione: "Il secondo equivale alla durata di 9.192.631.770 periodi (o cicli) della radiazione che corrisponde alla transizione tra due livelli iperfini dell'atomo di cesio 133."

Veniamo all'unità di lunghezza. Dalla fine del XVIII secolo fino alla seconda metà del XX, il metro è stato sempre una particolare barra di metallo, conservata accuratamente e adeguatamente protetta in una località selezionata della Francia. L'ultima di queste barre di metallo, che rappresenta fisicamente il metro, è ancora oggi conservata in una cripta di Sèvres, poco lontano da Parigi. Altre copie, fatte con precisione e scrupolosamente protette di questo unico metro, sono conservate presso uffici e laboratori preposti di ogni nazione che aderisce al Trattato del Metro (analogamente sono state effettuate delle copie del chilogrammo, preservato anch'esso nella cripta di Sèvres).

Ovviamente gli sviluppi della fisica atomica permisero anche di elaborare dei metodi che erano di gran lunga più esatti della misurazione della distanza tra i due estremi di una barra di metallo. Dopo uno studio intensivo della luce monocromatica emessa da lampade che usano sostanze diverse, nel 1960, l'XI Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure, scelse una radiazione di color rosso-arancio emessa dall'atomo di krypton 86 e definì il metro con queste parole: "Il metro è quella lunghezza che equivale a 1.650.763,73 lunghezze di onda nel vuoto della radiazione che corrisponde alla transizione tra i livelli 2 p alla 10 e 5 d alla quinta dell'atomo di krypton 86."

Un ulteriore passo avanti nella ricerca di universalità fu realizzato poi su un suggerimento che aveva avanzato sin dal 1889 il fisico tedesco Planck. *Egli suggerì di basare il sistema di unità su valori assegnati per convenzione ad alcune costanti fondamentali della fisica* (ad esempio la velocità della luce, la costante di Planck, la costante di Avogadro) che riassumono le informazioni più profonde di quanto noi conosciamo sulla realtà. La prima (parziale) realizzazione del progetto di Planck è avvenuta così nel 1983: l'invarianza della velocità della luce è stata adottata quale principio fondamentale *assegnando ad essa il valore convenzionale* $c=299792458$ m/s. Il metro è ora di fatto un'unità derivata: è il tragitto percorso dalla luce nella frazione $1/299792458$ di secondo.

Una delle proposte discusse attualmente è appunto definire tutte le unità fissando per ciascuna di esse un valore convenzionale per una costante fondamentale misurata con altissima precisione (vedi Mana, 1994). In un simile sistema il secondo sarà definito da un fenomeno naturale (probabilmente il periodo di una transizione atomica oppure della rotazione di una pulsar) mentre tutte le altre unità saranno derivate assegnando convenzionalmente il valore di alcune costanti fondamentali. *Per esempio è possibile che il chilogrammo sia ridefinito come un grande multiplo della massa dell'atomo di qualche elemento designato.* L'attuazione di questo programma richiede tuttavia ancora molti anni in quanto una costante universale diventa utilizzabile ai fini metrologici solo se l'unico limite all'incertezza della sua misurazione è costituito dall'incertezza della realizzazione dell'unità che si intende ridefinire.

C'è però da dire che, oltre i problemi tecnici, lo stesso concetto di "costante universale" può aprire una discussione di ordine teoretico. Secondo alcuni, infatti, la *costanza* delle costanti universali della natura sarebbe solo presunta, e si baserebbe soprattutto su una nostra *fede* nell'uniformità della natura stessa.

Malgrado le precedenti considerazioni dimostrino come sia ora ancora più difficile sostenere *una presunta universalità ed oggettività dei campioni di misura*, si può però affermare in maniera convincente che

molta strada si è fatta dalle misure così ricche di significato umano dell'epoca feudale. La «disumanizzazione» di uno strumento così strettamente legato alla vita quotidiana di ogni persona, qual è il metro, ha raggiunto il suo apice. Ma al tempo stesso le comunicazioni e la cooperazione fra gli uomini possono, per questa via, svilupparsi più efficacemente e giungere a risultati più qualificanti. (Kula, 1987, 134)

Per capire come sia stato possibile giungere a questi risultati credo vada di nuovo messo in luce che il processo di standardizzazione dei sistemi di misura è stato un aspetto, certo il più importante, di un *processo più generale di normalizzazione delle comunicazioni* volto ad una vera e propria *razionalizzazione della società*.

Consideriamo che dalle più sofisticate unità di misura all'oggetto più insignificante, come il cacciavite cruciforme, fino ad arrivare alle tecniche più recenti di normalizzazione internazionale nella gestione delle imprese (che si tratti della certificazione di qualità o dell'ambiente), la normalizzazione tecnologica impregna la nostra vita quotidiana, gli oggetti che ci circondano, ma soprattutto il nostro modo di lavorare, di produrre, di viaggiare e di vivere nella società.

La ragione dell'uomo occidentale, *le cui radici sono certo da ricercare in tempi ben più remoti*, dal momento in cui si è affermata la società moderna si è però sempre più esplicita in occasione del lavoro che svolge, nel senso cioè che la razionalità si esprime pienamente nei tentativi che fa l'uomo per rendere sempre più produttivo il suo lavoro.

BIBLIOGRAFIA

Agnoli P., Bosco F., Canavesio F., Spinelli M., Vecchione M., *Studio comparativo di apparati per servizi Audiotex, Rapporto tecnico 93170*, Torino, Centro Studi e Laboratori Telecomunicazioni, 1993

Alder K., *La misura di tutte le cose*, Milano, Rizzoli, 2002

Bernardini G., *Fisica Generale Parte I*, Roma, Veschi, 1974

Campbell N. R., *Foundations of Science*, Dover, New York, 1957

Cromer A., *L'eresia della scienza*, Milano, Cortina, 1996

D'Errico F., *Le prime informazioni registrate*, in AA.VV., *Dal segno alla scrittura*, Le Scienze Dossier n.12, Milano, Le Scienze Spa, Estate 2002, p.4-9

Dilke O.A.W., *Reading the past. Mathematics and measurement*, London, British Museum Press, 1993

Fazio M., *SI, MKSA, CGS & CO. Dizionario e manuale delle unità di misura*, Bologna, Zanichelli, 1995

Guedj D., *Il Meridiano*, Milano, Longanesi, 2001

Hume D., *Ricerche sull'intelletto umano e sui principi della morale*, a cura di Dal Pra M., Bari, 1957

Klein H.A., *The science of measurement*, New York, Dover Publications, 1988

Klima B., *Il periodo di homo sapiens sapiens fino agli inizi della produzione del cibo: quadro generale*, in AA.VV., *La Storia dell'umanità*, Novara, Gedeo/Unesco, 2002, Vol. 1, pp. 193-203

Kula W., *Le misure e gli uomini dall'antichità ad oggi*, Bari, Laterza, 1987

Mandel J., *The Statistical Analysis of Experimental Data*, Dover, New York, 1964

McCoubrey A. O., *Measures and measuring systems*, in AA.VV., *Encyclopedia Americana*, Danbury, Grolier, 1983, Vol.18, pp 584-597

Menninger K., *Number Words and Number Symbols*, Boston, MIT Press, 1969

Mondini A., *Il sistema metrico*, in AA.VV., *Storia della tecnica*, Torino, Utet, 1977, pp. 332-336

Reineke W., *Dalla conoscenza empirica agli inizi del pensiero scientifico*, in AA.VV., *La Storia dell'umanità*, Novara, Gedeo/Unesco, 2002, Vol. 3, pp. 57-62

Russo L., *La rivoluzione dimenticata. Il pensiero scientifico greco e la scienza moderna*, Milano, Feltrinelli, 2001

Toulmin S., *The Philosophy of Science, An Introduction*, Harper, New York, 1960