

## Analisi delle incertezze nelle misure di esposizione a campi elettromagnetici in presenza di segnali radiotelevisivi

C. Mastria<sup>1</sup>, R. Barnaba<sup>1</sup>, G. Assennato<sup>1</sup>, L. Anglesio<sup>2</sup>, S. Adda<sup>2</sup>, G. D'Amore<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>ARPA Puglia, Corso Trieste, 26 - 70100 Bari

<sup>2</sup>Arpa Piemonte – Centro Regionale per le Radiazioni Ionizzanti e non ionizzanti, Via Jervis, 30 – 10015 Ivrea (TO)

### A) OBIETTIVI

Il criterio del rischio condiviso adottato dalla norma CEI 211-7:2001 evidenzia l'importanza della valutazione dell'incertezza nelle misure RF volte alla verifica della conformità degli impianti ai limiti di esposizione ed il ricorso esplicito in tale Guida alla norma UNI CEI ENV 13005: 2000 implica la necessità di un resoconto dettagliato delle componenti di incertezza che caratterizzano una misura ambientale di campi elettromagnetici. L'approccio metrologico seguito dalla GUM, infatti, richiede che venga definito il modello matematico con il quale esprimere la relazione funzionale tra il misurando (intensità di campo elettrico) e tutte le grandezze d'ingresso che contribuiscono in maniera significativa all'incertezza del risultato della misurazione. Per ciascuna di esse si stima quindi l'incertezza standard attraverso metodi di tipo A o B, si calcola l'incertezza tipo composta per mezzo della legge di propagazione delle incertezze e si valuta l'incertezza estesa associata al risultato della misura utilizzando un fattore di copertura  $k=2$ .

Nei diagrammi di causa effetto riportati in Figura 1 e 2 sono raggruppate, per entrambe le tecniche di misura possibili nella valutazione sperimentale del campo elettromagnetico ambientale, le grandezze d'ingresso le cui incertezze tipo contribuiscono all'incertezza di misura di campo elettrico dovuto a segnali radiotelevisivi analogici.

Figura 1 – Diagramma causa effetto per misure a banda larga in presenza di segnali radiotelevisivi analogici

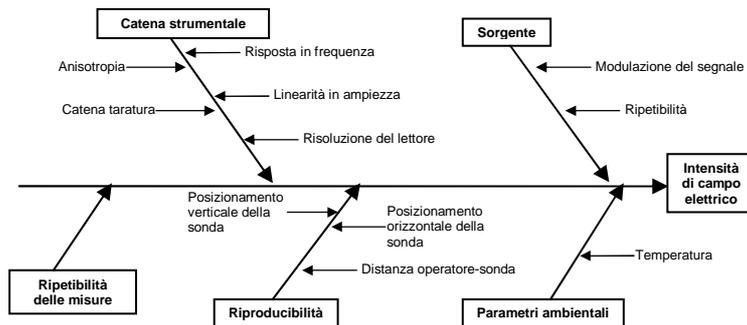
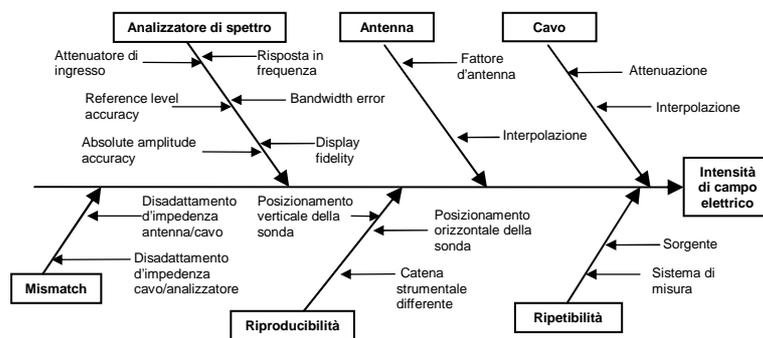


Figura 2 – Diagramma causa effetto per misure a banda stretta in presenza di segnali radiotelevisivi analogici



Lo scopo del presente lavoro è stato quello di valutare quanto la ripetibilità e la riproducibilità possano influenzare il risultato di una misura di campo RF, nel caso in cui le sorgenti di campo elettromagnetico consistano in trasmettitori radiotelevisivi analogici.

Nello specifico, è stato determinato il contributo all'incertezza tipo composta introdotto dalla ripetibilità del sistema di misura, sia nel caso in cui si utilizzi una catena strumentale a banda larga che nel caso in cui si effettui una misura selettiva in frequenza. Ai fini della riproducibilità delle misure si è invece valutato, per le misure in banda larga, il contributo introdotto dal posizionamento sul piano orizzontale e verticale della sonda, mentre nel caso di metodologia a banda stretta, si sono utilizzate catene strumentali differenti con lo

scopo di verificare quanto esse possano incidere sul risultato di una misura in un dato punto, a parità di sorgente. Limitatamente alle misure in banda larga si è infine esaminata l'influenza della distanza operatore-sonda sul risultato di misura, tramite l'acquisizione di un numero statisticamente rilevante di dati.

## **B) MATERIALI E METODI**

La valutazione dei contributi di incertezza legati alla ripetibilità e riproducibilità è stata effettuata sia tramite prove in campo, sia tramite analisi statistica e regressione di dati storici di misura.

Per le misure sono stati individuati due siti in cui il contributo al campo dovuto a tipologie di segnale diverso da quello radiotelevisivo fosse assente o, al più, trascurabile e il valore di campo elettrico totale fosse di alcuni volt al metro. Le misure sono state eseguite ad un'altezza dal piano di calpestio di 1,5 m.

L'analisi di dati storici, invece, ha permesso di fornire una statistica significativa relativamente al problema del posizionamento in campi variamente disuniformi. I risultati ottenuti sono stati quindi confrontati con gli altri contributi all'incertezza tipo composta, ricavati a partire dalle informazioni presenti nei certificati di taratura e nelle specifiche fornite dal costruttore.

Nelle misure in banda larga i risultati sono stati normalizzati, al fine di eliminare il contributo di variabilità delle sorgenti. Nelle misure selettive in frequenza si è invece verificato che l'incertezza di ripetibilità della sorgente fosse trascurabile. I parametri dell'analizzatore sono stati impostati, per l'acquisizione degli spettri, concordemente con quanto indicato dalle guide tecniche (RBW=30 kHz, VBW=30 kHz, SPAN=4,5 MHz) per questa tipologia di segnale. Inoltre, l'antenna è stata sempre posizionata in modo da consentire l'acquisizione (in modalità Max Hold, con un tempo di acquisizione di 10 s) in una sola delle tre posizioni mutuamente ortogonali.

### **1) VALUTAZIONE DEI CONTRIBUTI DI RIPETIBILITA' E DI RIPRODUCIBILITA' NELLE MISURE A BANDA LARGA.**

I contributi all'incertezza tipo composta dati dalla ripetibilità del sistema di misura e dal posizionamento orizzontale della sonda sono stati valutati effettuando tre campagne di misura in cui sono stati utilizzati simultaneamente due strumenti a banda larga (EMR 300 W&G, dotati di sonda isotropica di campo elettrico tipo 8.2), in modo da normalizzare i risultati ottenuti dal sensore in valutazione rispetto a quello fisso, deputato a controllare eventuali variazioni dell'intensità di campo elettrico.

I due misuratori di campo sono stati posti ad una distanza relativa sufficiente ad evitare possibili perturbazioni reciproche, mentre l'operatore addetto allo svolgimento delle acquisizioni relative alla verifica della stabilità del campo è rimasto sempre nella medesima posizione, a distanza maggiore di 3 m dal sensore, durante tutto il ciclo di misura.

Il contributo di ripetibilità è stato valutato effettuando una serie di 15 misure simultanee e consecutive del campo elettrico. Al fine di tenere conto delle possibili fonti di errori casuali durante il processo di misura, in corrispondenza di ciascuna acquisizione, si è montato di volta in volta il misuratore sul cavalletto, riposizionato il sensore nel punto prescelto, variando l'orientazione della sonda rispetto agli impianti, e si è modificata la posizione dell'operatore per la lettura del valore di campo visualizzato sul display dello strumento.

Un'altra prova è consistita, in corrispondenza di ciascuna acquisizione, nel lasciare inalterata la posizione dello strumento, mutando solo la distanza operatore - sonda entro il range 1,3 ÷ 2,3 m, al fine di verificare quanto la presenza dell'operatore possa influenzare la misura.

Il contributo legato al posizionamento orizzontale della sonda è stato valutato attraverso lo spostamento del misuratore lungo una griglia quadrata, a quota costante dal suolo, costituita da 16 punti posti ad una distanza di 10 cm l'uno dall'altro. Le misure sono state effettuate in due siti differenti, scelti in funzione della distanza del punto di misura dalle sorgenti (pari, rispettivamente, a 30 m ed a 110 m), al fine di verificare quanto essa influisca sul peso di tale contributo all'incertezza del risultato di una misurazione di campo elettrico in presenza di segnali radiotelevisivi. Nel sito caratterizzato da una distanza dalla sorgente maggiore, si è eseguita un'ulteriore prova su di una griglia quadrata le cui dimensioni (90x90 cm<sup>2</sup>) sono state definite sulla base della precisione dello strumento con cui si sono misurate le coordinate del punto di misura.

Il contributo all'incertezza tipo composta dovuto al posizionamento verticale della sonda è stato valutato tramite l'analisi statistica di valori di campo misurati alle altezze di 1,1 m, 1,5 m e 1,9 m nell'ambito di indagini in banda larga eseguite in date e luoghi diversi, nel solo caso di sorgenti di campo elettromagnetico consistenti in trasmettitori radiotelevisivi. Il numero totale di terne reperite è pari a 76: per ciascuna di esse si è stimato il corrispondente valore del campo ad un'altezza dal piano di calpestio pari a 1,55 m, in modo da considerare, cautelativamente, un errore da parte dell'operatore nel posizionamento della sonda pari a 5 cm. Si è quindi proceduto a determinare le corrispondenti variazioni percentuali sul livello di campo dovute a tale errore, di cui si è valutata la media e la deviazione standard. L'incertezza dovuta al posizionamento verticale si è infine ottenuta aggiungendo cautelativamente due deviazioni standard al valore medio.

## 2) VALUTAZIONE DEI CONTRIBUTI DI RIPETIBILITA' E DI RIPRODUCIBILITA' NELLE MISURE A BANDA STRETTA.

Le misure volte alla valutazione dell'incertezza di ripetibilità di un sistema di misura selettivo sono state effettuate in un sito caratterizzato dalla presenza di due impianti radio FM emittenti alle frequenze di 97,1 e 105,2 MHz. La catena strumentale adoperata era costituita da un analizzatore di spettro (R&S FSP3), da un cavo coassiale (Sunher di 30 m), da un'antenna (tipo dipolo conico EMSAP2000) e da un cavo interno di lunghezza 1 m, che consentiva la connessione tra il cavo schermato proveniente dall'antenna e l'analizzatore posto all'interno di un furgone schermato. Preliminarmente sono state effettuate 15 acquisizioni spettrali consecutive, al fine di valutare l'incertezza di ripetibilità della sorgente. Una volta verificato che fosse possibile considerare trascurabili le variazioni temporali del campo elettrico, si è proceduto a valutare l'incertezza di ripetibilità del sistema di misura attraverso l'esecuzione di 14 acquisizioni spettrali consecutive, effettuate in modo da tener conto di tutte le possibili fonti di errori casuali durante il processo di misura. In corrispondenza di ciascuna di esse l'operatore ha montato di volta in volta l'antenna sul cavalletto, portato l'antenna nella posizione corrispondente all'acquisizione nella direzione prescelta, riposizionato il sistema nel punto selezionato per le misure, verificando che il centro elettrico dell'antenna fosse ad 1,50 m dal piano di calpestio. Egli ha inoltre, prima di ogni acquisizione, scollegato e ricollegato il cavo coassiale al sistema, in modo da tener conto anche dei possibili errori casuali provenienti dall'inserzione della linea di collegamento.

L'ultima campagna di misura si è realizzata nei pressi di un sito in cui insistevano degli impianti di diffusione radiotelevisiva con lo scopo di verificare la significatività della variazione nell'acquisizione del dato introdotta dall'uso di antenne differenti. A tal fine si sono effettuate delle misure selettive in frequenza, posizionando in successione 6 antenne diverse (tipo dipolo conico EMSAP 2000, tipo biconica corta PBA10200, PCD8250, PCD3100, tipo biconica EMCO 3140, tipo attiva TES1000), nello stesso punto e con le stesse impostazioni dell'analizzatore. In corrispondenza di ogni misura si sono utilizzati la stessa linea di trasmissione (cavo coassiale Suhner 20m), tranne che per l'acquisizione con il sistema TES1000 (costituito da un sensore selettivo di campo elettrico, un cavo ottico monomodale di 10 m e da un convertitore elettro-ottico), e lo stesso analizzatore (R&S FSP3). Prima di collocare ciascuna antenna nel punto prescelto si è posizionata in tale punto, ad un'altezza di 1,50 m dal piano di calpestio, la sonda di un misuratore di campo a larga banda (EMR 300 W&G, sonda tipo 8.2), con cui si è valutata l'intensità del campo elettrico, per verificare che la variabilità temporale dello stesso fosse contenuta entro valori accettabili per tutto il tempo necessario ad acquisire i dati per il confronto.

L'acquisizione ha riguardato la sola componente verticale del campo. La valutazione della comparabilità dei dati è stata effettuata attraverso il calcolo dell'indice di compatibilità,  $E_n$  number, definito nella ISO/IEC 43-1, assumendo come valore di consenso la media aritmetica dei valori di campo misurati, cui è stata associata un'incertezza estesa pari alla media delle incertezze estese stimate.

## C) RISULTATI

### 1) BILANCIO DELLE INCERTEZZE NELLE MISURE A BANDA LARGA.

In tabella 1 si riportano i contributi di ripetibilità e di riproducibilità all'incertezza del risultato di una misurazione ambientale di campo elettrico, effettuata con strumentazione a banda larga, valutati in presenza di segnali radiotelevisivi analogici.

Tabella 1 – Incertezza di ripetibilità e riproducibilità per misure a banda larga in presenza di segnali radiotelevisivi analogici

Simbolo	Contributo all'incertezza	Valore (dB)	Distribuzione di probabilità	Coefficiente di sensibilità	Incertezza Tipo (%)
$U_{RIP}$	Ripetibilità delle misure	0,09	Normale (k = 1)	1	1,0
$U_{POS, vert}$	Posizionamento verticale della sonda	0,19	Normale (k = 1)	1	2,3
$U_{operatore}$	Distanza operatore-sonda	0,06	Normale (k = 1)	1	0,6
$U_{POS, or}$	Posizionamento orizzontale della sonda (distanza sonda – sorgente 30 m; griglia di dimensioni 30x30 cm <sup>2</sup> )	0,13	Normale (k = 1)	1	1,5
	Posizionamento orizzontale della sonda (distanza sonda – sorgente 110 m; griglia di dimensioni 30x30 cm <sup>2</sup> )	0,04	Normale (k = 1)	1	0,5
	Posizionamento orizzontale della sonda (distanza sonda – sorgente 110 m; griglia di dimensioni 90x90 cm <sup>2</sup> )	0,07	Normale (k = 1)	1	0,8

Dall'analisi dei risultati ottenuti emerge che il contributo maggiore è fornito dall'incertezza standard di posizionamento verticale, mentre l'incertezza dovuta al posizionamento orizzontale è tanto più piccola tanto maggiore è la distanza sonda – sorgente.

Al fine di valutare la significatività dei contributi riportati in tabella, si sono quantificate, a partire dalle informazioni presenti nei certificati di taratura, nelle specifiche fornite dal costruttore e da dati di letteratura, le incertezze tipo delle altre grandezze d'ingresso di cui alla Figura 1. Si è quindi proceduto a calcolare, utilizzando la legge di propagazione dell'incertezza nell'ipotesi che le grandezze siano indipendenti e non correlate, l'incertezza tipo composta rispettivamente con e senza i contributi di ripetibilità e riproducibilità. L'incertezza di misura percentuale, valutata a partire dall'incertezza tipo e considerando un livello di confidenza del 95%, risulta pari al 27% nel caso in cui si considerino anche i contributi di ripetibilità e di riproducibilità, pari invece al 26% non considerando tali contributi. Tale differenza risulta essere poco significativa, per cui è possibile concludere che nella valutazione dell'incertezza del risultato di una misura ambientale di campo elettrico, effettuata con metodologia a banda larga, è sufficiente considerare i contributi provenienti dalla sola catena strumentale.

## 2) BILANCIO DELLE INCERTEZZE NELLE MISURE A BANDA STRETTA

In tabella 2 sono riportati i contributi di ripetibilità all'incertezza in relazione, rispettivamente, alle frequenze delle emittenti FM 97,1 e 105,2 MHz.

Tabella 2 – Incertezza di ripetibilità per misure a banda stretta in presenza di segnali radiotelevisivi analogici

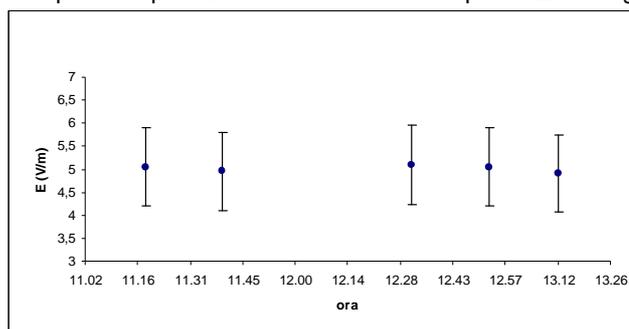
Simbolo	Contributo all'incertezza	Valore (dB)	Distribuzione di probabilità	Coefficiente di sensibilità	Incertezza Tipo (%)
$U_{RIP, sorg}$	Ripetibilità della sorgente alla frequenza di 97,1 MHz.	0,02	Normale (k = 1)	1	0,3
	Ripetibilità della sorgente alla frequenza di 105,2 MHz.	0,01	Normale (k = 1)	1	0,1
$U_{RIP}$	Ripetibilità delle misure alla frequenza di 97,1 MHz	0,35	Normale (k = 1)	1	4,1
	Ripetibilità delle misure alla frequenza di 105,2 MHz	0,22	Normale (k = 1)	1	2,6

Da essa si evince che l'incertezza di ripetibilità della sorgente è molto piccola, per cui è possibile considerare trascurabili le variazioni temporali del campo elettrico. Inoltre, analogamente a quanto effettuato per la metodologia a banda larga, anche in tal caso si sono valutati i contributi all'incertezza tipo composta dovuti alla catena strumentale associati a ciascuna componente spettrale, utilizzando le informazioni presenti nei certificati di taratura e nei data sheet degli strumenti. Si è quindi calcolata l'incertezza di misura del valore complessivo di campo elettrico, rispettivamente con e senza i contributi di ripetibilità. In entrambi i casi si è ottenuta un'incertezza estesa percentuale del 24%, per cui anche nelle misure in banda stretta, per la valutazione dell'incertezza del risultato di misura di campo elettrico dovuto a segnali radiotelevisivi, è sufficiente considerare i contributi provenienti dalla sola catena strumentale.

## 3) CONFRONTO TRA ANTENNE

Per quel che concerne le misure selettive in frequenza effettuate al fine di verificare la significatività della variazione nell'acquisizione del dato introdotta dall'uso di antenne differenti, nella figura successiva sono riportati l'ora ed i relativi valori misurati a campione, nello stesso punto in cui sono state posizionate le diverse antenne, con misuratore a banda larga.

Figura 3 – Incertezza di ripetibilità per misure a banda stretta in presenza di segnali radiotelevisivi analogici



Dal loro esame si può concludere che l'incertezza introdotta dalla ripetibilità della sorgente è trascurabile; pertanto un'eventuale variazione nel valore di campo elettrico rilevato con catene strumentali differenti sarebbe da attribuirsi ad una differenza nella loro risposta.

Di seguito sono riportati i valori di campo elettrico ottenuti con le 6 misure in banda stretta ed i punteggi riferiti all'indice di compatibilità ( $E_n$ ) per ciascuno dei confronti effettuati.

Figura 4 - Confronto tra i risultati ottenuti con catene strumentali differenti

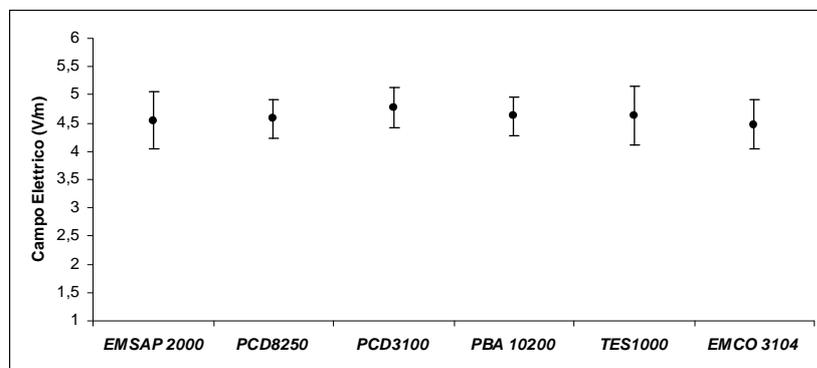


Tabella 3 – Punteggi riferiti all'indice di compatibilità

Tipo antenna	$E_n$ number
EMSAP 2000	-0,09
PCD 8250	-0,05
PCD 3100	0,30
PBA 10200	0,03
TES 1000	0,05
BICONICA 3104	-0,21

L' $E_n$  number, in valore assoluto, è sempre inferiore all'unità: considerando lo stesso metodo di misura e mantenendo fisso il punto di misura, tutte e 6 le catene strumentali hanno quindi manifestato un buon accordo nella risposta.

Tale risultato consente anche di affermare che l'incertezza sul posizionamento verticale del centro elettrico dell'antenna nel caso di misure in banda stretta è trascurabile: se, infatti, sono confrontabili i risultati ottenuti utilizzando antenne che mediano il campo su volumi diversi (le antenne utilizzate hanno lunghezze che variano da meno di 10 cm, per il sensore TES1000, fino a 140 cm, nel caso dell'antenna biconica EMCO 3104), risulta evidente che l'incertezza introdotta da un errore nel posizionamento errato di 5 cm rispetto ad un'altezza di 1,50 m dal piano di calpestio ha un peso molto modesto.

#### D) CONCLUSIONI

I risultati raggiunti con il presente lavoro sono riferiti al caso di siti in cui siano presenti solo emittenti radiotelevisive. In particolare, nel caso di metodologia a banda larga, si è verificato che l'incertezza di ripetibilità del sistema di misura è trascurabile rispetto agli altri contributi all'incertezza introdotti dalla catena strumentale. Anche l'incertezza dovuta al posizionamento orizzontale della sonda ha un peso molto modesto e questo ultimo è tanto più piccolo quanto maggiore è la distanza della sorgente dal punto dello spazio in cui si valuta il livello di campo presente. Infine, un errato posizionamento verticale della sonda da parte dell'operatore introduce un'incertezza che si è stimata essere, cautelativamente, solo del 2,3%. Si può pertanto concludere che il contributo maggiore all'incertezza del risultato di una misura ambientale di campo elettrico, effettuata con strumentazione a banda larga, è fornito dalla catena strumentale utilizzata. Di conseguenza, se gli strumenti adoperati sono tarati secondo le metodiche e la periodicità richieste dalla normativa tecnica e se le misure vengono eseguite secondo le procedure descritte in tali norme, l'incertezza sul valore di campo misurato è sicuramente contenuta entro i 3 dB. In particolare, la precauzione secondo la quale l'operatore debba mantenersi, durante l'esecuzione della misura, ad una distanza dalla sonda di 3 o 4 metri, al fine di garantire l'imperturbabilità del misurando, è altamente cautelativa. Si è, infatti, visto che una variazione della distanza operatore – sonda entro il range 1,3 ÷ 2,3 m introduce un contributo all'incertezza tipo composta estremamente piccolo. Dall'analisi dei risultati si è evinto che, anche nel caso in cui si utilizzi il metodo di rilevazione a banda stretta, il contributo maggiore all'incertezza di misura di campo elettrico dovuto a segnali radiotelevisivi è dato dalle incertezze associate alla catena strumentale, mentre sono praticamente trascurabili i contributi legati al posizionamento o alle dimensioni dell'antenna, fermo restando il rispetto delle procedure di buona tecnica.

I risultati ottenuti nel presente lavoro sono riferiti solo al caso di segnali analogici; è auspicabile che ulteriori studi volti ad una valutazione di questo tipo siano effettuati anche nel caso di segnali digitali.

#### Bibliografia

Norma UNI CEI ENV 13005, "Guida all'espressione dell'incertezza di misura" – Luglio 2000

UKAS M 3003 "The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement", United Kingdom Accreditation Service, Edition 1 - December 1997

M. Borsero, G. Lombardo *“Strumenti e misure a radiofrequenza (Fondamenti)”*, Rapporto tecnico IEN - Istituto Elettrotecnico Nazionale “Galileo Ferrarsi”, Torino  
FINAL DRAFT prEN 50413 *“Basic standard on measurement and calculation procedures for Human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0 Hz - 300 GHz)”*, Aprile 2005.  
Guida ISO/IEC 43-1 *“Proficiency testing by interlaboratory comparison – Part 1: Development and operation of proficiency testing schemes”*, 1997.