



ISSN 1590-2595

quaderni di geofisica

n. 53

MONITORAGGIO ELETTRROMAGNETICO PROGETTO MEM

Paolo Palangio, Angelo Lozito,
Antonio Meloni, Cesidio Bianchi

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

2008

Direttore

Enzo Boschi

Editorial Board

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Anna Grazia Chiodetti (AC)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Lucia Margheriti (CNT)

Simona Masina (BO)

Nicola Pagliuca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - coordinatore (RM1)

Aldo Winkler (RM2)

Gaetano Zonno (MI)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano (responsabile)

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

redazionecen@ingv.it

quaderni
di
geofisica



MONITORAGGIO ELETTROMAGNETICO PROGETTO MEM

ELECTROMAGNETIC MONITORING MEM PROJECT

Paolo Palangio, Angelo Lozito, Antonio Meloni, Cesidio Bianchi

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Via di Vigna Murata, 605 – 00143 Roma



Indice

PRIMA PARTE

Monitoraggio elettromagnetico ambientale nelle bande ULF-ELF-VLF-LF (0.001Hz -100 kHz)	9
1. Introduzione al progetto MEM	9
2. Interferometria a banda larga	10
3. Rumore elettromagnetico di fondo	11
4. Sorgenti elettromagnetiche	12
5. Sorgenti interne alla Terra	17
6. Modi di risonanza della cavità Terra-ionosfera	18
7. Bilancio energetico Terra-ionosfera	21
8. Elaborazione dei dati	24

SECONDA PARTE

Monitoraggio ambientale dei campi elettromagnetici di origine antropica nelle bande ELF- LF-HF-VHF-UHF (50 Hz, 100 kHz - 3 GHz)	27
1. Introduzione	27
2. Strumentazione e metodi di misura	27
3. Le reti di monitoraggio automatico e in continuo	31
4. Struttura funzionale della rete	41
5. Tecniche per la riduzione dell'esposizione	50

APPENDICE 1

Strumentazione sviluppata nell'ambito del progetto MEM e alcuni rilevanti risultati	57
---	----

APPENDICE 2

Il quadro normativo del settore	66
---------------------------------	----

APPENDICE 3

Implicazioni interdisciplinari: I meccanismi d'interazione del campo elettromagnetico con i tessuti biologici	78
Bibliografia essenziale	86

Prefazione

In tutto il mondo proseguono misurazioni e studi per approfondire le conoscenze sui campi elettromagnetici. Le motivazioni principali di questi studi si ricollegano alla necessità di una migliore comprensione dei fenomeni elettromagnetici naturali, che permeano la vita sul pianeta dall'inizio dei tempi, così come al discernimento delle possibili alterazioni che i campi artificiali possono aver comportato sull'equilibrio naturale. Il progetto MEM "Monitoraggio Elettromagnetico Ambientale nelle bande ULF, ELF, VLF, LF, nasce dal Programma Interreg III A Transfrontaliero Adriatico "Tutela e valorizzazione ambientale culturale ed infrastrutturale del territorio transfrontaliero, Asse 1". Nel Progetto sono stati coinvolti oltre alla Regione Abruzzo, nella veste di proponente e capofila, la Regione Molise e ARPA Molise, l'Istituto Nazionale Geofisica e Vulcanologia (INGV), l'Università di Ferrara - Dipartimento Scienze della Terra, l'Università di Tirana (Albania) e l'Istituto Geofisico di Belgrado (Serbia). Nell'ambito del Progetto, iniziato nel 2005 e terminato nel 2007, l'Osservatorio Geofisico di L'Aquila dell'INGV, responsabile scientifico del Progetto, ha sviluppato l'approccio teorico di una nuova classe di sensori di campo magnetico realizzandone i prototipi ingegnerizzati, e con essi, ha quindi progettato e realizzato una avanzata rete interferometrica nella banda 0.001 Hz -100 kHz che consente la rilevazione della distribuzione spaziale e temporale dei campi elettromagnetici, in tutta la banda di interesse, attraverso parametri indicativi che includono la localizzazione e la caratterizzazione delle sorgenti naturali e artificiali che concorrono alla formazione del rumore di fondo. La presente pubblicazione, che costituisce la relazione finale delle attività svolte dall'INGV nell'ambito del progetto, è articolata in due parti. La prima parte riassume i risultati teorici e gli sviluppi tecnologici conseguiti nel contesto di ricerca del progetto stesso, la seconda parte completa il quadro della ricerca attraverso un excursus sulle problematiche relative alle sorgenti antropiche del campo elettromagnetico nella banda 100 kHz -3 GHz, con particolare riferimento alle nuove tecnologie strumentali. In tal modo, si è voluto completare la caratterizzazione della matrice ambientale elettromagnetica, realizzando così anche un completamento e un aggiornamento della pubblicazione Quaderni di Geofisica, 22 edita dall'INGV nel 2002, dal titolo Campi elettromagnetici: tecniche di monitoraggio ambien-

tale e principi dell'interazione biologica, dedicata al tema specifico dei campi elettromagnetici di origine antropica. Vogliamo formulare un ringraziamento al Prof. Enzo Boschi per aver condiviso il progetto nel quale si è inteso fondere nella matrice elettromagnetica le esperienze di fisica terrestre con quelle di fisica ambientale, alla Dott.ssa Giovanna Andreola Dirigente del Servizio Attività Internazionali della Regione Abruzzo, al Dott. Luigi Petracca Direttore Generale ARPA Molise, al Dott. Antonio Di Ludovico Direttore Generale Assessorato Programmazione Regionale Regione Molise, ai colleghi dell'Osservatorio dell'Aquila per il supporto tecnico, Iolanda Cesarino e Silvia Nardi della segreteria tecnica della Sezione di Geomagnetismo Aeronomia e Geofisica Ambientale per la preparazione della grafica e al Dott. Bruno Zolesi la rilettura del testo.

Preface

Studies and measurements of terrestrial natural electromagnetic fields are still in progress all over the world to deepen the knowledge on this geophysical discipline. Main purpose of these studies are related to the need of a better understanding of natural electromagnetic fields, that permeate life on our planet since the beginning of time, and, also to the discrimination of possible alterations that man-made fields could have contributed on the natural balance. An Environmental electromagnetic monitoring in the ULF, ELF, VLF and LF bands, started with the name MEM project, under the frame of 'Programma Interreg III A Adriatic cross-border cooperation' in order to ensure an optimal use of resources to the full potential of the territory. In this project, coordinated by Regione Abruzzo, Regione Molise and ARPA Molise, Istituto Nazionale Geofisica e Vulcanologia (INGV), Dipartimento Scienze della Terra, University of Ferrara, University of Tirana (Albania) and Institute of Geophysics Belgrade (Serbia), are involved.

In the framework of MEM project, started in 2005 and ended in 2007, the 'Osservatorio Geofisico' of L'Aquila, of INGV, was the scientific responsible. In MEM a theoretical approach based on new electromagnetic sensors (probes, radiometers) and the realization of engineered prototypes were developed. Moreover an interferometric network in the band 0.001 Hz -100 kHz was developed and realized allowing the spatial and temporal detection of

electromagnetic fields distribution by means of indicative parameters describing the localization and the characterization of the natural and man-made sources that contribute to the background noise formation. This paper, that constitutes the final report of the activities developed in the project, is organized in two parts. The first part resumes the theoretical results and the technological developments in the research issues, while the second part of the paper completes the limits of the research throughout an excursus on problems related to man-made sources of the electromagnetic fields in the band 100 kHz - 3GHz, with particular attention to the new instrumental technologies. In this way the characterization of the electromagnetic environmental matrix has been completed and, moreover, an extension and upgrading of the previous paper, published on 2002 in N.22 of Quaderni di Geofisica 'Campi elettromagnetici: tecniche di monitoraggio ambientale e principi dell'interazione biologica' devoted to the specific subject of the man-made origin of the electromagnetic fields, was also undertaken. We want to thank Prof. Enzo Boschi who encouraged this project to link the expertise of terrestrial physics and environmental physics within the electromagnetic framework, Dr. Giovanna Andreola Head of the Servizio Attività Internazionali of the Regione Abruzzo, Dr. Luigi Petracca Chief Executive ARPA Molise, Dr. Antonio Di Ludovico Chief Executive of Assessorato Programmazione Regionale of Regione Molise. We also thank the colleagues of L'Aquila Observatory for their technical support, Iolanda Cesarino and Silvia Nardi of Section of Geomagnetism, Aeronomy and Environmental Geophysics of INGV, and Dr. Bruno Zolesi for a final reading of the text.

Prima parte

Monitoraggio elettromagnetico ambientale nelle bande ULF-ELF-VLF-LF (0.001Hz -100 kHz)

1. Introduzione al progetto MEM (Monitoraggio Elettro Magnetico)

Il progetto MEM si prefigge lo scopo primario di dare vita ad una rete di rilevamento dei campi elettromagnetici nella banda 0.001 Hz – 100 kHz.

Il progetto coinvolge diversi partner istituzionali quali la Regione Abruzzo, la Regione Molise (ARPA), l'INGV, l'Università di Ferrara, l'Università di Tirana, l'Istituto geofisico di Belgrado, e mira ad avere un impatto proprio nella diffusione dei risultati delle ricerche sia nell'ambiente scientifico sia al pubblico.

La realizzazione di una rete di monitoraggio permanente costituisce lo strumento di base per conoscere l'ambiente elettromagnetico in cui viviamo. Il carattere innovativo di questo progetto è individuabile nell'approccio scelto per affrontare il complesso problema di rappresentare la distribuzione spaziale e temporale dei campi elettromagnetici, in tutta la banda di interesse, attraverso parametri indicativi che includono la localizzazione e la caratterizzazione delle sorgenti naturali e artificiali che concorrono alla formazione del rumore di fondo ambientale, mediante l'interferometria a larga banda.

Questa tecnica consiste nella combinazione di osservazioni simultanee del campo elettromagnetico ambientale effettuate in più stazioni di misura distribuite sulla superficie terrestre. Le misure interferometriche consentono di ottenere informazioni dettagliate sulla struttura delle sorgenti elettromagnetiche.

Nella cavità Terra-ionosfera sono presenti una quantità di segnali naturali e artificiali prodotti da un numero enorme di sorgenti il cui spettro si estende per oltre dodici decenni nel dominio della frequenza e di 14 nel dominio dell'energia. Questa estesa variabilità prevede la realizzazione di apparati strumentali di misura molto sofisticati; è naturale quindi che il principale obiettivo concreto del progetto è la costituzione di 3 osservatori permanenti nell'Italia Centrale e la realizzazione di un sito WEB del progetto (<http://www.progettomem.it>). Questo sito sarà il supporto operativo e strutturato per la diffusione delle informazioni e dei risultati delle attività svolte in seno al progetto.

L'esperienza maturata nei primi due anni

di attività durante i quali è stata sviluppata la tecnologia necessaria per la realizzazione dei 3 osservatori permanenti ha avuto come ricaduta produttiva l'industrializzazione della strumentazione di misura da parte di un'azienda italiana (vedi appendice1). La tecnologia sviluppata si presta ad essere impiegata anche in altri ambiti della ricerca in particolare nel campo della prospezione elettromagnetica dell'interno della Terra con le tecniche di Magneto Tellurica (MT) e Geomagnetic Deep Sounding (GDS).

Uno dei temi del progetto è la messa a punto di modelli e strategie per giungere alla separazione del segnale prodotto dalle sorgenti interne alla Terra, dal fondo elettromagnetico presente sulla superficie terrestre.

Nella cavità Terra-ionosfera sono presenti una quantità di segnali naturali e artificiali prodotti da un numero enorme di sorgenti il cui spettro si estende per oltre 12 decenni nel dominio della frequenza e di 14 decenni nel dominio dell'energia.

In sintesi i temi sviluppati in questo progetto possono essere sintetizzati in quattro punti:

- 1) sviluppo tecnologico;
- 2) indagini sulle manifestazioni elettromagnetiche di origine interna alla Terra;
- 3) caratterizzazione del rumore elettromagnetico di fondo;
- 4) studio dei fenomeni elettromagnetici che hanno origine nella magnetosfera, nella ionosfera e nella cavità Terra-ionosfera.

Per poter abbracciare tutte queste tematiche, data la molteplicità dei parametri da misurare e la complessità dei meccanismi fisici da studiare, è necessario che il rumore intrinseco dell'interferometro proposto sia inferiore al livello dei segnali magnetici naturali più deboli che si intendono esplorare. La densità spettrale dei segnali naturali più flebili è dell'ordine di 5 – 10 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ nella banda medio-alta dello spettro di indagine.

La strumentazione sviluppata presenta un rumore di fondo dell'ordine di

$$1 - 2 fT / \sqrt{\text{Hz}}$$

nella banda LF (>30 kHz).

Considerata inoltre la grande variabilità dei campi magnetici coinvolti che può spaziare per ben 14 decadi in energia e 7 decadi in ampiezza, è stato adottato un convertitore analogico digitale con una dinamica di 24 bit. L'attuazione del progetto si realizza attraverso lo sviluppo di una rete interferometrica permanente sul territorio della regione Abruzzo e della Regione Molise che potrà essere ulteriormente espansa, nelle fasi successive, all'intero territorio delle due Regioni fino a coprire un'area di circa 90.000 km quadrati. Nella prima fase verranno realizzati 3 osservatori permanenti distribuiti nell'Italia Centrale: L'Aquila (AQU), Barete (BAR) e Duronia (DUR). In ognuno di questi osservatori verranno misurate le tre componenti del campo magnetico, le tre componenti del campo elettrico e le due componenti del campo tellurico. Questa configurazione è necessaria per separare i campi artificiali di origine locale dai campi elettromagnetici naturali e i campi di origine interna da quelli di origine esterna alla Terra.

L'approccio con tecniche interferometriche consente tra l'altro di determinare le funzioni di trasferimento tra i siti di misura che tengono in conto della struttura di conducibilità elettrica del sottosuolo nei tre osservatori. Queste informazioni costituiscono la base per realizzare i modelli tramite i quali è possibile identificare campi elettromagnetici anomali di origine interna alla Terra.

Quindi lo scopo di questo progetto è quello di realizzare la tomografia elettromagnetica ambientale che ha come prodotto finale la rappresentazione della distribuzione dei campi elettromagnetici nel dominio del tempo, nel dominio della frequenza e nel dominio dello spazio. Questa tecnica costituisce un potente strumento di indagine per ottenere mappe tridimensionali, su scala regionale, del rumore elettromagnetico di fondo. Le mappe tomografiche oltre a riportare la distribuzione spaziale delle sorgenti elettromagnetiche, caratterizzano i segnali emessi dalle sorgenti mediante una serie di parametri quali l'energia, la polarizzazione, le proprietà statistiche e il contenuto spettrale.

L'attività svolta nella seconda fase di attuazione del progetto, dopo lo sviluppo tecnologico e la costituzione della prima stazione di misura, si è articolata principalmente intorno a tre temi: studio delle matrici spettrali, della divergenza del vettore di Poynting e del tensore elettromagnetico.

2. Interferometria a larga banda

L'interferometria è una tecnica osservativa utilizzata in diversi campi della Fisica, come nella radioastronomia e nell'ottica. L'interferometria radioastronomica si basa sulla misura simultanea, in punti differenti, del segnale emesso da una radiosorgente e lo studio delle frange di interferenza prodotte nella rete di misura. I punti di misura vengono disposti secondo una appropriata geometria. Questa tecnica consente di ottenere molte più informazioni di quanto consentano le misure da singoli punti.

L'interferometria radioastronomica si basa sulle seguenti assunzioni:

- 1) la sorgente può essere considerata puntiforme;
- 2) la distanza tra la sorgente e i punti di osservazione è molto più grande della distanza tra i punti di osservazione;
- 3) la lunghezza d'onda dei segnali è molto più piccola delle dimensioni della rete osservativa;
- 4) gli osservatori si trovano sempre nel campo lontano (far field);
- 5) le proprietà dei segnali misurati non vengono alterate dal contesto elettromagnetico terrestre;
- 6) I segnali vengono osservati attraverso una finestra frequenziale molto stretta.

Da queste assunzioni ne deriva che i segnali registrati nei punti di misura sono praticamente identici, soltanto la loro fase è differente. L'elaborazione dei segnali consiste nella correlazione incrociata dei segnali ricevuti nei singoli punti di misura. I segnali misurati possono essere associati all'energia totale oppure alle tre componenti del campo elettrico delle emissioni delle radiosorgenti. Lo studio delle ampiezze e delle fasi consente di eseguire l'analisi interferometrica.

Nell'interferometria a larga banda e a bassa frequenza (ULF-ELF-VLF), le assunzioni sopra esposte vengono capovolte:

- 1) le sorgenti naturali sono prevalentemente estese e le loro dimensioni sono molto più grandi o comparabili con le dimensioni della rete rivelatrice;
- 2) la distanza tra le sorgenti e le stazioni di misura sono dello stesso ordine di grandezza delle dimensioni della rete interferometrica;
- 3) la lunghezza d'onda dei segnali è, per gran parte dello spettro investigato, molto più grande della rete;
- 4) gli osservatori si trovano sempre nel campo vicino (near field);
- 5) le proprietà dei segnali elettromagnetici

- misurati vengono considerevolmente modificate dal contesto elettromagnetico terrestre;
- 6) I segnali vengono osservati in una banda di frequenze estremamente ampia.

La conseguenza di queste assunzioni è che una data sorgente elettromagnetica viene “percepita” in ciascuno dei punti di osservazione in maniera differente. Questa diversità riguarda le proprietà fisiche della sorgente e le caratteristiche dei segnali emessi dalla sorgente quali le proprietà spettrali e statistiche. Ciò è dovuto principalmente all’interazione dei segnali con la cavità Terra-ionosfera. Le proprietà fisiche dei bordi della cavità rivestono un ruolo fondamentale. Queste sono soggette a variazioni spaziali e temporali considerevoli, pertanto segnali osservati nello stesso istante ma in punti spazialmente distinti sono diversi quando anche gli osservatori fossero disposti simmetricamente rispetto alla sorgente. D’altro canto, misure effettuate in un singolo punto di osservazione ma in tempi differenti, risultano diverse anche se i segnali manifestano proprietà stazionarie associate ad una costante di tempo più lunga del periodo di osservazione.

Per la realizzazione della tomografia elettromagnetica dell’area investigata e la caratterizzazione delle sorgenti elettromagnetiche responsabili dei campi che vengono rivelati dalla rete interferometrica si procede attraverso 2 fasi.. In primo luogo si mette in atto la ricostruzione del campo all’interno del territorio delimitato dalla rete applicando il teorema integrale di Cauchy. Le misure effettuate sul bordo del dominio territoriale vengono interpolate in modo da ottenere una funzione continua sul perimetro limitato dai punti di osservazione della rete interferometrica. Le armoniche principali vengono ricostruite mediante funzioni olo-morfe nel dominio della frequenza partendo dai due tensori densità spettrale relativi ai campi elettrico E e al magnetico H .

Queste funzioni sono complesse, ma applicando il teorema integrale di Cauchy permettono di ricostruire la distribuzione del campo all’interno del dominio.

Si opera sulle funzioni $G(\Delta t_i, \Delta f_{ji}, s)$ che rappresentano la generica componente del campo elettrico e del campo magnetico. Queste funzioni $G(\Delta t_i, \Delta f_{ji}, s)$ sono relative alle 6 componenti delle grandezze elettriche e magnetiche misurate, in cui Δt_i rappresentano gli intervalli temporali in cui viene suddiviso il record giornaliero dei dati. In ciascuno degli intervalli Δt_i vengono effettuate le trasformate i -esime di Fourier. Δf_{ji} rappresentano le bande j -esime rela-

tive alla i -esima trasformata effettuata nell’intervallo i -esimo Δt_i , s è la coordinata curvilinea sul percorso di integrazione intorno al perimetro del dominio, ovvero intorno all’area geografica delimitata dalle stazioni di misura. s è ovviamente funzione della latitudine e della longitudine.

Il secondo punto viene affrontato partendo dal dimensionamento della finestra temporale attraverso la quale vengono effettuate le elaborazioni dei segnali. Tale scelta si basa sulle proprietà statistiche dei segnali osservati. È necessario che per ciascuna classe di fenomeni venga scelta una finestra avente caratteristiche di “stazionarietà locale”, considerato che il rumore em di fondo presenta un elevato grado di non stazionarietà. Lo studio delle sorgenti si basa essenzialmente sull’analisi frequenziale del tensore elettromagnetico nella banda 1 Hz – 100 kHz. Da questo tensore vengono calcolati una serie di parametri in funzione del tempo, della frequenza e dello spazio: la Lagrangiana del campo elettromagnetico, l’impedenza d’onda, il vettore di Poynting e i 15 elementi invarianti del tensore em. Nella banda inferiore invece (0.001 Hz – 100 Hz) l’analisi riguarda lo studio del tensore impedenza dell’interno della Terra, le funzioni di risposta impulsiva del sottosuolo e la separazione dei segnali di origine interna alla Terra dal fondo che si misura sulla superficie terrestre.

L’Acquisizione dei dati è quindi scissa in due bande: nella banda 0.001 Hz – 100 Hz e nella banda 1 Hz – 100 kHz. Nella prima banda vengono registrati direttamente i dati campionati, nella seconda banda il software di acquisizione esegue in tempo reale la trasformata di Fourier delle sei componenti del campo, con risoluzione di 1 Hz. Con queste trasformate viene costruito il tensore elettromagnetico $T_{6 \times 6}$; con i 4 minori del tensore vengono realizzate 2000000 matrici spettrali 3×3 ogni 10 minuti.

3. Rumore elettromagnetico di fondo

Nella banda di frequenze che si estende da un millesimo di ciclo al secondo fino a 100000 cicli al secondo si manifestano una grande varietà di fenomeni elettromagnetici naturali che hanno accompagnato l’umanità attraverso i millenni. Per milioni di anni queste radiazioni non hanno subito apprezzabili cambiamenti; tutti gli esseri viventi sono comparsi e si sono evoluti in presenza di questa radiazione di fondo. Soltanto nel secolo scorso le emissioni artificiali hanno iniziato a sommarsi a questo fondo elettromagnetico.

Il fondo elettromagnetico naturale, osservabile in qualunque punto della superficie terrestre, è dato dalla sovrapposizione di una quantità di segnali prodotti da un numero enorme di sorgenti distribuite nella cavità Terra-ionosfera, nella magnetosfera, nella ionosfera e all'interno della Terra. Questo fondo permea lo spazio compreso tra la superficie terrestre e la ionosfera interagendo in maniera complessa con le due superfici che limitano la cavità. Alcuni di questi segnali sono:

- 1) modi di oscillazione libera delle cavità magnetosferica (0.001 Hz – 0.01 Hz);
- 2) modi di risonanza della cavità alfvénica (0.1 Hz – 10 Hz);
- 3) modi di risonanza longitudinale della cavità Terra-ionosfera (6 Hz – 50 Hz);
- 4) fenomeni risonanza onda-particella trasversale (risonanza ciclotronica) e longitudinale (risonanza Cerenkov, 1 kHz – 20 kHz);
- 5) emissioni legate a processi vari di instabilità nel plasma magnetosferico e ionosferico (0.001 Hz – 100 kHz);
- 6) segnali elettromagnetici associati al transito di meteore nell'atmosfera (300 Hz – 30 kHz);
- 7) emissioni associate a impulsi radio di origine atmosferica (1 kHz – 100 kHz);
- 8) emissioni che accompagnano gli impulsi gamma atmosferici (6 kHz – 50 kHz);
- 9) emissioni dovute a “sprite”, “blue jet”, “red flash” ecc. nell'alta atmosfera (2 kHz – 60 kHz);
- 10) emissioni secondarie generate da onde magnetoidrodinamiche prodotte all'interno della magnetosfera, eccitate da transienti em artificiali e naturali (10 Hz – 20 kHz);
- 11) emissioni prodotte dalle esplosioni nucleari (200 Hz – 10000 Hz);
- 12) emissioni associate a fenomeni tettonici e vulcanici (0.001 Hz – 1000 Hz);
- 13) segnali di risonanza trasversale della cavità Terra-ionosfera (800 Hz – 5000 Hz).

Nel corso dell'ultimo secolo si è avuta una proliferazione caotica dei segnali elettromagnetici artificiali in cui siamo immersi quotidianamente e il cui impatto sull'ecosistema non è ancora stato chiarito ed è oggetto di indagine da diversi anni. Negli ultimi decenni è andata sempre più aumentando la popolazione esposta stabilmente all'azione di campi elettromagnetici artificiali che, nelle aree intensamente urbanizzate e industrializzate, possono essere molto più intensi dei campi naturali. Le principali sorgenti artificiali, la cui banda di frequenze si sovrappone

a quella dei segnali naturali, sono le linee ferroviarie, i sistemi metropolitani di trasporto su rotaie (metro, tram, filobus) gli impianti di distribuzione dell'energia elettrica, gli impianti industriali, ecc.. Queste sorgenti, per la loro estensione spaziale, interessano vaste aree intensamente popolate. Poi ci sono i sistemi locali di piccola estensione spaziale i cui effetti sono limitati alle aree domestiche; questi sono rappresentati da quella quantità di oggetti tecnologici di uso quotidiano diffusi oramai su scala continentale.

Il rumore elettromagnetico di fondo si è arricchito di questi segnali artificiali al punto da coprire una parte dei segnali naturali. Discriminare le sorgenti naturali diventa un problema che in alcuni casi è di una complessità insuperabile. La scelta dei siti di misura richiede quindi una preventiva conoscenza del livello di fondo artificiale locale attraverso una campagna di prospezione effettuata sul territorio.

Il rumore di fondo naturale misurato sulla superficie terrestre è dominato dal fondo atmosferico prodotto dall'insieme delle scariche elettriche che hanno luogo sull'intera superficie terrestre al ritmo di circa 60-100 al secondo con una estensione spettrale vastissima, da qualche Hz fino a diversi MHz con un massimo intorno a 300 kHz. Lo spettro intrinseco di ciascun evento viene deformato dalla presenza della cavità Terra-ionosfera, in pratica si osservano diverse finestre spettrali, la prima con un massimo intorno a 8 Hz con le relative armoniche che giungono fino a 45 Hz (risonanza Schumann), la seconda nella banda 900 Hz – 5000 Hz (risonanza trasversale), la terza nella banda centrata tra 5 kHz e 12 kHz e altre meno significative per i nostri obiettivi, come quella HF e ottica, in quanto cadono al di fuori della banda di indagine. Se si prende in considerazione una singola scarica atmosferica, lo spettro osservato dipende soprattutto dalla distanza sorgente-osservatore. Da vicino ciò che si osserva è lo “spettro – sorgente”, da lontano si osserva il prodotto di convoluzione della “funzione – sorgente” con la funzione di trasferimento della cavità Terra – ionosfera. Mentre il primo osservatore vede un massimo intorno a 300 kHz, il secondo lo vede intorno a 7 kHz.

4. Sorgenti elettromagnetiche

Le sorgenti elettromagnetiche, dal punto di vista dell'estensione spaziale possono essere classificate in:

- dipoli elementari puntiformi

- dipoli elementari estesi
- multipoli ibridi estesi
- multipoli ibridi puntiformi

queste sorgenti, dal punto di vista della natura intrinseca possono essere:

- magnetici
- elettrici
- ibridi

dal punto di vista spettrale:

- sorgenti termiche
- sorgenti colorate
- sorgenti complesse

dal punto di vista statistico:

- gaussiane
- isotrope
- stazionarie
- impulsive
- omogenee

In natura possono presentarsi combinazioni varie di tutte queste schematizzazioni.

Inoltre una data sorgente osservata in punti diversi può manifestare proprietà completamente differenti.

Vi sono anche sorgenti magnetiche non irradianti o quasi (QNR), molto diffuse in natura, in cui il campo magnetico rimane confinato nel volume della sorgente, tipico esempio sono le sorgenti toroidali (sorgenti dinamo nella magnetosfera, nella ionosfera e nel nucleo terrestre). Le sorgenti estese complesse in generale possiedono quasi sempre una componente toroi-

dale. Queste componenti non sono accessibili mediante misure effettuate lontano dalla sorgente, nel senso che non è possibile determinare il bilancio energetico del sistema attraverso misure esterne al sistema. In realtà ciò che si misura sono soltanto le componenti poloidali delle sorgenti. Queste componenti, nel caso di sorgenti molto estese, di dimensioni maggiori della lunghezza d'onda dominante, producono campi elettrici e magnetici la cui lunghezza di correlazione spaziale e temporale riflette le proprietà di coerenza della sorgente legate ai processi di genesi dei campi.

Nella zona reattiva si riesce quasi sempre a trovare il legame tra la coerenza spaziale e temporale dei campi misurati e la coerenza spaziale e temporale del sistema di correnti che generano tali campi.

Infine vi sono sorgenti naturali le quali vengono attivate da segnali artificiali. Spesso uno stesso segnale artificiale si manifesta in due bande di frequenza completamente diverse e distanti tra di loro (figure 1.1 e 1.2). I segnali relativi alle due bande risultano provenire da direzioni opposte: la superficie terrestre e la ionosfera. Ad esempio i grandi sistemi di trasmissione e di trasformazione dell'energia elettrica possono dare luogo a fenomeni di risonanza locale nella magnetosfera producendo segnali di origine magnetosferica caratterizzati da righe spettrali distanziate di 100 Hz (figura 1.2).

Le armoniche dei 50 Hz penetrano nella ionosfera e si propagano nella magnetosfera fino a giungere nella plasmasfera equatoriale, seguendo le linee di forza del campo magnetico terrestre, dove subiscono un processo di amplificazione. Questi segnali appaiono, all'osservatore a terra, essere emessi da una superficie

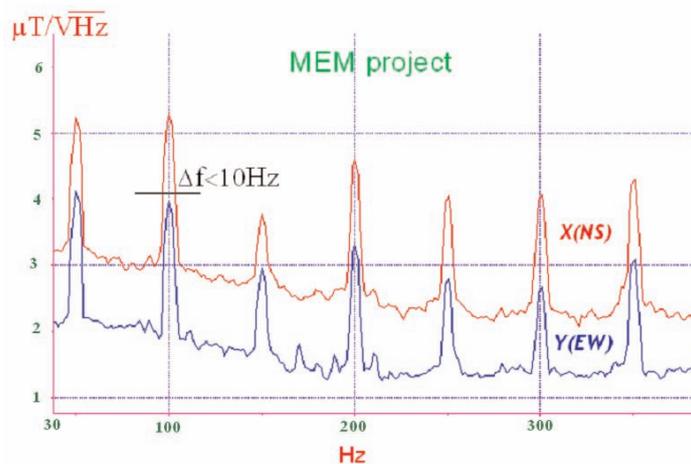


Figura 1.1 Armoniche prodotte dalla rete di distribuzione dell'energia elettrica.
Figure 1.1 Harmonic components due to the power distribution lines.

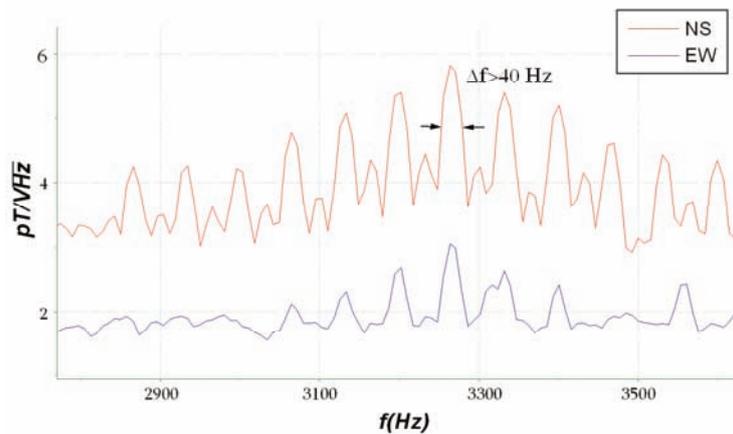


Figura 1.2 Armoniche di rete che hanno interagito con il plasma magnetosferico.
Figure 1.2 Harmonic components of the power lines after the interaction with the magnetosphere.

molto ampia che è costituita dal bordo inferiore della ionosfera. L'impedenza d'onda dei segnali misurati riflette le proprietà di tale superficie, questa risulta essere molto più bassa dell'impedenza del vuoto.

I segnali che giungono in tale zona devono superare il livello di soglia al di sopra della quale si innescano i processi di risonanza ciclotronica onda-particella che è di circa 2 pT.

Le righe spettrali dei segnali magnetosferici differiscono da quelli terrestri per la larghezza delle righe: mentre le armoniche terrestri presentano una larghezza di pochi Hz, quelle di origine magnetosferica sono caratterizzate da un allargamento di 20-60 Hz (figura 2). Un altro esempio sono le emittenti HF di grande potenza che possono eccitare, nella bassa ionosfera, segnali nella banda ELF/VLF mediante il riscaldamento locale del plasma. I transienti nei grandi sistemi di potenza possono stimolare la magnetosfera e la ionosfera producendo tutta una serie di fenomeni di risonanza onda-particella, oltre ad eccitare i modi di risonanza della cavità Terra-ionosfera.

Il campo elettromagnetico emesso da una sorgente attiva o scatterato da un oggetto passivo è sempre caratterizzato dal campo di propagazione e dal campo induttivo. Il campo evanescente lo si osserva nelle immediate vicinanze della sorgente, il campo di propagazione si osserva lontano dalla sorgente;

lontano e vicini è in relazione con la lunghezza d'onda che si considera e con la dimensione della sorgente. Vi è anche da considerare la lunghezza di coerenza della sorgente. In queste testo si assume il caso più semplice in cui la lunghezza di coerenza coincide con la dimen-

sione della sorgente. Il campo vicino contiene utili informazioni sulla natura della sorgente. Come interpretare le informazioni ottenute con la misura del campo prossimale è una questione piuttosto complessa ed è uno dei temi che verranno sviluppati in questo progetto.

E' usuale considerare lo spazio intorno alla sorgente elettromagnetica suddiviso in 4 regioni in funzione della distanza sorgente-osservatore d e della dimensione della sorgente D :

1. $d < \lambda/2\pi$ - zona prossimale (campo reattivo)
2. $\lambda/2\pi < d < D^2/4\lambda$ - zona di Fresnel 1
3. $D/4\lambda < d < 2D^2/\lambda$ - zona di Fresnel 2
4. $d > 2D^2/\lambda$ - zona di Fraunhofer.

Nella regione 1 non si ha irradiazione (l'energia rimane localizzata nell'intorno della sorgente), il vettore di Poynting è immaginario in quanto E e H sono in opposizione di fase e si attenua con l'inverso della quinta potenza della distanza; in realtà vi è sempre una piccola componente reale. Questo piccolo contributo reale ci consente di vedere le sorgenti da lontano. La configurazione spaziale della perturbazione elettromagnetica è estremamente complessa e dipende essenzialmente dalle caratteristiche della sorgente. L'energia all'interno della sfera di raggio $r \approx \lambda/2\pi$ viene mutuamente scambiata

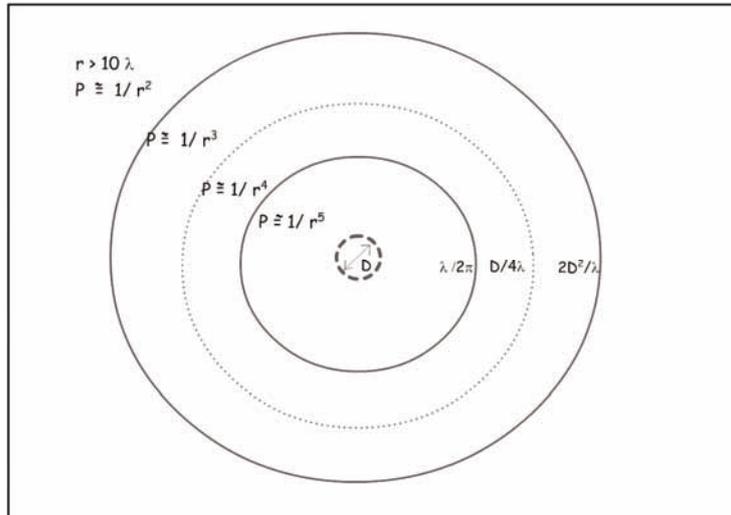


Figura 1.3 Schematizzazione dello spazio che circonda una sorgente elettromagnetica di estensione D.

Figure 1.3 Schematic representation of the space surrounding an electromagnetic source having size D.

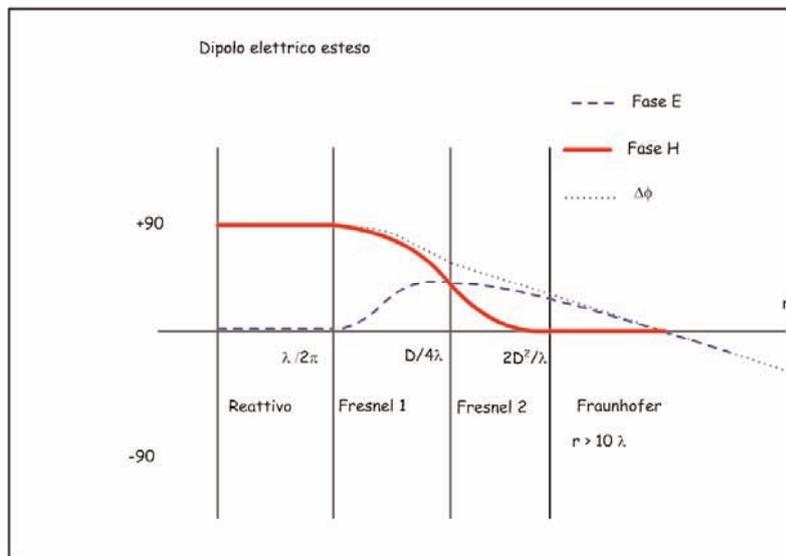


Figura 1.4 Fase dei campi E e H per un dipolo elementare esteso.

Figure 1.4 Phase of the fields E and H of an elementary dipole of size D.

con la sorgente. Sorgente e spazio circostante risultano permanentemente accoppiati (figure 1.3 e 1.4). L'impedenza d'onda è un tensore complesso.

La natura del campo è sostanzialmente capacitiva nel caso in cui la struttura radiante possieda le caratteristiche del dipolo elettrico, viceversa è sostanzialmente induttiva quando la struttura radiante è assimilabile ad un dipolo magnetico. Se l'antenna è assimilabile ad un dipolo elettrico si ha

$$E / H > 377 \Omega$$

con il campo elettrico che decresce con il cubo della distanza, mentre il campo magnetico decresce con il quadrato della distanza. Se l'antenna è assimilabile ad un dipolo magnetico si ha:

$$E / H < 377 \Omega$$

con gli andamenti dei campi che sono invertiti rispetto al caso precedente.

Nella regione 2 la componente immaginaria di P è maggiore della componente reale, P si attenua con l'inverso della quarta potenza

della distanza. L'impedenza d'onda non è ancora definibile. Tale regione si estende fino a una distanza r detta di Rayleigh.

Nella regione 3 la componente reale di P è maggiore della componente immaginaria, P si attenua con l'inverso del cubo della distanza. La componente reale dell'impedenza d'onda è maggiore di quella immaginaria. In questa regione non si hanno le condizioni di onda piana poiché prevalgono le interferenze dovute alle geometrie delle antenne e, non vi è relazione costante tra le fasi e tra le intensità dei vettori elettrico e magnetico. La determinazione della densità di potenza S in un punto richiede la misura vettoriale della fase e dell'ampiezza di entrambi i campi. La misura scalare di entrambi i campi non consente quindi di determinare l'esatto valore della densità di potenza "S" W/m^2 , tuttavia tale valore può in alcune circostanze essere accettato poiché è comunque conservativo, dato che la densità di potenza sarà comunque minore della densità di potenza in condizioni di onda piana e quindi di campi ortogonali.

$$S \leq |E| \wedge |H|$$

Si introduce quindi il concetto di densità di potenza di onda piana equivalente S_{eq} , come il valore di densità di potenza che verrebbe trasportata dall'onda piana in cui i campi elettrico e magnetico hanno ampiezza uguale a quella misurata separatamente in condizioni di campo vicino radiativo.

$$S_{eq} = |E| \wedge |H|$$

Nella regione 4 le componenti radiali di H e E sono praticamente nulle, la componente zenitale del campo elettrico è legata alla componente azimutale del campo magnetico attraverso una semplice relazione scalare, l'impedenza del mezzo $E\theta/H\phi$, che non dipende dalle caratteristiche della sorgente, dipende soltanto dalle proprietà fisiche del mezzo in cui si propaga l'onda.

Il vettore di Poynting è sempre reale in quanto le componenti sono sempre in fase e si attenua con il quadrato della distanza.

Nella regione di campo radiativo lontano la perturbazione elettromagnetica assume localmente le caratteristiche dell'onda piana, con distribuzioni uniformi del campo elettrico e del campo magnetico. Il campo elettrico ed il campo magnetico oscillano in fase su piani perpendicolari e nello stesso tempo le oscillazioni si mantengono ortogonali alla direzione di propagazione. Ciò determina che si mantenga costante nel tempo e nello spazio il rapporto h

(impedenza dell'onda) tra i moduli delle intensità dei due campi, cioè che valga la relazione:

$$h = \frac{E}{H} = 377 \quad \Omega.$$

Dal punto di vista delle tecniche di misura la condizione di campo lontano, e quindi di onda piana, permette di effettuare le sole rilevazioni di campo elettrico (di campo magnetico) per ottenere l'informazione di campo magnetico (di campo elettrico) e di densità di potenza. Questa però è una schematizzazione che non risulta adeguata quando si studiano le sorgenti a larga banda nella zona reattiva. In realtà il campo elettromagnetico varia spazialmente con continuità. Le relazioni di fase tra E e H sono anch'esse dipendenti da r . A titolo d'esempio, in figura 4, è riportata la fase dei campi E e H per un dipolo elementare esteso al variare di r . L'energia prodotta da una sorgente elementare puntiforme può essere rappresentata mediante uno sviluppo in serie della funzione $1/r$:

($S(t)$ è la funzione sorgente, k_e e k_m sono

$$W = \left[\frac{k_{1e}}{r} \left(\frac{d^2 S}{dt^2} \right) + \frac{k_{2e}}{r^2} \left(\frac{dS(t)}{dt} \right) + \frac{k_{3e}}{r^3} S(t) + \dots \right]$$

$$\cdot \left[\frac{k_{1m}}{r} \left(\frac{d^2 S}{dt^2} \right) + \frac{k_{2m}}{r^2} \left(\frac{dS}{dt} \right) + \frac{k_{3m}}{r^3} S(t) + \dots \right]$$

costanti che inglobano le caratteristiche fisiche e geometriche del dipolo in funzione di r)

Possiamo considerare una sfera di raggio r con il centro coincidente con la sorgente, l'energia totale distribuita sulla superficie S è data da:

$$W_{tot} = 4\pi \left[k_{1e} k_{1m} \left(\frac{d^2 S}{dt^2} \right)^2 + \frac{k_{1e} k_{2m}}{r^2} \left(\frac{d^2 S}{dt^2} \right) \left(\frac{dS(t)}{dt} \right) + \frac{k_{1e} k_{3m}}{r^3} \left(\frac{d^2 S}{dt^2} \right) S(t) + \dots \right]$$

Il termine costante $k_{1e} k_{1m}$, indipendente dalla scelta del raggio della sfera, rappresenta l'energia impressa dai generatori presenti all'interno della sorgente. I termini non costanti rappresentano il contributo reattivo che è tanto più intenso quanto più si è vicini alla sorgente. Questa rappresentazione è più realistica rispetto alle usuali schematizzazioni.

5. Sorgenti interne alla Terra

Il monitoraggio elettromagnetico dei processi geodinamici si basa su due aspetti distinti:

- 1) cambiamenti nel tempo della struttura di conducibilità elettrica del sottosuolo dovuti a variazioni dello stress tettonico a cui sono sottoposte le rocce nelle aree sismogenetiche;
- 2) emissioni di campi elettromagnetici dovute a diversi meccanismi di trasformazione di energia meccanica in energia elettromagnetica. Questi meccanismi dipendono dalla struttura e dalla natura delle rocce.

Il punto 1 viene affrontato mediante il monitoraggio continuo delle funzioni di trasferimento e degli elementi del tensore impedenza. Per quanto riguarda il punto 2 bisogna considerare la natura della sorgente em ipogeica, la valutazione dello spettro intrinseco e, attraverso le funzioni di risposta impulsiva del sottosuolo, dello spettro osservabile in superficie.

In letteratura sono presenti numerosi lavori sulle anomalie elettromagnetiche associate a eventi sismici che riportano osservazioni in una banda di frequenze estremamente ampia che si estende dai mHz fino ai MHz. La banda 0.001 Hz – 1000 Hz viene attribuita a processi lineari, mentre alla banda superiore possono essere associati processi non lineari nella trasformazione di energia meccanica in energia em.

Tuttavia, considerata l'attenuazione del mezzo attraversato dai segnali e.m., è ragionevole prevedere di poter osservare sulla superficie terrestre segnali nell'estremo inferiore della banda, 0.001 Hz – 1000 Hz. Questo dovrebbe essere l'intervallo di frequenze su cui focalizzare le indagini in quanto i segnali possono, sotto certe condizioni, raggiungere la superficie terrestre con ampiezze sufficienti da consentirne la discriminazione dal rumore di fondo e.m. In questa banda di frequenze la propagazione dei segnali elettromagnetici deve essere trattata in termini di diffusione anche all'esterno della Terra, in quanto siamo nella banda al di sotto della frequenza di cut-off minima di cavità per i modi TM e TE.

Un'altra banda di interesse è quella nota come "dead band" che si estende da 1 kHz fino a 5 kHz.

In questa banda si ha una elevata attenuazione nel sottosuolo dovuta alle caratteristiche dei materiali attraversati, nel contempo si ha un basso livello del rumore ambientale in quanto tale banda coincide con quella relativa ai modi di risonanza trasversale di cavità.

Poiché i segnali di origine interna non si propagano nella cavità, questi possono essere

osservati soltanto in prossimità della sorgente.

Il campo misurato sulla superficie terrestre è dato dalla sovrapposizione del campo sorgente, del campo indotto dall'interazione del campo sorgente con l'interno della Terra e dal campo di origine interna alla Terra. Per affrontare il problema della separazione dei campi la cui genesi sia nel sottosuolo si assumono alcune semplificazioni che si riassumono nella seguente rappresentazione:

$$\begin{pmatrix} E_{Xm} \\ E_{Ym} \\ E_{Zm} \\ H_{Xm} \\ H_{Ym} \\ H_{Zm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} & T_{15} & T_{16} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} & T_{25} & T_{26} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} & T_{35} & T_{36} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} & T_{45} & T_{46} \\ T_{51} & T_{52} & T_{53} & T_{54} & T_{55} & T_{56} \\ T_{61} & T_{62} & T_{63} & T_{64} & T_{65} & T_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_{Xi} \\ E_{Yi} \\ E_{Zi} \\ H_{Xi} \\ H_{Yi} \\ H_{Zi} \end{pmatrix}$$

Il legame tra le funzioni sorgente e il campo misurato è dato dal tensore T (6x6) che rappresenta le proprietà dell'interno della Terra, in cui il pedice m si riferisce alla grandezza misurata, con il pedice i sono indicati i segnali di ingresso al sistema T. Così posto il problema non vi sono soluzioni concrete in quanto non sono conoscibili tutte le funzioni sorgente.

Una relazione ulteriormente semplificata, con le seguenti condizioni al contorno: $E_{xi}=E_{yi}=E_{zi}=H_{xi}=H_{yi}=H_{zi}=0$, è data dalla seguente espressione:

$$\begin{pmatrix} E_{Xm} \\ E_{Ym} \\ E_{Zm} \\ H_{Xm} \\ H_{Ym} \\ H_{Zm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_1 & T_2 \\ T_3 & T_4 \\ T_5 & T_6 \\ T_7 & T_8 \\ T_9 & T_{10} \\ T_{11} & T_{12} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} H_{Xi} \\ H_{Yi} \end{pmatrix}$$

In cui il campo sorgente è rappresentato dalla sola componente orizzontale del campo magnetico.

Gli unici minori del tensore T effettivamente calcolabili sono i seguenti:

$$H(\omega)_{zm} = T_{11}(\omega)H(\omega)_{xm} + T_{12}(\omega)H(\omega)_{ym}$$

$$\begin{pmatrix} E(\omega)_{Xm} \\ E(\omega)_{Ym} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_1(\omega) & T_2(\omega) \\ T_3(\omega) & T_4(\omega) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_7(\omega) & T_8(\omega) \\ T_9(\omega) & T_{10}(\omega) \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} H(\omega)_{Xm} \\ H(\omega)_{Ym} \end{pmatrix}$$

Dagli elementi di questi minori del ten-

sore T, calcolati nel dominio della frequenza, vengono determinate le 6 funzioni “risposta impulsiva $I_1(t), I_2(t), I_3(t), I_4(t), I_5(t), I_6(t)$ ”. Queste funzioni consentono di calcolare una delle incognite del problema mediante la convoluzione delle funzioni “risposta impulsiva” con i campi misurati:

$$\begin{aligned} H(t)_z &= I_1(t) \otimes H(t)_{xm} + I_2(t) \otimes H(t)_{ym} \\ E(t)_x &= I_3(t) \otimes H_{xm}(t) + I_4(t) \otimes H_{ym}(t) \\ E(t)_y &= I_5(t) \otimes H_{xm}(t) + I_6(t) \otimes H_{ym}(t) \end{aligned}$$

La differenza tra i campi misurati e le funzioni ricostruite fornisce il campo di origine interna:

$$\begin{aligned} H(t)_z - H(t)_{zm} &= H_{zs} \\ E(t)_x - E(t)_{xm} &= E_{xs} \\ E(t)_y - E(t)_{ym} &= E_{ys} \end{aligned}$$

Questi segnali differenza possono però essere stati generati anche sulla superficie terrestre vicino al punto di misura, i segnali prossimi non producono effetti induttivi rilevanti, il loro contributo nelle funzioni di risposta impulsiva è praticamente nullo, questi segnali compaiono nelle funzioni differenza. Per discriminare questa ulteriore ambiguità si applica, a questo campo residuo, il teorema della divergenza del vettore di Poynting. Gli algoritmi connessi con questo teorema forniscono la direzione di arrivo dei segnali residui, consentendo quindi di isolare il campo di origine interna alla Terra. Spesso però l’ambiguità direzionale non viene risolta in quanto anche il rumore locale appare essere emesso dal sottosuolo. Uno strumento di maggiore efficacia è costituito dal tensore elettromagnetico. I segnali sintetizzati vengono introdotti nel tensore al posto delle omologhe componenti, opportunamente normalizzati. Lo studio degli autovettori in funzione della frequenza consente di discriminare la componente interna dal rumore locale.

6. Modi di risonanza della cavità Terra-ionosfera

La cavità Terra-ionosfera si comporta come un sistema risonante le cui frequenze sono legate alle dimensioni della cavità: la circonferenza massima della Terra di circa 40000 km e l’altezza Terra-ionosfera di circa 100 km (figura 1.5). Alla prima è associata una frequenza fondamentale longitudinale di 7.8 Hz, alla seconda

è associata una frequenza fondamentale trasversale di 1700 Hz. L’insieme delle scariche elettriche atmosferiche e dei transienti artificiali di grande intensità che si producono sull’intera superficie planetaria eccitano i modi di risonanza longitudinale e trasversale della cavità producendo una radiazione di fondo quasi stazionaria e osservabile in qualunque punto della superficie terrestre: un segnale di fondo noto come segnale di risonanza Schumann (6 Hz – 45 Hz) e un segnale di risonanza trasversale (800 Hz – 5000 Hz).

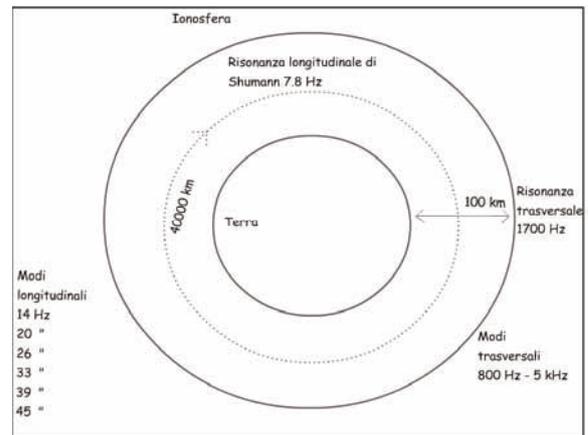


Figura 1.5 Modi di risonanza nella cavità Terra-ionosfera.

Figure 1.5 Resonance modes in the Earth-ionosphere cavity.

La radiazione Schumann è costituita da una componente quasi stazionaria la cui ampiezza è dell’ordine di 10-100 fT, e una componente impulsiva costituita da involucri quasi esponenziali molto più intensi, 0.1 –10 pT., la cui frequenza fondamentale e le sue armoniche sono soggette a piccole fluttuazioni inferiori al 5%.

La componente stazionaria è dovuta al fatto che la frequenza media di ripetizione delle scariche atmosferiche è molto più grande della frequenza di risonanza, la componente non stazionaria è prodotta dalle scariche atmosferiche di grande intensità (>1 GW); a livello planetario si ha, statisticamente, un evento ogni secondo (figura 1.6). Nel grafico sono rappresentati i segnali di risonanza longitudinale della cavità Terra-ionosfera (risonanza Schumann) in essa sono visibili le due componenti che caratterizzano il fondo in questa banda di frequenze (7.5 Hz): la componente non stazionaria dovuta ai transienti di grande potenza (>1 GW) e la componente quasi stazionaria eccitata dalle scariche elettriche atmosferiche (100 al secondo)

I segnali relativi ai modi di oscillazione

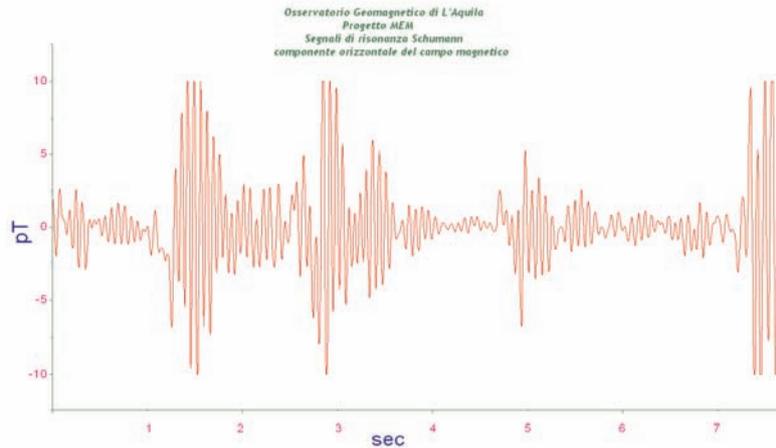


Figura 1.6 Segnali di risonanza di Schumann.
Figure 1.6 Schumann's resonance signals.

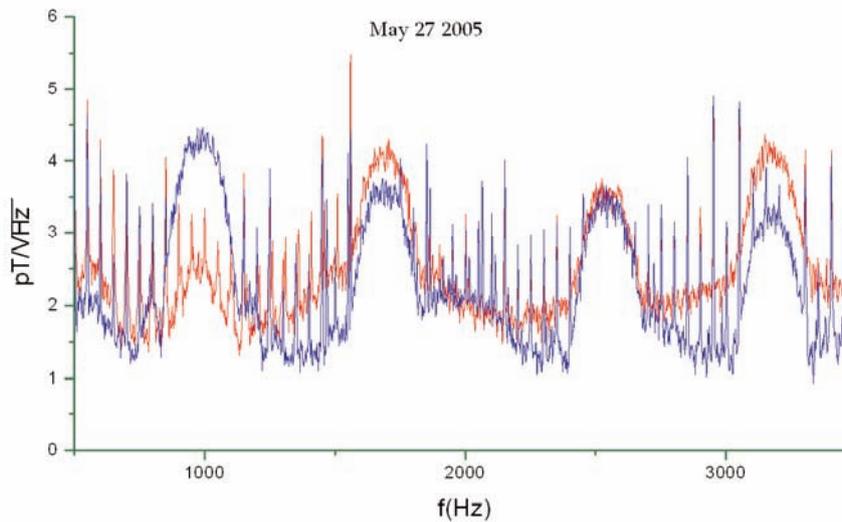


Figura 1.7 Frequenze di risonanza trasversale della cavità Terra-ionosfera.
Figure 1.7 Transverse resonance frequencies in the Earth-ionosphere cavity.

trasversale della cavità hanno una morfologia spettrale molto più complessa (figura 1.7) in quanto dipendono dalla struttura della ionosfera la quale è soggetta a continui cambiamenti influenzati principalmente dal sole sotto forma di due contributi: radiativo e particellare. Il contributo radiativo è dato dalla componente a più elevata energia della radiazione solare (raggi UV e raggi X) e il contributo particellare dovuto al vento solare (protoni, elettroni e ioni).

Le proprietà fisiche dei due bordi della cavità sferica rivestono una importanza fondamentale nella propagazione dei segnali. La ionosfera può essere considerata globalmente come un plasma freddo anisotropo e disomogeneo. Questa assunzione è valida fintantoché l'energia dell'onda incidente non sia tale da modificare le

proprietà fisiche del plasma.

Nel caso delle scariche elettriche atmosferiche l'energia in gioco può essere talmente elevata da produrre cambiamenti locali nel plasma ionosferico eccitando modi propri di risonanza. In una cavità sferica isotropa il campo elettromagnetico può essere scisso in due modi di propagazione indipendenti: nel modo TE (trasversale elettrico) e nel modo TM (trasversale magnetico) oltre al modo TEM. Poiché la ionosfera non è isotropa a causa del campo magnetico terrestre, questi modi di propagazione si accoppiano sul bordo inferiore della ionosfera.

Onde TM o TE incidenti danno luogo a riflessioni TE e TM. Nella cavità Terra-ionosfera non possono coesistere modi TE e TM indipendenti. I due modi sono caratterizzati da fre-

quenze di cut-off multiple di $c/2h$: TM1= 1700 Hz, TM2=3400 Hz, TM3=5500 Hz, ecc. (h è l'altezza della ionosfera assunta per semplicità pari a 100 km) in corrispondenza delle quali la velocità di gruppo tende a zero $V_{gn} = c \sqrt{1 - (f_p / f)^2}$.

Per f uguale alla frequenza di plasma f_p , la velocità di gruppo V_g e l'impedenza d'onda Z_{TM} tendono a zero e l'impedenza d'onda Z_{TE} tende a infinito (figure 1.8 e 1.9).

L'accoppiamento tra i due modi di propagazione implica che il coefficiente di riflessione nel bordo ionosferico è caratterizzato da una

matrice 2x2 piuttosto che da uno scalare.

Il bordo inferiore della cavità è costituito dalla superficie terrestre che può essere considerato approssimativamente isotropo. La matrice di riflessione relativa al suolo ha i due elementi diagonali nulli.

In corrispondenza delle frequenze TM1, TM2, TM3 ecc si ha la massima attenuazione dei segnali (figura 1.10).

Poiché la velocità di gruppo a queste frequenze tende a zero, il rumore presente nella cavità permane nell'ambiente per un tempo maggiore rispetto a tutte le altre frequenze, pertanto

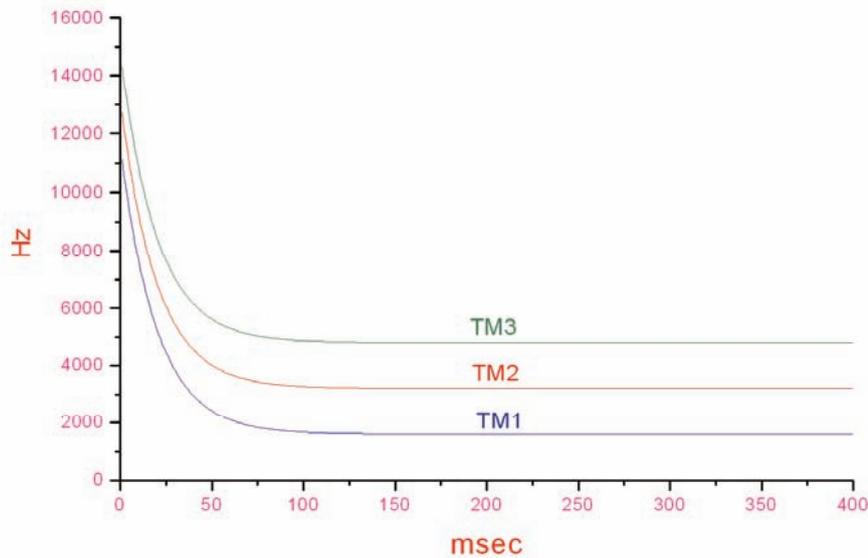


Figura 1.8 Risposta impulsiva della cavità Terra-ionosfera.
Figure 1.8 Impulse response of the Earth-ionosphere cavity.

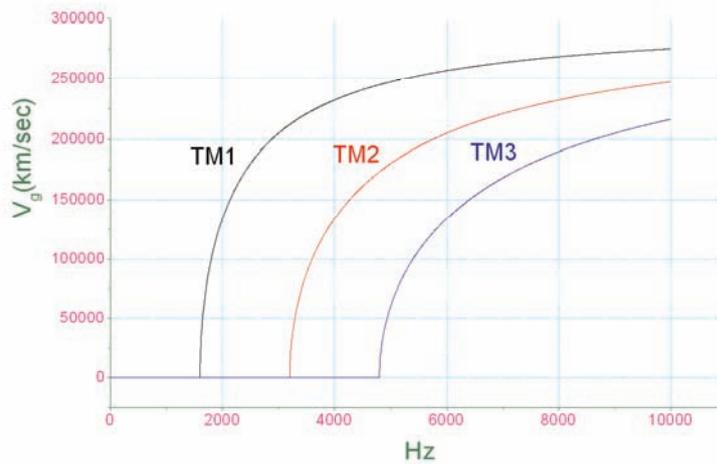


Figura 1.9 Velocità di propagazione in funzione della frequenza dei modi TM.
Figure 1.9 Propagation velocity depending on the frequencies of TM modes.

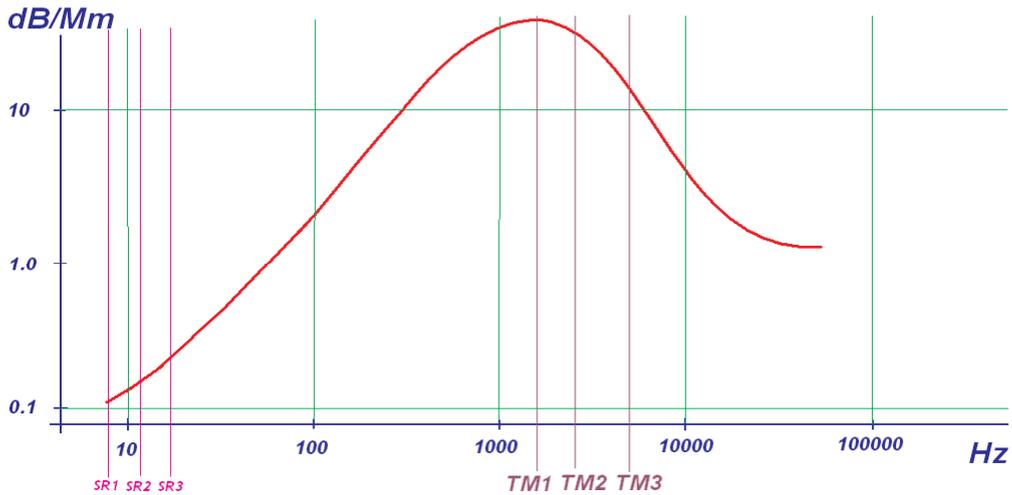


Figura 1.10 Curva di attenuazione della cavità Terra – ionosfera.
Figure 1.10 Attenuation curve of the Earth-ionosphere cavity.

è osservabile una serie di involucri in corrispondenza di tali frequenze. Queste frequenze dipendono dalla struttura della ionosfera, poiché questa è soggetta a variazioni temporali e spaziali, le frequenze di cut-off possono assumere diversi valori nello stesso istante, tali valori inoltre possono essere soggetti a variazioni nel tempo (tipica è la variazione giorno-notte). La misura di questi segnali può costituire un utile strumento di diagnosi della ionosfera (figura 1.11).

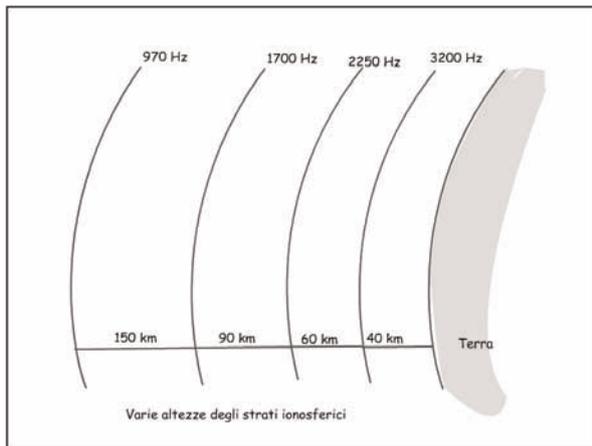


Figura 1.11 Modello semplificato della struttura della ionosfera dedotto dalle frequenze di risonanza trasversale.
Figure 1.11 Simplified model of the ionosphere structure inferred by the transverse resonance frequencies.

7. Bilancio energetico della cavità Terra-ionosfera

La cavità Terra-ionosfera può essere considerata come un grande condensatore elettrico le cui armature sono costituite da due sfere concentriche, la Terra e la ionosfera (figura 1.12). La carica di questo condensatore rimane approssimativamente costante nel tempo. La condizione di equilibrio elettrostatico del sistema è garantita dai meccanismi fisici che consentono la continua rigenerazione del campo elettrico. Questi meccanismi sono i responsabili di gran parte del rumore elettromagnetico che si osserva sulla superficie terrestre e che permea l'intera cavità. Per mantenere carico questo condensatore è necessaria una potenza dell'ordine di 400 MW.

In condizioni di bel tempo il campo elettrico in prossimità della superficie terrestre ha un valore medio di circa 120 V/m a cui corrisponde una densità superficiale di carica di -1.2 pC/m^2 . Integrando questo valore su tutta la superficie terrestre si ottiene la carica totale negativa della Terra di 0.5 MC. Una carica uguale e di segno opposto è ovviamente presente sul bordo della ionosfera. Il campo elettrico atmosferico decresce esponenzialmente con la quota, a 10 km il campo si riduce a 5 V/m, a 30 km il campo è di soli 0.3 V/m. Integrando il campo elettrico dalla superficie terrestre fino alla ionosfera si ottiene la differenza di potenziale esistente tra Terra e ionosfera che è di circa 300 kV. Nell'atmosfera fluisce una corrente verticale la cui densità è di circa 2 pA/m^2 , integrando tale valore della densità di corrente su tutta la superficie terrestre si ha una corrente totale di

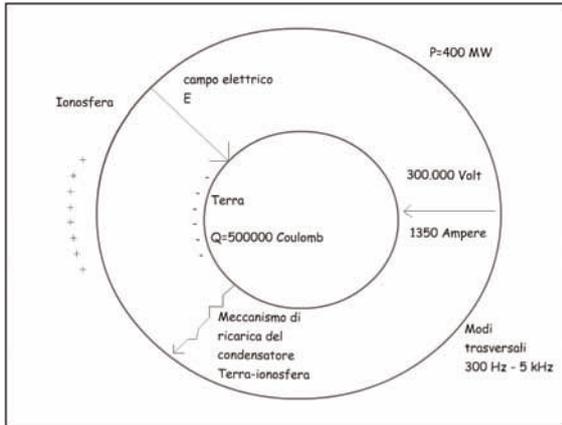


Figura 1.12 Equilibrio elettrostatico della cavità Terra-ionosfera.

Figure 1.12 Electrostatic equilibrium of the Earth-ionosphere cavity.

circa 1350 A che scorre tra la ionosfera e la superficie terrestre. Questa corrente di scarica è dovuta alla presenza di cariche elettriche che rendono l'atmosfera leggermente conduttrice. Alle quote basse la sorgente principale si trova sulla superficie terrestre e all'interno della Terra.

La crosta terrestre infatti contiene materiali radioattivi, principalmente Uranio, Torio e i loro prodotti di decadimento. I Raggi beta e gamma emessi dal suolo ionizzano le molecole di aria nei primi metri sopra il suolo. Il gas radioattivo Radon, uno dei prodotti di decadimento dell'Uranio 238, può diffondere nell'atmosfera fino a qualche decina di metri al di sopra del suolo prima che decada in Polonio emettendo particelle alfa. Pertanto il Radon è la principale causa di ionizzazione dell'aria fino ad altezze di diverse decine di metri sopra la superficie terrestre. Nonostante ciò la conducibilità elettrica dell'atmosfera vicino al suolo diminuisce perché gli ioni tendono a depositarsi sulle particelle di aerosol e di polvere. Queste particelle a causa della loro minore mobilità contribuiscono a ridurre la conducibilità elettrica dell'aria. Nelle zone con elevate concentrazioni di particolato nell'aria si hanno bassi livelli di conducibilità elettrica.

La seconda sorgente di ionizzazione è costituita dai raggi cosmici la cui efficacia è massima a 15 km di quota dove il massimo effetto ionizzante è dato dall'equilibrio tra i due parametri: densità dell'aria e intensità dei raggi cosmici, l'uno decresce e l'altro cresce con la quota. I raggi X e la radiazione ultravioletta sono la principale causa di ionizzazione dell'aria al di sopra di 60 km di quota. Questa dipen-

de dalla latitudine geografica, dalle stagioni, dalle ore del giorno e dall'attività solare. La conducibilità elettrica dell'aria aumenta inoltre con la latitudine a causa dell'aumento dell'intensità dei raggi cosmici alle latitudini più elevate.

A livello del suolo la densità di corrente subisce variazioni associate alle condizioni meteorologiche che producono migrazioni di cariche elettriche e quindi correnti di convezione. Alle variazioni temporali del campo elettrico terrestre sono associate le correnti di spostamento che rappresentano una parte non trascurabile della corrente totale nell'equilibrio del circuito elettrico globale. La corrente di spostamento ha la stessa variazione diurna della corrente di conduzione.

Vicino al suolo il campo elettrico è soggetto a grandi variazioni legate principalmente alle condizioni meteorologiche locali. In condizioni di cielo sereno e di assenza di vento si osservano fluttuazioni del campo elettrico legate a fenomeni di altra natura, la cui banda si estende da frazioni di mHz (variazione diurna) fino a frequenze dell'ordine dei kHz. Il campo elettrico misurato a terra spesso risulta essere molto più basso di 120 V/m, anche questo effetto è dovuto alla radioattività naturale. La superficie terrestre ha una carica elettrica negativa, le cariche elettriche negative prodotte dal decadimento delle sostanze radioattive della crosta vengono spinte verso l'alto dal campo elettrico terrestre, mentre quelle positive si dirigono verso il basso, ciò dà luogo alla formazione di un campo elettrico opposto a quello terrestre. Si forma uno strato che si estende per un'altezza di diversi metri sopra la superficie terrestre all'interno del quale il campo elettrico terrestre raggiunge un valore di equilibrio molto più basso di quello previsto, in funzione del livello di produzione di cariche negative di origine crostale, passando da 120 V/m a 5-30 V/m.

L'attività elettrica planetaria associata ai temporali può essere considerata come la sorgente primaria dell'energia che alimenta il sistema elettrico Terra-ionosfera. Questo sistema agisce come un immane generatore ad energia solare, esso converte l'energia solare in energia elettrica.

Il calore del sole che determina l'evaporazione, dà luogo a gradienti termici verticali, necessari per l'ascesa del vapore. Le correnti convettive verticali generano l'elettrizzazione delle nubi producendo un campo elettrico opposto a quello quasi-statico del condensatore Terra-ionosfera, di diversi ordini di grandezza più intenso. Le scariche elettriche temporale-

sche caricano la superficie terrestre ripristinando la carica negativa persa a causa della scarica continua attraverso l'atmosfera. La potenza elettrica totale messa in gioco in questo enorme meccanismo di carica e scarica è di circa 400 MW. Durante una scarica elettrica temporalesca viene creato un canale conduttivo ad elevata temperatura lungo il quale scorrono correnti dell'ordine dei kA. Questo conduttore è costituito da gas allo stato di plasma caratterizzato da una conducibilità elettrica confrontabile con quella di un metallo. Per qualche frazione di secondo si forma un'antenna che irradia onde elettromagnetiche la cui frequenza dominante dipende dalla lunghezza del canale conduttivo che mediamente è di circa 1000 metri, a cui corrisponde la frequenza fondamentale di circa 300 kHz. In realtà il funzionamento di questa antenna è piuttosto complesso, poiché il canale non è assimilabile al solo dipolo elettrico, dato che la corrente che vi circola genera un intenso campo magnetico. Inoltre, il canale ionizzato determina il "congelamento" del campo magnetico terrestre intensificandolo a causa dei moti vorticosi del plasma.

Quando la scarica cessa e il plasma si raffredda si produce una ulteriore emissione di segnali ELF-VLF dovuta allo "strozzamento" locale del campo geomagnetico lungo il percorso della scarica.

La ionosfera viene caricata anche attraverso altri meccanismi, diversi e molto più complessi.

Al di sopra della quota dei temporali, nell'atmosfera media dove l'aria è estremamente rarefatta, hanno luogo diversi fenomeni elettromagnetici, stimolati indirettamente dall'attività elettrica delle nubi, quali red sprites, elves, blu jets, impulsi radio ARB (Atmospheric Radio Bursts) e impulsi gamma di origine atmosferica TGF (Terrestrial Gamma Flashes) che in diversa misura contribuiscono a caricare elettricamente la ionosfera. Queste manifestazioni oltre a emettere nella banda propria, ottica, radio HF e gamma, hanno anche una coda spettrale nella banda ULF, ELF e VLF. Un ruolo importante si ritiene che abbiano i flussi di elettroni relativistici nella produzione di tali manifestazioni. Questi flussi vengono prodotti dal campo elettrico presente al di sopra delle nubi dove l'aria è più rarefatta. Gli elettroni vengono accelerati, lungo le linee di forza del campo geomagnetico, dal campo elettrico estremamente intenso presente al di sopra delle nubi elettrizzate, questi interagiscono con i neutri dell'atmosfera producendo un frenamento delle cariche accelerate (bremsstrahlung) producendo impulsi gamma

TGF (Terrestrial Gamma ray Flashes) " Red Sprites" sono emissioni ottiche nella regione dello spettro corrispondente al rosso, si manifestano tra i 40 e i 90 km di altitudine e sono associati a scariche elettriche atmosferiche che avvengono tra la sommità delle nubi e la ionosfera. Queste scariche hanno caratteristiche assai diverse dai fulmini in quanto l'aria è estremamente rarefatta. Le emissioni gamma sono transienti la cui durata è dell'ordine del millisecondo. Gli impulsi radio atmosferici sono caratterizzati da una energia centinaia di volte più intensa delle radio emissioni dovute alle scariche elettriche. Hanno origine tra 5 e 20 km di altitudine al di sopra di grandi temporali. Lo spettro di questi fenomeni si estende tra 20 MHz e 200 MHz. La loro durata è estremamente breve, può variare da qualche microsecondo fino a 100 microsecondi, perciò sono di difficile osservazione. Le scariche atmosferiche, in particolare quelle di grande potenza (>1GW), possono produrre condizioni di instabilità nel plasma ionosferico e magnetosferico inducendo tutta una serie di fenomeni, meglio noti con i loro acronimi:

- AKR (Auroral Kilometric Radiation) 20 kHz – 2 MHz
- NTC (Non Thermal Continuum) 500 Hz 10 kHz
- NCR (Non Continuum Radiation) 200 Hz - 100 kHz
- TNCR (Trapped Non Continuum Radiation) 500 Hz 20 kHz
- EW (Electron Whistlers) 100 Hz – 18 kHz
- PW (Proton Whistlers) 0.1 Hz – 20 Hz
- VLF HISS 10 Hz - 100 kHz
- GM (Geomagnetic Micropulsation) 0.001 Hz - 5 Hz
- ICW (Ion Cyclotron Whistlers) 10 Hz – 700 Hz
- ICWA (Ion Cyclotron Waves) 5 Hz – 100 Hz
- MNB (Magnetic Noise Bursts) 10 Hz – 600 Hz
- SR (Schumann Resonance) 6 Hz – 50 Hz
- ET (Electron Tweaks) 1-6 kHz
- PT (Proton Tweaks) 1-10 Hz
- TMR (Terrestrial Miriametric Radiation) 1-100 kHz

L'intensità dei segnali associati a queste manifestazioni naturali, osservate sulla superficie terrestre, variano da 10 fT fino a 100 nT. In gran parte vengono stimulate e modulate anche dalla componente particellare della radiazione solare (il vento solare). Questi segnali si propagano all'interno del plasma magnetosferico e ionosferico come onde magnetoidrodinamiche, che rimangono confinate come tali in queste regioni in quanto non possono propagarsi nel

e i 4 contributi distinti sono:

$$P = \iint_S (E \otimes H^*) dS$$

è la potenza totale complessa che fluisce fuori della superficie S che circonda la i-esima sorgente;

$$P_r = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \iint_S (E \otimes H^*) dS$$

è la parte reale della potenza che fluisce fuori di S;

$$W_m = \frac{1}{2} \iiint_V \frac{1}{2} \mu |H|^2 dV$$

è l'energia magnetica media immagazzinata nel volume V in cui è confinata l'i-esima sorgente;

$$W_e = \frac{1}{2} \iiint_V \frac{1}{2} \varepsilon |E|^2 dV$$

è l'energia media associata al campo elettrico immagazzinata nel volume V.

Inoltre,

$$P_d = \frac{1}{2} \iiint_V \sigma |E|^2 dV$$

è il valore medio dell'energia dissipata in V, e

$$P_s = -\frac{1}{2} \iiint_V (E \cdot J_s^*) dV$$

è la potenza media liberata dalla sorgente presente in V.

Il bilancio energetico complessivo suggerisce che l'energia totale fornita dai generatori confinati all'interno della superficie di integrazione S deve eguagliare la somma dell'energia irradiata fuori dalla sorgente, di quella dissipata all'interno della sorgente e di quella immagazzinata nel volume V limitato da S:

$$P_s = P + P_d + 2j\omega(W_m - W_e)$$

Naturalmente P_d e P_s non sono direttamente accessibili alla misura senza interagire fisicamente con la sorgente. Anche le altre grandezze non sono esattamente conoscibili attraverso una misura puntuale in quanto occorrerebbe poter integrare le misure sulla superficie S, naturalmente nel campo lontano le cose sono semplificate.

Nel caso estremamente semplificato in cui la sorgente è costituita da un dipolo elettrico puntiforme, nella zona reattiva in cui $r < \lambda/2\pi$ le componenti prevalenti sono:

$$E_r \approx -jZ_0 \frac{de^{-jkr}}{2\pi kr^3} \cos\theta$$

$$E_\theta \approx -jZ_0 \frac{de^{-jkr}}{4\pi kr^3} \sin\theta$$

$$H_\phi \approx \frac{de^{-jkr}}{4\pi r^2} \sin\theta$$

il vettore di Poynting diventa:

$$\vec{P} \approx (E_r \vec{v}_r + E_\theta \vec{v}_\theta) \otimes H_\phi^* = j \frac{Z_0}{k} d^2 \left[\frac{2\sin\theta \cos\theta}{r^5} \vec{v}_\theta - \frac{\sin^2\theta}{2r^5} \vec{v}_r \right] e^{-jkr}$$

P è immaginario, rappresenta un sistema di onde stazionarie. È un risultato irrealistico in quanto al di fuori della sfera S di raggio $r \approx \lambda/2\pi$ il campo sarebbe nullo, non vi sarebbe irradiazione.

Ciò deriva dalla semplificazione nell'espressione del campo dovuto al dipolo, in realtà la descrizione di questi campi è molto più complicata, se venissero considerati anche gli altri termini mancanti si avrebbe anche una componente reale del vettore P che terrebbe conto dell'energia che attraversa la superficie S.

Questo tipo di analisi consente comunque di valutare approssimativamente i vari contributi energetici e di discriminare i segnali rispetto ai quali l'osservatore si trova nel campo vicino e nel campo lontano, nelle relative bande di frequenza. Tali bande devono essere sufficientemente strette in modo da ridurre l'effetto dovuto alla sovrapposizione di segnali di origine diversa.

Le dimensioni trasversali della cavità Terra-ionosfera sono, per gran parte dello spettro di interesse, più piccole della lunghezza d'onda dei segnali. La condizione di campo vicino è quindi prevalente. Nelle regioni "near field" il vettore di Poynting istantaneo ha una componente immaginaria che rappresenta la porzione di energia dei segnali che si propaga nella direzione della sorgente. È come se lo spazio circostante scambiasse energia con la sorgente. La superficie che effettivamente appare emettere i segnali pare essere non quella coincidente con la sorgente fisica bensì quella corrispondente alla sfera di raggio $r \approx \lambda/2\pi$. All'esterno della quale P diviene reale al crescere della distanza.

Naturalmente nello studio del vettore di Poynting si assume che i campi E e H provengano da una sola sorgente, nel caso del rumore elettromagnetico naturale, nella banda di indagine, si è in presenza di una sovrapposizione di

campi dovuti a innumerevoli sorgenti di natura ed estensione diverse. L'osservazione dei campi in bande di frequenza molto strette non sempre garantisce che E e H misurati provengano da una sola sorgente.

Il terzo tema riguarda lo studio del tensore elettromagnetico T nel dominio del tempo e della frequenza. L'analisi delle due componenti di questo tensore, la parte simmetrica e la parte antisimmetrica, consente di calcolare tutti i parametri relativi alla distribuzione del campo in 3D.

Lo studio della derivata del tensore elettromagnetico consente inoltre di separare le variazioni del campo elettromagnetico nelle due componenti: la componente che varia parallelamente al vettore elettrico e al vettore magnetico e le componenti non parallele. I quattro tensori rappresentativi due simmetrici e due antisimmetrici descrivono la morfologia e la dinamica dei segnali nel tempo e nella frequenza. I vantaggi di queste metodologie risiedono nel fatto che non è necessario operare a banda stretta in quanto è possibile analizzare contemporaneamente

segnali provenienti da 2 o più sorgenti diverse. L'analisi del campo elettromagnetico ambientale conduce ineluttabilmente ad una rappresentazione della realtà fisica più o meno distorta in quanto i segnali si propagano all'interno di una cavità risonante caratterizzata sia da modi di risonanza libera sia da frequenze di cutoff relative ai modi TM e TE. Una parte dell'energia elettromagnetica osservata appare essere generata dalle due superfici che limitano la cavità: la superficie terrestre e la ionosfera. Una ulteriore complicazione è data dalla presenza del campo geomagnetico e dalla circostanza che le due superfici sono ben lungi dall'essere conduttori perfetti, inoltre le loro proprietà elettromagnetiche variano spazialmente e temporalmente.

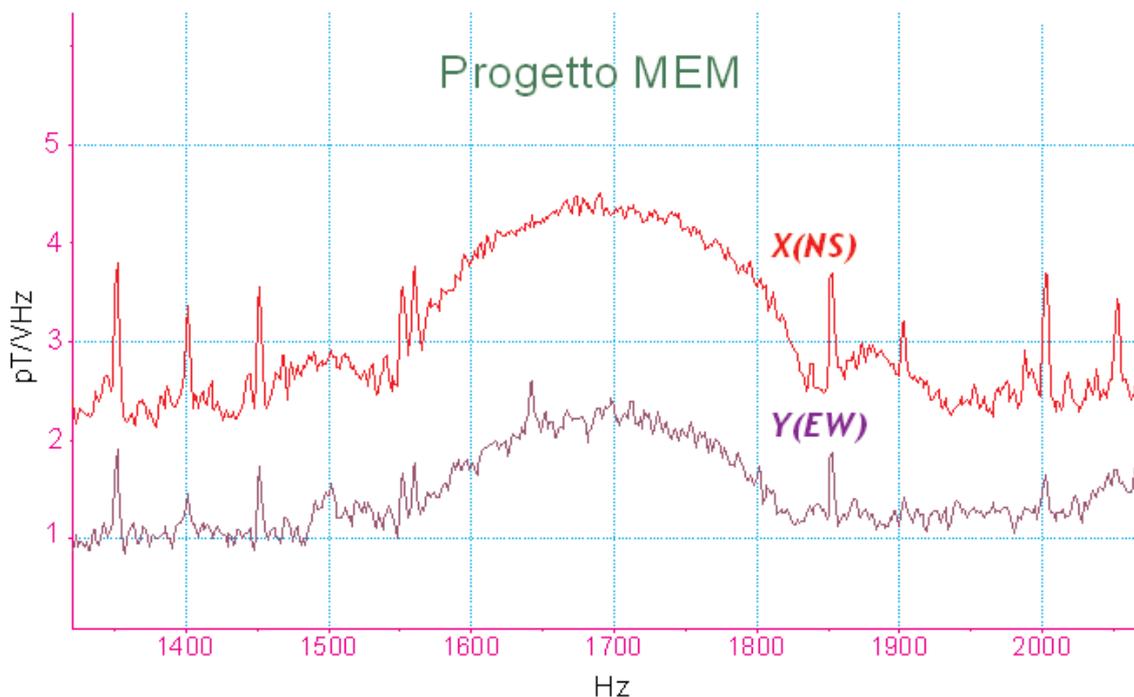


Figura 1.13 Esempio di sorgente estesa: modo di risonanza trasversale della cavità Terra-ionosfera dove la sorgente è costituita da una vasta area della superficie inferiore della ionosfera.

Figure 1.13 Example of large source: transverse resonance frequencies in the Earth-ionosphere cavity where the source is a large area of the bottom surface of the ionosphere.

Seconda parte

Monitoraggio ambientale dei campi elettromagnetici di origine antropica nelle bande ELF- LF-HF-VHF-UHF (50 Hz, 100 kHz - 3 GHz)

1. Introduzione

Il recente sviluppo di strumentazione automatica per la costituzione di reti di monitoraggio ambientale dei campi elettromagnetici rappresenta una delle principali novità nel panorama dei sistemi per la valutazione, tramite misure, dei valori che caratterizzano il campo *elettromagnetico ambientale*.

prescindendo dalle specifiche peculiarità che le caratterizzano come elementi costitutivi di una rete di monitoraggio, presenta le medesime problematiche che sono tipiche delle metodiche da adottare per la corretta esecuzione delle misure di campo che tengono conto sia delle configurazioni spaziali che assume il campo elettromagnetico, sia delle caratteristiche tecniche dello strumento di misura.

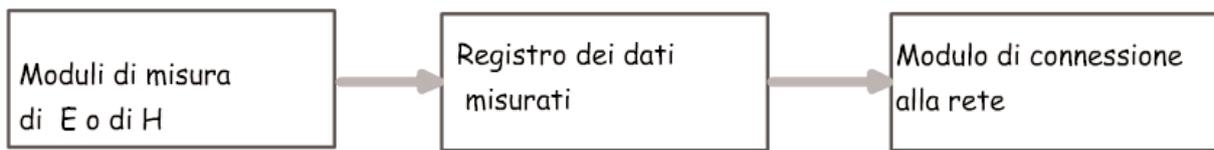


Figura 2.1 Moduli funzionali di una centralina di rilevamento.

Figure 2.1 Functional modules of remote electromagnetic data acquisition.

L'elemento di base che costituisce la rete è la *centralina di rilevamento* in continuo dei valori del campo elettrico o magnetico che, in prima analisi, è costituita dai seguenti moduli funzionali (figura 2.1):

- modulo di misura del campo elettrico (E) o magnetico (H);
- memoria di registrazione dei valori misurati;
- modulo di connessione alla rete;
- modulo di alimentazione.

Sotto il profilo strumentale, le centraline effettuano le misurazioni del campo con tecnica di rilevazione a banda larga. Il loro impiego,

Saranno quindi esaminati preliminarmente tali aspetti, a premessa dell'analisi sulle caratteristiche funzionali delle centraline, sulle peculiarità, e sui loro limiti tecnici.

2. Strumentazioni e metodi di misura

2.1 Le configurazioni spaziali del campo

Le tecniche e la tipologia di strumentazione per la misura dei parametri del campo elettromagnetico devono tenere conto delle configurazioni spaziali e delle proprietà del campo

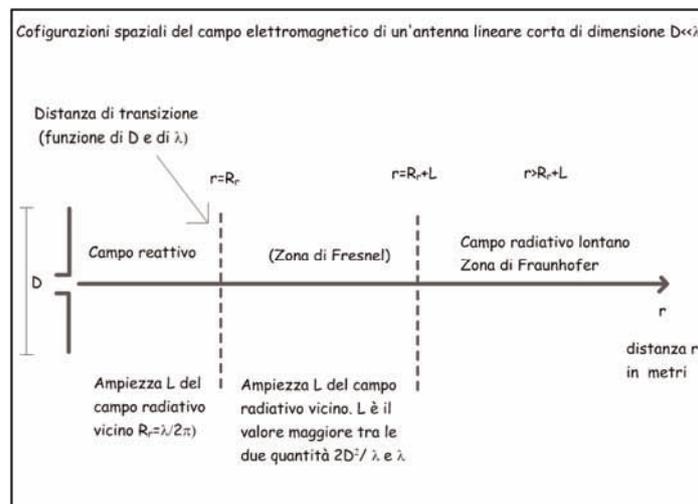


Figura 2.2 Configurazione spaziale del campo elettromagnetico con $D \ll \lambda$.

Figure 2.2 Spatial configuration of the electromagnetic field with $D \ll \lambda$.

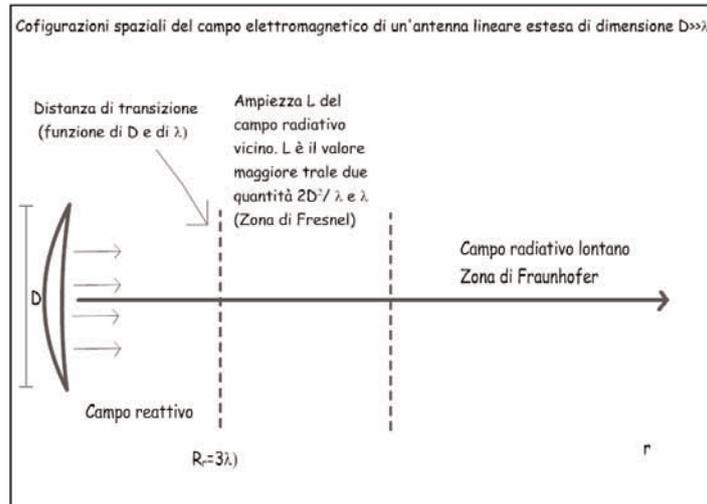


Figura 2.3 Configurazione spaziale del campo elettromagnetico con $D \gg \lambda$.
Figure 2.3 Spatial configuration of the electromagnetic field with $D \gg \lambda$.

in relazione alle dimensioni delle sorgente (antenna) ed alla lunghezza d'onda.

Un campo elettromagnetico con lunghezza d'onda λ emesso da una generica antenna avente la massima dimensione lineare "D" metri, presenta le caratteristiche spaziali e proprietà fisiche che condizionano significativamente le metodiche di misura e la scelta della strumentazione (norma CEI 211-7 del 2001 "Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10kHz-300 GHz con riferimento all'esposizione umana).

In sintesi, assumendo come origine il centro geometrico di un'antenna, è possibile individuare le seguenti tre regioni spaziali:

- regione di campo reattivo;
- regione di campo vicino radiativo;
- regione di campo lontano radiativo. La configurazione che il campo assume nello spazio dipende dalla geometria dell'antenna, dalla distanza r dalla sorgente e dalla lunghezza d'onda λ .

Le figure seguenti (2.2 e 2.3) individuano queste 3 regioni anche in relazione alla dimensione dell'antenna.

2.2 Gli strumenti per la misura dei livelli di campo

La strumentazione per la misura del campo elettromagnetico deve poter consentire la rilevazione delle seguenti grandezze:

- campo elettrico E nella zona di campo vicino reattivo (elettrodotti) e campo vicino radiativo (impianti ad alta frequenza);
- campo magnetico H nella zona di campo vicino reattivo (elettrodotti) e campo vicino radiativo (impianti ad alta frequenza);

- densità di potenza S nella zona d'onda piana (impianti ad alta frequenza) ($S \text{ W/m}^2 = E \times H = E^2 / 377 = 377 H^2$).

Le prime due misure devono essere indipendenti le une dalle altre nel senso che il sensore per la misura del campo elettrico deve essere insensibile al campo magnetico e viceversa (disaccoppiamento >20 dB).

Le caratteristiche della strumentazione devono inoltre essere adeguate alla banda nella quale si intendono effettuare le misure e devono rimanere costanti in tutta la banda misurata oppure devono essere disponibili i fattori di correzione.

L'elemento che caratterizza la banda di funzionamento degli strumenti è la sonda (sensore).

Sotto il profilo operativo, la strumentazione per la misura dei parametri del campo elettromagnetico può essere classificata in base alle specificità delle sonde sia per quel che riguarda la banda di esercizio, sia per quanto attiene alle loro caratteristiche di polarizzazione (isotropia).

Una prima e fondamentale suddivisione della strumentazione riguarda la banda di esercizio in termini di banda larga e banda stretta (figura 2.4).

Il criteri di suddivisione degli strumenti in base alla banda di esercizio, conduce ad individuare le seguenti tipologie di sonde:

- sonde a banda stretta che equipaggiano gli strumenti selettivi ed analizzano il campo nelle sue caratteristiche di ampiezza, frequenza polarizzazione e modulazione;
- sonde a banda larga che operano su una porzione di banda estremamente ampia (dal kHz al GHz) ed equipaggiano gli strumenti a

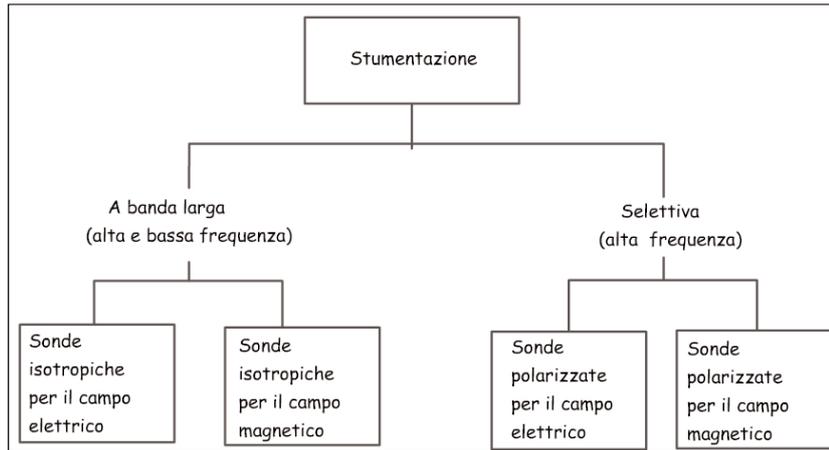


Figura 2.4 Criteri di suddivisione della strumentazione in base alla banda di esercizio.

Figure 2.4 Selection criterion of the devices based on the operative frequencies.

banda larga. Tali sonde forniscono la sola informazione dell'ampiezza del campo. La risposta in ampiezza è proporzionale a tutti i contributi dei campi presenti alle diverse frequenze nella banda di funzionamento.

Alla prima categoria, appartengono gli analizzatori di spettro che forniscono tutti i parametri del campo: intensità, frequenza, polarizzazione e modulazione.

Alla seconda categoria di strumenti appartengono i misuratori portatili che risultano di semplice impiego e di basso costo e che sono equipaggiati con sonde isotrope. Essi però forniscono la sola misura dell'intensità del campo.

Nella trattazione che segue si farà riferimento alla sola strumentazione a banda larga poiché le reti di centraline forniscono rilevazioni strumentali non selettive.

2.3 Strumentazione e metodi di misura a banda larga

a) Principio di funzionamento

Gli strumenti a banda larga sono equipaggiabili con sonde che possono essere per le basse frequenze (da qualche Hz a 100 KHz) o per le alte frequenze (da 100 KHz ad oltre 3 GHz). In entrambi i casi, la risposta in ampiezza delle sonde è proporzionale a tutti i contributi dei campi presenti alle diverse frequenze nella banda di funzionamento. Per ogni banda di frequenza sono previste sonde (sensori) diverse per la misura del campo elettrico e per la misura del campo magnetico.

La caratteristica della banda larga consente di ottenere la misura del valore efficace totale del campo elettrico E_{eff} o dell'induzione magnetica B_{eff} come somma quadratica dei singoli contributi del campo E_f o B_f

$$E_{eff} = \sqrt{\sum E_f^2}$$

$$B_{eff} = \sqrt{\sum B_f^2}$$

Le sonde a banda larga sono generalmente anche isotropiche (2.5) poiché forniscono in uscita un segnale che è indipendente dalla polarizzazione del campo. Tale caratteristica è ottenuta disponendo tre sensori orientati lungo tre direzioni mutuamente ortogonali. Con tale geometria vengono misurate separatamente le tre componenti del campo, qualunque sia la sua polarizzazione e comunque sia posizionata la sonda, e quindi sommate vettorialmente per ottenerne la risultante.

Ad esempio, una sonda isotropica del campo magnetico per le basse frequenze è costituita da tre avvolgimenti disposti mutuamente ortogonali in modo da misurarne separatamente le tre componenti.

Le componenti del campo rilevate dalle sonde danno luogo a tre tensioni che sono applicate a rivelatori quadratici, tipicamente diodi, sui quali le sonde sono chiuse.

La somma quadratica delle tensioni in uscita dai rivelatori è proporzionale alla somma vettoriale delle singole componenti del campo.

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$$

Una relazione analoga si ottiene anche per una sonda isotropica del campo elettrico che è realizzata disponendo tre dipoli elettrici corti disposti mutuamente ortogonali in modo da misurare separatamente le tre componenti del campo elettrico lungo i tre assi individuati dalla terna di dipoli, comunque vengano disposti rispetto alla sorgente.

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

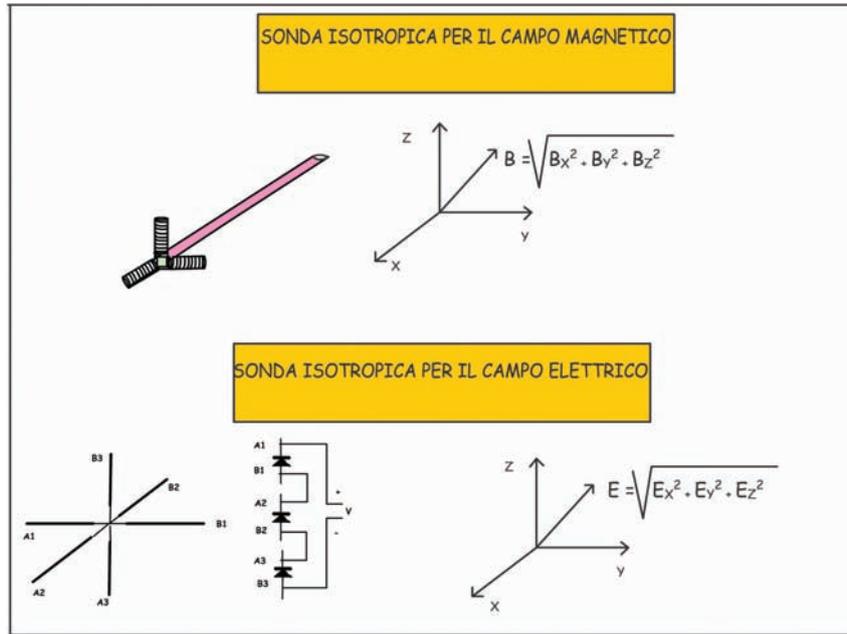


Figura 2.5 Sonde isotropiche per la misura del campo B e E.
Figure 2.5 Isotropic probe for E and B measurement.

Le caratteristiche congiunte di isotropia e di larga banda delle sonde, si combinano linearmente per cui il valore efficace del campo elettrico o magnetico dovuto a contributi di frequenza e polarizzazione diverse è dato da:

$$E_{eff} = \sqrt{\sum E_{x,f}^2 + \sum E_{y,f}^2 + \sum E_{z,f}^2}$$

$$B_{eff} = \sqrt{\sum B_{x,f}^2 + \sum B_{y,f}^2 + \sum B_{z,f}^2}$$

I vantaggi delle misure e dei misuratori a banda larga sono così sintetizzabili:

- isotropia;
- dimensione ridotta del sensore;
- semplicità d'uso e ridotto costo degli strumenti

- velocità di esecuzione della misura;
- capacità di misurare in tempo reale il valore efficace della intensità di campo presente (indipendentemente dalla forma d'onda);
- possibilità di mediare un intervallo di tempo compatibile con i requisiti degli standard di esposizione (per esempio 6 minuti);
- possibilità di applicare un fattore di correzione in funzione della risposta in frequenza e di diverse situazioni di esposizione. Nella figura che segue (2.6) è mostrata l'architettura funzionale di un misuratore isotropico a banda larga per il campo elettrico.

b) Procedure per misure a banda larga

Le sonde a banda larga misurano il livello r.m.s. (valore quadratico medio) del campo elettrico o del campo magnetico.

Nel caso specifico di segnali di telefonia mobile, ad esempio, i segnali GSM, con tecnica di accesso TDMA, possono avere una potenza media variabile nel tempo, sulla stessa portante radio, in funzione del numero di canali attivi e della distanza dei terminali mobili collegati. In tale caso, le sonde possono misurare con precisione il livello istantaneo dei campi prodotti ed ottenerne quindi la media su di un periodo di osservazione prefissato (p. es. di 6 minuti). I livelli di campo associati alla potenza massima del centro radio possono invece essere ottenuti elaborando i risultati ottenuti in funzione del

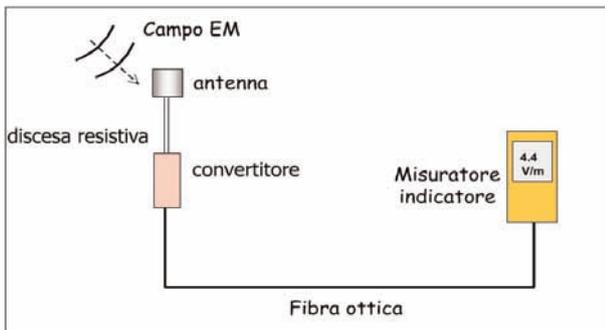


Figura 2.6 Misuratore isotropico a banda larga.
Figure 2.6 Wide band isotropic probe.

rapporto tra la potenza massima prevista all'ingresso delle antenne trasmettenti considerate e quella effettivamente presente al momento delle misure.

Per una valutazione precisa dei livelli di campo elettromagnetico presenti nei siti di misura è opportuno osservare le procedure di seguito descritte.

Le sonde richiedono un azzeramento iniziale e periodico per compensare le derive termiche. Alcuni modelli recenti effettuano questa operazione in modo automatico ed in presenza di esposizione, altri richiedono un azzeramento manuale e in assenza di campo incidente; questa operazione è determinante per la precisione della misura dei livelli prossimi al limite di sensibilità dell'apparato.

La valutazione dei livelli di campo più significativi deve essere effettuata ricercando, in corrispondenza di ogni punto di misura, il livello massimo del segnale ricevuto mediante spostamenti graduali della sonda.

È opportuno osservare che nelle situazioni di forte stazionarietà di campo, a minimi spostamenti possono corrispondere forti variazioni di livello ricevuto. L'accuratezza dedicata a questa fase di misura, quindi, è determinante per la precisione della stessa.

Le misure sono valide quando la sonda è ferma, non sono quindi da considerare i transitori che si possono manifestare nel corso degli spostamenti; se la sonda non è in posizione fissa e preferibilmente remotizzata dall'operatore sono quindi da escludere le funzioni di memoria (max-hold, average) generalmente disponibili.

Nel corso delle misurazioni la sonda non deve essere accostata o posizionata ad oggetti, in particolare metallici, per evitare effetti di risonanza degli elementi riceventi e, quindi, conseguenti letture alterate dei livelli di campo presenti nel punto di misura; al riguardo è buona norma mantenere una distanza minima di almeno 10 cm da qualsiasi oggetto.

Per ottimizzare la precisione della sonda, è necessario impostare sul misuratore ad essa collegato il fattore di calibrazione corrispondente alla banda di frequenza dei possibili segnali interferenti.

Nel caso di sorgenti variabili nel tempo è necessario utilizzare tempi e metodi di misura conformi alle vigenti normative in particolare sugli apparati che dispongono delle funzioni "peak" o "average" è possibile ottenere direttamente sull'indice del misuratore rispettivamente il livello massimo o la media dei livelli ricevuti in un tempo di ascolto prefissato. Le misure sono effettuate preferibilmente con sonde di

campo elettrico, sia per la maggiore estensione delle bande di funzionamento, sia per la maggiore sensibilità rispetto a quelle di campo magnetico.

Nel caso non sia possibile stabilire con certezza la frequenza dei segnali rilevati, è possibile considerare, come termine di confronto, i limiti di esposizione più restrittivi nell'ambito di tutte le possibili frequenze interferenti. Ovviamente l'indicazione che ne deriverà può essere molto conservativa; per un approfondimento è necessario ricorrere a misure selettive in frequenza.

c) Accuratezza degli apparati di misura a banda larga

L'accuratezza degli apparati di misura a banda larga è determinata sostanzialmente dai seguenti fattori:

- isotropicità della sonda;
- precisione di calibrazione in frequenza della sonda;
- linearità di ampiezza della sonda;
- accuratezza del misuratore applicato alla sonda;
- risposta in frequenza non piatta;
- risposta in temperatura (0,05 dB/°C).

Per migliorare l'accuratezza della misura, è necessario ottimizzare la precisione di lettura dello strumento impostando sul misuratore i fattori di calibrazione corrispondenti ai campi di frequenza indicati nelle istruzioni fornite a corredo delle sonde.

A questo scopo, quindi, è importante valutare, prima di effettuare ogni misura, i possibili campi di frequenza dei segnali interferenti e impostare, di conseguenza, un fattore di calibrazione mediato tra quelli corrispondenti ai suddetti campi di frequenza, o quello corrispondente all'emittente più significativa.

L'incertezza di misura totale, riferita ad ogni segnale misurato su ciascun asse considerato, è calcolata secondo le modalità indicate dallo Standard ISO TAG4 1992 per un livello di confidenza del 95%.

3. Le reti per monitoraggio automatico e in continuo

3.1 Premessa

I campi elettromagnetici emessi nell'ambiente esterno da un elettrodotto, da una stazione radio base, da un ripetitore radio o TV possono essere caratterizzati per via teorica in modo accurato ed affidabile, oppure essere valutati con

misure estemporanee e di limitata durata.

Le reti di monitoraggio in continuo dei livelli di campo elettromagnetico presenti sul territorio non rappresentano una alternativa ai metodi previsionali né alle consolidate tecniche strumentali, ma costituiscono un'ulteriore risorsa tecnica che integra e da valore aggiunto al repertorio dei dati ottenibili con gli approcci tradizionali.

Infatti esse consentono di tenere sotto osservazione diverse zone o impianti nello stesso periodo e per tempi prolungati acquisendo una rilevante quantità di dati con i quali è possibile, ove necessario, focalizzare ulteriori e più approfonditi interventi con strumentazione sofisticata sulle situazioni più critiche per la loro complessità e/o per la necessità di risanamenti.

Infine, le reti di monitoraggio costituiscono un supporto pressoché indispensabile se si vogliono raccogliere grandi quantità di dati in modo prolungato nel tempo ed esteso sul territorio.

3.2 Stato dell'arte

Il vantaggio principale delle centraline mobili consiste nella rapida dislocabilità sul territorio, e quindi in un uso dinamico della strumentazione in relazione alle effettive esigenze di sorveglianza.

Ad oggi, sono state sviluppate diverse tipologie di centraline equipaggiabili con sensori isotropici a banda larga con campo di frequenze che va da qualche centinaio di kHz a qualche GHz (generalmente 3 GHz), per le alte frequenze e da qualche Hz a 100 kHz per le basse frequenze (figure 2.7 e 2.8).

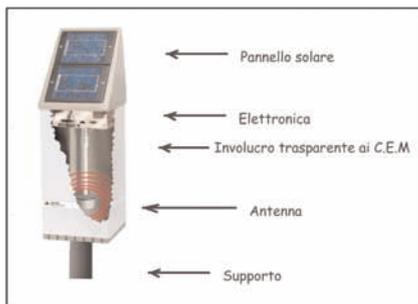


Figura 2.7 Tipica centralina mobile.
Figure 2.7 Typical relocatable data acquisition.

Le dimensioni ed il peso contenuti fanno sì che questi apparati possano essere facilmente ricollocabili; inoltre, il loro funzionamento è garantito per lunghi periodi in ambiente esterno poiché l'alimentazione dell'apparato è fornita da un pannello solare e batteria tampone.

Più di recente, sono state realizzate centraline multibanda che, al momento, rappresen-

tano lo sviluppo più avanzato nello specifico settore.

Nelle centraline multibanda sono integrati diversi canali di misura, uno per ogni banda di funzionamento. Ad ogni banda di funzionamento corrisponde un sensore (isotropico, a banda larga) ed una catena strumentale per la misura e la elaborazione dei segnali che provengono dalle diverse tipologie di sorgenti.

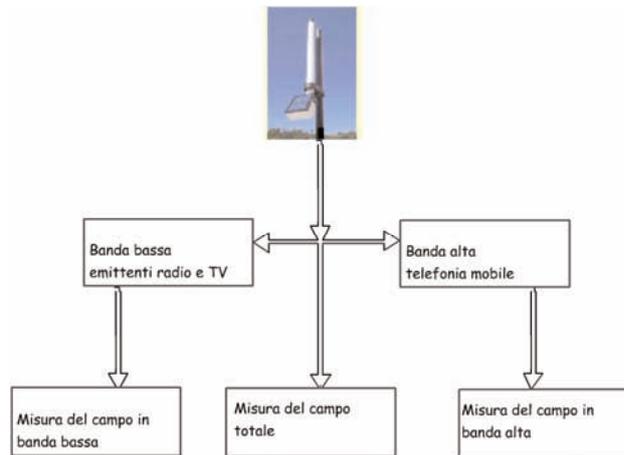


Figura 2.8 Tipica centralina mobile multibanda
Figure 2.8 Typical relocatable multi-band data acquisition.

3.3 Principi generali di funzionamento delle centraline

Per quanto riguarda l'hardware, le centraline sono tipicamente costituite dai blocchi funzionali rappresentati nello schema seguente.

Le caratteristiche dei singoli blocchi funzionali sono variabili e dipendono dalle scelte progettuali dei costruttori, tuttavia è possibile indicare le funzioni di base di ciascun blocco (figura 2.9).

Il sensore

Ha lo scopo di convertire il valore del campo elettrico (o del campo magnetico) in una tensione proporzionale al valore efficace del campo, ottenuto come risultante delle tre componenti spaziali della polarizzazione.

Il sensore comprende:

- sistema isotropico di antenne a larga banda (tipicamente da 100 kHz a 3 GHz), nel caso di sensori ad alta frequenza, o di avvolgimenti, nel caso di sensori a bassa frequenza (da qualche Hz a 100 kHz);
- reti di filtraggio e amplificatore operazionale;
- sensore di temperatura e sistema di compensazione della deriva termica dei diodi.

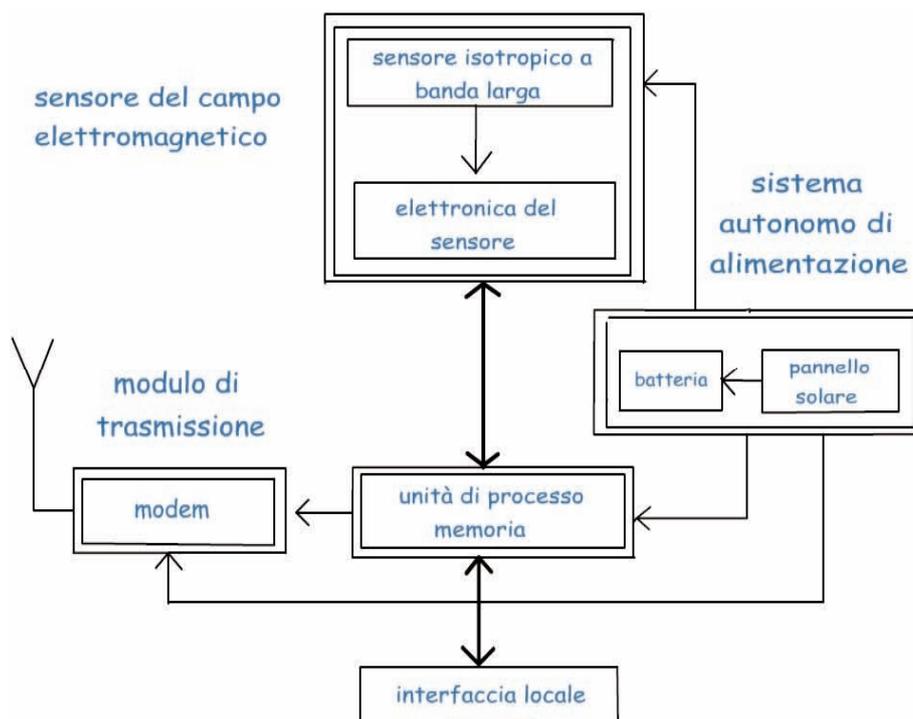


Figura 2.9 Tipico schema a blocchi di una centralina.

Figure 2.9 Typical block diagram of remote data acquisition.

Unità di processo e memorie

Costituisce la parte intelligente della centralina. Svolge le seguenti funzioni di base:

- supervisione di tutti i blocchi funzionali;
- gestione dei programmi residenti e dei settaggi esterni;
- gestione dei campionamenti delle grandezze del campo;
- elaborazioni statistiche dei campioni rilevati dal modulo sensore;
- gestione delle interrogazioni remote e locali;
- gestione trasmissione dati;
- gestione del B.I.T.E (allarmi di mal funzionamento).

Modulo di trasmissione

Ha lo scopo di realizzare la connessione e la gestione del collegamento remoto via GSM.

Sistema autonomo di alimentazione

Fornisce l'alimentazione alla centralina. Il sistema è costituito da un pannello fotovoltaico che ricarica una batteria tampone di capacità opportunamente dimensionata.

Interfaccia locale

Consente il settaggio e lo scarico locali dei dati tramite PC

3.3 La validazione dei dati

Come sarà successivamente trattato, le centraline inviano su interrogazione remota i dati registrati durante ogni ciclo di monitoraggio ad un centro raccolta dati (CRD).

Le modalità di interrogazione delle centraline ed il formato dei dati varieranno in relazione ai programmi residenti ed al settaggio del sistema.

I dati registrati saranno in generale costituiti da files formattati in relazione alla tipologia delle centraline utilizzate e comunque esportabili dalle centraline in modalità remota.

Prescindendo comunque dalle suddette caratteristiche, che dipendono dalle soluzioni progettuali adottate dai costruttori e quindi dal funzionamento delle centraline, i dati che esse forniscono devono comunque essere compatibili per il successivo confronto con le prescrizioni previste dalla normativa del settore.

Sorge quindi l'esigenza di validare i dati forniti dal sistema sia sotto tale profilo, sia sotto il profilo della coerenza con le finalità operative della rete stessa. A tale fine è necessario stabilire i criteri di validazione dei dati che devono tenere conto della normativa in vigore, dei limiti strumentali delle tecnologie, e delle condizioni operative nelle quali le stesse potranno essere impiegate.

Da ciò consegue una doppia verifica: la

prima (validazione tecnica) riguardante la significatività dei dati registrati, nel contesto delle prescrizioni tecniche previste dalle norme; la seconda (validazione operativa) attiene all'accertamento che i dati ottenuti, ancorché corretti sotto il profilo tecnico, siano anche utilizzabili nel contesto operativo delle rete.

3.3.1 La validazione tecnica

I due D.P.C.M. dell' 8 luglio 2003 (vds Appendice 1) nel prescrivere i limiti per la protezione della popolazione dalla esposizione ai c.e.m. ad alta e bassa frequenza, stabiliscono che le misurazioni siano eseguite secondo le indicazioni dalla norma CEI 211-7/01, per le misure dei campi elettromagnetici ad alta frequenza, e della norma CEI 211-6/01 per la misura a bassa frequenza .

Sotto tale aspetto occorre evidenziare che le centraline adottano il sistema di misura a banda larga e quindi non solo il metodo di misura deve essere conforme alle indicazioni previste dalle citate norme CEI per tale tipologia di misura, ma i risultati delle misure devono essere assunti tenendo conto dei limiti intrinseci di dette rilevazioni strumentali.

In particolare si evidenziano i seguenti aspetti:

- La gestione dell'incertezza del valore misurato.

I dati misurati dallo strumento (e quindi dalla centralina) devono essere presentati unitamente all'incertezza del valore della misura (circa 3 dB per la misure alle alte frequenze, valori più contenuti per la basse frequenze).

Tale prescrizione è fondamentale per il confronto dei risultati delle misure con i limiti previsti dalla normativa. Allo scopo di evidenziare l'importanza di tale aspetto nel contesto della validazione tecnica dei dati, si consideri la seguente situazione esemplificativa.

Si supponga che una centralina abbia registrato una misura dell'intensità di campo elettrico E_{TOT} in un generico punto del territorio. Occorre ora confrontare il risultato ottenuto con, ad esempio, il valore di attenzione di 6 V/m fissato dal citato decreto.

Nella figura 2.10 sono riportate quattro situazioni possibili. Nella misura *a*, il valore ottenuto è di 5.4 V/m ed è quindi inferiore al limite di norma. Il suo intervallo di incertezza è però di ampiezza tale da superare almeno in parte i 6 V/m.

Non essendo possibile stabilire con certezza se il valore corretto della misura appartiene o meno alla porzione dell'intervallo al di sotto del limite, nulla si può dire sulla conformità o meno del livello campo ai limiti della norma nel punto spaziale indagato.

In situazioni come questa, la strumentazione impiegata si dimostra inadeguata a fornire indicazioni certe. Diviene pertanto necessario procedere con strumentazione e metodologie di misura più accurate (misure a banda stretta).

Nella situazione *b* lo stesso risultato, 5,4 V/m, è ottenuto mediante strumentazione più accurata. In questo caso, l'intervallo di fiducia è sufficientemente stretto da poter verificare la conformità del punto di indagine ai limiti di norma. Ogni valore dell'intervallo risulta infatti

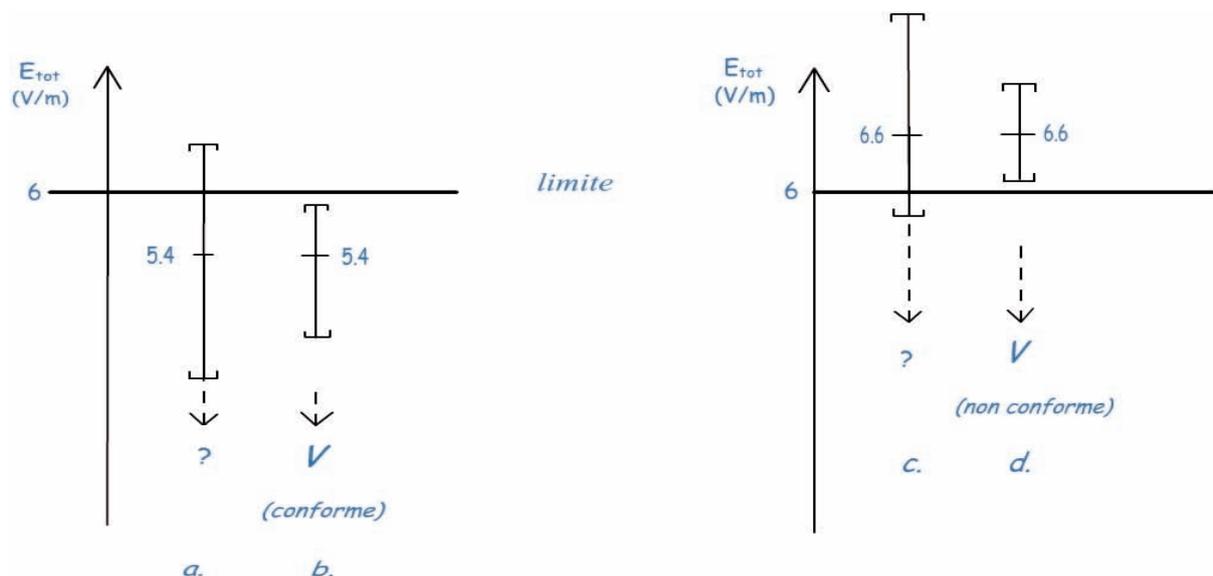


Figura 2.10 Esempio in cui l'incertezza incide sull'esito di una misura del campo elettrico.

Figure 2.10 Example in which the uncertainty affects the result of electric field measurement.

inferiore al limite di 6 V/m. Situazioni analoghe alle precedenti si riscontrano nei casi *c* e *d*, in cui il valore ottenuto è questa volta di 6,6 V/m, e quindi superiore ai 6 V/m. In *c*, l'eccessiva incertezza di misura non permette di stabilire la "non-conformità" del sito di indagine. Diverso è invece il caso in *d* dove l'intero intervallo di fiducia risulta superiore al limite di norma (sito non conforme).

Gli esempi trattati evidenziano la necessità e l'importanza di operare con accuratèzze note e più elevate possibili, soprattutto nei casi in cui le misure ottenute approssimano i limiti di norma.

D'altra parte per questo motivo, e per altri che saranno esposti successivamente, la rete di monitoraggio, allo stato dell'arte delle centraline, non può verificare il rispetto dei limiti previsti dalla normativa

Nel paragrafo successivo saranno esaminati i possibili scenari di utilizzazione dei dati centraline, alla luce dei limiti tecnici che esse attualmente presentano.

In tale contesto e dopo quanto esposto, è possibile anticipare che per l'utilizzazione dei dati come segnali di "warning" sarà necessario che la soglia di allarme, che deve essere settata nelle centraline in relazione al limite di legge applicabile nell'area di monitoraggio, tenga conto sia dell'ampiezza dell'intervallo di fiducia, sia del suo posizionamento, e quindi del valore misurato, rispetto al valore del limite che si applica.

In margine all'argomento, si rappresenta che per quanto riguarda il problema degli effetti dell'incertezza di misura sulla decisione da assumere in merito al superamento di un valore di "soglia", in assenza di più raffinate tecniche di misura, si potrebbe adottare il cosiddetto criterio del rischio condiviso ("shared risk") tra chi esegue la misura e l'autorità che deve controllare. Tale criterio può essere schematicamente riassunto nel modo seguente. I livelli di intensità di campo misurati con una incertezza contenuta entro 3 dB possono essere confrontati direttamente con i "valori limite" prescritti dalle normative in materia: il limite è rispettato se il valore misurato è inferiore, è superato nel caso contrario. I livelli di campo ottenuti con strumenti o catene strumentali aventi incertezza superiore a 3 dB sono da ritenersi solo indicativi e possono essere utilizzati quando differiscono dai "valori limite" di una quantità superiore alla incertezza di misura dichiarata. In questo caso, infatti, se al valore misurato si aggiunge l'incertezza e la somma è ancora inferiore al "limite" si ha un'alta probabilità che il valore "presunto" del campo

sia inferiore a tale limite (e similmente, ma con opposta conclusione, per un valore misurato più alto della soglia prescritta, al quale va sottratta l'incertezza prima di effettuare il confronto). Negli altri casi non si può prendere una decisione ed è necessario ripetere le misurazioni con strumentazione che garantisca una maggiore accuratezza.

3.3.2 L'isotropia della sonda

Occorre puntualizzare un aspetto specifico riguardante l'isotropia della sonda.

Per quanto riguarda le sonde ad alta frequenza l'uscita della sonda isotropa, costituisce il segnale proporzionale al valore efficace del campo elettrico. Questo segnale, a corrente continua, è immesso nella catena strumentale attraverso la cosiddetta *discesa resistiva* costituita da un conduttore sul quale però può accoppiarsi il campo elettrico esterno dando luogo ad una corrente che entra anch'essa nella catena strumentale falsando, in eccesso, il valore della misura.

Per evitare questa fonte di errore, la norma CEI 211-7/01 prevede che prima della misura la sonda sia orientata nella direzione di minimo accoppiamento con il campo (cioè nella direzione di minima lettura). Mentre tale operazione è agilmente fattibile nella quasi totalità degli strumenti a banda larga, può essere inattuabile in quelle centraline il cui sensore è, per costruzione, solidale con la struttura della centralina che, a sua volta, ha un posizionamento obbligato rispetto al supporto di sostegno.

Per le sonde a bassa frequenza, con specifico riferimento a quelle per la misura dell'induzione magnetica, gli aspetti dell'anisotropia si manifesta essenzialmente in regioni di campo magnetico ad elevata disomogeneità.

Le sonde magnetiche, costituite da tre bobine miniaturizzate mutuamente ortogonali, possono non presentare un punto centrale comune, e comunque la loro estensione spaziale può essere significativa se confrontata con la disomogeneità del campo e ciò introduce un errore sistematico nella misura.

I dati anomali

Si definisce anomala la classe di dati che, se pur corretti sotto il profilo della esecuzione della misura, non possono tuttavia essere utilizzati per la seguenti circostanze:

- Interferenza del sistema di trasmissione dati con il sensore della centralina

Nel funzionamento in rete le centraline possono inviare al C.R.D. messaggi di allarme (SMS) legati a particolari eventi critici che tipi-

camente riguardano le seguenti categorie di eventi:

- superamenti del valore della soglia di allarme del campo misurato;
- malfunzionamenti della centralina;
- alimentazione insufficiente.

In tali circostanze il valore di campo misurato potrebbe essere affetto dal contributo del modem della centralina stessa e non può essere utilizzato. È quindi necessario depurare dall'insieme dei dati quelli registrati durante la trasmissione degli allarmi (in generale le centraline di ultima generazione sono dotate di specifica funzione che provvede alla marcatura di tali dati).

- Valori di campo inferiori alla sensibilità del sensore

La sensibilità tipica dei sensori a larga banda è di 0,25-0,5 V/m per il campo elettrico (per le sonde ad alta frequenza) e dell'ordine di 10.nT per l'induzione magnetica (per la sonda a bassa frequenza). Se il sistema registra dati inferiori al valore della sensibilità essi non possono considerarsi validi e quindi negli istanti di registrazione e nelle statistiche, tali dati vanno sostituiti con quello della sensibilità dichiarata.

- Valori di campo superiori ai valori attesi

Tale caso può essere originato da diverse cause fra le quali le più ricorrenti sono:

- risposte anomale del sensore dovute a componenti spettrali fuori della banda di funzionamento;
- risposte anomale del sensore in presenza di segnali modulati in ampiezza o di segnali impulsivi (per le sonde ad alta frequenza);
- alterazione intenzionale o incidentale dei dati provocata dalla vicinanza della sonda a terminali mobili attivi (telefoni cellulari).

Un attento esame dei dati e l'esperienza degli operatori consentono, il più delle volte, di valutare le anomalie dei valori anche ricorrendo al confronto dei dati disponibili dalla caratterizzazione elettromagnetica preventiva dell'area come indicato nel paragrafo che segue.

3.3.3 La validazione operativa

Diversamente da quella tecnica, la valutazione operativa dei dati registrati dalle centraline tende ad accertare la significatività della misure in relazione alle finalità del monitoraggio.

Potrebbe quindi verificarsi che i dati registrati delle centraline, pur corretti sotto il profilo tecnico, risultino non significativi cioè non utilizzabili nel contesto del monitoraggio.

Per la validazione operativa si prevedono attività e prescrizioni nelle fasi antecedente e

seguito al ciclo di monitoraggio.

Fase precedente al monitoraggio

- Scelta con criterio areale delle postazioni di misura

Lo scopo è di ricercare la conservatività spaziale più vasta possibile ai dati che saranno registrati.

Per le alte frequenze, la scelta deve possibilmente tenere conto della tipologia degli impianti radioelettrici dislocati sul territorio (impianti per la diffusione radio televisiva, impianti per telefonia mobile o impianti per collegamenti in ponte radio), delle loro caratteristiche tecniche e, se noti, dei diagrammi di radiazione delle antenne.

Per le basse frequenze, occorre considerare lo sviluppo lineare della campata e la eventuale compresenza di più linee nella zona in esame. In tale ultimo caso, occorre anche valutare le relazioni di fase delle correnti afferenti alle diverse linee.

- Individuazione puntuale della localizzazione della centralina

Il posizionamento sul terreno della centralina deve contemperare sia esigenze tecniche per soddisfare le prescrizioni CEI 211-7/2001 (per le alte frequenze), e CEI 211-6/2001 (per le basse frequenze) previste per i sensori a banda larga, sia esigenze di sicurezza fisica e di funzionamento del sistema (copertura GSM).

- Misure preventive di caratterizzazione elettromagnetica dell'area come da norme CEI 211-7/2001 (per le alte frequenze), e CEI 211-6/2001 (per le basse frequenze)

La preventiva determinazione dei livelli di campo elettromagnetico o dell'induzione magnetica presenti nell'area ha il duplice scopo di individuare il punto più critico, sia in termini di valori di campo, sia in termini di tipologia del luogo, con l'acquisizione di dati preventivi, con i quali verificare la congruenza della successiva serie di dati che saranno registrati nel ciclo di monitoraggio. In tale fase sarebbe opportuno effettuare anche l'analisi spettrale del campo per individuare il fattore di correzione da applicare ai successivi dati.

- Durata del monitoraggio (ciclo di registrazione), per ogni posizionamento delle centraline

Per il monitoraggio alle alte frequenze, in fase di pianificazione il ciclo di registrazione potrà essere stabilito in 3 - 5 giorni in relazione alla tipologia degli impianti radioelettrici tributari del campo elettromagnetico totale (tipica-

mente 7 giorni per le stazioni radio base e 5 giorni per gli impianti per la diffusione del servizio radio e televisivo). Va comunque precisato che la durata minima del ciclo di monitoraggio deve essere valutata al termine del ciclo stesso verificando che sia stata raggiunta la stabilità dei dati.

Per il monitoraggio degli elettrodotti, il DPCM 8 luglio 2003 prescrive che la verifica del rispetto dei limiti sia effettuata con misurazioni dell'induzione magnetica nell'arco delle 24 ore. La norma però non specifica quanti cicli di 24 ore debbano essere effettuati, nè fa riferimento agli andamenti stagionali del carico elettrico sulle linee dal quale dipendono i valori dell'induzione magnetica

Fase successiva al monitoraggio

- Verifica di plausibilità dei dati misurati e registrati dalla centralina.
- Verifica di congruenza dei risultati delle misure con i risultati di caratterizzazione elettromagnetica preventiva.
- Verifica della stabilizzazione dei dati

3.4 Elaborazioni statistiche dei dati

Le statistiche temporali

Prescindendo dalla logica funzionale con la quale possono essere progettate le centraline, il vincolo che esse devono comunque soddisfare nella elaborazione statistica del dato va ricercato nella prescrizione della definizione dei limiti indicati dal D.P.C.M. che specifica come gli stessi debbano intendersi come *valori efficaci*

ci mediati su qualsiasi intervallo 6 minuti.

Tutti i dati risultanti da medie su 6 minuti, rilevati e registrati durante il monitoraggio in continuo, costituiscono l'insieme dei dati grezzi sul quale viene eseguita la validazione e quindi una successiva elaborazione statistica.

La prescrizione di una misurazione che fornisca il valore (efficace) del campo elettrico mediato su qualsiasi intervallo di sei minuti richiede l'elaborazione della media mobile dei valori che il campo assume in intervalli ampi 6 minuti.

Il problema può essere affrontato e risolto ricorrendo a strategie differenti. Allo scopo di approfondire i termini tecnici del problema, si analizzerà, a titolo esemplificativo, il funzionamento di una ipotetica centralina con riferimento alla funzione per la determinazione del valore della media mobile del valore efficace del campo elettrico.

Prima di procedere nella descrizione del funzionamento è opportuno richiamare, molto sinteticamente, la struttura della sonda isotropica e introdurre il principio del campionamento che è alla base del funzionamento della centralina.

Come già illustrato precedentemente, la sonda isotropica è costituita da tre dipoli *corti* assiemati in modo da realizzare una terna ortogonale di assi, ognuno dei quali è chiuso su un sensore alla cui uscita è disponibile una tensione proporzionale al quadrato del valore efficace della componente del vettore campo elettrico parallela al dipolo.

Nella figura 2.11 sono schematizzati, in linea di principio, i blocchi che svolgono le fun-

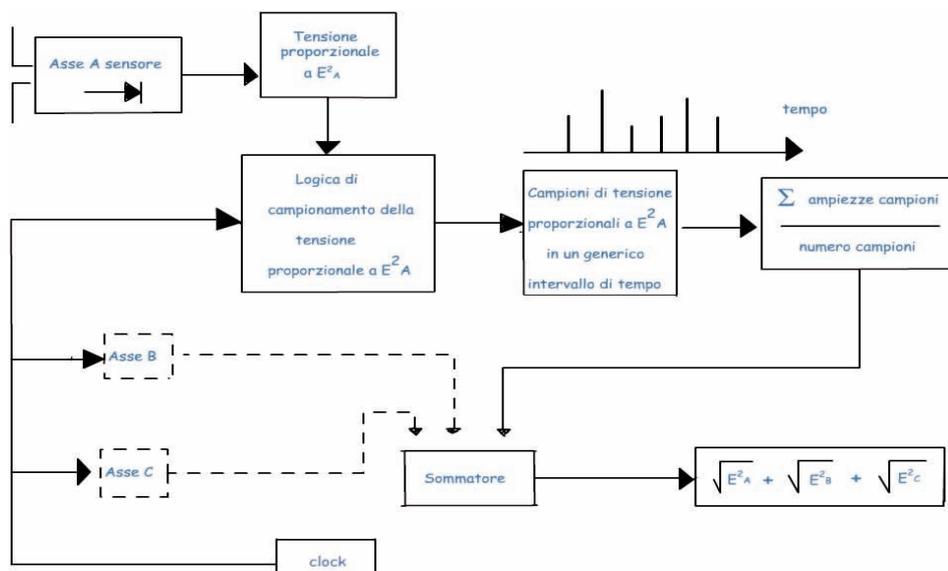


Figura 2.11 Schema di principio del processo di campionamento.

Figure 2.11 Schematic diagram of sampling process.

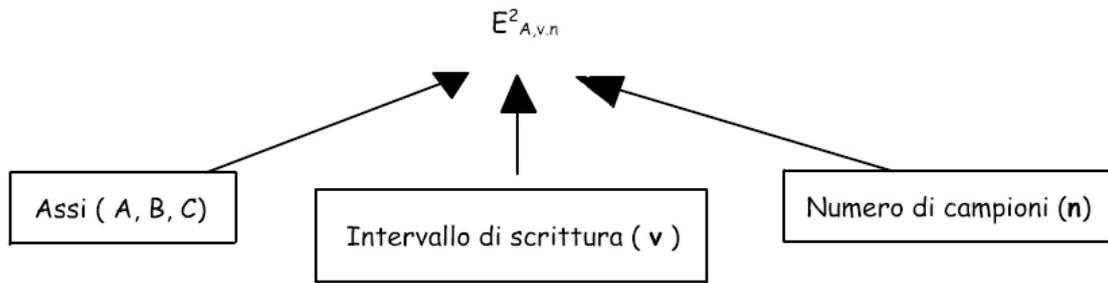


Figura 2.12 Diagramma a blocchi che illustrare la strategia per ottenere la media mobile su un qualsiasi numero di minuti.

Figure 2.12 Block diagram showing the running mean on not assigned number of minutes.

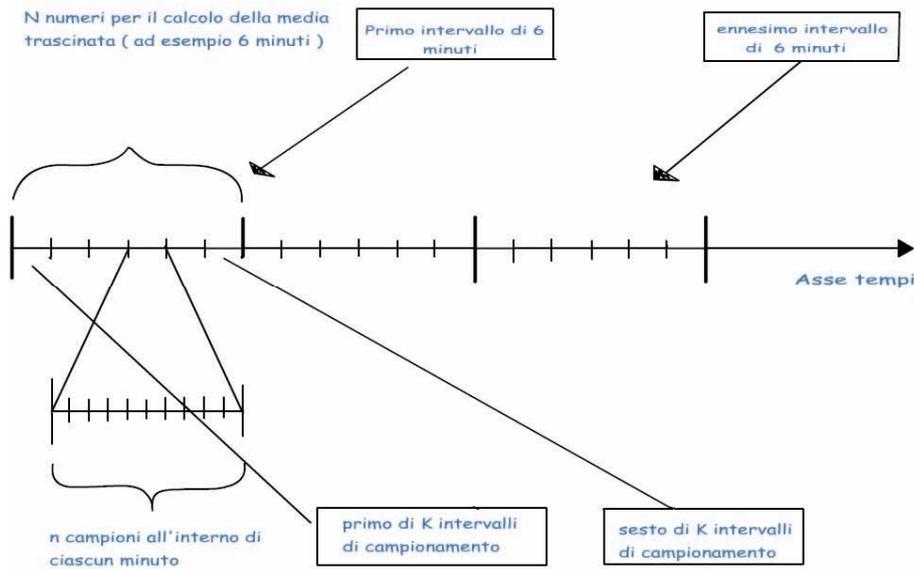


Figura 2.13 Esempificazione dei parametri del campionamento.

Figure 2.13 Facilities sampling parameters.

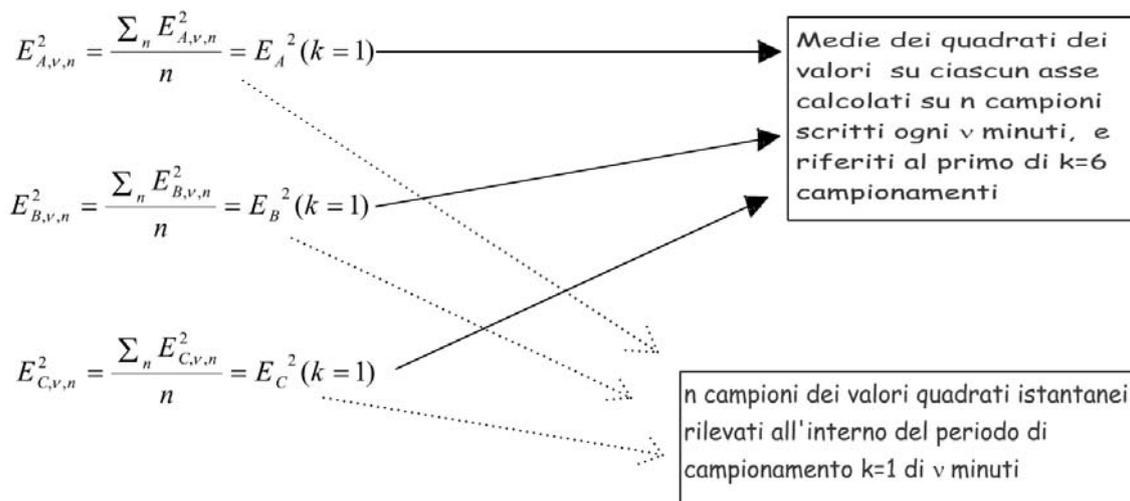


Figura 2.14 Diagramma di flusso del processo di campionamento.

Figure 2.14 Flow chart of sampling process.

zioni di campionamento dei segnali forniti dai sensori di una sonda isotropica, per la successiva determinazione dei valori mediati nel tempo del campo elettrico. Il funzionamento ipotizzato si basa sulla scelta di effettuare tutte le operazioni separatamente e in modo sincrono su ogni asse della sonda isotropica.

Dallo schema, nel quale sono stati esplicitati solo i blocchi relativi all'asse A, essendo gli assi B e C identici a quello A, sono facilmente deducibili i passaggi che conducono al calcolo della media temporale del valore del campo elettrico.

- a) Il campo elettrico che incide sul dipolo da origine ad una tensione elettrica che viene applicata al sensore che ne fornisce il valore efficace proporzionale al quadrato del campo.
- b) Il valore istantaneo della tensione in uscita dal sensore varierà nel tempo poiché i segnali a radio frequenza avranno, in generale, un andamento variabile nel tempo, (si ricorda che il sensore opera nella banda da 100 kHz a 3 GHz)
- c) La logica di campionamento provvede a fissare:
 - la durata temporale dell'intervallo di campionamento (ad esempio 6 minuti);
 - il numero dei campioni nell'intervallo di campionamento;
- d) La media delle ampiezze dei campioni delle tensioni è inviata ad un sommatore al quale confluiscono le omologhe medie degli altri assi. In uscita dal sommatore, si avrà una tensione proporzionale alla somma quadratica del valore efficace delle tre componenti del campo elettrico.

3.5 Una possibile strategia

Per illustrare la strategia per ottenere la media mobile su un qualsivoglia numero di minuti, lo schema precedente deve essere ulteriormente specificato nella parte che riguarda la logica di campionamento.

Si supponga quindi di voler ottenere il valore mediato del campo elettrico su 6 minuti con media mobile di 5 minuti.

La prima operazione che viene eseguita in modo sincrono su ogni asse A,B,C è la determinazione del valore istantaneo efficace del quadrato del campo elettrico $E^2_{A,B,C}$ riferito a ognuno dei k intervalli nei quali si suddivide il tempo di media N.

Per eseguire questa operazione ogni intervallo viene campionato con periodo di campionamento pari a ν secondi, e quindi in tale intervallo sono ricavati n campioni elementari, come

esemplificato in figura 2.12.

Il valore istantaneo da attribuire al campo elettrico $E^2_{A,\nu,n}$ (per l'asse A) nell'intervallo k-esimo è dato dalla media aritmetica delle ampiezze degli n campioni prelevati nel periodo ν .

I valori che assumono $E^2_{A,B,C,\nu,n}$ cioè i valori di $E^2_{A,B,C}(k)$ al variare del tempo, costituiscono i campioni elementari rappresentativi di ogni intervallo k (che nell'esempio adottato ha la durata di 1 minuto) all'interno della finestra di media N (che ha la durata di 6 minuti) che contiene $k=6$ campionamenti.

Per ogni asse e per ogni intervallo N si potrebbe ricavare il valore medio del campo relativo dell'intervallo stesso (N_6) effettuando il rapporto tra la somma dei k valori dei campioni e k. Tuttavia questo non porterebbe alla determinazione della media mobile in quanto ogni intervallo N è statisticamente indipendente da quello che lo precede.

Per determinare il valore mediato del campo elettrico su 6 minuti con media mobile di 5 minuti, ferma restando la suddivisione di N in $k=6$ intervalli di campionamento, occorre rendere mobile l'intervallo di N in modo che l'intervallo successivo a quello di N_1 , cioè N_2 , comprenda i campioni relativi a $k(2), k(3), k(4), k(5)$ registrati nell'intervallo N_1 ed il campione relativo a $k(1)$ dell'intervallo N_2 . Il processo è iterato per i successivi intervalli N_3, N_4 ecc. In figura è mostrato il processo descritto (figura 2.15).

A questo punto del processo si dispongono per ogni asse, e per ogni 6 minuti, le medie trascinate su 5 valori. Dette quindi:

$\widehat{E}^2_{A,N}$ - la media mobile del valore efficace del quadrato del campo elettrico mediato per 6 minuti con media mobile su 5 valori, relativa all'asse A nell'intervallo N;

$\widehat{E}^2_{B,N}$ - la media mobile del valore efficace del quadrato del campo elettrico mediato per 6 minuti con media mobile su 5 valori, relativa all'asse B nell'intervallo N;

$\widehat{E}^2_{C,N}$ - la media mobile del valore efficace del quadrato del campo elettrico mediato per 6 minuti con media mobile su 5 valori, relativa all'asse C nell'intervallo N;

la centralina fornirà la serie di somme quadratiche di $\widehat{E}^2_{A,N}, \widehat{E}^2_{B,N}, \widehat{E}^2_{C,N}$ come medie mobili ogni sei minuti, che rappresentano i valori del campo elettrico da confrontare con il limite previsto dalla normativa o con la soglia di "warning".

$$\widehat{E} = \sqrt{\widehat{E}^2_{A,N} + \widehat{E}^2_{B,N} + \widehat{E}^2_{C,N}}$$

Infine, si evidenzia che nel corso del calcolo del valore mediato su 6 minuti, sono resi

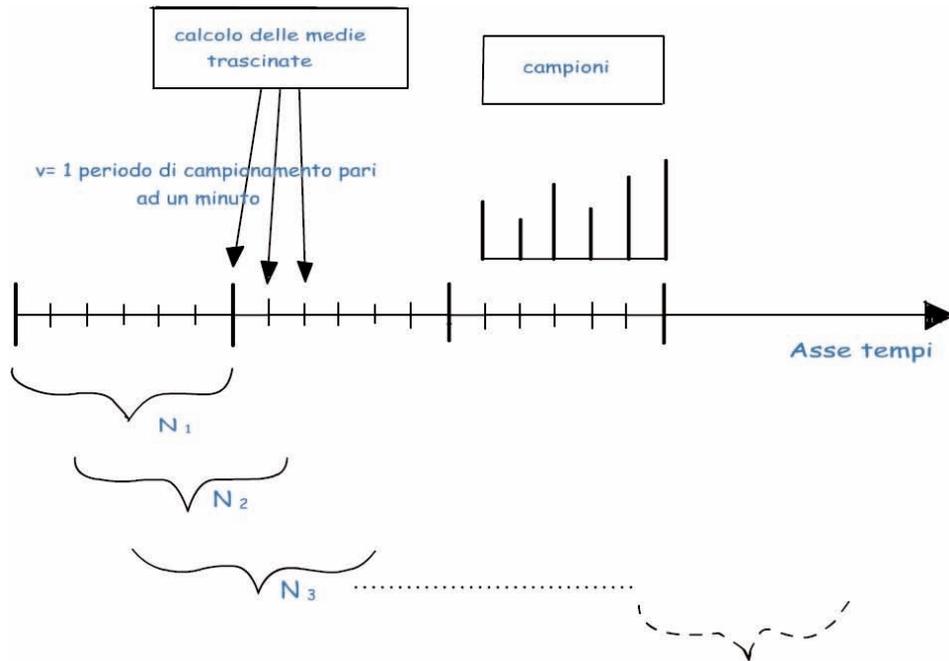


Figura 2.15 Procedimento per il calcolo della media mobile.
Figure 2.15 Procedure for running mean evaluation.

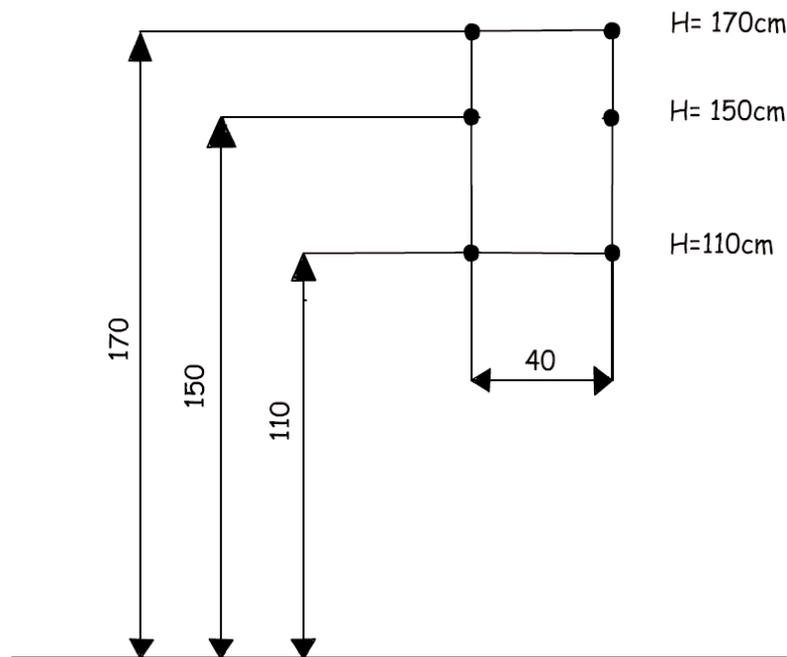


Figura 2.16 Punti di misura sulla sezione verticale del corpo umano.
Figure 2.16 Measurement points on the vertical section of the human body.

disponibili alcuni dati intermedi al procedimento che potrebbero risultare di un qualche interesse tecnico, quali i valori massimi su ciascuno degli assi e i valori massimi all'interno di ogni intervallo di misura.

3.6 Le statistiche spaziali

Per le caratteristiche proprie dei campi elettromagnetici, che non sono soggetti a fenomeni di trasporto o di diluizione nell'ambiente, ma a quelli della propagazione descritti dalle equazioni di Maxwell, l'elaborazione di una qualunque statistica della distribuzione del

campo elettromagnetico su un territorio a partire da dati puntuali ricavati per via strumentale non è di per sé di rilevante importanza se non in termini di una valutazione qualitativa dello stato elettromagnetico di un'area. Ad esempio, il valore medio spaziale del campo di un sia pure rilevante numero di misure eseguite su una porzione di territorio, non può essere confrontato con i limiti previsti dalla normativa per poter dedurre lo stato di criticità dell'area perché ciò che invece è significativo confrontare è il valore che il campo assume *in quel punto ed in quel momento*. D'altra parte anche l'attuale normativa nel definire i valori dei limiti stabilisce, tra l'altro, che tali valori devono essere considerati come *valori mediati su un'area equivalente del corpo umano*. Appare evidente il significato di statistica spaziale della prescrizione che però, in questo caso, ha lo scopo di riferire il risultato della misura non genericamente ed astrattamente ad un punto ma ad una prestabilita geometria del recettore umano al quale sono riferiti i limiti stessi. Va tuttavia evidenziato che la norma CEI 211-7/2001, nel fissare le modalità di misura a banda larga, si limita a prescrivere rilevamenti strumentali a quote diverse ma sullo stesso asse di misura.

Il CENELEC ha in corso l'elaborazione di una *guideline*, nella quale si raccomanda l'esecuzione delle medie spaziali secondo il seguente schema nel quale è rappresentata la proposta di una geometria rappresentativa della sezione verticale standard del corpo umano (figura 2.16).

Ciò precisato, le statistiche spaziali dei valori misurati dalla rete possono comunque essere di notevole interesse, se incrociate con altre classi di dati, per individuare correlazioni fra i valori spaziali del campo e variabili territoriali di cui si conoscono le distribuzioni. Sarà possibile ad esempio valutare il trend di "pressione elettromagnetica" su un'area nel corso del tempo, al variare della presenza degli impianti ed eventualmente della configurazione urbanistica. Oppure incrociare dati epidemiologici locali con i valori locali del campo elettromagnetico.

Le statistiche spaziali dei valori di campo che derivano dalle registrazioni in continuo delle centraline possono essere quindi funzionali alla verifica di eventuali correlazioni con altre classi di fenomeni che avvengono sul territorio.

Un ulteriore aspetto che si vuole evidenziare riguarda le rappresentazioni grafiche dell'intensità del campo (bande colorate, o curve isocampo) riportate su basi cartografiche territoriali. Anche a tali rappresentazioni non si può

attribuire significato quantitativo in quanto esse derivano da un numero necessariamente limitato di valori misurati e nulla si può affermare sui valori che il campo assume tra due punti per i quali si dispone di dati misurati. Esse forniscono solo indicazioni qualitative utilizzabili, ad esempio, per valutare il trend di "pressione elettromagnetica" su un'area nel corso del tempo, al variare della presenza degli impianti ed eventualmente della configurazione urbanistica.

4. Struttura funzionale della rete

4.1 Flusso dei dati e canali di connessione

La connettività della rete ha lo scopo di rendere possibile il flusso dei dati tra gli elementi hardware della rete di monitoraggio cioè tra le centraline ed il centro di raccolta dati (C.R.D.).

A tale scopo, occorre precisare che il mezzo tecnico preposto a tale funzione deve possedere non soltanto elevata affidabilità operativa ma essere idoneo a funzionare in condizioni ambientali anche avverse ed in postazioni non necessariamente equipaggiate con utenza elettrica.

Per realizzare la funzione di connessione possono ipotizzarsi i seguenti mezzi di collegamento (canali):

- ponte radio;
- rete telefonica fissa;
- rete telefonica mobile.

Nel seguito si esaminano sinteticamente gli elementi caratterizzanti i predetti canali.

Ponte radio

I ponti radio (figura 2.18) consentono collegamenti bidirezionali fra due postazioni fisse, effettuati a mezzo di microonde utilizzando antenne paraboliche.

Rete telefonica fissa

Tale possibilità (figura 2.19) presenta alcuni limiti tecnici ed operativi che ne escludono di fatto la realizzabilità. Il primo limite riguarda la velocità del flusso dati che è fortemente condizionata dalle caratteristiche della linea telefonica. Il secondo limite, più operativo e più vincolante, è ricondotto alla necessità di portare a piè d'opera di ogni centralina una linea telefonica. Tale vincolo esclude la possibilità di utilizzare la rete telefonica per la connessione della rete.

Rete telefonica mobile

La copertura territoriale del sistema

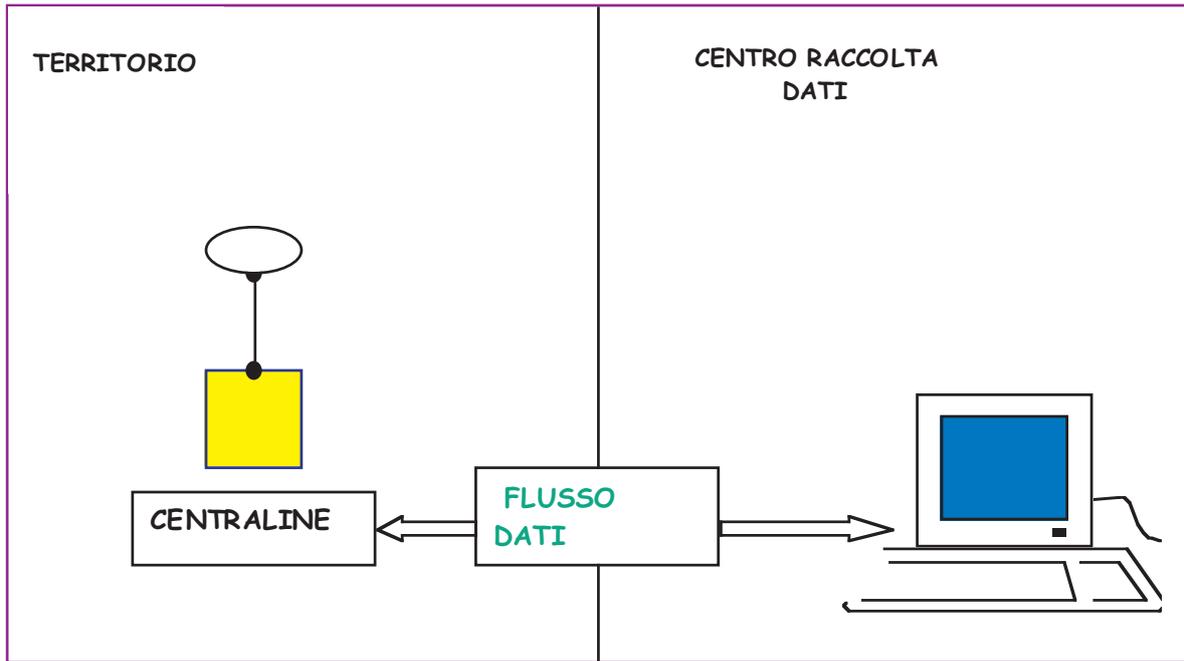


Figura 2.17 Schema del flusso dati degli elementi della rete.
Figure 2.17 Scheme of data flux of the network elements.

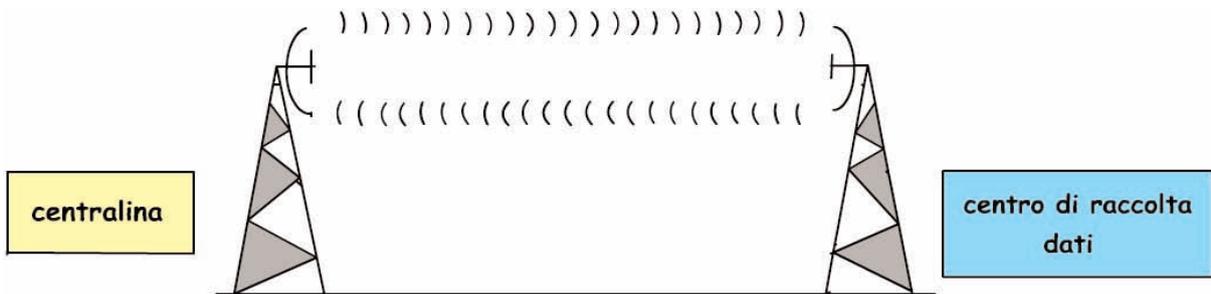


Figura 2.18 Schema di un ponte radio per la raccolta dati.
Figure 2.18 Scheme of radio bridge for collecting data.

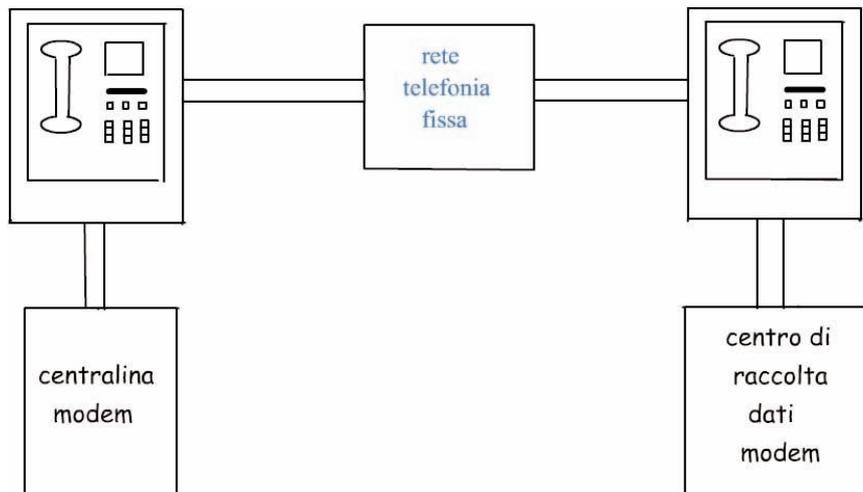


Figura 2.19 Schema di collegamento per la raccolta dati tramite rete telefonica.
Figure 2.19 Telephone lines connection schematic for collecting data.

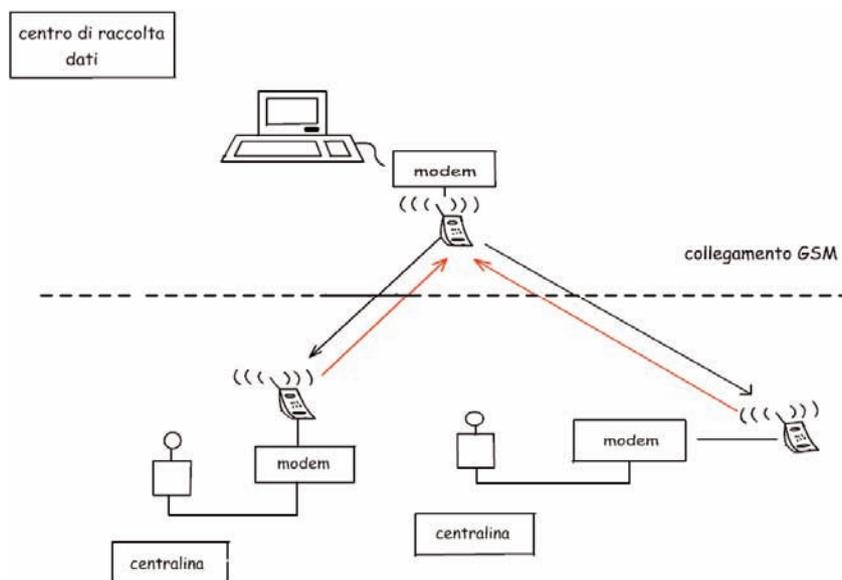


Figura 2.20 Schema di connessione degli elementi della rete tramite sistema GSM.

Figure 2.20 Scheme of GSM connection for collecting data.

mobile GSM e le caratteristiche dello standard della trasmissione dati del sistema stesso, consentono di superare i vincoli ed i limiti propri dei sistemi già indicati e quindi la connessione tra gli elementi mobili della rete di monitoraggio (centraline) ed il centro di raccolta dati può essere realizzato utilizzando la rete del sistema GSM indicato nello schema seguente (figura 2.20).

In conclusione, i mezzi trasmissivi che consentono la connettività tra gli elementi costituenti la rete, non appaiono condizionare la scelta della architettura della rete stessa, potendo comunque coprire ogni topologia di rete.

4.2 Architettura di rete

In estrema sintesi, l'architettura funzionale di una rete di monitoraggio comprende un certo numero di stazioni mobili di rilevamento in continuo dei valori del campo elettromagnetico (centraline), distribuite sul territorio, da un Centro di coordinamento e di raccolta dei dati (C.R.D.) che provvede all'esercizio tecnico delle centraline periferiche, e da un Centro di coordinamento della rete (C.C.R.) che ha la responsabilità della gestione tecnico-operativa dell'intera rete. Il sistema è completato da una infrastruttura di telecomunicazione per interconnettere i vari elementi della rete.

Di seguito è rappresentato uno schema di connessione della rete, basato sul collegamento via GSM, tra le centraline ed il C.R.D. (ad esempio l'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente-ARPA) e via internet tra il C.R.D. ed il C.C.R. (Amministrazione territoriale, ad esempio una

regione o comune, preposta alla diffusione dei dati ai soggetti interessati).

Per quanto riguarda l'architettura da conferire alla rete, la scelta deve tener conto oltre che di quanto già indicato, dei seguenti requisiti:

- flessibilità: la rete deve poter essere adattata alle esigenze del monitoraggio senza alterare la sua configurazione;
- dinamicità: gli elementi periferici della rete debbono potere essere collocati sul terreno senza che ciò impedisca il regolare funzionamento della rete nella sua interezza;
- sopravvivenza: l'eventuale inefficienza di una parte della rete non deve comprometterne il rimanente funzionamento;
- contenuti costi di esercizio: l'impegno di personale specialistico deve essere limitato e commisurato alle reali esigenze di monitoraggio provenienti dal territorio.

I requisiti elencati possono essere agevolmente soddisfatti adottando un'architettura di rete strutturata su tre livelli come indicato nello schema.

Il primo livello gerarchico della rete è di competenza dell'Amministrazione preposta alla diffusione dei dati che istituisce il *Centro di coordinamento della rete* (C.C.R.) e svolge le seguenti funzioni:

- attuazione delle direttive per la gestione operativa della rete sul territorio;
- coordinamento delle attività per la dislocazione delle centraline;
- analisi, raccolta e archiviazione dei rapporti

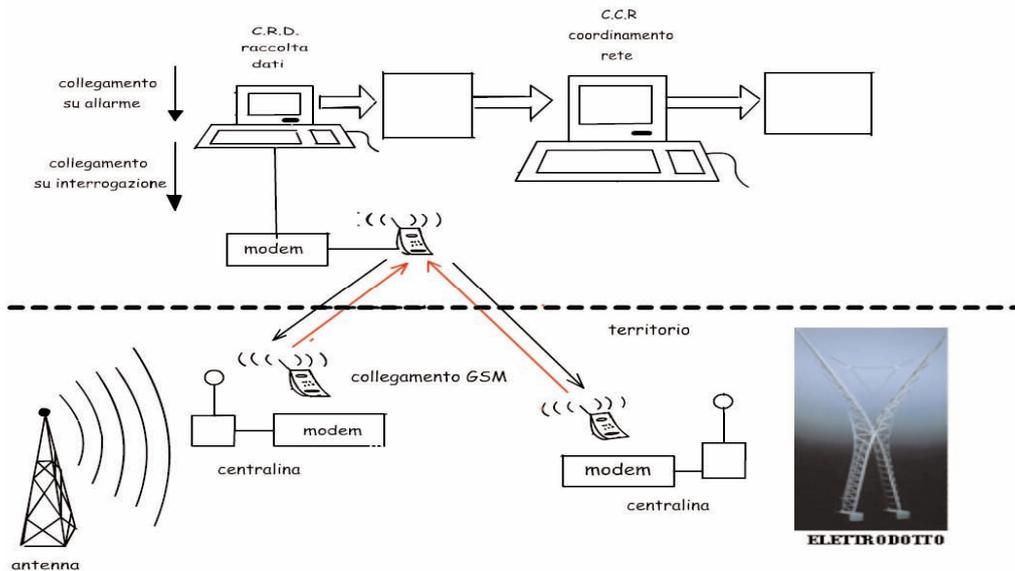


Figura 2.21 Schema di connessione delle rete via GSM.

Figure 2.21 Scheme of network connection by means of GSM.

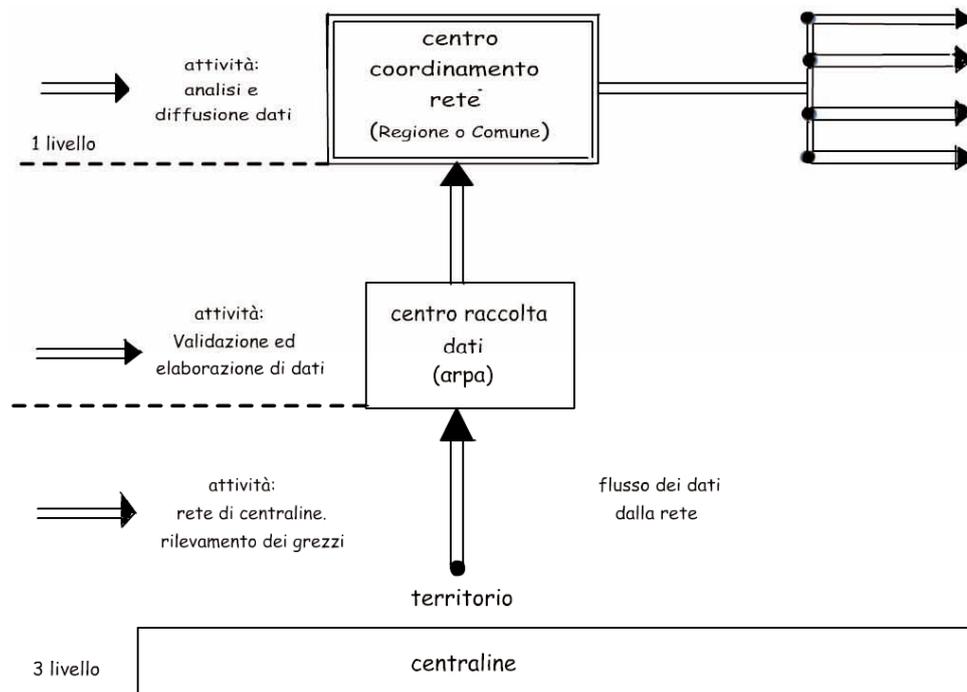


Figura 2.22 Una possibile architettura di rete.

Figure 2.22 Possible architectural network.

- di monitoraggio provenienti dal centro raccolta dati;
- diffusione dei rapporti di monitoraggio;
- predisposizione di documentazione informativa sull'attività di monitoraggio.

Il secondo livello è di competenza dell'Ente tecnico preposto alla gestione tecnico-

logistica della rete che attiva un *Centro di raccolta dati* (C.R.D.) e svolge le funzioni necessarie al fine di assicurare la funzionalità della rete.

In particolare sono di competenza del C.R.D. le seguenti funzioni:

- dispiegamento delle configurazioni della rete (centraline);
- individuazione dei posizionamenti puntuali

delle centraline e della durata cicli di monitoraggio;

- validazione, raccolta ed archiviazione dei dati grezzi provenienti dalle centraline;
- elaborazioni statistiche dei dati validati;
- compilazione ed invio al CCR del rapporto dei dati validati ed elaborati;
- manutenzione ordinaria del materiale di rete.

Il terzo livello gerarchico è costituito da ogni configurazione di centraline schierate sul territorio. Il terzo livello di rete, variabile in relazione alle diverse dislocazioni delle centraline, è di competenza del C.C.R. per quanto riguarda la scelta delle aree da monitorare, mentre sono di competenza del C.R.D. l'individuazione puntuale dei posizionamenti delle centraline e della durata dei cicli di monitoraggio.

4.3 Criteri di configurazione

La rete ha lo scopo di realizzare una griglia dinamica e flessibile di sensori (centraline) di monitoraggio in continuo, finalizzata sia alla caratterizzazione delle condizioni di esposizione al campo elettromagnetico esistenti in punti del territorio, sia alla individuazione di situazioni critiche per le quali fornire segnali di *warning* (allarme) per le eventuali esecuzioni di successive misure dei parametri del campo elettromagnetico.

Per soddisfare tale duplice finalità è necessario fissare dei criteri guida per il posizionamento delle centraline sul territorio.

Intanto, per la caratterizzazione elettromagnetica del territorio, occorre stabilire preliminarmente le priorità per la individuazione delle aree da monitorare. In tal senso i criteri guida possono essere i seguenti:

- recettori sui quali sono stati già accertati valori del campo elettrico, per le alte frequenze, o di induzione magnetica, per le basse frequenze, superiori al 50% dei limiti previsti dalla normativa vigente;
- comprensori scolastici;
- strutture per la degenza sanitaria;
- recettori in prossimità di siti con molteplicità di impianti per le telecomunicazioni o di elettrodotti;
- luoghi attrezzati per l'intrattenimento pubblico superiore alle quattro ore;
- siti segnalati dai municipi;
- siti per i quali è stata già adottata la riduzione a conformità (per gli impianti ad alta frequenza).

Per quanto riguarda poi la possibilità di utilizzare la rete con funzioni di *warning*, il posizionamento dei sensori, oltre a tenere conto delle

priorità precedentemente elencate, richiederà:

- la preventiva attribuzione dei limiti del valore del campo elettromagnetico in relazione alla tipologia dei luoghi, come previsto dai già citati D.P.C.M. 8 luglio 2003;
- la scelta del punto di installazione della centralina, previa misura a banda larga al fine di caratterizzare spazialmente il sito da monitorare;
- la fissazione del valore di soglia da attribuire al segnale di *warning*, in relazione al limite applicabile alla posizione del sensore.

4.4 Diffusione e utilizzazione dei dati

La diffusione e la successiva utilizzazione dei dati costituiscono la fase finale del monitoraggio elettromagnetico del territorio.

La rilevante importanza di tale fase è da ricondursi alle finalità stesse attribuite alla rete.

In tal senso la misura delle grandezze del campo elettromagnetico effettuata dalle centraline non può essere considerato un modo alternativo e definitivo per la verifica del rispetto dei limiti previsti dalle normative esposte ed analizzate in Appendice

I dati scaturiti dal monitoraggio rappresentano, invece, l'elemento oggettivo di conoscenza che consente:

- agli Enti responsabili dell'autorizzazione per l'installazione di nuovi impianti, di corroborare il processo istruttorio ai fini autorizzativi e di pianificare l'uso del territorio anche in funzione dello sviluppo di tali tecnologie;
- agli organi di vigilanza di pianificare i controlli sul territorio e di intervenire con misure mirate, là dove gli andamenti temporali dei valori di campo elettromagnetico mostrassero criticità;
- alla popolazione di acquisire la consapevolezza sui reali livelli di campo elettromagnetico presenti sul territorio ed il loro andamento nel tempo;
- ai gestori degli impianti di telecomunicazioni e degli elettrodotti di acquisire un dato tecnico condiviso sulla possibilità di inserire ulteriori impianti sul territorio, compatibilmente con lo stato elettromagnetico già esistente.

4.4.1 La diffusione dei dati

Il valore mediato su sei minuti è il dato di base fornito dalla centralina non soltanto perché è con tale valore che è possibile verificare, almeno con una analisi di primo livello, la rispondenza ai limiti previsti dalla normativa, ma anche perché a partire da esso è possibile ricavare importanti parametri statistici che sono

specifici del monitoraggio in continuo.

Intanto si fa rilevare che al termine di un ciclo di monitoraggio di 24 ore, ogni centralina ha elaborato 1440 medie mobili. Tale mole di dati non è di grande interesse né appare pratico che la totalità dei dati possa essere inviata al C.C.R. o ai soggetti interessati all'esito del monitoraggio. È invece necessario che, a partire dall'insieme dei valori delle medie, l'informazione sugli esiti del monitoraggio che deve essere fornita al C.C.R., o ad altre amministrazioni, sia costituita da alcune elaborazioni statistiche delle medie validate. A tale fine, risultano significative le seguenti elaborazioni da inviare ai predetti soggetti al termine di ogni ciclo di monitoraggio e per ogni postazione monitorata:

- numero dei superamenti dei limiti;
- numero dei superamenti della soglia di *warning*;
- valore massimo dell'insieme dei valori mediati su 6 minuti del campo elettrico;
- valore medio dell'insieme dei valori mediati su 6 minuti del campo elettrico;
- valore minimo dell'insieme dei valori mediati su 6 minuti del campo elettrico;
- % dei valori < valore medio;
- % dei valori misure \geq valore medio (nel caso di centraline equipaggiate con sensori bi-banda i dati devono essere riferiti ad ogni banda di misurazione);
- la media sul ciclo dei valori mediati su sei minuti;
- il 98° ed il 95° percentile dei valori;
- periodo di osservazione;
- numero totale delle misure;
- durata in ore del monitoraggio.

Alcuni di questi parametri potrebbero essere forniti direttamente dal sistema di elaborazione delle centraline, per gli altri occorrerà disporre di appositi programmi di calcolo.

4.4.2 Vincoli per l'utilizzazione dei dati

Nel precedente paragrafo si è fatto cenno alla impossibilità di utilizzare i dati forniti dalla centralina ai fini della verifica del rispetto dei limiti previsti dalla normativa. Si vuole ora approfondire tale aspetto esaminando i vincoli di natura tecnico-procedurale che condizionano l'utilizzazione dei dati forniti dalla rete.

4.4.3 I dati forniti dalle centraline ad alta frequenza

La citata norma CEI 211-7 del 2001, richiamata dal D.P.C.M. 8 luglio 2003 e quindi cogente, prescrive, in sintesi, le seguenti modalità di misura:

- 1) le misure vanno effettuate ordinariamente in banda larga;
- 2) il punto deve essere individuato attraverso una prima serie di misure nell'area in esame al fine di rilevare il punto di massima esposizione;
- 3) i livelli del campo elettrico, magnetico e della densità di potenza devono essere mediati su qualsiasi intervallo temporale di sei minuti;
- 4) i livelli del campo elettrico, magnetico e della densità di potenza devono essere mediati su un'area equivalente alla sezione verticale del corpo umano;
- 5) il requisito della media spaziale richiede che vengano effettuate più misure nel punto d'indagine; almeno due corrispondenti alla testa

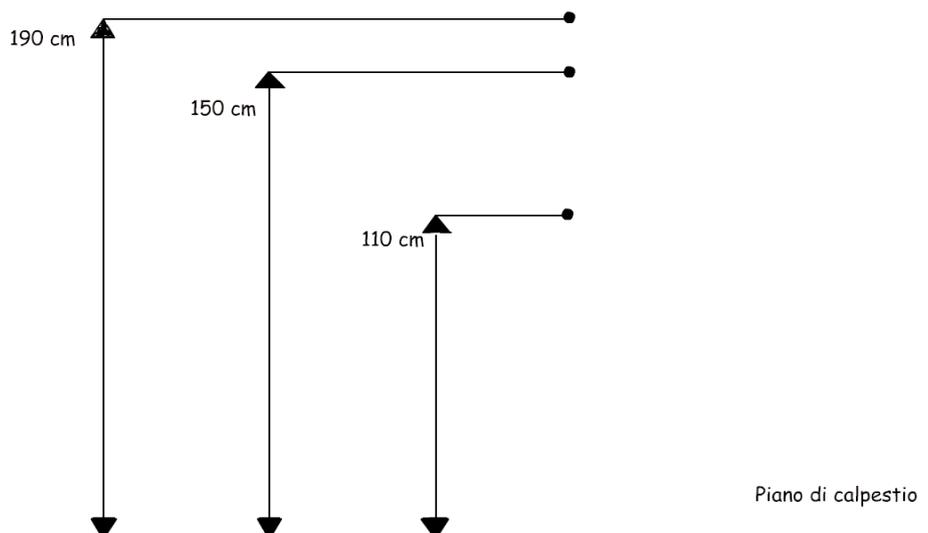


Figura 2.23 Prescrizioni per il rilevamento spaziale del campo elettrico ad alta frequenza.
Figure 2.23 Regulation for spatial detection of the high frequency electric field.

- e al tronco, quindi ad una altezza di 1.90 m e 1.10 m. Ognuna di queste dovrà essere a sua volta il risultato della media temporale su sei minuti. Se la differenza tra le due misure è maggiore del 25% del valore più elevato tra le due (maggiore quindi dell'incertezza di quella misura) è opportuno effettuare una terza a 1.50 m da terra, per poi effettuare una media dei tre risultati.
- 6) tutte le medie sopra riportate devono essere considerate come medie aritmetiche sulla densità di potenza ovvero come medie quadratiche delle intensità del campo elettrico o magnetico;
 - 7) nel caso in cui venga superato il 50% del valore dei limiti di legge è consigliabile effettuare l'analisi in banda stretta ;
 - 8) oltre il 75% dei suddetti limiti tale analisi diventa obbligatoria;
 - 9) nelle misure a banda stretta, a causa delle dimensioni non trascurabili delle antenne (tipicamente 1.2 m x 0.4 m per le biconiche, dai 10 ai 40 cm per i dipoli in mezz'onda e circa 0.4 m x 0.5 m per le log-periodiche) è sufficiente un solo punto di misura a 1,5 m di altezza;
 - 10) è necessario che siano precisate le condizioni di funzionamento degli impianti esistenti al momento delle rilevazioni. Tali condizioni dovrebbero rispecchiare la massima potenzialità degli impianti stessi o consentire di valutare il valore di campo presente in quelle condizioni per estrapolazione;
 - 11) al fine di valutare l'adeguatezza degli strumenti di misura si ritiene utile citare, tra le altre, le norme tecniche ANSI che richiedono che gli strumenti utilizzati siano isotropi entro 1 dB ed abbiano un fattore di calibrazione noto con un'incertezza massima di 2 dB, e le norme ISO 45000 e ISO 9000, che raccomandano che gli strumenti utilizzati siano tarati e riferibili.

Allo scopo di individuare i criteri di utilizzazione dei dati forniti dalla rete, si passa ad esaminare se e come le caratteristiche tecniche e costruttive generali delle centraline consentano di soddisfare le modalità di misura precedentemente elencate.

Intanto si osserva che tutte le prescrizioni ad eccezione della 9) riguardano la misurazione a banda larga e quindi sono direttamente riscontrabili nelle caratteristiche delle centraline che, per l'appunto, sono equipaggiate con sensori a banda larga.

In particolare:

- prescrizioni 1) e 2). Le prime due prescrizio-

ni, che riguardano le caratteristiche delle centraline e le modalità d'impiego (misurazioni a banda larga e preventiva caratterizzazione della zona di misura) sono soddisfatte sia tecnicamente che operativamente;

- prescrizione 3). Anche tale prescrizione è soddisfatta in quanto gli strumenti a banda larga commercializzati hanno la possibilità di integrare i valori di campo elettrico o magnetico su intervalli temporali variabili, compreso l'intervallo di 6 minuti previsto dalla vigente normativa;
- prescrizioni 5) e 6). Le configurazioni costruttive delle centraline attualmente sul mercato, non consentono di soddisfare il dispositivo di tali prescrizioni. Infatti, non è possibile effettuare la media spaziale delle misure in quanto l'altezza del sensore non può essere variata essendo il sensore stesso montato in modo solidale alla struttura della centralina (vds fig. 2.7). Tale limitazione potrebbe essere superata facendo assumere alla installazione della centralina le quote previste dalla norma. Ciò però colliderebbe con l'esigenza di una misurazione continua nel tempo. D'altra parte, anche ricorrendo alla strategia di effettuare cicli temporali di misurazioni a quote diverse, e quindi dedurre in qualche modo medie temporali/spaziali del campo, la modalità sarebbe comunque difforme dalla norma che, di fatto, richiede contestualità delle misure nel dominio spaziale;
- prescrizioni 7) e 8). Non applicabili alle centraline per la motivazione precedente;
- prescrizione 9). Non applicabile alle centraline in quanto riferita a strumentazione selettiva (a banda stretta);
- prescrizione 10). La prescrizione ha valenza operativa e tecnica. Sotto il profilo operativo essa ha lo scopo di correlare i dati misurati e registrati dalle centraline con le condizioni di funzionamento degli impianti radioelettrici i cui contributi cadono nella banda di funzionamento del sensore. Appaiono però evidenti le difficoltà operative per soddisfare il requisito. Infatti, gli impianti emettitori possono essere numerosi e dislocati nelle posizioni le più varie sul territorio. Ciò comporta una onerosa attività di verifica da parte dell'ente preposto al controllo della regolarità radioelettrica degli impianti che, inoltre, dovrebbe estendere tale controllo a tutto il periodo di registrazione dei dati. Sotto il profilo tecnico, poi, la conoscenza degli impianti che occorre sottoporre a controlli radioelettrici può essere ottenuta solo con un'analisi selettiva della banda di

- funzionamento della centralina, da eseguire preventivamente e nello stesso punto in cui successivamente sarà installata la centralina stessa. Infatti, solo attraverso l'analisi selettiva è possibile individuare le frequenze delle emissioni degli impianti e, da esse, risalire alla loro dislocazione. Questa complessa procedura che, tra l'altro, richiede il coordinamento stretto tra enti diversi, è adottata, con qualche semplificazione, solo nei casi di misurazioni a banda stretta. D'altra parte, prescindendo dalla necessità di individuare la dislocazione degli impianti per il loro successivo controllo radioelettrico, la preventiva analisi selettiva della banda appare quanto mai opportuna poiché solo attraverso essa è possibile determinare il valore del fattore di correzione che occorre applicare alla misura in relazione alla curva di calibrazione in frequenza della sonda fornita dal costruttore;
- prescrizione 11). La prescrizione si riferisce ai parametri di qualità degli strumenti a banda larga che, in generale, costituiscono lo standard costruttivo attualmente adottato.

4.4.4 I dati forniti dalle centraline a bassa frequenza

L'analisi della utilizzabilità dei dati misurati alle basse frequenze, con specifico riferimento alla frequenza di 50 Hz degli elettrodotti, presenta alcuni aspetti comuni a quella precedentemente fatta, e peculiarità connesse sia alla sostanziale diversità degli elettrodotti rispetto agli impianti per le telecomunicazioni (alta frequenza), sia per la conseguente ed ulteriore diversità della norma CEI 211-6 del 2001 (omologa a quella citata nel precedente paragrafo per

le alte frequenze), in base alla quale la normativa prevede debbano essere eseguite le misure di induzione magnetica relative agli elettrodotti.

Ciò posto, la citata norma CEI 211-6 del 12001, richiamata dal D.P.C.M. 8 luglio 2003 e quindi cogente, e lo stesso decreto prescrivono, in sintesi, le seguenti modalità di misura:

- 1) le misure vanno effettuate ordinariamente in banda larga;
- 2) il punto deve essere individuato attraverso una prima serie di misure nell'area in esame al fine di rilevare il punto di massima esposizione;
- 3) devono essere rilevati 12 valori dell'induzione magnetica nelle 24 ore (vds. Appendice 5) nelle normali condizioni di esercizio dell'elettrodotto;
- 4) l'induzione magnetica deve essere misurata ad una altezza di 1,0 m e 1,5 m dal piano di calpestio assumendo il valore massimo come indicativo del valore di esposizione;
- 5) è necessario che siano precisate le condizioni di carico delle linee, al momento delle rilevazioni.

Al fine di valutare l'adeguatezza degli strumenti di misura si ritiene utile citare, tra le altre, le norme tecniche ANSI che richiedono che gli strumenti utilizzati siano isotropi entro 1 dB ed abbiano un fattore di calibrazione noto con un'incertezza massima di 2 dB, e le norme ISO 45000 e ISO 9000, che raccomandano che gli strumenti utilizzati siano tarati e riferibili.

Allo scopo di individuare i criteri di utilizzazione dei dati forniti dalla recedei sensoria a bassa frequenza, si passa ad esaminare se e come le caratteristiche tecniche e costruttive

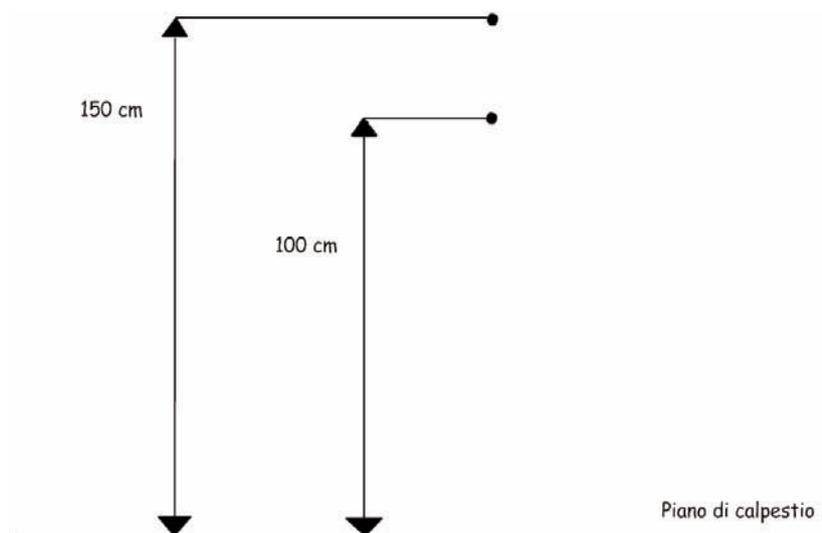


Figura 2.24 Prescrizioni per il rilevamento spaziale dell'induzione magnetica a bassa frequenza.
Figure 2.24 Regulation for spatial detection of the low frequency magnetic field.

generali delle centraline consentano di soddisfare le modalità di misura precedentemente elencate.

Intanto si osserva che tutte le prescrizioni riguardano la misurazione a banda larga e quindi sono direttamente riscontrabili nelle caratteristiche delle centraline che, per l'appunto, sono equipaggiate con sensori a banda larga.

In particolare:

- prescrizioni 1) e 2). Le prime due prescrizioni, che riguardano le caratteristiche delle centraline e le modalità d'impiego (misurazioni a banda larga e preventiva caratterizzazione della zona di misura) sono soddisfatte sia tecnicamente che operativamente;
- prescrizione 3). È pienamente soddisfatta dalle centraline in quanto dotate di sistema di registrazione dei dati;
- prescrizione 4). È soddisfatta purchè il sensore sia posizionato alla quota corrispondente al massimo valore dell'induzione magnetica;
- prescrizione 5). La prescrizione ha lo scopo di correlare i dati misurati e registrati dalle centraline con le condizioni di carico delle linee cioè al valore della corrente che deve essere fornito dal gestore dell'elettrodotto.

4.5 Scenari di utilizzazione dei dati

A conclusione dell'analisi svolta, si possono individuare alcuni scenari operativi d'impiego della rete e quindi il campo di utilizzazione dei dati forniti delle centraline.

- Una prima possibilità è strettamente legata alla principale peculiarità delle centraline che, in quanto progettate per il monitoraggio continuo, consente la registrazione temporale del campo elettromagnetico. Tale caratteristica messa a sistema con i dati relativi al

catasto delle sorgenti di campo, fornisce le correlazioni tra la dislocazione degli impianti sul territorio e le loro caratteristiche radioelettriche, il trend di sviluppo degli stessi, ed il trend dei valori di esposizione sul territorio.

- Un'ulteriore possibilità è connessa alla funzione di sensore di "warning" da attribuire alle centraline. Per le motivazioni tecniche già illustrate, i valori misurati dalle centraline non possono essere direttamente utilizzati per la verifica del rispetto dei limiti previsti dalla normativa. Tuttavia è possibile utilizzare la logica interna e gli automatismi della strumentazione per impostare soglie di allarme che, se superate, consentono l'intervento mirato per l'esecuzione di misure più accurate con le modalità previste dalla normativa vigente. Tale criterio di impiego appare quanto mai opportuno in siti complessi ove i valori di campo si discostano significativamente dal valore di fondo, attestandosi su valori prossimi al limite dalla norma (tale caso comprende anche quello relativo a impianti le cui emissioni sono state *ridotte a conformità*).
- Inoltre, le risultanze del monitoraggio potranno essere utilizzate per la pianificazione delle attività di vigilanza e di controllo degli impianti.
- Infine, le centraline possono essere inoltre utilizzate come primo anello strumentale nella procedura di misura dei valori di campo elettromagnetico in quelle situazioni nelle quali i valori di campo elettrico subiscono variazioni significative a breve e medio termine. Con tale criterio, infatti, la preventiva analisi del sito eseguita con la centralina, pur

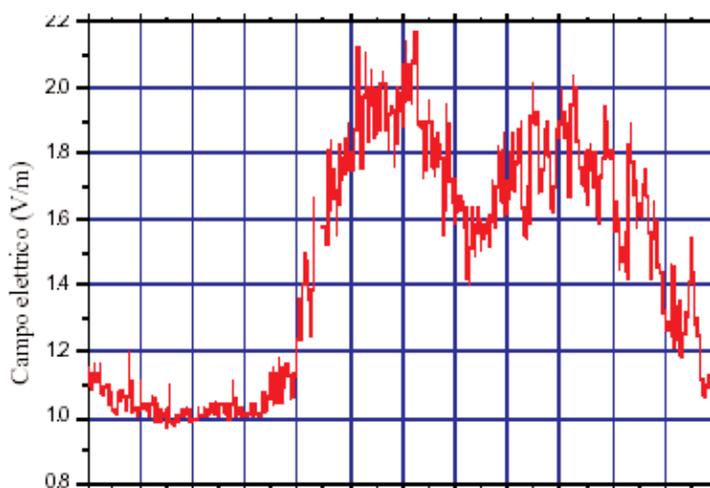


Figura 2.25 Tipico andamento medio del campo elettrico di una giornata dalle ore 00 alle ore 23.

Figure 2.25 Typical average trend of the electric field during the day from 00 to 23.

tenendo conto dei limiti tecnici di cui si è già detto, consente di eseguire le successive misure tenendo conto non soltanto della caratterizzazione spaziale del campo che viene assicurata dalla validazione dei dati, ma soprattutto dell'andamento temporale dei dati consentendo così la programmazione e l'esecuzione delle misure durante le finestre temporali più critiche.

Come esemplificazione, nella figura 2.25 è stato riportato il grafico dell'andamento temporale del valore di campo elettrico mediato, su intervalli di 6 minuti, misurato in un sito con prevalenza di contributi di campo generati da stazioni radio base (alta frequenza). Esso mostra come l'andamento giornaliero tipico del valore medio su 6 minuti sia caratterizzato da valori minimi durante le ore notturne e da due massimi, il primo nella fascia oraria 10-13 ed il secondo nella fascia 18-22.

Nel grafico successivo (figura 2.26) è mostrato l'andamento tipico del valore dell'induzione magnetica registrato in prossimità di un elettrodotto (grafico in rosso). La figura riporta anche il valore registrato della corrente ed il valore dell'induzione magnetica determinato con il calcolo.

Dal confronto delle curve si osserva come l'andamento dell'induzione magnetica sia strettamente correlato a quello della corrente e che il modello di calcolo adottato, pur con valori in eccesso, fornisce lo stesso andamento dell'induzione magnetica misurata.

5. Tecniche per la riduzione dell'esposizione

Si è ampiamente analizzata la circostanza che i valori misurati dalle centraline non possono essere assunti direttamente come prova strumentale di superamenti dei limiti ma piuttosto come possibili segnali di *warning* che consentono di attivare, da parte degli organi di vigilanza, mirate procedure di controllo e da parte delle amministrazioni competenti di adottare i conseguenti provvedimenti amministrativi ove i controlli confermassero i superamenti dei limiti.

Occorrerà pertanto definire i criteri in base ai quali fissare la soglia di *warning* al di sopra della quale i dati del monitoraggio siano considerati rappresentativi di situazioni critiche.

5.1 Procedure tecniche per le criticità dovute agli impianti per le telecomunicazioni

Si possono definire situazioni critiche quelle per le quali risulta che uno o più valori registrati dalle centraline sono superiori al 75% dei limiti imposti dalla normativa per gli impianti per le telecomunicazioni (da 100 kHz a 3GHz).

Le criticità delle situazioni sono deducibili dai rapporti sui dati registrati dalle centraline, che il C.R.D. (Centro Raccolta Dati) invia al C.C.R. (Centro Coordinamento Rete) termine di ogni ciclo di ogni monitoraggio.

In tali casi:

- gli organi preposti al controllo (ARPA) procedono ad eseguire misurazioni a banda

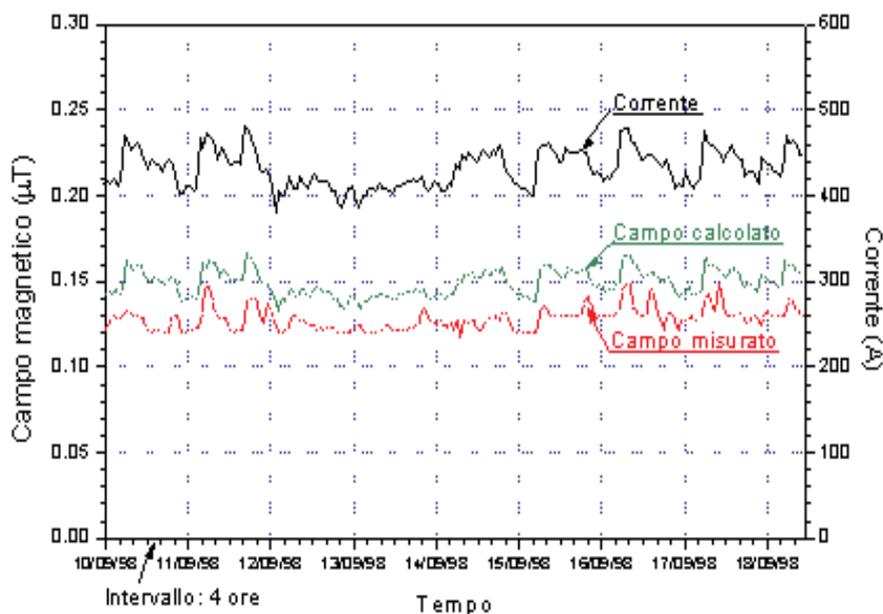


Figura 2.26 Andamento tipico dell'induzione magnetica registrato in prossimità di un elettrodotto.
Figure 2.26 Typical trend of the magnetic induction field next to the power line.

FREQUENZA	CAMPO ELETTRICO (V/m)		CAMPO ELETTRICO (V/m)		CAMPO ELETTRICO (V/m)	
	LIMITI DI ESPOSIZIONE	WARNING (75%)	VALORI DI ATTENZIONE	WARNING (75%)	OBIETTIVI DI QUALITÀ	WARNING (75%)
0,1 ÷ 3 MHz	60	45	6	4,5	6	4,5
3 MHz ÷ 3000 MHz	20	15	6	4,5	6	4,5
3000 MHz ÷ 300 GHz	40	30	6	4,5	6	4,5

larga nel punto di posizionamento della centralina, adottando le modalità previste dalla norma CEI 211-7 del 2001, tenendo conto dei periodi della giornata in cui sono stati registrati i superamenti, come risulta dalla registrazione dei dati delle centraline.

- ove le misure a banda larga confermassero i superamenti della soglia, vengono attivate le procedure di misura a banda stretta che consentono, tra l'altro, di conoscere la frequenza di ogni singola emissione e quindi il gestore dell'impianto.
- se le verifiche a banda stretta confermassero il superamento dei limiti di legge, la norma-

tiva prescrive "la riduzione a conformità delle emissioni".

Con la ripetizione della misura con strumentazione a banda stretta, eseguita nella medesima posizione della precedente misurazione a banda larga e nello stesso periodo di tempo, si ottengono, per ogni emissione, le seguenti ulteriori informazioni:

- frequenza;
- contributo del campo elettrico;
- direzione provenienza della emissione;
- polarizzazione del campo.

Le prime due informazioni assumono decisiva rilevanza amministrativa, poiché dalla

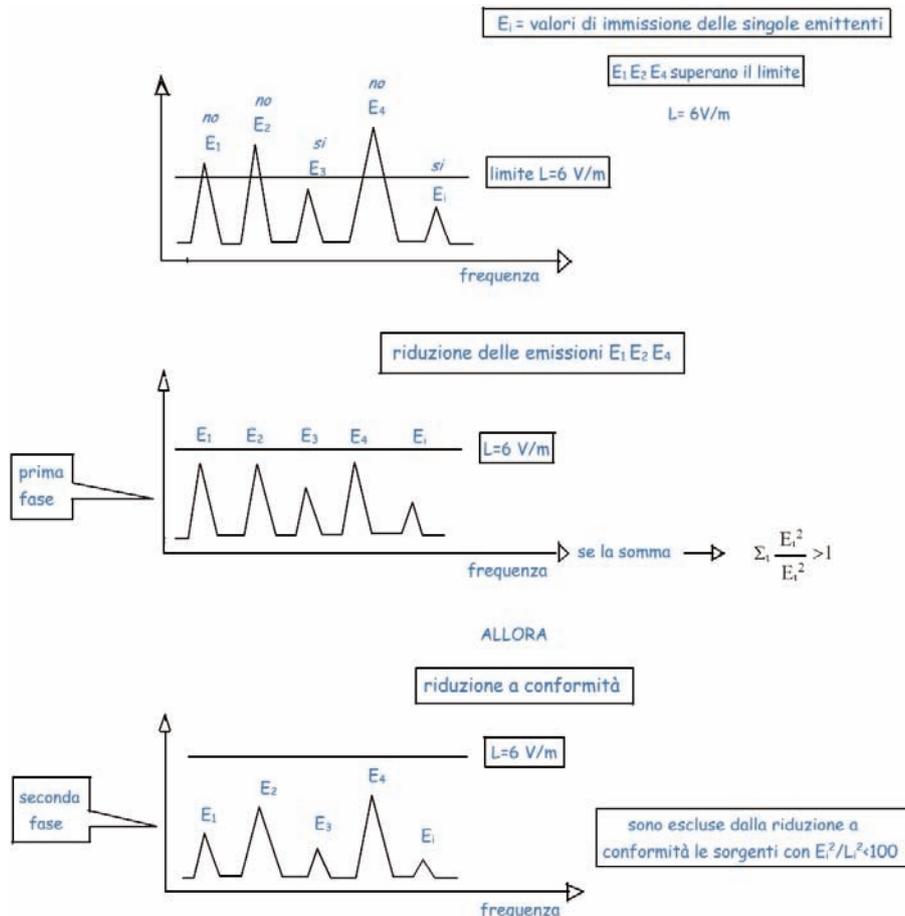


Figura 2.27 Schema concettuale della riduzione a conformità.

Figure 2.27 Thought scheme of reduction to conformity.

conoscenza della frequenza di emissione è possibile risalire al gestore dell'impianto, mentre la conoscenza del contributo del campo elettrico della emissione consente di verificare, noti i contributi di tutte le emittenti, il superamento evidenziato dalla misure a banda larga e dalle centraline.

Ciò perché la tecnica di misura a banda stretta è caratterizzata da una maggiore precisione rispetto e quella a banda larga.

Nel caso di superamenti dei limiti, le informazioni fornite dalle misure selettive consentono di procedere alla cosiddetta riduzione a conformità dei valori di immissione del campo elettrico generato dagli impianti, come prescritto dall'Allegato C del D.P.C.M. 8-7-2003.

In sintesi tale prescrizione ha lo scopo di ridurre i singoli contributi di campo in modo che la loro somma (quadratica) rientri nei limiti previsti dalla citata norma.

Lo schema concettuale del procedimento è di seguito sintetizzato.

La riduzione a conformità dei valori del campo elettrico di immissione E_i di n sorgenti, riferiti al punto di misura, ha il seguente presupposto:

$$C = \sum_{i>1} \frac{E_i^2}{L_i^2}$$

con E_i i valori misurati del campo elettrico di ciascuna delle n sorgenti, ed L_i i relativi limiti in funzione della frequenza.

In termini generali, il problema si enuncia come segue: *Calcolare il fattore di riduzione a che, applicato ai singoli valori misurati di campo elettrico E_i con riferimento ai rispettivi valori dei limiti L_i , soddisfi la seguente relazione:*

$$C_r = \alpha^2 C = \alpha^2 \sum_i \frac{E_i^2}{L_i^2} = 0.8$$

In tale calcolo sono esclusi i contributi minori di 1/100 del limite per essi previsto.

Occorrerà preliminarmente determinare la somma dei valori normalizzati C che, per le condizioni assunte, è maggiore di 1:

$$C = \sum_i \frac{E_i^2}{L_i^2}$$

Si possono generalizzare i seguenti casi:

- a)** Ciascuna delle n sorgenti fornisce un contributo E_{ip} inferiore al proprio limite L_i (situazione particolare ma più frequente).

Il fattore di riduzione α è dato dalla:

$$\alpha = \sqrt{0.8 \sum \frac{L_i^2}{E_{ip}^2}} = (0.8/C)^{1/2}$$

Quindi i valori ridotti a conformità E_{ipR} si ottengono moltiplicando ciascun valore di campo elettrico misurato E_{ip} per α

$$E_{ipR} = \alpha E_{ip}$$

b) Situazione più generale:

- una o più sorgenti con valori di immissione E_{is} superiori al limite previsto;
- una o più sorgenti con valori di immissione E_{ip} inferiori al limite previsto;
- una o più sorgenti con valori di immissione E_{if} inferiori all'1% del limite previsto.

La prima operazione da eseguire è la riduzione delle sorgenti che hanno un valore di immissione E_{is} superiore al limite previsto L_i . Per tali sorgenti occorre calcolare il fattore di riduzione β

$$\beta_i = (0.8 L_{is}^2 / E_i^2)^{1/2}$$

I valori ridotti si ottengono moltiplicando per β_i i valori di campo elettrico misurati E_{is} .

$$E_{isR} = \beta_i E_{is}$$

Con tali valori si procede alla verifica della condizione generale per la riduzione a conformità

$$C = \sum_i \frac{E_i^2}{L_i^2} > 1$$

Occorre poi verificare quali e quante sorgenti E_{if} forniscono un contributo inferiore all'1% del loro limite, attraverso la condizione:

$$E_{if}^2 / L_i^2 < 1\%$$

Per tali sorgenti si calcola la somma normalizzata

$$C_F = \sum_{if} (L_{if}^2 / E_i^2)$$

Si calcola quindi la somma normalizzata C_T di tutte le sorgenti che hanno un contributo superiore all'1%. Avendo già ridotto i valori di quelle sorgenti con contributi superiori al proprio limite, il fattore di riduzione α che si applica alle sorgenti che hanno contributi uguali o superiori all'1% è dato da:

i valori ridotti a conformità si ottengono moltiplicando ciascun valore di campo elettrico da ridurre per α .

$$E_{ipR} = \alpha E_{ip}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{0,8 - C_F}{C_T}}$$

Il procedimento va reiterato se la somma normalizzata dei quadrati dei contributi ridotti risultasse ancora maggiore di 1.

5.2 Procedure tecniche per criticità dovute agli elettrodotti

La criticità di un elettrodotto, con riferimento all'induzione magnetica, è connessa al superamento dei limiti previsti dal D.P.C.M. 8 luglio 2003, di seguito riportati.

INDUZIONE MAGNETICA		
Limiti di Esposizione (μT)	Valori di Attenzione (μT)	Obiettivi di Qualità (μT)
100	10	3

La completa formulazione dei limiti sopra indicati necessita di ulteriori specificazioni riguardanti le condizioni di esercizio degli elettrodotti durante le misure:

- i *limiti di esposizione* non devono essere superati in tutte le condizioni di esercizio degli elettrodotti;
- i *valori di attenzione e gli obiettivi di qualità* sono da intendersi come mediana dell'induzione magnetica nelle 24 ore e nelle normali condizioni di esercizio dell'elettrodotto.

Nel caso in cui i dati misurati dalle centraline abbiano evidenziato superamenti dei limiti occorre ricondurre i valori dell'induzione magnetica entro i limiti precedentemente indicati.

Diversamente è per gli impianti per le telecomunicazioni, per i quali l'adozione della riduzione a conformità non comporta necessariamente la modifica dei parametri di emissione dell'impianto (potenza in antenna) o il suo spostamento, nel caso di un elettrodotto che determini il superamento dei limiti in uno o più punti del territorio, non è possibile modificarne i parametri di esercizio, ma è necessario agire sugli elementi costituenti l'elettrodotto (linee e tralicci). Va altresì specificato che in generale la normativa non impone le soluzioni tecnologiche per far rientrare i valori di esposizione nelle prescrizioni, ma si limita ad imporre le prescrizioni stesse. Pertanto sono lasciate ai gestori le scelte

tecnologiche idonee per il raggiungimento di tale obiettivo che si configura come una specifica azione di risanamento.

Per ridurre l'intensità dei campi generati da un elettrodotto aereo in determinati punti, senza modificarne i parametri elettrici principali (corrente di esercizio e potenza trasportata), sono sostanzialmente possibili le seguenti soluzioni:

- 1) modificare il tracciato;
- 2) aumentare l'altezza dei sostegni;
- 3) adottare sostegni "compatti", che riducano l'interdistanza tra i vari conduttori di fase;
- 4) ricorrere a linee *split-phase*;
- 5) interrimento.

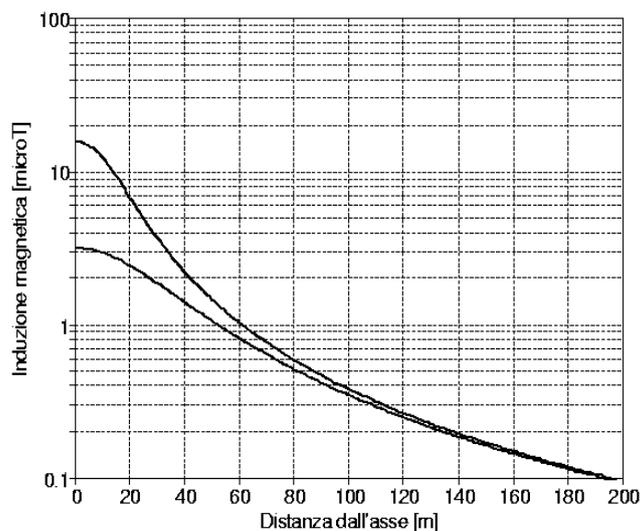


Figura 2.28 Profili laterali dell'induzione magnetica.
Figure 2.28 Lateral profile of magnetic induction.

La soluzione 1) tende ad allontanare la linea di punti critici. Il campo magnetico, a grande distanza da un elettrodotto (grande rispetto alla mutua distanza tra i conduttori) è inversamente proporzionale al quadrato della distanza stessa. La soluzione non sempre è di semplice attuazione perché lo spostamento di una campata comporta la modifica di un tratto dell'elettrodotto che comprende più campate.

La soluzione 2) aumenta l'altezza dei conduttori rispetto ai siti sensibili e ciò riduce il valore campi. Il metodo risulta abbastanza efficace per abbattere i valori riscontrabili direttamente al di sotto di un elettrodotto o nelle sue immediate vicinanze (al massimo alcune decine di metri), mentre è assai meno efficace per ridurre i valori a distanze maggiori, vedasi figura 2.28, dove si riportano i profili laterali dell'induzione magnetica ad 1 metro dal suolo, generata da un elettrodotto semplice terna 380 kV/1500 A con il conduttore più basso posto a 15 m dal suolo (curva superiore) e a 35 m dal suolo (curva inferiore).

La soluzione 3) si basa sulla circostanza che il campo magnetico generato da un elettrodotto dipende in maniera sensibile dalle mutue distanze tra i vari conduttori che costituiscono la linea. L'adozione di sostegni "compatti" riduce tali distanze con la conseguente riduzione delle intensità del campo in tutti i punti circostanti l'elettrodotto, soprattutto ad una certa distanza da esso (vedasi figura 2.29), dove si riportano i profili laterali dell'induzione magnetica ad 1 metro dal suolo, generata da un elettrodotto semplice terna 380 kV/1500 A con sostegni standard a traliccio (curva superiore) e da un elettrodotto analogo con sostegni innovativi tipo

Foster and Partners (curva inferiore); in entrambi i casi il conduttore più basso si trova ad una altezza di 25 metri dal suolo.

La soluzione 4) è una delle tecniche più efficaci per abbattere il campo magnetico. Lo *split-phase* consiste nel ripartire tra due o più conduttori la corrente trasportata da un singolo conduttore di fase, in modo da avere correnti minori su ciascun conduttore e contemporaneamente poter scegliere lo schema di cablaggio in modo da ottenere la massima cancellazione tra i contributi dei conduttori stessi al campo totale, sfruttando la composizione delle diverse fasi di ciascuna corrente. Una forma attuativa di questa tecnica può consistere nel convertire a doppia terna una tratta a semplice terna, a parità di tensione e di potenza trasportata (vedasi figura 2.30) dove si riportano i profili laterali dell'induzione magnetica ad 1 metro dal suolo di una linea semplice terna da 380 kV/1500 A, (curva superiore) e linea a doppia terna di uguale tensione e potenza con conduttori ad una altezza minima di 25 metri dal suolo.

La soluzione 5) prevede la sostituzione dei conduttori aerei con cavi isolati interrati. Le più recenti tecnologie per l'isolamento dei cavi consentono di realizzare una maggiore compattezza (ovvero minore interdistanza mutua tra i vari conduttori) di un elettrodotto interrato rispetto alla configurazione aerea nella quale i conduttori non sono isolati. Ciò determina una rapida attenuazione dell'intensità del campo magnetico con la distanza dalla linea. Infatti, mentre nelle immediate vicinanze di una linea interrata ci si devono aspettare valori dello stesso ordine di grandezza di quelli riscontrabili sotto una linea aerea di caratteristiche corri-

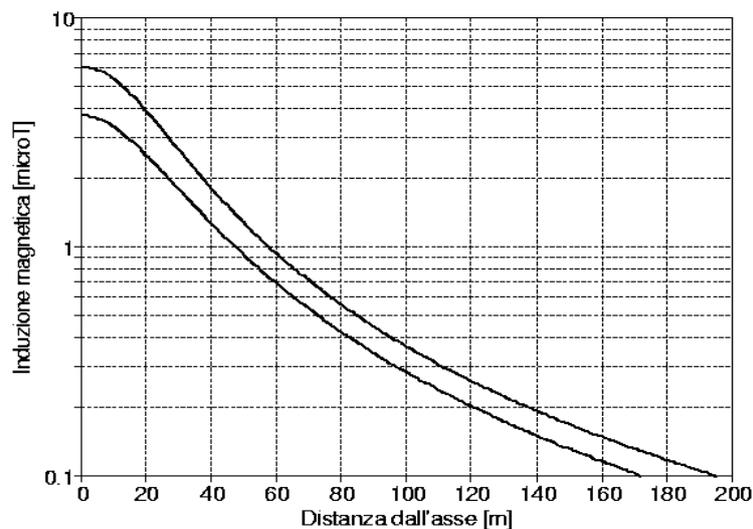


Figura 2.29 Profili laterali dell'induzione magnetica (*Foster and Partners*).

Figure 2.29 Lateral profile of magnetic induction (*Foster and Partners*).

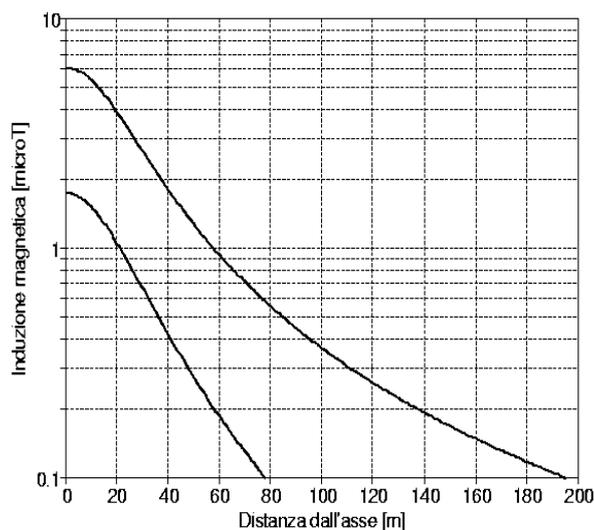


Figura 2.30 Profili laterali dell'induzione magnetica (doppia terna).
Figure 2.30 Lateral profiles of magnetic induction (double tern).

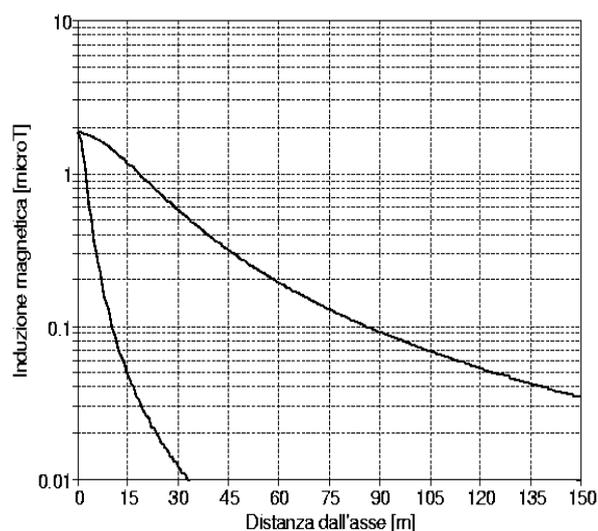


Figura 2.31 Profili laterali dell'induzione magnetica (linea interrata).
Figure 2.31 Lateral profiles of magnetic induction (buried conductor).

spondenti, con l'aumentare della distanza, anche di pochi metri, dalla linea interrata i valori attesi decadono assai rapidamente a livelli che, per la linea aerea, richiederebbero distanze di molte decine di metri (vedasi figura 2.31), dove si riportano i profili laterali ad 1 metro dal suolo dell'induzione magnetica generata da una linea aerea a semplice terna 132 kV/450A con il conduttore più basso posto ad una altezza di 18 metri dal suolo (curva superiore) e da linea interrata a trifoglio (curva inferiore) posta ad una profondità di 1,5 metri.

APPENDICE 1

Strumentazione sviluppata nell'ambito del progetto MEM e alcuni rilevanti risultati

Sviluppo tecnologico

Uno dei temi sviluppati in seno al progetto MEM ha riguardato la tecnologia ed il software di acquisizione ed elaborazione dei dati.

Gli strumenti progettati sono:

- 1) elettrometro vettoriale
- 2) magnetometro triassiale nella banda 0.001 Hz – 20 Hz
- 3) magnetometro triassiale nella banda 1 Hz – 100 k
- 4) magnetometro triassiale nella banda DC – 20 Hz

Elettrometro vettoriale

Per la misura vettoriale del campo elettrico atmosferico nella banda 0.001 Hz – 100 kHz è stata realizzata un'antenna triassiale con una sensibilità di circa 1 $\mu\text{V}/\text{m}$ (fig.1).

La parte sensibile dello strumento si compone di 3 sensori ortogonali costituiti da due sferoidi A e B e da un ellissoide T che funge da struttura portante dei 3 sensori e contiene l'elettronica di condizionamento dei segnali (fig. 2). Nella figura 3 è rappresentato lo schema equivalente relativo ad un asse.

Se Q è la carica elettrica totale sulla sfera A , e se la carica vista da un osservatore posto alla distanza d dal centro della sfera ($d < 10r$) è inferiore a Q a causa dell'effetto schermante della superficie conduttrice della sfera sulle cariche distribuite nella zona opposta, questa carica è:

$$Q' = Q \left[1 + \sum_1^{\infty} \frac{r^{2n}}{d^{2n} - r^{2n}} \right] = 1 + \frac{r^2}{d^2 - r^2} + \frac{r^4}{d^4 - 3d^2r^2 + r^4} + \dots$$

pertanto anche la capacità elettrica della sfera è inferiore a quella percepita da un osservatore posto a grande distanza dalla superficie. Questa capacità diventa:

$$C = \frac{\partial Q'}{\partial V} = 4\pi\epsilon' \left[1 + \sum_1^{\infty} \frac{r^{2n}}{d^{2n} - r^{2n}} \right] = 4\pi\epsilon' \left[1 + \frac{r^2}{d^2 - r^2} + \frac{r^4}{d^4 - 3d^2r^2 + r^4} + \dots \right]$$



Figura 1. Antenna elettrica vettoriale.

Figure 1. Vectorial electric antenna.

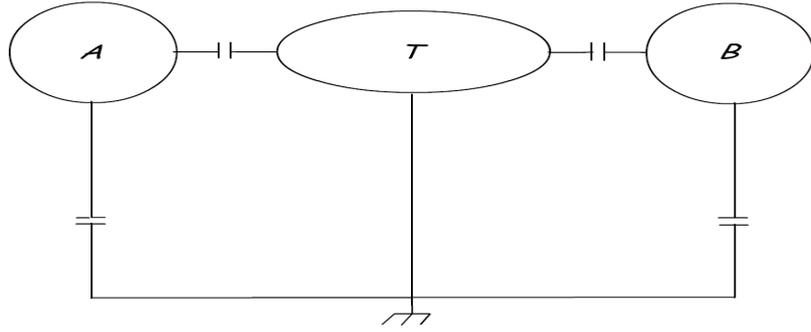


Figura 2. Schematizzazione dell'antenna elettrica.
Figure 2. Schematic of electric antenna.

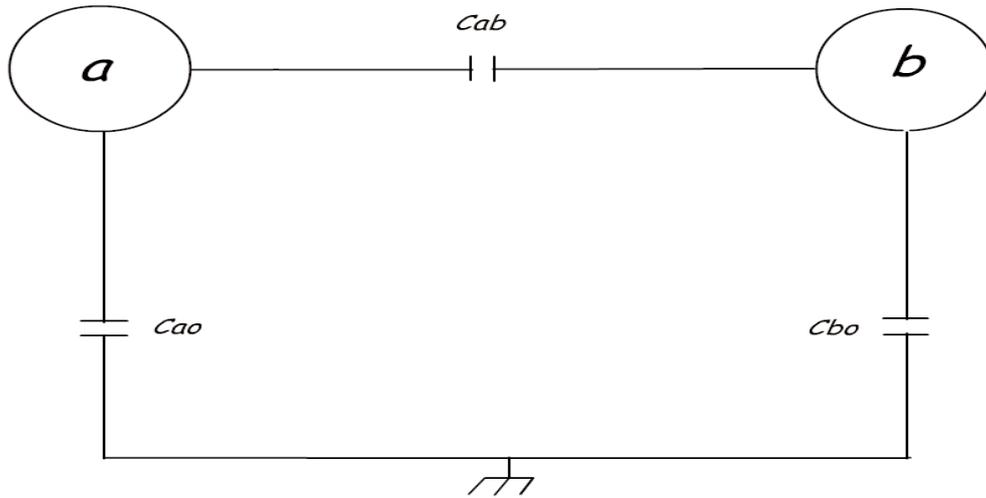


Figura 3. Schema equivalente dell'antenna elettrica vettoriale.
Figure 3. Equivalent scheme of vectorial electric antenna.

dove V è il potenziale prodotto dalla distribuzione di cariche sulla superficie della sfera:

$$V = \int_r^{\infty} E dr = \frac{Q}{4\pi\epsilon r}$$

infine la capacità tra le due sfere diventa:

$$C_{ab} = 4\pi\epsilon \frac{r^2}{d} \left[1 + \sum_1^{\infty} \frac{r^{2n}}{(d^2 - 2r^2)^n} \right] =$$

$$4\pi\epsilon \frac{r^2}{d} \left[1 + \frac{r^2}{d^2 - 2r^2} + \frac{r^4}{d^4 - 4d^2r^2 + 4r^4} + \dots \right]$$

mentre la capacità tra le sfere e il terreno è:

$$C_{ao} = C_{bo} = 4\pi\epsilon r \left[1 - \frac{r}{d} + \frac{r^2}{d^2 - r^2} - \frac{r^3}{d^2 - 2dr^2} + \dots \right]$$

per ragioni costruttive risulta che $C_{ab} \approx C_{ao}$ se l'altezza da terra dell'antenna $h \gg d$.

La resistenza "vista" dalle due sfere, dovuta alla sia pure piccolissima conducibilità elettrica dell'aria indotta dai raggi cosmici e dai materiali radioattivi nel sottosuolo, può essere calcolata mediante la seguente espressione:

$$R = \frac{\epsilon n_i f_i}{n i e^2 \left[4\pi\epsilon \frac{r^2}{d} \left[1 + \sum_1^{\infty} \frac{r^{2n}}{(d^2 - 2r^2)^n} \right] \right]}$$

dove, n_i è il numero di elettroni e ioni, m_i è il valore medio della massa degli ioni, f_i è la frequenza di collisione tra neutri e ioni, e e è la carica elettrica dell'elettrone e r è il raggio della sfera.

In prossimità della superficie terrestre, con $r = 20$ cm, questa resistenza è dell'ordine di 10^{12} Ohm. Per poter misurare la differenza di potenziale tra le sfere è necessario che la resistenza d'ingresso dello strumento sia $R_{in} \gg R_{atm}$.

Questa condizione è praticamente irrealizzabile senza l'introduzione di condizioni di

instabilità nel sistema di misura. Inoltre è necessario disporre sistemi di protezione in parallelo alla resistenza intrinseca dell'atmosfera nei confronti delle scariche atmosferiche, ciò comporta una resistenza addizionale in parallelo dello stesso ordine di grandezza di quella atmosferica. In questo strumento è stato adottato il compromesso $R_m \approx R_{atm}$, per cui il valore del campo misurato viene dimezzato.

Magnetometri a induzione

Il sensore per le basse frequenze (fig. 4) è costituito da un avvolgimento di circa 500000 spire frazionato in 8 settori per ridurre la capacità distribuita e, quindi, massimizzare la frequenza di risonanza.

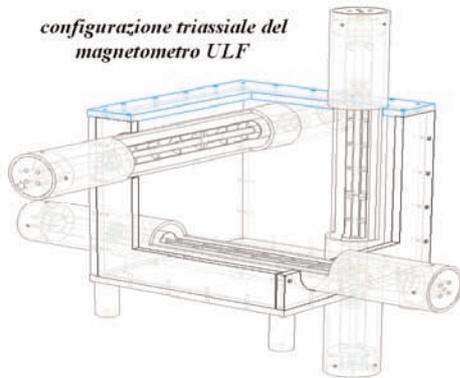


Figura 4. Magnetometro per le basse frequenze: assemblaggio meccanico.

Figure 4. Low frequency magnetometer: mechanical assembly.

Un secondo avvolgimento, coassiale al primo, viene utilizzato per la controreazione del segnale. In regime sinusoidale il segnale ai capi dell'avvolgimento primario è rappresentabile mediante la relazione:

$$V_i(t) = K(\omega) \cdot \frac{\partial H(t, \omega)}{\partial t} = j\omega K(\omega) H(t, \omega)$$

in cui K è la funzione di trasferimento dell'avvolgimento.

Questo segnale viene introdotto nell'avvolgimento di controreazione mediante la rete Z e produce la corrente i .

$$i(t) = V_o(t) \cdot \frac{1}{Z(\omega)}$$

Il segnale di uscita del sistema così controreazionato è:

$$V_o(t) = \frac{j\omega K(\omega) G(\omega) H(t)}{1 + j\omega G(\omega) M(\omega) \frac{1}{Z(\omega)}}$$

Se è soddisfatta la relazione:

$$\left| j\omega G(\omega) M(\omega) \frac{1}{Z(\omega)} \right| \gg 1$$

Su tutta la banda di interesse $10^{-3} < f < 20$ e il segnale di uscita non dipende più esplicitamente dalla frequenza ma soltanto dalle funzioni di trasferimento K, Z e M :

$$V_o(t) = \frac{K(\omega) Z(\omega) H(t)}{M(\omega)}$$

In realtà questa condizione non è concretamente realizzabile su tutta la banda ma soltanto per una parte di essa. Per ottenere una risposta uniforme su tutta la banda è stata adottata una soluzione diversa, che consiste nel simulare una induttanza negativa e una resistenza negativa mediante una configurazione circuitale GIC in parallelo al sensore. Questi componenti negativi simulati sono tali che rendono le componenti reali del sensore estremamente piccole. Posizionando opportunamente i poli e gli zeri della funzione di controreazione K e del GIC la funzione di trasferimento complessiva del magnetometro nella banda 0.001 Hz – 20 Hz diventa costante ed effettivamente indipendente dalla frequenza.

Nella regione inferiore della banda (1 mHz-100 mHz) si presenta il problema della deriva legato a diversi fattori; tra questi quello che domina è la deriva termica degli operazionali. Per abbattere il contributo del rumore $1/f$ è stato adottato un rivelatore sincrono che esegue la cross-correlazione tra il segnale associato alle variazioni del campo magnetico V_{sig} e un segnale di riferimento V_{rif} .

Questo processo non elimina il segnale $1/f$ bensì lo trasla nella banda del segnale di riferimento V_{rif} ; poiché si pone questa frequenza al di fuori della banda utile (> 20 Hz) il rumore viene filtrato agevolmente con un filtro ellittico a otto poli che lo sopprime di un fattore maggiore di 100 dB (fig 6). Il rumore del sensore è di circa 10^{-4} T/√Hz RMS. La dinamica di questo sensore è di 400 nT.

Il secondo magnetometro (fig. 7) che opera nella banda 1 Hz – 100 kHz è strutturato allo stesso modo ad eccezione del cross-correlatore che non è presente in quanto il rumore $1/f$ è

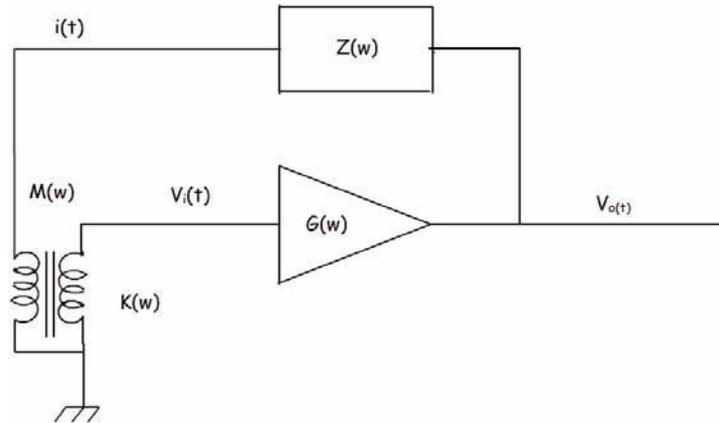


Figura 5. Schema di controeazione impiegato nel magnetometro.
Figure 5. Schematic of feedback employed in the magnetometer.

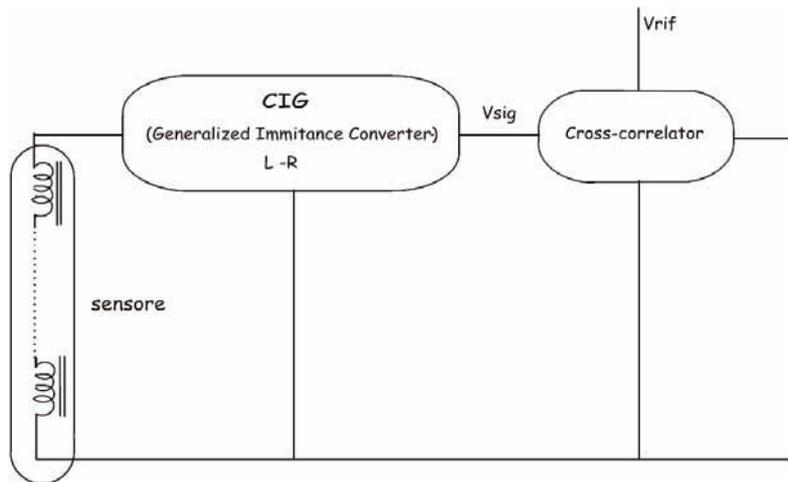


Figura 6. Schema di principio del filtraggio del segnale del magnetometro 0.001 Hz – 20 Hz.
Figure 6. Schematic of signal filtering in the magnetometer 0.001 Hz – 20 Hz.

trascurabile. Il rumore complessivo associato a questo sensore è dell'ordine di 10^{-15} T/ $\sqrt{\text{Hz}}$ RMS e una dinamica di 200 nT.

Il terzo magnetometro è rappresentato nella figura 8 in cui il sensore si trova all'interno di un sistema di bobine di Helmholtz realiz-

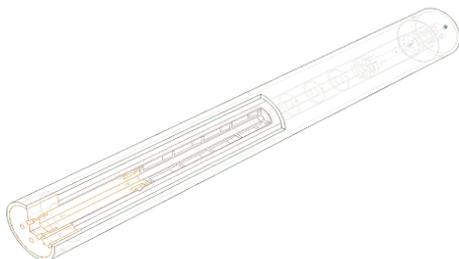


Figura 7. Spaccato del sensore a induzione.
Figure 7. Cutaway section of induction sensor.

zato ad hoc per la calibrazione. Il sensore è costituito da un cubo di fibra di quarzo sulle cui facce giacciono 6 sensori magnetici costituiti da 6 toroidi e 3 bobine di Helmholtz per la captazione dei segnali.

Lo strumento è caratterizzato da un rumore intrinseco dell'ordine di 10^{-11} T/ $\sqrt{\text{Hz}}$ RMS nella banda 0 Hz – 20 Hz con una dinamica di 50000 nT e una deriva termica di 0.1 nT/°C.

Per la calibrazione dei sensori è stato realizzato un solenoide con campo magnetico noto mostrato in figura 9. Tale sistema è posto nell'osservatorio MEM di L'Aquila (figura 10) dove viene mostrato anche il sistema d'acquisizione all'interno della struttura (figura 11).



Figura 8. Magnetometro per la banda 0 Hz – 20 Hz.

Figure 8. Magnetometer operating in the band 0 Hz – 20 Hz.



Figura 9. Sistema di calibrazione dei magnetometri a induzione.

Figure 9. Calibration system of induction magnetometers.



Figura 10. Stazione di misura MEM di L'Aquila, laboratorio di calibrazione e acquisizione dei dati.

Figure 10. Measurement station of L'Aquila, acquisition and calibration laboratory.



Figura 11. Interno del laboratorio, sistema di acquisizione ed elaborazione dei dati.

Figure 11. Indoor view of acquisition and calibration data system.

Elaborazioni dei dati e presentazione grafica risultati

In questo paragrafo vengono presentati alcuni risultati delle elaborazioni eseguite sui segnali acquisiti. In figura 12 viene mostrato uno spettrogramma, dove le righe orizzontali continue sono dovute a segnali stazionari di origine artificiale; sono evidenti la frequenza a 50 Hz, le armoniche superiori e alcune emittenti VLF. Le righe che compaiono soltanto per brevi tratti rappresentano emissioni naturali. In figura 13 è mostrata la distribuzione dell'energia del campo elettromagnetico di fondo in funzione della frequenza e del tempo. Le creste uniformi descrivono le sorgenti artificiali relativamente vicine al punto di misura, le creste irregolari rappresentano sorgenti lontane i cui segnali sono giunti per riflessione ionosferica, questi vengono modulati dall'andamento diurno della ionosfera. In figura 14 è rappresentata una sezione del grafico di fig. 13 nella banda 20 kHz. L'energia dei segnali riflette la variazione diurna delle proprietà fisiche della ionosfera. La componente Z non subisce la modulazione diurna della ionosfera, l'anomalia tra le 8 e le 10 è interpretabile come un effetto locale dovuto al rumore prodotto nelle vicinanze del punto di osservazione. La figura 15 mostra il vettore di Poynting nel piano verticale, l'intervallo angolare di arrivo di gran parte dei segnali è centrato intorno a 90° , questi segnali vengono emessi

dalla superficie terrestre e dalla ionosfera. La figura 16 rappresenta i diversi modi di propagazione. In questo esempio si mostrano i percorsi seguiti dalle onde elettromagnetiche nel tragitto sorgente-osservatore. Ciascun segnale è caratterizzato dalla propria impedenza d'onda Z: Z_i impedenza superficiale della ionosfera, Z_t^{sup} impedenza superficiale della terra, Z_t impedenza interna del sottosuolo, l'impedenza d'onda del segnale diretto può essere quello della sorgente Z_s se l'osservatore è vicino oppure l'impedenza del vuoto Z_0 se l'osservatore è lontano.

È possibile anche rappresentare la direzione d'arrivo dei segnali elettromagnetici tramite i parametri di Stokes, vedere figura 17. In figura sono rappresentati i segnali nella banda 1 Hz - 50 kHz, dove il cerchio di sinistra è posizionato nel piano orizzontale, gran parte dei segnali provengono dalla direzione Est-Nord-Est. Il cerchio di destra è posizionato verticalmente, la parte in giallo rappresenta l'interno della Terra, gran parte dei segnali provengono dalla ionosfera e dalla superficie terrestre, vi è anche un piccolo contributo proveniente dal sottosuolo.

In ultimo si mostra, vedere figura 18, la ricostruzione della componente Z mediante le funzioni di risposta impulsiva legate alle funzioni A e B sulla base del modello di figura 19.

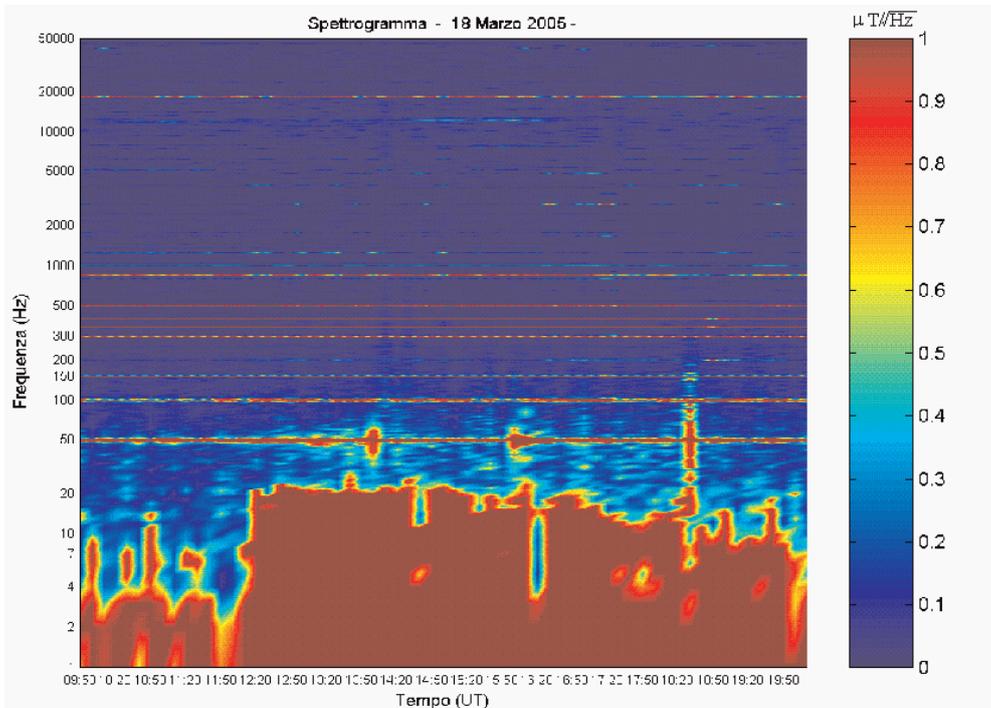


Figura 12. Spettrogramma del rumore elettromagnetico di fondo.
Figure 12. Background noise spectrogram.

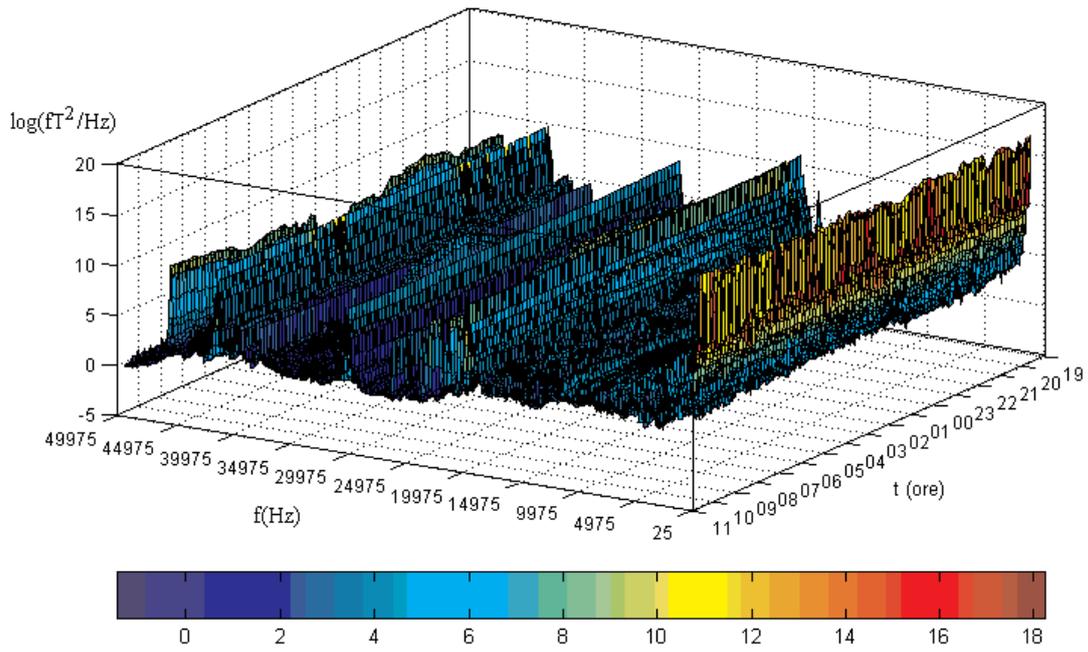


Figura 13. Distribuzione dell'energia del campo elettromagnetico in funzione della frequenza e del tempo.

Figure 13. Energy distribution of the electromagnetic field dependent on frequency and time.

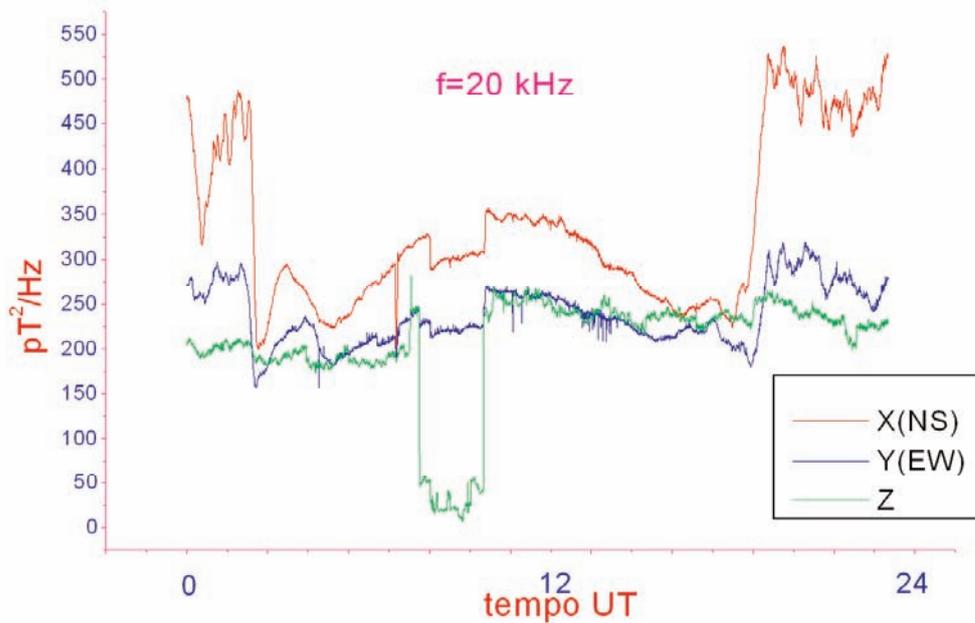


Figura 14. Sezione del grafico di fig. 13 nella banda di frequenza di 20 kHz.

Figure 14. Section of the graph of fig.13 in the frequency band of 20 kHz.

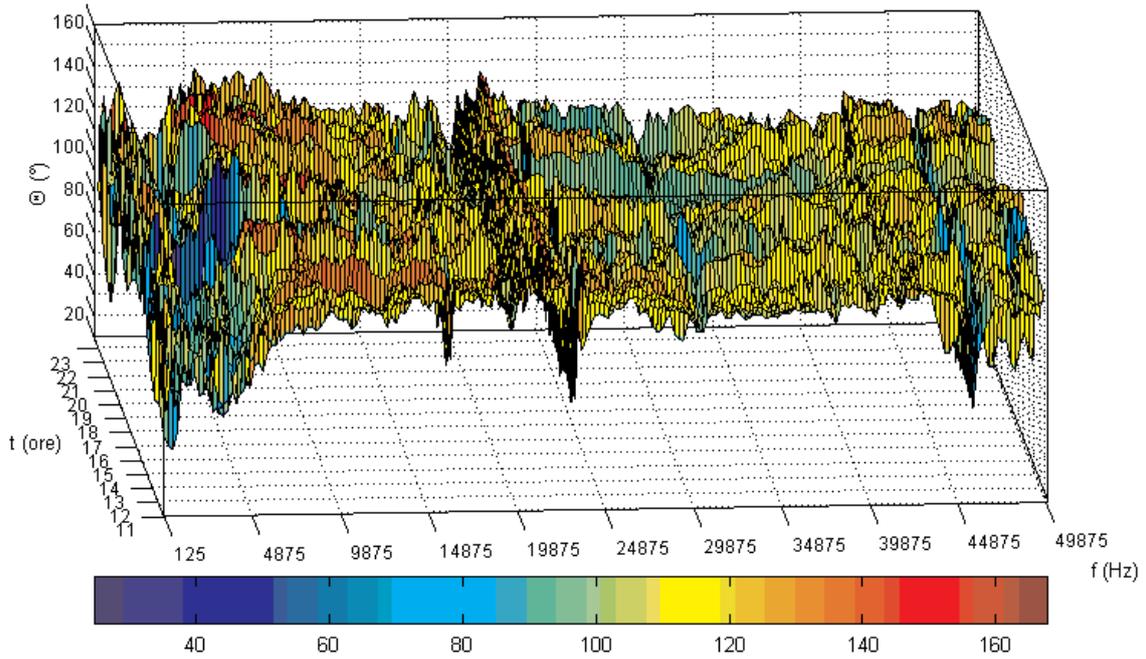


Figura 15. Vettore di Poynting nel piano verticale.
Figure 15. Poynting vector in the vertical plane.

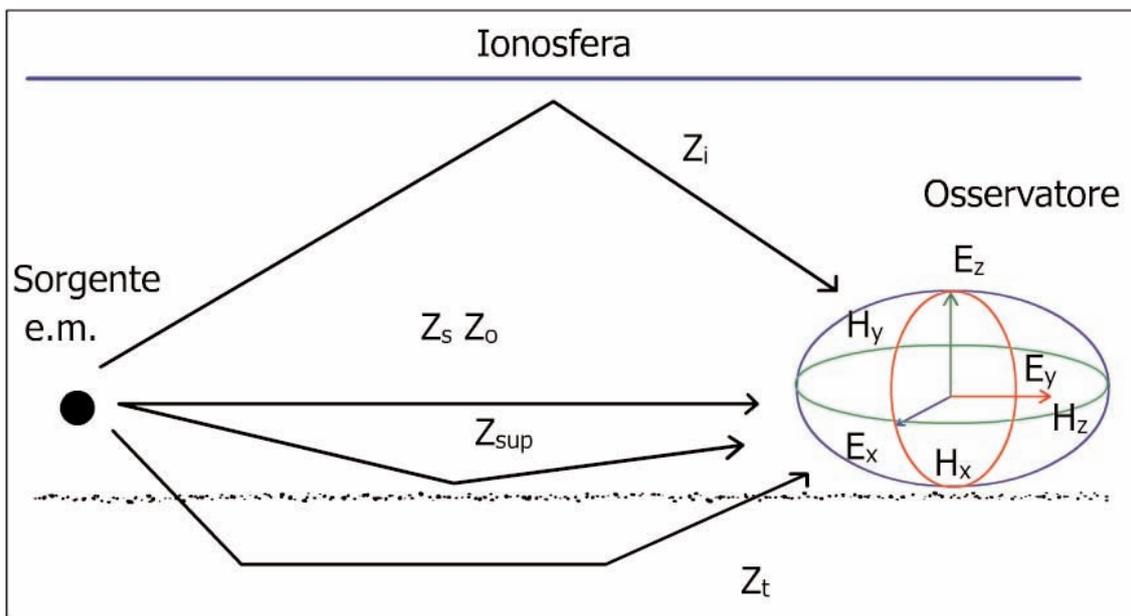


Figura 16. Esempificazione dei percorsi seguiti dalle onde e.m. nel tragitto sorgente – osservatore.
Figure 16. Schematic of ray path of the electromagnetic waves from the source to the observer.

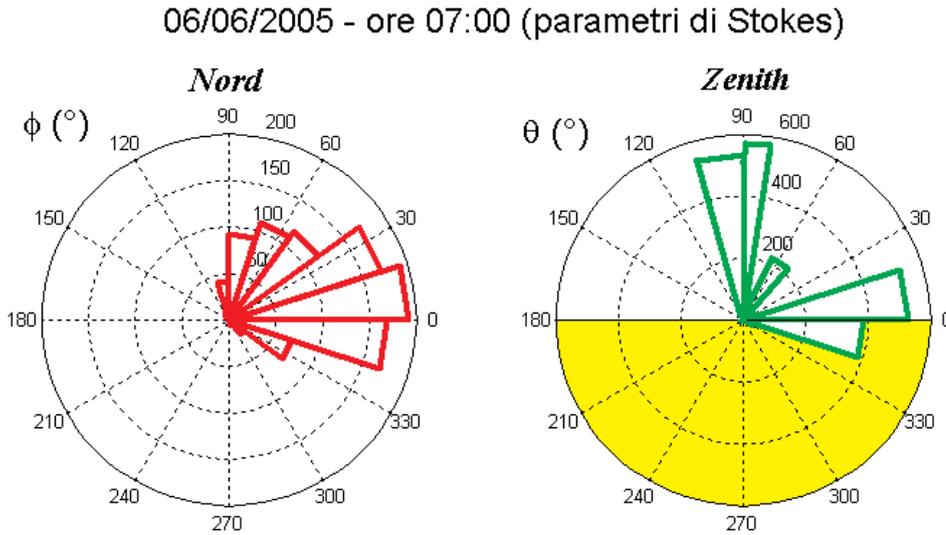


Figura 17. Istogramma polare della direzione di arrivo dei segnali elettromagnetici.
Figure 17. Polar histogram of the electromagnetic signal direction.

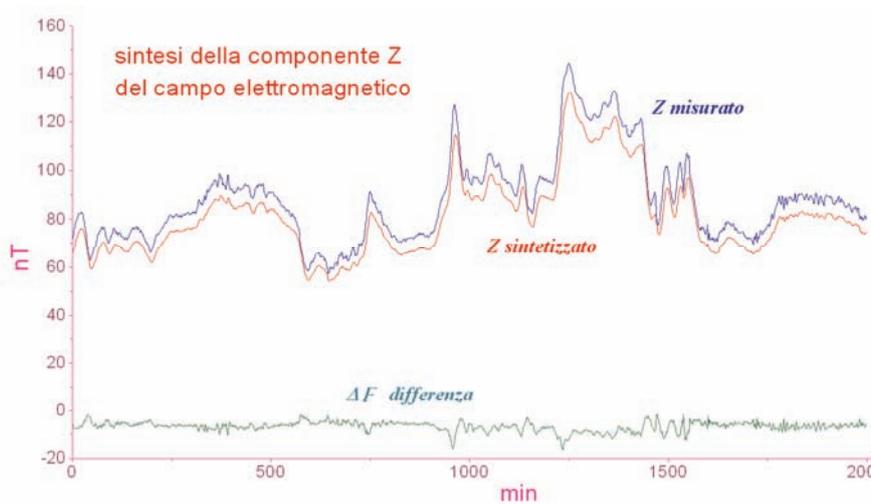


Figura 18. Ricostruzione della componente Z mediante le funzioni di risposta impulsiva legate alle funzioni A e B.
Figure 18. Z component reconstruction by means of the impulsive response connected A and B functions.

$$H_z = A * H_x + B * H_y$$

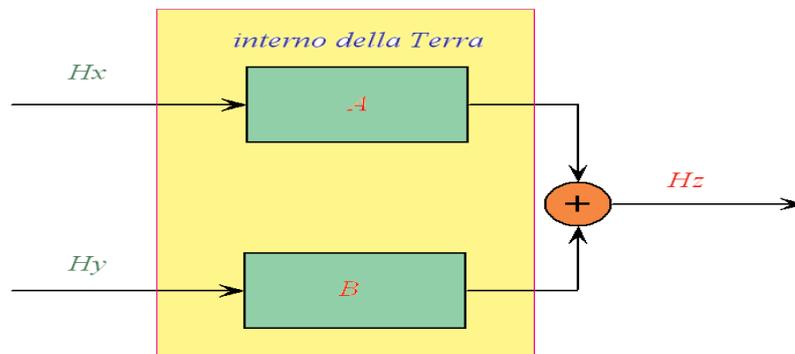


Figura 19. Schematizzazione della struttura interna della Terra mediante le due funzioni A e B.
Figure 19. Schematic representation of the internal structure of the Earth using A and B.

APPENDICE 2

1. Il quadro normativo del settore

Le prescrizioni che disciplinano la protezione sanitaria dall'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici e la salvaguardia dell'ambiente dall'impatto delle strutture impiantistiche, derivano da un complesso di norme le cui finalità non risultano sempre direttamente riconducibili a materie sanitarie, e ambientali ma conseguono da combinati disposti di norme afferenti a diversificati corpi normativi. La mancanza di un testo unico sulla materia sulla quale, a partire dal 1998, quando fu emanata la prima norma del settore (D.M. 381/98 recante il "Regolamento per la determinazione dei tetti massimi a radiofrequenza compatibili con la salute umana"), si è concentrata una disarmonica produzione legislativa, spesso promossa più che da esigenze tecniche, da istanze sociali o da pressioni della pubblica opinione, ha determinato un complesso quadro di norme che costituisce un corpus legis inorganico e, per taluni importanti aspetti, lacunoso ed ambiguo.

Tale caratteri, unitamente ad una distorta

percezione del rischio da parte di limitati ma fortemente determinati settori della popolazione, hanno alimentato un acceso contenzioso amministrativo che si è assommato al contenzioso costituzionale, Stato-Regioni, in merito alla natura concorrente delle competenze regionali in materia.

Il contesto giuridico è stato quindi reso più complesso ed articolato da una copiosa giurisprudenza costituzionale ed amministrativa che, nel corso degli anni, e in relazione al mutare del quadro normativo, ha manifestato una sostanziale evoluzione dei pronunciamenti che hanno arricchito e, in taluni casi, chiarito il quadro normativo, dirimendo alcune importanti incertezze di base.

Nella tabella che segue è sinteticamente riportato il quadro normativo e regolamentare di riferimento nel quale è richiamata anche la normativa comunitaria, ivi comprese le direttive tecniche di organismi internazionali, divenuti cogenti per effetto dei Decreti recentemente emanati in attuazione della legge quadro n. 36/01.

PROSPETTO DEL QUADRO NORMATIVO

- RIFERIMENTO INTERNAZIONALE
 - **Linee guida dell'ICNIRP (International Commission on Non Ionizing Radiation Protection) del 28 aprile 1998: popolazione e lavoratori (0 Hz-300 GHz)**
- RIFERIMENTO COMUNITARIO
 - **Raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea - 12 luglio 1999: solo popolazione (0Hz-300 GHz)**
 - **Direttiva 2004/40/ce del Parlamento Europeo e del Consiglio - 29 aprile 2004: solo lavoratori (0Hz-300 GHz)**
- LEGISLAZIONE NAZIONALE
 - **L. 66 del 20/3/2001: disposizioni urgenti per il risanamento degli impianti radiotelevisivi**
 - **L. 36 del 22/2/2001: protezione della popolazione e dei lavoratori (0 Hz-300 GHz)**
 - **D. Lgs. 259 dell'1/8/03: codice delle comunicazioni elettroniche (assorbe parzialmente, a meno delle norme urbanistiche, il D.Lgs. 198 del 4/9/2002 annullato dalla sentenza della corte costituzionale n. 330 dell'1/10/2003)**
 - **Decreti attuativi della legge n. 36/01 pubblicati sulla G.U. n. 199 del 29 agosto 2003 e sulla G.U. n. 200 del 30 agosto 2003: limiti di esposizione, valori di attenzione ed obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalla esposizione ai campi elettrici e magnetici generati dagli elettrodotti e dai campi elettromagnetici generati dagli impianti per le telecomunicazioni**
- RIFERIMENTI TECNICI
 - **Norma CEI 211-6 2001: guida per la misura dei c.e.m. (0-10 kHz)**
 - **Norma CEI 211-7 2001: guida per la misura dei c.e.m. (10 kHz-300 GHz)**

1.1 La normativa nazionale

La Legge quadro n. 36/01 sulla “protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici” (G.U. n. 55 del 7/3/2001)

La legge quadro n. 36/01 costituisce il riferimento normativo nazionale principale nella specifica materia poiché tutte le norme successive discendono o fanno riferimento a detta legge.

La norma, pur avendo un dispositivo che si discosta nettamente dalle omologhe leggi che vigono nei paesi dell’U.E. e da quelle in vigore nei paesi industrializzati, copre lo stesso range di frequenze previsto dalla normativa internazionale

Uno degli elementi più qualificanti della legge, è l’adozione del *principio di precauzione* per il quale la norma fornisce indicazioni puntuali sui criteri con i quali devono essere definiti i nuovi limiti a tutela della salute della popolazione e dei lavoratori dalla esposizione ai c.e.m.

A tal fine, la norma definisce i seguenti limiti enunciandone le finalità:

- *limite di esposizione*: è il valore di campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico, considerato come valore di immissione, definito ai fini della tutela della salute da effetti acuti, che non deve essere superato in alcuna condizione di esposizione della popolazione e dei lavoratori;
- *valore di attenzione*: è il valore del campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico,

considerato come valore di immissione che non deve essere superato negli ambienti abitativi, scolastici, e nei luoghi adibiti a permanenze prolungate. Esso costituisce misura di cautela ai fini della protezione da possibili effetti a lungo termine;

- *obiettivi di qualità* sono criteri localizzativi, standard urbanistici e incentivazioni per l’utilizzo delle migliori tecnologie disponibili, indicati dalle regioni; sono valori di campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico, definiti dallo stato ai fini della progressiva minimizzazione dell’esposizione.

Su tali definizioni si possono fare alcune considerazioni. Intanto emerge che l’adozione del *principio di precauzione* trova riscontro nella definizione del *valore di attenzione* inteso come misura di cautela al fine della protezione da possibili effetti a lungo termine. Tale impostazione è del tutto assente nella Raccomandazione del Consiglio d’Europa del luglio 1999.

Inoltre, mentre ai *limiti di esposizione* ed al *valore di attenzione* è attribuita una finalità sanitaria, gli obiettivi di qualità non hanno tale finalità ma quella del miglioramento della qualità ambientale.

Infine, particolare rilevanza assume la prescrizione contenuta nella definizione degli obiettivi di qualità per la quale è riservata solo allo Stato la competenza di fissarli in termini di valori di campo elettromagnetico.

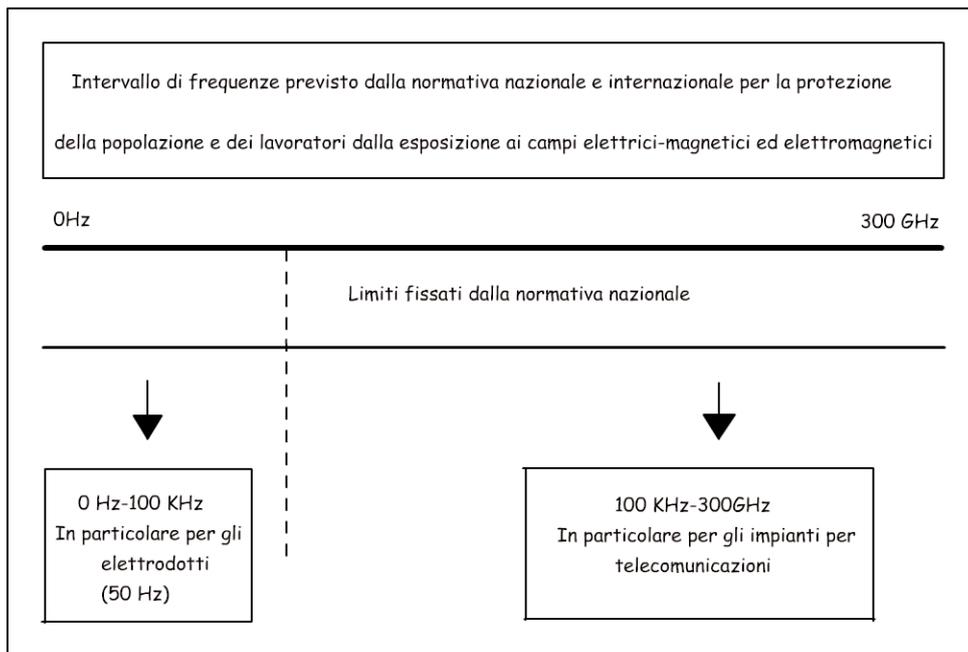


Figura 1. Campo di frequenza trattato dalla normativa.

Figure 1. Frequency field considered in the law that setting up a standard.

Si sintetizzano di seguito gli elementi salienti della norma.

- ha lo scopo di assicurare la tutela della popolazione e dei lavoratori nei confronti degli effetti dei campi elettromagnetici a breve e a lungo termine assumendo, per quest'ultimi, il *principio di precauzione*;
- ha come campo di applicazione gli elettrodotti e gli impianti per uso civile e militare che causano esposizione della popolazione e dei lavoratori ai campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici nell'intervallo di frequenza da 0 Hz a 300 GHz (figura 1);
- introduce i *limiti di esposizione* e i *valori di attenzione* per la protezione dagli effetti a breve e a lungo termine, e gli *obiettivi di qualità* per la progressiva minimizzazione dell'esposizione;
- affida a successivi decreti D.P.C.M. (emanati nel 2003) la definizione dei limiti;
- prescrive il completo risanamento degli impianti radioelettrici entro due anni e degli elettrodotti entro dieci anni, stabilendo per quest'ultimi i criteri di priorità degli interventi;
- prevede sanzioni amministrative nei confronti dei soggetti trasgressori o inadempienti;
- attribuisce specifiche competenze alle Regioni, alle Province e ai Comuni in materia autorizzativa mentre affida le attività di controllo alle Agenzie regionali e provinciali per la protezione ambientale;
- istituisce i catasti nazionale e regionali degli elettrodotti e degli impianti emittenti;
- prescrive che i prodotti commerciali che generano campi elettromagnetici riportino l'indicazione dei valori di campo emessi nelle condizioni di impiego;
- promuove l'educazione ambientale e l'informazione per la popolazione nel settore.

Il D.P.C.M. attuativo della L. 36 del 22 febbraio 2001 (da 0 Hz a 100 kHz)

Fissa i nuovi limiti di esposizione, i valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai capi elettrici e magnetici generati dagli elettrodotti (G.U. n. 200/03).

In sintesi la norma:

- scaturisce dalla legge quadro n. 36 del 22/2/01 (art. 4, comma 2 lettera a);
- abroga il D.P.C.M. del 1992 ed il D.P.C.M.

del 1995;

- ha come campo di applicazione gli elettrodotti così come definiti all'art. 3 comma 1 lettera e) della L. 36/01: "*l'elettrodotta è l'insieme delle linee aeree, delle sottostazioni e delle cabine di trasformazione*";
- per le altre sorgenti con frequenza da 0 Hz a 100 kHz rimanda alla raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea del 12 luglio 1999;
- stabilisce che le tecniche di misurazione da adottare siano quelle indicate dalle norme CEI;
- stabilisce che per la determinazione del valore d'induzione magnetica utile ai fini della verifica del non superamento del valore di attenzione e dell'obiettivo di qualità, il sistema agenziale APAT-ARPA dovrà determinare le procedure di misura e valutazione, per la successiva approvazione del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio;
- definisce le fasce di rispetto da calcolare sulla base della corrente normale di esercizio e con riferimento agli obiettivi di qualità di 3 μT ;
- fissa i seguenti limiti:
 - i limiti di esposizione non devono essere mai superati;
 - i valori di attenzione, come misura di cautela per la protezione dai possibili effetti a lungo termine non possono essere superati:
 - nelle aree gioco per l'infanzia;
 - in ambienti abitativi;
 - in ambienti scolastici;
 - nei luoghi adibiti a permanenza superiore alle 4 ore.

Il valore di 10 μT è da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio.

- gli obiettivi di qualità, ai fini della progressiva minimizzazione della esposizione (non ha significato sanitario), non possono essere superati nella progettazione dei nuovi elettrodotti e nella progettazione di nuovi insediamenti in prossimità di linee elettriche in corrispondenza di:
 - ambienti abitativi;
 - ambienti scolastici;
 - luoghi adibiti a permanenza non inferiore alle quattro ore.

Il valore di 3 μT è da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle

Grandezza	Limiti di Esposizione	Valori di Attenzione	Obiettivi di Qualità
Induzione magnetica (μT)	100	10	3
Campo elettrico (KV/m)	5	----	----

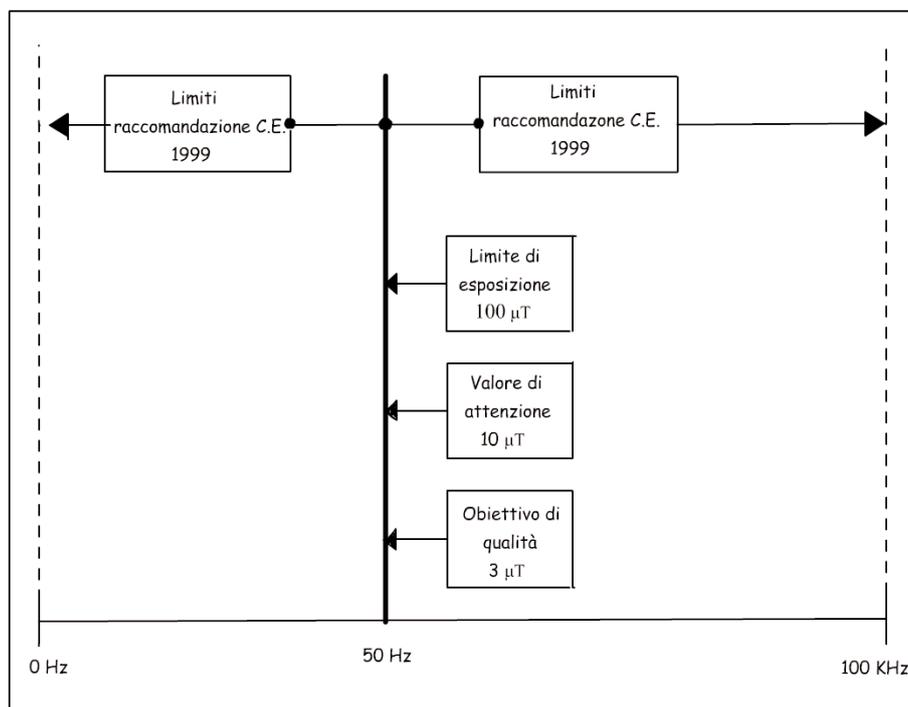


Figura 2. Rappresentazione grafica dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità, per l'induzione magnetica, fissati dal D.P.C.M. 8 luglio 2004 (basse frequenze).

Figure 2. Graph representation of exposure limits of warning values and quality objective for magnetic induction field, as in D.P.C.M. 8 July 2004 (low frequency).

normali condizioni di esercizio dell'elettrodoto.

Nella figura 2 che segue è riportata la rappresentazione grafica dei limiti prescritta dal Decreto nell'intervallo di frequenza da 0 Hz a 100 kHz.

Gli aspetti innovativi

- Estende il campo di applicazione della precedente normativa anche alle sorgenti di campo elettrico e magnetico, diverse dagli elettrodotti, aventi frequenza da 0 Hz a 100 kHz.
- Per tali tipologie di sorgenti rimanda all'insieme completo di restrizioni stabilite dalla Raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea del 1999.
- Assume, quali **limiti di esposizione** per il campo elettrico e per l'induzione magnetica, i limiti indicati dalla raccomandazione del consiglio dell'unione europea del 1999 (corrispondenti ai limiti di cui all'art. 4 dell'abrogato D.P.C.M. del 1992).
- Per i soli elettrodotti, e per la sola induzione magnetica, introduce due ulteriori limiti:
 - il **valore di attenzione** a tutela dai possibili effetti a lungo termine;
 - l'**obiettivo di qualità**, che non ha significato sanitario.

Le criticità

- Il rimando all'insieme completo di restrizioni stabilite dalla Raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea del 1999 per le sorgenti di campo elettrico e magnetico diverse dagli elettrodotti è tecnicamente incongruente con la norma che riguarda gli elettrodotti in quanto la norma europea comprende anche il criterio di verifica della condizione di esposizione multisorgenti a bassa ed alta frequenza, che è inconciliabile con l'Allegato C del decreto per le alte frequenze e con il presente decreto che non prevede l'esposizione multisorgente.
- Non sono specificate le alle quali devono essere riferiti i limiti di esposizione.
- La formulazione del valore di attenzione consente di accertare la rispondenza alla norma solo per gli elettrodotti già esistenti.
- Per i futuri elettrodotti manca il riferimento progettuale.
- La legge 36/01, art. 4 comma 1 lettera g, prescrive che all'interno delle fasce di rispetto non possano insistere i recettori indicati per gli obiettivi di qualità.

Se le fasce di rispetto sono applicabili ai futuri elettrodotti si avrebbe che:

- per i nuovi elettrodotti l'obiettivo di qualità di 3 μt sarebbe calcolato sulla base della mediana dei valori di corrente nelle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio;
- per la determinazione delle fasce di rispetto, il valore di 3 mt sarebbe calcolato sulla base della valore della corrente in servizio normale come definita della norma CEI 11-60.

Se le fasce di rispetto si riferiscono agli elettrodotti già esistenti si avrebbe che:

- i nuovi insediamenti sarebbero interdetti nella fascia di rispetto calcolata per il valore di 3 μt sulla base del valore della corrente in servizio normale come definita dalla norma CEI 11-60;
- i risanamenti degli elettrodotti esistenti dovrebbero essere eseguiti sulla base dell'obiettivo di qualità di 3 μt , calcolato con il valore della corrente in servizio normale come definita dalla norma CEI 11-60.

Il D.P.C.M attuativo della L. 36 del 22 febbraio 2001(da 100 kHz a 300 GHz) fissa i nuovi limiti di esposizione, i valori di attenzione e gli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici, magnetici, ed elettromagnetici generati alle frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz,

figura 3 (G.U. n.199/03).

In sintesi la norma:

- scaturisce dalla legge quadro 36 del 22/2/01 (art. 4, comma 2 lettera a);
- abroga il D.M. 381/98;
- ha come campo di applicazione le sorgenti fisse con frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz;
- non si applica:
 - ai lavoratori esposti per ragioni professionali;
 - agli impianti radar ed agli impianti con emissioni pulsate per i quali è previsto un successivo decreto;
 - agli impianti delle forze armate e delle forze di polizia per i quali è previsto un successivo decreto.
- per le sorgenti non riconducibili ai sistemi di telecomunicazioni si applicano le restrizioni di cui alla raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea del 12/7/1999;
- rimanda alle norme CEI per le tecniche di misurazione e di rilevamento dei livelli di esposizione;
- fissa i seguenti limiti di esposizione che non devono essere mai superati (valori efficaci mediati su un'area equivalente del corpo umano e su qualsiasi intervallo di sei minuti);

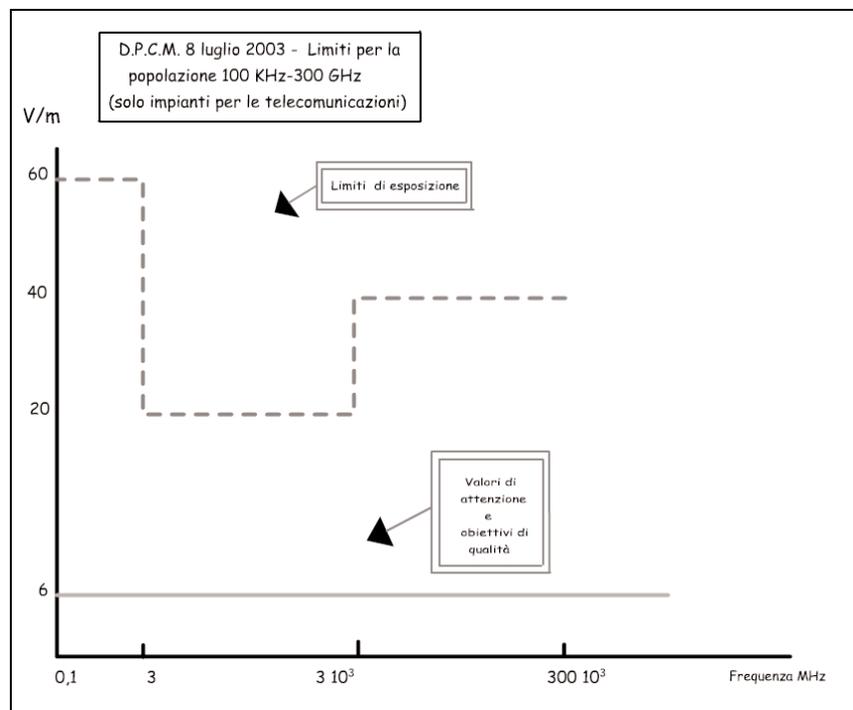


Figura 3. Rappresentazione grafica dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità fissati dal D.P.C.M. 8 luglio 2004 (alte frequenze).

Figure 3. Graph representation of exposure limits of warning values and quality objective for electric field, as in D.P.C.M. 8 July 2004 (high frequency).

FREQUENZA	CAMPO ELETTRICO (V/m)	CAMPO MAGNETICO (A/m)	DENSITÀ DI POTENZA (W/m ²)
0,1 ÷ 3 MHz	60	0,2	//
3 MHz ÷ 3000 MHz	20	0,05	1
3000 MHz ÷ 300 GHz	40	0,1	4

FREQUENZA	CAMPO ELETTRICO (V/m)	CAMPO MAGNETICO (A/m)	DENSITÀ DI POTENZA (W/m ²)
0,1 MHz ÷ 300 GHz	6	0,16	0,1

- fissa i seguenti valori di attenzione per la protezione dai possibili effetti a lungo termine, che non devono essere superati:
 - all'interno di edifici adibiti a permanenza superiore alle quattro ore;
 - nelle pertinenze esterne quali balconi terrazze e cortili;
 - sono esclusi i lastrici solari.
- fissa gli obiettivi di qualità (valori efficaci mediati su un'area equivalente del corpo umano e su qualsiasi intervallo di sei minuti) per la progressiva minimizzazione dell'esposizione, intesi come valori di immissione del campo elettromagnetico che non devono essere superati all'aperto nelle aree intensamente frequentate intese anche come superfici edificate ovvero attrezzate permanentemente per il soddisfacimento di bisogni sociali, sanitari e ricreativi. Agli obiettivi di qualità sono stati attribuiti gli stessi valori di cui alla tabella precedente.

Gli aspetti innovativi del decreto

- Estende il campo di applicazione anche ai sistemi non destinati alle telecomunicazioni.
- Rimanda all'insieme completo di restrizioni stabilite dalla Raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea del 1999 per le emissioni generate da impianti diversi dai sistemi fissi per le telecomunicazioni.
- Introduce il valore di attenzione come misura di cautela per i possibili effetti a lungo termine.
- Introduce un ulteriore nuovo limite costituito dagli obiettivi di qualità che non ha significato sanitario.
- Prevede una normativa particolare per gli impianti delle forze armate e delle forze di polizia.
- Prescrive la riduzione a conformità nel caso

che la somma normalizzata dei contributi delle emissioni sia ≥ 1 .

Le criticità della norma

- Nel caso di esposizioni multiple causate da impianti per le telecomunicazioni e da altri tipi di sorgenti, è tecnicamente incongruente il criterio di verifica del superamento dei limiti per i contributi dovuti ai sistemi delle telecomunicazioni, di cui all'Allegato C del decreto, con i criteri previsti dalla Raccomandazione del Consiglio U.E. per quanto riguarda i contributi di campo dovuti ad altre tipologie di sorgenti come, ad esempio, gli elettrodotti.
- Per i motivi di cui sopra, il decreto non si raccorda con quello sugli elettrodotti che non prevede la riduzione a conformità.
- Il testo del decreto indica condizioni diverse per la riduzione a conformità rispetto all'allegato al decreto stesso.
- La formulazione dei luoghi ove verificare gli obiettivi di qualità non è inequivocabilmente definita.
- Appare immotivato che:
 - solo gli obiettivi di qualità siano definiti come valore di immissione;
 - non sia prevista la riduzione a conformità per il superamento degli obiettivi di qualità.

Riferimenti comunitari

A premessa della presentazione dei contenuti della Raccomandazione (riguardante la popolazione) e della successiva Direttiva (riguardante i lavoratori) del Consiglio d'Europa è necessario illustrare, sia pure sinteticamente, il razionale scientifico sul quale esse si basano che è quello adottato dall'ICNIRP (International Commission on Non Ionizing Radiation Protection).

Il razionale dell'ICNIRP

Il razionale scientifico della normativa per la protezione dalla esposizione umana dai campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici (c.e.m.) sono i criteri ed i procedimenti tecnici con i quali sono stati determinati i limiti di esposizione che, sottoforma di linee guida, possono costituire riferimento per la formazioni degli atti legislativi che regolano la materia. I cardini fondamentali del razionale sono basati sui seguenti assunti:

- Distinzione tra:
 - meccanismi di interazione;
 - effetti biologici;
 - effetti di danno alla salute (effetti sanitari).
- Individuazione delle *grandezze di base* e delle *grandezze derivate*.
- Individuazione di *limiti di base* e dei *livelli di riferimento*.

1.2 I meccanismi di interazione - effetti biologici - effetti di danno alla salute

In generale, i campi elettromagnetici interagiscono con la materia attraverso i cosiddetti "meccanismi di interazione" "cioè con una serie di fenomeni che sono strettamente dipendenti dalle proprietà elettriche e magnetiche della materia e dalle caratteristiche del campo. Ciò si verifica anche nel corpo umano quando è esposto a campi elettromagnetici. In conseguenza dei meccanismi di interazioni, si determinano una serie di effetti biologici alcuni dei quali possono causare un danno alla salute. Appare quindi di fondamentale importanza la differenza tra l'effetto biologico e l'effetto di danno alla salute provocato dalla esposizione umana ai campi elettromagnetici.

L'OMS (Organizzazione Mondiale della Sanità) fornisce una chiara distinzione tra i due effetti: "Un effetto biologico si verifica quando l'esposizione alle onde elettromagnetiche provoca qualche variazione fisiologica notevole o rilevabile in un sistema biologico. Un effetto di danno alla salute si verifica quando l'effetto biologico è al di fuori dell'intervallo in cui l'organismo può normalmente compensarlo, e ciò porta a qualche condizione di danno alla salute".

Ciò posto, e chiarito che l'effetto biologico non si configura necessariamente in un danno alla salute, rimane da stabilire in quali condizioni un campo elettromagnetico può avere effetti sulla salute umana.

Grandezze di base e grandezze di riferimento - Limiti di base e livelli di riferimento

Per affrontare il problema conviene riferirsi alla suddivisione dello spettro in basse frequenze (da 0 Hz a 10 kHz) e in alte frequenze (da 10 kHz a 300 GHz) poiché i meccanismi di interazione e quindi gli effetti biologici, sono strettamente dipendenti dalla frequenza del campo elettromagnetico e, naturalmente, dalla sua intensità.

Va precisato che tale suddivisione è abbastanza arbitraria ma in questo contesto ciò non è di rilevante importanza poiché ogni altra possibile suddivisione non escluderebbe la contemporanea presenza, con diversa rilevanza, dei meccanismi di interazione tipici delle basse frequenze anche alle alte frequenze, e viceversa. Ciò che è rilevante è la preminenza di una classe di meccanismi rispetto alle altre e quindi di effetti, in dipendenza dalla frequenza del campo elettromagnetico.

Il passaggio dall'effetto biologico all'effetto di danno alla salute è individuato dai valori di soglia delle cosiddette *grandezze di base* che assumono il significato di *limiti di base* che dipendono dalla frequenza del campo elettromagnetico e rappresentano i veri limiti di esposizione al di sopra dei quali tali effetti si manifestano.

Ai valori di soglia dell'effetto di danno alla salute, ridotti di un fattore di sicurezza, si fanno corrispondere i valori del campo elettrico, magnetico, e di densità di potenza esterni, detti *livelli di riferimento* che, per come sono stati definiti, assumono il significato di *limiti di esposizione* per la prevenzione dagli effetti immediati.

Il non superamento di tali limiti fornisce quindi la certezza che non sia superata la soglia che separa l'effetto biologico dal danno immediato alla salute.

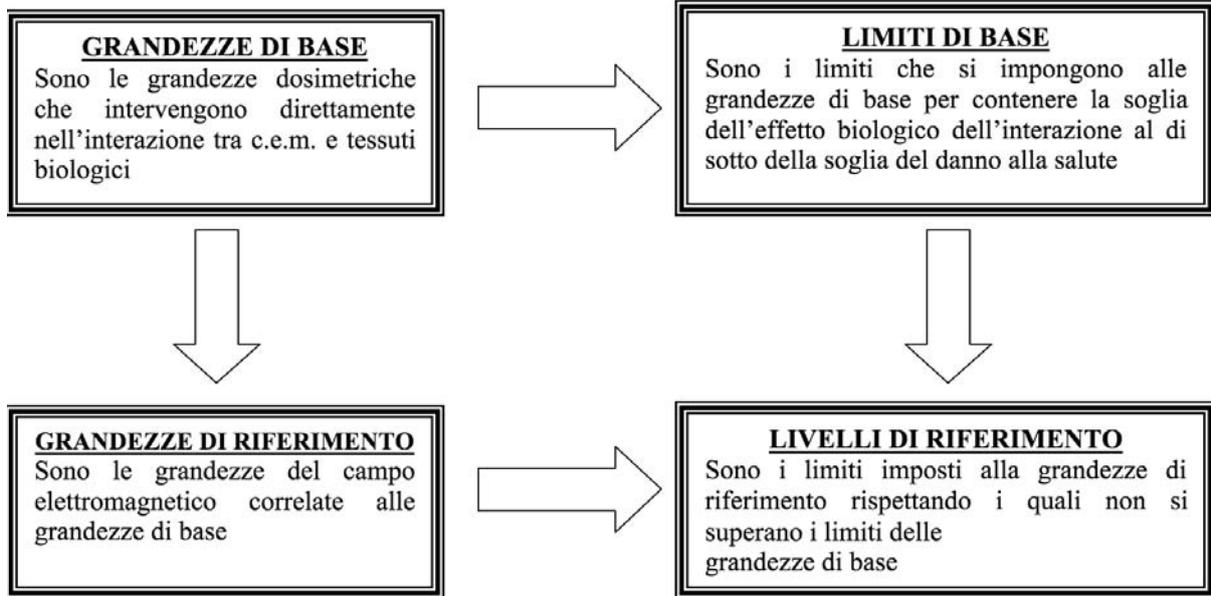
Questo è il criterio, cioè il *razionale* adottato dell'ICNIRP ma anche da altre organizzazioni scientifiche per l'individuazione dei *limiti di esposizione* ai campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici che si può sintetizzare con lo schema seguente.

Le grandezze di base, sono rappresentative dei fenomeni di accoppiamento dei tessuti biologici con il campo elettrico, il campo magnetico ed il campo elettromagnetico.

Esse però non sono direttamente misurabili e quindi per la verifica delle stesse, in termini di limiti di base, si introducono le grandezze di riferimento connesse funzionalmente alle grandezze di base.

Le grandezze di base, che dipendono strettamente dalla frequenza del campo come mostrata nella figura 4 sono:

- induzione magnetica B (Tesla);
- densità di corrente j (A/m^2);
- corrente di contatto i (A);



- tasso di assorbimento specifico di potenza SAR (W/kg);
- tasso di assorbimento specifico di energia SA (J/kg);
- densità di potenza S (W/m²).

I limiti di base sono i valori delle grandezza di base che separano gli effetti biologici da quelli di danno alla salute. I limiti di base, ai quali è applicato un fattore di sicurezza tipicamente pari 50, non devono essere mai superati:

Le grandezze di riferimento sono i parametri del campo elettromagnetico che si possono agevolmente misurare.

Le grandezze di riferimento sono quelle

che caratterizzano l'esposizione del recettore vale a dire:

- induzione magnetico B (Tesla);
- intensità del campo elettrico V/m;
- intensità del campo magnetico A/m;
- densità di potenza S (W/m²).

Si può osservare che alcune grandezze di base coincidono con le grandezze di riferimento.

I livelli di riferimento sono i valori delle grandezze di riferimento correlati con i limiti di base.

I limiti di base sono considerati rispettati quando non sono superati i relativi livelli di riferimento.

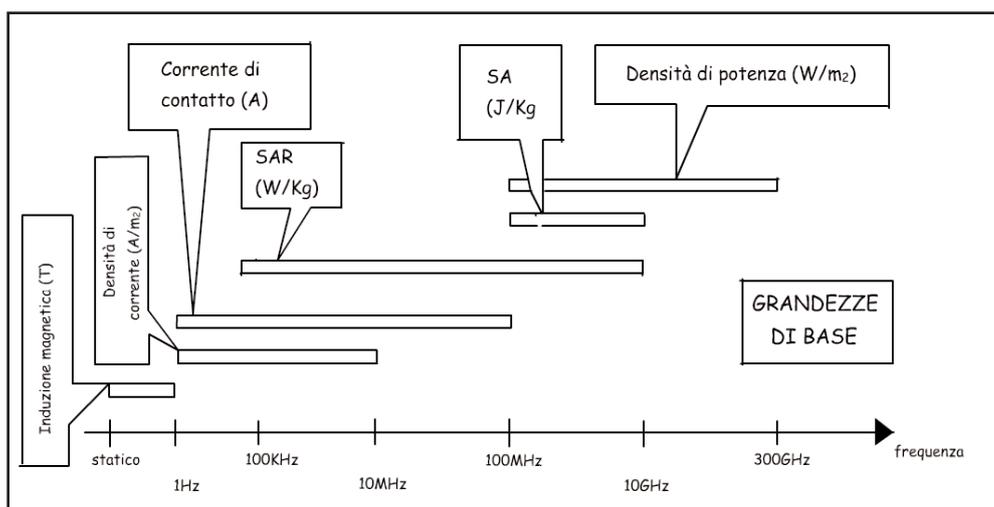


Figura 4. Rappresentazione delle grandezze di base in funzione della frequenza secondo il razionale dell'I.C.N.I.R.P.

Figure 4. Representation of the frequency dependent quantities used to specify basic restriction as in the I.C.N.I.R.P. rationale.

Il superamento dei livelli di riferimento non comporta necessariamente il superamento di limiti di base.

Raccomandazione del Consiglio d'Europa per la popolazione

Il Consiglio d'Europa ha emanato la Raccomandazione del 12 luglio 1999 relativa alla "limitazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300

GHz". La raccomandazione fissa i limiti di base ed i livelli di riferimento per la protezione delle popolazioni dagli effetti scientificamente accertati della esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici.

La Raccomandazione che ha recepito le linee guida dell'ICNIRP del 28/4/1998:

- specifica che i limiti di esposizione adottati "tengono conto delle incertezze connesse con la sensibilità delle condizioni ambientali e

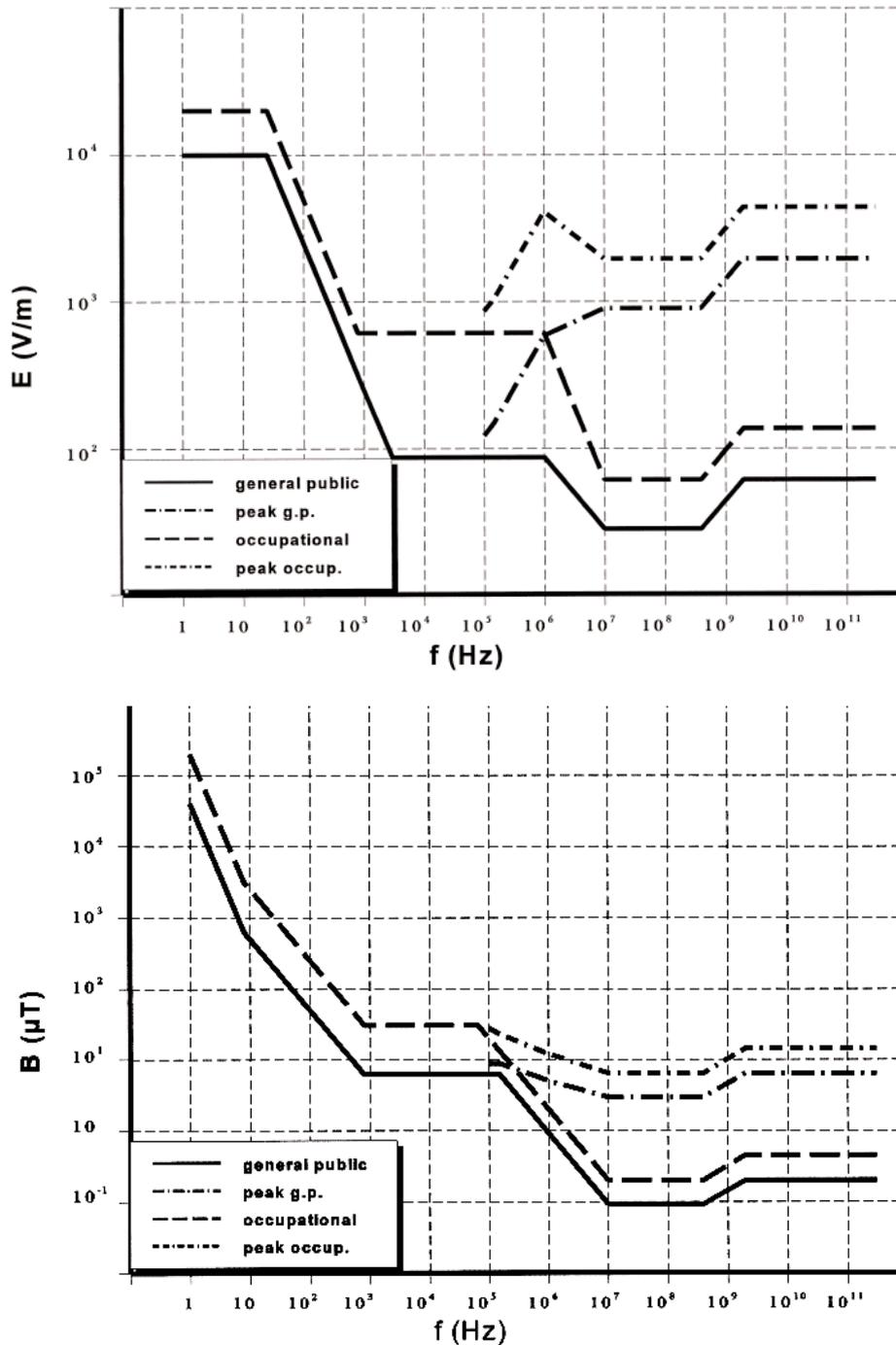


Figura 5. Limiti per il campo elettrico e magnetico.
Figure 5. Electric and magnetic field limits.

delle differenti età e condizioni di salute fra i membri della popolazione”;

- indica limiti di esposizione superiori a quelli previsti dal D.P.C.M. del luglio 2003 per i campi e.m. tra 100 kHz e 300 GHz; e dal D.P.C.M. 8 luglio 2003 per gli elettrodotti;
- lascia facoltà agli stati membri di adottare limiti inferiori.

I limiti per il campo elettrico E e per l'induzione magnetica B previsti dalla Raccomandazione sono riportati nei grafici che seguono (fig.5).

La Direttiva 2004/40/CE del Parlamento europeo del 29 aprile 2004 per i lavoratori

Per disciplinare l'esposizione ai campi elettromagnetici delle categorie lavorative, il Parlamento europeo ha emanato un'apposita Direttiva, che deve essere recepita dagli ordinamenti legislativi degli Stati membri entro il 30 aprile del 2008, che fissa le prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli ampi elettromagnetici.

La norma, che ha assunto il razionale dell'ICNIRP, si riferisce alla protezione dagli effetti scientificamente accertati.

A tale fine la norma fornisce le seguenti definizioni di “limiti di esposizione” e di “valori di azione”:

- *valori limite di esposizione: limitazioni all'esposizione a campi elettromagnetici che sono direttamente basate su effetti sanitari accertati e su considerazioni biologiche. il rispetto di questi limiti assicura che i lavoratori esposti siano protetti da tutti gli effetti nocivi noti.*
- *valori di azione: il valore dei parametri direttamente misurabili a cui si deve fare riferimento nei casi di superamenti per intraprendere una o più delle misure specificate nella direttiva.*

Con riferimento alle definizioni della Raccomandazione U.E. per la protezione della popolazione, si osserva che la prima definizione è l'omologa della definizione dei limiti di base, mentre la seconda corrisponde alla definizione dei limiti di esposizione della citata Raccomandazione.

Nella tabella che segue sono indicati i limiti di esposizione in funzione della frequenza.

1.3 Confronto

Dal confronto della Raccomandazione europea con il quadro legislativo nazionale, emerge che:

- per la frequenza di 50 Hz, cioè per gli elettrodotti, i limiti previsti dalla Raccomandazione coincidono con i limiti di esposizione indicati dal D.P.C.M. 8/7/03

Valori di azione (articolo 3, paragrafo 2) [valori efficaci (rms)imperturbati]

Intervallo di frequenza	Intensità di campo elettrico E (V/m)	Intensità di campo magnetico H (A/m)	Induzione magnetica B (µT)	Densità di potenza di onda piana equivalente S_{eq} (W/m ²)	Corrente di contatto, IC (mA)	Corrente indotta attraverso gli arti I_L (mA)
0 - 1Hz	-	$1,63 \times 10^5$	2×10^5	-	1,0	-
1 - 8 Hz	20 000	$1,63 \times 10^5 / f^2$	$2 \times 10^5 / f^2$	-	1,0	-
8 - 25 Hz	20 000	$2 \times 10^4 / f$	$2,5 \times 10^4 / f$	-	1,0	-
0,025 - 0,82kHz	$500 / f$	$20 / f$	$25 / f$	-	1,0	-
0,82 — 2,5 kHz	610	24,4	30,7	-	1,0	-
2,5 - 65 kHz	610	24,4	30,7	-	$0,4 f$	-
65 - 100 kHz	610	$1 600 / f$	$2 000 / f$	-	$0,4 f$	-
0,1 - 1 MHz	610	$1,6 / f$	$2 / f$	-	40	-
1 - 10 MHz	$610 / f$	$1,6 / f$	$2 / f$	-	40	-
10 — 110 MHz	61	0,16	0,2	10	40	100
110 - 400 MHz	61	0,16	0,2	10	-	-
400 — 2 000 MHz	$3 f^4$	$0,008 f^4$	$0,01 f^4$	$f / 40$	-	-
2 - 300 GHz	137	0,36	0,45	50	-	-

Note:

1. f è la frequenza espressa nelle unità indicate nella colonna relativa all'intervallo di frequenza.

(100 microtesla per il campo magnetico e 5 kV/m per il campo elettrico). Tuttavia, mentre il citato decreto prescrive per l'induzione magnetica anche i valori di attenzione (10 microtesla) a tutele dei possibili effetti a lungo termine, e gli obiettivi di qualità (3 microtesla) per la progressiva minimizzazione dell'esposizione, la Raccomandazione non pone tali restrizioni.

- per le radiofrequenze e le microonde, i limiti di esposizione previsti dalla Raccomandazione risultano tutti maggiori di quelli indicati dal D.P.C.M. 8/7/03 .

Per quanto riguarda la protezione dei lavoratori dalla esposizione ai C.E.M., manca ancora la specifica norma nazionale che disciplini il settore.

Nella tabella che segue è riportata una esemplificazione del confronto tra le norme nazionali attualmente in vigore e le norme comunitarie di cui sopra.

$$C = \sum_i \frac{E_i^2}{L_i^2} > 1$$

con E_i i valori misurati di campo elettrico di ciascuna delle n sorgenti, ed L_i i relativi limiti in funzione della frequenza.

Ben più articolata si presenta la normativa comunitaria poiché anziché porre condizioni sui soli valori delle grandezze di riferimento, fissa condizioni sui valori normalizzati delle grandezze di base in funzione delle frequenza e quindi sui valori delle grandezze di riferimento.

Per esposizioni simultanee a campi di frequenza diversa, il rationale della normativa europea prevede infatti che si debba considerare si deve considerare che gli effetti biologici dei campi si sommino in ragione della loro frequenza e quindi per la valutazione di tale additività i calcoli debbano essere eseguiti separatamente per ciascun effetto, sulle grandezze di base.

FREQUENZA	SERVIZIO	limiti nazionali PER POPOLAZIONE	limiti EUROPEI PER POPOLAZIONE	limiti EUROPEI PER LAVORATORI
50 Hz	TRASPORTO ENERGIA ELETTRICA	<ul style="list-style-type: none"> • Valore di attenzione 10 μT (induzione magnetica) • Obiettivo di qualità 3 μT (induzione magnetica) 	100 μ T induzione magnetica	500 μ T induzione magnetica
1 MHz 10 MHz 30 MHz	BANDA HF	Valore di attenzione 6 V/m	87 V/m 27,5 V/m 28V/m	610 V/m 61 V/m 61 V/m
470 MHz	TV UHF	Valore di attenzione 6 V/m	27 V/m	65 V/m
900 MHz	GSM	Valore di attenzione 6 V/m	41 V/m	90 V/m
1800 MHz	GSM	Valore di attenzione 6 V/m	61 V/m	127 V/m
2 GHz	UMTS	Valore di attenzione 6 V/m	61 V/m	127 V/m

Un ulteriore aspetto sul quale la normativa nazionale si discosta da quella comunitaria riguarda le condizioni per le quali si rende necessaria la riduzione a conformità nei casi di esposizione multi sorgenti.

Come già esposto, la normativa nazionale prevede tale situazione solo per le emissioni da 100 kHz a 300 GHz, e quando si verifichi la condizione

In particolare gli effetti termici e di stimolazione elettrica sul corpo devono essere valutati separatamente.

Per gli effetti di stimolazione elettrica dei tessuti, significativi da 1 Hz a 10 MHz, le densità di corrente indotta devono essere sommate in base alla seguente formula:

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{J_i}{J_{L,i}} \leq 1$$

dove:

- J_i è la densità di corrente alla frequenza i ;
- $J_{L,i}$ è il limite di base della densità di corrente alla frequenza i .

Per gli effetti termici, significativi a partire da 100 kHz, il tasso di assorbimento specifico di energia (SAR) e la densità di potenza (S) devono essere sommati in base alla seguente formula:

$$\sum_{i=100\text{kHz}}^{10\text{GHz}} \frac{SAR_i}{SAR_L} + \sum_{i>10\text{GHz}} \frac{S_i}{S_L} \leq 1$$

dove:

- SAR_i è il tasso di assorbimento specifico di energia dovuto alla esposizione alla frequenza i ;
- SAR_L è il limite di base per il tasso di assorbimento specifico di energia;
- S_i è la densità di potenza alla frequenza i ;
- S_L è il limite di base per la densità di potenza.

Ai fini applicativi per la verifica dei limiti di base, i criteri da applicare ai livelli di riferimento dell'intensità dei campi devono essere i seguenti.

Per la densità di corrente indotta e gli effetti di stimolazione elettrica, significativi fino a 10 MHz, i livelli dei campi devono soddisfare le due seguenti condizioni:

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{1\text{MHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} + \sum_{i>1\text{MHz}} \frac{E_i}{a} \leq 1$$

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{150\text{kHz}} \frac{H_j}{H_{L,j}} +$$

$$\sum_{j>150\text{kHz}}^{10\text{MHz}} \frac{H_j}{b} \leq 1$$

con:

- E_i è l'intensità del campo elettrico alla frequenza i ;
- $E_{L,i}$ è il livello di riferimento dell'intensità del campo elettrico;
- H_j è l'intensità del campo magnetico alla frequenza j ;
- $H_{L,j}$ è il livello di riferimento dell'intensità del campo magnetico;
- a è pari a 87 V/m;
- b è pari a 5 A/m (6.25 μ T).

L'impiego di costanti (a, b) al di sopra di 1 MHz per il campo elettrico e al di sopra di 150 kHz per il campo magnetico è dovuto al fatto

che la sommatoria si basa sulla densità di corrente indotta e ogni mescolanza deve essere evitata con l'eventuale effetto termico.

Per gli effetti termici, a partire da 100 kHz, i livelli di campo devono soddisfare le due seguenti condizioni:

$$\sum_{i=100\text{kHz}}^{1\text{MHz}} \frac{E_i^2}{c^2} + \sum_{i>1\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \frac{E_i^2}{E_{L,i}^2} \leq 1$$

$$\sum_{j=100\text{kHz}}^{1\text{MHz}} \frac{H_j^2}{d_{L,j}^2} +$$

$$\sum_{j>1\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \frac{H_j^2}{H_{L,j}^2} \leq 1$$

- E_i è l'intensità del campo elettrico alla frequenza i ;
- $E_{L,i}$ è il livello di riferimento del campo elettrico;
- H_j è l'intensità del campo magnetico alla frequenza j ;
- $H_{L,j}$ è il livello di riferimento del campo magnetico;
- c è pari a 87/f^{1/2} V/m;
- d è pari a 0.73/f A/m.

Per la corrente in un arto e per la corrente di contatto si devono applicare rispettivamente le seguenti norme:

$$\sum_{K=10\text{MHz}}^{110\text{MHz}} \frac{I_k^2}{I_{L,k}^2} \leq 1$$

$$\sum_{n>1\text{Hz}}^{110\text{MHz}} \frac{I_n^2}{I_{c,n}^2} \leq 1$$

con:

- I_k è la componente della corrente sull'arto alla frequenza k ;
- $I_{L,k}$ è il livello di riferimento per la corrente sull'arto, 45 mA;
- I_n è la componente della corrente di contatto alla frequenza n ;
- $I_{c,n}$ è il livello di riferimento per la corrente di contatto alla frequenza n .

APPENDICE 3

Implicazioni interdisciplinari: *I meccanismi d'interazione del campo elettromagnetico con i tessuti biologici*

Introduzione

I campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici (CEM) interagiscono con le cariche della materia e pertanto anche con i tessuti biologici. I tessuti biologici da un punto di vista fisico, si comportano a seconda della frequenza dei campi e del tipo di tessuto, come conduttori più o meno cattivi, oppure come dielettrici con perdite. La dipendenza dalla frequenza e il loro comportamento, dato che in genere non hanno proprietà magnetiche, è descritto da due grandezze fondamentali: la conducibilità elettrica σ e la costante dielettrica assoluta ϵ . Esse si assumono come grandezze scalari dipendenti dalla frequenza. La conoscenza di queste grandezze, ottenuta per mezzo di modelli teorici, o attraverso sperimentazione diretta, consente di affrontare anche per i tessuti biologici i problemi riguardanti l'interazione e la propagazione dei campi in questo particolare mezzo. Nei meccanismi d'interazione sono rilevanti i fenomeni di cessione dell'energia del campo elettromagnetico al tessuto, di spostamento delle cariche elettriche (o polarizzazione), con conseguente alterazione dei campi interni e dei potenziali. Riguardo ai meccanismi di cessione d'energia, l'energia del campo è ceduta alle cariche elettriche (elettroni, ioni, molecole dipolari e multipolari) che sono poste in movimento (traslate o ruotate). Durante il moto le cariche collidono con le altre molecole del tessuto trasferendo così la loro energia meccanica in calore. Inoltre le cariche elettriche, a seconda della loro massa, reagiscono più o meno rapidamente alle variazioni del campo e questo dà luogo a una serie di interessanti fenomeni dipendenti dalla frequenza. A frequenze basse, e per campi elettrici e magnetici quasi statici, sono rilevanti i fenomeni di polarizzazione all'interno dei tessuti biologici e le correnti indotte che si generano. A questo proposito per queste frequenze si può assumere che il campo elettrico e magnetico agiscano indipendentemente. Nei casi in cui ci si trovi in presenza di campi magnetici variabili sono anche importanti le dimensioni del corpo che interagisce con i CEM rispetto alla lunghezza d'onda λ e le orientazioni relative.

Caratterizzazione elettrica dei tessuti biologici nell'interazione con i CEM

I tessuti biologici costituiti da fluidi extracellulari contenenti strutture cellulari e intracellulari (fig. 1) che si presentano a varie scale dimensionali da 10^{-9} m (per esempio gli ioni e piccole molecole dipolari) fino a 10^{-5} (piccoli gruppi di cellule) e aggregati cellulari aventi dimensioni maggiori di vari ordini grandezza sono caratterizzati da numerose superfici di separazione (membrane cellulari, membrane intracellulari, ecc.) che impediscono in vario grado gli spostamenti liberi o indotti dei costituenti e delle cariche. Le membrane cellulari sono anche considerate le principali strutture dove si esplicano le interazioni tra i campi CEM e i sistemi biologici. Le cellule sono strutture complesse e fortemente disomogenee che racchiudono varie sottostrutture quali nuclei e organelli separati anch'essi da membrane interne, macromolecole proteiche, DNA ecc.. A loro volta le membrane sono costituite principalmente da fosfolipidi combinati con proteine, come in figura 2 dove sono riportati anche degli ioni positivi in prossimità delle teste polari idrofile. I fosfolipidi sono composti che mostrano una preponderanza di gruppi non polari a catena aperta con due lunghe code e un gruppo di testa polare disposti a doppio strato. È evidente che nella interazione con i CEM un tale "miscuglio" è dif-

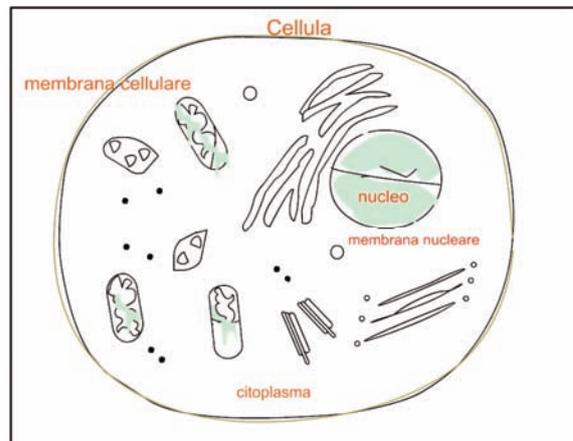


Figura 1. Rappresentazione schematica di una cellula con alcune strutture interne.

Figure 1. Schematic representation of a cell with some internal structures.

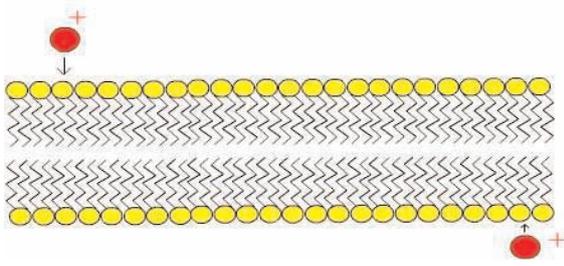


Figura 2. Rappresentazione schematica della membrana plasmatica.

Figure 2. Schematic representation of a cell membrane.

ficile da trattare come somma di singoli costituenti da un punto di vista quantitativo.

L'approccio macroscopico consiste allora nel considerare i tessuti come miscugli di differenti costituenti assimilabili a mezzi viscosi e densi a contenuto variabile di acqua, dotati di capacità di termoregolazione (se viventi), nei quali sono in sospensione ioni, molecole e aggregati con distribuzione di carica elettrica.

Questo miscuglio costituito da differenti ioni, molecole e aggregati molecolari interagisce con il campo elettrico indotto dai campi esterni con due diverse classi di risposta alla sollecitazione: con correnti elettriche di conduzione, tanto più intense quanto maggiore è la conducibilità σ dei tessuti e con effetti di polarizzazione che dipendono in modo non semplice dalla costante dielettrica locale ϵ .

Da un punto di vista elettromagnetico, relativamente alla frequenza considerata, possiamo pensare ai tessuti biologici come dielettrici capaci di immagazzinare e dissipare energia dei campi elettromagnetici. Pertanto possiamo trattare questo particolare mezzo come un dielettrico dispersivo e dissipativo. Per esempio un buon conduttore riflette quasi completamente le onde elettromagnetiche e dissipa energia a causa delle correnti indotte che in esso si producono. Al contrario, un dielettrico è quasi completamente trasparente alle onde elettromagnetiche ma può immagazzinare una parte di energia. I tessuti biologici, in una certa misura, possono fare le due cose. Nella teoria elettromagnetica l'unica grandezza fisica che può tener conto di questi meccanismi è la permittività dielettrica relativa in forma complessa: $\epsilon_{rel} = \epsilon_r - j\epsilon_i$. Infatti il primo termine reale ϵ_r tiene conto dell'accumulo temporaneo dell'energia nel mezzo, il secondo termine ϵ_i , immaginario, chiamato fattore di perdita, è funzione della conducibilità σ . Il termine immaginario è responsabile della dissipazione dell'energia elettromagnetica mentre

il rapporto tra i due, che indica se siamo più o meno in presenza di conduttore o di dielettrico, viene indicato in letteratura come tangente di perdita. Pertanto, la determinazione di ϵ_r e σ , alle frequenze di interesse, consente di sapere tutto, o quasi, riguardo alla interazione dell'onda con il tessuto biologico. I valori di ϵ_r e σ sono riportati in un intervallo di frequenza da 0 a 1THz (10^{12} Hz) nella figura 3. È interessante notare che per frequenze basse il tessuto biologico esibisce valori di ϵ_r dell'ordine di 10^6 - 10^7 . Questo vuol dire che un campo elettrico esterno che penetra il tessuto si riduce dello stesso fattore. Per esempio un campo esterno di un 10 kV/m all'interno del tessuto si abbassa fino a \approx 10 mV/m. Questa peculiarità conferita a tutti gli organismi viventi dalle membrane cellulari rappresenta una specie di difesa naturale. È proprio in virtù di questa proprietà che, per esempio, gli uccelli si possono posare su una linea ad alta tensione senza riportare danni. Le membrane cellulari e gli altri organelli sub cellulari, quali i mitocondri, nuclei, ecc., fanno sì che ϵ_r dei tessuti sia molto più grande dei singoli costituenti cellulari presi separatamente. Ad esempio il valore di ϵ_r dell'acqua, che costituisce in larga parte i tessuti, è circa 80. Pertanto, la stessa intensità di campo, all'interno di un mezzo come l'acqua, produrrebbe un campo interno con valori almeno 10000 volte maggiori rispetto ai campi interni che si stabiliscono nei tessuti. Le proprietà amagnetiche insieme alla isotropia dei tessuti biologici, come si è visto, semplificano un po' il problema. Le proprietà elettriche dei tessuti si possono riassumere con le grandezze $\sigma(\omega)$, $\epsilon(\omega)$ riportate in figura 3. La permittività dielettrica ϵ_r dei tessuti decresce con la frequenza secondo l'andamento in figura e, a basse frequenze, presenta dei valori notevolmente più alti, soprattutto se paragonata ai valori dei solidi o liquidi omogenei costituenti gli stessi tessuti. Per esempio, un organismo composto di oltre l'80% d'acqua e di altri composti che considerati come materiali omogenei hanno dei valori relativamente bassi di permittività dielettrica (ad esempio per l'acqua si ha $\epsilon_r \approx 80$), come aggregati cellulari essi esibiscono valori di $\epsilon_r > 10^6$ alle basse frequenze. In figura 3 si può notare (tratto continuo della curva) che ϵ_r decresce con la frequenza. Sono varie le cause che intervengono per stabilire questa tendenza generale di dispersione del tessuto. Per campi quasi statici il valore di ϵ_r è massimo. Infatti, le cariche ioniche intorno alle membrane determinano i valori della permittività dielettrica del mezzo alle basse frequenze. Tale regione di dispersione è indicata con α e la permittività dielettrica si

abbatte di due ordini di grandezza, al crescere della frequenza, in relazione alla mobilità degli ioni intorno alle membrane. Per frequenze ancora più elevate le macromolecole e le cariche delle membrane plasmatiche inclusa la capacità elettrica intrinseca della stessa, subentrano nei processi di interazione dei campi e.m. con i tessuti. Perciò a partire dalle frequenze intorno al kHz, si instaura un altro meccanismo e la costante dielettrica si abbatta ancora di un paio d'ordini di grandezza (regione di dispersione β). È la capacità di membrana che gioca un ruolo piuttosto importante intorno a queste frequenze in queste due regioni di dispersione.

Il meccanismo è qui di seguito brevemente descritto. I campi elettrici a bassa frequenza

banda investigata e comunque gli altri cambiamenti della permittività dielettrica si hanno quando i livelli, prima rotazionali e poi vibrazionali delle varie macromolecole polari e dell'acqua cominciano ad essere via via interessati, per frequenze maggiori di 20 GHz (regione di dispersione γ).

Per quanto riguarda la conduttività σ la sua dipendenza dalla frequenza è descritta dalla curva in figura 4. Vi è una cosiddetta conducibilità ϵ_{dc} (conducibilità in corrente continua) dovuta agli ioni presenti nel citoplasma e nei fluidi extracellulari. Un secondo tipo di conduttività è di tipo dispersivo poiché dipendente dalla frequenza. Tale conduttività aumenta con la frequenza. Schematizzando come in un cir-

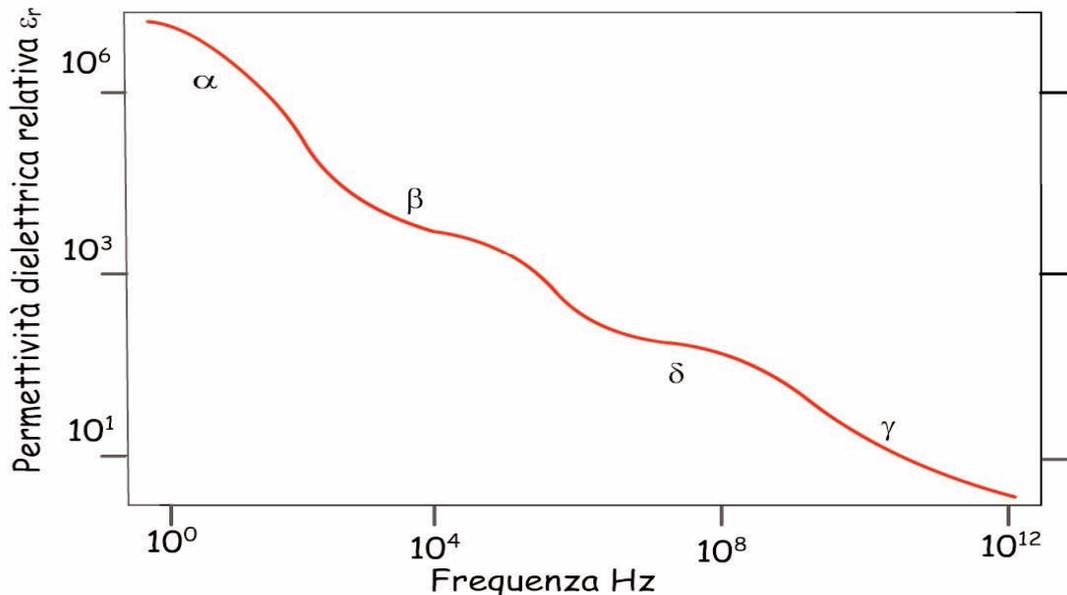


Figura 3. Escursione dei valori ϵ_r nel campo di frequenza da 1 Hz a 1 THz.

Figure 3. Excursion of the values of ϵ_r in the frequency range from 1 Hz to 1 THz.

caricano i mini condensatori della membrana e fanno accumulare le cariche all'interfaccia di separazione di cellule e tessuti (spazio intra-extra cellulare). Al crescere della frequenza comunque il tempo di accumulo di queste cariche in prossimità delle membrane diminuisce (prima che si siano accumulate i campi elettrici si invertono, cambiando verso alle velocità delle cariche) pertanto la permittività dielettrica decresce e questa tendenza permane nel campo di frequenza 10 kHz–100 MHz. Nel campo di frequenza 100–1000 MHz, (regione di dispersione δ) sono i moti di orientazione delle molecole polari dell'acqua legate alle proteine o ad altre strutture cellulari a influenzare il valore di ϵ_r . Questa tendenza si mantiene fino al limite della

cuito elettrico, i mini condensatori plasmatici a bassa frequenza non si lasciano attraversare dai campi elettrici (impedenza data da $1/\omega C$), essi operano come un filtro di reiezione a bassa frequenza. Pertanto, solo correnti di conduzione relativamente basse possono fluire.

Per frequenze via via crescenti (>1 kHz) i “condensatori plasmatici” cominciano a risultare cortocircuitati lasciando scorrere correnti RF relativamente intense poiché i fluidi intra-extra cellulari partecipano alla conduzione senza essere impediti dalle membrane plasmatiche. Un semplice schema circuitale, con resistenze e capacità intra-extra cellulare, che tiene conto delle caratteristiche elettriche del tessuto biologico. In tale schema semplificato si possono già

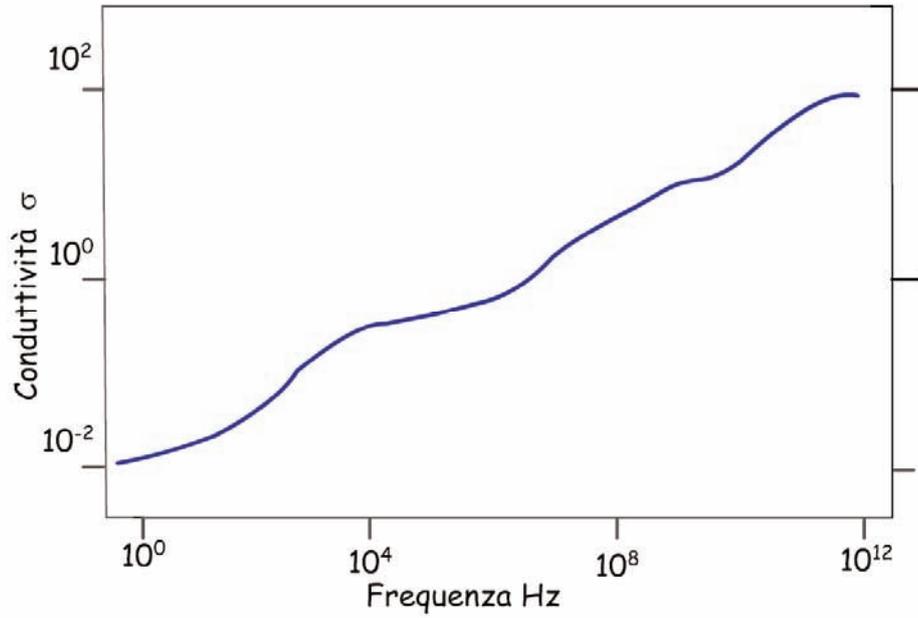


Figura 4. Escursione dei valori σ nel campo di frequenza da 1 Hz a 1 THz.
Figure 4. Excursion of the values of σ in the frequency range from 1 Hz to 1 THz.

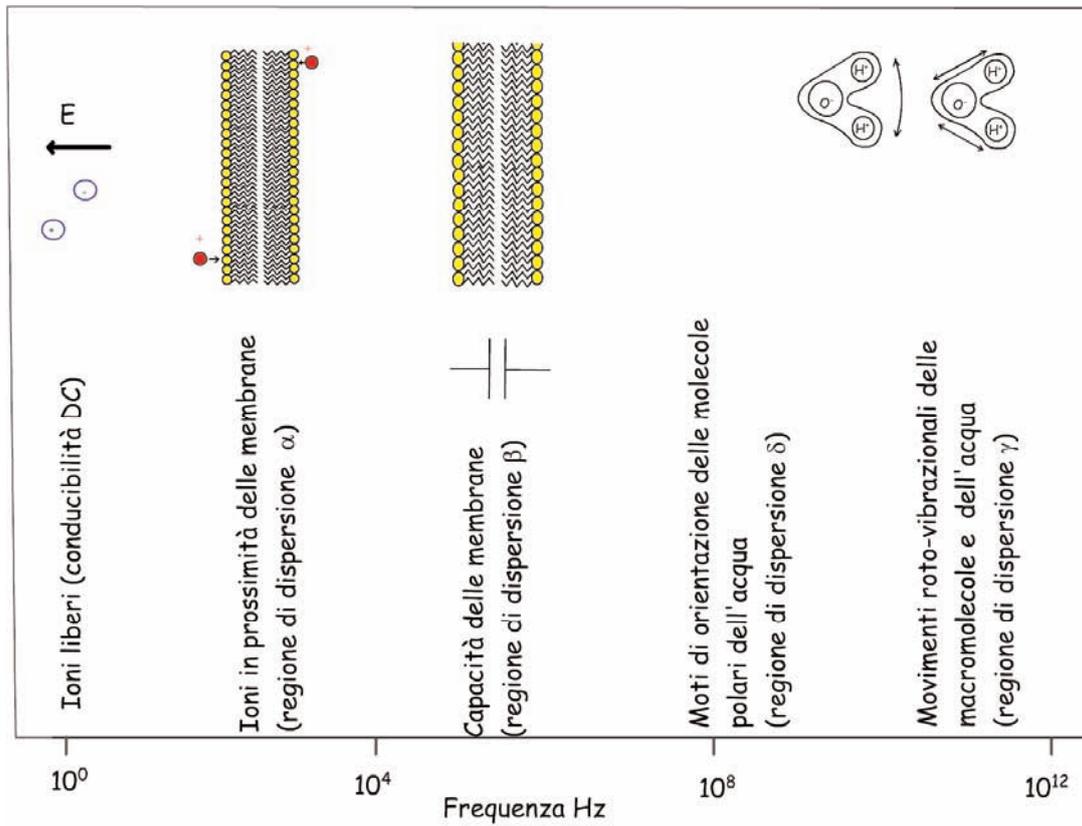


Figura 5. Meccanismi di dispersione e caratteristiche dei tessuti biologici.
Figure 5. Dispersive mechanism and characteristics of biological tissue.

dedurre le conducibilità σ_{dc} e σ_{RF} e altre caratteristiche dielettriche dovute soprattutto alla presenza della membrana plasmatica

A frequenze sempre più elevate è il comportamento della molecola polare dell'acqua a stabilire le condizioni di conduttività. Il comportamento in generale è dominato dal fatto che campi elettrici oscillanti a frequenze sempre più elevate, a causa dell'inerzia delle cariche, perdono di efficacia nel conferire alle stesse cariche, sia la mobilità traslazionale, sia la mobilità rotazionale. La conduttività σ influenza anche la penetrazione dei campi nei tessuti. Partendo dalle frequenze più basse e andando alle frequenze più elevate la profondità di penetrazione δ diminuisce. Pertanto, come abbiamo visto, è soltanto il valore della conduttività elettrica σ in funzione della frequenza che influenza questa grandezza.

Come abbiamo visto, al variare della frequenza variano sia ϵ_r che σ e questo porta a distinguere le varie grandezze di base (grandezze dosimetriche) dei vari campi di frequenza impiegati. Si distinguono per questo i vari campi di frequenza. In maniera sintetica si assume, in genere, che alle basse frequenze, fino a 10 kHz, prevalgano alcuni meccanismi e che le grandezze significative siano la densità di corrente (A/m^2) e la corrente di contatto (A). Mentre alle alte frequenze i meccanismi predominanti sono quelli di tipo termico e le grandezze significative sono il SAR (W/kg), e la densità di potenza (W/m^2). Per questa ragione, nei fenomeni riguardanti l'interazione dei campi elettromagnetici con i tessuti biologici, i due ambiti di frequenza sono trattati separatamente.

I meccanismi d'interazione alle basse frequenze

L'interazione dei campi elettrici e magnetici alle basse frequenze si deve ai campi elettrici e magnetici che generano correnti nei tessuti. Questi, non avendo in generale proprietà magnetiche, sono pressoché trasparenti ai campi magnetici. I campi elettrici e magnetici agiscono indipendentemente se le frequenze sono relativamente basse. Inoltre si è quasi sempre in condizioni di capo cosiddetto "vicino". Tali condizioni si realizzano quando la distanza della sorgente dei campi è inferiore a qualche lunghezza d'onda. Il campo magnetico terrestre, di circa 40 micro Tesla, un campo di tutto rispetto, non interagisce significativamente con i tessuti. Per un breve periodo di tempo gli organismi viventi possono sopportare, per quel che se ne

sa, fino a diversi Tesla, se il campo di induzione magnetica è statico. Infatti nella risonanza magnetica nucleare (NMR) si arriva fino a qualche Tesla, senza che il paziente sotto esame se ne avveda. Per i campi magnetici variabili il discorso cambia completamente. Tali campi, non interagiscono direttamente con i tessuti che, ovviamente, sono trasparenti anche ai campi magnetici variabili nel tempo. I campi magnetici variabili, però, generano nello spazio, e quindi anche nei tessuti, campi elettrici variabili alla stessa frequenza. Sono poi questi campi elettrici a interagire con le cariche come è stato mostrato. Un paziente sotto esame NMR non sarebbe altrettanto in sicurezza se mancasse l'alimentazione della bobina che produce tale campo. La variazione nel tempo del campo magnetico genererebbe un campo elettrico molto intenso. I campi elettrici esterni all'interno dei tessuti sono ridotti di un fattore ϵ_r . Riassumendo, l'interazione dei campi elettrici e magnetici alle basse frequenze, in particolare alla frequenza di 50 Hz, è caratterizzata dai seguenti aspetti fondamentali:

- l'induzione magnetica B interna ai tessuti viene assunta uguale a quella esterna B_o poiché m non varia rispetto al suo valore nel vuoto ($\mu = \mu_o = 4\pi 10^{-7} H/m$);
- il campo magnetico esterno di induzione B_o , alla frequenza f , genera per induzione e.m. un campo elettrico interno ai tessuti, alla stessa frequenza f , di intensità proporzionale ad f ;
- il campo elettrico esterno E_o , alla frequenza f , genera un campo elettrico interno ai tessuti alla stessa frequenza f ridotto di un fattore ϵ_r .

I due campi elettrici interni danno luogo a densità di corrente J esprimibili attraverso le seguenti espressioni:

- $J = K f E_o$ [A/m^2] (densità di corrente prodotta dal campo elettrico E_o)
- $J = \sigma \pi r f B_o$ [A/m^2] (densità di corrente prodotta dall'induzione esterna B_o)

essendo K un fattore di forma espresso in [S/Hz] m e r il raggio della "spira" con la quale si catena il flusso di induzione B_o .

A titolo di esempio assumendo una conducibilità media per tutti i tessuti pari a 0,1 S/m, gli ordini di grandezza dei campi elettrici interni E_i e delle corrispondenti densità di corrente J_i indotti nella testa e nel tronco di un uomo, dai campi esterni imperturbati $E_o = 1$ kV/m e $B_o = 1$ μ T, alla frequenza di 50 Hz sono riportati in tabella.

Campi elettrici interni e densità di correnti indotte generati dai corrispondenti campi esterni sulla testa e sul tronco di un uomo. Per confronto, le densità di correnti fisiologiche sono dell'ordine dei mA/m². In figura 6 sono schema-

Campo esterno imperturbato	Volume piccolo assimilabile alla testa di un uomo		Volume medio assimilabile al tronco di un uomo	
	E_i ($\mu\text{V}/\text{m}$)	J_i ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	E_i ($\mu\text{V}/\text{m}$)	J_i ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)
$E_0 = 1 \text{ kV}/\text{m}$	500	50	1500	150
$B_0 = 1 \mu\text{T}$	15	1.5	50	5

ticamente riportate le correnti indotte che si stabiliscono all'interno del tessuto quando è sottoposto all'azione di un campo elettrico (a) e magnetico (b). A bassa frequenza prevalgono fenomeni di generazione di correnti indotte da parte dei campi elettrici e magnetici nei tessuti.

In questa breve descrizione, abbiamo poco accennato a tutta una serie di fenomeni di interazione che non mettono in gioco rilevanti densità di corrente e altri fenomeni cosiddetti "atermici". Tali fenomeni riguardano interazioni con campi elettromagnetici a bassa intensità che però producono effetti biologici quali cambiamenti di potenziali delle membrane cellulari, forzano alcuni flussi ionici, orien-

tano proteine e cellule, solo per citare alcuni effetti.

I meccanismi d'interazione alle alte frequenze

Un piatto di patate all'interno del forno a microonde ci aiuta a capire i principi dell'interazione dei campi elettromagnetici alle alte frequenze. Il piatto fatto di materiale dielettrico (non conduttore) non assorbe energia e, se non fosse per il contatto diretto con le patate, rimarrebbe freddo. In quanto al contenuto del piatto, le cose vanno un po' diversamente. I campi elet-

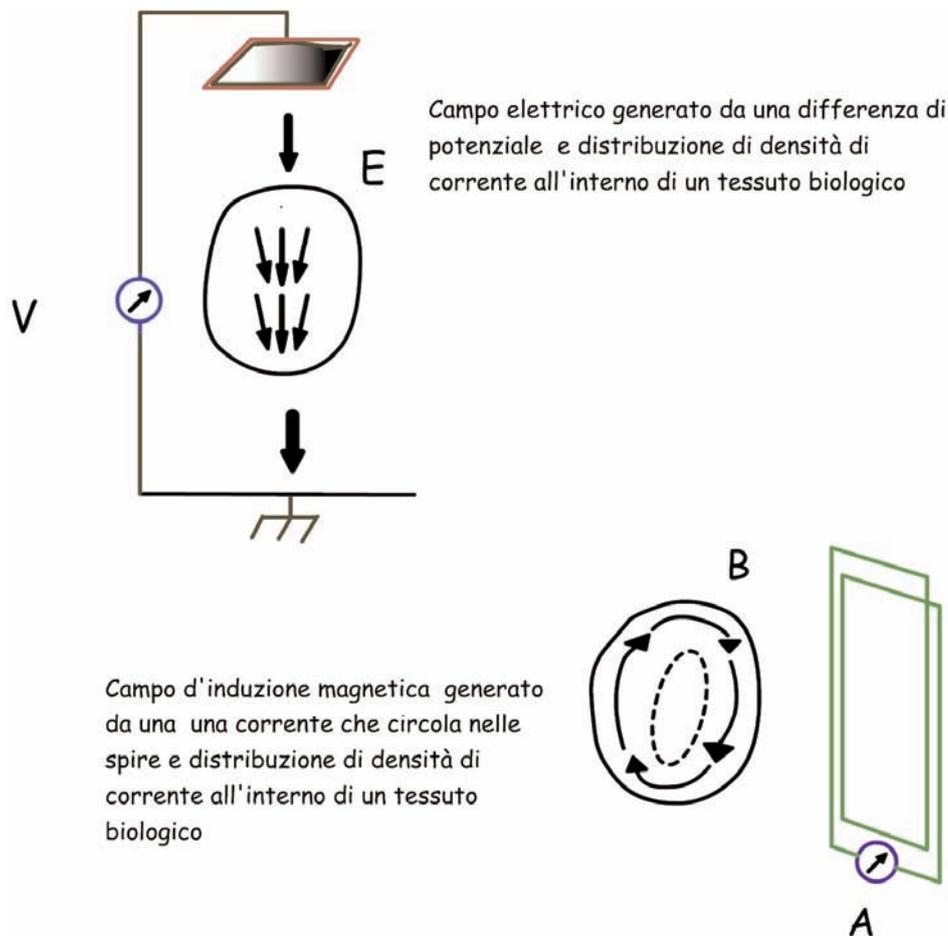


Figura 6. Esempio di meccanismo d'interazione a bassa frequenza.
Figure 6. Example of interaction at low frequency.

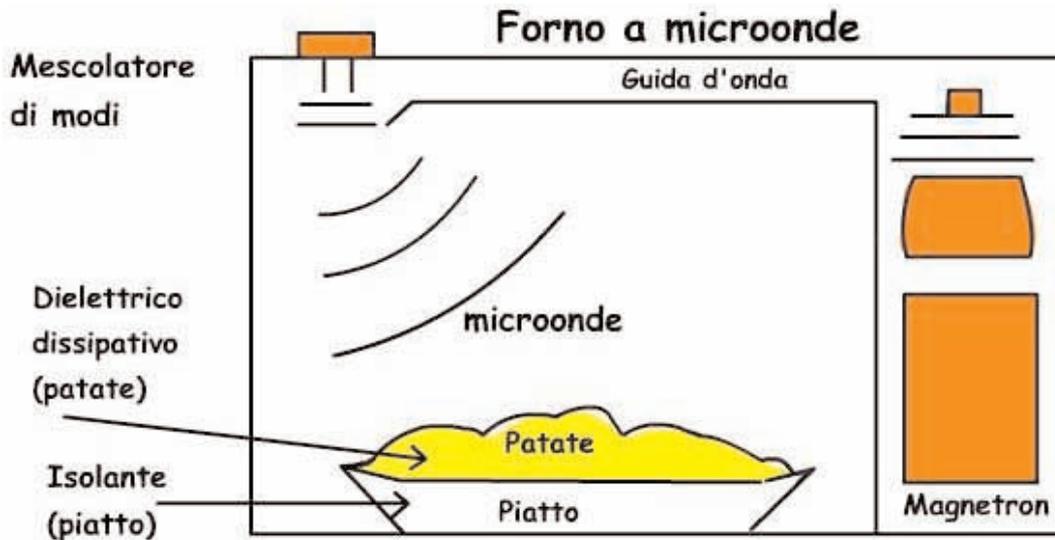


Figura 7. Esempio di meccanismo d'interazione ad alta frequenza.
Figure 7. Example of interaction at low frequency.

trici delle microonde interagiscono principalmente con le molecole polari d'acqua costringendole a seguire le sue vibrazioni (circa 1 miliardo di vibrazioni al secondo alla frequenza di funzionamento del magnetron). Nel seguire queste oscillazioni le molecole sono anche sottoposte a un attrito molecolare che in definitiva riscalda le patate. Le pareti del forno di ottimo materiale conduttore sono poco scaldate dalle microonde in quanto la profondità di penetrazione interessa solo gli strati molto superficiali del conduttore stesso. Se inavvedutamente mettessimo un pezzo di metallo all'interno del forno in breve tempo questo si scalderebbe a causa delle correnti a radio frequenza indotte nel materiale conduttore.

Questo spiega grossolanamente il comportamento dei dielettrici (piatto), dielettrico dissipativo (patate) e conduttore (metallo).

Quando un'onda elettromagnetica incide su un mezzo biologico, parte di essa viene riflessa e parte viene trasmessa attraverso il mezzo stesso in relazione agli indici di rifrazione, o per rimanere nell'ambito delle grandezze trattate, in relazione a ϵ_r .

La parte della radiazione che si trasmette subisce una attenuazione, e quest'ultima è funzione del fattore di perdita ϵ_i o della conducibilità σ che a sua volta dipende dalla frequenza. La profondità di penetrazione δ , cioè la profondità alla quale il campo si riduce circa al 37% del suo valore, è data da:

$$\delta = \sqrt{2 / \omega \sigma \mu}$$

dove ω è la pulsazione angolare dell'onda inci-

dente ($\omega=2\pi f$) e μ la permeabilità magnetica. Da quest'ultima si evince che all'aumentare della frequenza, cioè di ω le onde hanno sempre più difficoltà nel penetrare il mezzo.

Per la classe degli effetti di interesse sanitario è necessario esaminare i meccanismi di interazione dei campi elettromagnetici alle alte frequenze anche dal punto di vista energetico. I meccanismi di interazione riguardano l'attivazione di stati traslazionali, rotazionali e vibrazionali (dipendenti dalla frequenza) di dipoli permanenti o di cariche spaziali (polarizzazioni/oscillazioni) con il ritorno successivo allo stato fondamentale (rilassamento) attraverso scattering o cessione di energia ai vari gradi di libertà possibili. In tale contesto i meccanismi di polarizzazione possibili sono i seguenti:

- polarizzazione atomica (formazione di dipoli);
- polarizzazione molecolare (spostamento delle posizioni di equilibrio dei singoli atomi per azione del campo sulle cariche che realizzano il legame molecolare);
- polarizzazione per orientamento (dipoli permanenti);
- polarizzazione di carica spaziale (distorsione della distribuzione delle cariche elettriche "intrappolate" su interfacce che non possono scaricarsi).

Nell'intervallo indicato (100 kHz - 10 GHz) si instaurano meccanismi di cessione di energia da parte del campo elettromagnetico ai tessuti. La grandezza dosimetrica significativa che rappresenta tali meccanismi è il tasso di assorbimento specifico SAR definito dalla derivata

rispetto al tempo dell'energia dw dissipata in un elemento di massa dm di tessuto biologico contenuto in un elemento di volume dv di densità ρ .

$$\text{SAR} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dw}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dw}{\rho dv} \right) \text{ [W/kg]}$$

Il SAR può essere riferito a due situazioni espositive diverse:

- SAR specifico o locale che è il rateo di energia trasferita ad un elemento ρdv di tessuto;
- SAR medio che è la quantità totale di energia trasferita al corpo nell'unità di tempo divisa per la massa totale M del corpo.

$$\text{SAR medio} = \frac{w}{M}$$

Questo fenomeno di cessione energetica, in pratica, dipende anche da altri fattori che sono le condizioni di risonanza e la polarizzazione del campo elettromagnetico rispetto alle massime dimensioni del mezzo in esame. Ad esempio in figura 8 è riportato il SAR alle varie frequenze nel caso in cui il campo elettrico sia paralle-

lo alla massima dimensione lineare del corpo.

I valori massimi dell'assorbimento di energia si hanno nelle condizioni di risonanza. In tale contesto è importante anche la polarizzazione (direzione del campo elettrico rispetto alle geometrie in gioco). Condizione questa data da: $\lambda_t = d$. Essendo, λ_t la lunghezza d'onda all'interno del tessuto e d le dimensioni massime del corpo. Nelle condizioni di sub-risonanza, cioè quando $\lambda_t \gg d$, la cessione di energia attraverso questo meccanismo è minima. Nelle condizioni di sovrarisonanza $\lambda_t \ll d$, il trasferimento di energia elettromagnetica in calore perde efficacia rispetto ai valori in caso di risonanza. Per frequenze oltre i 20 – 30 GHz la grandezza di base più importante diventa la densità di potenza W/m^2 . Come abbiamo visto, per frequenze via via crescenti, la profondità di penetrazione si riduce al millimetro o meno. In tal caso gli effetti sono di natura locale e riguardano essenzialmente la superficie investita.



Figura 8. Fenomeni di risonanza nell'interazione dei campi con i tessuti biologici.

Figure 8. Resonance phenomena in the interaction between electromagnetic fields and biological tissue.

Bibliografia essenziale

- Bekefi G., Barrett A.H., (1981). *Vibrazioni elettromagnetiche onde e radiazioni*, Zanichelli, Bologna.
- Bianchi C, Lozito A., Meloni A., (2002). *Campi elettromagnetici: tecniche di monitoraggio ambientale e principi dell'interazione biologica*, Quaderni di Geofisica N.22.
- Bianchi C, Meloni A., (2007). *Terrestrial natural and man-made electromagnetic noise: an outlook*, Annals of Geophysics, in stampa.
- Bliokh, P. V., A. P. Nikolaenko, and Y. F. Filippov, (1980). *Schumann Resonances in the Earth-Ionosphere Cavity*, Peter Peregrinus, London.
- Blank, M. Findi, E., (1987). *Mechanicistic approaches to interaction of electromagnetic fields with living systems*, Plenum Press, N.Y.
- Budden K.G., (1985). *The propagation of radio wave*, Cambridge University Press, Cambridge, UK pp. 438-479.
- Carlo, G.L., (1998). *Wireless phones and health*, Kluwer Academic Publishers.
- Carlson A.B., (1986). *Communication systems*. McGraw- Hill.
- CCIR, (1964). *World distribution and characteristics of atmospheric radio noise*, Int. Radio Consultative Comm., Int. Telecommun. Union, Geneva, Switzerland, Rep 322.
- CCIR, (1988). *Characteristics and applications of atmospheric radio noise data*, Int. Radio Consultative Comm., Int. Telecommun. Union, Geneva, Switzerland, Rep. 322-3.
- CCIR, (1990). *Man-made radio noise* Int. Radio Consultative Comm., Int. Telecommun. Union, Geneva, Switzerland, Rep. 258-5.
- Commission of the European Communities, (2000). *Communication on the precautionary principle - COM(2) 1 Brussels*.
- Cummer, S. A. and U. S. Inan, (2000). *Modeling ELF radio atmospheric propagation and extracting lightning currents from ELF observations*, Radio Sci., 35, (2), 385-394.
- Davies K., (1990). *Ionospheric Radio*, IEE (Peter Peregrinus Ltd.), London, UK.
- Fieve, S., P. Portala, and L. Bertel, (2007). *A new VLF/LF atmospheric noise model*, Radio Sci., 42, RS3009.
- Greifinger, P. S., V. C. Mushtak, and E. R. Williams, (2007). *On modeling the lower characteristic ELF altitude from aeronomical data*, Radio Sci., 42.
- Helliwell R.A., (1965). *Whistlers and related ionospheric phenomena*, Stanford University Press, Stanford California USA.
- Hitchcock R.T., Patterson R.M., (1995). *Radio-Frequency and ELF Electromagnetic Energies*, Wiley Interscience N.Y. USA.
- Hughes, W. J., (1994). *Magnetospheric ULF waves: A tutorial with a historical perspective*, in: *Solar wind sources of magnetospheric ultra-low-frequency waves*, Geophyssetson, K. Takahashi, M. Scholer, Geophysical Mon., 81, 1-12.
- I.C.N.I.R.P., (1998). *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*, Health Physics Society.
- I.E.G.M.P., (2000). *Mobile phones and Health*, National Radiological Protection Board (UK)
- ITU, (1995). *Hand book National Spectrum Management- Radiocommunication Bureau* Geneve
- JACKSON J. D., (1984). *Elettrodinamica Classica*, Zanichelli ed., Bologna.
- Kimura, I., (1989). *Ray paths of Electromagnetic waves in the Earth and planetary magnetospheres*, American Geophysical Union, Geophysical Monograph, 53, 161-171.
- Kivelson, M., C.T. Russell, (1995). *Introduction to Space Physics*, Cambridge University Press.
- Krauss J.D., (1988). *Antennas*, Mc Graw Hill N.Y.
- Lanzerotti, L.J, C. G. MacLennan, and A. C. Fraser-Smith, (1990). *Background magnetic spectra: ~ 10-5 to ~ 105 Hz*, Geophys. Res. Lett., vol. 17, pp.1593-1596.
- Lin, J.C., (1989). *Electromagnetic interaction with biological System*, Plenum Press, N.Y.
- Meloni A., Palangio P. and Fraser Smith A.C., (1992). *Some characteristics of the ELF/VLF radio noise measured near L'Aquila, Italy*, *IEEE T. Ant. Propag.*, **40**, 2, 12-18.
- Merrill, R.T, M.W, McElhinny, PL, McFadden, (1988), *The Magnetic Field of the Earth*, Academic Press.
- Mika, A., Haldoupis C., Marshall R. A., Neubert T., Inan U. S., (2005). *Subionospheric VLF signatures and their association with sprites observed during EuroSprite-2003*, J. Atmos. Solar Terrest. Phys., 67, 16.
- Molchanov, O. A., and Hayakawa M., (1995). *Generation of ULF electromagnetic emissions by microfracturing*, *Geophys. Res. Lett.*, 22, p. 3091-3094.
- National Research Council, (1997). *Possible Health Effects of Exposure to Residential Electric and Magnetic Fields*, NRC, USA.
- Palangio P., (1993). *Radioricezione ELF-VLF*, *Ann. Geofis.*, **36**, 5-6, 99-114.
- Parrot M., Achache J., Berthelier J. J., Blanc E., Deschamps A., Lefeuvre F., Menvielle M., Plantet J.L, Tarits P. and Villian J. P, (1993). *High-frequency seismo-electromagnetic effects*, *Phys. Earth Planet. In.*, 77, 65-83.

- Richmond A.D., Lu G., (2000), *Upper-atmospheric effects of magnetic storms: a brief tutorial*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 62, 12, 1115-1127.
- Sentman, D.D., (1987). *Magnetic polarization of Schumann resonances*, Radio Science, 22, 595-606.
- Sentman, D. D. and B. J. Fraser, (1991), *Simultaneous observations of Schumann resonances in California and Australia: Evidence for intensity modulation by the local height of the D region*, J. Geophys. Res., 96, 15973-15984.
- Teisseyre, R. and T. Ernst (2002). *Electromagnetic radiation related to dislocation dynamics in a seismic preparation zone*, Ann. Geophys.-Italy, 45, 393-399.
- Svetov, B. S., Karinskij S. D., Kuksa I.Y. and Odintsov V.I., (1997). *Magnetotelluric monitoring of geodynamic processes*, Ann. Geofis., 40, 2, 219-237.
- Tomco A.A., Hepner T., (2001). *Worldwide monitoring of VLF/LF propagation and atmospheric noise*, Radio Sci., 36, pp. 363-369.
- Wait J.R., (1970). *Electromagnetic waves in stratified media*, Pergamon Press, Oxford, UK.
- Wang, X.S., Samson J. C. and Gough D. I., (1987). *Wave-number domain analysis of magnetometer array data*, J. Geomagn. Geoelectr., 39,129-142.



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605 - 00143 Roma - Italy
www.ingv.it