

La metrologia nello sviluppo delle attività umane

RAFFAELE FEDELE LAITANO

ENEA
Istituto Nazionale di Metrologia delle
Radiazioni Ionizzanti

Osservatorio su

La domanda di accuratezza e di affidabilità nei diversi settori di misura è crescente nel tempo. Questa domanda, a sua volta, richiede con continuità lo sviluppo di nuovi campioni sempre più accurati e di nuove procedure di taratura. In questo articolo viene presentato il ruolo che l'ENEA svolge come Istituto Metrologico Primario nel settore delle radiazioni ionizzanti. Altri articoli, relativi all'attività dei Centri ENEA come centri secondari di taratura (SIT) nei diversi settori di interesse, saranno presentati nel prossimo numero della rivista

Metrology and its impacts on human activities certification

The growing needs of accuracy required for measurements in most sectors of human activities makes metrology a prerequisite for improving industrial production as well as human health and environmental protection. This article outlines the metrology organisation at the international level and describes role and activities of the National Institute of Ionising Radiation Metrology (INMRI), the Italian national metrological institute. The INMRI is an institute belonging to ENEA that has the task to develop and maintain the national primary standards for ionising radiation measurement. In its forthcoming issue this journal will present the activities carried out by some laboratories operating at ENEA as secondary calibration centres in various fields of measurement

1. Introduzione

Molti aspetti delle attività umane sono legati ai risultati di misurazioni. Tali risultati sono infatti usati per attuare decisioni in relazione a: processi produttivi, attività commerciali, attività scientifiche e tecnologiche, problemi sanitari e ambientali ecc.. In concomitanza con lo sviluppo delle diverse attività, la tipologia delle misure è stata nel corso del tempo in continua evoluzione: dalle misure riguardanti le dimensioni e la massa degli oggetti, diffuse sin dalle epoche più remote, alle misure del tempo e man mano di tutte le altre grandezze relative ai fenomeni dinamici, termici, elettrici ecc.. Nei periodi più recenti sono poi diventate sempre più importanti le misure di ulteriori grandezze come quelle legate ai parametri fisiologici umani, agli agenti nocivi nell'ambiente ecc.. Con l'evoluzione delle attività umane non è però solo aumentato il numero di grandezze da misurare ma si è costantemente evoluta soprattutto la qualità delle misurazioni. Il continuo progredire della tecnologia e dello sviluppo ha infatti richiesto, e continua tuttora a richiedere, sia una sempre maggiore accuratezza nei vari metodi di misura sia il continuo sviluppo di metodi innovativi per nuove tipologie di misura. Come sarà illustrato nel seguito, questo processo è reso possibile dallo sviluppo della metrologia: la scienza delle misure, la quale si occupa in particolare della definizione (e della evoluzione) delle unità di misura, dello studio e della realizzazione dei loro campioni, dello sviluppo dei metodi di misura e dei metodi di taratura degli strumenti usati per effettuare le diverse possibili misurazioni. Nel passato i campioni delle unità di misura erano diversi fra paesi (e anche fra regioni dello stesso paese) differenti per connotati socio-economici e amministrativi: una situazione questa, sempre meno compatibile con il progredire degli scambi industriali e commerciali. La necessa-

ria uniformità dei vari sistemi campione è oggi possibile grazie al fatto che gli istituti metrologici nazionali, aventi il compito di fare ricerca sui metodi di misura e di sviluppare i relativi campioni di riferimento, hanno costituito negli anni recenti una struttura interconnessa a livello internazionale. Grazie a tale struttura la confrontabilità e l'accettabilità internazionale dei risultati delle misure sono quindi oggi rese possibili.

Evidenziare i principali nessi fra sviluppo e metrologia unitamente alla descrizione della struttura metrologica nazionale e internazionale costituisce lo scopo di questa rassegna. In questo quadro, sarà illustrato in particolare il ruolo istituzionale che l'ENEA svolge a tal riguardo. L'ENEA ha infatti per l'Italia un'importante funzione in campo metrologico poiché svolge, tramite il suo Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti, il ruolo di Istituto Metrologico Primario, cioè di organismo cui è demandato per legge il compito di sviluppare e mantenere sempre operativi i campioni nazionali di misura, nel settore delle radiazioni ionizzanti.

2. Origini ed evoluzione della metrologia

La capacità di effettuare misure affidabili è stata sempre una delle condizioni per lo sviluppo delle attività umane sin dalle più antiche società strutturate. Vi è inoltre stata sempre consapevolezza che una condizione di base per l'affidabilità del risultato di una misura è che il mezzo di misura usato sia riferibile a un sistema campione ben definito. La riferibilità di una misura esige che lo strumento usato per quella misura debba essere "tarato" rispetto a un campione di riferimento. Il campione di misura di una qualsiasi grandezza misurabile è necessario per realizzare l'unità di misura con cui si intende esprimere quella data grandezza. Affinché i risultati delle misure siano immediatamente com-

prensibili e confrontabili nell'ambito di una comunità di utenti, è poi necessario che questi campioni siano concordati e accettati come riferimento univoco entro quella data comunità. In assenza di un tale campione di riferimento le misure dovrebbero essere di volta in volta espresse in unità stabilite arbitrariamente, con l'impossibilità di valutare in modo diretto e oggettivo l'entità della grandezza misurata e con conseguenze di contenziosi facilmente immaginabili. Per questo motivo, sin dalle più antiche società strutturate è vivo l'interesse nel definire e sviluppare mezzi e procedure di misura unitamente ai primi rudimentali campioni di riferimento. La moderna scienza delle misure e dei campioni di riferimento - la metrologia - vede infatti le sue origini già nelle antiche civiltà mesopotamica, egiziana, cinese, greca (per citare quelle più largamente note). In queste civiltà ritroviamo infatti autorità preposte alla definizione dei campioni e delle unità di misura cui riferire in modo univoco le misurazioni effettuate nell'ambito dei propri territori. L'importanza della correttezza dei risultati di misura è stata sempre ritenuta elevata sin dalle più antiche società organizzate. Nell'antico Egitto il faraone puniva con una pena (che, nel caso di misure attinenti alla costruzione delle piramidi, poteva anche essere quella capitale) chi forniva risultati sbagliati per non

aver effettuato, nelle misure di lunghezza, la taratura periodica dei propri mezzi di misura rispetto al campione di riferimento di allora¹, il "cubito reale", costituito da un blocco di granito di circa 50 cm (figura 1). Fino agli albori dell'età industriale, l'interesse delle misure si concentra prevalentemente nelle misure delle masse, delle capacità volumetriche e delle lunghezze. Con il progredire dello sviluppo scientifico e tecnologico, industriale e commerciale, l'interesse pratico si estende man mano a misure di sempre più nuove e a più numerose grandezze (nei settori meccanico, elettrico, termodinamico ecc.) e quindi alla realizzazione dei rispettivi campioni per la taratura degli strumenti di misura di tali grandezze. L'intensificarsi degli scambi ha nel tempo attivato l'esigenza di uniformare entro regioni con confini sempre più ampi i campioni di misura definiti in ciascun Paese. Alla fine del secolo XIX, in una fase di grande crescita dello sviluppo industriale, i paesi più industrializzati ritennero ormai indifferibile l'attuazione di un accordo internazionale nel settore. E' da questa esigenza che venne siglato a Parigi nel 1875 un accordo diplomatico, *"La Convention du Mètre"*, grazie al quale si concordò fra gli iniziali 17 paesi firmatari (fra cui l'Italia) di adottare come comune sistema di misura il "Sistema Metrico Decimale". Il nuovo sistema era



Figura 1

Papiro egiziano in cui è raffigurato, in basso al centro, il "Cubito Reale Egiziano", il campione cui venivano riferite le misure di lunghezza nell'Egitto dei faraoni a partire da circa il 3000 a C.¹

Figura 2
Esemplare di uno dei primi campioni del metro a seguito dell'introduzione del Sistema Metrico Decimale in Francia il "18 germinale dell'anno III" (7 aprile 1795)



basato in larga parte sui rivoluzionari cambiamenti delle unità di misura già introdotti in Francia nel 1795 e dai quali, in particolare, era scaturito il metro (figura 2). Il metro fu definito come la decimilionesima parte di un quarto del meridiano terrestre passante per Parigi. Con l'introduzione del sistema metrico venivano abolite in Francia oltre settecento unità di misura (con nomi spesso mutuati da parti del corpo umano: piede, passo, cubito, pollice, spanna, braccio, ecc) differenti, pur a parità di denominazione, nelle diverse località. Nell'ambito della "Convenzione del Metro" viene istituito a Sèvres (Francia) il Bureau International des Poids et Mésures (BIPM) un organismo internazionale² avente il compito di realizzare campioni di misura internazionalmente riconosciuti – fra i più importanti all'epoca, il metro (figura 3) - e di promuovere lo sviluppo della moderna scienza delle misure: la metrologia.

Una successione di eventi conseguenti a questo accordo è la creazione, in ciascun Paese, di istituti metrologici con il compito di sviluppare i campioni nazionali di misura e di confrontarli periodicamente a livello internazionale per assicurare l'uniformità e la comparabilità delle misure. Gli istituti metrologici nazionali nei singoli paesi nascono in tempi diversi, in funzione del proprio livello di sviluppo, a partire dalla Germania, l'Inghilterra e gli USA con i primi istituti metrologici nel mondo: PTB nel 1887, NPL nel 1900 e NBS (oggi NIST) nel 1901, rispettivamente. Agli inizi del secolo XXI i Paesi aderenti alla "Convenzione del Metro" sono 51 (dagli originari 17) e in ciascuno di questi opera un'istituzione metrologica per lo sviluppo dei campioni di

misura. La tipologia dei campioni che realizzano le unità di misura, è andata anch'essa allargandosi nel tempo per soddisfare le crescenti esigenze di accuratezza nella misura di grandezze sempre più numerose. Queste esigenze sono espresse nei più svariati settori dell'industria, del commercio, della tecnologia, della medicina, dell'ambiente ecc.. E' sempre più vasta la quantità di decisioni prese sulla base dei risultati di misurazioni nei più svariati settori. Queste decisioni influenzano in modo diretto settori dell'economia e della salute umana e da esse può dipendere l'esistenza o l'eliminazione di barriere negli scambi internazionali. La riferibilità delle misure a sistemi campione internazionalmente riconosciuti è un requisito essenziale affinché i risultati delle misure siano accettati a livello internazionale. Questo requisito può essere soddisfatto solo a condizione di disporre di una consolidata struttura metrologica operante a livello nazionale e inserita in un contesto internazionale di verifiche e controlli. Dal 1875 - anno in cui si attua il primo accordo internazionale sulla metrologia (v. sopra) - l'organizzazione internazionale della metrologia si è continuamente evoluta fino ad assumere la struttura descritta nello schema in figura 4.

Anche il sistema delle unità di misura e dei campioni si evolve nel tempo. Oggi le unità di misura ufficialmente adottate da tutti i paesi aderenti alla "Convenzione del Metro" sono quelle definite nel "Sistema Internazionale" (SI)³.

Negli anni recenti, con il perfezionamento dei metodi e delle tecnologie di misura, si è consolidata la tendenza ad abbandonare il concetto di campione inteso come oggetto fisico da custodire con grande cura in appositi ambienti controllati. Oggi quasi tutti (e in prospettiva tutti) i campioni delle grandezze fisiche sono invece realizzati mediante rigorose sequenze di misurazioni. Ciò è reso possibile dall'introduzione di nuove definizioni delle uni-

tà di misura delle grandezze fisiche di base, basate essenzialmente su costanti fondamentali della fisica (la velocità della luce nel vuoto, la carica elementare, la costante di Planck, ecc.). Il metro, ad esempio, è stato ridefinito nel 1960 come un multiplo della lunghezza d'onda di una specificata radiazione emessa dal Krypton 86 e nel 1983 (a tutt'oggi) come la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un tempo uguale a $1/299\,792\,458$ di secondo

3. Importanza della metrologia nei diversi settori di attività

Come si è già sopra ricordato, misurare è sempre stato un atto connesso con l'attività umana organizzata. Con il progredire del livello tecnologico, produttivo, commerciale e dei servizi, cresce in ciascun paese anche la necessità di accuratezza nelle misurazioni in settori di attività sempre più vasti.

Ciò è richiesto dall'esigenza di verificare le proprietà tecnologiche e i connotati funzionali che sono sempre più numerosi nei prodotti e nei servizi quando essi evolvono qualitativamente. In una società tecnologicamente sviluppata l'incidenza delle operazioni di misurazione sul costo finale di un prodotto o di un servizio è quindi sempre crescente. L'incidenza delle misurazioni è crescente anche nella vita quotidiana di ciascuna persona in una società sviluppata.

Ciascuno di noi impegna una parte non trascurabile del proprio tempo nell'effettuare direttamente delle misure: l'orario durante il lavoro, gli spostamenti e il tempo libero; i parametri climatici quali la temperatura la pressione e l'umidità; il peso del proprio corpo, ecc.. Ciascuno di noi è inoltre regolarmente interessato al risultato di misurazioni che altri effettuano a nostro carico: i consumi di elettricità, di acqua, di gas, l'ora e la durata delle conversazioni telefoniche, le pesate del negoziante, la velocità della propria auto, ecc..



Figura 3

Esemplare di un campione del metro del secolo scorso (basato sempre sulla originaria definizione del 1795, rimasta in uso fino al 1960) realizzato con una barra di platino-iridio

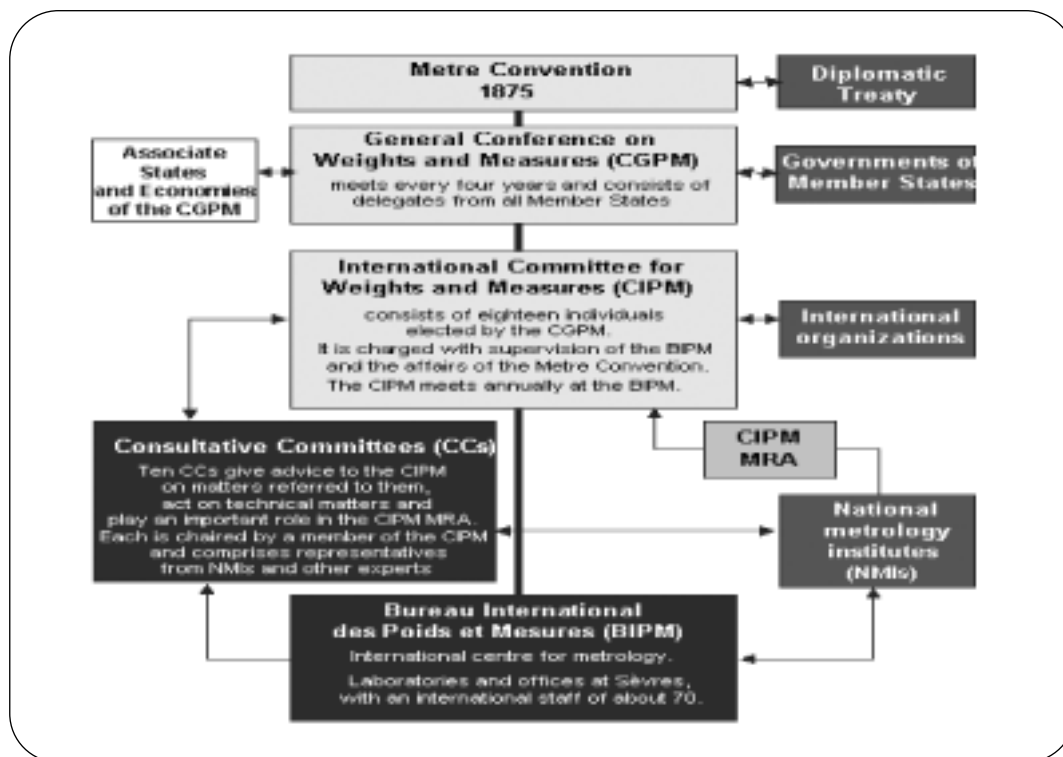
Un ruolo di particolare criticità rivestono poi le misure inerenti alle verifiche sulla salute umana, (le analisi cliniche, le misure della temperatura corporea, della pressione arteriosa ecc.) e alla salvaguardia ambientale (misure dei contaminanti nell'aria e negli alimenti).

In tutti questi casi il risultato della misurazione ha un peso nella fase decisionale successiva alla misura. In un'analisi clinica, ad esempio, a seconda dei valori ottenuti si può decidere (debitamente o indebitamente) di iniziare o arrestare una cura medica, oppure in una misura dimensionale di un componente industriale si può decidere (debitamente o indebitamente) di utilizzare o scartare quel componente. La correttezza della decisione e i costi delle eventuali azioni di rimedio conseguenti a misure errate dipendono dall'affidabilità della misura.

E' utile ricordare che l'incidenza dei costi connessi a misurazioni (controlli qualitativi) nella produzione di manufatti non è trascurabile e può arrivare fino a circa un quarto del loro valore per prodotti a tecnologia avanzata, quali si hanno nell'industria aeronautica e automobilistica. Gli interventi di rimedio in campo sanitario (ad es. le prescrizioni terapeutiche a seguito di analisi del sangue) o in campo ambientale (ad es. le restrizioni nel traffico a seguito di elevate concentrazioni di inquinanti nell'aria) sono strettamente legati ai risultati (talvolta corretti, talvolta errati) di

Figura 4

Organizzazione internazionale della metrologia (www.bipm.org). La General Conference on Weights and Measures (CGPM), costituita da esperti in scienza della misura a livello internazionale elabora i temi scientifici su cui sono basate le decisioni della CGPM. Gli istituti metrologici nazionali (NMI) concorrono alle elaborazioni del CIPM tramite i Comitati Consultivi. Il BIPM è la sede scientifica internazionale dove gli NMI confrontano i rispettivi campioni



misurazioni. I costi di questi interventi di rimedio possono essere molto elevati e sono indebiti se tali interventi sono conseguenti a misurazioni errate. Analoghe valutazioni valgono nel caso dei costi connessi a misure non affidabili attinenti a settori d'attività industriali o commerciali.

L'affidabilità di una misura è legata a diversi fattori, ma in primo luogo dipende dall'affidabilità degli strumenti di misura. A sua volta l'affidabilità di uno strumento di misura dipende dal fatto che esso sia opportunamente tarato.

La taratura di uno strumento di misura è la prima indispensabile operazione che permette di ottenere il valore della grandezza che si vuole misurare (ad es. la temperatura, il tempo, la velocità ecc.) a partire dall'indicazione (ad es. le variazioni di un indicatore numerale o analogico) direttamente fornita dallo strumento di misura. Uno strumento di misura non correttamente tarato fornisce risultati sbagliati e quindi non è affidabile.

La taratura degli strumenti di misura è un'operazione essenziale per la quale è

necessario disporre di specifici campioni di riferimento e di idonei laboratori. Lo sviluppo dei campioni di riferimento e la definizione delle procedure di taratura nei più svariati settori di misura costituiscono il compito principale della metrologia.

La metrologia è una disciplina in continua evoluzione poiché la domanda di accuratezza e di affidabilità nei diversi settori di misura è crescente nel tempo.

Questa domanda a sua volta richiede con continuità lo sviluppo di nuovi campioni (caratterizzati da accuratezze crescenti) e di nuove procedure di taratura.

Ogni 10-20 anni, negli ultimi 50 anni, i requisiti di accuratezza sono aumentati di circa un fattore 10 nei diversi campi di misura attinenti principalmente al settore industriale e a quello della salute e dell'ambiente. Una breve rassegna dei settori di attività dai quali la scienza della misura, la metrologia, riceve continuamente una domanda di crescente accuratezza, sarà utile a quantificare l'impegno che oggi gli istituti metrologici sono chiamati a soddisfare in ciascun settore di misura.

4. L'esigenza di affidabilità nelle misure nei diversi settori di attività

Una domanda di maggiore accuratezza e affidabilità nelle misure si evidenzia da anni sia nel tradizionale settore delle misure elettriche, meccaniche, del tempo, ecc., sia in nuovi settori d'attività: dalla chimica, alle scienze della salute, dell'ambiente ecc.. Le più recenti aree della metrologia sono legate alle necessità di misura nel campo delle nanotecnologie, delle applicazioni laser, delle tecniche optoelettroniche, della caratterizzazione delle proprietà dei nuovi materiali, delle applicazioni mediche delle radiazioni ionizzanti, della specificazione e quantificazione dei contaminanti ambientali (gas e particolato atmosferico) ecc.. Nel seguito sono esemplificati alcuni dei settori dove oggi le esigenze di accuratezza di misura si manifestano maggiormente e per i quali è richiesto o un miglioramento della metrologia tradizionale (in termini di maggiore accuratezza dei campioni esistenti) o lo sviluppo di sistemi metrologici del tutto nuovi (nuovi campioni). Per una rassegna dettagliata sul nesso oggi esistente fra la metrologia e i diversi settori dell'industria e dei servizi si veda il rapporto pubblicato sull'argomento dal BIPM⁴.

4.1 - Stato attuale ed evoluzione della metrologia nel settore industriale

In campo industriale è richiesta una elevata accuratezza delle misure conseguente alle sempre più strette tolleranze imposte (nella fase di costruzione e di utilizzazione) ai componenti e ai sistemi di tipo meccanico ed elettrico/elettronico. Questa richiesta riguarda tutti i tradizionali settori di misura (misure elettriche, dimensionali, di massa, pressione, flusso, umidità ecc.) e quindi i corrispondenti campioni di riferimento. Una crescente evoluzione

qualitativa è richiesta in particolare ai campioni di tempo e frequenza che sono alla base dei sistemi di navigazione spaziale e dei sistemi di posizionamento. Le immagini di oggetti sulla terra fornite dai satelliti hanno risoluzioni sempre più elevate (ormai ben al di sotto del metro), ciò richiede oggi ai campioni di frequenza (necessari per la taratura dei sistemi di posizionamento del tipo GPS ecc.) accuratezze molto elevate. Gli attuali campioni basati sugli orologi atomici al cesio consentono infatti accuratezze dell'ordine di una parte su 10^{15} . Una grande accuratezza è anche richiesta nelle misure di fluidi e in particolare quelle svolte dall'industria petrolifera (petrolio e gas). Date le quantità in gioco, errori di alcune parti su mille possono in questi casi determinare perdite economiche quantificabili in centinaia di milioni di dollari.

La necessità di disporre di adeguati sistemi campione per misure di grandezze quali la forza, la viscosità, l'elasticità, il trasferimento di calore, ecc., o per la caratterizzazione di proprietà quali la granulometria di polveri, il colore, gli odori ecc., costituiscono attualmente un rilevante impegno di ricerca e sviluppo per la metrologia in questi settori.

Un particolare impegno si profila per quella che viene indicata come la "nanometrologia". Da tempo la produzione di manufatti è impegnata con tecnologie che si sono evolute dalle dimensioni micrometriche a quelle nanometriche. Non si tratta tuttavia solo di affrontare un problema di scala ma di tener conto anche di una fenomenologia diversa. Ad esempio la caratterizzazione di una superficie liscia oggi può richiedere analisi dei materiali dove entrano in gioco le strutture caotiche delle superfici quando l'analisi delle strutture viene spinta a livello nanometrico. I metodi di misura sono perciò concettualmente diversi da quelli usati tradizionalmente per un'analisi più "grossolana" della regolarità di una superficie. Nuovi cam-

pioni di riferimento sono perciò necessari a questo scopo se si vuole comprovare (per esigenze industriali, commerciali, scientifiche ecc) con metodi riproducibili e accettati internazionalmente, che un prodotto possiede effettivamente le caratteristiche strutturali ad esso attribuite nominalmente. Le esigenze di misurare -e certificare- piccolissime dimensioni riguardano un numero crescente di applicazioni come la litografia con UV, l'impiego dei nanotubi e dei fullereni, la deposizione di film sottili su vetri o metalli, l'uso di fibre ottiche per telecomunicazioni, "l'electron tunneling", tecniche associate alla micromecanica e alla farmacologia, ecc.⁵.

4.2 - I problemi della riferibilità metrologica nel settore ambientale e sanitario

Le misure fatte per scopi medici e per la salvaguardia ambientale (ad es. le misure di colesterolo nel sangue o di polveri e gas nell'aria, di radiazioni ionizzanti in campo medico e ambientale) sono anch'esse sempre più numerose e di vasta tipologia. Queste misure riguardano in particolare:

- la diagnostica e la terapia medica (ad es. le analisi cliniche in diagnostica e la dosimetria in radioterapia);
- il controllo della presenza di agenti chimici o biologici nocivi negli alimenti o di sostanze estranee nell'organismo umano (antidoping);
- il controllo della presenza di contaminanti chimici o fisici nell'aria o nelle acque (ad es. misura delle concentrazioni di gas nocivi, di particolato, ecc.);
- la verifica della presenza di organismi geneticamente modificati (OGM) negli alimenti;
- la verifica dei livelli di rumore, fumo, vibrazioni, ecc. in ambienti di lavoro o pubblici;
- il monitoraggio del cambio climatico globale mediante la misura (oltre che del-

le temperature) di parametri quali gas serra, ozono ecc.;

- le biotecnologie (biologia cellulare, biochimica, chimica delle proteine, biologia molecolare) nelle diverse aree applicative (medicina, analisi qualitative e quantitative, industria, controlli fiscali e forensi ecc.).

Molte di queste misure (in particolare quelle basate su metodi chimici e chimico-biologici) non hanno ancora la medesima qualità metrologica di quella raggiungibile nella misure di grandezze fisiche (ad es. massa, lunghezza, tempo, ecc.) per le quali si dispone sia di accurati campioni di riferimento sia di consolidate procedure di taratura per gli strumenti usati nelle misure correnti. Per molte misure di tipo chimico non sono sempre disponibili campioni di riferimento, non sempre i possibili sistemi campione sono confrontati a livello internazionale e quindi universalmente accettati come sistemi di riferimento; in altri casi essi non sono ancora univocamente definibili in quanto a tale scopo potrebbero essere seguiti approcci concettuali fra loro diversi. Stante questa situazione, autorità a livello nazionale e internazionale^{6, 7, 8} da tempo sono impegnate a stimolare l'attuazione dei processi di riferibilità per le determinazioni di tipo chimico, con la messa a punto di campioni e di procedure di misura adeguati alle principali nuove esigenze di determinazioni quantitative.

D'altra parte anche per le misure in campo medico e ambientale è necessario avere un'adeguata accuratezza, in termini di riproducibilità, confrontabilità e credibilità dei risultati ottenuti in tempi e in luoghi diversi. Un risultato non affidabile in questo settore di misure può avere infatti non solo conseguenze di ordine sanitario ma anche di natura economica: basti pensare alle implicazioni conseguenti ai blocchi del traffico o alle cure mediche quando questi provvedimenti sono basati su risultati di misure non corretti. Pertanto molta parte

Tabella 1 - Alcuni esempi di analisi di tipo chimico-fisico (per analisi cliniche, o per misure di Contaminanti/sostanze nocive in matrici ambientali e alimentari) per le quali sono iniziati studi di riferibilità metrologica a livello internazionale da parte del BIPM e di Istituti metrologici nazionali⁹

Diagnostica medica	Alimenti	Ambiente	Biotecnologie(*)
Colesterolo nel sangue	Pb nel vino	Cd e Pb nell'acqua potabile	Estrazione del DNA
Glucosio nel sangue	As nei frutti di mare	Gas serra CO ₂ , CH ₄ nell'ambiente	Quantificazione del DNA
Creatina nel sangue	Elementi (e.g, Cu, Cd,Zn) nel vino	Emissioni di SF ₆ e CFC	Quantificazione del rapporto peptidi/proteine
Elementi in traccia (Pb,Se) nel sangue	As, Se, Hg, Pb, metil-Hg nel tonno	Ozono nell'aria	
Ca nel siero	Cd, Zn nel riso	Pb/Cd nei sedimenti	
Droga nell'urina	Gamma HCH/p,p - DDT nel pesce	Metalli negli scarti di miniere rocciose	
Steroidi anabolizzanti nell'urina	Contaminanti organici nelle cozze	Umidità nei combustibili fossili	
Ormoni nel sangue	Metil-mercurio nel salmone	PAH nei terreni e nei sedimenti	
	Elementi in traccia nella farina di soia	Emissioni di SO ₂ in impianti industriali	
	Antibiotici nella carne		
	Ormoni della crescita nella carne	Zolfo nei combustibili	
	Vitamine e minerali	Etanolo in matrici acquose	

La metrologia riguardante le biotecnologie è sempre più importante per la crescente quantità di misure nel settore (9). Il suo obiettivo è di rendere riproducibili, affidabili e confrontabili metodi di misura basati su tecniche molto diversificate (NMR, spettroscopia a fluorescenza, spettrometria di massa, cromatografia su liquidi ecc.), per i quali non esistono campioni di riferimento in senso tradizionale e per molti dei quali non si ha ancora un adeguato livello di standardizzazione.

dell'attività di ricerca metrologica è oggi dedicata alla soluzione di questo problema di riferibilità, strettamente connesso all'affidabilità delle misure nei settori dell'ambiente, e della salute e alla loro reciproca accettabilità sul piano internazionale. Nella tabella 1 sono riportate alcune tipologie di misura per le quali il CIPM e il BIPM (figura 4) ha da tempo iniziato un'attività di studio e di standardizzazione affinché per tali misure si possano realizzare dei riferimenti campione⁹. Questo studio è condotto prevalentemente dagli istituti metrologici nazionali di diversi paesi e ha come obiettivo la possibilità di certificare in modo univoco, e uniforme a livello internazionale, l'affidabilità delle misure anche nel settore chimico-fisico d'interesse in campo medico e ambientale. La misura delle radiazioni ionizzanti è invece quel settore, fra le misure in campo medico e ambientale, in cui negli anni recenti si è già raggiunta una ragguardevole affidabi-

lità. Ciò è principalmente dovuto alla ricerca e allo sviluppo che negli ultimi anni si sono avuti sui metodi sperimentali per effettuare misure assolute e per realizzare quindi idonei campioni primari di riferimento. Della metrologia delle radiazioni ionizzanti si descriveranno più oltre i principali sviluppi, in relazione a quanto è stato realizzato a tutt'oggi presso l'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti dell'ENEA.

5. Costi-benefici derivanti dallo sviluppo dei programmi metrologici

I costi legati alle operazioni di misura nelle attività industriali, commerciali, sanitarie, ambientali, ecc., di un paese sviluppato ammontano a valori stimati fra il 3% e il 6% del suo PIL¹⁰. Una parte ridotta, ma essenziale, di questi costi riguarda lo sviluppo e il mantenimento delle attività metrologiche nel paese, quale prerequisito per

l'affidabilità di tutti i processi di misura. Il ritorno economico degli investimenti sulle attività metrologiche è stato quantificato ed è di sensibile entità. I paesi che investono una percentuale dello 0.006% del loro PIL in metrologia sono in grado di raggiungere un più avanzato sviluppo di quelli il cui corrispondente investimento è solo di un quarto inferiore (4). Esempi in questa direzione sono quelli degli Stati Uniti d'America, Singapore e la Repubblica di Corea in relazione ai processi di misura richiesti per lo sviluppo nei settori delle nuove tecnologie, della produzione alimentare, dei farmaceutici, della salute (misure cliniche e strumentazione associata). In quest'ultimo settore, ad esempio, il beneficio derivanti dai costi metrologici (richiesti per realizzare campioni di riferimento per le diverse tipologie di misura) è stato analizzato da diversi studi del NIST^{11, 12, 13}. Si è valutato al riguardo che una sovrastima (dovuta a errore) del 3% nelle misure di colesterolo può dar luogo a un incremento del 5% di risultati falsi positivi che a loro volta determinano controlli ripetuti (con costi aggiuntivi) o interventi medici (di cui non vi è in realtà necessità). In generale anche piccoli errori in questo campo possono dar luogo a costi indebiti sia in termini economici che di tipo sanitario. In USA in particolare, la spesa legata alla cura della salute umana (circa 1300 miliardi di dollari annui) è circa il 14% del PIL (con riferimento al 2001). I citati studi del NIST evidenziano inoltre che il 10% di questa spesa è dovuta a costi per misurazioni (per diagnostica clinica e terapia) e che circa il 30% di questi ultimi costi potrebbe essere risparmiato se si evitasse di ripetere misurazioni a seguito di errori o del mancato uso di procedure standardizzate e basate su campioni di riferimento. La conclusione è che gli investimenti nelle infrastrutture metrologiche nazionali siano fra quelli a più elevato ritorno in termini di benefici^{14, 15}. Anche la Commissione Europea ha avviato uno stu-

dio sul rapporto costi-benefici per le attività di misura e prova nei paesi sviluppati¹⁶. Lo studio esamina in particolare i settori delle nanotecnologie, dell'industria automobilistica e farmaceutica, dei controlli sull'inquinamento ambientale, della diagnostica medica. Da questo rapporto si apprende che nella UE si spendono circa 83 miliardi di euro per misure e prove nei diversi settori di attività. Ad esempio, circa 13 miliardi di euro annui sono spesi per attività legate a misure e prove in campo sanitario e circa 5 miliardi di euro annui per misure legate ai controlli delle emissioni nocive nel settore automobilistico. La metrologia, quale prerequisito per l'affidabilità delle misure in tutti i settori di attività, emerge da quest'analisi come fattore essenziale affinché questa non trascurabile spesa non sia affetta da sprechi e sia ottimizzata con positivi ritorni di natura economica e sanitaria. In definitiva, gli istituti metrologici nazionali, soprattutto quelli nei paesi più sviluppati, hanno un impatto sempre più marcato sulla competitività nazionale e internazionale e sulla qualità della vita nel proprio paese.

6. La metrologia negli scambi internazionali e i recenti accordi multilaterali nel settore

Fra le cause che tradizionalmente hanno dato luogo a barriere commerciali negli scambi internazionali vi è sempre stata la mancanza di un reciproco riconoscimento dei risultati di misure e di prove tese a certificare la reale rispondenza di un prodotto (o servizio) alle caratteristiche denunciate. Alla base di questo problema vi è stata la non immediata accettazione dei certificati di taratura (degli strumenti di misura) emessi dagli istituti metrologici nazionali dei diversi paesi. Analogo problema si è posto tradizionalmente per i certificati di prova (di strumenti, materiali e prodotti vari) a causa della non comparabilità dei metodi di prova seguiti nei rispet-

tivi paesi. Ciò ha sempre avuto come conseguenza la ripetizione di misure e prove nei paesi importatori/esportatori con un evidente aggravio di costi, di ritardi e di contenziosi sui risultati.

Un importante evento finalizzato a eliminare le barriere tecniche al libero scambio di beni e servizi, ha avuto luogo a Parigi il 14 ottobre 1999: la firma di un Accordo di Mutuo Riconoscimento (MRA) relativo ai campioni, alle misure e alle tarature¹⁷. Tale accordo è stato firmato dai responsabili degli istituti metrologici nazionali (per l'Italia erano rappresentati l'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, l'Istituto di Metrologia Gustavo Colonnelli del CNR e l'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti dell'ENEA) con incarico ad essi conferito dalle autorità nazionali (per l'Italia i Ministeri delle attività produttive e degli esteri). La sigla MRA denota l'*Accordo di mutuo riconoscimento dei campioni nazionali di misura e dei certificati di taratura e misura emessi dagli Istituti Metrologici Nazionali*. L'accordo specifica, in un ampio e dettagliato testo i vincoli da rispettare per il mutuo riconoscimento della validità dei campioni nazionali e dei certificati di taratura ad es-

si riferiti e impegna quindi ciascun paese firmatario a mantenere l'operatività degli istituti metrologici nazionali ai livelli prescritti. L'accordo ha dunque lo scopo di fornire ai governi un fondamento tecnico per ridurre le barriere negli scambi internazionali riguardanti: attività produttive e commerciali, dati ambientali, sanitari, statistici e tutto ciò che sia dedotto da un processo di misurazione e che attenga all'attuazione dei Sistemi Qualità nella produzione, nei servizi, nella pubblica amministrazione. L'MRA fissa le condizioni alle quali si possono accettare i certificati di taratura, di misurazione e di prova emessi dagli Istituti Metrologici Nazionali e dai laboratori ed organismi accreditati in altri paesi. La validità di questo accordi è quindi legata all'accuratezza dei campioni di misura nazionali e dei certificati di taratura e di misura emessi dagli Istituti Metrologici Nazionali. A questo scopo gli Istituti Metrologici Nazionali devono: a) effettuare periodicamente, sotto il controllo di organismi internazionali nel settore (BIPM, EUROMET ecc.), misure e confronti internazionali tesi a stabilire il grado di equivalenza dei campioni nazionali di misura sviluppati in ciascun paese, b) comprovare a



Figura 5

La pubblicazione riportata in figura (consultabile al sito in rif. 2) descrive i termini dell' "Accordo di mutuo riconoscimento dei campioni nazionali di misura e dei certificati di taratura e misura emessi dagli istituti metrologici nazionali" (MRA)

livello internazionale le proprie *capacità di taratura e misura (CMC)*, c) attuare un idoneo *Sistema Qualità* a dimostrazione e supporto dei propri metodi sia sul piano tecnico che organizzativo. Al fine di consentire una armonizzazione dei diversi sistemi di qualità in attuazione della norma ISO/IEC 17025, gli istituti metrologici europei partecipano alle iniziative del Quality System Forum dell'EUROMET e al progetto INITIATION della Comunità Europea.

Il testo dell'MRA, i firmatari dell'accordo, i risultati dei periodici confronti internazionali fra gli istituti metrologici, le capacità di taratura e misura validate dalla comunità metrologica internazionale per ciascun istituto nazionale, sono consultabili al sito web del BIPM: www.bipm.org. Una sintesi in italiano del testo dell'MRA è riportata in¹⁸.

L'accordo internazionale sulla metrologia ora descritto, avrebbe rischiato di vedere compromesse le sue finalità se il sistema di validazione e controllo che l'MRA esercita sugli Istituti Metrologici Nazionali non si fosse esteso anche ai Centri di Taratura. Questi sono laboratori idoneamente attrezzati e con competenti risorse umane, i quali sono accreditati per effettuare la taratura degli strumenti di misura. In ciascun paese, gli Istituti Metrologici Primari sono impegnati prevalentemente nell'attività di ricerca e sviluppo sui campioni primari di misura e nel mantenimento della loro efficienza tramite continue intercomparazioni internazionali. Si tratta di un impegno che non consentirebbe di soddisfare contemporaneamente anche le quotidiane richieste di taratura provenienti da tutto il territorio nazionale. L'attività di taratura degli Istituti Metrologici Nazionali è per forza di cose limitata solo ad alcune tipologie di taratura, laddove la gran parte delle esigenze in questo campo viene soddisfatta per l'appunto dai Centri di Taratura. Questi laboratori devono poter essere accreditati per svolgere questa funzione. Il pro-

cesso di accreditamento è svolto in ogni Paese dal proprio organismo di accreditamento competente con il coinvolgimento del rispettivo Istituto Metrologico Nazionale. L'organismo italiano per l'accREDITAMENTO dei Centri di Taratura è il SIT (Servizio di Taratura in Italia)¹⁹. Esistono analoghi organismi negli altri paesi. Tali organismi si coordinano a livello europeo tramite l'EA (European cooperation for Accreditation, e a livello extraeuropeo tramite l'ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation). Anche questi organismi di accreditamento internazionali^{20, 21} hanno siglato specifici accordi multilaterali che, per i Centri di Taratura, hanno finalità analoghe (uniformità di regole, verifiche delle capacità tecniche, affidabilità ecc.) a quelle che ha l'MRA per gli Istituti Metrologici Primari. Grazie a questi accordi, l'operazione di accreditamento fornisce una condizione di garanzia della esistenza, verificata a livello internazionale, di mezzi tecnici e procedure che comprovano l'equivalenza dei certificati emessi. L'obiettivo di questa operazione è di ottenere misure credibili e accettabili ovunque, diminuendo l'importanza di continue, costose e spesso non necessarie azioni di misura e di certificazione condotte ripetitivamente nei vari paesi.

Tutto ciò in definitiva fornisce agli utilizzatori una garanzia aggiuntiva dei prodotti e dei servizi che, acquisendo una accettazione valida internazionalmente, possono circolare liberamente nel mercato mondiale, attenuando gli effetti di eventuali barriere commerciali.

7. La struttura della metrologia in Italia e il ruolo dell'ENEA in questo settore

In ogni paese sviluppato esiste un Istituto Metrologico Nazionale (NMI) avente il compito ufficiale di sviluppare il sistema di riferimento primario per la misura di tutte le grandezze d'interesse. Un tale sistema è

costituito, come si è sopra descritto, dai campioni nazionali delle unità di misura delle diverse grandezze. L'Italia pur essendo uno dei paesi firmatari del primo accordo metrologico internazionale (la "Convention du Mètre" del 1875, v. sopra) solo negli anni recenti ha formalmente istituito il proprio sistema metrologico nazionale. In precedenza i campioni di riferimento per le diverse tipologie di misura erano stati sviluppati e resi disponibili per la taratura degli strumenti di misura nel Paese solo in un ambito scientifico e volontaristico. Entro questo ambito operavano infatti tradizionalmente l'Istituto di Metrologia G. Colonnetti (IMGC) del CNR, l'Istituto Elettrotecnico Nazionale G. Ferraris (IEN) e successivamente il Laboratorio di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti (LMRI) dell'ENEA. Ciascuno di questi tre organismi era di fatto riconosciuto a livello nazionale e internazionale come l'istituzione detentrica dei campioni primari di misura nei rispettivi settori di competenza: l'IMGC del CNR per le misure termiche, meccaniche ecc., l'IEN nel settore elettrotecnico, del tempo, ecc., il LMRI dell'ENEA per le misure delle radiazioni ionizzanti. Nessuno di questi tre organismi

aveva tuttavia il riconoscimento formale di istituto metrologico nazionale da parte della legislazione italiana. Questa carenza legislativa, che rendeva l'Italia unica eccezione nell'ambito dei paesi sviluppati (tutti dotati di un proprio istituto metrologico nazionale riconosciuto per legge), venne colmata con l'approvazione della Legge n. 273, 11 agosto 1991, che istituisce il sistema metrologico nazionale. L'importanza pratica di questo atto legislativo può essere misurata dal fatto che, in sua assenza, ciascuno in Italia avrebbe potuto in linea di principio rivendicare il ruolo di detentore dei campioni primari di misura facendo quindi venir meno il fondamentale requisito in base al quale i campioni nazionali di ciascuna unità di misura devono essere, per definizione, unici per ciascun Paese. La legge n. 273/1991 riconosce il ruolo di fatto svolto dai tre organismi citati designando ciascuno di essi quale istituto metrologico primario nel proprio settore di competenza. Nel 2006 gli istituti IMGC-CNR ed IEN sono stati accorpati in un unico organismo, l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), e quindi gli istituti metrologici primari in Italia sono attualmente: INRIM ed IN-

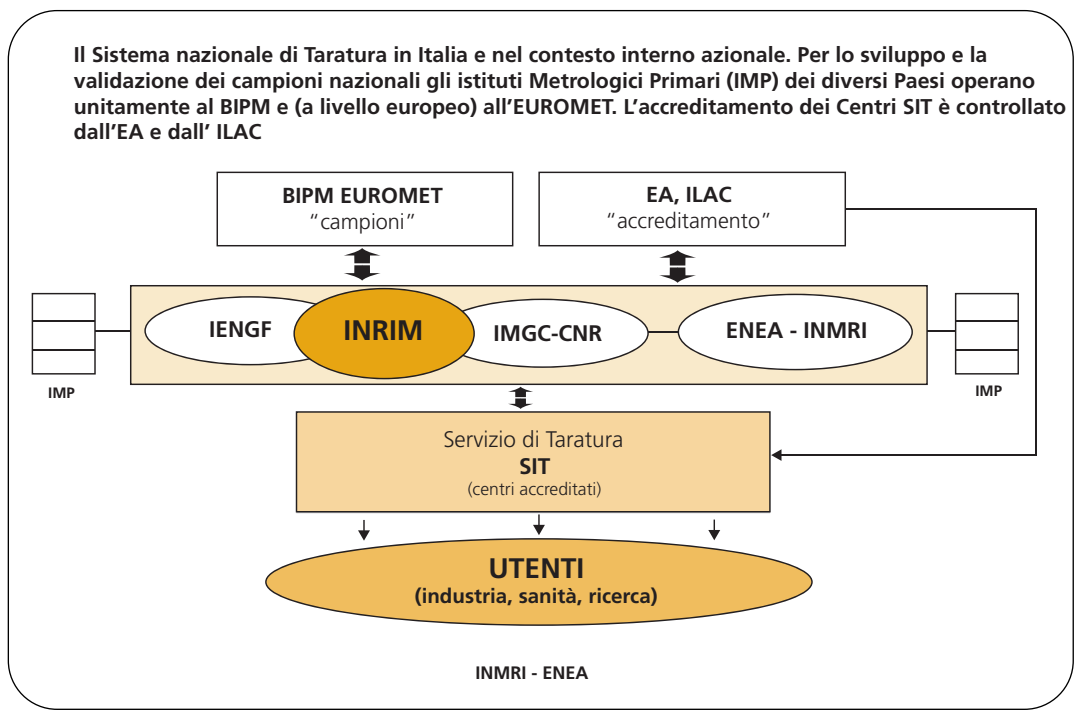


Figura 6
 Il sistema nazionale di taratura in Italia è costituito dagli istituti metrologici nazionali, INRIM (nel quale sono di recente confluiti i due istituti metrologici IENGF e IMGC-CNR) ed INMRI-ENEA, e dai centri di taratura SIT

MRI-ENEA operanti nei rispettivi settori di competenza. A questi due istituti fa capo la rete dei centri secondari di taratura operante nell'ambito del Servizio di Taratura in Italia (SIT). Questi centri sono laboratori autorizzati, in quanto tecnicamente e organizzativamente idonei, ad effettuare la taratura di strumenti di misura nei diversi settori d'interesse, in quanto accreditati dal SIT e riconosciuti perciò a livello internazionale. I centri SIT hanno, fra gli altri obblighi, quello di tarare periodicamente i loro campioni secondari rispetto ai corrispondenti campioni primari sviluppati presso ciascuno dei due istituti metrologici nazionali di competenza. Il sistema nazionale di taratura, costituito dagli istituti metrologici primari e dai centri SIT ad essi riferibili (si veda lo schema in figura 6), può emettere certificazione di taratura riconosciuta a livello in-

ternazionale grazie al fatto che esso soddisfa i requisiti scientifici e organizzativi previsti dall'accordo internazionale di mutuo riconoscimento (MRA) sopra citato. Questo tipo di certificazione di taratura è l'unico ad essere riconosciuto per l'attuazione dei Sistemi di Qualità che oggi tutti i laboratori che forniscono prestazioni scientifiche all'esterno (in campo industriale, sanitario, ecc.) sono ormai chiamati ad adottare. Nell'ambito del Sistema Nazionale di Taratura, l'ENEA ha dunque il ruolo di Istituto Metrologico Primario nel settore delle radiazioni ionizzanti e questo ruolo è svolto dall'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti (INMRI). L'INMRI è un istituto costituito dall'ENEA nel 1991 presso il Centro Ricerche della Casaccia come evoluzione del Laboratorio di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti. Questo laborato-

Tabella 2 - Grandezze e unità SI per la misura delle radiazioni ionizzanti

Grandezza	Nome (simbolo)	Nome speciale (simbolo)
Esposizione (per raggi X e γ)	coulomb al kilogrammo (C/kg)	
Energia specifica	joule al kilogrammo (J/kg)	gray (Gy)
Dose assorbita, kerma	joule al kilogrammo (J/kg)	gray (Gy)
Equivalente di dose, equivalente di dose ambiente, equivalente di dose direzionale, equivalente di dose personale	joule al kilogrammo (J/kg)	sievert (Sv)
Rateo di dose assorbita, rateo di kerma	joule al kilogrammo al secondo (J/kg s)	gray al secondo (Gy/s)
Rateo di equivalente di dose, rateo di equivalente di dose ambiente, rateo di equivalente di dose direzionale, rateo di equivalente di dose personale	joule al kilogrammo al secondo (J/kg s)	sievert al secondo (Sv/s)
Attività (di un radionuclide)	secondo alla meno uno (s^{-1})	becquerel (Bq)
Concentrazione di attività (di un radionuclide)	secondo alla meno uno al kilogrammo ($s^{-1}kg^{-1}$)	becquerel al kilogrammo (Bq/kg)
Fluenza di particelle	metro alla meno due (m^{-2})	
Rateo di fluenza di particelle	metro alla meno due al secondo (m^{-2}/s)	
Rateo di emissione di particelle	secondo alla meno uno (s^{-1})	

Tabella 3 - I campioni nazionali per la misura delle radiazioni ionizzanti operanti presso l'INMRE-ENEA e le rispettive grandezze SI di cui questi campioni realizzano l'unità di misura. Le caratteristiche dei sistemi campione sono descritte nel D. M. n. 591/1991⁶. Nella tabella sono riportati anche gli intervalli di misura, i livelli di accuratezza e i tipi di radiazione per la cui misura i campioni sono stati progettati

Grandezza fisica	Campione	Radiazione di riferimento	Intervallo di accuratezza (s)	Intervallo di misura
Esposizione (#)	•Camera a ionizzazione ad aria libera per basse energie	Raggi x 10-50 kV	0,5 - 1	$(3 \cdot 10^{-8} - 2 \cdot 10^{-4}) \text{ C kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$
	•Camera a ionizzazione ad aria libera per medie energie	Raggi x 60-300 kV	0,5 - 1	$(2 \cdot 10^{-8} - 9 \cdot 10^{-6}) \text{ C kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$
	•Camera a ionizzazione di trasferimento **	Radiazione gamma del ^{137}Cs	0,8 - 1,3	$(2 \cdot 10^{-8} - 9 \cdot 10^{-6}) \text{ C kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$
	•Camera a ionizzazione a cavità con pareti di grafite			
Kerma in aria (#)	•2 Camere a ionizzazione ad aria libera per basse e medie energie con procedure di conversione esposizione/kerma	Raggi x 10-50 kV e 60-300 kV	0,5 - 1	$(1 \cdot 10^{-7} - 7 \cdot 10^{-3}) \text{ Gy s}^{-1}$
	•Camera a ionizzazione di trasferimento con procedura di conversione esposizione/kerma **	Radiazione gamma del ^{137}Cs	0,8 - 1,3	$(7 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-4}) \text{ Gy s}^{-1}$
	•Camera a ionizzazione a cavità con pareti di grafite con procedura di conversione esposizione/kerma	Radiazione gamma del ^{60}Co	0,5	$(2 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-3}) \text{ Gy s}^{-1}$
Equivalente di dose ambiente, direzionale e personale (#)	•2 Camere a ionizzazione ad aria libera per basse e medie energie con fantocci per l'irraggiamento e procedura di conversione kerma/equivalente di dose	Raggi x 10-50 kV e 60-300 kV	0,5 - 1	$(8 \cdot 10^{-7} - 8 \cdot 10^{-3}) \text{ Sv s}^{-1}$
	•Camera a ionizzazione a cavità con fantocci per l'irraggiamento e procedura di conversione kerma/equivalente di dose	Radiazione gamma del ^{60}Co	0,5	$(2 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-3}) \text{ Sv s}^{-1}$
Dose assorbita: in grafite in acqua (#)	•Calorimetro in grafite	Radiazione gamma del ^{60}Co	0,5 - 0,7	$(2 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}) \text{ Gy s}^{-1}$
	•Calorimetro ad acqua (in fase sperimentale)	" " "		
	•Calorimetro in grafite e camera a ionizzazione a cavità in fantoccio d'acqua	" " "		
Dose assorbita: in materiali tessuto equivalenti (#)	•Camera a ionizzazione ad estrapolazione	sorgenti beta di ^{204}Tl , ^{147}Pm , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr	3	$(3 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-4}) \text{ Gy s}^{-1}$
Kerma in aria di riferimento (#)	•Camera a ionizzazione di trasferimento con procedura di conversione esposizione/kerma rif. **	Radiazione gamma del ^{192}Ir	1,1	$(1 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-3}) \text{ Gy s}^{-1}$
Emissione di neutroni	•Bagno al solfato di manganese	Sorgenti di neutroni di Am-Be e ^{252}Cf	0,4	$(10^5 - 10^7) \text{ s}^{-1}$
	•Contatore Lungo (Long Counter) *	" " "	0,7	$(10^3 - 10^7) \text{ s}^{-1}$
Neutron Flux Density	•Campione di densità di flusso di neutroni termici **	Neutroni termici	0,8	$1,2 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Attività	•Sistema di conteggio a coincidenza $4\pi\beta\text{-}\gamma$	Emettitori β e $\beta\text{-}\gamma$	0,1 - 3	$(1 - 20) \text{ kBq}$
	•Rivelatori a NaI a pozzetto	Emettitori $\gamma\text{-}\gamma$ e ^{222}Rn	0,5 - 3	$(1 - 20) \text{ kBq}$
	•Camera a ionizzazione ad alta pressione*	Emettitori γ	0,2 - 3	$(10 - 2 \cdot 10^4) \text{ kBq}$
	•Spettrometro gamma HPGe *	Emettitori γ	1 - 5	$(1 - 10^5) \text{ Bq}$
	•Cella elettrostatica	Radiazione del ^{222}Rn	1	$(1 - 15) \text{ kBq}$
Concentrazione di attività	•Camere radon di diverso volume	Radiazione del ^{222}Rn (e figli)	2 - 10	$(10^2 - 10^4) \text{ Bq/m}^3$

* Campione secondario di alta precisione.

** Sei sorgenti di neutroni Am-Be con moderatori di grafite e polietilene, con metodo di misura per attivazione neutronica dell'oro.

(s) Valori corrispondenti alla incertezza tipo composta (10) in %.

(#) L'intervallo di misura è riferito al rateo della grandezza, poiché tale riferimento può essere più significativo.

rio, nato nel 1980, scaturiva a sua volta da un'attività nel settore metrologico svolta nell'ente sin dai primi degli anni settanta.

Prima del 1991 l'attività metrologica svolta dall'ENEA, pur non dettata da alcun compito di legge, si poneva comunque l'obiettivo di sviluppare sistemi di misura campione nel campo delle radiazioni ionizzanti. Si intendeva in tal modo realizzare le condizioni tecnico-scientifiche per svincolare il paese da una sudditanza economica e tecnologica, essendo necessario, prima di allora, rivolgersi a istituti metrologici all'estero per la taratura di strumenti di misura delle radiazioni ionizzanti.

Sulla base del livello qualitativo comprovato a livello internazionale e sulla base dell'unicità delle attività di questo laboratorio in ambito nazionale, l'ENEA veniva poi designato, nel corso della iniziativa legislativa sull'organizzazione della metrologia in Italia, come uno dei tre istituti metrologici primari nazionali.

Per assolvere il compito di istituto metrologico nazionale l'ENEA, tramite l'INMRI, svolge attività di ricerca e sviluppo per realizzare i campioni nazionali per la misura delle radiazioni ionizzanti.

L'esistenza di questi sistemi campione è il presupposto per garantire a livello nazionale l'affidabilità delle misure delle radiazioni ionizzanti e la loro comparabilità a livello internazionale. Infatti i complessi di misura usati correntemente nel paese per le diverse esigenze forniscono risultati significativi solo se essi hanno la possibilità di essere tarati rispetto ai campioni nazionali di riferimento riconosciuti a loro volta a livello internazionale. L'insieme delle attività svolte dall'INMRI costituiscono il presupposto per l'affidabilità delle misure delle radiazioni ionizzanti e per l'attuazione dei Sistemi di Qualità nei seguenti settori:

- radioterapia e radiodiagnostica medica;
- radioprotezione in campo ambientale, ospedaliero e industriale;
- trattamento, sterilizzazione e diagnosi di materiali mediante radiazioni ionizzanti.

8. La domanda nazionale nel campo della metrologia delle radiazioni ionizzanti

L'attività metrologica svolta dall'INMRI-ENEA è essenziale per l'affidabilità delle misure delle radiazioni ionizzanti nel Paese, e in particolare per l'attuazione dei Sistemi Qualità, nei settori della medicina, della radioprotezione e della ricerca scientifica. Un presupposto essenziale per quest'affidabilità è infatti la taratura degli strumenti di misura che, nel settore delle radiazioni ionizzanti, è peraltro richiesta dalla normativa nazionale e internazionale. I soggetti che a livello nazionale necessitano regolarmente dell'attività dell'INMRI-ENEA (metodi di misura e certificazioni di taratura degli strumenti nel settore delle radiazioni ionizzanti) comprendono:

- i centri ospedalieri di radioterapia;
- le agenzie per la protezione ambientale (ARPA) di tutte le Regioni italiane;
- gli organismi centrali di vigilanza e controllo, in particolare l'APAT;
- gli organismi della protezione civile e della difesa;
- le industrie che impiegano o producono radioisotopi o strumenti di misura delle radiazioni ionizzanti;
- le università e i centri di Ricerca;
- i centri SIT (presso industrie ed enti pubblici) accreditati per la taratura di strumentazione radiologica.

I complessi sperimentali campione sviluppati - con le associate procedure di taratura - dall'INMRI-ENEA riguardano tutte le tipologie di misura delle radiazioni ionizzanti d'interesse nei settori sopra specificati. Le classi di strumenti di misura per i quali l'INMRI-ENEA ha realizzato i sistemi di taratura includono in particolare la strumentazione per:

- dosimetria per la radioterapia con fotoni, elettroni, protoni;
- dosimetria personale e ambientale per radiazione x, beta, gamma e neutronica.
- misura della radioattività in varie matrici ambientali (aria, acqua, terreni, ali-

menti ecc.).
 - misura della contaminazione radioattiva superficiale.

Nel paragrafo seguente è descritta brevemente la funzione e la tipologia degli apparati sperimentali studiati e messi a punto presso l'INMRI- ENEA per realizzare i campioni nazionali di misura delle radiazioni ionizzanti.

9. I sistemi di misura campione sviluppati dall'INMRI-ENEA per la misura delle radiazioni ionizzanti

I sistemi campione dell'INMRI-ENEA comprendono circa 20 linee sperimentali cui sono associati i relativi impianti d'irraggiamento (irradiatori per radiazione alfa, beta e gamma, macchine a raggi x, sorgenti neutroniche, sorgenti dei più importanti radionuclidi incluso il radon, un acceleratore "Microtrone" da 20 MeV. Con questi apparati sperimentali è possibile effettuare la misura assoluta delle grandezze del Sistema Internazionale (SI) relative alle radiazioni ionizzanti ed elencate nella tabella 2. I sistemi campione consentono quindi di realizzare l'unità di misura di riferimento per ciascuna di queste grandezze. Le unità di misura SI realizzate presso l'INMRI-ENEA sono poi trasferite, tramite i processi di taratura, dai campioni nazionali agli strumenti di misura normalmente usati per scopi pratici. La misura delle grandezze fisiche per gli scopi pratici correnti è sempre basata, in tutti i settori di misura, sull'uso di strumenti tarati (rispetto ai propri campioni di riferimento). Una misura assoluta è invece una misura che utilizza strumenti non tarati preventivamente rispetto a campioni della grandezza oggetto della misura. Una tale misura richiede che siano soddisfatte sperimentalmente le condizioni che sono alla base della definizione della grandezza d'interesse. I sistemi campione, una volta riconosciuti come campioni nazionali, sono unici in un dato paese poiché deve essere garantita l'unicità dell'unità di misura che

quel paese adotta. Questa unità di misura deve essere poi coerente con le analoghe unità realizzate e adottate negli altri paesi. L'unicità di questo riferimento non implica però che esso rimanga statico nel tempo: ciascun campione (relativo a ciascuna delle grandezze SI) è infatti oggetto di miglioramento continuo consentendo misure assolute e quindi unità di misura sempre più accurate. Tutto ciò si riflette sulla possibilità di effettuare misure sempre più accurate anche al livello dell'utente finale nelle diverse attività produttive, commerciali, scientifiche, sanitarie ecc..

Per far fronte ai diversi tipi di misure richieste nei diversi settori d'interesse (si veda par. 7) è necessario disporre di un ampio numero di campioni primari.

Questi apparati sperimentali sono elencati nella tabella 3 unitamente alle grandezze di cui realizzano l'unità di misura SI³, all'intervallo di misura e all'accuratezza corrispondente. Il sistema dei campioni nazionali consente la misura assoluta di grandezze quali: la dose assorbita, l'esposizione, l'equivalente di dose (nelle sue diverse accezioni), la concentrazione di attività di radionuclidi (incluso il radon e la sua progenie), la fluenza di neutroni, ecc. I diversi tipi di campioni primari e di metodi di taratura sviluppati presso l'INMRI-ENEA sono in grado di far fronte a tutte le principali esigenze nei vari settori di misura quali la radioterapia, radiodiagnostica, radioprotezione, trattamento di materiali con alte dosi ecc.. L'INMRI-ENEA ha il compito di mantenere e sviluppare le caratteristiche di questi apparati di misura ai livelli qualitativi che gli accordi internazionali sulla metrologia primaria impongono.

Le caratteristiche e le funzioni di ciascuno di questi apparati di misura campione, necessari per poter effettuare la taratura degli strumenti di misura correntemente usati per la misura di radiazioni ionizzanti, sono riportate nel Decreto Ministeriale 591/1993 che elenca e descrive tutti i campioni pri-

segue a pag 64

Scheda 1 - I campioni primari realizzati presso l'ENEA per la misura della "esposizione", una grandezza di largo uso nella misura delle radiazioni ionizzanti

Fra le diverse grandezze fisiche introdotte nel Sistema Internazionale (SI) per la misura delle radiazioni ionizzanti, la grandezza "esposizione" è di particolare importanza. L'esposizione misura la capacità di ionizzare l'aria da parte della radiazione x e gamma. Una volta nota la quantità di ionizzazione (ovvero la carica elettrica) prodotta in una data massa di aria da parte di questo tipo di radiazione, è possibile determinare il valore di un'ulteriore grandezza, la "dose assorbita", legata all'energia che quella medesima radiazione può cedere a una massa di qualsiasi altro mezzo diverso dall'aria (ad esempio un organismo biologico). L'importanza della dose assorbita deriva dal fatto che essa è direttamente correlabile agli effetti biologici delle radiazioni ionizzanti, sia per le applicazioni in radioterapia sia per esigenze di radioprotezione. Per misurare l'esposizione è necessario usare strumenti opportunamente tarati. La taratura richiede il riferimento a uno specifico campione primario il quale effettua una misura assoluta della grandezza, cioè una misura che non necessita di alcuna taratura preventiva. Il campione in questione misura quindi la grandezza esposizione (il cui simbolo è X) sulla base della sua definizione:

$$X(P,E)=\frac{dQ}{dm}$$

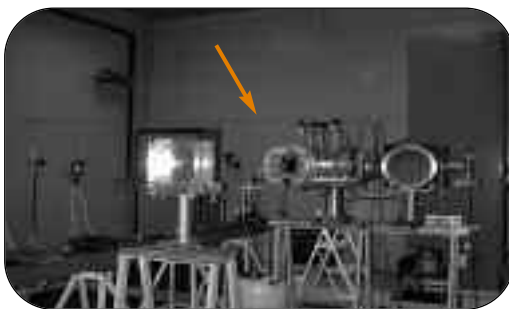
dove dQ è la carica di un solo segno generata, in una massa dm di aria centrata nel punto P, da fotoni di energia E. E' richiesto inoltre che dQ sia la carica che si produce in aria quando tutti gli elettroni generati dai fotoni nella massa dm sono arrestati completamente in aria. In dQ non va incluso il contributo di carica prodotto dalla radiazione di frenamento (bremsstrahlung) degli elettroni secondari generati dai fotoni primari. L'unità di misura dell'esposizione nel Sistema Internazionale (SI) è il coulomb al chilogrammo (C/kg). In Italia il campione primario nazionale di esposizione realizzato presso l'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti dell'ENEA, è costituito da un gruppo di tre apparati sperimentali progettati per misure assolute alle diverse energie della radiazione. Questi sistemi di misura, basati tutti su particolari camere a ionizzazione, sono fra loro molto diversi essendo differenti le condizioni di misura dell'esposizione alle diverse energie della radiazione x e gamma.

La misura assoluta dell'esposizione è molto impegnativa a causa dei numerosi fattori correttivi da determinare (sia teorici che sperimentali) e dei piccoli valori di corrente (fino a 10^{-16} A) che si devono poter misurare con la necessaria accuratezza (0,01%). I fattori correttivi sono necessari per tener conto delle differenti condizioni sperimentali rispetto a quelle richieste dalla definizione dell'esposizione.

Con particolari sistemi dosimetrici (le cosiddette camere a ionizzazione "a cavità") tarati per misurare l'esposizione, si può poi determinare la dose assorbita in acqua che è la grandezza d'interesse per la radioterapia. Per la conversione da esposizione a dose assorbita in acqua si fa ricorso alla cosiddetta "teoria della cavità" che attiene a uno specifico settore della fisica delle radiazioni ionizzanti.

Figure 7 e 8

I sistemi campione "camera ad aria libera" (al centro della foto a destra) e "camera a cavità" (indicata dalla freccia nella foto a sinistra) realizzati presso l'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti dell'ENEA per la misura assoluta dell'esposizione dovuta, rispettivamente, a radiazione x con energia da 50 a 300 keV e a radiazione gamma da 1,25 MeV



Scheda 2 - I campioni primari realizzati presso l'ENEA per la misura dell'attività dei radionuclidi

Le misure riguardanti i radionuclidi sono d'interesse in campo ambientale per poter monitorare la presenza di sorgenti radioattive nonché la loro variazione nel tempo e nelle diverse matrici ambientali (aria, terreni, alimenti ecc.). Le misure relative ai radionuclidi sono inoltre sempre più importanti in campo medico, sia per la radiodiagnostica (analisi PET e SPECT) sia per la radioterapia oncologica (brachiterapia). In quest'ultimo caso l'accuratezza di misura deve essere la più elevata possibile. La grandezza d'interesse per tutti questi tipi di misure è "l'attività" di un radionuclide, definita come: dove dN è il numero di trasformazioni nucleari spontanee che hanno luogo nel tempo dt in una determinata massa di un dato radionuclide (la sorgente radioattiva). Nota l'attività si può determinare l'energia emessa da una sorgente radioattiva nel suo processo di decadimento, una volta che siano conosciute le modalità con cui essa emette radiazione (lo schema di decadimento). Questa energia è poi importante per determinare la dose assorbita cioè la grandezza fisica correlata agli effetti biologici negli organismi che possono aver interagito con le radiazioni emesse dalla sorgente. L'unità di misura dell'attività nel Sistema Internazionale (SI) è il secondo alla meno uno (s^{-1}). A questa unità è assegnato il nome speciale becquerel (Bq). Quindi 1 Bq è l'attività di una sorgente radioattiva che decade con una trasformazione nucleare al secondo.

Le misure di attività dei radionuclidi richiedono una grande varietà di strumenti (spettrometri, contaminometri, contatori con scintillatori solidi o liquidi, ecc.) ciascuno dei quali necessita di una specifica taratura. La taratura richiede a sua volta un campione primario in grado di effettuare una misura "assoluta" di attività, cioè una misura che non ha bisogno di alcuna taratura preventiva.

Anche i campioni primari per le misure di attività sono costituiti da apparati sperimentali di diverso tipo. Essi sono infatti progettati in funzione dello schema di decadimento che caratterizza un dato radionuclide (tipo di particelle emesse, energia e correlazioni temporali fra di esse, tempo di dimezzamento, ecc.). Per la categoria dei radionuclidi che decadono con emissione di radiazione beta e gamma in rapida successione temporale (praticamente in coincidenza rispetto alla risoluzione temporale del circuito di misura) uno dei principali campioni primari di attività è il "sistema di conteggio in coincidenza $4\pi\beta\text{-}\gamma$ ". Con questo apparato sperimentale si determina l'attività di una sorgente da una misura della radiazione beta e gamma emessa dal radionuclide. Questa misura è particolarmente complessa a causa dei numerosi effetti fisici e strumentali che alterano il risultato della misura se non tenuti debitamente in conto.

Nota l'attività della sorgente ottenuta con il sistema campione, si possono realizzare ulteriori sorgenti - diverse per massa, forma e attività - da utilizzare per la taratura dei vari tipi di strumenti di misura di uso corrente.

Numerosi altri campioni sviluppati presso dell'Istituto per misure di attività sono basati su metodi di misura diversi. Fra questi, particolare importanza rivestono le camere radon dove vengono prodotte atmosfere con radon a diverse concentrazioni per la taratura dei sistemi di misura del radon ambientale.



Figure 9 e 10

Nella foto a sinistra è mostrato un particolare di uno dei sistemi campione - il sistema di conteggio in coincidenza $4\pi\beta\text{-}\gamma$ - realizzati presso l'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti dell'ENEA per la misura assoluta dell'attività dei radionuclidi. La foto a destra mostra il sistema campione camera radon (da circa 1000 litri) per la taratura dei sistemi di misura del radon

mari su cui è basato il Sistema Nazionale di Taratura. Nelle due schede seguenti sono delineati a titolo esemplificativo i metodi di misura su cui sono basati alcuni dei sistemi campione sviluppati presso l'INMRI-ENEA. I metodi sperimentali descritti riguardano due tipologie di misure assolute, fra loro molto diverse e sviluppate per soddisfare le esigenze di taratura in tre distinti settori applicativi: la radioprotezione, la radiodiagnostica medica e la radioterapia oncologica.

Questi sistemi di misura, come del resto tutti gli altri sistemi campione, sono oggetto di continua evoluzione in funzione della crescente richiesta di affidabilità delle misure e dello sviluppo delle conoscenze scientifiche nei rispettivi settori.

Una dettagliata descrizione dei compiti istituzionali, delle attività e delle attrezzature sperimentali dell'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti è riportata nel sito web dell'Istituto²².

Bibliografia

1. National Conference of Standards Laboratories, NCSL International, Boulder CO, USA, www.ncsli.org/.
2. Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), www.bipm.org.
3. The International System of Units, Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), F-92312 Sèvres Cedex, France (1998), www.bipm.org.
4. Evolving Needs for Metrology in Trade, Industry and Society and the role of the BIPM, Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), F-92312 Sèvres Cedex (France), 2003 (la pubblicazione è consultabile nel sito www.bipm.org).
5. European Union, The need for measurement and testing in nanotechnology, compiled by the High Level Expert Group on Measurement and Testing under the European Framework Programme for Research and Development, March 2002.
6. European Union, Council Directive 98/79/EC of the European Parliament and of the Council of 27 October 1998 on In Vitro Diagnostic Medical Devices, December 1998.
7. ISO 15189:2003, Medical Laboratories . Particular requirements for quality and competence, ISO, 2003.
8. European Union, Council Directive 96/23/EC on the performance of analytical methods and the interpretation of results, August 2002.
9. Consultative Committee for Amount of Substance, Report of the 10th Meeting Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), F-92312 Sèvres Cedex (France), 2004.
10. Quinn T.J., Metrology, its role in today's world, Rapport BIPM/94-5, Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), F-92312 Sèvres Cedex (France), 1994.
11. Leech D.P., The Economic Impacts of NIST Cholesterol Standards Program, NIST Planning Report 00-4, September 2000.
12. Semerjia H.G., Beary E.S., Impact of Metrology on the Economy and Quality of Life, International symposium on Measurement Standards 2002, Tokyo, April 2002.
13. Klee G.F., Requirements of physicians for standardized/comparable measurements; Impact on medical decisions, a study at the Mayo Clinic, USA, June 2002.
14. Swan G.M.P., The Economics of Measurement, Manchester, Manchester Business School of the University of Manchester, Report for NMS Review, June 1999.

15. Bowns S., Department of Trade and Industry National Measurement System Policy Unit, Review of the Rationale for and Economic Benefit of the U.K National Measurement System, PA Consulting Group, November 1999.
16. Williams G., The assessment of the economic role of measurements and testing in modern society, Oxford, United Kingdom, Pembroke College, University of Oxford, European Measurement Project funded under the GROWTH Programme by the DG-Research of the European Commission, July 2002.
17. Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes, Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), F-92312 Sèvres Cedex, France (BIPM) 1999, www.bipm.org.
18. Molinar G., Gli accordi di mutuo riconoscimento, Tutto Misure, anno VI n. 4, 2002.
19. Servizio di Taratura in Italia (SIT), www.sit-italia.it.
- 20- European co-operation for Accreditation (EA), www.european-accreditation.org.
21. International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC), www.ilac.org.
22. Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti (INMRI-ENEA), www.inmri.enea.it/.
23. R F Laitano, M P Toni, M. Pimpinella and M Bovi, Determination of the K_{wall} correction factor for a cylindrical ionization chamber to measure air-kerma in ^{60}Co beams, Phys. Med. Biol. 47 (2411) 2002.
24. Attix FH., Introduction to radiological physics and radiation dosimetry, John Wiley & Sons 1986.
25. International Atomic Energy Agency, Absorbed dose determination in photon and electron beams, an international code of practice, TRS 277, IAEA Vienna 1997.
26. National Council on Radiation Protection and Measurements, A Handbook of Radioactivity Measurements Procedures, NCRP Report 58, NCRP Bethesda MD USA, 1985.
27. De Felice P., Data acquisition System for the $4\pi\beta(\text{PC})-\gamma$ coincidence-counting equipment and the gamma-ray spectrometers at the laboratory of ionizing radiation metrology of ENEA, Applied Radiation and Isotopes 38 No 10, 857, 1987.
28. Sahagia, M., Ivan, C., Grigorescu, E.L., Capogni, M., De Felice, P., Fazio, A., Standardization of ^{65}Zn by $4\pi\text{PC}-\gamma$ coincidence counting method with efficiency extrapolation, Appl. Radiat. Isot. 60, 423-427, 2004.
29. Guerra, A.S., Laitano, R.F., Pimpinella, M., Characteristics of the absorbed-dose-to-water standard at Enea, Phys. Med. Biol. 41, 657-674, 1996.
30. Seuntjens J. and Palmans H. Correction Factors and Performance of a 4°C Sealed Water Calorimeter, Phys. Med. Biol. 44 627-46, 1999.

Per informazioni:

laitano@casaccia.enea.it