

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

TESI DI LAUREA

***Impatto dei campi elettromagnetici in
ambito industriale: valutazione dei
rischi e risanamento***

Relatore : Prof. Alessandro Sona

Laureando : Francesca Padoin

ANNO ACCADEMICO 2009-2010

Indice

SOMMARIO

Capitolo 1	1
Panoramica sui campi elettromagnetici	
1.1 Elettromagnetismo	1
1.2 Definizioni	2
1.3 Disturbi elettromagnetici	5
1.4 Le sorgenti di campi elettromagnetici	8
Capitolo 2	10
La valutazione dei rischi da campi elettromagnetici in ambiente lavorativo	
2.1 Valutazione del rischio	10
2.2 Identificazione dei lavoratori (o di terzi) esposti al rischio	11
2.3 Individuazione dei rischi da esposizione	12
2.3.1 Stima dei rischi da esposizione	12
2.4 Studio della possibilità di eliminare o ridurre il rischio	12
2.4.1 Situazione normativa direttiva 89/336/Cee compatibilità elettromagnetica	13
2.4.1.2 Aspetti di compatibilità elettromagnetica	13
2.5 Problemi di esposizione del corpo umano a CEM	14
14	
Capitolo 3	15
Decreto legislativo 626/94	
3.1 Principali novità organizzative	15
3.2 Ruoli e responsabilità in materia di sicurezza	15
3.2.1 Obblighi del preposto	16
3.3 Misure generali di tutela	17
3.3.1 Informazioni che deve fornire il datore di lavoro al SPPR ed al medico	18
3.3.2 Identificazione dell'esposizione e valutazione dei rischi	18
3.4 Prescrizioni del Testo Unico	19
3.4.1 Campi elettrici e magnetici statici (0-1 Hz)	20
3.4.2 Campi con frequenze comprese fra 1 Hz e 300 GHz: valori limite.	21
3.5 Norme CEI 211-6 e 211-7	26
3.5.1 CEI 211-6	27
3.5.1.1 Caratteristiche delle sorgenti	29
3.5.1.2 Misure	34
3.5.1.3 Misure di esposizione	34
3.5.1.4 Misure dosimetriche	35
3.5.2 CEI 211-7	35
3.6 Misurazione	36

3.6.1 Specifiche relative agli strumenti	36
3.6.2 Sorgenti di incertezza di misura	38
3.6.3 Obiettivi e metodi di misura	39
3.6.3.1 Verifica della compatibilità di una data situazione espositiva con i limiti sanitari	39
3.6.3.2 Scelta dello strumento di misura	39
3.6.3.3 Misura dell'esposizione umana	40
3.6.3.4 Caratterizzazione delle variazioni spaziali	40
3.6.3.5 Caratterizzazione delle variazioni temporali	40
3.6.3.6. Caratterizzazione del contenuto in frequenza	41
3.7 Documento valutazione rischi	41
3.8 Strumentazione di misura	41
3.8.1 Sonde di misura	42
3.8.1.1 Strumenti a diodi	42
3.8.1.1.1 Diodi isotropici	42
3.8.2 Strumenti a banda larga	43
3.8.3 Strumenti a banda stretta	43
3.8.4 Fonti di errori di misura	43
3.8.5 Misure di campi vicini	43
3.8.5.1 Misure in prossimità delle macchine	45
3.8.6 Alcune modalità operative per le misure	46
3.8.6.1 Modalità d'esecuzione	46
3.8.7 PMM 8053(Portable Field Strength Meter)	48
3.8.7.1 Sonde del PMM	48
Capitolo 4	49
Interazione campi elettromagnetici – organismo	
4.1 Introduzione	49
4.2 La modellazione delle sorgenti ed il calcolo delle correnti indotte	50
4.2.1 Problema magnetico esterno	52
4.2.2 Problema elettrico esterno	53
4.2.3 Problema interno	54
4.2.4 Post – processing	55
4.3 Risonanza del corpo	55
4.4 Composizione della densità di corrente	55
4.5 Che cosa succede quando siamo esposti ai campi elettromagnetici?	57

4.5.1 Effetti sulla salute	58
4.5.1.1 Effetti acuti	58
4.5.1.2 Effetti cronici	58
4.6 Accoppiamento campo elettromagnetico – organismo	60
4.7 Ruolo della frequenza	61
Tirocinio presso l'azienda Luxottica nel campo della misurazione dei campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici e redazione finale del DVR	
Capitolo 1	1
1.1 Formazione sulla legislazione vigente e sulla strumentazione da utilizzare	1
1.2 Differenze fra le misurazioni a bassa ed ad alta frequenza	1
1.3 Scelta dello strumento di misura	2
1.3.1 PMM 8053	3
1.3.1.1 Misure in alta frequenza con la sonda EP-330.	3
1.3.1.2 Misure in bassa frequenza con la sonda EHP-50	4
Capitolo 2	4
2.1 Esperienza in azienda: mappatura dell'ambiente di misura e relative misurazioni.	4
2.2 Suddivisione delle misure e stesura del DVR	6
2.3 Studio della possibilità di eliminare o ridurre il rischio	10
Capitolo 3	13
3.1 Esempio di DVR	13

Capitolo 1

Panoramica sui campi elettromagnetici

1.1 Elettromagnetismo

Sulla terra è presente un fondo naturale di radiazione elettromagnetica di origine cosmica, prodotto dal sole e dalle stelle, e di origine atmosferica, dovuto a fenomeni meteorologici (scariche elettrostatiche). Le radiazioni elettromagnetiche si propagano nello spazio sotto forma di onde elettromagnetiche, le cui caratteristiche dipendono dalla frequenza, ossia dal numero di oscillazioni compiute in un secondo, che si misura in cicli al secondo o Hertz. Maggiore è la frequenza, maggiore è l'energia trasportata dall'onda.

L'insieme di tutte le possibili onde elettromagnetiche, in funzione della frequenza, costituisce lo spettro elettromagnetico. Al suo interno si possono distinguere due grandi zone, quella delle radiazioni ionizzanti (IR) che hanno un'energia tale da rompere i legami atomici che tengono unite le molecole e quella delle radiazioni non ionizzanti (NIR), che viceversa non hanno energia sufficiente per ionizzare la materia. E' in questa regione dello spettro che si parla comunemente di campi elettromagnetici. All'estremo inferiore dell'intervallo di frequenza più basse si hanno i campi statici o quasi-statici (0 - qualche Hz), poi le frequenze estremamente basse (qualche Hz - 300 Hz), le onde radio (fino a 1 GHz), le microonde (fino a 300 GHz), e infine le radiazioni infrarosse, visibili e ultraviolette. A seconda della frequenza, il modo di propagarsi nello spazio e di interagire con la materia circostante è molto differente. Le principali sorgenti di radiazioni non ionizzanti, in ambiente di vita e di lavoro, sono legate all'utilizzo dell'energia elettrica e alle telecomunicazioni; in particolare sono costituite dagli elettrodotti e dalle antenne per telecomunicazioni, che possono esporre un elevato numero di persone. E' alle radiazioni elettromagnetiche non ionizzanti con frequenza inferiore a quella della luce infrarossa che ci si riferisce quando si parla di inquinamento elettromagnetico. In relazione ai possibili effetti delle onde sugli organismi viventi, si possono suddividere le radiazioni non ionizzanti in due gruppi di frequenze:

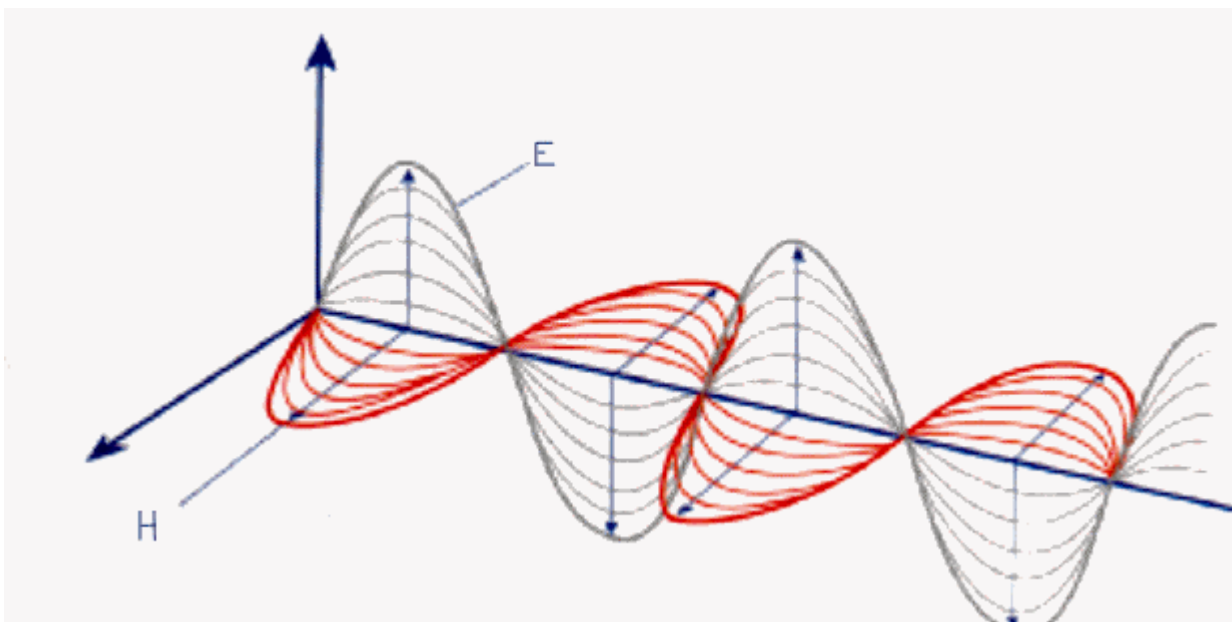
Frequenze estremamente basse	ELF(Extremely Low Frequencies)	0 Hz-300 Hz	Linee elettriche, elettrodomestici, ecc.
Radiofrequenze	RF	300 Hz-300 GHz	Cellulari, ripetitori, radioTv, forni a microonde, ecc.

I campi associati a fenomeni elettrici e magnetici naturali o artificiali si dividono:

- campi elettrici,
- campi magnetici,
- campi elettromagnetici.

Un campo elettromagnetico è costituito da due grandezze che variano periodicamente nel tempo: il campo elettrico ed il campo magnetico, rappresentate in figura 1.1. Il primo si definisce come una proprietà o perturbazione dello spazio, dovuta alla presenza di cariche elettriche, la sua intensità si misura in volt per metro (V/m). Analogamente, il campo magnetico è una proprietà dello spazio legata alla presenza di cariche elettriche in movimento (correnti elettriche), la sua intensità si esprime in ampere per metro (A/m) o in microtesla (μT).

Fig. 1.1 Grafico dell'andamento di un campo elettromagnetico



1.2 Definizioni

Campo elettrico

Si definisce Campo Elettrico una regione dello spazio in cui una carica (o un corpo carico elettricamente) è sottoposta ad una forza proporzionale alla carica stessa.

Viene descritto mediante un vettore \vec{E} che in ogni punto della regione di spazio indica la direzione, l'intensità ed il verso della forza che agisce su una carica puntiforme unitaria positiva che venga posta in quel punto.

Relazioni che legano tra loro campo elettrico e carica elettrica sono:

Legge di Coulomb:

$$k = F/q = Q / (4\pi\epsilon_0 r^2) \quad (1.1)$$

K è il vettore campo elettrico ad una distanza r da una carica puntiforme Q

F è la forza esercitata su una carica di prova

ϵ_0 è la costante dielettrica del vuoto

Teorema di Gauss:

$$\Phi_a(E) = (Q \cdot 4\pi r^2) / (4\pi\epsilon_0) = Q/\epsilon_0 \quad (1.2)$$

determina il flusso del campo elettrico attraverso una qualunque superficie chiusa.

Campo magnetico

Il campo magnetico è definito come una perturbazione di una certa regione di spazio determinata dalla presenza nell'intorno di una distribuzione di corrente elettrica o di massa magnetica.

È descritto mediante un vettore \vec{B} (densità di flusso magnetico o induzione magnetica)

La principale relazione che lega tra loro induzione magnetica e corrente elettrica è la legge di Biot-Savart:

Esprime il campo magnetico generato alla distanza r da un conduttore elementare lineare di lunghezza dl percorso da corrente I :

$$dB = \mu_0 (dI \times \hat{r}) / (4\pi r^2) \quad (1.3)$$

Campo elettromagnetico

Se il campo elettrico e magnetico non sono indipendenti; si parla di campo Elettromagnetico (campo lontano).

r è la distanza dalla sorgente oltre la quale vi è la sicura presenza di campo lontano

D è la massima dimensione dell'elemento radiante (supposta non trascurabile rispetto alla lunghezza d'onda)

Per $\lambda \geq D^2/\lambda$ nella regione di spazio $r \geq \lambda$

per $\lambda \leq D^2/\lambda$ nella regione di spazio $r \geq D^2/\lambda$

Se D è trascurabile rispetto alla lunghezza d'onda $r > \lambda/2\pi$
(sorgente puntiforme).

Per una la dimensione massima dell'elemento radiante $D=1\text{m}$ e con frequenza di 30 MHz ($\lambda=10\text{m}$) si ha: regione di campo lontano : $r \geq 10\text{m}$ ($\lambda \geq D^2/\lambda$)

Tre principali grandezze fisiche, correlate tra di loro, caratterizzano tali radiazioni:

- a) la lunghezza d'onda λ , o distanza fra i due punti di un'onda. Unità di misura della lunghezza d'onda è il metro
- b) la frequenza f , ovvero il numero di cicli completi dell'onda in un secondo.
- c) l'energia E , trasportata in pacchetti di energia, chiamati fotoni, la cui unità di misura è, per il Sistema Internazionale (SI) il Joule; spesso però l'unità di misura utilizzata è quella convenzionale dell' elettronvolt (eV), definita come l'energia acquistata da un elettrone, quando attraversa una differenza di potenziale di 1 Volt.

Frequenza f , e lunghezza d'onda λ sono sempre legate dalla relazione $f \times \lambda = c$, dove c è la velocità di propagazione delle onde ($c = 300000\text{Km/s}$ nell'aria, ovvero la velocità della luce). Quando la propagazione avviene in un mezzo materiale, la velocità di propagazione c dipenderà dalle proprietà del mezzo attraversato. Le frequenze delle onde elettromagnetiche possono coprire un vastissimo intervallo di valori, definito come spettro elettromagnetico. Per semplificare i riferimenti e la terminologia, l'intero spettro è suddiviso in regioni che assumono denominazioni diverse in base alla frequenza e/o alla lunghezza d'onda, all'energia associata e all'utilizzo.

Fig. 1.2 Bande di frequenza dello spettro elettromagnetico da 3 kHz a 300 GHz

Numero di banda	Suddivisione del range di frequenza	Denominazione metrica	Descrizione e simbolo
1	<30 Hz	-	Sub-extremely low frequency
2	30-300 Hz	-	extremely low frequency
3	300-3000 Hz	-	voice frequency
4	3-30 KHz	Myriametrica	Very low frequency(VLF)
5	30-300 KHz	chilometrica	low frequency
6	0.3-3 MHz	ettometrica	medium frequency (MF)
7	3-30 MHz	decametrica	high frequency
8	30-300 MHz	metrica	very high frequency (VHF)
9	0.3-3 GHz	decimetrica	ultra high frequency (UHF)
10	3-30 GHz	centimetrica	super high frequency (SHF)
11	30-300 GHz	millimetrica	extremely high frequency
12	300 GHz-300 THz	IR	Intermediate and Infra-Red

Grandezze dosimetriche

Nei paragrafi precedenti sono state esaminate le grandezze fisiche descrittive del campo magnetico incidente. La quantizzazione dell'energia assorbita da un sistema esposto avviene attraverso altre grandezze, in particolare:

1) densità di corrente: è la corrente indotta da un campo elettromagnetico perpendicolare alla sua direzione, nell'unità di superficie, nel corpo umano. L'unità di misura è l' Ampere/metro quadrato (A/m^2). La densità di corrente è utilizzata come quantità dosimetrica per frequenze entro i 10 MHz

2) tasso di assorbimento specifico (SAR): è il tasso temporale a cui l'energia elettromagnetica a radiofrequenza viene impartita ad un elemento di massa di un sistema biologico.

L'unità di misura è il Watt per Chilogrammo (W/kg).

3) l'assorbimento specifico (SA), definito come il rapporto fra l'energia elementare assorbita in una massa elementare, contenuta in un volume elementare con una certa densità.

L'unità di misura è il Joule per chilogrammo (J/kg).

L' *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP), nella formulazione delle nuove linee guida, ha poi introdotto altre grandezze dosimetriche, come la corrente I , misurata in ampere (A), per il range di frequenza fino a 110 MHz, e la densità di potenza S , misurata in W/m^2 , nel range di frequenza da 10 a 300 GHz.

I limiti di base per gli effetti acuti e quindi i valori soglia che non devono mai essere superati, sono espressi in termini di grandezze dosimetriche; i livelli di riferimento, che sono invece dei valori limite operativi, sono espressi in termini di grandezze fisiche (campo elettrico, campo magnetico e densità di potenza).

1.3 Disturbi elettromagnetici

I sistemi elettrici ed elettronici sono detti “elettromagneticamente compatibili” quando il rumore elettrico generato da ciascuno di essi non influenza le prestazioni standard degli altri. La “compatibilità elettromagnetica” (*Electromagnetic Compatibility*, EMC) rappresenta quella situazione ideale in cui tutti i sistemi elettrici ed elettronici funzionano come da specifiche di progetto sia isolati, sia nel loro ambiente operativo ed in presenza gli uni degli altri.

Si dice che siamo in condizioni di interferenza elettromagnetica (*Electromagnetic Interference*, EMI) se esistono tensioni e correnti spurie che influenzano negativamente le prestazioni di un sistema o di un dispositivo. Queste tensioni o correnti possono determinarsi nell'apparato “vittima” (*victim*) per effetto di disturbi condotti generati in seguito all'esposizione ad un campo elettromagnetico. Il processo che porta a variazioni di progetto o ad aggiustamenti dei livelli di segnale o di rumore allo scopo di garantire il corretto funzionamento di un'apparecchiatura è noto come “controllo dell'interferenza elettromagnetica” (*Electromagnetic Interference Control*, EMIC). Spesso anche le procedure di gestione seguite per mettere in atto tale controllo ricadono sotto questa denominazione.

In definitiva un sistema è elettromagneticamente compatibile se sono rispettati i seguenti criteri:

- non causa interferenza con altri sistemi
- non è suscettibile alle emissioni di altri sistemi

Esistono due possibili modalità di trasmissione di un disturbo, mediante conduzione e irradiazione. La conduzione avviene attraverso parti metalliche e gli elementi a parametri concentrati (condensatori, trasformatori). L'irradiazione avviene attraverso la propagazione in spazio libero e, quando i sistemi sono vicini, occorre considerare le cosiddette condizioni di campo vicino.

A fronte di questa prima classificazione, le caratteristiche di un emettitore possono essere definite in termini di emissione condotta (CE) e di emissione radiata (RE), mentre quelle di un dispositivo o vittima in termini di suscettibilità condotta (CS) o radiata (RS) (Fig. 1.2).

Disturbi irradiati: si propagano nello spazio libero secondo le leggi dell'elettromagnetismo.

Disturbi condotti: per propagarsi hanno bisogno di un mezzo conduttore (cavi alimentazione, chassis apparecchiature, connessioni di terra ecc...)

Misure di emissione condotta o suscettibilità condotta sono sempre effettuate in termini di tensioni e correnti, usando come unità di misura: Volt (V), dBV, dB μ V o Ampere (A), dBA, dB μ A. Nel caso di misure di emissione condotte si definisce l'impedenza di trasferimento (*transfer impedance*) come il rapporto tra la tensione sull'apparato vittima e la corrente che scorre nell'emettitore. In base al tipo di percorso questa impedenza può essere di tipo conduttivo, capacitivo o induttivo.

Misure di emissione irradiata e suscettibilità radiata vengono espresse in termini di intensità dei campi: Volt/m (V/m), dBV/m, dB μ V/m o Tesla (T)², dBpT.

Al fine della prevenzione delle interferenze, è importante distinguere quattro diversi fenomeni di trasferimento di energia elettromagnetica: emissione condotta, suscettività condotta, emissione radiata e suscettività radiata. L'emissione condotta riguarda l'emissione di energia elettromagnetica da parte del dispositivo verso la rete di distribuzione di energia elettrica per via cavo.

La suscettività condotta riguarda l'emissione di energia elettromagnetica da parte della rete di distribuzione di energia elettrica verso il dispositivo per via cavo.

L'emissione radiata riguarda l'irradiazione di onde elettromagnetiche da parte del dispositivo verso l'ambiente circostante. La suscettività radiata riguarda l'irradiazione di onde elettromagnetiche da parte dell'ambiente verso il dispositivo.

Per lo studio dei fenomeni di interferenza ora elencati, è necessario dare alcune definizioni.

Si definisce "lunghezza elettrica" la seguente quantità:

$$L_E = \frac{L_G}{\lambda} , \quad (1.4)$$

dove L_G è la lunghezza geometrica del dispositivo e λ è la lunghezza d'onda, determinata dal rapporto tra la velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica e la relativa frequenza.

Dalla (1.4) evince che un dispositivo, irradiante onde elettromagnetiche, è elettricamente corto se la relativa lunghezza geometrica è molto piccola rispetto alla lunghezza d'onda.

Si definisce "guadagno di tensione" il rapporto tra la tensione di uscita e la tensione d'ingresso di un dispositivo elettronico:

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} , \quad (1.5)$$

Dove V_o è la tensione di uscita di un dispositivo

V_i è la tensione d'ingresso di un dispositivo

il cui valore espresso in decibel (dB) è

$$A_{v_{dB}} = 20 \log_{10} \frac{V_o}{V_i} . \quad (1.6)$$

Si definisce "guadagno di potenza" il rapporto tra la potenza di uscita e la potenza d'ingresso di un dispositivo elettronico:

$$A_p = \frac{P_o}{P_i} , \quad (1.7)$$

Dove P_o è la potenza di uscita di un dispositivo
 P_i è la potenza d'ingresso di un dispositivo

il cui valore espresso in dB è

$$A_{pdB} = 10 \log_{10} \frac{P_o}{P_i} . \quad (1.8)$$

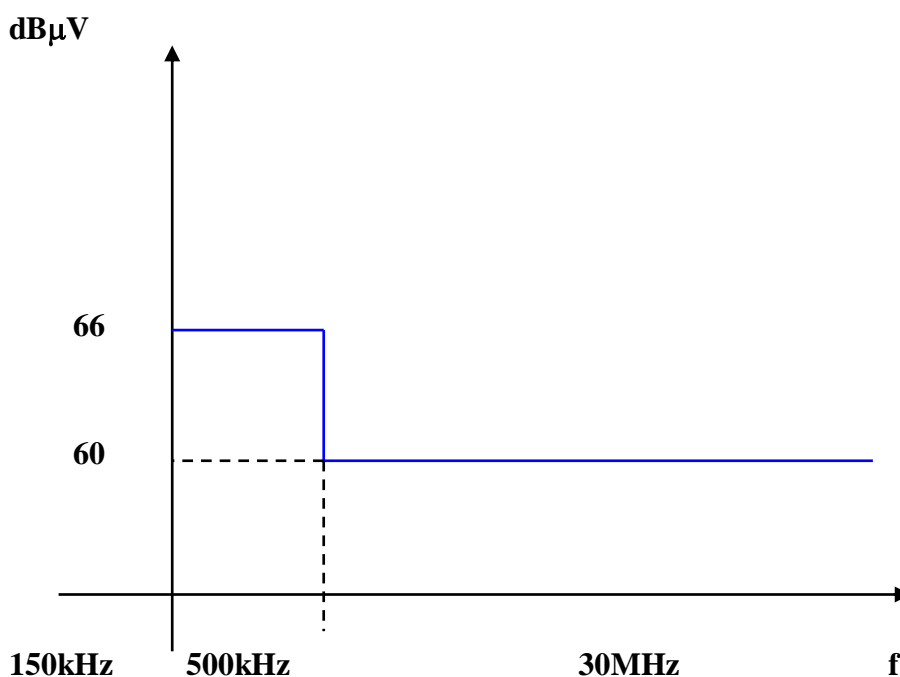
Date le definizioni necessarie, è importante evidenziare che i limiti di emissione di energia elettrica e magnetica sono fissati da determinate normative, le quali stabiliscono la massima energia elettrica e magnetica che un dispositivo può emettere per ogni intervallo di frequenza.

Per ciò che concerne l'emissione condotta, l'energia elettrica è associata alla tensione ed è espressa in dBmV oppure in dB μ V, mentre l'energia magnetica è associata alla corrente ed è espressa in dBmA oppure in dB μ A.

Nel caso dell'emissione radiata, invece, l'energia elettrica è associata al campo elettrico ed è espressa in dBmV/m oppure in dBV/m, mentre l'energia magnetica è associata al campo di intensità magnetica ed è espressa in dBmA/m oppure in dBA/m.

Per quanto riguarda l'emissione condotta, il seguente grafico stabilisce il massimo valore di tensione di disturbo che un dispositivo può emettere per via cavo per ogni fascia frequenza:

Fig.1.3 Normativa EN55011 in riferimento all'emissione condotta



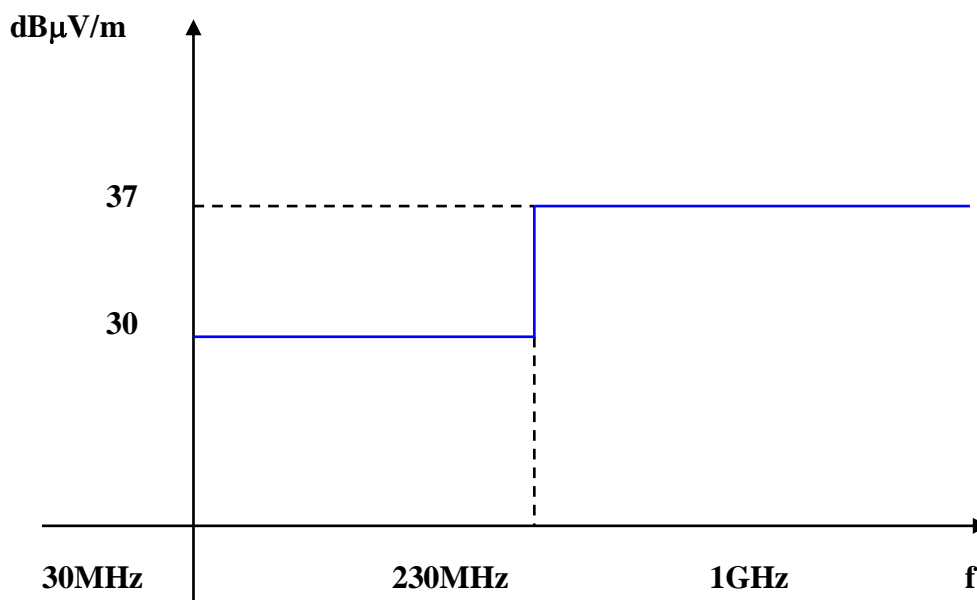
Volendo fare un esempio, dalla fig.1.3, in corrispondenza di 66dB μ V risulta:

$$66 = 20 \log_{10} \frac{V}{1\mu V} \Rightarrow V = 1.99mV$$

ciò significa che nella fascia di frequenza 150 - 500kHz, la tensione di disturbo che può emettere un dispositivo non deve superare 1.99mV. C'è da osservare, dall'esempio ora fatto, che 1 μ V è la tensione campione.

Per quel che riguarda, invece, l'emissione radiata, il seguente grafico indica il massimo valore di campo elettrico di disturbo che un dispositivo può irradiare per ogni fascia di frequenza:

Fig.1.4 Normativa EN55011 in riferimento all'emissione radiata



Il grafico di fig.1.4 evidenzia i valori di quasi picco, i quali sono i più significativi ma anche difficili da misurare.

1.4 Le sorgenti di campi elettromagnetici

Le principali sorgenti di campi elettromagnetici che interessano gli ambienti di vita possono essere suddivise in base alle frequenze a cui operano.

Generano campi a 'bassa frequenza':

- le linee di distribuzione della corrente elettrica ad alta, media e bassa tensione (elettrodotti)
- gli elettrodomestici e i dispositivi elettrici in genere

Generano campi a 'radiofrequenza':

- gli impianti di telecomunicazione (impianti radiotelevisivi, stazioni radio-base, telefoni cellulari....)
- forni a microonde, apparati per saldatura e incollaggio a microonde, etc.

I campi elettromagnetici inoltre vengono usati in medicina a scopo diagnostico o terapeutico: risonanza magnetica nucleare, marconiterapia, radarterapia, magnetoterapia...

Elettrodotti e distribuzione dell'energia elettrica: L'energia elettrica viene portata dai centri di produzione agli utilizzatori (case, industrie...) per mezzo di elettrodotti che lavorano con tensioni di intensità variabile fino a 380.000 volt (380 kV).

La rete di distribuzione dell'energia elettrica è formata da una grande maglia di elettrodotti che costituiscono un complesso circuito caratterizzato dalle linee, dalle centrali elettriche e dalle cabine di trasformazione. Queste ultime hanno la funzione di trasformare la corrente ad alta tensione prodotta dalle centrali dapprima in media tensione e poi in tensioni più basse fino ai valori utilizzati nelle applicazioni pratiche. Per tensioni fino a 15000 Volt e per tratte di linee urbane in bassa tensione a volte vengono utilizzate le linee interrate. Gli elettrodotti, nei quali circola una corrente alternata alla frequenza di 50 Hz, producono campi elettrici e magnetici variabili nel tempo.

I campi elettrico e magnetico dipendono anche dal numero e dalla disposizione geometrica dei conduttori, nonché dalla distribuzione delle fasi della corrente tra i conduttori stessi. In particolare le linee di trasporto possono viaggiare in terna singola (una linea con i tre conduttori per le tre fasi) o in terna doppia (due linee di tre conduttori ciascuna su di un'unica serie di tralicci).

Il campo elettrico è facilmente schermabile da parte di materiali quali legno o metalli, ma anche alberi o edifici: tra l'esterno e l'interno degli edifici si ha quindi una riduzione del campo elettrico.

Il campo magnetico è difficilmente schermabile e diminuisce soltanto allontanandosi dalla linea.

L'interramento delle linee permette di diminuire i campi nello spazio circostante, ma questa soluzione ha costi molto elevati e può essere effettuata solo per tratti limitati.

Negli ambienti di vita e di lavoro, tutti gli apparecchi alimentati con l'energia elettrica sono sorgenti di campi elettrici e magnetici ELF. Il campo elettrico è sempre presente negli ambienti domestici indipendentemente dal funzionamento degli elettrodomestici. Il campo magnetico invece si produce solamente quando gli apparecchi vengono messi in funzione ed in essi circola corrente.

Capitolo 2

La valutazione dei rischi da campi elettromagnetici in ambiente lavorativo

2.1 Valutazione del rischio

Il rischio da campo elettromagnetico è classificato come un *Rischio per la salute* tra i rischi Igienico - ambientali all'interno della classe "Agenti Fisici", nell'ambito delle "Radiazioni non Ionizzanti", che comprendono una parte dei raggi ultravioletti, le microonde, le radiofrequenze, i raggi infrarossi, i raggi X ed i raggi laser.

La valutazione dei rischi è l'esame sistematico di tutti gli aspetti attinenti il lavoro a partire dall'individuazione delle cause probabili di lesione o danno, al fine di eliminare il rischio o, in alternativa, di ridurlo ad un livello accettabile.

Anche per il rischio da campi elettromagnetici è importante determinare il percorso che va' dalle cause più frequenti di esposizione, alle sorgenti di pericolo, alle classi di lavoratori più esposti al rischio, ai metodi di misura delle onde emesse, ai provvedimenti da prendere per ridurre al minimo l'esposizione del lavoratore e della popolazione.

Le applicazioni delle radiazioni non ionizzanti sono molto diverse a seconda della frequenza, per cui occorre considerare tre intervalli:

a) Frequenze industriali (0 - 50 Hz): sono utilizzate nelle linee elettriche (per il trasporto a distanza e la distribuzione dell'energia elettrica) e per il funzionamento di motori elettrici, trasformatori e svariati elettrodomestici di uso comune (TV, forni, lavatrici, computer, asciugacapelli, vasche idromassaggio, radiosvegli, rasoio elettrici, ...)

b) Basse frequenze (50/60 Hz – 10kHz): sono utilizzate nella telefonia, nelle trasmissioni radio intercontinentali ed in quelle via cavo; accompagnano anche il funzionamento dei carichi non lineari (convertitori statici) allacciati alle reti di distribuzione di energia elettrica

c) Alte Frequenze (10kHz - 300GHz): con riferimento a sistemi non diffusivi (con inquinamento elettromagnetico locale limitato alle persona in vicinanza), si distinguono le seguenti applicazioni:

– industria alimentare (forni a microonde, sterilizzatori, forni di precottura, distruzione di insetti e larve nei cereali e nel tabacco, ...), dove la banda di frequenza è quella delle microonde e la potenza dei generatori è compresa tra 1 e 100 kW. In particolare, i forni a microonde, ampiamente utilizzati anche per usi domestici, hanno frequenza di lavoro di 2.45 GHz (la banda ISM permessa per queste operazioni) e potenza generalmente inferiore a 2kW

– industria elettronica (raffinazione di semiconduttori, produzione di fibre ottiche, saldatura);

– industria della carta (essiccamento)

– industria del legno (incollaggio, stagionatura, fabbricazione del legno compensato), in cui sono utilizzate potenze compresa tra pochi kW e qualche centinaio di kW

– industria siderurgica (tempera superficiale, stampaggio a caldo, saldature), dove la potenza dei generatori varia fra 1 kW e molte centinaia di kW

– industria delle materie plastiche (riscaldamento delle resine termoindurenti, accelerazione della formazione di polimeri, ...)

- applicazioni mediche (diatermia, stimolazione della osteogenesi, diagnostica con tecniche raffiguranti (RMN), marconiterapia); nel caso della marconiterapia, i generatori lavorano alle frequenze di 27.12 o 40.68 o 433.92 MHz con una potenza trasferita ai trasduttori di circa qualche centinaio di W (in relazione al tipo di terapia ed alla regione da trattare i trasduttori sono bobine o condensatori con diversa geometria)
- sistemi di comunicazione portatili, quali walkie-talkie (nelle bande CB e VHF, ovvero 27 e 144 MHz), cellulari (ETACS, GSM e DCS, ovvero nelle bande 450, 900 e 1800 MHz).

Le applicazioni con inquinamento diffuso sono invece le seguenti:

- sistemi di comunicazione (diffusione radiotelevisiva, collegamenti punto-punto in ponte radio, collegamenti via satellite, stazioni per servizi radiomobile e telefonia cellulare) i quali rappresentano fonte di esposizione per la popolazione specialmente nelle aree ad alta densità abitativa
- sistemi radar (radionavigazione, radiolocalizzazione e telerilevamento), caratterizzati da un funzionamento generalmente pulsato (in alcuni casi continuo) con elevatissime potenze di picco (da alcuni kW ad alcuni MW).

I contributi maggiori all'inquinamento elettromagnetico alle alte frequenze diffuso sul territorio sono forniti dagli apparati radar, dai trasmettitori radio (con potenze di alcune decine o centinaio di kW), dai trasmettitori degli impianti televisivi (di potenza normalmente compresa tra qualche centinaio di W e qualche kW), dalle antenne delle stazioni radio base (SRB) della telefonia cellulare, le cui potenze sono inferiori e si attestano su valori dell'ordine di qualche decina e al massimo un centinaio di W.

2.2 Identificazione dei lavoratori (o di terzi) esposti al rischio

Le classi di lavoratori a rischio sono evidenziabili ovunque siano presenti fonti di emissione elettromagnetica. Più in particolare, si possono individuare 2 classi di rischio:

1) Rischio generico: per tutti i lavoratori che utilizzano qualsiasi elettrodomestico che funziona a corrente elettrica o lavorano davanti a videoterminali o in luoghi di lavoro situati in prossimità di antenne radiobase o elettrodotti.

2) Rischio specifico: per quei lavoratori che utilizzano giornalmente fonti di emissione di campi elettromagnetici e particolarmente:

-Fonti di emissione a Radiofrequenza:

- a) Sistemi per saldatura dielettrica e trattamenti termici ad induzione elettromagnetica
- b) Apparati elettromedicali per diatermia, risonanza magnetica, chirurgia con elettrobisturi ad alta frequenza (con esposizione di pazienti, personale medico, infermieristico e tecnico)
- c) Apparecchiature scientifiche (spettrografi magnetici, ciclotroni e sistemi di perfusione nucleare)
- e) Sistemi di broadcasting
- h) Impiantistica della telefonia cellulare
- i) Utilizzo di telefonia cellulare
- l) Apparecchiature Wafers (microcip di memoria RF)
- m) Impiantistica radar (es. torri di controllo)
- n) Attrezzature forze armate (radar, carri armati, ecc.)

-Fonti di emissione a basse frequenze:

- a) Apparecchiature per l'essiccazione della ceramica

b) Apparecchiature presenti nelle cabine di conduzione dei treni

2.3 Individuazione dei rischi da esposizione

L'individuazione dei rischi di esposizione parte dall'analisi del quadro generale delle sorgenti di pericolo e prosegue con lo studio delle procedure lavorative e delle misure di prevenzione e protezione già attuate. A partire dall'analisi delle sorgenti, dallo studio della loro disposizione spaziale e della loro compatibilità elettromagnetica quando si hanno più sorgenti, è quindi necessario arrivare all'istituzione di metodi operativi e di misure di sicurezza per la prevenzione dei danni connessi al rischio elettromagnetico.

Fondamentale è quindi, in questo ambito, analizzare ed affrontare i problemi organizzativi, legati alla gestione degli spazi di lavoro, ed alla mancanza di consapevolezza dell'esposizione da parte degli operatori. Già in una prima fase si sono date delle indicazioni per evitare esposizioni improprie degli operatori che hanno coinvolto anche la fase progettuale, sia per ristrutturazioni che per sia per nuova costruzione di locali destinati ad attività che coinvolgano l'utilizzo di campi elettromagnetici, come ad esempio, locali destinati a diagnostica magnetica o a fisioterapia che preveda l'utilizzo della magnetoterapia.

Inoltre, quando possibile, si dovrebbero adottare misure di protezione, che a seconda dei casi possono essere collettive ed accompagnate a percorsi di formazione/informazione dei lavoratori che assegnino a ciascun esposto la giusta consapevolezza dell'esposizione, nonché i corretti comportamenti da adottare, pur tuttavia senza creare inutili allarmismi.

2.3.1 Stima dei rischi da esposizione

Dall'analisi delle sorgenti di pericolo e dall'individuazione dei livelli di rischio, deve essere effettuata una stima del rischio di esposizione residuo.

Tale stima, può essere eseguita attraverso:

- a) La verifica del rispetto dell'applicazione delle norme di sicurezza alle macchine durante il loro funzionamento.
- b) La verifica dell'accettabilità delle condizioni di lavoro in relazione ad un esame oggettivo dell'entità e della durata delle lavorazioni, delle modalità operative svolte e di tutti i fattori che influenzano le modalità e l'entità dell'esposizione, in analogia con i dati di condizioni di esposizione similari riscontrati nello stesso settore operativo. A quest'ultimo riguardo si potrà operare tenendo conto dei dati desunti da indagini su larga scala, effettuate in realtà lavorative similari.
- c) La verifica delle condizioni di sicurezza anche mediante acquisizione di documentazioni e certificazioni eventualmente esistenti agli atti dell'azienda.
- d) La corretta misura dell'entità dell'esposizione (eseguita secondo la normativa vigente in materia) che porti alla quantificazione oggettiva del rischio ed alla conseguente valutazione attraverso il confronto con indici di riferimento.

2.4 Studio della possibilità di eliminare o ridurre il rischio

La possibilità di ridurre le emissioni elettromagnetiche in ambiente lavorativo, dipende da una serie di fattori: primo tra tutti la frequenza e le caratteristiche fisiche dell'onda, ma anche l'utilizzo dell'onda emessa (se si tratta per esempio di una macchina industriale o di un elettrodotto, o di un'antenna per radiotelefonica) e l'ambiente in cui il lavoratore è esposto.

La schermatura di un campo elettrico, magnetico o elettromagnetico può risultare molto utile in numerosi settori tecnici che vedono l'utilizzo di campi elettromagnetici. Innanzitutto quando si vuole ridurre l'esposizione di individui che debbano transitare o stazionare nei pressi di una sorgente di campo elettromagnetico in ambiente lavorativo, in secondo luogo nell'ambito della

cosiddetta "compatibilità elettromagnetica", quando è importante evitare che le emissioni elettromagnetiche prodotte da una apparecchiatura elettrica disturbino il funzionamento di altre apparecchiature poste nelle vicinanze della prima, o che la sommatoria delle onde elettromagnetiche di più sorgenti crei un'amplificazione dell'intensità dell'onda. In particolare, i campi elettrici vengono fortemente attenuati anche dagli oggetti materiali non conduttivi che si interpongono tra le sorgenti e gli individui: una parete o un edificio sono utili attenuatori di campo elettrico.

I campi magnetici, invece, non subiscono attenuazione da parte degli oggetti materiali. Pertanto si ritrovano quasi inalterati all'interno e all'esterno di un edificio. La possibilità di schermatura dipende anche dal fatto che l'emissione della sorgente sia intenzionale o accidentale.

Nel primo caso, in cui l'emissione di un campo elettromagnetico è necessaria espressamente per diffondere un segnale elettromagnetico (per esempio: impianti di teleradiodiffusione, stazioni radiobase, apparati radar), non è possibile schermare la sorgente, ovvero impedire che le sue emissioni diffondano nell'ambiente circostante, poiché questo ne impedirebbe il regolare funzionamento. A questo proposito deve essere schermata, laddove sia possibile, la regione di spazio all'interno della quale non si vuole che il campo elettromagnetico possa penetrare.

Nel secondo caso, invece, troviamo le sorgenti la cui emissione è del tutto "accidentale" (per esempio: elettrodomestici, computer e altre macchine da ufficio) e quegli apparati industriali il cui funzionamento richiede la generazione di un intenso campo, ma solo in una regione limitata di spazio, dove si trova lo strumento che eroga il campo. In questi casi, è possibile pensare di schermare la stessa sorgente. Gli schermi si realizzano maggiormente con l'impiego di pannelli o contenitori metallici o comunque di materiale che possieda una buona conducibilità elettrica. Si deve tener presente che il campo magnetico statico o di bassa frequenza (50 Hz) è molto difficile da schermare: per una schermatura efficace occorrono lastre di acciaio o altro materiale ferromagnetico spesso diversi millimetri. Attualmente vengono prodotte leghe metalliche con alta permeabilità magnetica che possono schermare anche campi a bassa frequenza ad altissima intensità con lastre dello spessore di pochi millimetri, peraltro con bassi costi di produzione. Il campo elettromagnetico a radiofrequenza (per esempio a 900 MHz, come nel caso della telefonia cellulare) può essere, invece, facilmente schermato da materiali metallici. Uno schermo può anche essere realizzato con un tessuto (filato o non filato, naturale o sintetico) attraversato da un materiale che deve essere dotato di una buona conducibilità elettrica (ad es. grafite, filamenti metallici).

2.4.1 Situazione normativa direttiva 89/336/Cee compatibilità elettromagnetica

Un aiuto concreto per la mitigazione del problema delle interferenze elettromagnetiche giunge dalle normative nazionali e internazionali in materia. La direttiva europea 89/336/CEE "*compatibilità elettromagnetica*" impone ai costruttori di apparecchiature elettriche ed elettroniche il rispetto di alcuni requisiti essenziali insiti nella definizione stessa di compatibilità elettromagnetica, che sono mirati al contenimento delle emissioni elettromagnetiche dei sistemi entro limiti ben determinati e contemporaneamente all'incremento dell'immunità degli stessi nei confronti delle interferenze.

Il rispetto di tali requisiti si può ottenere seguendo le prescrizioni delle norme tecniche armonizzate che forniscono i limiti ed i metodi di misura per la totalità dei prodotti o delle famiglie di prodotti che rientrano negli obiettivi della direttiva, o per tutti i dispositivi che possono creare emissioni elettromagnetiche o il cui funzionamento può essere alterato da disturbi elettromagnetici presenti nell'ambiente.

2.4.1.2 Aspetti di compatibilità elettromagnetica considerati dalla Direttiva 89/336/CEE

-Emissioni di disturbi condotti: sono i disturbi originati dalle apparecchiature elettriche/elettroniche che si propagano lungo le linee di alimentazione o di segnale, e che possono interferire con il funzionamento di altre apparecchiature connesse sulla stessa linea.

-Emissioni di disturbi irradiati: sono i disturbi originati dai dispositivi elettrici/elettronici che si propagano dall'involucro attraverso mezzo circostante, e possono raggiungere altri sistemi provocandone il malfunzionamento.

-Susceptibilità ai disturbi condotti: è la sensibilità di una apparecchiatura ai disturbi presenti sulle linee di alimentazione o di segnale originati da altre apparecchiature collegate alla stessa linea.

-Susceptibilità ai disturbi irradiati: è la sensibilità di una apparecchiatura ai disturbi presenti nell'ambiente circostante che si accoppiano con parti conduttive (masse metalliche, cavi, piste di circuiti stampati, etc.) provocando il malfunzionamento del sistema.

-Susceptibilità alle scariche di elettricità statica: è la sensibilità di una apparecchiatura al brusco passaggio di cariche elettrostatiche sulle sue parti metalliche (es. le cariche che si accumulano sui tessuti sintetici quando si cammina su pavimento isolante in atmosfera secca).

2.5 Problemi di esposizione del corpo umano a CEM

La massiccia penetrazione dell'elettronica in tutti i settori tecnologici e la sempre crescente domanda di energia elettrica hanno fatto sì che l'uomo si trovi quotidianamente immerso in campi elettromagnetici di diverse frequenze ed intensità.

Tra tutte le "macchine" che possono subire l'influenza delle onde elettromagnetiche, il corpo umano è sicuramente la più complessa: i campi elettromagnetici possono interferire con il suo buon "funzionamento"?

La valutazione dei rischi ai sensi del D. Lgs. 626/94 deve individuare le possibili fonti di emissioni elettromagnetiche e il rischio associato.

Capitolo 3

Decreto legislativo 626/94

Il presente decreto legislativo (testo unico) prescrive misure per la tutela della salute e per la sicurezza dei lavoratori durante il lavoro, in tutti i settori di attività privati o pubblici.

3.1 Principali novità organizzative

1. Ampliamento del concetto di “lavoratore”
2. Codifica dello scalettamento degli obblighi in materia di sicurezza
3. Definizione e modalità di effettuazione della delega di funzioni
4. Inserimento dei modelli organizzativi secondo OHSAS e Linee-guida UNI-INAIL come esimenti per la responsabilità amministrativa dell'ente ex D. lgs 231/2001
5. Principio di effettività
6. Obbligo di indicare espressamente “chi fa che cosa” relativamente alle misure di prevenzione individuate nel DVR
7. Codifica generale delle modalità di gestione relative agli appalti interni nelle aziende (ITP, DUVRI ecc..)
8. “Burocratizzazione” nelle procedure di utilizzo delle attrezzature e delle macchine (art 71, art 72)
9. Necessità di provvedere a corsi di formazione e di aggiornamento per i lavoratori

3.2 Ruoli e responsabilità in materia di sicurezza

Il Testo Unico non fa altro che “codificare “ quanto la Giurisprudenza sostiene da anni in materia di “scalettamento” o meglio di “condivisione” fra i diversi soggetti chiamati a rispondere penalmente per eventuali violazioni in materia di salute e sicurezza nei luoghi di lavoro.

Vengono infatti introdotte:

1. Le definizioni di Datore di Lavoro, Dirigente, Preposto (art 2, comma 1 lett b), d) e)
2. Gli obblighi di Datori di lavoro e dirigenti, separati da quelli dei preposti (art 18 e art 19)

1. Agli effetti delle disposizioni di cui al presente decreto si intendono per:

a) lavoratore: persona che presta il proprio lavoro alle dipendenze di un datore di lavoro, esclusi gli addetti ai servizi domestici e familiari, con rapporto di lavoro subordinato anche speciale. Sono equiparati i soci lavoratori di cooperative o di società, anche di fatto, e gli utenti dei servizi di orientamento o di formazione scolastica, universitaria e professionale avviati presso datori di lavoro per agevolare o per perfezionare le loro scelte professionali. Sono altresì equiparati gli allievi degli istituti di istruzione ed universitari, e i partecipanti a corsi di formazione professionale nei quali si faccia uso di laboratori, macchine, apparecchi ed attrezzature di lavoro in genere, agenti chimici, fisici e biologici

b) datore di lavoro: qualsiasi persona fisica o giuridica o soggetto pubblico che è titolare del rapporto di lavoro con il lavoratore e abbia la responsabilità dell'impresa ovvero dello stabilimento

c) servizio di prevenzione e protezione dai rischi: insieme delle persone, sistemi e mezzi esterni o interni all'azienda finalizzati all'attività di prevenzione e protezione dai rischi professionali nell'azienda, ovvero unità produttiva

d) medico competente: medico in possesso di uno dei seguenti titoli:

- 1) specializzazione in medicina del lavoro o in medicina preventiva dei lavoratori e psicotecnica o in tossicologia industriale o specializzazione equipollente
- 2) docenza o libera docenza in medicina del lavoro o in medicina preventiva dei lavoratori e psicotecnica o in tossicologia industriale o in igiene industriale o in fisiologia ed igiene del lavoro;
- 3) autorizzazione di cui all'art. 55 del Decreto legislativo 15 agosto 1991, n. 277;

e) responsabile del servizio di prevenzione e protezione: persona designata dal datore di lavoro in possesso di attitudini e capacità adeguate

f) rappresentante dei lavoratori per la sicurezza: persona, ovvero persone, elette o designate per rappresentare i lavoratori per quanto concerne gli aspetti della salute e sicurezza durante il lavoro

g) prevenzione: il complesso delle disposizioni o misure adottate o previste in tutte le fasi dell'attività lavorativa per evitare o diminuire i rischi professionali nel rispetto della salute della popolazione e dell'integrità dell'ambiente esterno

h) agente: l'agente chimico, fisico o biologico, presente durante il lavoro e potenzialmente dannoso per la salute.

i) dirigente: persona che, in ragione delle competenze professionali e di poteri gerarchici e funzionali adeguati alla natura dell'incarico conferitogli, attua le direttive del Datore di Lavoro organizzando l'attività lavorativa e vigilando su di essa

l) preposto: persona che, in ragione delle competenze professionali e nei limiti dei poteri gerarchici e funzionali adeguati alla natura dell'incarico conferitogli, sovrintende all'attività lavorativa e garantisce l'attuazione delle direttive ricevute, controllandone la corretta esecuzione da parte dei lavoratori ed esercitando un funzionale potere di iniziativa»

3.2.1 Obblighi del preposto

L'art. 19 individua gli obblighi posti a carico del preposto distintamente da quelli del datore di lavoro e del dirigente, mutuandoli dagli indirizzi giurisprudenziali. Nel dettaglio il preposto deve:

- a) sovrintendere e vigilare sulla osservanza da parte dei singoli lavoratori dei loro obblighi di legge, nonché delle disposizioni aziendali in materia di salute e sicurezza sul lavoro e di uso dei mezzi di protezione collettivi e dei dispositivi di protezione individuale messi a loro disposizione e, in caso di persistenza della inosservanza, informare i loro superiori diretti
- b) verificare affinché soltanto i lavoratori che hanno ricevuto adeguate istruzioni accedano alle zone che li espongono ad un rischio grave e specifico
- c) richiedere l'osservanza delle misure per il controllo delle situazioni di rischio in caso di emergenza e dare istruzioni affinché i lavoratori, in caso di pericolo grave, immediato e inevitabile, abbandonino il posto di lavoro o la zona pericolosa
- d) informare il più presto possibile i lavoratori esposti al rischio di un pericolo grave e immediato circa il rischio stesso e le disposizioni prese o da prendere in materia di protezione
- e) astenersi, salvo eccezioni debitamente motivate, dal richiedere ai lavoratori di riprendere la loro attività in una situazione di lavoro in cui persiste un pericolo grave ed immediato

- f) segnalare tempestivamente al datore di lavoro o al dirigente sia le deficienze dei mezzi e delle attrezzature di lavoro e dei dispositivi di protezione individuale, sia ogni altra condizione di pericolo che si verifichi durante il lavoro, delle quali venga a conoscenza sulla base della formazione ricevuta
- g) frequentare appositi corsi di formazione secondo quanto previsto dall'articolo 37.

3.3 Misure generali di tutela

Le misure generali per la protezione della salute e per la sicurezza dei lavoratori sono:

- a) valutazione dei rischi per la salute e la sicurezza
- b) eliminazione dei rischi in relazione alle conoscenze acquisite in base al progresso tecnico e, ove ciò non è possibile, loro riduzione al minimo
- c) riduzione dei rischi alla fonte
- d) programmazione della prevenzione mirando ad un complesso che integra in modo coerente nella prevenzione le condizioni tecniche produttive ed organizzative dell'azienda nonché l'influenza dei fattori dell'ambiente di lavoro
- e) sostituzione di ciò che è pericoloso con ciò che non lo è, o è meno pericoloso
- f) rispetto dei principi ergonomici nella concezione dei posti di lavoro, nella scelta delle attrezzature e nella definizione dei metodi di lavoro e produzione, anche per attenuare il lavoro monotono e quello ripetitivo
- g) priorità delle misure di protezione collettiva rispetto alle misure di protezione individuale
- h) limitazione al minimo del numero dei lavoratori che sono, o che possono essere, esposti al rischio
- i) utilizzo limitato degli agenti chimici, fisici e biologici, sui luoghi di lavoro
- l) controllo sanitario dei lavoratori in funzione dei rischi specifici
- m) allontanamento del lavoratore dall'esposizione a rischio, per motivi sanitari inerenti alla sua persona
- n) misure igieniche
- o) misure di protezione collettiva ed individuale
- p) misure di emergenza da attuare in caso di pronto soccorso, di lotta antincendio, di evacuazione dei lavoratori e di pericolo grave ed immediato
- q) uso di segnali di avvertimento e di sicurezza
- r) regolare manutenzione di ambienti, attrezzature, macchine ed impianti, con particolare riguardo ai dispositivi di sicurezza in conformità alla indicazione dei fabbricanti

s) informazione, formazione, consultazione e partecipazione dei lavoratori ovvero dei loro rappresentanti, sulle questioni riguardanti la sicurezza e la salute sul luogo di lavoro

t) istruzioni adeguate ai lavoratori

Le misure relative alla sicurezza, all'igiene ed alla salute durante il lavoro non devono in nessun caso comportare oneri finanziari per i lavoratori. Bisogna inoltre eseguire una valutazione dei rischi ovvero una valutazione globale e documentata di tutti i rischi per la salute e sicurezza dei lavoratori presenti nell'ambito dell'organizzazione in cui essi prestano la propria attività, finalizzata ad individuare le adeguate misure di prevenzione e di protezione e ad elaborare il programma delle misure atte a garantire il miglioramento nel tempo dei livelli di salute e sicurezza.

3.3.1 Informazioni che deve fornire il datore di lavoro al SPPR ed al medico

Natura dei rischi.

- L'organizzazione del lavoro, la programmazione e l'attuazione delle misure preventive e protettive.
- La descrizione degli impianti e dei processi produttivi.
- I provvedimenti adottati dagli organi di vigilanza.

I dati di cui al comma 1, lettera r e quelli relativi alle malattie professionali.

3.3.2 Identificazione dell'esposizione e valutazione dei rischi

1. Nell'ambito della valutazione dei rischi di cui all'articolo 181, il datore di lavoro valuta e, quando necessario, misura o calcola i livelli dei campi elettromagnetici ai quali sono esposti i lavoratori. La valutazione, la misurazione e il calcolo devono essere effettuati in conformità alle norme europee standardizzate del Comitato europeo di normalizzazione elettrotecnica (CENELEC). Finché le citate norme non avranno contemplato tutte le pertinenti situazioni per quanto riguarda la valutazione, misurazione e calcolo dell'esposizione dei lavoratori ai campi elettromagnetici, il datore di lavoro adotta le specifiche linee guida individuate o emanate dalla Commissione consultiva permanente per la prevenzione degli infortuni e per l'igiene del lavoro, o, in alternativa, quelle del Comitato Elettrotecnico italiano (CEI), tenendo conto, se necessario, dei livelli di emissione indicati dai fabbricanti delle attrezzature.

2. A seguito della valutazione dei livelli dei campi elettromagnetici effettuata in conformità al comma 1, qualora risulti che siano superati i valori di azione di cui all'articolo 208, il datore di lavoro valuta e, quando necessario, calcola se i valori limite di esposizione sono stati superati.

3. La valutazione, la misurazione e il calcolo di cui ai commi 1 e 2 non devono necessariamente essere effettuati in luoghi di lavoro accessibili al pubblico, purché si sia già proceduto ad una valutazione conformemente alle disposizioni relative alla limitazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz e risultino rispettate per i lavoratori le restrizioni previste dalla raccomandazione 1999/519/CE del Consiglio, del 12 luglio 1999, e siano esclusi rischi relativi alla sicurezza.

4. Nell'ambito della valutazione del rischio di cui all'articolo 181, il datore di lavoro presta particolare attenzione ai seguenti elementi:

- a) il livello, lo spettro di frequenza, la durata ed il tipo di esposizione
- b) i valori limite di esposizione ed i valori di azione di cui all'articolo 208

c)tutti gli effetti sulla salute e sulla sicurezza dei lavoratori particolarmente sensibili al rischio;
d)qualsiasi effetto indiretto quale:

1)interferenza con attrezzature e dispositivi medici elettronici(compresi stimolatori cardiaci ed altri dispositivi impiantati)
2)rischio propulsivo di oggetti ferromagnetici in campi magnetici statici con induzione magnetica superiore a 3 mT
3)innesco di dispositivi elettro - esplosivi (detonatori)
4)incendi ed esplosioni dovuti all'accensione di materiali infiammabili provocata da scintille prodotte da campi indotti, correnti di contatto o scariche elettriche

e)l'esistenza di attrezzature di lavoro alternative progettate per ridurre i livelli di esposizione ai campi elettromagnetici

g)per quanto possibile, informazioni adeguate raccolte nel corso della sorveglianza sanitaria, comprese le informazioni reperibili in pubblicazioni scientifiche

h)sorgenti multiple di esposizione

i)esposizione simultanea a campi di frequenze diverse

5. Il datore di lavoro nel documento di valutazione del rischio di cui all'articolo 28 precisa le misure adottate, previste dall'articolo 210.

3.4 Prescrizioni del Testo Unico

Il presente capo (IV(protezione dei lavoratori dai rischi di esposizione a campi elettromagnetici)) riguarda i rischi per la salute e la sicurezza, come definiti dall'articolo 207, dovuti agli effetti nocivi a breve termine conosciuti nel corpo umano derivanti dalla circolazione di correnti indotte e dall'assorbimento di energia, nonché da scosse elettriche ed ustioni,e da correnti di contatto. Il presente capo non riguarda la protezione da eventuali effetti a lungo termine ed i rischi risultanti dal contatto con i conduttori in tensione. Il Testo Unico stabilisce prescrizioni minime di protezione dei lavoratori contro i rischi per la loro salute e sicurezza che derivano, o possono derivare, dall'esposizione ai campi elettromagnetici(da 0 Hz a 300 GHz) durante il lavoro.

La direttiva assume le seguenti definizioni:

-Campi elettromagnetici: campi magnetici statici e campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici variabili nel tempo di frequenza inferiore o pari a 300 GHz.

-Valori limite di esposizione: limiti di esposizione a campi elettromagnetici che sono basati direttamente sugli effetti sulla salute accertati e su considerazioni biologiche. Il rispetto di questi limiti garantisce che i lavoratori esposti a i campi elettromagnetici siano protetti contro tutti gli effetti nocivi per la salute conosciuti.

-Valori di esposizione che fanno scattare l'azione: l'entità dei parametri direttamente misurabili, espressi in termini di intensità di campo elettrico (E), intensità di campo magnetico (H), induzione magnetica (B) e densità di potenza (S) che determina l'obbligo di adottare una o più delle misure specificate nella presente direttiva. Il rispetto di questi valori assicura il rispetto dei pertinenti valori limite di esposizione.

3.4.1 Campi elettrici e magnetici statici (0-1 Hz)

Non esistono, oggi, validi dati sperimentali su cui basare la scelta di limiti di esposizione al campo elettrico statico, e ciò spiega perché questo sia l'unico caso in cui l'ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) non abbia al momento emanato alcuna raccomandazione al riguardo. In linea di principio, un limite di esposizione potrebbe essere dedotto dal valore corrispondente al processo di ionizzazione dell'aria; ma questo dipende molto criticamente dalla forma del corpo e dal suo orientamento rispetto alla direzione del campo esterno, per cui tutte queste informazioni devono essere tenute in conto nella definizione di un limite di esposizione. Per quanto riguarda il campo magnetico, le attuali conoscenze scientifiche non suggeriscono alcun effetto nocivo sui principali parametri di sviluppo, comportamentali e fisiologici negli organismi superiori per effetto di esposizioni temporanee a induzioni magnetiche statiche fino a 2 T.

Dall'analisi dei meccanismi di interazione accertati, l'ICNIRP raccomanda che il limite di esposizione professionale sia pari a un valore di 200 mT mediato nel tempo su una giornata di lavoro, con un valore massimo di 2 T. Poiché le estremità non contengono grossi vasi sanguigni o organi critici, può essere consentito per esse un limite più elevato, pari a 5 T.

La restrizione di 200 mT è conservativa, prevedendo un fattore di sicurezza uguale a 10.

Per le ragioni precedentemente esposte, il limite di esposizione per la popolazione prevede un ulteriore fattore 5 di sicurezza, che si traduce in un limite per l'esposizione continua di 40 mT.

I limiti raccomandati dall'ICNIRP per le esposizioni dei lavoratori e della popolazione al campo magnetico statico sono riassunti nella tabella 3.1.

Tabella 3.1 limiti di esposizione a campi magnetici statici(*)

Caratteristiche dell'esposizione	Induzione magnetica
<i>Lavoratori</i>	200 mT
Giornata lavorativa (media pesata sul tempo)	2T
Valore mai superabile	
Estremità	5 T
<i>Popolazione</i>	
Esposizione continua	40 mT

(*) Avvertenze

a) Le persone che abbiano impiantati stimolatori cardiaci (*pacemaker*) e altri dispositivi azionati elettricamente o che abbiano impianti di materiale ferromagnetico potrebbero non essere adeguatamente protetti dai limiti qui forniti. La maggior parte degli stimolatori cardiaci sono difficilmente influenzati dall'esposizione a campi di 0.5 mT . Le persone che abbiano impiantate protesi ferromagnetiche o apparati azionati elettricamente (diversi dai *pacemaker*) possono avere problemi con campi superiori a pochi mT .

b) Quando l'induzione magnetica supera 3 mT , si devono prendere precauzioni per prevenire rischi dovuti a oggetti metallici messi dal campo in rapido movimento.

c) Orologi metallici, carte di credito, nastri magnetici, dischi per calcolatori, ecc., possono essere danneggiati da esposizioni a 1 mT ; ma ciò non è motivo di preoccupazione per la sicurezza degli individui.

d) L'accesso occasionale di individui della popolazione a particolari locali in cui l'induzione magnetica superi i 40 mT può essere consentito in condizioni opportunamente controllate, purché non vengano superati i limiti prescritti per i lavoratori.

La considerazione dei potenziali rischi dovuti all'interferenza di campi magnetici con dispositivi elettronici porta a raccomandare che, nei luoghi con induzione magnetica superiore a 0.5 T , siano affissi dei segnali di avvertimento. Si dovrebbe evitare che persone con *pacemaker* impiantati possano inavvertitamente entrare in aree con campi di livello tanto elevato da far sì che la maggior parte del torace dell'individuo possa trovarsi esposto a induzioni magnetiche superiori a 0.5 mT .

Considerazioni sui potenziali rischi dovuti al movimento o allo spostamento di dispositivi o materiali ferromagnetici impiantati (specialmente se l'oggetto è in un'area potenzialmente pericolosa del corpo, come vicino ad una struttura vitale neurale, vascolare o ad un tessuto molle o all'occhio) o sui rischi di schegge (proiettili) metalliche, portano a raccomandare che le aree con induzioni magnetiche al di sopra di 3 mT debbano essere indicate da specifici segnali di avvertimento.

Persone con stimolatori cardiaci, impianti ferromagnetici e dispositivi medicali impiantati potrebbero, quindi, non essere adeguatamente protette dai limiti riportati nella *tabella 1*.

3.4.2 Campi con frequenze comprese fra 1 Hz e 300 GHz

I limiti proposti dal TU sono basati, come già detto, su effetti acuti pienamente accertati, quali la stimolazione di muscoli e nervi periferici, scosse e ustioni derivanti dal contatto con conduttori e un aumento della temperatura dei tessuti dovuto all'assorbimento di energia. Il pregio delle scelte risiede nel rigore con cui vengono indicate le finalità perseguite e le procedure adottate. Le questioni non trattate, in particolare quelle connesse al rischio cancerogeno, sono esplicitate con chiarezza e non si può pervenire alla conclusione affrettata che il rispetto dei limiti proposti rappresenti, *tout-court*, una garanzia di assenza di rischi per la salute.

Rimandando alla lettura dell' allegato XXXVI del Testo Unico, le tabelle 3.2 e 3.3 mostrano i limiti di base proposti.

ALLEGATO XXXVI

VALORI LIMITE DI ESPOSIZIONE E VALORI DI AZIONE PER I CAMPI ELETTROMAGNETICI

Le seguenti grandezze fisiche sono utilizzate per descrivere l'esposizione ai campi elettromagnetici:

Corrente di contatto (I_C). La corrente che fluisce al contatto tra un individuo ed un oggetto conduttore caricato dal campo elettromagnetico. La corrente di contatto è espressa in Ampere (A).

Corrente indotta attraverso gli arti (I_I). La corrente indotta attraverso qualsiasi arto, a frequenze comprese tra 10 e 110 MHz, espressa in Ampere (A).

Densità di corrente (J). È definita come la corrente che passa attraverso una sezione unitaria perpendicolare alla sua direzione in un volume conduttore quale il corpo umano o una sua parte. È espressa in Ampere per metro quadro (A/m^2).

Intensità di campo elettrico. È una grandezza vettoriale (E) che corrisponde alla forza esercitata su una particella carica indipendentemente dal suo movimento nello spazio. È espressa in Volt per metro (V/m).

Intensità di campo magnetico. È una grandezza vettoriale (H) che, assieme all'induzione magnetica, specifica un campo magnetico in qualunque punto dello spazio. È espressa in Ampere per metro (A/m).

Induzione magnetica. È una grandezza vettoriale (B) che determina una forza agente sulle cariche in movimento. È espressa in Tesla (T). Nello spazio libero e nei materiali biologici l'induzione magnetica e l'intensità del campo magnetico sono legate dall'equazione $1 \text{ A m}^{-1} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}$.

Densità di potenza (S). Questa grandezza si impiega nel caso delle frequenze molto alte per le quali la profondità di penetrazione nel corpo è modesta. Si tratta della potenza radiante incidente perpendicolarmente a una superficie, divisa per l'area della superficie in questione ed è espressa in Watt per metro quadro (W/m^2).

Assorbimento specifico di energia (SA). Si definisce come l'energia assorbita per unità di massa di tessuto biologico e si esprime in Joule per chilogrammo (J/kg). Nella presente direttiva esso si impiega per limitare gli effetti non termici derivanti da esposizioni a microonde pulsate.

Tasso di assorbimento specifico di energia (SAR). Si tratta del valore mediato su tutto il corpo o su alcune parti di esso, del tasso di assorbimento di energia per unità di massa di tessuto corporeo ed è espresso in Watt per chilogrammo (W/kg). Il SAR a corpo intero è una misura ampiamente accettata per porre in rapporto gli effetti termici nocivi dell'esposizione a radiofrequenze (RF). Oltre al valore del SAR mediato su tutto il corpo, sono necessari anche valori locali del SAR per valutare e limitare la deposizione eccessiva di energia in parti piccole del corpo conseguenti a particolari condizioni di esposizione, quali ad esempio il caso di un individuo in contatto con la terra, esposto a RF dell'ordine di pochi MHz e di individui esposti nel campo vicino di un'antenna.

Tra le grandezze sopra citate, possono essere misurate direttamente l'induzione magnetica, la corrente indotta attraverso gli arti e la corrente di contatto, le intensità di campo elettrico e magnetico, e la densità di potenza.

A. VALORI LIMITE DI ESPOSIZIONE

Per specificare i valori limite di esposizione relativi ai campi elettromagnetici, a seconda della frequenza, sono utilizzate le seguenti grandezze fisiche:

-sono definiti valori limite di esposizione per la densità di corrente relativamente ai campi variabili nel tempo fino a 1 Hz, al fine di prevenire effetti sul sistema cardiovascolare e sul sistema nervoso centrale;

-fra 1 Hz e 10 MHz sono definiti valori limite di esposizione per la densità di corrente, in modo da prevenire effetti sulle funzioni del sistema nervoso;

-fra 100 kHz e 10 GHz sono definiti valori limite di esposizione per il SAR, in modo da prevenire stress termico sul corpo intero ed eccessivo riscaldamento localizzato dei tessuti. Nell'intervallo di frequenza compreso fra 100 kHz e 10 MHz, i valori limite di esposizione previsti si riferiscono sia alla densità di corrente che al SAR;

-fra 10 GHz e 300 GHz sono definiti valori limite di esposizione per la densità di potenza al fine di prevenire l'eccessivo riscaldamento dei tessuti della superficie del corpo o in prossimità della stessa.

Tabella 3.2 Valori limite di esposizione (articolo 188, comma 1). Tutte le condizioni devono essere rispettate.

Intervallo di frequenza	Densità di corrente per corpo e tronco J (mA/m ²) (rms)	SAR mediato sul corpo intero (W/kg)	SAR localizzato (capo e tronco) (W/kg)	SAR localizzato (arti) (W/kg)	Densità di potenza (W/m ²)
Fino a 1 Hz	40	/	/	/	/
1 – 4 Hz	40/f	/	/	/	/
4 – 1000 Hz	10	/	/	/	/
1000 Hz – 100 kHz	f/100	/	/	/	/
100 kHz – 10 Mhz	f/100	0,4	10	20	/
10 MHz – 10 GHz	/	0,4	10	20	/
10 – 300 GHz	/	/	/	/	50

Note:

1. f è la frequenza in Hertz.

2. I valori limite di esposizione per la densità di corrente si prefiggono di proteggere dagli effetti acuti, risultanti dall'esposizione, sui tessuti del sistema nervoso centrale nella testa e nel torace. I valori limite di esposizione nell'intervallo di frequenza compreso fra 1 Hz e 10 MHz sono basati sugli effetti nocivi accertati sul sistema nervoso centrale. Tali effetti acuti sono essenzialmente istantanei e non v'è alcuna giustificazione scientifica per modificare i valori limite di esposizione nel caso di esposizioni di breve durata. Tuttavia, poiché i valori limite di esposizione si riferiscono agli effetti nocivi sul sistema nervoso centrale, essi possono permettere densità di corrente più elevate in tessuti corporei diversi dal sistema nervoso centrale a parità di condizioni di esposizione.

3. Data la non omogeneità elettrica del corpo, le densità di corrente dovrebbero essere calcolate come medie su una sezione di 1 cm² perpendicolare alla direzione della corrente.

4. Per le frequenze fino a 100 kHz, i valori di picco della densità di corrente possono essere ottenuti moltiplicando il valore efficace rms per $(2)^{1/2}$.

5. Per le frequenze fino a 100 kHz e per i campi magnetici pulsati, la massima densità di corrente associata agli impulsi può essere calcolata in base ai tempi di salita/discesa e al tasso massimo di variazione dell'induzione magnetica. La densità di corrente indotta può essere confrontata con il corrispondente valore limite di esposizione. Per gli impulsi di durata t_p la frequenza equivalente per l'applicazione dei limiti di esposizione va calcolata come $f = 1/(2t_p)$.
6. Tutti i valori di SAR devono essere ottenuti come media su un qualsiasi periodo di 6 minuti.
7. La massa adottata per mediare il SAR localizzato è pari a ogni 10 g di tessuto contiguo. Il SAR massimo ottenuto in tal modo costituisce il valore impiegato per la stima dell'esposizione. Si intende che i suddetti 10 g di tessuto devono essere una massa di tessuto contiguo con proprietà elettriche quasi omogenee. Nello specificare una massa contigua di tessuto, si riconosce che tale concetto può essere utilizzato nella dosimetria numerica ma che può presentare difficoltà per le misurazioni fisiche dirette. Può essere utilizzata una geometria semplice quale una massa cubica di tessuto, purché le grandezze dosimetriche calcolate assumano valori conservativi rispetto alle linee guida in materia di esposizione.
8. Per esposizioni pulsate nella gamma di frequenza compresa fra 0,3 e 10 GHz e per esposizioni localizzate del capo, allo scopo di limitare ed evitare effetti uditivi causati da espansione termoelastica, si raccomanda un ulteriore valore limite di esposizione. Tale limite è rappresentato dall'assorbimento specifico (SA) che non dovrebbe superare 10 mJ/kg calcolato come media su 10 g di tessuto.
9. Le densità di potenza sono ottenute come media su una qualsiasi superficie esposta di 20 cm² e su un qualsiasi periodo di $68/f^{1,05}$ minuti (f in GHz) per compensare la graduale diminuzione della profondità di penetrazione con l'aumento della frequenza. Le massime densità di potenza nello spazio, mediate su una superficie di 1 cm², non dovrebbero superare 20 volte il valore di 50 W/m².
10. Per quanto riguarda i campi elettromagnetici pulsati o transitori o in generale per quanto riguarda l'esposizione simultanea a campi di frequenza diversa, è necessario adottare metodi appropriati di valutazione, misurazione e/o calcolo in grado di analizzare le caratteristiche delle forme d'onda e la natura delle interazioni biologiche, tenendo conto delle norme armonizzate europee elaborate dal CENELEC.

B. VALORI DI AZIONE

I valori di azione di cui alla tabella 3 sono ottenuti a partire dai valori limite di esposizione secondo le basi razionali utilizzate dalla Commissione internazionale per la protezione dalle radiazioni non ionizzanti (ICNIRP) nelle sue linee guida sulla limitazione dell'esposizione alle radiazioni non ionizzanti (ICNIRP 7/99).

Tabella 3.3 Valori di azione (art. 188, comma 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 (μ T)	Densità di potenza di onda piana S_{eq} (W/m ²)	Corrente di contatto, I_C (mA)	Corrente indotta attraverso gli arti I_L (mA)
0 – 1 Hz	/	$1,63 \times 10^5$	2×10^5	/	1,0	/
1 – 8 Hz	20000	$1,63 \times 10^5 / f^2$	$2 \times 10^5 / f^2$	/	1,0	/
8 – 25 Hz	20000	$2 \times 10^4 / f$	$2,5 \times 10^4 / f$	/	1,0	/
0,025 – 0,82 kHz	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	/	0,4f	/
65 – 100 kHz	610	1600/f	2000/f	/	0,4f	/
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 – 2000 MHz	$3f^{1/2}$	$0,008f^{1/2}$	$0,01f^{1/2}$	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.
2. Per le frequenze comprese fra 100 kHz e 10 GHz, S_{eq} , E^2 , H^2 , B^2 e I_L devono essere calcolati come medie su un qualsiasi periodo di 6 minuti.

3. Per le frequenze che superano 10 GHz, S_{eq} , E^2 , H^2 e B^2 devono essere calcolati come medie su un qualsiasi periodo di $68/f^{1,05}$ minuti (f in GHz).

4. Per le frequenze fino a 100 kHz, i valori di azione di picco per le intensità di campo possono essere ottenuti moltiplicando il valore efficace rms per $(2)^{1/2}$. Per gli impulsi di durata t_p la frequenza equivalente da applicare per i valori di azione va calcolata come $f = 1/(2t_p)$.

Per le frequenze comprese tra 100 kHz e 10 MHz, i valori di azione di picco per le intensità di campo sono calcolati moltiplicando i pertinenti valori efficaci (rms) per 10^a , dove $a = (0,665 \log(f/10) + 0,176)$, f in Hz.

Per le frequenze comprese tra 10 MHz e 300 GHz, i valori di azione di picco sono calcolati moltiplicando i valori efficaci (rms) corrispondenti per 32 nel caso delle intensità di campo e per 1000 nel caso della densità di potenza di onda piana equivalente.

5. Per quanto riguarda i campi elettromagnetici pulsati o transitori o in generale l'esposizione simultanea a campi di frequenza diversa, è necessario adottare metodi appropriati di valutazione, misurazione e/o calcolo in grado di analizzare le caratteristiche delle forme d'onda e la natura delle interazioni biologiche, tenendo conto delle norme armonizzate europee elaborate dal CENELEC.

6. Per i valori di picco di campi elettromagnetici pulsati modulati si propone inoltre che, per le frequenze portanti che superano 10 MHz, S_{eq} valutato come media sulla durata dell'impulso non superi di 1000 volte i valori di azione per S_{eq} , o che l'intensità di campo non superi di 32 volte i valori di azione dell'intensità di campo alla frequenza portante.

3.5 Norme CEI 211-6 e 211-7

L'analisi dei dati ottenuti attraverso le indagini epidemiologiche porta oggi a distinguere, all'interno dell'intero spettro elettromagnetico non ottico, due campi di frequenza rilevanti dal punto di vista delle applicazioni e fra loro ben differenziati: la gamma dei campi a frequenze estremamente basse (ELF), egemonizzata dalla frequenza (50 Hz), utilizzata per la rete elettrica, e la gamma delle radiofrequenze e microonde (100 kHz-300 GHz), con vaste applicazioni nei processi industriali, nel settore delle telecomunicazioni e in medicina; un terzo campo meno esplorato ma di potenziale interesse è quello dei campi statici e dei campi a frequenze inferiori a 10 Hz.

CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano)

- i. Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche. Norma CEI 211-4, Milano, 1996.
- ii. Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0Hz-10kHz, con riferimento all'esposizione umana. Norma CEI 211-6, Milano, 2001.
- iii. Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10kHz-300GHz, con riferimento all'esposizione umana. Norma CEI 211-7, Milano, 2001.
- iv. Guida alla realizzazione di una Stazione Radio Base per rispettare i limiti di esposizione ai campi elettromagnetici in alta frequenza. Norma CEI 211-10, Milano, 2002.

Ai fini di questa tesi interessano solo la seconda e la terza norma.

Pur presentando alcune specificità in relazione alle diverse frequenze in gioco e ai diversi tipi di sorgente, le due guide hanno strutture molto simili comprendendo le seguenti parti principali:

- definizione delle grandezze fisiche che determinano l'esposizione (grandezze interne e grandezze esterne), delle grandezze da misurare, delle unità di misura

- descrizione dei campi elettromagnetici in relazione al tipo di sorgente, alla gamma di frequenze interessata, alle distanze dei punti di misura dalla sorgente, alle caratteristiche dell'ambiente di misura
- descrizione dei vari tipi di sorgente (intenzionali e non intenzionali) riportando, per i più importanti, le gamme di frequenze e i livelli tipici dei campi emessi alle distanze di interesse
- specificazione delle caratteristiche della strumentazione idonea (sensori e sistemi di visualizzazione e registrazione) per la rilevazione delle varie grandezze caratterizzanti l'esposizione umana ai campi elettromagnetici
- indicazioni sulle modalità di taratura e di verifica in campo della catena strumentale
- definizione delle modalità di misura, raccolta, elaborazione e presentazione dei risultati, in funzione del tipo di sorgente, delle frequenze interessate e delle finalità delle misure.

3.5.1 CEI 211-6

È una guida per la misura e per la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0 Hz-100 kHz, con riferimento all'esposizione umana.

Accoppiamento con i campi elettrici a bassa frequenza

L'accoppiamento di campi elettrici variabili nel tempo con il corpo umano dà luogo ad un flusso di cariche elettriche (corrente elettrica), alla polarizzazione di cariche legate (formazione di dipoli elettrici) e al riorientamento di dipoli elettrici già presenti nei tessuti. L'importanza relativa di questi diversi effetti dipende dalle proprietà elettriche del corpo, cioè dalla conducibilità elettrica (che governa il flusso della corrente elettrica) e dalla permittività (che governa l'entità degli effetti di polarizzazione). La conducibilità e la permittività elettriche variano con il tipo di tessuto corporeo e dipendono anche dalla frequenza del campo applicato. I campi elettrici esterni al corpo inducono su questo una carica superficiale; quest'ultima dà luogo a correnti indotte nel corpo, la cui distribuzione dipende dalle condizioni di esposizione, dalle dimensioni e dalla forma del corpo e dalla sua posizione nel campo.

Accoppiamento con i campi magnetici a bassa frequenza

L'interazione fisica dei campi magnetici variabili nel tempo con il corpo umano dà luogo a campi elettrici indotti e alla circolazione di correnti elettriche. L'intensità del campo indotto e la densità di corrente sono proporzionali al raggio della spira, alla conducibilità elettrica del tessuto nonché alla velocità di variazione ed al valore dell'induzione magnetica. Per una data intensità e una data frequenza del campo magnetico, i campi elettrici più intensi sono indotti laddove le dimensioni della spira sono maggiori. L'esatto percorso e l'intensità della corrente indotta in ciascuna parte del corpo dipende dalla conducibilità elettrica del tessuto.

Il corpo non è elettricamente omogeneo; tuttavia, la densità delle correnti indotte può essere calcolata usando modelli realistici dal punto di vista anatomico ed elettrico assieme a metodi di calcolo che presentano un alto grado di risoluzione anatomica. La misura dei campi elettrici e magnetici a bassa frequenza si verifica sempre nella regione di campo vicino reattivo, cioè a distanze dalle sorgenti inferiori alla lunghezza d'onda λ . Si osserva, infatti, che, anche con riferimento al limite estremo superiore della gamma di frequenza considerata nella guida CEI 211-6 (10 KHz), la lunghezza d'onda λ vale circa 30 km, valore molto elevato rispetto alle distanze di misura d'interesse. Nella regione di campo vicino reattivo non esiste nessuna correlazione tra campo elettrico e campo magnetico: il primo dipende dalle tensioni presenti nell'impianto o nell'apparecchiatura che produce tali campi, il secondo dalle correnti in essi circolanti, essendo tensioni e correnti quantità generalmente del tutto indipendenti. Il rapporto tra campo elettrico e campo magnetico non è in nessun modo correlato con l'impedenza d'onda Z_0 dell'onda piana, caratteristica delle regioni di campo lontano. Per esempio tale rapporto è molto più elevato di Z_0 nel

caso di impianti elettrici ad alta tensione con modeste correnti di carico, mentre può essere molto più basso di Z_0 nel caso di impianti ed apparecchiature a bassa tensione interessate da circolazione di correnti di valore elevato. A differenza quindi di quanto accade per i campi elettromagnetici ad alta frequenza, per i quali la misura viene generalmente condotta nella regione di campo lontano, per i campi a bassa frequenza la caratterizzazione completa deve prevedere in ogni caso la misura di entrambe le componenti: campo elettrico e campo magnetico.

I campi magnetici ed elettrici prodotti dai vari tipi di sorgente (linee e stazioni elettriche, sistemi elettrici di trasporto, apparecchi elettrici) hanno caratteristiche diverse in relazione alle ampiezze, alle frequenze fondamentali, al contenuto armonico, al grado di polarizzazione, alle variazioni spaziali ed alle variazioni temporali. È opportuno fornire una breve descrizione di queste caratteristiche, considerata la loro importanza per la definizione delle prescrizioni per gli strumenti di misura dei campi.

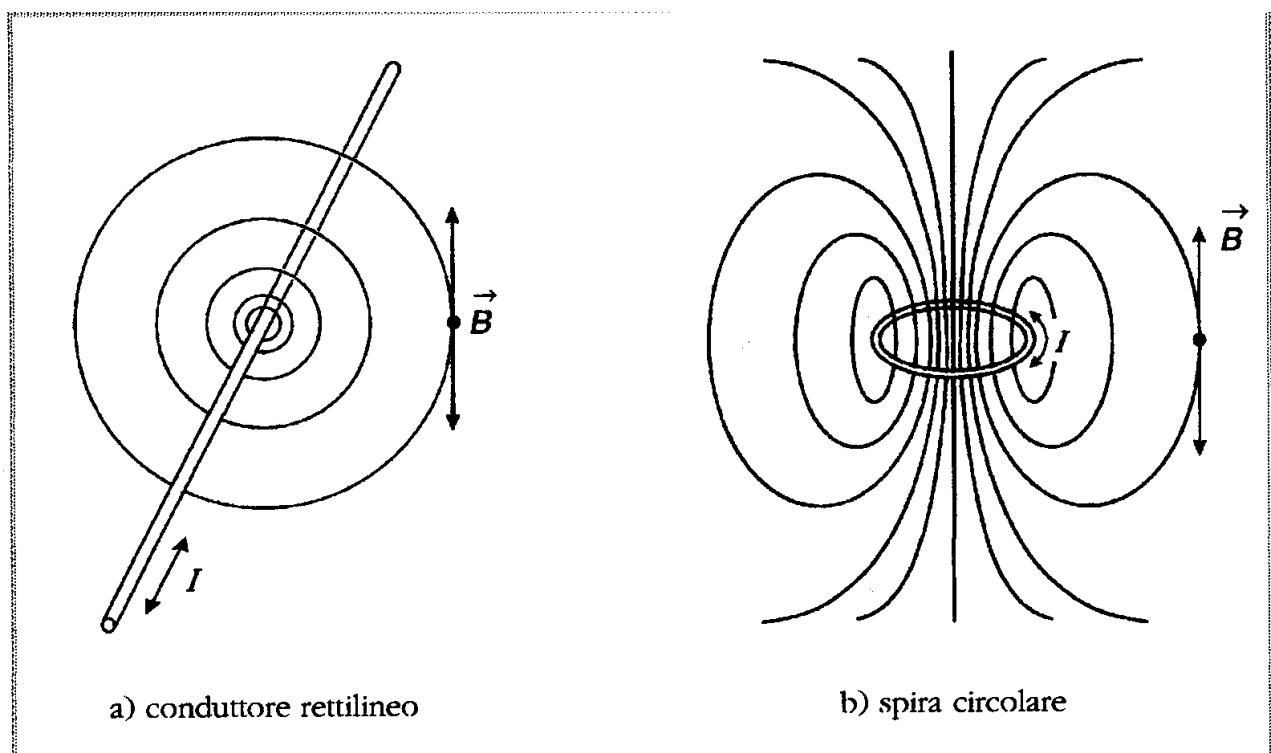
Influenza dei parametri delle sorgenti

Vicino al livello del suolo, l'ampiezza del campo elettrico e, anche se in misura minore, quella del campo magnetico prodotto da una linea di trasmissione trifase varia poco in funzione dell'altezza del punto di misura al di sopra del suolo. Per esempio, per una tipica linea a 380 kV, la variazione nell'ampiezza del campo magnetico, per punti al di sotto della linea a distanza attorno ad 1 m sul suolo, è inferiore al 2% per una variazione del 10% nell'altezza di misura; tale uniformità aumenta allontanandosi dalla linea.

A distanze elevate da una linea trifase a semplice terna, con correnti bilanciate o quasi bilanciate, l'ampiezza del campo magnetico diminuisce approssimativamente secondo $1/r^2$, essendo r la distanza laterale dalla linea (si suppone che r sia molto più grande della distanza tra i conduttori).

All'aumentare dello sbilanciamento della corrente, la legge di diminuzione dell'ampiezza del campo magnetico con la distanza cambia da $1/r^2$ a $1/r$.

Fig. 3.1 Induzione magnetica prodotta dalla corrente circolante in conduttori rettilinei e spire circolari.



Il campo magnetico prodotto dalle linee trifase bilanciate a doppia terna con una disposizione delle fasi per ottenere una bassa reattanza (correnti di carico identiche o quasi identiche nelle due terne) diminuisce approssimativamente secondo $1/r^3$, qualora r sia ancora molto maggiore della distanza tra i conduttori. Le variazioni temporali del campo magnetico sono soprattutto legate alle variazioni della corrente di carico delle linee; un altro fattore di influenza su tali variazioni temporali è la variazione di freccia dei conduttori per cause meccaniche e climatiche.

Per esaminare le altre sorgenti di campo magnetico che si possono riscontrare nei diversi ambienti, si presentano qui due configurazioni elementari, che certamente non rappresentano in modo realistico le configurazioni reali, ma che aiutano ad individuare alcune leggi di variazioni con la distanza che comprendono quelle relative ai vari impianti ed apparecchiature di interesse. Tali configurazioni elementari sono: i sistemi conduttori rettilinei e paralleli (per rappresentare, per esempio, i sistemi di conduttori degli impianti utilizzatori, comprese le connessioni di terra) e le spire approssimativamente circolari (che possono trovarsi, per esempio, nei trasformatori, nei motori, nei videotermini).

Le figure 3.1a e 3.1b rappresentano schematicamente gli andamenti del campo magnetico prodotto da tali sorgenti elementari. Trattandosi di elementi monofase i campi magnetici sono linearmente polarizzati e la dipendenza dal campo dei vettori oscillanti è funzione della forma d'onda delle correnti. Le correnti sinusoidali producono campi magnetici sinusoidali privi di armoniche, le correnti non sinusoidali (ad esempio le forme d'onda a denti di sega generate da bobine di deflessione dei televisori) producono campi magnetici non sinusoidali che possono essere ricchi di armoniche. Le ampiezze dei campi magnetici prodotti dalle correnti nel filo rettilineo, infinitamente lungo, ed in una spira circolare, diminuiscono rispettivamente secondo $1/r$ e $1/r$, dove r è la distanza dalla sorgente di campo (nel secondo caso si suppone che r sia molto più grande del raggio della spira).

3.5.1.1 Caratteristiche delle sorgenti

Campo elettrico

Linee e stazioni elettriche ad alta tensione. Esse possono interessare l'esposizione della popolazione; le linee elettriche in cavo non producono invece campo elettrico esterno.

Il campo elettrico prodotto da una linea aerea in un dato punto dipende in primo luogo dal livello di tensione e della distanza dal punto dalla linea ed in seconda istanza dalla configurazione della linea stessa. A parità di configurazione ovviamente il campo elettrico cresce all'aumentare della tensione e diminuisce all'aumentare della distanza.

I parametri che maggiormente influenzano il campo elettrico sono: l'altezza della linea, la distanza fra le fasi e la loro disposizione, le dimensioni del conduttore o del fascio di conduttori, la presenza o meno di funi di guardia. Inoltre va ricordato che il campo elettrico al suolo è molto influenzato dalla presenza di oggetti, anche se scarsamente conduttori.

Fig. 3.2 Profili laterali del campo elettrico, a 1 m da terra, calcolato per cinque tipiche configurazioni di linee ad alta tensione nella sezione corrispondente ai più gravosi franchi minimi stabiliti dalla legislazione vigente.

LEGENDA

- A: Semplice terna a 380 kV
- B: Doppia terna a 380 kV
- C: Semplice terna a 220 kV
- D: Semplice terna a 132 kV
- E: Semplice terna a 132 kV con disposizione orizzontale dei conduttori

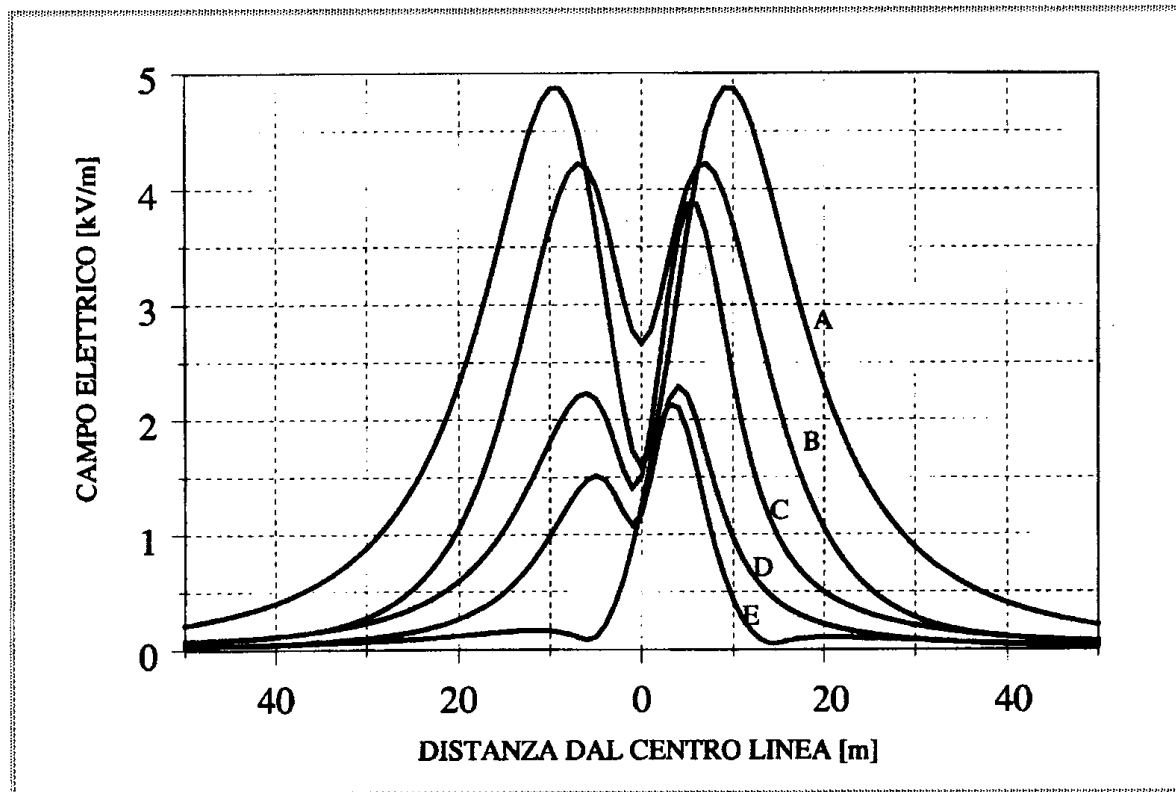
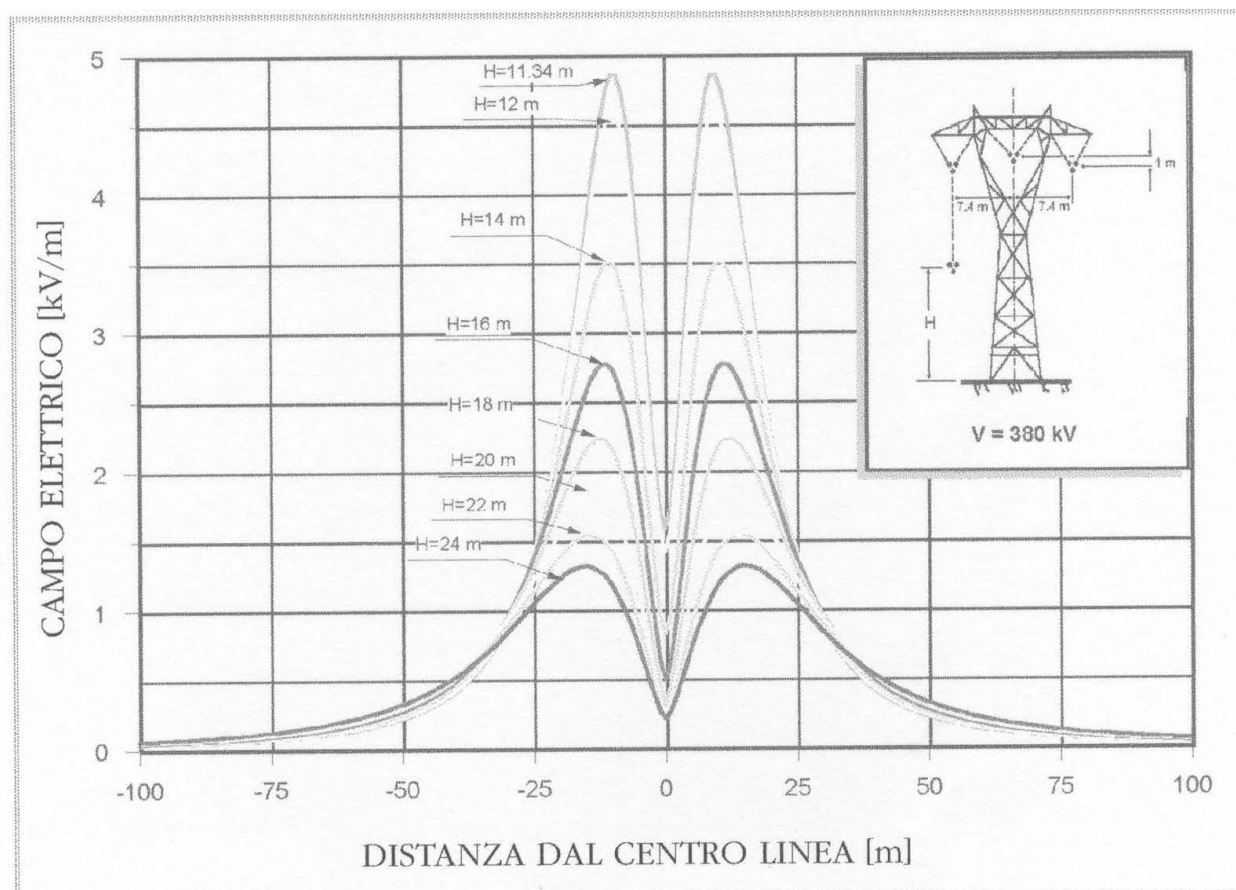


Fig. 3.3 Profili laterali del campo elettrico, a 1 m dal suolo, calcolati, per una linea a 380 kVa semplice terna, in diverse sezioni trasversali di una campata (diverse altezze h da terra dei conduttori).



Negli ambienti domestici e similari i campi elettrici prodotti dagli impianti di distribuzione dell'energia elettrica e delle apparecchiature sono di entità molto minore rispetto a quelli associati alle linee e stazioni elettriche ad alta tensione.

Campo magnetico

Come per i campi elettrici, le linee elettriche ad alta tensione sono sorgenti di campo magnetico a bassa frequenza che possono interessare l'esposizione della popolazione.

Contrariamente a quanto avviene per il campo elettrico, le linee in cavo interrato sono sorgenti di campo magnetico, in quanto le guaine dei cavi non costituiscono un efficace schermatura a tale riguardo. Il campo magnetico prodotto da una linea aerea in un dato punto dipende in primo luogo dal valore della corrente transitante in linea dalla distanza del punto della linea ed in seconda istanza dalla configurazione della linea stessa. A parità di configurazione ovviamente il campo magnetico cresce all'aumentare della corrente e diminuisce all'aumentare della distanza.

I parametri legati alla configurazione che influenzano maggiormente il campo magnetico al suolo sono: l'altezza della linea, la distanza fra le fasi e la loro disposizione, la presenza o meno di funi di guardia. Va ancora sottolineato che il campo magnetico prodotto dalle linee elettriche, dipendendo dalla corrente, che, a differenza della tensione, varia notevolmente al variare delle condizioni di carico delle linee stesse, può assumere valori assai diversi in diversi periodi di osservazione e deve essere quindi analizzato in termini statistici.

Fig. 3.4 Profili laterali dell'induzione magnetica, a 1 m da terra, calcolata per cinque tipiche configurazioni di linee ad alta tensione nella sezione corrispondente ai più gravosi franchi minimi stabiliti dalla legislazione vigente.

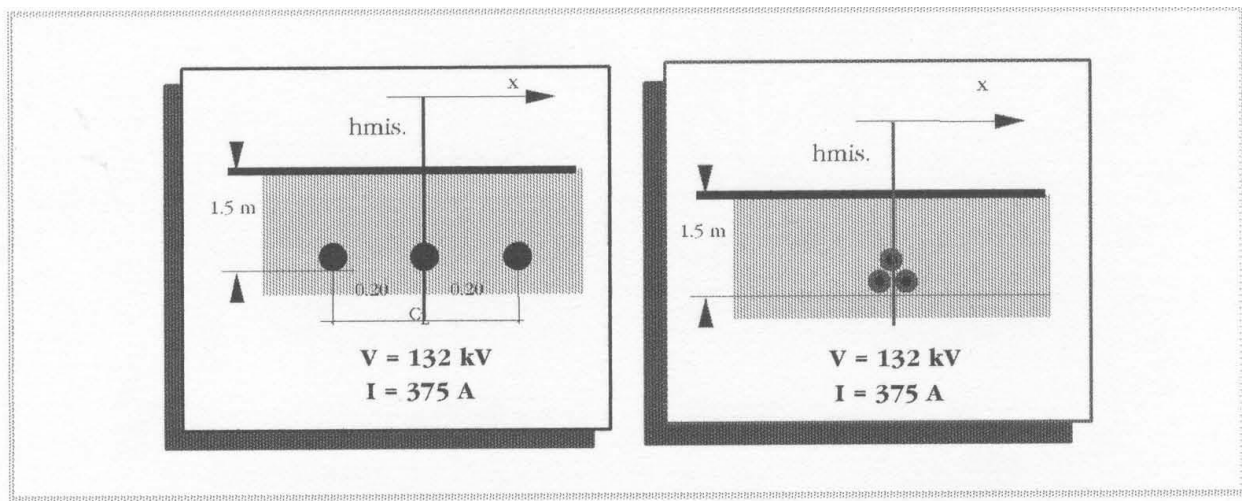


Fig. 3.5 Due tipici sistemi di linea in cavo con indicazione della corrente di riferimento per il calcolo dei campi magnetici di fig. 3.6

LEGENDA

Condizioni di riferimento per il calcolo:

- A: Semplice terna a 380 kV, carico 400 A; B: doppia terna a 380 kV, carico 400 A
- C: Semplice terna a 220 kV, carico 200 A; D: semplice terna a 132 kV, carico 100 A
- E: Semplice terna a 132 kV con disposizione verticale dei conduttori, carico 100 A

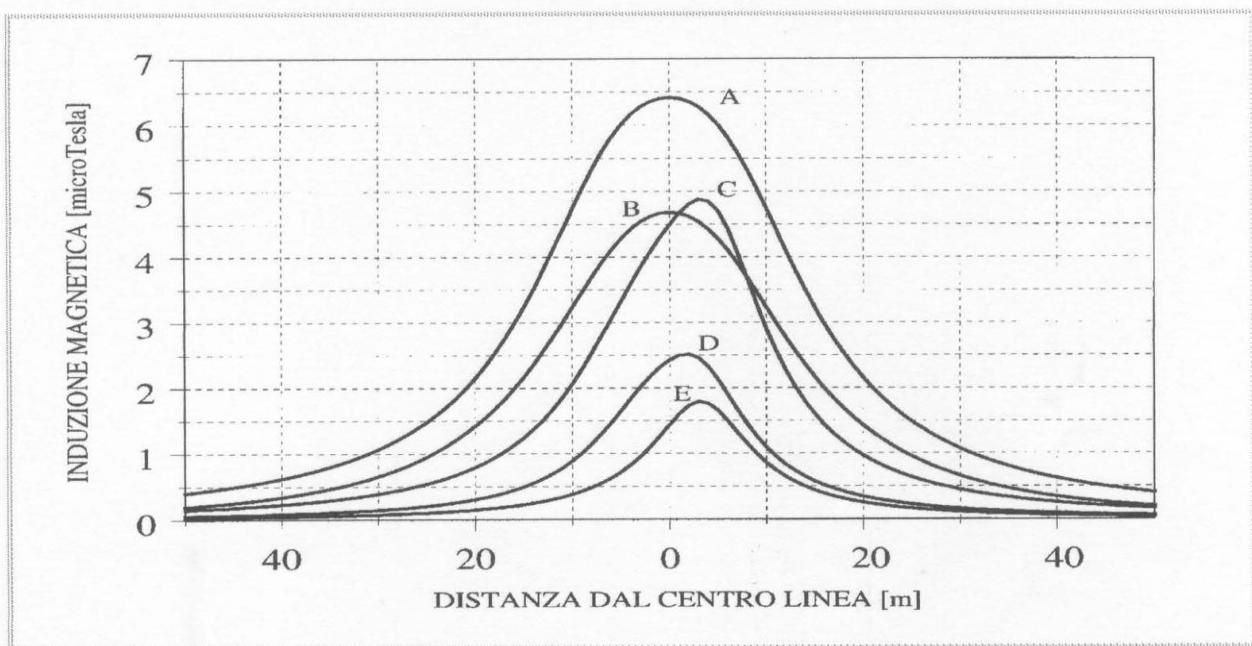
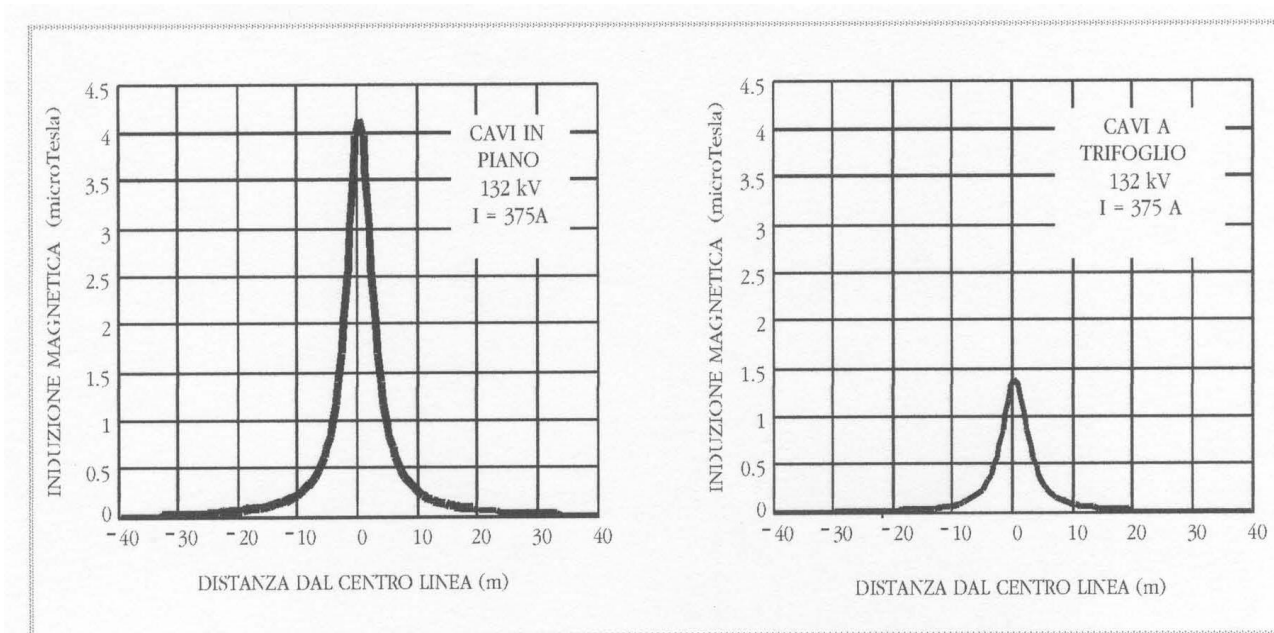


Fig. 3.6 Profili laterali dell'induzione magnetica relativa ai due sistemi tipici in cavo interrato riportati in fig. 3.5.



Mentre il campo elettrico è assai modesto nella maggior parte degli ambienti industriali e degli ambienti domestici e pubblici, gli impianti elettrici e le numerose apparecchiature presenti in tali ambienti sono sorgenti di campo magnetico.

Essa però decresce molto rapidamente con l'aumentare della distanza.

In figura 3.7 e nella tabella 3.4 sono rappresentati alcuni valori di induzione magnetica e la loro variazione in funzione della variazione spaziale.

Fig. 3.7 Risultati di misure di induzione magnetica effettuate a diverse distanze da: televisori(A); stufe elettriche(B); asciugacapelli(C); aspirapolvere(D).

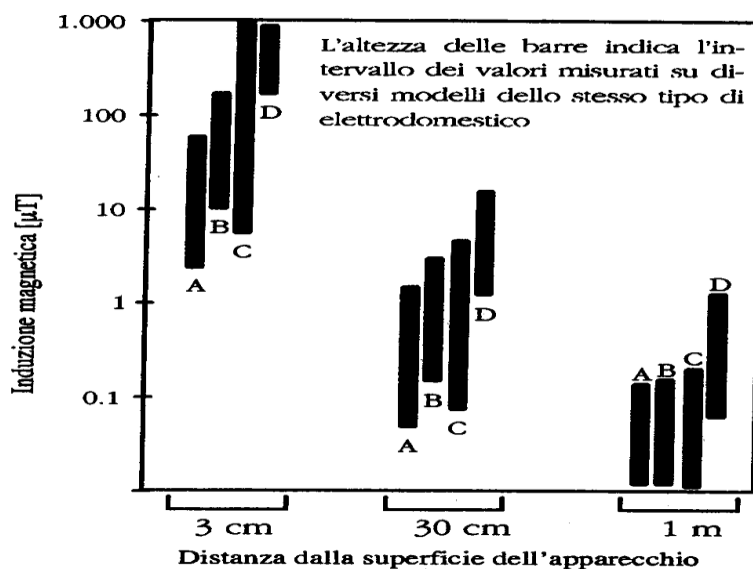


Tabella 3.4 Livelli di esposizione di sorgenti di campo magnetico a frequenza industriale.

Sorgente	Induzione magnetica (μT)	Distanza
Rasoio elettrico	150-240	Sul viso
Asciugacapelli	13-1	10-20 cm
Frullatore	0,9	40 cm
Lampada alogena 12 V, 20 W	0,5	30 cm
Apparecchio aerosolterapia	50-20	20-30 cm
Coperta elettrica	2	A contatto
TV 21 pollici	0,3	50 cm
Lavabiancheria	3,4	50 cm
Lavastoviglie	0,05	50 cm
Forno elettrico	0,4	20 cm
Trapano 600 W	2	Sul busto
Saldatore 100 W	14,5	Sul busto
Mola 225 W	0,8	40 cm
Compressore 1100 W	8,2	40 cm
Saldatrice ad arco 2150 W	23,2	40 cm
Forno ad arco 75 MW, 55-65 kA, 150 t	100-270	In prossimità
Bisturi elettrico	2,9	In prossimità
Carica batterie	22,9	In prossimità
Ecografo	0,8	Posto operatore
Proiettore lavagna luminosa	2,3	20 cm

3.5.1.2 Misure

Nell'ambito della normativa per la protezione delle persone da esposizione ai campi elettrici e magnetici a bassa frequenza devono essere stabilite tecniche di misura appropriate per la verifica dei livelli di campo in ambienti ed aree potenzialmente a rischio.

La problematica delle misure si presenta alquanto articolata in relazione:

- alla tipologia ed all'eventuale molteplicità delle sorgenti
- alle caratteristiche del campo emesso dalle sorgenti (ampiezza, contenuto in frequenza, polarizzazione)
- alle caratteristiche del campo nell'area di misura (variabilità spaziale e temporale);
- all'obiettivo delle misure (sorveglianza, indagine sistematica, analisi puntuale, interventi di bonifica)

A questa varietà di situazioni può corrispondere una diversificazione della strumentazione e della metodologia da utilizzare nelle misure.

3.5.1.3. Misure di esposizione

Per effettuare misure di esposizione nell'intervallo di frequenze 0 Hz-100 kHz è necessario adottare varie tecniche e diversi strumenti di misura, in relazione al tipo di campo, all'ambiente ed allo scopo delle misure.

La valutazione dell'esposizione viene condotta attraverso la misura delle seguenti grandezze:

- valore efficace del campo elettrico E (espresso in V/m)

-valore efficace dell'induzione magnetica B (espresso in T-Wb/m²)

In bassa frequenza è necessario eseguire la misura di entrambe le grandezze; non esiste infatti un semplice rapporto tra tali grandezze nella regione di campo vicino reattivo dove vengono sempre eseguite le misure. Fatta eccezione per i casi in cui si conosca a priori la forma d'onda del campo (per esempio in prossimità di linee elettriche aeree), occorre valutare innanzitutto la forma d'onda del campo e quindi l'opportunità di eseguire le misure in banda stretta (selettive) oppure in banda larga e di eseguire, in alternativa o in aggiunta alla misura del valore efficace, anche quella del valore di picco o del valore medio.

3.5.1.4 Misure dosimetriche

Le misure dosimetriche sono essenzialmente orientate alla validazione dei modelli.

Si tratta di misure della densità della corrente indotta su fantocci simulanti il corpo umano, esposti a campi elettrici e magnetici di caratteristiche note. La letteratura tecnica riporta risultati di misure eseguite principalmente per esposizione a campi elettrici; poche esperienze sono disponibili con riferimento al campo magnetico. Negli ultimi anni inoltre si è notata una notevole riduzione del numero di misure dosimetriche, in quanto si preferisce sempre più impiegare modelli analitici che sono molto più accurati, avanzati e versatili.

3.5.2 CEI 211-7

Essa è una guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 100 kHz-300 GHz, con riferimento all'esposizione umana.

Assorbimento di energia elettromagnetica

L'esposizione a campi elettrici e magnetici a bassa frequenza normalmente dà luogo ad un assorbimento di energia trascurabile e non produce alcun aumento misurabile di temperatura nel corpo. Invece, l'esposizione a campi elettromagnetici di frequenza superiore a circa 100 kHz può portare a significativi assorbimenti di energia e aumenti di temperatura. In generale, l'esposizione a un campo elettromagnetico uniforme (onda piana) dà luogo a una deposizione e ad una distribuzione dell'energia nel corpo molto disuniformi, che devono essere valutate mediante misure e calcoli dosimetrici. Dal punto di vista dell'assorbimento di energia da parte del corpo umano, i campi elettromagnetici possono essere suddivisi in quattro intervalli di frequenza (Durney et al. 1985):

- frequenze da circa 100 kHz a circa 20 MHz, per le quali l'assorbimento nel tronco diminuisce rapidamente al decrescere della frequenza, mentre assorbimenti significativi possono prodursi nel collo e nelle gambe
- frequenze nell'intervallo tra circa 20 MHz e 300 MHz, per le quali si può presentare un assorbimento relativamente alto nel corpo intero, ed uno ancora più elevato se si considerano gli effetti di risonanza in singole parti del corpo (ad esempio la testa)
- frequenze nell'intervallo da circa 300 MHz a qualche gigahertz, in corrispondenza delle quali si verifica un significativo e non uniforme assorbimento locale
- frequenze superiori a circa 10 GHz, per le quali l'assorbimento di energia ha luogo soprattutto sulla superficie del corpo.

Nei tessuti, il SAR è proporzionale al quadrato dell'intensità del campo elettrico interno. Il SAR medio e la distribuzione del SAR possono essere calcolati o stimati da misure di laboratorio. I valori del SAR dipendono dai seguenti fattori:

- parametri che caratterizzano il campo incidente, cioè frequenza, intensità, polarizzazione e posizione relativa della sorgente e dell'oggetto (campo vicino o lontano)

-caratteristiche del corpo esposto, cioè dimensioni e geometria interna e esterna, nonché proprietà dielettriche dei vari tessuti
-effetti di contatto a terra ed effetti di riflessione da parte di altri oggetti nel campo, vicino al corpo esposto.

Quando l'asse maggiore del corpo umano è parallelo al vettore campo elettrico, ed in condizioni di onda piana (cioè di esposizione in campo lontano), il SAR nel corpo intero raggiunge i suoi valori massimi. La quantità di energia assorbita dipende da diversi fattori, tra cui le dimensioni del corpo esposto. Il cosiddetto "uomo di riferimento tipico" (ICNIRP 1994), in assenza di contatto a terra, ha una frequenza di risonanza prossima ai 70 MHz. Per individui più alti la frequenza di risonanza è un po' più bassa, mentre nel caso di adulti di bassa statura, bambini o neonati e nel caso in posizione seduta può superare 100 MHz. I valori scelti come livelli di riferimento sono basati sull'andamento dell'assorbimento di energia con la frequenza; in individui che siano in contatto elettrico con il suolo le frequenze di risonanza sono più basse di circa un fattore 2 (UNEP/WHO/IRPA 1993).

Per alcuni dispositivi che funzionano a frequenze superiori a 10 MHz (ad esempio riscaldatori dielettrici o telefoni mobili), l'esposizione può aver luogo in condizioni di campo vicino. In questa situazione, la dipendenza dell'assorbimento di energia dalla frequenza è molto diversa da quella descritta per le condizioni di campo lontano. Per alcuni apparati, come i telefoni mobili, i campi magnetici possono essere dominanti in certe condizioni di esposizione.

L'utilità, ai fini di una valutazione delle esposizioni in campo vicino, di modelli di calcolo numerico e di misure delle correnti indotte nel corpo e dei campi interni ai tessuti è stata dimostrata nel caso di telefoni mobili, walkie-talkie, trasmettitori radiotelevisivi, sistemi di comunicazione marittima e riscaldatori ad induzione (Kuster e Balzano 1992; Dimbylow e Mann 1994; Jokela et al. 1994; Gandhi 1995; Tofani et al. 1995). L'importanza di questi studi risiede nel fatto che essi hanno mostrato che l'esposizione in campo vicino può dar luogo ad elevati valori di SAR locale (ad esempio nella testa, nei polsi e nelle caviglie) e che sia il SAR mediato sull'intero corpo, sia quello locale, dipendono fortemente dalla distanza che separa la sorgente ad alta frequenza dal corpo. Infine, è da notare che i dati di SAR ottenuti dalle misure sono in accordo con quelli ottenuti da calcoli su modelli numerici. Il SAR mediato sull'intero corpo e quello locale sono grandezze appropriate per confrontare gli effetti osservati in diverse condizioni di esposizione. Una più dettagliata discussione sul SAR può essere reperita altrove (UNEP/WHO/IRPA 1993).

A frequenze superiori a circa 10 GHz, lo spessore di penetrazione dei campi nei tessuti è piccolo, ed il SAR non è una buona grandezza per valutare l'energia assorbita; una grandezza dosimetrica più appropriata è la densità di energia incidente (espressa in W/m^2).

3.6 Misurazione

3.6.1 Specifiche relative agli strumenti

Strumenti non conformi alle specifiche di seguito descritte possono essere usati se si riesce a dimostrare che, nelle condizioni d'uso, i risultati ottenuti non si scostano di molto da quelli ottenuti con un misuratore conforme alle guide Cei 211-6 e 211-7.

-incertezza strumentale: il sistema di misura dei campi magnetici alternati dovrebbe indicare il valore efficace dei campi magnetici uniformi con un'incertezza inferiore a $\pm 10\%$ (della lettura + 20 nT) dopo aver applicato i fattori di correzione, se necessario. L'incertezza dello strumento è determinata da parecchie componenti, quali l'incertezza di taratura, la deriva di temperatura delle componenti elettroniche, la stabilità e le sorgenti esterne di rumore. L'incertezza di cui sopra è associata al progetto ed al funzionamento del misuratore di induzione magnetica in un campo pressoché uniforme. L'elemento del 10% si riferisce all'incertezza durante la taratura nella gamma di frequenza (banda passante) specificata per lo strumento ed include le incertezze nel valore

dell'induzione magnetica e le ulteriori incertezze durante il processo di taratura. Il fattore di copertura è 2. L'aggiunta di 20 nT tiene conto delle incertezze strumentali durante la taratura delle scale più sensibili e durante la misura dei campi di ordine di 0.1 μ T.

-gamma di ampiezza: si deve indicare la gamma di ampiezza in cui opera lo strumento nei limiti dell'incertezza specificata.

-banda passante: lo strumento deve essere accompagnato da dati o specifiche di taratura che permettano all'utilizzatore di valutare l'incertezza nel determinare i livelli di campo quando si usa lo strumento per misurare campi contenenti varie frequenze. Queste informazioni dovrebbero anche includere la sensibilità dello strumento alle frequenze al di là della gamma utile prevista. L'incertezza strumentale permessa associata con la risposta in frequenza è aumentata a $\pm 20\%$ (fattore di copertura 2) per piccoli dosimetri individuali, dispositivi che possono essere indossati e che periodicamente registrano il campo magnetico efficace alla frequenza industriale ed alle sue armoniche.

-gamme di temperature e di umidità di funzionamento: le gamme di temperature e di umidità relativa alle quali lo strumento deve funzionare entro l'incertezza specificata non dovrebbero essere inferiori rispettivamente a 0°C - 45°C e 5% - 95%. Si dovrebbero evitare variazioni improvvise di temperatura che possono favorire la formazione di condensa nello strumento.

-alimentazione: se si usano batterie, si deve prevedere un mezzo che indichi se le condizioni della batteria sono adeguate per il corretto funzionamento del misuratore di campo. Se si usano batterie ricaricabili non bisogna far funzionare gli strumenti durante il collegamento alla tensione di rete. Nel caso tali connessioni siano necessarie, bisogna dimostrare che i campi parassiti provenienti dal carica batterie, i disturbi condotti provenienti dalla tensione di rete e l'accoppiamento elettromagnetico attraverso i cavi di connessione (al carica batterie) non influenzano la misura.

-leggibilità della scala: se sono previste più gamme di sensibilità, dovrebbe essere indicato il valore a fondo scala della gamma selezionata e le unità di misura dovrebbero essere immediatamente interpretabili.

-dimensioni dello strumento: si dovrebbero fornire le dimensioni dell'involucro che contiene il circuito del rivelatore e gli eventuali cavi di connessione. La dimensione delle sonde o degli elementi sensibili dovrebbe essere appropriata alla variazione spaziale del campo misurato. Gli elementi sensibili dovrebbero avere una superficie non superiore a 0,01 m². con gli strumenti triassiali, i tre elementi sensibili possono essere concentrici (per esempio sonde a bobina che hanno un punto centrale comune) oppure, se le dimensioni degli elementi sensibili non sono superiori a 0,05 m, essi dovrebbero essere il più possibile vicini l'uno all'altro. La dimensione massima del volume contenente le tre sonde a bobina combinate non dovrebbe superare 0,2 m. le sonde a bobina dovrebbero avere una sezione circolare o quadrata.

-sicurezza e compatibilità elettromagnetica: gli strumenti in questione dovrebbero essere conformi alle norme di prodotto relative alla sicurezza ed alla compatibilità elettromagnetica degli strumenti di misura, controllo e da laboratorio. In particolare si deve far riferimento alle seguenti Norme:

-CEI EN 61010-1 (CEI 66-5), anno 1997: *"Prescrizioni di sicurezza per apparecchi elettrici di misura, controllo e per utilizzo in laboratorio"*.

-CEI EN 61326 (CEI 65-50), anno 1998 + Variante: *"Apparecchi elettrici di misura, controllo e laboratorio- Prescrizioni di compatibilità elettromagnetica"*.

In particolare per quanto riguarda l'immunità ai campi elettrici a frequenza industriale, gli strumenti previsti per essere usati in vicinanza di apparecchiature ad alta tensione funzionanti a frequenze industriali non dovrebbero essere significativamente influenzati dai campi elettrici ambiente fino a 20 kV/m, cioè l'influenza del campo elettrico sulla lettura del campo magnetico dovrebbe essere inferiore a 20 nT. Questo requisito di immunità potrebbe essere aumentato in caso di alcuni ambienti esterni, nei quali possono esserci campi elettrici fino a 100 kV/m.

- fattore di cresta: il sistema di misura dovrebbe misurare correttamente il vero valore efficace del campo, anche quando il fattore di cresta del campo magnetico è 3. Nella pratica molti campi mostrano un fattore di cresta elevato, e la presenza di un fattore di cresta può condurre ad una saturazione non voluta negli stadi amplificatori del rivelatore.
- durabilità: lo strumento indicatore e le altri componenti del sistema dovrebbero essere abbastanza robusti da resistere alle vibrazioni ed agli urti durante il trasporto.
- peso: si dovrebbe indicare il peso degli strumenti.

3.6.2 Sorgenti di incertezza di misura

Se un misuratore di campo magnetico è tarato correttamente, il numero di meccanismi che può causare errori di misura è ridotto. Le sorgenti di incertezza da considerare quando applicabili e combinare con le incertezze di taratura sono riportate qui sotto.

- Campo magnetico non uniforme: le sonde triassiali che non hanno un centro comune misurano il campo in punti diversi. Le incertezze nell'orientamento delle sonde monoassiali e la distanza fra la sorgente e la sonda possono portare a risultati di misura che differiscono di oltre il 100%. Inoltre tali sonde sono di solito tarate in un campo magnetico pressoché uniforme e sono usate per misurare un campo che può variare secondo la distanza.
- Separazione dei sensori(sonda triassiale): può capitare che in campi altamente uniformi i misuratori triassiali con sonde vicinissime l'una all'altra ma in punti differenti abbiano un margine di errore. Inoltre, se le sonde a bobina hanno nuclei ferromagnetici per aumentare la sensibilità, può essere necessario un compromesso nel posizionamento delle tre sonde orientate ortogonalmente. Se le sonde sono troppo vicine, la vicinanza dei nuclei ferromagnetici può disturbare il campo magnetico ed il campo assiale rivelato da ciascuna sonda.
- Vicinanza delle batterie: gli involucri metallici delle batterie possono essere ferromagnetici.
- Rumore di fondo:il rumore elettrico nel circuito può costituire un rumore di fondo che impedisce le misure accurate di campo magnetico a livelli di campo inferiori.
- Limitazioni della banda passante: può contribuire all'incertezza della misura e portare a differenze nei risultati di misura. Questo può verificarsi nel caso il campo magnetico sia ricco di armoniche che per esempio non possono essere rivelate con un misuratore a 50 Hz.
- Temperatura:bisognerebbe conoscere o caratterizzare gli effetti della temperatura al momento della taratura.
- Umidità: dà effetti ridotti(<1%).
- Fattore di cresta: durante il processo di conversione di un segnale periodico nel suo valore efficace possono verificarsi degli errori. In generale questo errore aumenta all'aumentare del fattore di cresta.
- Immunità elettromagnetica: i campi elettromagnetici generati da una grande varietà di sorgenti possono accoppiarsi non intenzionalmente con i misuratori di campo magnetico(ed elettrico) a causa di schermatura inadeguata, e quindi influenzare la misura.
- Luogo di misura: la variazione del campo misurato B in rapporto alla distanza r può essere descritto secondo la relazione :

$$B=B_c(1/r^a) \quad (3.1)$$

Dove $1 \leq a \leq 3$ nella maggior parte dei casi.

B_c è una costante, cioè si suppone che il campo magnetico alternato abbia un valore efficace costante.

Deriva a lungo termine: variazioni nella risposta del misuratore di campo. Un controllo periodico della taratura fornisce un mezzo adeguato per determinare l'entità delle derive a lungo termine ed i fattori di correzione. Costante di tempo dello strumento: causa del tempo inadeguato di trattamento del segnale.

3.6.3 Obiettivi e metodi di misura

I campi magnetici ed elettrici possono essere caratterizzati conformemente ad un numero di parametri quali l'ampiezza, la frequenza, ecc... La caratterizzazione di uno o più di questi parametri ed i loro possibili effetti sugli esseri umani possono rappresentare gli obiettivi di un programma di misura. È bene che il protocollo descriva ogni singolo passo della procedura da seguire, indicando in modo esplicito, oltre alle prescrizioni strumentali, elementi come il luogo in cui eseguire le misure e la durata di queste ultime. Durante l'elaborazione di un metodo e di un protocollo di misura, è opportuno individuare preliminarmente le sorgenti dei campi elettrici e magnetici, attraverso la localizzazione degli impianti elettrici e delle apparecchiature elettriche presenti nell'ambiente che si vuole investigare, e reperire informazioni sulla presenza di persone nei vari ambienti.

3.6.3.1 Verifica della compatibilità di una data situazione espositiva con i limiti sanitari

Nel caso, ad esempio delle linee guida ICNIRP del 1998 e della Raccomandazione Europea 1999/519/CE il limite effettivo (limite di base) è rappresentato dalla densità di corrente indotta nel sistema nervoso centrale mentre i valori di campo forniti nelle stesse pubblicazioni vengono definiti come livelli di riferimento, intesi come i valori efficaci del campo elettrico e del campo magnetico uniformi che assicurano il rispetto del limite di base in qualsiasi situazione. In Italia invece sia il DPCM del 23/04/92 sia il disegno di legge quadro attualmente in discussione e le relative proposte di decreti, fissano i limiti sanitari solo in termini di valori di campo o, come nel caso dei 'valori di attenzione' e degli 'obiettivi di qualità', in termini di valori medi annui dei campi stessi.

Per effettuare la compatibilità di una data situazione espositiva con questo tipo di limiti sanitari, occorre innanzitutto effettuare una caratterizzazione spaziale e temporale dei campi elettrici e magnetici (valori efficaci) presenti nell'ambiente dove avviene l'esposizione. Inoltre, laddove non sia già nota a priori in relazione alla conoscenza delle sorgenti presenti nell'ambiente, occorre effettuare anche un'analisi in frequenza dei campi misurati. Attraverso queste caratterizzazioni ed analisi è possibile individuare i luoghi in cui i livelli del campo elettrico e magnetico possono superare i livelli di riferimento.

Una dettagliata caratterizzazione spaziale e temporale di luoghi ed ambienti è poi indispensabile laddove occorra valutare i valori medi ambientali per verificarne la compatibilità con eventuali vincoli imposti su tali parametri. Nel caso delle linee elettriche, per il calcolo del campo elettrico deve essere nota la tensione e per quello del campo magnetico devono essere conosciute le correnti. La tensione di linea è generalmente costante con una buona precisione, ma le correnti di linea possono variare notevolmente a seconda della potenza trasportata. Ne deriva che, anche nel caso di semplici configurazioni, valutazioni basate su calcoli possono non essere sufficienti e dovrebbero essere verificate, ove opportuno, con misure. Le misure nel caso in cui la sorgente presenti condizioni di variabilità temporale devono essere effettuate per un lungo periodo al fine di ottenere una valutazione completa.

3.6.3.2 Scelta dello strumento di misura

Un apparecchio di misura è identificato dalle sue caratteristiche funzionali. Queste caratteristiche devono essere adatte al parametro che si deve misurare. L'incertezza strumentale del dispositivo di misura, espressa come incertezza estesa con un fattore di copertura $k=2$, deve essere inferiore al 10%. In particolare le misure del campo elettrico e magnetico dovrebbero essere eseguite con strumenti triassiali (isotropici) in modo da indicare direttamente il valore efficace del campo. Anche gli strumenti monoassiali possono essere usati per determinare, sulla base della misura di tre componenti ortogonali, il campo totale efficace. Vista tuttavia la non contemporaneità delle misure, questo approccio è praticabile a patto che il livello del campo rimanga stabile.

Le dimensioni della sonda o degli elementi sensibili devono essere appropriate alla variazione spaziale del campo in corso di misurazione. Per quanto riguarda il campo elettrico, le dimensioni della sonda devono essere adatte alla vicinanza dei piani conduttori adiacenti. La banda passante dello strumento deve essere appropriata al contenuto in frequenza del campo in corso di misurazione. Quando il campo elettrico e magnetico sono prodotti da un impianto elettrico di potenza, le frequenze presenti saranno di solito la fondamentale (50 Hz) più alcune fra le prime armoniche. La minima banda passante usata per misurare tali campi dovrebbe estendersi dalla frequenza fondamentale fino a 500 Hz. Quando si misurano i campi prodotti da sorgenti diverse da impianti elettrici di potenza, è necessario scegliere la banda passante in modo appropriato. I campi prodotti da alcuni sistemi di trazione hanno una frequenza fondamentale più bassa, mentre gli impianti di riscaldamento ad induzione, i videoterminali, ecc possono produrre campi con frequenze più elevate.

3.6.3.3 Misura dell'esposizione umana

Si può ritenere che le misure effettuate in un campo elettrico o magnetico pressoché uniformi corrispondono all'esposizione dell'intero corpo umano. Le misure in presenza di campi non uniformi richiedono invece interpretazioni e valutazioni più complesse in quanto la misura del campo rappresenta l'esposizione umana solo per quella parte anatomica che coincide con il punto di misura. La scelta del luogo di misura può variare quindi in funzione della sorgente del campo e della posizione relativa del soggetto umano. Inoltre a differenza dei campi magnetici, i campi elettrici sono perturbati dal corpo umano; durante la misura si dovrebbe pertanto prestare particolare attenzione ad evitare gli effetti di vicinanza dell'operatore ed anche delle altre persone. Si deve inoltre evitare l'effettuazione di misure in vicinanza di 'punte' in quanto trovandosi in zona di campo elettrico perturbato, la misura non risulta rappresentativa dell'esposizione umana. Una valutazione completa dell'esposizione umana in una zona specificata richiede che vengano misurate sia la variazione spaziale sia quella temporale del campo in esame. È poi utile acquisire informazioni sul tipo di attività umana che viene normalmente svolta nella zona d'interesse.

3.6.3.4 Caratterizzazione delle variazioni spaziali

I punti di misura devono essere distribuiti in maniera uniforme sull'intera area da caratterizzare ed il loro numero commisurato alla superficie in esame. Bisogna fare attenzione che la sonda non passi vicino a superfici cariche elettricamente, come indumenti in materiale plastico, perché si possono verificare variazioni del campo; analogamente, la presenza di masse ferrose può influenzare il risultato della misura del campo magnetico. In generale, i punti ad altezze di 1-1,5 m dal piano di calpestio vengono considerati significativi ai fini della caratterizzazione dell'esposizione umana. In casi particolari, come in presenza di campi disuniformi è opportuno effettuare misure aggiuntive ad altezze corrispondenti ai punti nello spazio occupati dalla testa e dal torso di una persona.

3.6.3.5 Caratterizzazione delle variazioni temporali

I campi elettrici, dipendendo dalla tensione, sono praticamente costanti. Possono contribuire alla variabilità del campo elettrico gli effetti di schermatura dovuti ai materiali di costruzione, che possono dipendere dalle condizioni atmosferiche oppure se nelle vicinanze vi sono oggetti conduttori in movimento. I campi magnetici, essendo invece generati da correnti molto variabili nel tempo, possono avere escursioni molto elevate. La determinazione statistica completa delle variazioni temporali richiede quindi registrazioni prolungate per durate rappresentative dei cicli di funzionamento degli impianti ed apparecchiature sorgenti. A causa della dipendenza dei livelli di campo magnetico dalle correnti di carico, che possono variare giornalmente, settimanalmente, ecc., il problema è determinare un intervallo di tempo per la registrazione delle misure che capti

abbastanza variazioni del campo da poter ottenere una valida registrazione statistica. A tale scopo può risultare utile condurre dapprima uno studio pilota espressamente orientato alla definizione del tempo di campionamento delle misure.

I campi magnetici generati dagli apparecchi elettrici spesso contengono armoniche della frequenza industriale. Pertanto ciò porta ad una lettura del valore efficace di questo campo, eseguita con un misuratore che rileva solo la componente fondamentale, inferiore di almeno un 15%. Si nota inoltre che il contenuto in frequenza dei campi magnetici prodotti da apparecchi elettrici a velocità variabile, per esempio i sistemi elettrici di trasporto di massa, può variare in funzione della velocità.

3.7 Documento valutazione rischi

In tema di valutazione dei rischi (artt. 28 e 29), le novità più rilevanti sono:

- il documento di valutazione dei rischi deve avere data certa
- precisazione che la (unica ed unitaria) valutazione dei rischi deve riguardare tutti i rischi (soli esclusi quelli da interferenze)
- conferma che la (sola) valutazione dei rischi da interferenze resta separata, restando oggetto di autonoma previsione (art. 26, comma 3), per giunta non considerata in sede di individuazione degli obblighi non delegabili (art. 17), bensì tra quelli delegabili (art. 18, comma 1, lett. p)).

Inoltre:

- è soppressa la possibilità per “il datore di lavoro delle aziende familiari, nonché delle aziende che occupano fino a dieci addetti di autocertificare per iscritto l’avvenuta effettuazione della valutazione dei rischi” (com’era previsto dall’art. 4, comma 11, del d.lgs. n. 626/1994)
- ma, per le aziende fino a 50 lavoratori un decreto definirà le procedure standardizzate per la valutazione dei rischi

E soprattutto, il documento di valutazione dei rischi deve contenere:

1. le procedure per l’attuazione delle misure di prevenzione e protezione da realizzare
 2. i ruoli dell’organizzazione aziendale che devono attuare tali procedure
- deve quindi contenere, fin dal 01 gennaio 2009:
- la definizione dell’organigramma per la sicurezza
 - la definizione dei compiti e dei poteri assegnati.

3.8 Strumentazione di misura

Per decidere la strumentazione di misura bisogna prima osservare la tipologia di sorgente da analizzare. Principali caratteristiche delle sorgenti da misurare sono:

- tipologia del generatore
- frequenza operativa ed armoniche prodotte
- tipo di modulazione (AM,FM,Fase,impulsi,ecc.)
- tipologia dell’ antenna
- polarizzazione e tilt dell’ antenna

Vi sono 2 tipi di strumentazione principalmente:

- a banda larga (es.:PMM8053). Misura semplice ed immediata per valutare se siamo sopra i limiti
- a banda stretta (es.:PMM SA-7270) con indicazione della frequenza (analizzatore di spettro). Misura complessa e lunga.

3.8.1 Sonde di misura

Rispondono ad un solo parametro (E o H), hanno piccole dimensioni tali da non perturbare il campo ed i cavi di collegamento tali da non comportarsi a loro volta come delle antenne.

Tipologia delle sonde:

-a diodo: il più diffuso.

-bolometrico: uso di termistore per misurare l'innalzamento della temperatura. Poco usato in quanto sensibile alle variazioni della temperatura ambientale.

-a termocopia: limitato a misure di campi di bassa intensità.

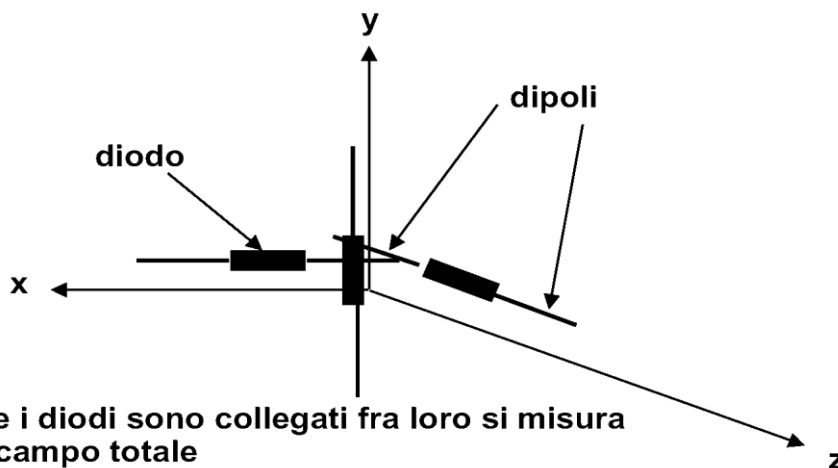
3.8.1.1 Strumenti a diodi

Ve ne sono di due tipi: isotropici (i più diffusi) e non isotropici.

3.8.1.1.1 Diodi isotropici

Fig. 3.8 Caratterizzazione di un diodo isotropico

- **sono costituiti da diodi multipli collegati a dipoli d'antenna ortogonali fra loro.**



Considerazioni:

- hanno risposta quadratica per piccoli segnali
- risposta lineare per segnali medi (nella gamma tipica di lavoro)
- saturazione per segnali elevati
- rottura delle giunzioni per segnali estremamente elevati (anche se il sensore non viene collegato)

3.8.2 Strumenti a banda larga

Essi sono costituiti da un sensore di campo elettrico o magnetico, un trasduttore del campo in segnale elettrico proporzionale a $E(E^2)$ o $H(H^2)$, un collegamento all'unità di misura (cavo ad alta impedenza, fibra ottica, ecc.) ed un'unità di misura e registrazione.

3.8.3 Strumenti a banda stretta

Essi sono costituiti da un antenna con supporto, un cavo di collegamento e l'unità di misura e processamento.

3.8.4 Fonti di errori di misura

- onda incidente non piana
- modulazione elevata
- sensibilità alla luce
- presenza di elevati gradienti di temperatura
- presenza di segnali spuri
- accoppiamento dei cavi
- accoppiamento in vicinanza di corpi conduttori
- presenza di campi intensi fuori banda
- presenza del corpo umano
- presenza nelle vicinanze di strutture metalliche

Dove l'onda non piana si ha quando si è vicino alla sorgente (in prossimità dell'antenna) cioè per distanze minori tra : λ e D^2/λ (dove D è la dimensione del radiante). In questo caso si devono misurare separatamente le componenti elettriche e magnetiche. Per distanze inferiori le misure sono dipendenti dalla dimensione della sonda e della sua posizione spaziale.

Condizioni di onda piana:

- condizioni ottimali di misura
- eseguire misure in diversi punti nello spazio
- fissare il sensore ad 1 m da terra
- fissare l'antenna o il sensore lontano dall'operatore
- usare cavi di collegamento in fibra ottica
- eseguire misure su un arco di tempo sufficientemente lungo (almeno 6 minuti)

3.8.5 Misure di campi vicini

La sonda (dipolo) deve essere più piccola di $\lambda/4$

Bisogna usare una sonda isotropica

Bisogna mappare il campo nell'area di interesse per trovare il punto di massima intensità

Infine usare il ripetitore ottico per evitare l'interferenza del corpo umano.

Nelle misure a bassa frequenza (in particolare a 50 Hz(frequenza industriale)) si misura il campo elettrico $E(V/m)$ che il campo magnetico $H(A/m)$

I campi sotto i tralicci possono assumere il valore tipico di:

-impianti ad altissima tensione: 380 kV
E=4.500-8000 V/m e H=15-20 μ T

-impianti ad alta tensione: 132 kV, 150 kV, 60 kV
E=2000-3000 V/m e H=10 μ T

-la rete a media tensione : 10-30 kV
E=200 V/m e H=5 μ T

-cabine secondarie a BT: 220 e 380 V

Fig. 3.9 Misure di campo elettrico in base alla loro distanza dal punto di misura

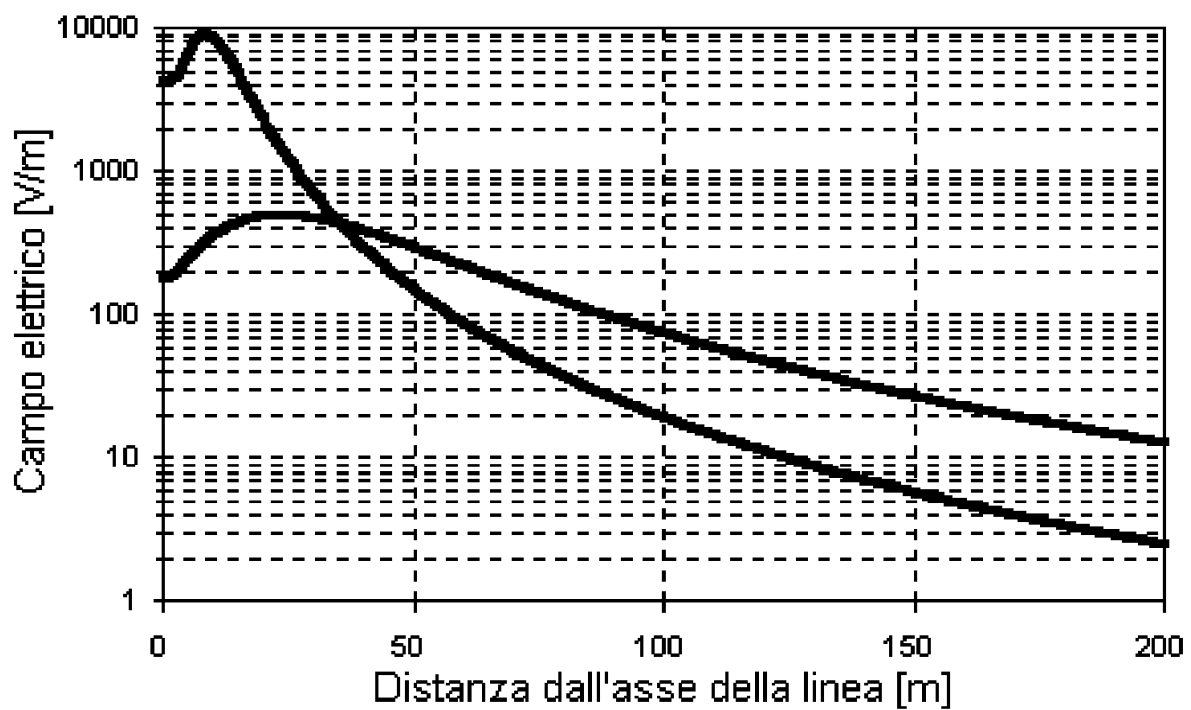
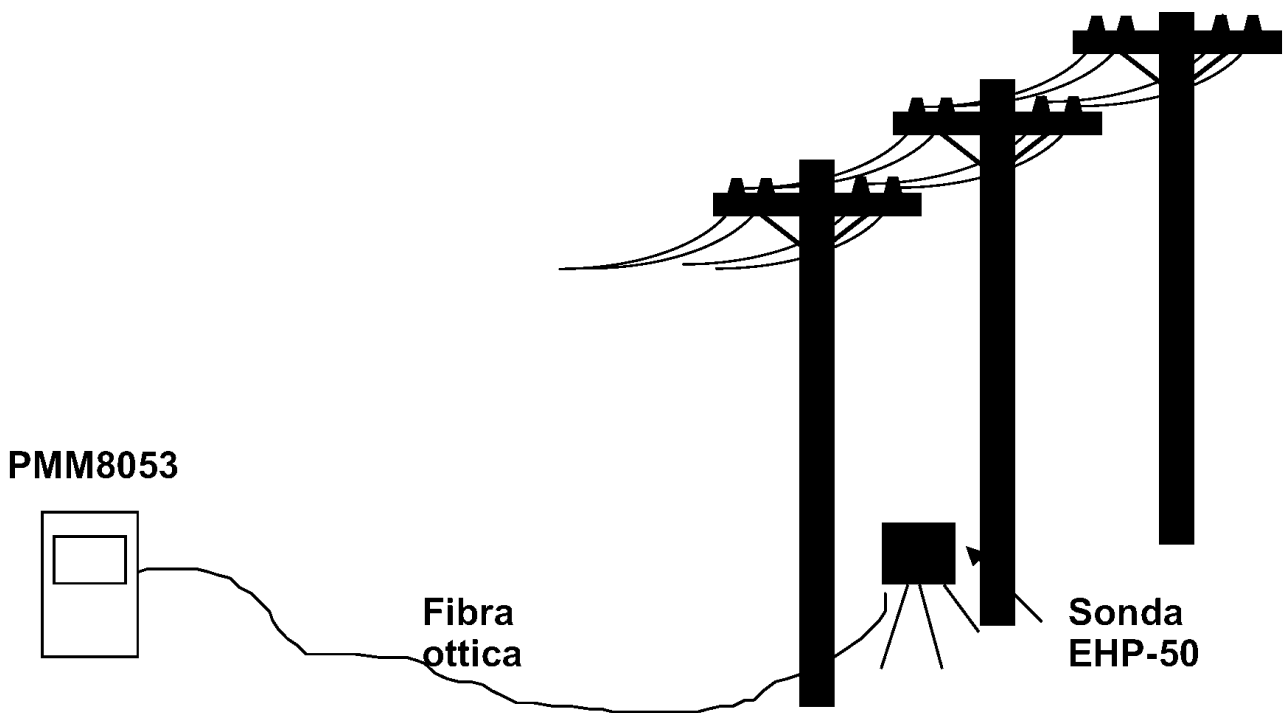


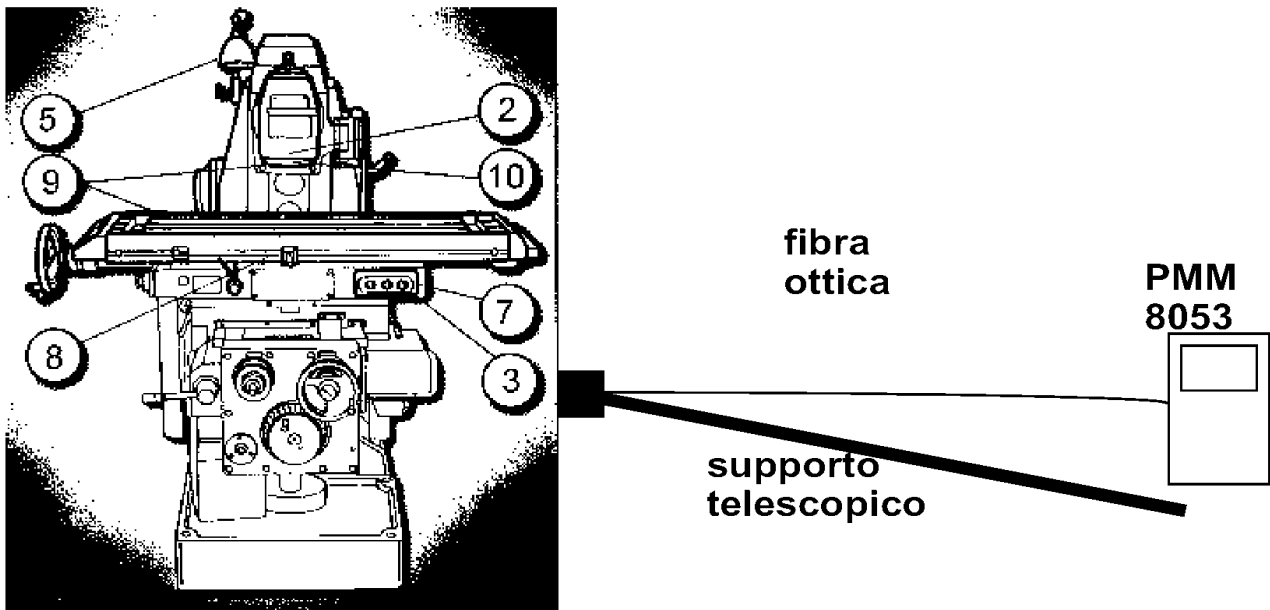
Fig. 3.10 Esempio di un tipico set-up di misura



3.8.5.1 Misure in prossimità delle macchine

- Conoscenza delle frequenze di lavoro
- Layout dell'impianto
- Posizione dove il lavoratore staziona per lunghi periodi
- Preparare una pianta con i punti di misura
- Fissare la durata della misura (almeno 6 minuti)
- Verificare che l'operatore di misura non venga esposto a campi elevati
- Acquisire i valori dei campi elettrici e magnetici
- Ripetere la misura con maggiore definizione se i valori misurati sono alquanto diversi fra loro

Fig. 3.11 Esempio di un set-up di misura in prossimità di una macchina



3.8.6 Alcune modalità operative per le misure

Vengono rilevati durante l'arco di sei minuti i valori di campo magnetico ed elettrico con la strumentazione adeguata, e viene fatta una mappatura generale, delle cui reali condizioni si è fatta una prima analisi in tempo reale. Nelle tabelle riassuntive sono riportati i punti dei rilievi effettuati con le relative analisi, per ogni posizione indicata nei disegni in allegato per poter identificare l'eventuale punto critico del campo misurato. Le misure di campo magnetico ed elettrico si effettuano ponendo la sonda su di un cavalletto all'altezza di 2m su di un bastone isolato e collegata direttamente allo strumento misuratore. Nelle tabelle sono state indicate l'altezza effettiva da terra e la distanza dall'antenna emittente più vicina. Per ogni posizione sono state effettuate più misure con una frequenza di campionamento di 1s con una media su un periodo di sei minuti ed è stato anche rilevato il valore massimo. Nelle tabelle sono riassunti i valori del modulo isotropico del campo elettrico, che comprende tutte le frequenze contenute nell'intervallo di misura della sonda. Il campo magnetico invece è stato derivato da quello elettrico tramite la relazione $H=E/377$, poichè le misure sono state effettuate nelle regioni di 'Campo Lontano', dove per campo lontano si considera la regione di distanza superiore a $L > 2D^2/\lambda$ dove D è la dimensione massima dell'elemento emittente e λ è la lunghezza d'onda operativa.

3.8.6.1 Modalità d'esecuzione

- Misure spaziali a 1.1 e 1.9 m da terra. Se la differenza tra i rilievi è $>$ del 25% del valore più elevato, si misura anche a 0.5m. Poi si calcola il valore medio.
- Ogni misura è il risultato della media temporale su sei minuti dei valori istantanei rilevati ogni secondo.

- Gli impianti devono funzionare alla massima potenzialità (effettiva o calcolata).
- Gli strumenti devono avere:
 - Isotropicità $\leq 1\text{dB}$
 - Incertezza $\leq 2\text{dB}$
- Gli strumenti devono essere tarati secondo le norme ISO9000 o SIT.

Fig. 3.12 Esempio di un set-up di misura in prossimità di un'antenna

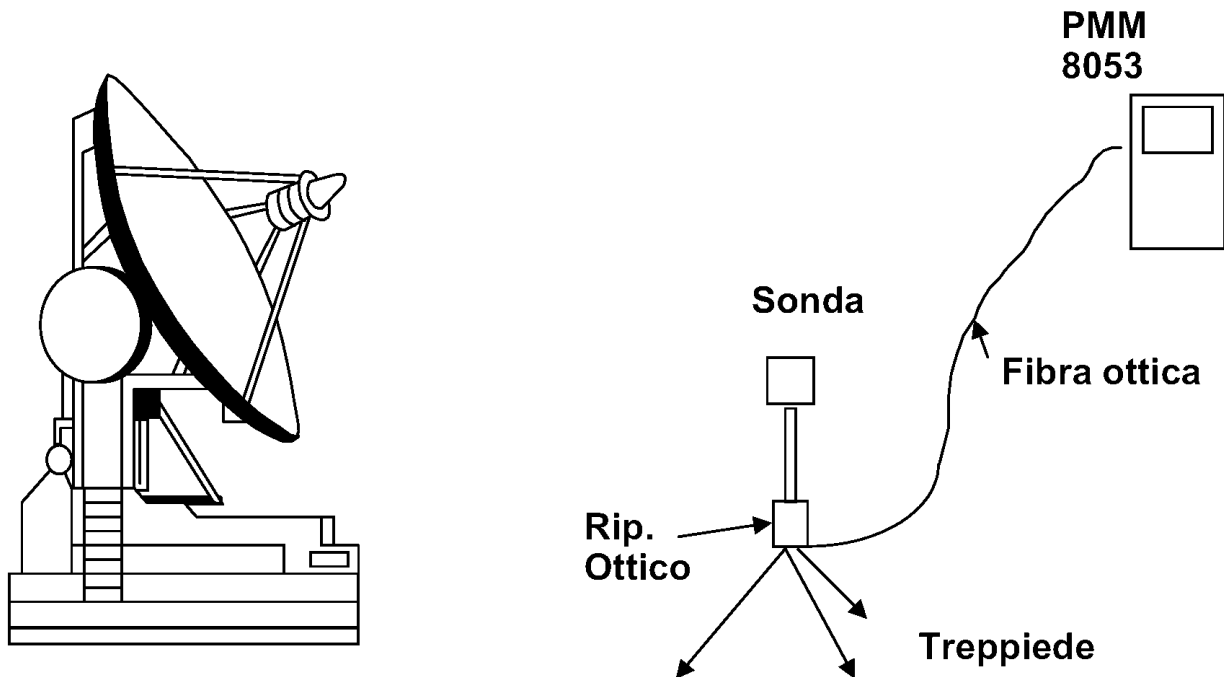
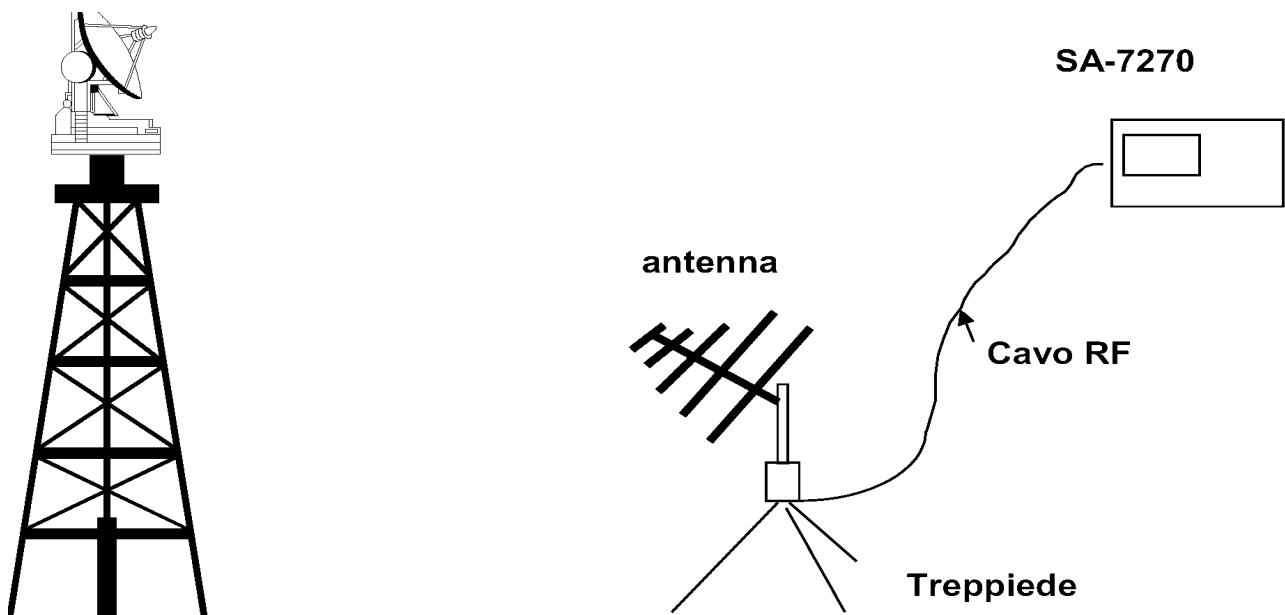


Fig. 3.13 Esempio di un set-up di misura con un analizzatore di spettro



3.8.7 PMM 8053(Portable Field Strength Meter)

Soluzione a basso costo per misurare i campi E e H. Ha un campo da 5 Hz a 18 GHz. Facile da usare ed ideale per mappature di territori. Conforme al decreto DM 381.

Caratteristiche :Test dei diodi di misura:

- alta dinamica >66 dB/120 dB
- grande display
- completezza di accessori
- Data logger intelligente con acquisizioni: 1,10-900 secondi (del valore peggiore)
- data change
- over the limit
- la media ad ogni sei minuti
- media aritmetica e quadratica
- misure con associato il commento

3.8.7.1 Sonde PMM

EP-330: ideale per il decreto 381. Misura il campo elettrico da 100 kHz a 3GHz.

HP-102:misura il campo magnetico da 30 MHz a 1 GHz

EHP-50:misura il campo elettrico e quello magnetico da 5 Hz a 100 kHz

E: Range: da 0.1 V/m a 100 kV/m

Sensibilità: 0.1 V/m

Risoluzione: 0.01 V/m

H: Range: da 10 nT a 10 mT

Sensibilità: 10 nT

Risoluzione: 1 nT

Il sensore ha incorporato un Analizzatore di Spettro in tempo reale.

Tale analizzatore (SA-7270) ha:

- frequenza 9 kHz - 2.7 GHz;
- risoluzione 1 Hz
- livello +20-120 dBm
- precisione +/- 1.5 dB
- display LC 7.4''
- memoria 20 misure
- RS232 standard

Capitolo 4

Interazione campi elettromagnetici-organismo

4.1 Introduzione

Negli ultimi decenni, livelli di esposizione a campi elettrici e magnetici ed elettromagnetici sono aumentati con continuità e in misura considerevole; nel contempo, è andata anche aumentando la diffusione di tali esposizioni tra i lavoratori e la popolazione in generale.

Ciò ha portato i paesi più industrializzati, compresa l'Italia, a svolgere una vasta attività di ricerca, volta alla definizione dei meccanismi biofisici di interazione e alla descrizione dei principali effetti biologici e sanitari: sui risultati di tale ricerca è possibile poi basare la scelta di limiti di esposizione appropriati per gli ambienti di vita e di lavoro. Nel settore della protezione dai campi elettromagnetici non ionizzanti si riscontra, talvolta, un uso improprio dei termini interazione, effetto biologico ed effetto sanitario (danno), che sembra riflettere un certo livello di confusione concettuale. Quando un organismo interagisce con un campo elettromagnetico, il suo equilibrio viene perturbato, ma ciò non si traduce automaticamente in un effetto biologico apprezzabile e ancor meno in un effetto sanitario. Si può parlare di effetto biologico solo in presenza di variazioni morfologiche o funzionali a carico di strutture di livello superiore, dal punto di vista organizzativo, a quello molecolare. Le informazioni fornite da studi sui sistemi molecolari, sebbene fondamentali per la comprensione dei meccanismi di interazione o patogenetici, non autorizzano al momento estrapolazioni a livelli organizzativi più complessi, come tessuti, organi e sistemi. L'induzione di un effetto biologico, d'altra parte, non comporta necessariamente un danno alla salute. Per poter parlare di effetto sanitario occorre, infatti, che l'effetto biologico superi i limiti di efficacia dei meccanismi di adattamento dell'organismo, meccanismi le cui caratteristiche variano con l'età, il sesso, lo stato di salute, il tipo e grado di attività del soggetto, nonché con le condizioni ambientali esterne, come temperatura e umidità o la contemporanea presenza di altri agenti nocivi.

Chiarito questo punto fondamentale, se si analizzano criticamente le scelte normative effettuate nel tempo nei vari paesi, è facile evidenziare i diversi fattori che portarono a quelle significative differenze tra i livelli di esposizione raccomandati che tanto hanno vivacizzato il dibattito scientifico in questo settore negli anni '70-'80.

Tra questi vanno sottolineati:

- 1) gli effetti biologici e sanitari scelti per la definizione dei valori limite
- 2) la diversa interpretazione fornita dai ricercatori ai dati sperimentali in termini di significatività per l'uomo e l'ambiente
- 3) gli scopi diversi per cui progressivamente i vari standard sono stati definiti e adottati
- 4) il livello di compromesso accettato, nei diversi paesi, fra rischio e grado di cautela
- 5) l'influenza di eventuali norme già adottate nelle singole nazioni o in aree ad esse vicine e caratterizzate da un medesimo contesto sociopolitico.

Nel corso dell'ultimo decennio, invece, la filosofia della protezione nel settore dei campi elettromagnetici adottata da vari organismi nazionali, per esempio l'*American National Standard Institute/Institute of Electric and Electronic Engineers* (ANSI/IEEE), o europei (per esempio, il CENELEC) o internazionali, quali l'attuale *International Commission on Non-Ionizing Radiation*

Protection (ICNIRP) o, fino al 1992, l'*International Non-Ionizing Radiation Committee dell'International Radiation Protection Association* (IRPA/INIRC), è andata rapidamente convergendo, sulla base del continuo avanzamento delle conoscenze scientifiche, verso un approccio comune. Non deve quindi sorprendere il fatto che il percorso logico che porta alla definizione dei limiti di esposizione delle citate normative sia in larga misura sovrapponibile, anche se su alcuni aspetti particolari, più legati a problemi di gestione pratica delle norme che ad interpretazioni diverse dei dati scientifici, sussistono ancora significative differenze.

4.2 La modellazione delle sorgenti ed il calcolo delle correnti indotte

A bassa frequenza, campo elettrico e campo magnetico possono essere considerati come agenti fisici indipendenti tra loro, che danno luogo a due problemi dosimetrici distinti ed indipendenti (problema elettrico e problema magnetico). Oltre a ciò, anche la modellazione delle sorgenti ed il calcolo della densità di corrente indotta internamente all'organismo, possono essere separati (problema esterno e interno). Questa separazione è possibile rigorosamente solo per frequenze inferiori alle centinaia di kHz, ma le approssimazioni applicate possono essere ritenute valide fino ad 1 MHz.

Risultano così definiti quattro problemi da risolvere:

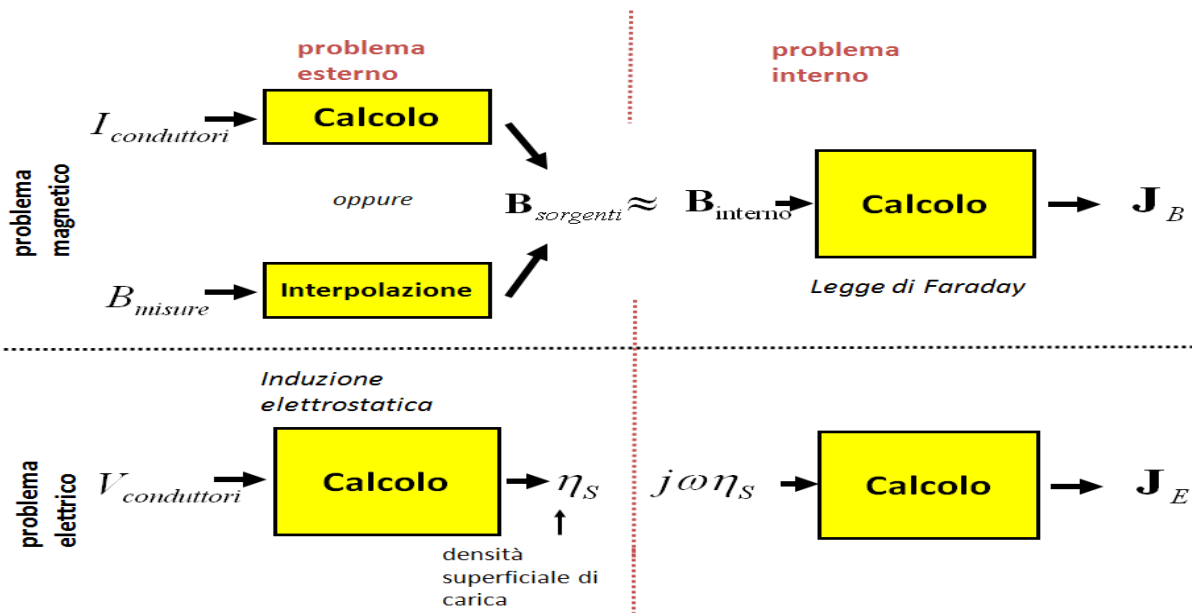
- **Problema magnetico esterno:** date le correnti sulle sorgenti oppure un opportuno insieme di misure di campo, si determina la distribuzione di induzione magnetica interna all'organismo B_{interno}.

- **Problema magnetico interno:** data la distribuzione di induzione magnetica all'interno dell'organismo B_{interno}, si determina la distribuzione di densità di corrente ***JB*** indotta dal campo magnetico.

- **Problema elettrico esterno:** noto il valore del potenziale elettrico V conduttori su tutti gli oggetti conduttori del teatro espositivo, si determina la densità (superficiale o lineare) di carica su di essi, ed in particolare la densità di carica superficiale hS indotta sulla superficie esterna del modello dell'organismo esposto, considerato perfettamente conduttore.

- **Problema elettrico interno:** nota la densità superficiale di carica hS indotta sul modello dell'organismo esposto si determina la distribuzione di densità di corrente ***JE*** indotta dal campo elettrico.

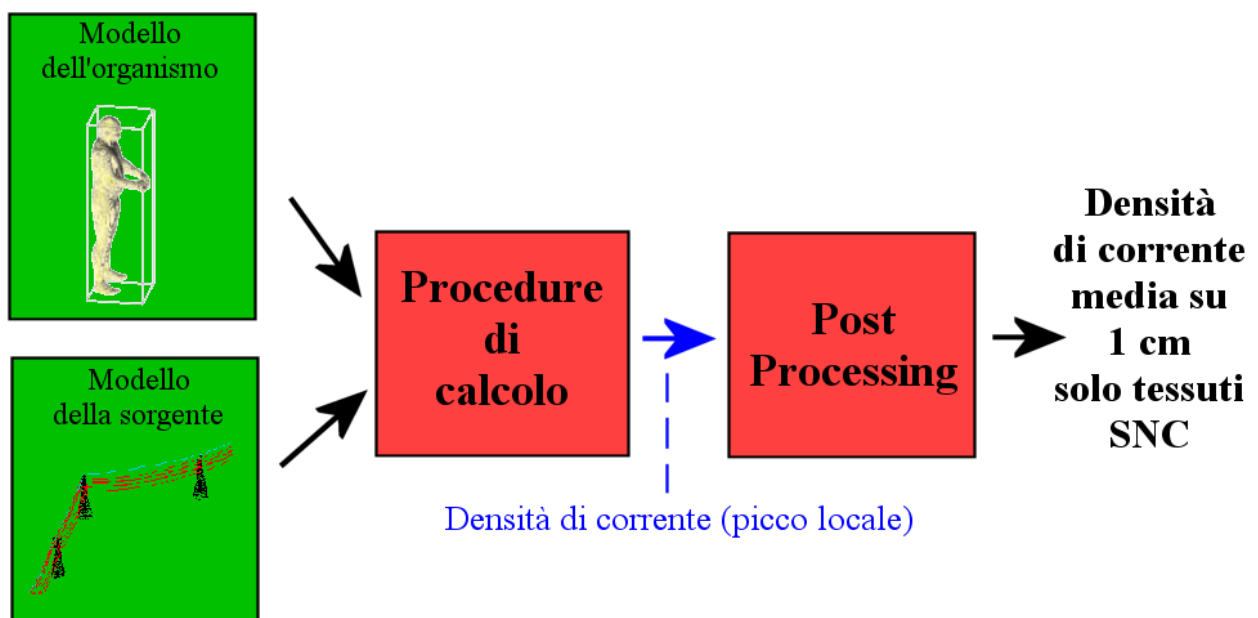
Fig. 4.1 Suddivisione di calcolo delle correnti indotte nell'organismo.



Nella figura 4.2 è illustrato un diagramma a blocchi che descrive in modo schematico gli elementi componenti una analisi dosimetrica numerica a bassa frequenza:

- il modello dell'organismo umano
- il modello della sorgente
- le procedure di calcolo della densità di corrente indotta all'interno dell'organismo
- le procedure per la determinazione della media superficiale della densità di corrente e per la limitazione dell'analisi al solo sistema nervoso centrale.

Fig. 4.2 Schema a blocchi di una analisi dosimetrica in condizioni quasi statiche



4.2.1 Problema magnetico esterno

In prima approssimazione, il campo magnetico generato dalle sorgenti non è perturbato dalla presenza dell'organismo. La soluzione del problema magnetico esterno è quindi data dalla distribuzione del campo magnetico imperturbato generato dalle sorgenti nel volume occupato dal modello di organismo esposto. Per risolvere problemi tridimensionali è necessario che siano note le tre componenti del campo impresso in ciascuno dei segmenti che compongono il modello di organismo esposto. Ciò significa che, anche nel caso di modelli a media risoluzione, si devono determinare milioni di valori (vettoriali) di campo impresso; ciò rende ovviamente impraticabile la misura del campo in tutti i punti di interesse.

Per disporre della distribuzione di campo impresso sono possibili sostanzialmente due approcci:

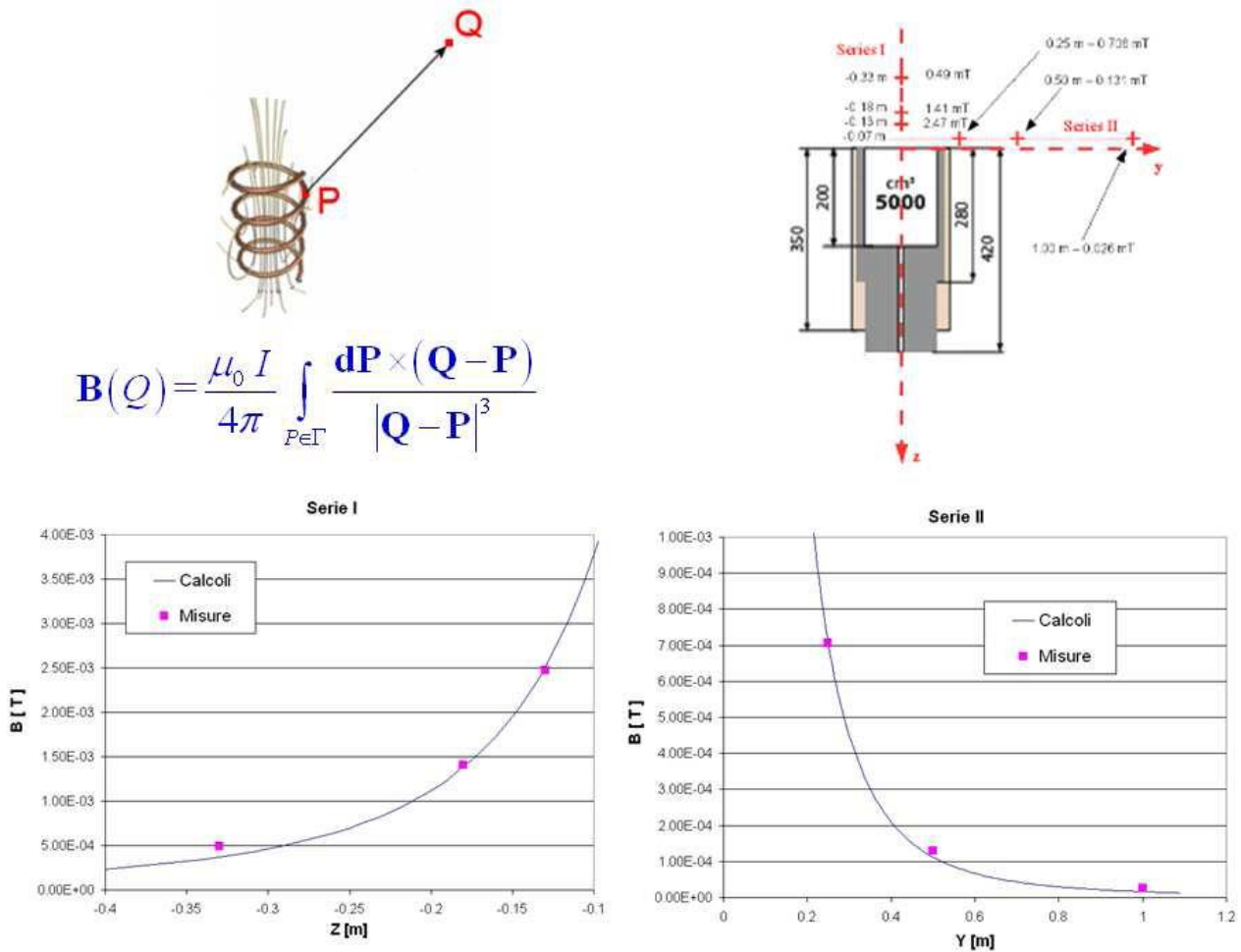
(1) la modellazione matematica delle sorgenti, (2) l'interpolazione da dati misurati.

La modellazione delle sorgenti è possibile quando queste siano rappresentabili come composizione di un numero ragionevolmente basso di sorgenti elementari, come rette, segmenti, spire o porzioni di piano percorse da correnti. Il campo impresso in un generico punto è la somma (vettoriale) dei contributi di tutte le sorgenti elementari.

In alternativa è possibile partire dai dati misurati ed applicare alcune tecniche di interpolazione. Tra queste si cita, in particolare, la tecnica dello sviluppo in multipoli, che può essere utilizzata sia in caso di pochi punti di misura (Andreuccetti e altri, 1993), sia quando siano disponibili dati misurati su insiemi più numerosi di punti, disposti in modo adattato alla particolare sorgente da trattare (Nishizawa e altri, 2004).

La figura 4.3 si riferisce al fornetto ad induzione rappresentato schematicamente in figura 4.2. La sorgente è stata modellata come un solenoide ed il campo magnetico è stato calcolato integrando la legge di Biot - Savart in forma differenziale lungo di esso. Sono stati trascurati sia i cavi di alimentazione, sia tutte le parti metalliche della struttura del fornetto che non fossero i conduttori del solenoide. Le caratteristiche della sorgente sono infine state aggiustate in modo da ottenere un buon accordo tra valori calcolati e quelli misurati in un numero limitato di punti, come rappresentato in figura 4.3.

Fig. 4.3 Distribuzione di campo magnetico impresso



4.2.2 Problema elettrico esterno

Nel caso di esposizione a sorgenti di campo elettrico, il problema esterno ha caratteristiche molto differenti rispetto al caso magnetico, poiché il soggetto distorce il campo elettrico impresso. È necessario quindi caratterizzare una porzione di spazio sufficientemente grande da poter considerare trascurabile ai suoi margini la perturbazione dovuta al soggetto esposto.

Per la soluzione del problema elettrico esterno si ricorre quindi alla rappresentazione matematica delle sorgenti, che però deve tenere conto anche del soggetto esposto, considerato come un conduttore perfetto, sul quale si vuole calcolare la densità di carica indotta dal campo elettrico. Per risolvere questo problema possono essere utilizzati metodi numerici come la soluzione dell'equazione di Laplace per il potenziale elettrostatico, mediante differenze finite (Dimbylow, 2000) o dell'equazione integrale della carica, con il metodo dei momenti (Chuang e Chen, 1989). Se si ha a che fare con modelli di organismo ad alta risoluzione, è preferibile adottare un metodo del primo tipo, perché richiede minori risorse di calcolo e memoria a parità di dimensioni del problema. La richiesta di molta memoria e di grande potenza di calcolo è una caratteristica tipica del problema elettrico esterno. Al fine di contenere le dimensioni del problema, si possono ad esempio utilizzare celle a dimensione variabile, più piccole in prossimità dell'organismo, più grandi lontano da esso. Un altro possibile approccio è quello di affrontare in sequenza problemi con celle sempre più piccole, in cui la soluzione di ciascun problema è utilizzata come condizione al contorno per quello successivo (Dimbylow, 2000). Aumentando la risoluzione ma lasciando grosso modo inalterato il

numero delle celle, si ottengono rappresentazioni di volumi sempre più piccoli ed aderenti al modello dell'organismo (fig.5).

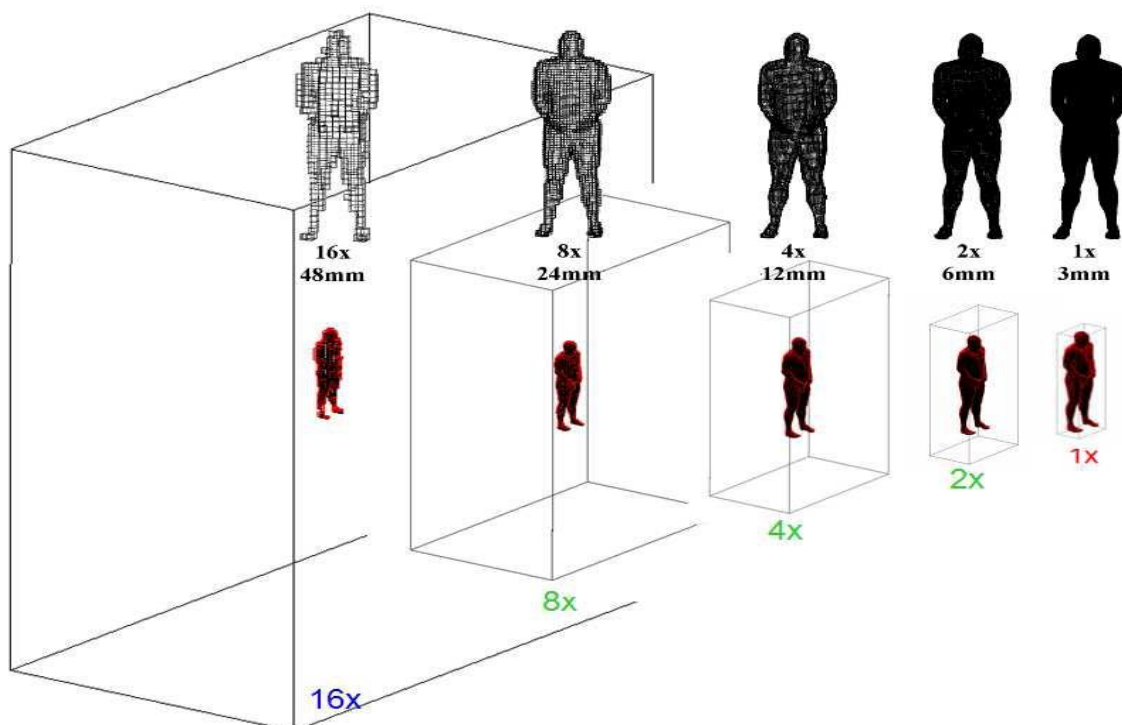
4.2.3 Problema interno

Una volta determinata la distribuzione di campo magnetico all'interno del soggetto esposto e/o la distribuzione della densità superficiale di carica indotta dal campo elettrico sulla sua superficie esterna, si può passare alla soluzione del problema interno, magnetico e/o elettrico. Tra i metodi più generali descritti in letteratura, nel senso che permettono di trattare sia problemi bidimensionali, sia problemi tridimensionali ed inoltre sia il problema elettrico, sia quello magnetico, si citano il metodo delle impedenze (Ghandi, DeFord, 1984) e il metodo Scalar Potential finite Difference, detto anche SPFD (Davey e altri, 1991). Con opportuni adattamenti sono inoltre applicabili anche i metodi alle differenze finite nel dominio del tempo (Dimbylow, 2000), che sono attualmente i più utilizzati per risolvere problemi ad alta frequenza.

Sebbene dal punto di vista teorico i metodi numerici citati possono dirsi maturi, tuttavia la soluzione di problemi reali può riservare difficoltà tecniche non banali. I modelli dell'organismo a media risoluzione sono sei caratterizzati da milioni di celle, quelli ad alta risoluzione da centinaia di milioni di celle e quindi da altrettante incognite. Per risolvere i problemi di queste dimensioni in tempi ragionevoli e con l'accuratezza desiderata possono essere necessari computer molto potenti, con configurazioni non standard.

In relazione ai tempi di calcolo, la soluzione del problema elettrico interno è generalmente più onerosa rispetto a quella del problema magnetico. Ciò è dovuto al fatto che il termine forzante (in questo caso la variazione nel tempo della carica superficiale) è concentrato su un numero relativamente piccolo di segmenti. Questo rende la convergenza delle procedure numeriche più lenta rispetto al caso in cui il termine forzante risulti presente in tutte le celle del problema, come nel caso del problema magnetico interno.

Fig. 4.4 Distribuzione campo magnetico e densità di carica all'interno del corpo umano.



4.2.4 Post - processing

Una volta calcolata la densità di corrente cella per cella, per confrontare i valori ottenuti con i relativi valori limite di esposizione è necessario (1) calcolarne la media superficiale su una superficie di 1 cm² ortogonale alla densità di corrente stessa in ciascun punto di interesse; (2) valutare in che modo si debba limitare tale media alle sole celle che compongono il SNC.

L'adempimento di queste prescrizioni è tutt'altro che immediato e costituisce uno dei principali problemi aperti nell'applicazione della normativa. Non è infatti chiaro come si debba procedere nel caso in cui il punto di applicazione della media si trovi vicino alle interfacce con tessuti che non appartengono al SNC oppure quando la sezione trasversa dell'insieme delle celle che rappresentano il sistema nervoso abbia estensione inferiore al centimetro quadrato, come avviene nel caso del midollo spinale. Questo aspetto è affrontato anche da recenti pubblicazioni, come (Bahr e altri, 2007) e (Dimbylow, 2008).

I due lavori appena citati si concentrano sulle difficoltà di applicazione del concetto di media superficiale più che sull'algoritmo per la sua determinazione. Ci si riferisce in particolare a casi in cui la grandezza vettoriale da mediare risulta parallela ad un asse coordinato. Inoltre si utilizzano superfici di forma quadrata, allineate con gli assi coordinati. In (Zoppetti e Andreuccetti, 2008) si considera il caso del fornetto ad induzione rappresentato in figura 2 e si applica alla stessa distribuzione di densità di corrente di picco, sia l'algoritmo semplificato descritto in (Dawson e altri, 2002), che è quello più utilizzato in letteratura, sia un algoritmo rigoroso per l'esecuzione della media superficiale, sviluppato all'IFAC. Le differenze che si osservano in tabella 1 ed in figura 6 evidenziano come la scelta dell'algoritmo per l'esecuzione della media superficiale rappresenti una importante fonte di incertezza metodologica.

Ancora a proposito della media superficiale è opportuno notare come, nel caso di polarizzazione circolare o ellittica della densità di corrente (come quella dovuta a sorgenti ELF trifase), il concetto di media superficiale non sia ben definito, non essendo possibile individuare univocamente un piano ortogonale ad un vettore che muta la sua direzione nel tempo. In questo caso, può risultare utile l'algoritmo semplificato presentato in (Dawson e altri, 2002) che, utilizza superfici allineate con gli assi coordinati e svincolate dalla direzione della densità di corrente.

4.3 Risonanza del corpo

A frequenze nella banda delle VHF, l'orientamento del corpo rispetto al campo incidente è di estrema importanza. Il corpo si comporta come un' antenna e l'energia assorbita in modo risonante in funzione della lunghezza del corpo rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione incidente. Per un uomo di taglia media isolato elettricamente dal terreno, il picco di questo assorbimento risonante avviene nella gamma di frequenza 70-80 MHz, e 35-40 MHz nel caso che il soggetto sia messo elettricamente a terra. Persone più piccole e bambini mostrano la caratteristica di risonanza a frequenze più alte.

4.4 Composizione della densità di corrente

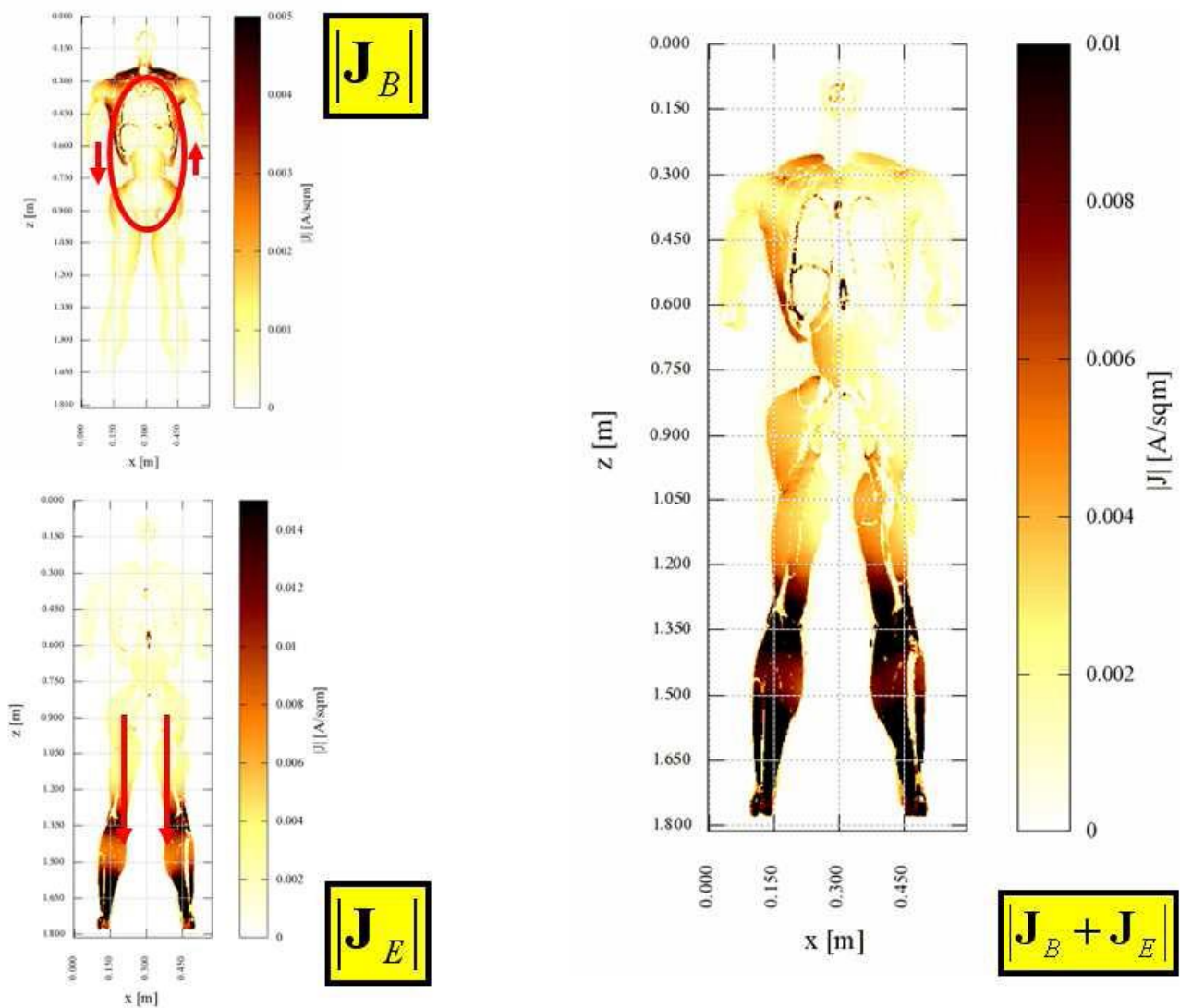
Come si è visto l'esposizione al campo elettrico ed al campo magnetico a bassa frequenza dà luogo a densità di corrente indotte calcolate indipendentemente l'una dall'altra: quella di origine magnetica *JB* e quella di origine elettrica *JE*. La normativa prescrive di considerare separatamente *JB* e *JE*, nel senso di confrontare ciascuna di esse e non la loro somma vettoriale con il limite. Esistono però alcuni casi, come ad esempio quello di un lavoratore esposto al campo elettrico e al campo magnetico generato da un elettrodotto, in cui si hanno informazioni sufficienti per comporre vettorialmente le densità di corrente indotte *JB* e *JE*.

In figura 4.4 è illustrato l'esempio di un soggetto posto nelle immediate vicinanze di un tratto di un

elettrodotto trifase a 380 kV. In questo caso, si è utilizzato il modello di sorgente in cui la terna di conduttori è rappresentata da un fascio di rette orizzontali e parallele e si è supposto che, su ciascun conduttore, la corrente e la tensione siano in fase tra loro. Trattandosi di una sorgente trifase, le densità di corrente J_B e J_E sono state calcolate considerando le grandezze come vettori la cui ampiezza è un numero complesso.

Osservando la composizione delle due distribuzioni si può notare come la corrente indotta dal campo elettrico in alcune zone tenda a sottrarsi a quella indotta dal campo magnetico, mentre in altre tenda a sommarsi ad essa e ciò, pur non essendo previsto dalla normativa, ha sicuramente rilevanza nel momento in cui si voglia valutare cosa realmente accada dal punto di vista fisico ed eventualmente sanitario.

Fig. 4.5 Densità di corrente J_E e J_B all'interno di un soggetto posto nelle vicinanze di un elettrodotto trifase a 380 kV.

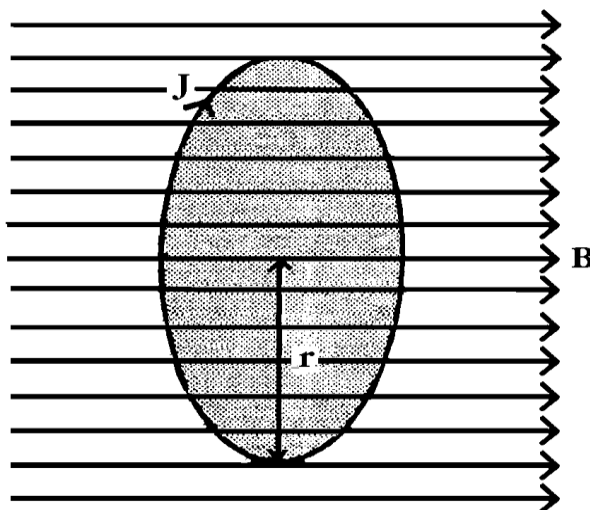


Le correnti indotte dai campi elettrici comunemente fluiscono attraverso le gambe ed i piedi verso il terreno o il pavimento (qualsiasi superficie che sia a potenziale più basso e sia in contatto col

corpo). In tal caso l'uso di strumentazione posta in serie fra il corpo e la terra può fornire una misura di queste correnti.

Nel caso di esposizione a campi magnetici, le correnti indotte circolano in genere attorno ad una sezione trasversale del corpo e quindi la maggiore intensità si verifica alla periferia esterna del corpo, in prossimità della superficie, dove si ha la sezione di maggiore diametro. Queste correnti per loro natura non tendono ad uscire dal corpo come quelle indotte dal campo elettrico e, di conseguenza, presentano grandi difficoltà nella misura.

Fig. 4.6 Correnti indotte nel caso di esposizione a campi magnetici.



Modello per esposizione al campo magnetico:

In generale sarà:

$$J = (r \cdot \sigma \cdot dB) / (2dt) \quad (4.1)$$

Dove:

- J è la densità di corrente indotta
- σ è la conducibilità della sfera
- R è il raggio della sfera
- B è l'intensità dell'induzione magnetica

4.5 Che cosa succede quando siamo esposti ai campi elettromagnetici?

A seconda della frequenza e dell'intensità, i campi elettromagnetici esercitano azioni diverse sull'organismo. I campi elettromagnetici a 50-60 Hz influenzano la distribuzione delle cariche elettriche nei tessuti biologici e inducono correnti nel corpo, la cui intensità dipende dall'intensità del campo. Per livelli particolarmente elevati (superiori a quelli cui è esposta normalmente la popolazione), i campi elettromagnetici alle basse frequenze possono provocare la contrazione involontaria di muscoli, oppure possono stimolare i nervi. Il limite di esposizione di 100 microtesla indicato dall'ICNIRP (*International Commission on Non-Ionising Radiation Protection*) è stato stabilito proprio in base alla soglia di intensità cui inizia a manifestarsi la stimolazione di muscoli e nervi. Per i campi elettromagnetici alle radiofrequenze, l'effetto biologico principale che si riscontra

in seguito all'esposizione è il riscaldamento dei tessuti che sono più a contatto con la sorgente. Questo fenomeno è ben visibile negli utilizzatori dei telefoni cellulari, in cui è stato evidenziato un incremento della temperatura dalla parte della testa ove si posiziona il telefonino durante l'utilizzo. Gli esperti sottolineano che il fatto che l'esposizione ai campi elettromagnetici provochi effetti biologici misurabili (come l'aumento della temperatura o l'induzione di correnti) non significa automaticamente che debbano esserci conseguenze sulla salute. L'Organizzazione Mondiale della Sanità, che nel 1996 ha avviato un programma specifico sui campi elettromagnetici, sottolinea che gli effetti biologici sono le risposte naturali dell'organismo agli stimoli che provengono dall'ambiente. Gli effetti sulla salute si verificano quando l'esposizione lede l'integrità dell'organismo.

4.5.1 Effetti sulla salute

Da una trentina di anni a questa parte la ricerca scientifica studia la questione degli effetti sulla salute dei campi elettromagnetici. Soprattutto per le emissioni alle basse frequenze, la questione è stata indagata a fondo e sono stati prodotti circa 25.000 articoli scientifici che riguardano sia le conseguenze immediate dell'esposizione (effetti acuti), sia quelle che potrebbero insorgere nel lungo periodo (effetti cronici).

4.5.1.1 Effetti acuti

Gli effetti acuti per le basse frequenze si manifestano nel breve periodo quando si è esposti a intensità del campo magnetico superiori a 100 microtesla (μT), e cessano quando si rimane per un tempo sufficiente distanti dalla sorgente del campo. Per le alte frequenze gli effetti acuti si verificano per valori di campo elettrico non inferiori a 20 V/m.

I disturbi più comuni sono insonnia, brividi e mal di testa, sensazione di malessere. Questi effetti sono stati accertati da molti studi e su di essi i ricercatori non hanno dubbi. E' noto che alcuni individui sono particolarmente sensibili ad azioni di agenti ambientali, quali possono essere quelle dei campi elettromagnetici sia alle alte sia alle basse frequenze, manifestando malesseri anche a intensità per le quali normalmente non vengono avvertiti. Fino a oggi, gli studi che hanno analizzato l'ipersensibilità elettromagnetica non hanno tuttavia dato risultati riproducibili.

A parte questi casi, comunque, soltanto lavoratori di particolari categorie sono esposti a intensità tali da provocare questi disturbi. Il dibattito sulla presunta nocività dei campi elettromagnetici si concentra invece sugli effetti cronici, che si manifesterebbero a intensità molto minori, che si registrano a volte anche nelle abitazioni e nei comuni luoghi di lavoro.

4.5.1.2 Effetti cronici

Per motivi storici, la gran parte della ricerca epidemiologica si è concentrata sugli effetti cronici dei campi elettromagnetici a 50- 60 Hz, mentre le indagini sulle conseguenze a lungo termine dell'esposizione alle radiofrequenze è indagata in modo sistematico da meno tempo.

- Basse frequenze: le ricerche presero il via nel 1979, quando Nancy Wertheimer e Ed Leeper pubblicarono sull'*American Journal of Epidemiology* uno studio che collegava l'esposizione a intensità superiori a 0,2 μT alla leucemia infantile.

Poiché ai campi elettromagnetici siamo tutti esposti, e poiché, colpendo i bambini, la malattia in questione ha un forte impatto psicologico, quello studio fece molto scalpore, e indusse altri ricercatori a indagare a fondo la questione. Per molti anni i risultati sono stati incerti. Alle incertezze su come misurare l'esposizione individuale dei soggetti in esame, si univano i dubbi relativi alla plausibilità biologica.

Negli ultimi anni mettendo assieme gli studi prodotti i ricercatori sono arrivati a un pur minimo accordo. Secondo l'OMS, nonostante le prove rimangano controverse, «se i campi elettromagnetici hanno un effetto cancerogeno, allora l'incremento del rischio deve essere molto piccolo». L'unica forma tumorale per cui si vede un piccolo aumento del rischio è la leucemia infantile. Il rischio resta costante fra 0,2 e 0,4 microtesla, mentre tende a crescere per intensità più elevate. Una stima dell'Istituto Superiore di Sanità calcola che in Italia l'esposizione ai campi magnetici a 50-60 Hz possa provocare ogni anno tre casi di leucemia infantile.

L'Agenzia internazionale per la ricerca sul cancro (IARC) definisce i campi elettromagnetici come «possibile cancerogeno», come peraltro caffè e saccarina (vedi tabella 4.1).

Gli studi epidemiologici non hanno fornito le prove che esista un'associazione fra esposizione ai campi elettromagnetici a 50-60 Hz e malattie diverse dalla leucemia infantile.

- Alte frequenze: gli studi epidemiologici che hanno analizzato gli effetti dell'esposizione a radiazioni emesse da antenne e ripetitori sono troppo pochi e hanno dato risultati contraddittori.

Questi risultati hanno tuttavia attirato l'attenzione sui possibili danni da esposizioni croniche alle alte frequenze. Più che su antenne e ripetitori, gli studi epidemiologici si sono concentrati sulle relazioni fra tumori del cervello e uso del telefono cellulare.

Due studi importanti pubblicati fra la fine del 2000 e l'inizio del 2001 escludono che l'esposizione prolungata alle radiazioni emesse dai telefoni cellulari provochi la malattia. «I nostri dati non avvalorano l'ipotesi secondo cui l'utilizzo dei telefoni cellulari provoca tumori al cervello» scrivono gli esperti del National Cancer Institute statunitense su *New England Journal of Medicine*. «I nostri dati suggeriscono che l'impiego dei telefonini non è associato al rischio di sviluppare il tumore del cervello» concludono su *JAMA* i medici dell'American Medical Association. Entrambi gli studi sono stati condotti su gruppi di pazienti maggiori di 18 anni, mentre restano da accertare gli effetti sui bambini. Si ritiene infatti che un sistema nervoso ancora in fase di sviluppo possa essere più sensibile agli effetti delle radiazioni. Per questo motivo l'OMS raccomanda di non far usare il telefonino ai bambini. Tornando ai presunti effetti cronici delle radiofrequenze, l'OMS sostiene che «non c'è nessuna evidenza convincente che l'esposizione a radiofrequenze abbrevi la durata della vita umana, né induca o favorisca il cancro».

Le organizzazioni internazionali sottolineano comunque la necessità di ulteriori studi, sia sugli adulti sia sui bambini, e, considerato il continuo aumento nell'ambiente di fonti di campi elettromagnetici ad alta frequenza, diversi autori consigliano l'adozione di politiche cautelative basate sulla riduzione di tali esposizioni soprattutto per i bambini.

Tab. 4.1 classificazione di pericolosità dei CEM

Gruppo 1: Agente cancerogeno	prove epidemiologiche sufficienti	alcolici, asbesto, benzene, radon	75
Gruppo 2A: Probabile cancerogeno e prove sufficienti su animali	prove epidemiologiche limitate o inadeguate	formaldeide, benzopirene	59
Gruppo 2B: Possibile cancerogeno	prove epidemiologiche limitate e dimostrazioni limitate o inadeguate su animali	cloroformio, caffè, saccarina CEM a 50-60 Hz	227
Gruppo 3: Non è classificabile come cancerogeno	prove epidemiologiche inadeguate e prove inadeguate o limitate su animali	caffeina, mercurio	471

Prove sufficienti	relazione causale stabilita	relazione causale dimostrata in due studi indipendenti o in due specie diverse
Prove limitate	Osservata una relazione per cui è credibile una associazione causale ma, in cui non si può escludere una interpretazione non causale	Osservata una cancerogenicità, ma in un solo studio oppure solo per tumori benigni o tumori che hanno un'elevata incidenza
Prove inadeguate	Studi di qualità insufficiente o poco consistenti per stabilire l'esistenza di una associazione, oppure mancanza di dati nell'uomo	Studi di insufficiente qualità e consistenza per arrivare a una conclusione, oppure mancanza di dati negli animali
Mancanza di cancerogenicità	Studi negativi e consistenti che comprendano un ampio range di esposizioni e che non mostrano una associazione con nessun tipo di tumore	Studi negativi e consistenti in almeno due specie con un ampio range di esposizioni e che non mostrano carcinogenesi

4.6 Accoppiamento campo elettromagnetico - organismo

Schematicamente, l'interazione tra un campo elettromagnetico ed un organismo può essere descritta iniziando dal meccanismo di accoppiamento fisico tra il campo ed il sistema biologico, a seguito del quale determinate grandezze fisiche (campi, cariche, correnti) vengono indotte nei tessuti dell'organismo esposto. Queste grandezze sono direttamente responsabili degli effetti acuti. A bassa frequenza, tali effetti consistono in una "interferenza" delle correnti indotte con i meccanismi fisiologici della percezione sensoriale e della attivazione muscolare, per cui l'esposizione, se sufficientemente intensa, si manifesta con sensazioni tattili o visive spurie o disturbate o con contrazioni muscolari involontarie. A frequenze superiori ad un centinaio di chiloherzt circa, gli effetti acuti sono riconducibili al riscaldamento locale dei tessuti provocato, per effetto Joule, ancora dalla corrente indotta. Nella tabella seguente sono riportate le soglie di densità di corrente per i principali effetti acuti: tra parentesi è indicata la banda di frequenza interessata; i termini "minimo" e "tipico" si riferiscono alla variazione da individuo ad individuo; per l'effetto termico, è riportato il valore di SAR (*Specific Absorption Rate*, potenza assorbita per unità di massa) universalmente considerato "sicuro".

Tab. 4.2 Effetti sul corpo umano in base alle frequenze su cui si opera

10 mA/m ²	20 Hz	Valore minimo per la generazione di fosfeni (allucinazioni ottiche).
100 mA/m ²	10÷400 Hz	Valore minimo per la stimolazione dei recettori nervosi periferici (percezione di formicolii e sensazioni analoghe).
0.5 A/m ²	10÷100 Hz	Valore tipico per la stimolazione di contrazioni nella muscolatura scheletrica.
0.8 A/m ²	10÷100 Hz	Valore minimo per l'eccitazione di extrasistole ventricolari.
2 A/m ²	10÷100 Hz	Soglia minima di innesco della fibrillazione ventricolare con tempi di stimolazione di almeno 1 secondo.
0.4 W/kg	>100 kHz	Soglia "termica".

Poiché le soglie degli effetti biologici acuti sono note in funzione dei valori della densità di corrente indotta e del SAR, queste ultime vengono considerate grandezze primarie dalle norme di sicurezza ed i loro rispettivi valori massimi ammissibili sono considerati limiti primari. Essendo però, di fatto, estremamente difficile misurare i valori delle grandezze primarie nelle condizioni reali di esposizione (è tutt'al più possibile calcolarli in condizioni standardizzate e semplificate), le norme di sicurezza specificano anche i cosiddetti limiti derivati, cioè i valori massimi ammissibili delle intensità dei campi in assenza dell'individuo esposto, grandezze più facilmente accessibili alla misura diretta. I modelli dosimetrici costituiscono gli strumenti fisico-matematici che permettono di risalire dalle grandezze derivate a quelle primarie, cioè di stabilire la distribuzione di densità di corrente indotta o di SAR in un individuo esposto, una volta che siano note le condizioni di esposizione e le caratteristiche del campo elettromagnetico nel teatro espositivo.

4.7 Ruolo della frequenza

La frequenza è il parametro principale che influenza la modalità di interazione del campo elettromagnetico con un sistema biologico e quindi ne condiziona gli effetti, al punto che un campo elettrico di fissata intensità può essere pressoché insignificante o assai pericoloso, a seconda della sua frequenza: per questo motivo le norme di sicurezza specificano sempre limiti massimi notevolmente variabili con la frequenza. Due sono gli aspetti significativi di questa questione.

1. La frequenza condiziona innanzitutto la struttura stessa del CEM nell'intorno della sorgente, che si modifica notevolmente in funzione della distanza da essa, rapportata alla lunghezza d'onda del CEM, passando dalla zona dei campi reattivi a quella dei campi radiativi; questo fenomeno condiziona anche le modalità di misura.

2. Lo stesso meccanismo di accoppiamento fisico tra CEM ed oggetti biologici dipende in modo critico dal rapporto tra la dimensione dell'organismo esposto e la lunghezza d'onda del campo.

Tirocinio presso l'azienda Luxottica nel campo della misurazione dei campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici e redazione finale del DVR.

1.1 Formazione sulla legislazione vigente e sulla strumentazione da utilizzare

L'esperienza presso l'azienda ha previsto un mese di preparazione presso l'università di Padova e la relativa pratica presso l'azienda.

Si è preso in visione il decreto legislativo 626 del 9 aprile 2008 con particolare interesse al titolo VIII capo IV relativo alla protezione dei lavoratori dai rischi di esposizione ai campi elettromagnetici ed ai relativi allegati XXXVI con i valori limite di esposizione e valori di azione per i campi elettromagnetici. Questa lettura è stata integrata con le due guide CEI 211-6 per la misura e per la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0 Hz-10 kHz, con riferimento all'esposizione umana e CEI 211-7 per la misura e la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10 kHz-300GHz, con riferimento all'esposizione umana. Questi testi forniscono una guida dettagliata sulle diverse fasi da seguire, la strumentazione da utilizzare e la variazione spaziale e temporale da seguire per ottenere un'ottimale misura dei campi elettromagnetici nelle condizioni di maggior trasferimento di potenza. È quindi necessario suddividere le misure in due tipologie: a bassa frequenza(0-10 kHz) ed ad alta frequenza (10 kHz-300 GHz). Per la bassa frequenza si procederà a due misure distinte del campo elettrico e del campo magnetico in quanto essendo nel caso di campo vicino le due grandezze non sono direttamente ricavabili una dall'altra. Nel caso dell'alta frequenza sarà invece bastevole un'unica misura del campo elettromagnetico. È seguito lo studio della strumentazione da utilizzare con particolare attenzione alle diverse tipologie di strumenti(analizzatori di spettro ed a banda larga) ed alle diverse sonde (triassiali o monoassiali).

1.2 Differenze fra le misurazioni a bassa ed ad alta frequenza

Nell'ambito della misura di un macchinario si dovrà inizialmente tenere conto della frequenza alla quale opera. In base a tale valore si dovrà fare riferimento rispettivamente alla guida CEI 211-6 o alla guida CEI 211-7. Se operiamo ad esempio a 50 Hz sarà necessario utilizzare una sonda conforme a tale frequenza. Si dovrà inoltre eseguire distintamente le misure dei due campi. Particolare attenzione verrà data alla misura del campo magnetico, il quale, in quanto originato dalle correnti, dipenderà da esse. Si avranno quindi possibili valori oscillatori del campo magnetico dovuti alle variazioni di corrente nell'arco del tempo. Si deve quindi eseguire una media temporale dei valori raccolti e possibilmente tracciare la misura nel momento di maggiore carico, tenendo nota dei valori massimi raggiunti dalla corrente durante la rilevazione. Inoltre tale campo può anche venire influenzato dalla presenza di elementi ferromagnetici nelle vicinanze della sonda che possono influenzare il valore effettivo. Si dovrà quindi cercare di porsi il più possibile distanze da tali sostanze e, in caso d'impossibilità, segnalarne la presenza nella relazione che si farà.

Il campo elettrico a bassa frequenza invece non presenta particolari oscillazioni nella misura poiché la tensione, da cui dipende, rimane sempre costante. Esso varia se vi sono presenti fenomeni impulsivi come l'accensione o lo spegnimento della sorgente di misura. Si esegue comunque una media temporale della misura segnalando l'eventuale presenza di picchi se questi superano i valori segnalati nell'allegato XXXVI del testo unico. Inoltre tale campo varia sensibilmente in presenza di materiali conduttori fra i quali il corpo umano. Si cercherà quindi di effettuare la misura lontano da tali elementi e cercando di allontanandosi dalla sonda di circa 2-3 m per permettere una corretta

misurazione della sorgente interessata. Nel caso della strumentazione di misura PMM 8053 la sonda viene connessa allo strumento mediante un collegamento in fibra ottica che non risente di particolari dispersioni di campo e non è influenzata da eventuali sorgenti di campo elettrico.

Se viceversa si opera ad alta frequenza, il campo elettrico e magnetico sono mutuamente dipendenti ed in quadratura fra loro. Si eseguirà quindi un'unica misura del campo elettrico (magnetico) e poi si ricaverà direttamente il campo magnetico(elettrico) mediante la legge $E = 377 \times H$. Tale rilevazione dovrà essere eseguita per un periodo di 6 minuti, sempre secondo le direttive della guida CEI 211-7.

1.3 Scelta dello strumento di misura

Vi sono due possibili scelte di strumentazione: gli strumenti a banda larga e quelli a banda stretta. I primi forniscono il solo campo totale ma non danno informazioni aggiuntive (ad esempio numero, origine ed intensità) sui segnali che concorrono a fornire il valore misurato; mentre i secondi permettono l'analisi selettiva in frequenza, permettendo quindi di discriminare tra segnali provenienti da diverse sorgenti. Per questa trattazione si è utilizzata la prima tipologia. La scelta è effettuata anche sui sensori che possono essere di tre tipi:

- bolometrici: es. termistore molto sensibile alla variazione di temperatura e per questo motivo poco usato
- termocoppia: in questo caso l'antenna termina con una termocoppia, usata solo per campi elettromagnetici di bassa intensità
- a diodi: sono i più diffusi

Un misuratore di campo elettromagnetico a banda larga si compone essenzialmente di due parti: un apparato di misura del campo che elabora e presenta i dati e le sonde per il campo elettrico e magnetico, per rilevazioni nella regione di campo vicino, e per il campo elettromagnetico, nella regione di campo lontano. L'apparato si divide in analizzatori palmari, che sono costituite da sonde direttamente interfacciabili con l'analizzatore e in analizzatori ottici, costituiti da sonde interfacciate tramite l'uso di un ripetitore ottico ed il trasporto del segnale tramite cavi di fibra ottica col vantaggio di aumentare la distanza sonda-operatore. La sonda deve essere sempre posta su un sostegno isolante. Vi sono due tipologie di sonde:

- triassiale: misura contemporaneamente tutte le tre componenti del campo; la sonda contiene tre sensori a larga banda, disposti ortogonalmente tra loro e che rivelano il valore del campo e lo inviano allo strumento misuratore.
- monoassiale: misura una componente del campo alla volta; la sonda è costituita da un solo sensore a larga banda, la risposta dipende dall'orientazione di quest'ultimo rispetto al campo. Agisce su un determinato range di frequenza sommando tutti i segnali percepiti.

1.3.1 PMM 8053

Il sistema PMM 8053 è un misuratore portatile che, mediante opportuni sensori, permette di rilevare e misurare campi elettromagnetici compresi nell'intervallo di frequenza di 5 Hz a 18 GHz.

1.3.1.1 Misure in alta frequenza con la sonda EP-330.

La prima operazione consiste nel posizionare la sonda EP-330 ed il misuratore di campi elettromagnetici sul cavalletto, all'altezza prevista dalla normativa (1,1 e 1,9 m dal suolo). Accensione dello strumento ed impostazione dei parametri di misura mediante la funzione SET. Acquisizione delle misure. Importante fra le impostazioni di Set è la media aritmetica (AVG) o la

media quadratica(RSM). Il valore medio è visualizzato nella finestra principale assieme ai valori Massimo e minimo. Quando il PMM 8053 avrà acquisito un numero sufficiente di dati o sarà trascorso il tempo scelto nel menù, nel display principale la misura media sarà evidenziata con un piccolo simbolo v come in tale esempio:

MAX 1.45
 MIN 1.29
 V AVG 1.35

Dove sarà: $AVG = \frac{1}{T} \int_0^T |E(t)| dt$ (1.1)

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |E(t)|^2 dt} \quad (1.2)$$

Un'altra importante impostazione è Freq: inserendo il valore di una frequenza da misurare conosciuta, il PMM 8053 correggerà la misura effettuata usando un fattore di correzione inserito in una tabella interna alla sonda. Ciò permetterà di ottenere una misura molto precisa del valore di campo sulla frequenza scelta. Infine la funzione Filter permette di ridurre il rumore durante le misure grazie ad un filtro passa basso presente nello strumento.

Fig. 1.2 Sonda EP-330



1.3.1.2 Misure in bassa frequenza con la sonda EHP-50

Tale sonda è un sensore-analizzatore isotropico di campi elettrici e magnetici a bassa frequenza. Verrà posizionata su un supporto isolato e collegata all'analizzatore tramite della fibre ottiche che ne trasportano il segnale. Ciò permette una maggiore distanza sonda-operatore evitando fenomeni di disturbo del segnale dovuti alla presenza del corpo umano in quanto elemento conduttore. Si utilizza la fibra ottica poiché ha bassissime dispersioni. Tale sonda misura sia il campo elettrico che quello magnetico da 5 Hz a 100 kHz. Aggiunge alle funzioni del SET quella dello Span che può essere a 100,200,500 Hz e 1 2 10 100 kHz. Internamente tale sonda è composta da numerosi elementi circuitali che realizzano le funzioni di trasduzione(dal campo E o B a tensione) e di rilevazione. Vi è un sistema triassiale di bobine per il campo magnetico mentre per il campo elettrico vi è un sistema triassiale di sonde a potenziale libero.

Fig. 1.3 Sonda EHP-50



2.1 Esperienza in azienda: mappatura dell'ambiente di misura e relative misurazioni.

La formazione è proseguita in azienda dove si è potuta studiare la planimetria della fabbrica con relativa disposizione dei macchinari, delle linee elettriche e delle varie sorgenti di energia. Inizialmente si è suddivisa la mappa secondo due diversi tracciati: le zone interessate dal passaggio di elettrodotti e le varie zone in cui erano presenti macchinari con caratteristiche tecniche simili fra loro. Si sono inoltre differenziati i macchinari che operano ad alta frequenza da quelli che funzionano alla frequenza fondamentale. Infine è stata fatta un'ulteriore suddivisione fra l'area riservata ai lavoratori specializzati da quella riservata agli uffici o alle zone di passaggio. In questo caso si utilizzeranno dei diversi limiti per l'esposizione ad i campi elettromagnetici.

Si sono perseguiti due obiettivi nell'eseguire tali suddivisioni:

- individuare il punto di massimo campo
- realizzare mappature dei valori di campo.

Si possono seguire quattro metodologie per mappare una zona: nel caso non vi siano previsioni sulla distribuzione del misurando si usa il metodo della griglia, ovvero si suddivide il piano di misura secondo una griglia e si eseguono vari rilevamenti nei punti segnati equispaziati fra loro per avere un'ottimale e completa caratterizzazione di tale zona. La seconda metodologia consta nell'eseguire un'analisi in punti a caso vicino alla sorgente del segnale per vedere le variazioni di tali misure senza risentire della stazionarietà del segnale. La terza applicazione consiste nel fissare una diagonale preferenziale tenendo conto della posizione delle sorgenti e poi di procedere a zig-zag rispetto a tale diagonale. Si utilizza nel caso in cui non vi siano molte sorgenti o queste non diano luogo a particolari valori in modo da dare una caratterizzazione del luogo di misura in più punti ed in maniera rapida. Infine se vi sono sorgenti a diffusione radiale, come le antenne ad esempio, si farà una misura vicino alla sorgente e poi si procederà radialmente a questa. Dopo aver suddiviso in tale modo l'area d'interesse bisogna conoscere le caratteristiche principali dei macchinari che si va a misurare come la frequenza a cui operano, la potenza e la corrente che vi circola e se vi sono presenti fenomeni impulsivi. Inoltre bisogna fare particolare attenzione se in tali macchinari sono presenti schermature oppure guasti e rotture che possono dare luogo a dispersioni.

Dopo aver fatto queste constatazioni si può proseguire alla misura dell'esposizione dei campi elettromagnetici alla quale si sottopone il lavoratore. Individuata la frequenza a cui opera il macchinario la si inserisce nello strumento di misura, in questo caso il PMM 8053, e si seleziona la

durata della misura, che in base alle raccomandazioni delle guide CEI, contempla un tempo di sei minuti. In seguito si precisa il campo che si vuole misurare e la relativa unità di misura.

Lo strumento di misura va quindi posto a breve distanza dal macchinario, cercando di rappresentare il più fedelmente possibile la situazione a cui è sottoposto il lavoratore. Si deve quindi effettuare la misura a tre differenti altezze per valutare le diverse risposte a livello gambe, tronco e testa. Inoltre nel caso vi siano più sorgenti di campi elettrici e magnetici oppure una parte del corpo sia più esposta di altre a tale sorgente bisogna eseguire ulteriori misure nel punto di particolare interesse. La misura va quindi soppesata caso per caso. Nell'ipotesi di macchine funzionanti sia a bassa che ad alta frequenza per mezzo di impulsi si deve eseguire la misura nell'arco di tempo dei sei minuti ed eseguire la media in tale tempo. Si dovrà comunque segnalare le presenza di eventuali picchi che superino i valori limite anche se questi vengono assorbiti nella media temporale. Per ottenere una valida valutazione dell'esposizione ad i campi elettromagnetici la rilevazione si effettua nel momento di massimo carico e con tutti i macchinari accesi per avere la risposta nel caso peggiore. Ovviamente sempre dal punto di vista del lavoratore e delle condizioni generalmente attuabili.

Quando invece si misurano le dispersioni prodotte dagli elettrodotti o dalle cabine elettriche, si opera prevalentemente a bassa frequenza, in questo caso alla frequenza fondamentale (50 Hz), e ci si pone con la sonda allo stesso livello in cui passano le linee a circa 1 m ed a 1,5 m dal suolo calpestabile. Anche in questo caso si deve possibilmente eseguire la misura nell'ipotesi di massima potenza trasportata nelle linee ed eseguirla nell'arco dei sei minuti in quanto il campo magnetico, dipendendo dalla corrente, non sarà in linea di massima uniforme. Inoltre se tali linee passano all'interno dei reparti dove operano i macchinari bisogna tenere conto anche del contributo al campo elettrico e magnetico dovuto dal funzionamento di tali macchine. Infine particolare attenzione va data alla misura del campo elettrico a bassa frequenza facilmente perturbabile se nelle vicinanze vi sono elementi conduttori compreso il corpo umano ed al campo magnetico se vi sono elementi ferromagnetici in prossimità della sonda.

2.2 Suddivisione delle misure e stesura del DVR.

Una volta completate le misure nei vari luoghi di lavoro si redige una tabella in cui si indicano i valori raccolti alle varie altezze e distanze dai punti di misura. Vanno inoltre indicate le frequenze alle quali si è ottenuta la valutazione ed il luogo in cui si è eseguita la misura; se punto di passaggio od ufficio bisognerà segnalarlo ed utilizzare differenti valori del limite di esposizione.

Queste valutazioni vanno confrontate con i valori limite espressi negli allegati XXXVI del Testo Unico o nei D.P.C.M. per la popolazione. Nel caso di valori superiori a quelli limite si procederà, ove possibile, ad una schermatura della sorgente o alla chiusura della zona con limite d'ingresso a persone specializzate ed informate. Qui di seguito è presente un esempio di tabella di misura con relativa mappatura:

Fig. 2.1 Suddivisione fra misure eseguite a bassa frequenza (croci blu) ed a alta frequenza (punti rossi).

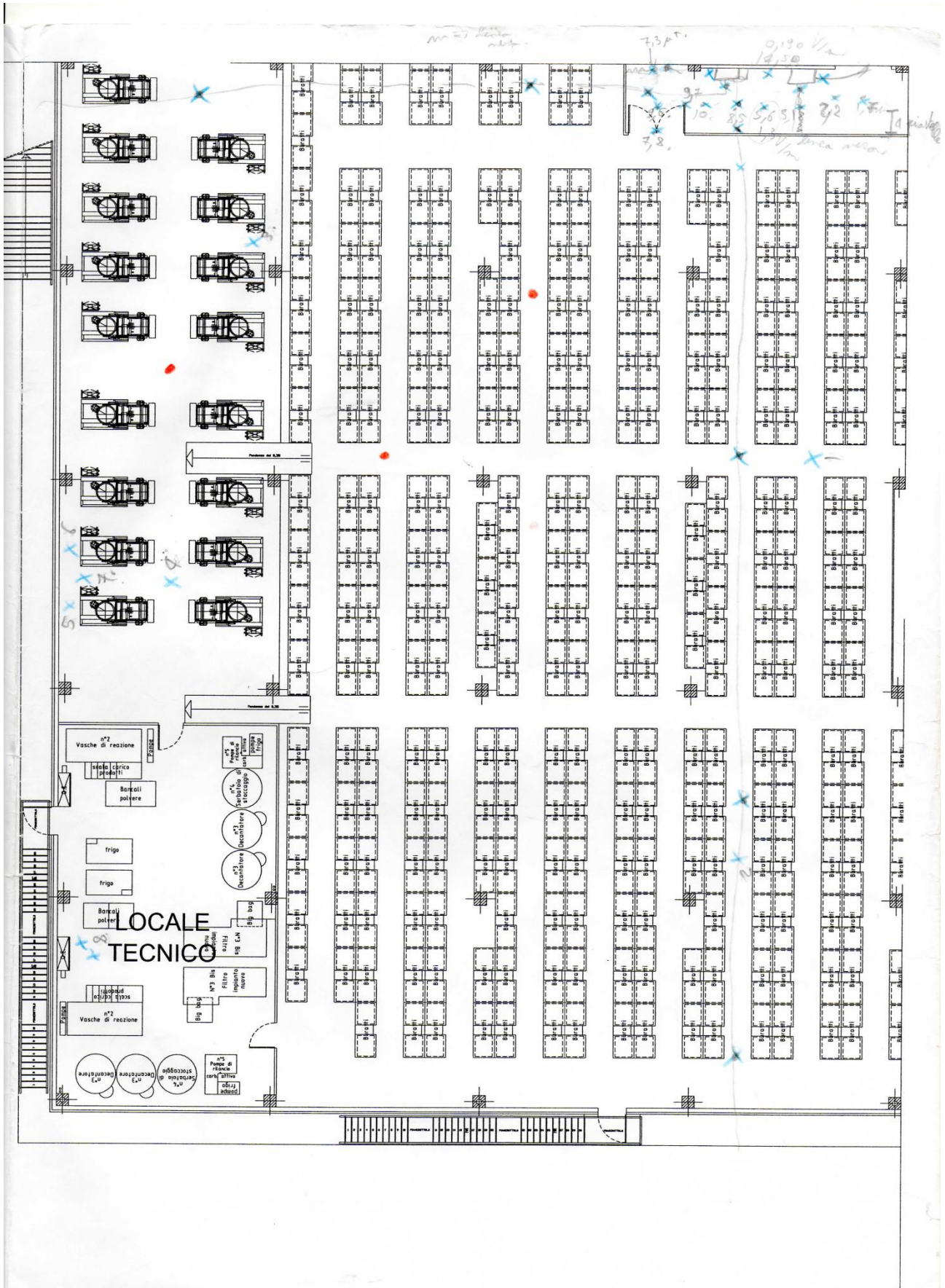
nero: area popolazione minore 4h

blu: area popolazione $\geq 4h$ con obiettivo di qualità

rosso: area critica per la popolazione (sosta $>4 h$)

POSIZIONE	100 Hz	500 Hz	2 kHz	10 kHz	100 kHz	POTENZA	ALTEZZA	PICCO
Punto 1 E:	0,988V/m		0,886V/m		0,408V/m	22,5 kW	90 cm	
B:	7,369 μ T	Oscilla di 0.4 μ T	7,618 μ T		0,124 μ T			
Punto 2 E:	1,406V/m	40 cm dal quadro elettrico		0,458V/m		Ore 15.40 23 kW	1 m	
B:	15,55 μ T		16,15 μ T	3,519 μ T	0,260 μ T			
Punto 3 E:	0,969 V/m	50 cm colonna			0,490 V/m		90 cm	
B:	7,548 μ T		7,640 μ T		0,139 μ T			7,900 μ T

Fig. 2.2 Mappatura di un'area con segnalazione dei punti di misura



Si terranno quindi presente le tabelle dell'allegato XXXVI nel caso di misure eseguite in prossimità dei macchinari o nei reparti adibiti a personale specializzato e qualificato. Nel caso invece di misurazioni nei punti di passaggio o negli uffici o in zone non lavorative, quali coffee point, zona mensa ed altre si useranno come riferimento per i valori limite i D.P.C.M. dell'8 luglio 2003 che fissano i limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti ed i D.P.C.M. dell'8 luglio 2003 che fissano i limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz.

Qui di seguito sono riportate le tabelle relative ai valori limite a bassa ed a alta frequenza:

Tabella 1. Limiti di esposizione a campi elettrici e magnetici alla frequenza di 50 Hz.

Tabella 1	Intensità di campo elettrico E (kV/m)	Induzione magnetica (μ T)
Limiti di esposizione 50 Hz	5	100

Tabella 2. A titolo di misura di cautela per la protezione da possibili effetti a lungo termine, eventualmente connessi con l'esposizione ai campi magnetici generati alla frequenza di rete (50 Hz), nelle aree gioco per l'infanzia, in ambienti abitativi, in ambienti scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore giornaliere, si assume per l'induzione magnetica il valore di attenzione di 10 μ T, da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio.

Tabella 2	Intensità di campo elettrico E (kV/m)	Induzione magnetica (μ T)
Valori di attenzione 50 Hz		10

Tabella 3. Nella progettazione di nuovi elettrodotti in corrispondenza di aree gioco per l'infanzia, di ambienti abitativi, di ambienti scolastici e di luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore e nella progettazione dei nuovi insediamenti e delle nuove aree di cui sopra in prossimità di linee ed installazioni elettriche già presenti nel territorio, ai fini della progressiva minimizzazione dell'esposizione ai campi elettrici e magnetici generati dagli elettrodotti operanti alla frequenza di 50 Hz, e' fissato l'obiettivo di qualità di 3 μ T per il valore dell'induzione magnetica, da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio.

Tabella 3	Intensità di campo elettrico E (kV/m)	Induzione magnetica (μ T)
Obiettivi di qualità 50 Hz		3

Tabella 4. Limiti di esposizione ai campi elettromagnetici con frequenza compresa fra 100 kHz e 300 GHz.

Tabella 4	Intensità di campo elettrico E (V/m)	Intensità di campo Magnetico H (A/m)	Densità di potenza D (W/m ²)
Limiti di esposizione			
0,1 < F <= 3 MHz	60	0,2	-
3 < F <= 3000 MHz	20	0,05	1
3 < F <= 300 GHz	40	0,01	4

Tabella 5. A titolo di misura di cautela per la protezione da possibili effetti a lungo termine eventualmente connessi con le esposizioni ai campi generati alle suddette frequenze all'interno di edifici adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore giornaliere, e loro pertinenze esterne, che siano fruibili come ambienti abitativi quali balconi, terrazzi e cortili esclusi i lastrici solari, si assumono i valori di attenzione indicati nella tabella 5.

Tabella 5	Intensità di campo elettrico E (V/m)	Intensità di campo magnetico H (A/m)	Densità di potenza D (W/m ²)
Valori di attenzione			
0,1 MHz	6	0,016	0,10 (3MHz - 300 GHz)

Tabella 6. Ai fini della progressiva minimizzazione della esposizione ai campi elettromagnetici, i valori di immissione dei campi oggetto del presente decreto, calcolati o misurati all'aperto nelle aree intensamente frequentate, non devono superare i valori indicati nella tabella 6. Detti valori devono essere mediati su un'area equivalente alla sezione verticale del corpo umano e su qualsiasi intervallo di sei minuti.

Tabella 6	Intensità di campo elettrico E (V/m)	Intensità di campo magnetico H (A/m)	Densità di potenza D (W/m ²)
Obiettivi di qualità			
0,1 MHz < F <= 300 GHz	6	0,016	0,10 (3MHz - 300 GHz)

Alla fine confrontati i valori rilevati con quelli delle tabelle precedentemente esposte si prosegue alla stesura del DVR dove verranno segnalate le misure effettuate, la strumentazione utilizzata, la frequenza a cui si è eseguita la rilevazione, l'eventuale presenza di elementi ferromagnetici o conduttori nelle vicinanze della sonda. Si dovrà segnalare il punto in cui si è eseguita la misura e la distanza dalla sorgente, inoltre se vi erano rilevanti valori di picco. Infine nel caso si fossero trovati valori fuori norma bisogna farlo presente nella relazione correlando tali risultati con una possibile soluzione del problema che potrebbe essere la semplice schermatura della sorgente oppure l'interramento di cavi interessati ad un'elevata dispersione di campo magnetico. Si dovrà anche segnalare tali zone anomale, nel caso il problema non si riesca a risolvere con le soluzioni suggerite, con delle indicazioni di pericolosità e la relativa simbologia di pericolo. In tali zone quindi potrà accedere solo del personale qualificato ed in periodo di tempo relativamente breve. Inoltre qualora i valori di azione risultino superati, il datore di lavoro avrà due opzioni:

- proseguire nel processo di valutazione del rischio allo scopo di verificare il rispetto dei limiti di esposizione espressi in termini delle grandezze dosimetriche
- adottare misure tecniche, ove praticabili, per ridurre le esposizioni al di sotto dei valori d'azione.

Fermo restando quanto previsto dall'articolo 3 il datore di lavoro, tenuto conto del progresso tecnico e della disponibilità di misure per controllare il rischio alla fonte, elimina alla sorgente o riduce al minimo i rischi derivanti dall'esposizione ai campi elettromagnetici.

Qualora risulti che i valori limite di esposizione siano superati e che non possano essere esclusi rischi relativi alla sicurezza, elabora ed applica un programma d'azione che comprenda misure tecniche e organizzative intese a prevenire esposizioni superiori ai valori limite di esposizione, tenendo conto in particolare:

- di altri metodi di lavoro che implicano una minore esposizione ai campi elettromagnetici
- della scelta di attrezzature che emettano campi elettromagnetici di intensità inferiore
- delle misure tecniche per ridurre l'emissione dei campi elettromagnetici
- degli appropriati programmi di manutenzione delle attrezzature di lavoro, dei luoghi e delle postazioni di lavoro
- della progettazione e della struttura dei luoghi e delle postazioni di lavoro
- della limitazione della durata e dell'intensità dell'esposizione
- della disponibilità di adeguati dispositivi di protezione individuale.

2.3 Studio della possibilità di eliminare o ridurre il rischio

La possibilità di ridurre le emissioni elettromagnetiche in ambiente lavorativo, dipende da una serie di fattori: primo tra tutti la frequenza e le caratteristiche fisiche dell'onda, ma anche l'utilizzo dell'onda emessa (se si tratta per esempio di una macchina industriale o di un elettrodomestico, o di un'antenna per radiotelefonica) e l'ambiente in cui il lavoratore è esposto. La schermatura di un campo elettrico, magnetico o elettromagnetico può risultare molto utile in numerosi settori tecnici che vedono l'utilizzo di campi elettromagnetici. Innanzitutto quando si vuole ridurre l'esposizione di individui che debbano transitare o stazionare nei pressi di una sorgente di campo elettromagnetico in ambiente lavorativo, in secondo luogo nell'ambito della cosiddetta "compatibilità elettromagnetica", quando è importante evitare che le emissioni elettromagnetiche prodotte da una apparecchiatura elettrica disturbino il funzionamento di altre apparecchiature poste nelle vicinanze della prima, o che la sommatoria delle onde elettromagnetiche di più sorgenti crei un'amplificazione dell'intensità dell'onda. In particolare, i campi elettrici vengono fortemente attenuati anche dagli oggetti materiali non conduttivi che si interpongono tra le sorgenti e gli individui: una parete o un edificio sono utili attenuatori di campo elettrico. I campi magnetici, invece, non subiscono attenuazione da parte degli oggetti materiali. Pertanto si ritrovano quasi inalterati all'interno e all'esterno di un edificio. La possibilità di schermatura dipende anche dal fatto che l'emissione della sorgente sia intenzionale o accidentale.

Nel primo caso, in cui l'emissione di un campo elettromagnetico è necessaria espressamente per diffondere un segnale elettromagnetico (per esempio: impianti di teleradiodiffusione, stazioni radiobase, apparati radar), non è possibile schermare la sorgente, ovvero impedire che le sue emissioni diffondano nell'ambiente circostante, poiché questo ne impedirebbe il regolare funzionamento. A questo proposito deve essere schermata, laddove sia possibile, la regione di spazio all'interno della quale non si vuole che il campo elettromagnetico possa penetrare. Nel secondo caso, invece, troviamo le sorgenti la cui emissione è del tutto "accidentale" (per esempio: elettrodomestici, elettrodomestici, computer e altre macchine da ufficio) e quegli apparati industriali il cui funzionamento richiede la generazione di un intenso campo, ma solo in una regione limitata di spazio, dove si trova lo strumento che eroga il campo. In questi casi, è possibile pensare di schermare la stessa sorgente. Gli schermi si realizzano maggiormente con l'impiego di pannelli o contenitori metallici o comunque di materiale che possieda una buona conducibilità elettrica. Si deve tener presente che il campo magnetico statico o di bassa frequenza (50 Hz) è molto difficile da schermare: per una schermatura efficace occorrono lastre di acciaio o altro materiale ferromagnetico spesso diversi millimetri. Attualmente vengono prodotte leghe metalliche con alta permeabilità magnetica che possono schermare anche campi a bassa frequenza ad altissima intensità con lastre dello spessore di pochi millimetri, peraltro con bassi costi di produzione.

Il campo elettromagnetico a radiofrequenza (per esempio a 900 MHz, come nel caso della telefonia cellulare) può essere, invece, facilmente schermato da materiali metallici. Uno schermo può anche

essere realizzato con un tessuto (filato o non filato, naturale o sintetico) attraversato da un materiale che deve essere dotato di una buona conducibilità elettrica (ad es. grafite, filamenti metallici). Questo significa che è possibile abbattere i livelli di campo elettromagnetico ad alta frequenza mediante l'uso di semplici tende purché dotate delle succitate caratteristiche.

Fig. 2.3 Esempio di misura a bassa frequenza presso un quadro elettrico



Fig. 2.4 Esempio di misura in bassa frequenza in prossimità della cabina elettrica



Fig. 2.5 Esempio di misura a bassa frequenza in un ufficio



3.1 Esempio di DVR

Documento di Valutazione dei rischi, dell'individuazione delle misure di prevenzione e protezione e del programma di attuazione delle misure di prevenzione, controllo e mantenimento

Criteria per la valutazione del rischio da esposizione a campi elettromagnetici

Termini, definizioni e simbologia

- Frequenza : numero di cicli o periodi nell' unità di tempo. Si misura in Hertz(Hz).
- Campo elettrico E : grandezza vettoriale che, in ogni punto di una data regione di spazio, rappresenta il rapporto fra la forza F esercitata su una carica elettrica di prova q ed il valore della carica medesima.
 $E = F/q$.
- Si misura in volt per metro (V/m).
- Campo magnetico H: quantità vettoriale pari al rapporto tra l'induzione magnetica B e la permeabilità magnetica μ , che caratterizza le proprietà magnetiche del mezzo.
 $H = B/\mu$
- Si misura in ampere per metro (A/m).
- Induzione magnetica B: grandezza vettoriale (B) che determina una forza agente sulle cariche in movimento. E' espressa in Tesla(T).
- Densità di potenza S: potenza radiante incidente perpendicolarmente a una superficie, divisa per l'area della superficie in questione ed è espressa in Watt per metro quadro (W/m^2). Questa grandezza si impiega nel caso delle frequenze molto alte per le quali la profondità di penetrazione nel corpo è modesta.
- Corrente di contatto (I_c): corrente che fluisce al contatto tra un individuo ed un oggetto conduttore caricato dal campo elettromagnetico. La corrente di contatto è espressa in Ampere(A).
- Corrente indotta attraverso gli arti (I): corrente indotta attraverso qualsiasi arto, a frequenza compresa tra 10 e 110 MHz, espressa in Ampere(A).
- Densità di corrente (J): è definita come la corrente che passa attraverso una sezione unitaria perpendicolare alla sua direzione in un volume conduttore quale il corpo umano o una sua parte. È espressa in Ampere per metro quadro (A/m^2).
- Assorbimento specifico di energia(SA): si definisce come l'energia assorbita per unità di massa di tessuto biologico e si esprime in Joule per chilogrammo (J/Kg).
- Tasso di assorbimento specifico di energia (SAR): si tratta del valore mediato su tutto il corpo o su alcune parti di esso, del tasso di assorbimento di energia per unità di massa di tessuto corporeo ed è espresso in Watt per chilogrammo (W/Kg).
- Campi elettromagnetici: campi magnetici statici e campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici variabili nel tempo di frequenza inferiore o pari a 300 GHz.
- livello di esposizione giornaliera ai campi elettromagnetici :[V/m per l'HF e V/m e μT per LF] valore medio, ponderato in funzione del tempo(media sui 6 minuti), dei livelli di

esposizione alle onde elettromagnetiche per una giornata lavorativa nominale di otto ore, Si riferisce a tutte le radiazioni non ionizzanti sul lavoro, incluse la radiazioni impulsive;

- valori limite di esposizione : limiti all'esposizione a campi elettromagnetici che sono basati direttamente sugli effetti sulla salute accertati e su considerazioni biologiche. Il rispetto di questi limiti garantisce che i lavoratori esposti ai campi elettromagnetici siano protetti contro tutti gli effetti nocivi a breve termine per la salute conosciuti.

Valori di azione: l'entità dei parametri direttamente misurabili espressi in termini di intensità di campo elettrico(E), intensità di campo magnetico(H), induzione magnetica (B) e densità di potenza(S), che determina l'obbligo di adottare una o più delle misure specificate nell'allegato XXXVI del Dlgs 81/08. Il rispetto di questi valori assicura il rispetto dei pertinenti valori limite di esposizione.

Metodologia di valutazione del rischio da esposizione ai campi elettromagnetici

Nell'ambito della valutazione dei rischi dovuti ai campi elettromagnetici, sono stati presi in considerazione in particolare:

- il livello, tipo e durata dell'esposizione, ivi inclusa ogni esposizione a campi impulsivi;
- i valori limite di esposizione ed i valori di azione;
- tutti gli effetti sulla salute e sulla sicurezza dei lavoratori particolarmente sensibili all'elettromagnetismo;
- gli effetti sulla salute e sulla sicurezza dei lavoratori derivanti da interazione fra campi elettromagnetici e materiali metallici connesse con l'attività svolta;
- le informazioni sull'emissione di onde elettromagnetiche fornite dai costruttori dell'attrezzatura di lavoro in conformità alle vigenti disposizioni in materia;
- il censimento delle sorgenti interne ed esterne all'azienda che possono esercitare la loro influenza sul lavoratore.
- l'esistenza di dispositivi progettati per ridurre l'emissione di campi elettromagnetici;
- le informazioni raccolte dalla sorveglianza sanitaria, comprese quelle reperibili nella letteratura scientifica;
- la disponibilità di dispositivi di protezione con adeguate caratteristiche di attenuazione.

Le misure dei campi elettromagnetici sono state eseguite su tutti i locali dell'azienda nei punti di passaggio e di sosta e nei casi specifici a ridosso di quadri elettrici e condutture, macchinari ed altre sorgenti di energia. Sono state eseguite con strumentazione a banda larga PMM 8053 e relativo set di sonde: EHP 50 (5 Hz – 100kHz) EP330 (100 kHz – 3 GHz). Non si è ritenuto necessario procedere con misure a frequenze superiori ai 3 GHz in quanto l'azienda non presenta sorgenti o apparecchiature con caratteristiche che lo richiedano.

In base alle situazioni si sono approntati diverse metodologie di misura sempre e comunque in maniera conforme al D. Lgs 81/2008 e applicando le procedure di misura descritte nelle norme CEI 211-6 e 211-7.

Nel caso di reparti omogenei ,come "l'area buratti" ,che presentano macchinari con uguali caratteristiche tecniche,sono state effettuate misure nei punti in cui normalmente il lavoratore opera individuando anche eventuali punti "caldi" in cui poteva essere plausibile un'influenza di più contributi contemporaneamente (ovvero nel centro del reparto o all'incrocio dei corridoi con le macchine disposte su ogni lato) e nelle condizioni di massimo carico.

I macchinari che presentavano modifiche o parti esposte che sono stati valutati separatamente.

Nel caso ad esempio del reparto "animatrici" , dove vi sono 4 diverse marche di apparecchiature con caratteristiche tecniche diverse ed anni di produzione diversi sono state eseguite misure per ogni marca . Inoltre presentando alcune schermi protettivi a differenza di altre sono state eseguite

misure anche in questi ambiti. Essendo inoltre l'operatore sottoposto a 2 diverse sorgenti (HF e LF) si è operato a diverse altezze e distanze per vedere i diversi riscontri di ogni sorgente. Le misure sono state eseguite nella media temporale dei 6 minuti ad altezze di 1 m e di 1,50 m a livello del tronco e della sorgente HF e a livello della testa. Inoltre sono state elaborate a 2 diverse distanze dalla sorgente: 30 cm dove l'operatore staziona con mani e testa e 50 cm a livello del tronco.

Determinazione dei livelli di esposizione ai campi elettromagnetici.

I livelli di esposizione ai campi elettromagnetici dei lavoratori sono stati determinati sulla base dei valori strumentali registrati e delle informazioni ricevute dalla direzione aziendale.

Il metodo di valutazione è così riassumibile:

- a. suddivisione dei locali dell'azienda in aree omogenee di rischio;
- b. individuazione, all'interno di tali aree, delle mansioni presenti e delle relative attività svolte;
- c. identificazione delle sorgenti di campi elettromagnetici presenti in ciascuna area e delle attività connesse al loro utilizzo;
- d. individuazione, nell'ambito di ciascuna mansione e di ciascuna attività, della frazione di tempo lavorativo in cui l'operatore è esposto ai campi elettromagnetici delle sorgenti identificate;

Per la determinazione di quanto riportato nei punti a ÷ c si è fatto riferimento al documento di valutazione dei rischi (art. 28 D. Lgs 81/2008);

Errore statistico associato alla misura ed alla determinazione dei livelli di esposizione

L'errore statistico è il grado di incertezza di una misura eseguita con un dato procedimento, e la proiettabilità di questa incertezza nel passato e nel futuro: deve essere associato alla determinazione sulla base della constatazione che, ripetendo più volte la misura della stessa grandezza -livello di campo elettrico (V/m), livello di campo magnetico (μ T), valore di campo elettromagnetico per l'alta frequenza- con lo stesso procedimento, si ottengono in generale risultati diversi.

L'errore statistico delimita le probabilità di ritrovare in una diversa occasione di rilevazione i valori emersi nell'attuale misura. A causa delle accuratezze relative alle caratteristiche degli strumenti di misura, delle possibilità di disturbi durante la misurazione e delle variabili insite nelle lavorazioni oggetto di rilievi, l'errore di misura relativo al livello medio di campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico viene valutato, allo stato attuale delle conoscenze, pari a $\pm (10\% + 2V/m)$ e $\pm (10\% + 20 nT)$.

Valutazione rischi, piani di miglioramento e misure di controllo, programma di attuazione misure di prevenzione, controllo e mantenimento

Le misure sono state eseguite con il misuratore portatile di campi elettromagnetici PMM 8053 secondo le modalità e le indicazioni presenti nel testo unico e secondo la CEI 211-6 per le misure in bassa frequenza e la CEI 211-7 del 2001 per le misure in alta frequenza.

Nel caso della sonda a bassa frequenza EHP-50 operante nell'intervallo fra 5 Hz e 100 kHz sono stati utilizzati inizialmente 5 span di frequenza a 100 Hz; 500 Hz; 2 kHz; 10 kHz; 100 kHz. Poiché lo strumento opera a banda larga e non sono stati rilevati scostamenti di valore fra i diversi span si è ristretta la misura a 3 span di frequenza:

- a 100 Hz in modalità highest che misura solamente il contributo all'interno dello span impostato con intensità maggiore, in quanto tutti i macchinari operano alla frequenza nominale di rete di 50/60 Hz.
- A 2 kHz span intermedio in cui si rileva il valore maggiore in modalità wideband che considera l'entità di tutte le componenti nello spettro selezionato.

- 100 kHz sempre in modalità wideband in modo da considerare nell'analisi tutte le eventuali armoniche.

Nelle misure a bassa frequenza sono stati considerati i valori rms ed in particolare quelli di picco conformemente all'allegato XXXVI del testo unico. Sono stati inoltre raccolti per la misura sui quadri elettrici e sui tracciati delle condutture di alimentazione degli stessi i valori della corrente assorbita al momento della misura.

Tutte le misure ad alta frequenza conformemente al testo unico ed alla CEI 211-7 sono state eseguite nella media temporale di 6 minuti e mediate nello spazio a 2 differenti altezze corrispondenti a tronco e testa dell'operatore. Tutte le misure sono state effettuate individuando il caso peggiore per l'esposizione dell'operatore. Qui di seguito vanno messe le misure eseguite all'interno dell'azienda; le misure rilevate non vengono inserite nei criteri generali ma saranno indicate nel documento specifico a cui i criteri generali rimandano

PIANO TERRA (vedere mappe allegate)

ZONA BURATTI eseguite misure in bassa ed in alta frequenza dei macchinari, delle zone vicine al traliccio dell'alta tensione e lungo la linea dell'elettrodotto sotterraneo e delle zone di passaggio. Non si è riscontrato nessun valore al di fuori della norma

ZONA PREBURATTI misura in bassa ed alta frequenza su macchinari (zona di lavoro manuale), e nei punti di passaggio e sotto la zona di influenza dell'antenna radio FM . Non si è trovato alcun valore fuori norma.

ZONA INCERNIERATRICI misura in alta e bassa frequenza su macchinari e punti di passaggio. Vi sono 2/3 forni ad alta frequenza ma con valori pienamente nella norma. Non vi sono valori fuori limite.

ZONA FORNI HF eseguita misura a bassa ed alta frequenza sui macchinari e nei punti di passaggio. Non si è riscontrato alcun valore fuori norma

ZONA TAGLIO misure in alta e bassa frequenza dei macchinari e fra i macchinari. Non si è trovato nessun valore fuori norma.

ZONA MAGAZZINO misure in alta e bassa frequenza a livello dell'elettrodotto sotterraneo e di un quadro elettrico. A livello di bassa frequenza trovato un valore del campo magnetico che non rispetta il limite per l'obiettivo qualità del D.P.C.M del 2003. Gli altri uffici hanno valori sia in alta che in bassa frequenza al di sotto del limite.

ZONA PANTOGRAFI misure in alta e bassa frequenza sui macchinari tutti automatici e nei punti di passaggio. Valori tutti nella norma.

ZONA ANIMATURA misure in bassa ed alta frequenza su macchinari e punti di passaggio. valori in bassa frequenza al di sotto dei limiti; valori in HF delle animatrici sono fuori norma limitatamente alle SALION prive dello schermo di protezione. Si consiglia di installare uno schermo protettivo anche su tali macchine che riduce i valori di circa 10/15 V/m mediati nei 6 minuti.

MISURA DEI QUADRI ELETTRICI. Qui abbiamo detto di verificare se sul quadro è presente l'etichetta gialla e comunque sono valori all'interno della normativa popolazione LF.

PIANO PRIMO

Eseguite misure in alta e bassa frequenza sui macchinari, negli uffici, sui punti di passaggio, lungo le linee del traliccio dell'alta tensione e lungo le zone di influenza delle antenne ma non sono stati trovati valori fuori limite.

PALAZZINA TECNICA

Eseguite misure in alta e bassa frequenza. Riscontrati valori fuori norma nel testo unico solo nella cabina elettrica dove si riscontrano valori di $114 \mu\text{T}$ a livello dei cavi esposti dove si consiglia di schermarli con una gabbia in materiale ferromagnetico e valori a ridosso dei quadri elettrici ampiamente al di sotto dei limiti per i lavoratori professionalmente esposti.

Apporre apposite segnaletiche informative per il lavoratore professionalmente esposto come previsto dal D. Lgs 81/2008 come quelle in figura 3.1.

Fig. 3.1 Segnalazioni di avvertimento – pericolo



BIBLIOGRAFIA

- [1] “Normativa CEI 211-6 e 211-7” (28/08/2001)
- [2] “Decreto legislative 626” 1994
- [3] “Controllo ambientale degli agenti fisici: nuove prospettive e problematiche emergenti - Vercelli, 24-27 marzo 2009”
- [4] “DVR Intesa SPISAL Confindustria Vicenza. (08/11/04)
- [5] Documento congiunto ISPESL – ISS ”Campi elettromagnetici linee guida”
- [6] Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto “Onde in chiaro”

- [7] ISIMM “Comunicazioni mobili e campi elettromagnetici. Attività di monitoraggio, percezione del rischio e strumenti di comunicazione e di sensibilizzazione dell’opinione pubblica”

SITOGRAFIA

- [1] “Quadri elettrici e sicurezza elettrica”
<http://www.voltimum.it/news.jsp>

- [2] Daniele Andreuccetti “Campi CEM”
<http://www.ifac.cnr.it/pcemni/>

- [3] Sandro Petrizzelli “CEM teoria”
<http://users.iol.it/sandry>

- [4] “Campi elettromagnetici e frequenza”
http://www.electroportal.net/vis_resource.php

- [5] ”Sicurezza sul lavoro”
<http://www.studiofonzar.com>

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il prof. Alessandro Sona per avermi dato la sua disponibilità a seguirmi con la tesi nonostante i tempi ristretti.

Ringrazio gli amici Maria e Stefano per i bei momenti trascorsi in questi anni all'università e gli innumerevoli esami preparati assieme.

Ringrazio infine tutti coloro che mi hanno supportata in questi anni.