



APAT

Agenzia per la protezione
dell'ambiente e per i servizi tecnici

Metodologie, tecniche e procedure per la riduzione delle emissioni dei campi elettromagnetici nell'ambiente

Informazioni legali

L'Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici o le persone che agiscono per conto dell'Agenzia stessa non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questo rapporto.

APAT - Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici
Via Vitaliano Brancati, 48 - 00144 Roma
www.apat.it

© APAT - Rapporti 73/2006

ISBN 88-448-0193-0

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Elaborazione grafica
APAT

Grafica di copertina: Franco Iozzoli (APAT)
Foto: Paolo Orlandi, Paolo de Zorzi

Coordinamento tipografico e distribuzione
Olimpia Girolamo - Michela Porcarelli - Simonetta Turco
APAT - Servizio Stampa ed Editoria
Ufficio Pubblicazioni

Impaginazione e stampa
I.G.E.R. srl - Viale C.T. Odascalchi, 67/A - 00147 Roma

Stampato su carta TCF

Finito di stampare luglio 2006

Il presente rapporto è stato realizzato da:

Ing. Simona Ciattoni, Ing. Giuseppe Marsico, Ing. Francesca Ticconi

Ed è stato coordinato da:

Ing. Giuseppe Di Marco

Prefazione

Numerosi e molteplici sono gli aspetti da trattare sull'argomento campi elettromagnetici ed ambiente, inoltre periodicamente appaiono notizie sul tema inquinamento elettromagnetico ed è divenuto di uso comune il neologismo "elettrosmog". E' doveroso premettere che nell'ambiente che ci circonda è sempre presente un fondo di radiazione elettromagnetica dovuto a campi di origine che può essere definita "naturale", come il campo magnetico terrestre o la radiazione solare o i fenomeni atmosferici legati alla scarica di fulmini. Certo è che negli ultimi decenni si è assistito ad un notevole sviluppo di tecnologie legate all'uso di sorgenti elettromagnetiche che ha fatto sì che, accanto al fondo di radiazione elettromagnetica naturale, si aggiungesse un contributo dovuto ad emissioni di origine artificiale generate da sorgenti di varia natura. Ne sono un esempio il processo di elettrificazione del paese (la generazione di energia elettrica, l'insieme delle centrali, delle cabine di trasformazione e delle linee di distribuzione o la presenza di apparati elettronici per uso domestico, industriale, medico e militare) ed anche il forte sviluppo delle telecomunicazioni (trasmissioni radiotelevisive, radar, comunicazione via satellite e telefonia cellulare). I campi elettromagnetici emessi nell'ambiente a causa della presenza di queste numerose sorgenti hanno un'incidenza tale da modificare il valore del campo elettromagnetico ambientale, ed in questo testo laddove si parlerà di inquinamento elettromagnetico o elettrosmog, si dovrà intendere come una sovrapposizione alla radiazione elettromagnetica naturale

Accanto all'aumento progressivo nell'ambiente di questi campi elettromagnetici causati dal progresso tecnologico è cresciuto, parallelamente, l'interesse sul fatto se questi abbiano effetto sull'uomo e sull'ambiente, e in che misura. Partendo da ciò numerosi Stati sulla base di innumerevoli ricerche scientifiche e delle risultanze degli studi condotti, ispirandosi anche al principio di precauzione, hanno emanato leggi che regolano la materia. La situazione italiana ha il suo punto di forza nella legge quadro n.36 "Sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici" entrata in vigore nel marzo 2001 e nei suoi due decreti attuativi. Il primo è relativo "alla fissazione dei 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” (pubblicato sulla G.U. n. 200 del 29/8/2003). Il secondo decreto è relativo "alla fissazione dei 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” (pubblicato sulla G.U. n.199 del 28/8/2003).

Con riferimento all’articolo 4 della legge, in cui sono definite le funzioni dello Stato, il comma 1 lettera f dichiara che lo Stato esercita le funzioni relative “alla realizzazione di accordi di programma con i gestori di elettrodotti ovvero con i proprietari degli stessi o delle reti di trasmissione o con coloro che ne abbiano comunque la disponibilità nonché con gli esercenti di impianti per emittenza radiotelevisiva e telefonia mobile, al fine di promuovere tecnologie e tecniche di costruzione degli impianti che consentano di minimizzare le emissioni nell’ambiente e di tutelare il paesaggio”. Il Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio in merito a ciò ha stipulato un Accordo di Collaborazione con l’APAT per “lo svolgimento di attività di ricerca riguardanti la promozione di nuove tecnologie e tecniche di costruzione degli impianti per l’abbattimento e la riduzione dell’inquinamento elettromagnetico ed il supporto per lo sviluppo di nuove tecnologie in collaborazione con gli enti gestori degli elettrodotti ed impianti, per la definizione dei piani di risanamento”. La finalità di tale accordo è quella di produrre una serie di rapporti tecnici sull’argomento che forniscano una base conoscitiva dello stato dell’arte in tema di riduzione delle emissioni di campi elettromagnetici e che illustrino i risultati ottenuti dagli accordi di programma realizzati con gli enti gestori sia per quanto concerne soluzioni per l’abbattimento e la riduzione dei campi generati in bassa frequenza che quelli emessi in alta frequenza.

Allo scopo è stato costituito un gruppo di lavoro che da un lato ha svolto attività di indagine per definire lo stato dell’arte della ricerca, nazionale ed internazionale, sui dispositivi, sulle metodologie e sulle tecniche per l’abbattimento e la riduzione dell’inquinamento elettromagnetico, e dall’altro ha avviato una serie di attività per il raggiungimento di accordi di programma con gli enti gestori per la promozione di alcune di queste tecniche. In accordo ai due decreti attuativi, il tema è stato affrontato in due passi successivi focalizzando dapprima l’attenzione sui campi prodotti a 50 Hz e poi su quelli prodotti dalle alte frequenze. Questo

documento ha lo scopo di illustrare i risultati ottenuti nell'ambito del primo anno di questo accordo fornendo in particolare una panoramica sulle tecniche di riduzione dei campi elettromagnetici e sugli strumenti necessari alla comprensione di tale argomento.

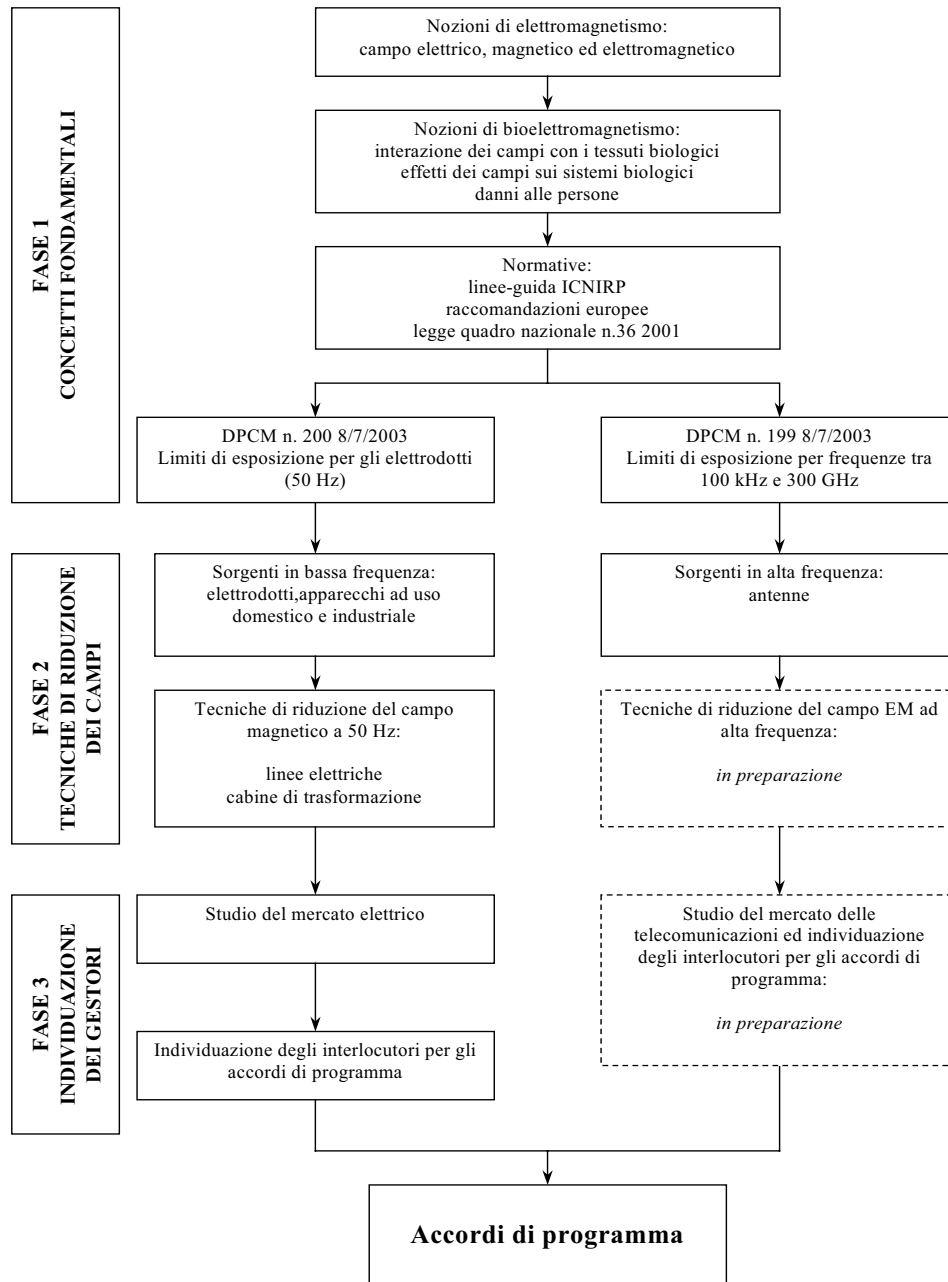
Il testo è suddiviso in parti. La parte prima "Concetti fondamentali", che conta i capitoli dal primo al terzo, tratta, come da titolo, alcune conoscenze basilari. In particolare il primo capitolo illustra in maniera sintetica alcuni elementi di elettromagnetismo, mentre il secondo le possibili sorgenti di campo. Il terzo capitolo offre una panoramica sulle interazioni tra campi elettromagnetici e materia vivente nonché concetti di danno ed effetto biologico, per avere una conoscenza corretta per la comprensione dei limiti di esposizione.

La parte seconda "Normative" è dedicata appunto alle norme che regolano l'esposizione ai campi elettromagnetici.

La parte terza "Tecnologie e Tecniche di riduzione" è il cuore di questo documento e vi sono illustrate, nel quinto capitolo, le varie tecniche di riduzione dei campi emessi a 50 Hz (Elettrodotti) e nel sesto, quanto realizzato per il raggiungimento degli accordi di programma con gli enti gestori.

La parte relativa alle alte frequenze ed i relativi accordi di programma non è stata sviluppata in questa fase dell'accordo ed è quindi rinviata ad una successiva pubblicazione. Infine il testo è corredato in apertura da uno schema di percorso metodologico ed in chiusura da quattro appendici: Appendice A "Campo magnetico a 50 Hz emesso dagli elettrodomestici", Appendice B "Enti Normatori", Appendice C "Organismi internazionali", Appendice D "Principali progetti internazionali ed europei legati ai CEM".

Percorso metodologico (schema a blocchi)



Indice

PARTE PRIMA: “CONCETTI FONDAMENTALI”

I	ELEMENTI DI ELETTROMAGNETISMO.	15
I.1	Introduzione	15
I.2	Campo elettrico	15
I.3	Campo magnetico	18
I.4	Differenza di potenziale	25
I.5	Relazione tra campo elettrico e potenziale	27
I.6	Campo elettromagnetico	28
I.7	Spettro elettromagnetico	33
I.8	Dipendenza del campo elettromagnetico dalla distanza	37
I.9	SAR	39
I.10	Bibliografia	42
II	CAMPI ELETTROMAGNETICI E TESSUTI BIOLOGICI	43
II.1	Introduzione	43
II.2	Penetrazione del campo elettrico e magnetico e propagazione del campo elettromagnetico nei tessuti biologici	43
II.3	Effetto biologico e danno	57
II.4	Effetti dei campi a radio frequenza (RF)	58
II.5	Effetti alle ELF	61
II.6	Bibliografia	64
III	SORGENTI DI CAMPO ELETTRICO, MAGNETICO, ELETTROMAGNETICO	65
III.1	Introduzione	65
III.2	Sorgenti in bassa frequenza	65
III.2.1	Linee elettriche e cabine di trasformazione	65
III.2.2	Apparecchiature elettriche	70
III.3	Sorgenti in alta frequenza	71
III.3.1	Sistemi punto-punto	73
III.3.2	Apparati a diffusione	75
III.3.3	Approfondimento sui sistemi radiomobili	85
III.3.4	Architettura e struttura di una rete cellulare	88
III.3.5	Architettura GSM	92
III.3.6	Accesso radio e copertura	95
III.4	Bibliografia	97

PARTE SECONDA: NORMATIVE

IV	LINEE GUIDA E NORMATIVE PER L'ESPOSIZIONE A CAMPI ELETTROMAGNETICI	99
IV.1	Introduzione	99
IV.2	Normative internazionali	99
IV.2.1	Linee guida ICNIRP [IV-1]	99

IV.3	Normative europee	103
IV.3.1	Raccomandazione 1999/519/CE [IV-2]	103
IV.3.2	Posizione comune (CE) N. 10/2004	105
IV.3.3	CENELEC/CEI	107
IV.4	Normativa Italiana [IV-3][IV-4][IV-5]	107
IV.5	Bibliografia	113

PARTE TERZA: “TECNOLOGIE E TECNICHE DI RIDUZIONE”

V	TECNICHE DI RIDUZIONE DEL CAMPO MAGNETICO GENERATO DA ELETTRODOTTI	117
V.1	Introduzione	117
V.2	Calcolo del campo magnetico prodotto dalle linee aeree [V-1] [V-2]	118
V.3	Schermatura del campo magnetico a frequenza industriale	122
V.3.1	Calcolo dell'efficienza di schermatura (SE) degli schermi elettromagnetici [V-1].	122
V.3.2	Caratterizzazione del campo magnetico generato da linee trifasi [V-3].	128
V.3.3	Prestazioni degli schermi elettromagnetici [V-3].	130
V.4	Tecniche di riduzione del campo magnetico generato da linee elettriche aeree.	139
V.4.1	Spostamento/innalzamento dei sostegni [V-5]	140
V.4.2	Riconfigurazione della geometria dei conduttori	140
V.4.3	Linee compatte	145
V.4.4	Circuiti di compensazione	147
V.5	Linee in cavo interrate.	148
V.5.1	Riconfigurazione della geometria di posa.	150
V.5.2	Schermature dei cavi	151
V.5.3	Elettrodotti blindati	162
V.5.4	Cavo a debole emissione di campo magnetico (green cable)	163
V.6	Mitigazione dei campi magnetici emessi delle sottostazioni e delle cabine di trasformazione	177
V.6.1	Introduzione	177
V.6.2	Cabine Primarie AT/MT	177
V.6.3	Cabine Secondarie MT/BT	179
V.7	Bibliografia	194
VI	LAVORI PREPARATORI PER GLI ACCORDI DI PROGRAMMA	195
VI.1	Introduzione	195
VI.2	Individuazione degli enti gestori	195
VI.2.1	Il Sistema elettrico in Italia	195
VI.2.2	Le attività del sistema elettrico	196
VI.2.3	La gestione dell'attività	197
VI.2.4	Infrastrutture del sistema elettrico [VI-1]	200
VI.2.5	La proprietà delle reti	206
VI.2.6	Gli elettrodotti della rete ferroviaria	207
VI.3	Conclusioni	208
VI.4	Bibliografia	208

APPENTICI

A	APPENDICE: CAMPO MAGNETICO A 50 HZ EMESSO DAGLI ELETTRODOMESTICI	211
A.1	Introduzione	211
A.2	Apparecchi elettrici portatili o mobili	211
A.3	Apparecchi elettrici fissi	223
A.4	Apparecchi elettrici per il «bricolage» ed il «fai da te»	227
A.5	Ulteriori Dati	229
A.6	Bibliografia	231
B	ENTI NORMATORI	233
B.1.	International Electrotechnical Commission (IEC)	233
B.1.1.	Informazioni Generali	233
B.1.2.	Attività legate ai CEM	234
B.2.	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (CENELEC)	236
B.2.1.	Informazioni Generali	236
B.2.2.	Attività legate ai CEM	236
B.3.	Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI)	238
B.3.1.	Informazioni Generali	238
B.3.2.	Attività legate ai CEM	239
C	APPENDICE: ORGANISMI INTERNAZIONALI	241
C	World Health Organization (WHO)	241
C.1.1	Informazioni Generali	241
C.1.2	Attività legate ai CEM	241
C.2	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)	244
C.2.1	Informazioni Generali	244
C.2.2	Attività legate ai CEM	245
D	PRINCIPALI PROGETTI INTERNAZIONALI ED EUROPEI LEGATI AI CEM	247

Parte prima: “Concetti fondamentali”

I Elementi di elettromagnetismo.

I.1 Introduzione

Parlare di tecniche per la riduzione delle emissioni di campi elettromagnetici presuppone che siano noti alcuni concetti fondamentali di elettromagnetismo come pure la terminologia utilizzata. I termini *campo elettrico*, *campo magnetico*, *campo elettromagnetico* o *onda elettromagnetica* non sono sinonimi, ma entità distinte che rappresentano aspetti diversi dell'elettromagnetismo ed esprimono l'insieme delle proprietà fisiche relative alle sorgenti elettromagnetiche.

Si è pensato di fornire quindi in questo capitolo una panoramica sintetica dei principali concetti dell'elettromagnetismo.

I.2 Campo elettrico

Si consideri dapprima una condizione di staticità intesa come non variabilità nel tempo delle grandezze che verranno di seguito definite e lo spazio vuoto.

La presenza di una carica elettrica fissa Q modifica le proprietà dello spazio circostante, come mostrato dal fatto che ponendo in tale spazio una carica di prova fissa e puntiforme, q , quest'ultima risulta sottoposta ad una forza espressa dalla legge di Coulomb:

$$\vec{F} = K \frac{Qq}{r^2} \hat{r} \quad \text{Eq. I-1}$$

dove r è la distanza fra le cariche, \hat{r} il versore posizione di q rispetto a Q , e K è un fattore di proporzionalità pari a $\frac{1}{4\pi\epsilon}$ con ϵ costante dielettrica (o permittività dielettrica) del mezzo. Nel nostro caso, la costante dielettrica nel vuoto è indicata con ϵ_0 ed è pari a $8.854 \cdot 10^{-12}$ Farad/m [F/m].

Tale modifica è misurata punto per punto dalla grandezza vettoriale *campo elettrico* \vec{E} , definita dal rapporto mostrato nell'equazione seguente, che indica direzione, intensità e verso della forza agente sulla carica puntiforme q di prova posta in quel punto:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}(x, y, z) = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2} \hat{r} \quad \text{Eq. I-2}$$

Avendo assunto q come una carica puntiforme, il rapporto è indipendente dal valore q in ogni posizione.

Le dimensioni fisiche del campo elettrico sono quelle di una forza divisa per una carica, Newton/Coulomb [N/C], ma l'unità di misura usuale equivalente è il Volt/m [V/m], il perché sarà evidente più avanti. La carica Q viene detta *sorgente* del campo elettrico e poiché quest'ultima si è supposta fissa, il campo viene detto *elettrostatico*. Si evidenzia dall'eq. I-2 che le grandezze su cui si può agire al fine di ridurre il campo elettrostatico in un dato punto sono:

- Q , diminuire l'intensità della sorgente;
- r , aumentare la distanza dalla sorgente;
- ϵ , aumentare la permittività del materiale circostante la sorgente.

Un'ulteriore possibilità derivante dalla natura vettoriale del campo è di far agire in quel punto un campo di densità uguale o minore, ma di verso opposto.

Infine, per consentire un'immediata visualizzazione della distribuzione spaziale del campo elettrico, si introducono le linee di forza, definite come quelle curve aventi in ogni loro punto il vettore campo elettrico tangente. In altre parole, dato un punto appartenente ad una linea di forza, il campo elettrico in quel punto è dato dalla tangente alla linea di forza in quel punto. Il numero di linee di forza per unità di superficie che attraversano una superficie ad esse perpendicolare è proporzionale all'intensità del campo elettrico in corrispondenza della superficie.

Nell'esempio di Figura I-1, siccome la densità delle linee che attraversano la superficie A è superiore a quella delle linee che attraversano la superficie B , il campo elettrico in A è maggiore del campo in B .

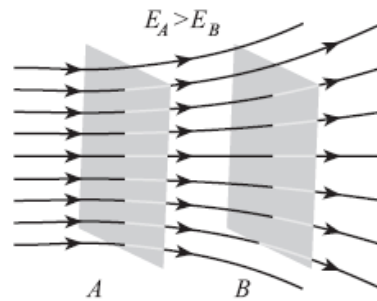


Figura I-1. Esempio di linee di forza di un campo elettrico. $E_A > E_B$ in quanto il numero delle linee di flusso che fluiscono attraverso la superficie A risulta maggiore di quelle che fluiscono attraverso la superficie B .

Le regole per disegnare le linee di forza per una distribuzione di carica sono le seguenti:

- le linee di forza devono avere origine dalle cariche positive e terminare sulle cariche negative o all'infinito qualora il sistema abbia un eccesso di carica;
- il numero di linee di forza che entrano o escono da una carica è proporzionale alla carica;
- due linee di forza non si possono incrociare.

Il metodo di rappresentazione del campo elettrico attraverso le linee di forza presenta tuttavia alcune limitazioni. Innanzitutto la sua efficacia è circoscritta alla descrizione di campi statici essendo piuttosto complessa la rappresentazione dei campi generati da cariche in movimento; inoltre con questo metodo è impossibile applicare il principio di sovrapposizione. Si faccia riferimento, infatti, alla configurazione di linee di forza originate da una singola carica, Figura I-2, in principio il campo prodotto da due cariche uguali ma di segno opposto si dovrebbe ottenere affiancando due configurazioni di linee di una singola carica e invertendo la direzione delle frecce per una delle due cariche. Tuttavia tale metodo determinerebbe delle linee che si incrociano a cui corrisponderebbero due direzioni del campo elettrico nello stesso punto, cosa ovviamente priva di significato fisico. La rappresentazione delle linee di forza per tale sistema di cariche, il dipolo elettrico, è comunque possibile ed è mostrato in Figura I-3, ma richiede un preventivo calcolo matematico.

Fino ad ora nel definire il campo elettrico si è considerato lo spazio vuoto. Tuttavia nella realtà tale spazio è riempito di materia (o materiali) più o meno densa, solida, liquida o gassosa. Di conseguenza bisogna considerare l'effetto prodotto dalla presenza di tali materiali nello spazio in esame.

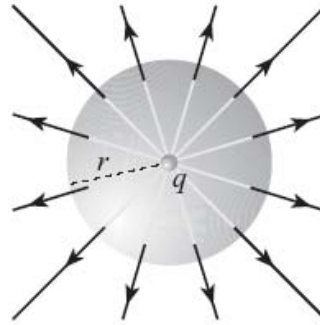


Figura I-2. Linee di forza originate da una carica positiva.

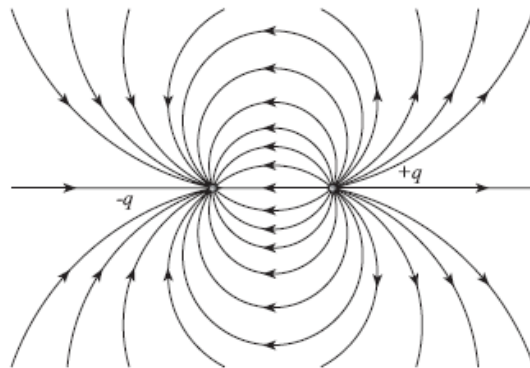


Figura I-3. Linee di flusso di un dipolo elettrico.

Nei *conduttori* la disposizione degli atomi nel reticolo cristallino è tale che un certo numero di elettroni delle orbite esterne risulta sostanzialmente “libero” di spostarsi, dando luogo ad un moto effettivo, quando è presente un campo elettrico all’interno del conduttore stesso [I-1]. Dal punto di vista microscopico, l’azione di tale campo (attivo internamente al conduttore per conseguenza di una differenza di potenziale applicata ai suoi capi) è quella di sovrapporre al moto disordinato dovuto all’agitazione termica un moto ordinato di elettroni, detto di deriva [I-1]. Tale moto avviene nella

direzione del campo elettrico e determina la corrente elettrica. Questa grandezza è definita come il rapporto fra la carica che fluisce in un intervallo di tempo attraverso la sezione del conduttore e l'intervallo di tempo stesso. L'unità di misura corrispondente è l'Ampere [A], pari ad un Coulomb per secondo. Un'ulteriore grandezza vettoriale spesso utilizzata, legata al movimento degli elettroni, è la densità di corrente elettrica \vec{J} , definita come quel vettore tale che il suo flusso attraverso una sezione del conduttore fornisce la corrente che lo attraversa. Tale grandezza soddisfa la ben nota legge di Ohm, che scritta in forma locale lega fra di loro, attraverso la conducibilità elettrica del materiale, σ , il campo elettrico presente in un certo istante e in una certa posizione del conduttore, e la densità di corrente nello stesso istante e posizione. Per un mezzo lineare, stazionario, omogeneo, isotropo e non dispersivo, caratteristiche queste che verranno assunte nel seguito della trattazione, la conducibilità risulta essere una quantità scalare e la relazione menzionata assume la seguente espressione:

$$\vec{J}(\vec{r}) = \sigma \vec{E}(\vec{r}) \quad \text{Eq. I-3}$$

La densità di corrente \vec{J} e la conducibilità σ si misurano rispettivamente in Ampere/m² [A/m²] e in Siemens/m [S/m].

In assenza di un moto netto degli elettroni in una particolare direzione, ovvero in assenza di un campo elettrico interno, il conduttore è detto in *equilibrio elettrostatico*. In altre parole, in elettrostatica il campo elettrico all'interno del conduttore è ovunque nullo.

In effetti, se un conduttore viene immerso in un campo elettrico, in una prima fase gli elettroni interni al conduttore cominciano a muoversi, alla ricerca di una configurazione di equilibrio: quando la loro disposizione è tale da annullare il campo elettrico presente internamente al conduttore, la configurazione di equilibrio è raggiunta [I-1].

Una proprietà fondamentale, che deriva dal fatto che il campo elettrostatico internamente al conduttore è nullo, e inerente al campo elettrico esterno al conduttore stesso, consiste nel fatto che tale campo in prossimità della superficie risulta ad essa ortogonale [I-1].

Nei dielettrici, invece, gli elettroni risultano fortemente legati ai rispettivi nuclei, e non sono pertanto liberi di muoversi per effetto di un campo elettrico esterno. Tuttavia, sotto l'azione di tale campo, è possibile assistere a livello atomico a spostamenti della nube elettronica rispetto al nucleo

dell'atomo, con conseguente formazione di dipoli elettrici, ciascuno dei quali rappresenta un semplice sistema costituito da due cariche uguali ed opposte poste a distanza fissa l'una dall'altra. In questo caso si parla di *polarizzazione per deformazione* proprio per il fatto che l'atomo si deforma sotto l'azione del campo elettrico esterno. Esistono inoltre materiali particolari per i quali si manifesta il fenomeno di *polarizzazione per orientamento*. Questi materiali in assenza di campo elettrico esterno possiedono dipoli orientati in modo casuale che tendono invece ad orientarsi con il campo elettrico quando questo viene applicato.

A livello macroscopico, il comportamento di un dielettrico soggetto ad un campo esterno è descritto dal vettore di *polarizzazione elettrica* \vec{P} , che per un mezzo dalle caratteristiche prima supposte risulta proporzionale al campo elettrico \vec{E} che agisce internamente al dielettrico.

Per determinare il campo elettrostatico in presenza di dielettrico, si introduce il vettore *spostamento elettrico* \vec{D} , così definito:

$$\vec{D}(\vec{r}) = \epsilon_0 \vec{E}(\vec{r}) + \vec{P}(\vec{r}) \quad \text{Eq. I-4}$$

che per un mezzo dalle caratteristiche menzionate risulta proporzionale al campo elettrico attraverso la costante dielettrica assoluta ϵ , quest'ultima pari al prodotto delle costanti dielettriche del vuoto e del mezzo materiale:

$$\vec{D}(\vec{r}) = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}(\vec{r}) = \epsilon \vec{E}(\vec{r}) \quad \text{Eq. I-5}$$

L'unità di misura di tale campo è Coulomb/m² [C/m²].

1.3 Campo magnetico

L'esistenza delle *forze di origine magnetica* porta all'introduzione di un campo vettoriale, detto *campo magnetico*. Anche per la definizione di tale campo si consideri in un primo momento una condizione di staticità.

Studi sistematici hanno mostrato l'esistenza di forze fra circuiti percorsi da corrente e materiali magnetici permanenti, posti in prossimità, e l'esistenza di mutue azioni meccaniche fra i circuiti stessi.

La presenza di tali forze è spiegabile ipotizzando che circuiti percorsi da corrente generino nel loro intorno un campo \vec{B} detto *induzione magnetica*. Quindi, poiché le correnti elettriche sono definite in termini di cariche in movimento, tutti i fenomeni magnetici sono così ricondotti a una comune base secondo cui essi sono generati in relazione al movimento di cariche. Anche le azioni fra materiali magnetici sono interpretabili in termini di movimento di elettroni che generano correnti all'interno degli atomi.

Dunque, come per il campo elettrico, l'intensità dell'effetto, dovuto al campo magnetico, è misurata dall'azione della forza che il campo stesso esercita sulla carica in movimento. E' noto che una carica elettrica q che si muove ad una velocità \vec{v} subisce una forza ad opera del campo di induzione magnetica \vec{B} a cui è sottoposta, che risulta ortogonale sia al campo sia alla velocità e possiede un'intensità proporzionale alla carica, alla velocità e all'intensità del campo. Tale forza nota come *forza di Lorentz* è espressa dalla seguente relazione che costituisce la definizione operativa del campo *induzione magnetica* \vec{B} :

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \qquad \text{Eq. I-6}$$

Da questa equazione si deducono le dimensioni fisiche del campo \vec{B} che risultano pari a $\left[\frac{\text{forza}}{\text{carica} \cdot \text{velocità}} \right]$.

L'unità di misura è il Tesla [T], definito dunque come un campo B tale che una carica di 1 C, in moto con velocità $v = 1$ m/s, è soggetta alla forza di 1 N se \vec{v} è ortogonale a \vec{B} :

$$T = \frac{Ns}{Cm} = \frac{Vs}{m^2}$$

La quantità Volt per secondo è definita Weber [Wb] quindi $T = \frac{Wb}{m^2}$. Tuttavia un'unità di misura frequentemente usata è il Gauss [G], che è legato al Tesla dalla relazione:

$$1 T = 10^4 \text{ Gauss}$$

Qualora in una certa regione dello spazio agisca oltre al campo di induzione magnetica \vec{B} (le

cui sorgenti sono correnti elettriche) anche un campo elettrico \vec{E} (le cui sorgenti sono le cariche elettriche), una particella carica è sottoposta alla forza:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \quad \text{Eq. I-7}$$

Un caso di notevole interesse, che sarà utile quando si parlerà di tecniche di riduzione per gli elettrodotti, è quello della determinazione del campo di induzione magnetica \vec{B} generato da un conduttore rettilineo indefinito percorso da una corrente stazionaria I , posto in un mezzo materiale. In questo caso il vettore induzione magnetica $\vec{B}(r)$ è dato dalla nota legge di Biot e Savart:

$$\vec{B}(r) = \frac{\mu I}{2\pi r} \hat{t} \quad \text{Eq. I-8}$$

nella quale r è la distanza dal conduttore, μ [H/m] la permeabilità magnetica del mezzo, nel caso sia il vuoto $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, e \hat{t} il versore della tangente alla circonferenza di raggio r giacente sul piano ortogonale al filo. Quindi per un conduttore di lunghezza infinita le linee di forza del campo di induzione magnetica sono circonferenze concentriche con il centro del conduttore e disposte nel piano perpendicolare alla direzione del conduttore stesso. Il verso del vettore \vec{B} segue la regola della mano destra, nel senso che il pollice punta nel verso della corrente, il vettore campo di induzione magnetica punta nella direzione delle quattro dita. Nella Figura seguente sono mostrate le linee del campo di induzione magnetica per questo caso specifico.

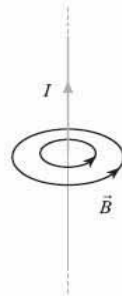


Figura I-4. Linee del campo intorno a un conduttore rettilineo e loro verso con la regola della mano destra

Quando della materia viene posta in una regione di spazio in cui sia presente un campo

magnetico, essa ne subisce un'azione meccanica e contemporaneamente modifica il campo. Sotto questo profilo generale, la situazione è analoga a quella che si presenta quando un dielettrico viene posto in un campo elettrostatico. In questo caso, però, il comportamento del materiale dal punto di vista magnetico può essere spiegato assimilando ciascun elettrone orbitante intorno al nucleo ad una spirale microscopica percorsa da corrente (corrente microscopica) la quale fluisce nella direzione opposta a quella di rotazione dell'elettrone intorno al nucleo. La Figura I-5 riporta il modello atomico mostrando la similitudine ora descritta. Poiché l'azione del campo magnetico su di una spirale non è una forza, ma un momento di una coppia, quest'ultimo tenderà a far ruotare la spirale e a farle assumere un orientamento perpendicolare al campo applicato. Questo fenomeno di polarizzazione produce sia delle alterazioni del campo magnetico esterno sia delle azioni meccaniche sul materiale da parte del campo esterno stesso, ed è descritto dal vettore di *polarizzazione magnetica* \vec{M} , il quale dipende dal campo di induzione magnetica \vec{B} nel quale il materiale considerato è immerso $\vec{M} = \vec{M}(\vec{B})$ ed è specifico per ogni tipo di materiale. Inoltre, si introduce il vettore *campo magnetico* \vec{H} così definito:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \quad \text{Eq. I-9}$$

Le dimensioni fisiche di tale campo sono quelle di una corrente divisa per una lunghezza e la sua unità di misura è Ampere/metro [A/m]. Per come è stato definito il campo magnetico si nota che volendo intervenire per ridurlo si può agire:

- sulle correnti in gioco
- sulla distanza dal conduttore
- sul tipo di materiale

Anche in questo caso è possibile ridurre il campo in un punto sovrapponendone uno minore o al più uguale e contrario.

Nel caso di un mezzo con le caratteristiche ipotizzate precedentemente (lineare, stazionario, omogeneo, isotropo e non dispersivo), e dunque escludendo in particolare i magneti permanenti, i campi vettoriali \vec{H} e \vec{B} risultano essere fra di loro paralleli. Per tali mezzi si può scrivere:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{Eq. I-10}$$

La quantità scalare μ , permeabilità magnetica, è data dal prodotto della permeabilità magnetica del vuoto e della permeabilità relativa, che costituisce una proprietà di ogni materiale:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad \text{Eq. I-11}$$

Nel vuoto e praticamente anche in aria $\mu = \mu_0$ e dunque $\mu_r = 1$.

Di seguito, poiché si considererà sempre il caso di mezzo lineare, stazionario, omogeneo, isotropo e non dispersivo, si parlerà indistintamente di \vec{B} ed \vec{H} poiché, come detto in precedenza, essi risultano fra loro paralleli.

Riprendendo in esame il caso espresso dalla legge di Biot – Savart, si può definire il campo magnetico generato da una corrente lineare nel modo seguente:

$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi r} \hat{t}$$

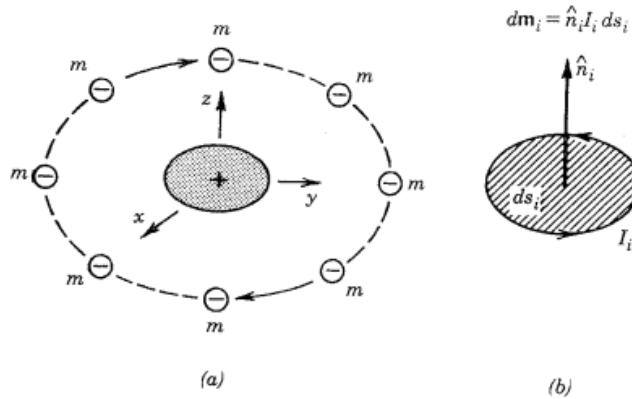


Figura I-5. Modelli atomici rappresentanti la struttura atomica: (a) elettroni orbitanti; (b) spira circolare equivalente.

A questo punto è bene sottolineare che i campi fondamentali dell'elettromagnetismo sono \vec{E} e \vec{B} . I campi \vec{D} ed \vec{H} sono opportunamente introdotti per descrivere gli effetti medi delle cariche e delle correnti di origine atomica presenti internamente ad un materiale, e di cui si è cercato di dare un

breve accenno, in sovrapposizione agli effetti delle cariche localizzate e delle correnti macroscopiche di conduzione [I-1].

1.4 Differenza di potenziale

La forza elettrostatica fra due cariche definita dalla legge di Coulomb è una forza di tipo centrale o radiale, cioè il suo modulo dipende dalla distanza tra le due cariche, in particolare esso risulta inversamente proporzionale al quadrato di tale distanza, ed è diretta lungo la congiungente che si ottiene collegando la carica sorgente con quella di prova. Una forza che appartiene a tale categoria ha la caratteristica di essere conservativa, ossia il lavoro da essa compiuto per spostare una carica su cui agisce lungo un percorso che unisce due punti fissi, non dipende dalla forma del percorso, ma solo dalla posizione che i due punti assumono rispetto ad un riferimento [Figura I-6].

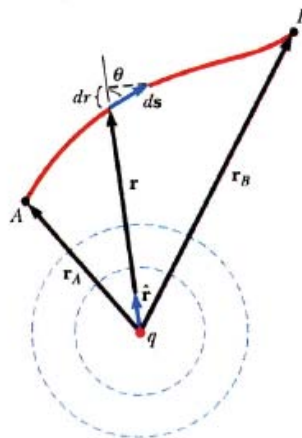


Figura I-6.

Per tale forza, in un sistema di riferimento avente origine coincidente con il punto in cui si genera il campo elettrostatico (si veda Figura I-6), è possibile definire un'energia potenziale elettrica come una funzione scalare di punto, dipendente quindi dal vettore posizione, la quale rappresenta l'energia che una carica possiede a causa della sua posizione all'interno del campo elettrostatico (conservativo) nel quale è immersa. In un punto generico \vec{r}_A il valore che l'energia potenziale assume è uguale al lavoro che la forza elettrostatica compie sulla carica per spostarla dal punto A ad un altro

punto O , preso come punto di riferimento per A e tutti gli altri punti dello spazio su cui agisce la forza, cui si assegna convenzionalmente energia nulla. Allora è possibile definire la seguente funzione di *energia potenziale*:

$$U(\vec{r}_A) = U(A) = L(A \rightarrow O) = \int_A^O \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{s} = q \int_A^O \vec{E}(\vec{r}) \cdot d\vec{s} \quad \text{Eq. I-12}$$

Se B è un altro punto dello spazio, si ha:

$$U(\vec{r}_B) = U(B) = L(B \rightarrow O) = \int_B^O \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{s} = q \int_B^O \vec{E}(\vec{r}) \cdot d\vec{s} \quad \text{Eq. I-13}$$

Scegliendo una traiettoria che vada da A a B , passando anche per il punto di riferimento O , si può scrivere:

$$U(A) - U(B) = L(A \rightarrow O) - L(B \rightarrow O) = L(A \rightarrow O) + L(O \rightarrow B) = L(A \rightarrow B) \quad \text{Eq. I-14}$$

cioè, il lavoro svolto è uguale alla diminuzione di energia potenziale:

$$L(A \rightarrow B) = U(A) - U(B) = -\Delta U \quad \text{Eq. I-15}$$

Dall'eq. I-13, discende la definizione di *potenziale* nel punto A come il lavoro fatto dal campo sulla carica unitaria:

$$V(A) = \frac{U(A)}{q} = \int_A^O \vec{E}(\vec{r}) \cdot d\vec{s} \quad \text{Eq. I-16}$$

Si definisce allora la *differenza di potenziale* tra i punti A e B come la variazione di energia potenziale per unità di carica:

$$V(A) - V(B) = \frac{U(A) - U(B)}{q} = \int_A^B \vec{E}(\vec{r}) \cdot d\vec{s} \quad \text{Eq. I-17}$$

Le dimensioni fisiche del potenziale elettrico sono dunque quelle di una energia rapportata ad una carica elettrica; l'unità di misura è detta Volt [V] ed equivale a un Joule su Coulomb.

1.5 Relazione tra campo elettrico e potenziale

Noto il potenziale è possibile anche risolvere il problema inverso, ovvero la determinazione del campo elettrico. Infatti, il primo membro dell'eq. I-17 si può scrivere, per definizione di integrale definito, come:

$$V(A) - V(B) = - \int_A^B dV \quad \text{Eq. I-18}$$

Dal confronto di queste due equazioni si ottiene:

$$- \int_A^B dV = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad \text{Eq. I-19}$$

e quindi

$$-dV = \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad \text{Eq. I-20}$$

In particolare, facendo uso delle componenti cartesiane, si ha:

$$-dV(x, y, z) = E_x dx + E_y dy + E_z dz \quad \text{Eq. I-21}$$

dove $d\vec{s} = (dx, dy, dz)$. Per semplificare la trattazione si può supporre che il campo e il potenziale dipendano solo dalla variabile spaziale x . In tal caso, l'eq. I-21 si può semplificare;

$$-dV(x) = E_x dx \quad \text{Eq. I-22}$$

e ancora, esplicitando il differenziale al primo membro:

$$-\frac{dV(x)}{dx} dx = E_x dx \quad \text{Eq. I-23}$$

In definitiva, si ha:

$$E_x = -\frac{dV(x)}{dx} \quad \text{Eq. I-24}$$

Questa relazione permette di affermare che, se è noto il potenziale, come funzione di una coordinata, per ottenere la componente del campo associata alla coordinata è sufficiente fare la derivata del potenziale e cambiargli il segno. Questo risultato è generalizzabile a tutte le componenti. Si può quindi affermare che, mentre la definizione nell'eq. I-17 consente di ottenere il potenziale se è noto il campo, la relazione espressa dall'eq. I-24 consente di ricavare il campo noto il potenziale (in maniera più rigorosa bisogna parlare di derivate parziali del potenziale).

I.6 Campo elettromagnetico

In condizioni stazionarie, il campo elettrico e il campo magnetico sono trattati indipendentemente l'uno dall'altro e i campi \vec{E} e \vec{B} appaiono come grandezze fisiche fra di loro indipendenti. Tuttavia esse sono solo in apparenza completamente separate. Infatti, le stesse cariche elettriche, che rappresentano la sorgente del campo elettrico, quando sono in movimento, danno luogo a una corrente e divengono dunque sorgente di un campo \vec{B} . Poiché il fatto che le cariche siano ferme o si muovano è un fatto *relativo*, cioè dipendente dal sistema di riferimento scelto per descrivere il fenomeno, diviene relativo il fatto che si abbia a che fare con un campo elettrico o con un campo magnetico. Per chiarire questo concetto, si può analizzare la forza agente su una carica q che si muove con una certa velocità \vec{v} parallelamente ad un filo rettilineo indefinito percorso da una corrente stazionaria. Tale analisi può essere eseguita sia da un osservatore O solidale al filo, e che vede quindi la carica in moto con velocità \vec{v} , sia da un osservatore O' solidale alla carica, che vede la carica immobile. Il primo osservatore, O , vede il filo elettricamente neutro percorso da una corrente stazionaria, per cui non vede campi elettrici, ma vede il campo magnetico di un filo percorso da una corrente di intensità costante. Per tale osservatore la forza agente sulla carica è la forza di Lorenz, definita dall'eq. I-6 (Figura I-7). L'osservatore O' vede anch'esso un campo magnetico dovuto alla corrente. Tuttavia, poiché egli vede la carica q ferma, tale campo non produce forza sulla carica. Ciò nonostante l'osservatore O' deve vedere la stessa forza che vede l'osservatore O , in quanto i due sistemi di riferimento sono l'uno rispetto all'altro in moto traslatorio uniforme e pertanto debbono misurare le stesse accelerazioni e le stesse forze. L'osservatore O' deve di conseguenza concludere che tale forza agente sulla carica q , per lui in quiete, deriva dalla presenza di un campo elettrico \vec{E}' (Figura I-8). In altre parole, gli osservatori O e O' vedono la medesima forza, ma mentre O la considera un effetto del campo magnetico, O' la considera un effetto di un campo elettrico la cui origine non sembra

derivare dalla presenza di carica elettrica, il filo è elettricamente neutro, ma è attribuibile alla presenza di un campo magnetico.

Da queste considerazioni sembra logico interpretare il campo elettrico e il campo magnetico come manifestazioni diverse di un'unica entità fisica [I-1].

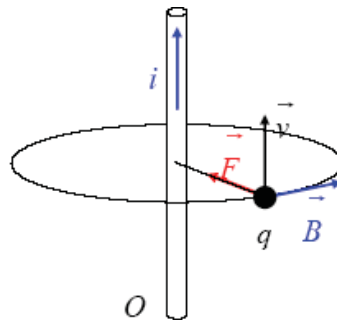


Figura I-7.

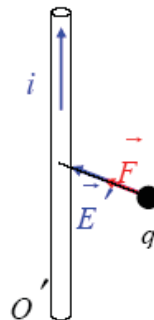


Figura I-8.

Questa conclusione è rafforzata dalla legge di Faraday-Neumann secondo la quale, in condizioni di non stazionarietà, ogni volta che si è in presenza di un campo di induzione magnetica \vec{B} variabile nel tempo viene generato un campo elettrico indotto non conservativo. Quest'ultimo provoca uno spostamento di cariche e quindi una corrente che genera a sua volta un campo magnetico \vec{B} indotto [I-1]. In pratica, il campo elettrico e il campo magnetico sono l'uno la sorgente dell'altro e questa circostanza conferma, come detto, la necessità di considerare i due campi come due aspetti di

un'unica entità fisica, il *campo elettromagnetico*, il quale è in grado di propagarsi a distanza indefinita dalla sorgente proprio grazie a questa mutua generazione [I-2]. Questo fenomeno propagativo è indicato anche con il termine *radiazione elettromagnetica*.

Il campo elettromagnetico si propaga sottoforma di *onde dette elettromagnetiche*, che si possono pensare costituite da pacchetti di energia chiamati fotoni. L'energia di ogni fotone è direttamente proporzionale alla frequenza dell'onda: più alta è la frequenza, maggiore è la quantità di energia di ogni fotone. Riassumendo: parlare di campo elettromagnetico o radiazione elettromagnetica è lo stesso, mentre parlare di onda elettromagnetica sta ad indicare la forma con cui il campo si propaga.

Un'onda elettromagnetica si propaga con velocità pari a $v = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$ e quindi dipende dal mezzo in cui viaggia. Nel vuoto è pari alla velocità della luce, $c \cong 3 \cdot 10^8$ m/s. La funzione che rappresenta tale tipologia di onde è di tipo sinusoidale e pertanto l'onda è periodica sia nella variabile spaziale (fissato il tempo) sia nella variabile temporale (fissata la variabile spaziale). Il periodo temporale T e quello spaziale λ , *lunghezza d'onda*, ovvero la distanza percorsa dall'onda nel tempo di un'oscillazione, sono legati dalla relazione:

$$\lambda/T = v \qquad \text{Eq. I-25}$$

Un parametro fondamentale che caratterizza l'onda elettromagnetica è la *frequenza* pari all'inverso del periodo temporale ($f = 1/T$), la quale rappresenta il numero di oscillazioni, per un determinato punto, nell'unità di tempo. Misurata in cicli al secondo, ha come unità di misura l'Hertz [Hz]. Si ha quindi che la lunghezza d'onda e la frequenza sono legate dalla relazione:

$$\lambda f = v \qquad \text{Eq. I-26}$$

Tanto più corta è la *lunghezza d'onda*, tanto più alta è la frequenza. Altri due parametri che si utilizzano spesso legati alla frequenza sono: la *pulsazione*, $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$, misurata in s^{-1} [s^{-1}] e il *numero d'onda*, $k = 2\pi/\lambda$, misurato in m^{-1} [m^{-1}], che rappresenta il numero di oscillazioni che l'onda compie nell'unità di spazio.

L'esistenza simultanea del campo elettrico e del campo magnetico associati ad un'onda elettromagnetica comporta la presenza di una certa densità di energia distribuita nello spazio, che è equipartita tra campo elettrico e campo magnetico, ovvero la densità di energia elettrica è la stessa di quella magnetica. Tale energia viene trasportata dall'onda e la grandezza di misura accessibile attraverso la quale è possibile caratterizzare l'intensità istantanea, ovvero l'energia che all'istante t fluisce nell'unità di tempo, attraverso la superficie unitaria disposta ortogonalmente alla velocità di propagazione dell'onda, è data dal modulo del vettore di Poynting che è così definito [I-1]:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad \text{Eq. I-27}$$

Dimensionalmente \vec{S} si esprime in watt al metro quadrato, $[\text{W}/\text{m}^2]$. Il flusso di tale vettore attraverso una superficie elementare rappresenta, quindi, l'energia elettromagnetica che l'onda trasporta nell'unità di tempo attraverso l'elemento di superficie detto. Tale interpretazione fisica vale tuttavia solo nel caso delle onde, in cui i campi \vec{E} ed \vec{H} sono strettamente correlati, poiché le variazioni temporali dell'uno costituiscono le sorgenti dell'altro. In condizioni statiche, può capitare che sia non nullo il prodotto $\vec{E} \times \vec{H}$ di un campo elettrico \vec{E} e di un campo magnetico \vec{H} indipendentemente generati da sorgenti diverse. Trattandosi di una configurazione statica, il flusso di energia attraverso una qualunque superficie è naturalmente nullo, mentre può essere non nullo il flusso del prodotto vettoriale $\vec{E} \times \vec{H}$, che non ha in questo caso alcuna interpretazione fisica significativa [I-1].

La figura seguente propone una semplice schematizzazione di un'onda elettromagnetica che si propaga nella direzione x del sistema di riferimento prescelto:

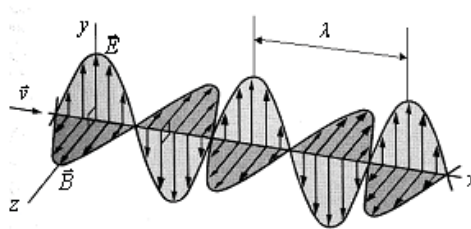


Figura I-9. Rappresentazione onda piana uniforme trasversale.

In particolare, quello riportato è il tipico andamento di campo elettrico (nel piano x - y) e di

campo di induzione magnetica (nel piano xz) di un'onda piana uniforme: si tratta di un tipo d'onda molto importante in quanto si può dimostrare che un'onda elettromagnetica irradiata da una qualsiasi sorgente presenta, a distanza sufficientemente elevata da questa, le caratteristiche di un'onda piana uniforme (approssimazione di sorgente puntiforme). Come si vede dalla figura il campo elettrico e quello di induzione magnetica (e quindi quello magnetico) sono fra loro ortogonali ed oscillano in fase su piani perpendicolari all'asse x , che rappresenta la direzione di propagazione. Per tale ragione l'onda è detta anche *onda trasversale*. Inoltre, ad ogni istante, tali campi hanno lo stesso valore in tutti i punti di ogni piano ortogonale alla direzione di propagazione [I-1]. Ciascuno di questi piani rappresenta quindi il fronte d'onda ed è per questo motivo che l'onda viene indicata come piana.

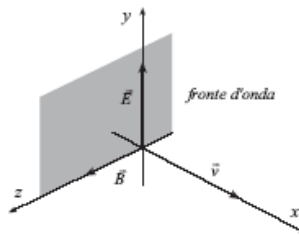


Figura I-10. Fronte d'onda.

Si osservi, infine, che la scelta di assumere i campi orientati in direzioni fisse, condizioni per le quali si dice che l'onda possiede *polarizzazione lineare* (nel caso rappresentato in Figura I-10 \vec{E} è polarizzato lungo y), non deve ritenersi una restrizione in quanto la più generale delle onde può essere ottenuta dalla sovrapposizione di un'onda polarizzata lungo l'asse y e l'altra polarizzata lungo l'asse z .

Un'altra proprietà fondamentale dell'onda piana e uniforme è espressa dal rapporto fra le intensità del vettore campo elettrico E e del vettore campo di induzione magnetica B che risulta pari alla velocità di propagazione dell'onda stessa nel mezzo. Questa proprietà viene generalmente espressa in termini dell'intensità del vettore E e del vettore H nel modo seguente:

$$E/H = \sqrt{\mu/\varepsilon} = Z \quad \text{Eq. I-28}$$

La quantità Z è nota come impedenza caratteristica del materiale ed ha le dimensioni di una resistenza elettrica (o di una impedenza). Nel caso del vuoto questa grandezza è pari a:

$$Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 377 \Omega \quad \text{Eq. I-29}$$

Sempre nel vuoto v vale c e quindi risulta:

$$E = cB \quad \text{Eq. I-30}$$

questa relazione suggerisce che, siccome c ha un valore molto grande, gli effetti prodotti da un'onda elettromagnetica nel vuoto, ma anche nell'aria visto che in tale caso $v \approx c$, sono sostanzialmente di natura elettrica. Ad esempio, un'onda elettromagnetica piana nel vuoto, il cui campo elettrico assume un valore massimo di 6 V/m, sarà caratterizzata da un campo magnetico il cui valore massimo è di circa 20 nT (ossia 2500 volte minore del campo magnetico medio alla superficie prodotto dalla Terra, che è circa pari a 50 μ T). Per tale motivo nella descrizione di un'onda elettromagnetica, comunemente, ci si riferisce al suo campo elettrico.

Nel caso di un'onda piana uniforme il vettore di Poynting è caratterizzato dall'aver la direzione ed il verso coincidenti con quelli della velocità di propagazione dell'onda e modulo proporzionale al prodotto delle intensità del campo elettrico e del campo magnetico.

1.7 Spettro elettromagnetico

L'intervallo di frequenza entro il quale le onde elettromagnetiche sono oggetto di applicazioni è estremamente ampio. A seconda della loro frequenza, esse sono prodotte da tipi di sorgenti diverse, hanno proprietà diverse e in particolare diverse modalità di interazione con la materia. Ne segue quindi che esse vengono classificate in base alla loro lunghezza d'onda ovvero alla loro frequenza. La figura seguente mostra l'intero spettro elettromagnetico, cioè l'insieme di tutte le frequenze a partire dal valore nullo fino al raggiungimento di valori elevati della frequenza, insieme alla classificazione basilare delle radiazioni elettromagnetiche. Inoltre, essa mette in risalto esempi di sorgenti tipiche relative a ciascuna classe individuata.

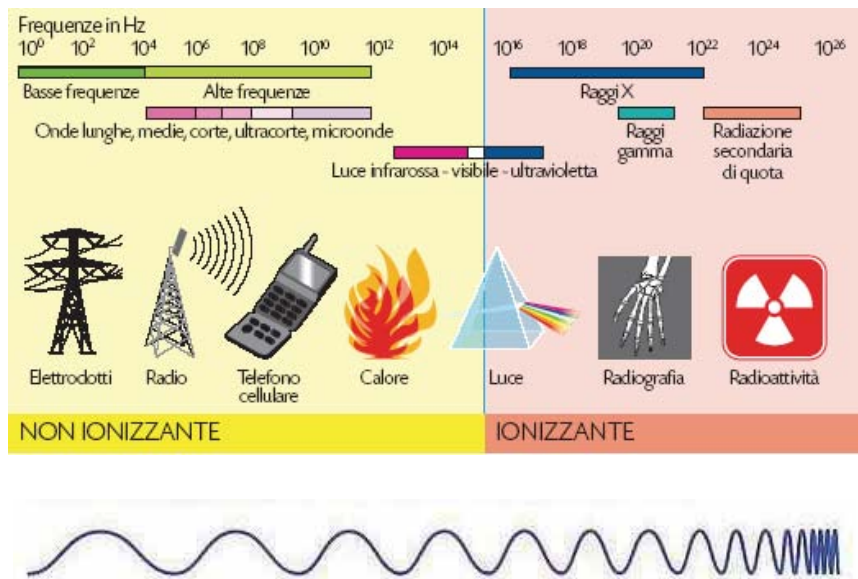


Figura I-11. Spettro elettromagnetico.

Dalla figura si può notare una prima suddivisione tra le cosiddette *radiazioni ionizzanti* (IR: *Ionizing Radiation*) e *radiazioni non ionizzanti* (NIR: *Non Ionizing Radiation*). Il limite di demarcazione è stato fissato alla frequenza di $3 \cdot 10^{15}$ Hz in base al DLgs. 26/5/00 n. 241, in seguito al recepimento della direttiva 96/29/Euratom [I-3]. Tale linea si colloca all'interno delle frequenze dell'ultravioletto, per cui le radiazioni dell'infrarosso, del visibile e parte dell'ultravioletto stesso rientrano nelle radiazioni non ionizzanti, mentre la componente superiore dell'ultravioletto appartiene all'intervallo ionizzante.

Le differenze fra i due tipi di radiazione sono di seguito riportate:

- le radiazioni ionizzanti hanno una frequenza estremamente alta, sono dotate quindi, di un'energia fotonica in grado di rompere i legami atomici della materia dando luogo al fenomeno fisico della ionizzazione, ovvero alla separazione di uno o di più elettroni dagli atomi o dalle molecole di cui fanno parte, la quale determina di conseguenza la creazione di particelle atomiche o parti di molecole cariche positivamente (ioni);
- le radiazioni non ionizzanti, sono dotate di una energia fotonica, la cui intensità non

è tale da dar vita al fenomeno della ionizzazione, tuttavia esse sono in grado di interagire con la materia apportando modifiche termiche, meccaniche e bioelettriche [I-4].

Nella Tabella I-1 viene riportata la classificazione delle radiazioni secondo lo standard 211-1997 della IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers* – Organizzazione professionale USA), il quale è stato rivisto e confermato in data 11 Settembre 2003 [I-5]. Per ciascuna classe si riportano poi alcuni esempi di servizi ed applicazioni. Tuttavia spesso viene utilizzata una suddivisione più sommaria: con il termine di *radiofrequenze* vengono indicate le onde elettromagnetiche il cui spettro si estende dalle LF alle VHF e con il termine di *microonde* quelle la cui frequenza appartiene all'intervallo che definisce le UHF, SHF ed EHF (tra 300 MHz e 300 GHz). Oltre tale intervallo, salendo in frequenza si incontra lo spettro dell'infrarosso, del visibile e dell'ultravioletto.

<i>Denominazione</i>	<i>Banda di frequenza</i>	<i>Lunghezza d'onda</i>	<i>Sigla</i>	<i>Servizi ed applicazioni tipiche</i>
FREQUENZE ULTRA BASSE	0-3 Hz	> 10000 km	ULF (Ultra Low Frequency)	radiosismologia
FREQUENZE ESTREMAMENTE BASSE	3-3000 Hz	10000 km – 100 km	ELF (Extremely Low Frequency)	Distribuzione di energia elettrica (elettrودotti), comunicazioni sottomarine
FREQUENZE MOLTO BASSE	3-30 kHz	100 km – 10 km	VLF (Very Low Frequency)	Applicazioni industriali, di telecomunicazioni, di telefonia, di telegrafia, di navigazione marittima
BASSE FREQUENZE (onde lunghe)	30-300 kHz	10 km – 1 km	LF (Low Frequency)	Applicazioni di localizzazione geografica e radio-navigazione
MEDIE FREQUENZE (onde medie)	300-3000 kHz	1 km – 100 m	MF (Medium Frequency)	Applicazioni di telefonia, di radiofonia (modulazione di ampiezza AM e marittima)
ALTE FREQUENZE (onde corte)	3-30 MHz	100 m – 10 m	HF (High Frequency)	Trasmissioni radio (onde corte) e televisive
FREQUENZE MOLTO ALTE (onde ultracorte, o metriche)	30-300 MHz	10 m – 1 m	VHF (Very High Frequency)	Radiodiffusione di segnali televisivi (VHF) e radio (modulazione di frequenza FM), radio-comunicazioni mobili, controllo traffico aereo
FREQUENZE ULTRA ALTE (onde decimetriche)	300-3000 MHz	1 m – 10 cm	UHF (Ultra High Frequency)	Radiodiffusione di segnali televisivi (UHF), sistemi radar, radio astronomia, telefonia mobile, ponti radio, radarterapia
FREQUENZE SUPER ALTE (onde centimetriche)	3-30 GHz	10 cm – 1 cm	SHF (Super High Frequency)	Sistemi radar, sistemi di trasmissione televisiva satellitare, sistemi di telecomunicazione via satellite, sistemi di localizzazione geografica (GPS), radio-navigazione aerea, radio astronomia, telerilevamento ambientale, applicazioni bio-medicali
FREQUENZE ESTREMAMENTE ALTE (onde millimetriche)	30-300 GHz	1 cm – 1 mm	EHF (Extremely High Frequency)	Sistemi radar, sistemi di telecomunicazioni satellitari avanzati, radio astronomia, sistemi a guida radar per l'aeronautica, telerilevamento ambientale, elettroterapia

Tabella I-1 Spettro dei campi elettromagnetici e loro applicazione [I-4].

Nella Tabella I-2 vengono mostrate le bande di frequenza e i relativi range di variazione della lunghezza d'onda per le radiazioni cui l'occhio umano è sensibile. Tali radiazioni come è noto appartengono allo spettro del visibile e spesso sono meglio individuate dalla denominazione del colore corrispondente.

Color	Wavelength interval	Frequency interval
red	~ 625 to 740 nm	~ 480 to 405 THz
orange	~ 590 to 625 nm	~ 510 to 480 THz
yellow	~ 565 to 590 nm	~ 530 to 510 THz
green	~ 520 to 565 nm	~ 580 to 530 THz
cyan	~ 500 to 520 nm	~ 600 to 580 THz
blue	~ 430 to 500 nm	~ 700 to 600 THz
violet	~ 380 to 430 nm	~ 790 to 700 THz

Tabella I-2 Colori e relative frequenze dello spettro visibile

Infine, per completezza, nella Figura I-12, viene riportato lo standard utilizzato dalla ITU (*International Telecommunication Union*), organizzazione che si occupa di definire e promuovere a livello mondiale, standard utilizzati nel campo delle telecomunicazioni.

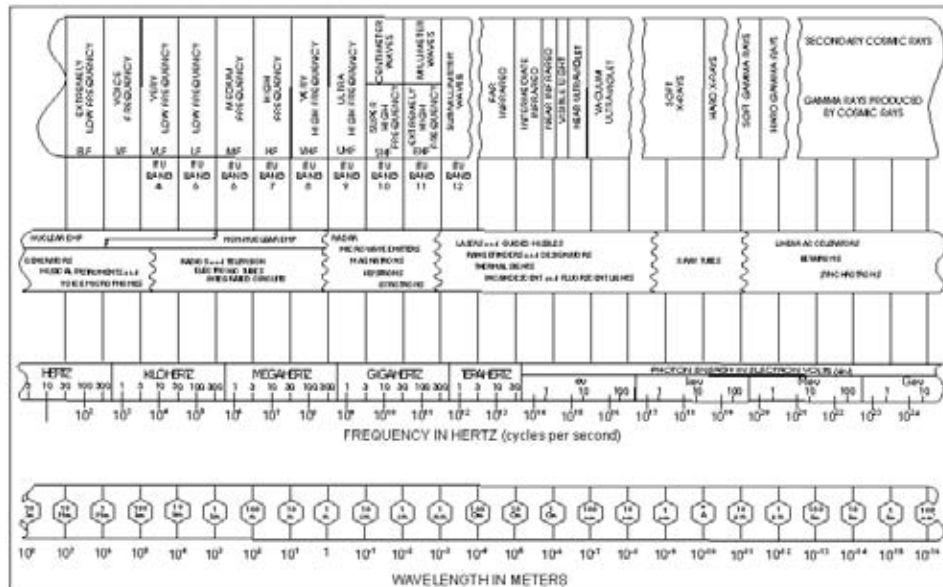


Figura I-12 Spettro elettromagnetico secondo lo standard ITU (1981)

1.8 Dipendenza del campo elettromagnetico dalla distanza

Consideriamo una sorgente posta in un punto dello spazio ed un campo elettromagnetico da essa generato che si propaga in tale spazio. Le caratteristiche elettromagnetiche del campo in un dato punto di tale spazio dipendono dalla distanza del punto dalla sorgente, misurata in termini di lunghezza d'onda, e dalle caratteristiche della sorgente stessa, in particolare la frequenza di lavoro è un parametro fondamentale. Per una qualsiasi sorgente si possono distinguere una zona di campo lontano ed una di campo vicino. In particolare indicando con D il diametro della più piccola sfera che contiene la sorgente e con r_L , detta distanza di transizione, la maggiore tra le quantità λ e D^2/λ , si definisce campo lontano il campo situato a distanza maggiore di r_L e campo vicino quello a distanza inferiore. Si ricorda che una sorgente è definita corta se $D \ll \lambda$, estesa se D è dell'ordine di λ o più. Quindi si può dire che per una sorgente corta, come ad esempio può essere un dipolo, la zona di campo lontano inizia a distanza λ dalla sorgente, mentre per una estesa, come può essere quella usata per trasmissioni a microonde, la zona di campo lontana parte da una distanza dalla sorgente pari a D^2/λ . Inoltre nel caso di sorgente estesa la zona di campo vicino che va da una distanza compresa tra λ e D^2/λ prende nome di zona di Fresnel. Se si considera il caso di una antenna che lavora a 1800 MHz ($\lambda \approx 17$ cm) lunga $D \approx 3$ m ($D \gg \lambda$) risulta che la quantità D^2/λ è maggiore di λ per cui la distanza di transizione a cui inizia il campo lontano è circa 53 m e la zona di Fresnel va da 0.17 m a 53 m. A seconda della zona, il campo elettromagnetico presenta caratteristiche diverse, anche se le transizioni sono graduali e non esistono confini ben definiti

Si consideri la zona di campo lontano. Nella zona di campo lontano si ricade nella condizione di propagazione di onda piana uniforme, quindi è valido quanto detto nel paragrafo 1.6. In particolare il vettore campo elettrico ed il vettore magnetico sono ortogonali fra loro, e man mano che l'onda si propaga, essi oscillano sinusoidalmente e si mantengono in fase l'uno rispetto all'altro. Il rapporto dei loro moduli è costante ed è pari all'impedenza caratteristica. Un campo con queste caratteristiche è definito radiativo. Al crescere della distanza r dalla sorgente i campi si distribuiscono su superfici sempre più ampie e per il principio di conservazione dell'energia questo significa che l'intensità dei campi diminuisce nella propagazione, in pratica la superficie dei fronti d'onda cresce proporzionalmente ad r^2 e la densità di potenza decresce come $1/r^2$ e quindi E ed H come $1/r$ [1-6].

Avvicinandosi alla sorgente, ad una distanza pari alla lunghezza d'onda, il campo perde le

caratteristiche suddette o e comincia a dipendere più fortemente dalla distribuzione di cariche e dalla distribuzione di correnti sulla sorgente, e queste, a loro volta, dipendono dalla geometria della sorgente, dalle proprietà elettriche dei suoi componenti e dal tipo di collegamento fra sorgente e generatore. Questa situazione si ha per punti che distano molto meno di una lunghezza d'onda dalla sorgente, operativamente pari ad $1/10 \lambda$.

Nella zona di campo vicino, il campo elettrico e magnetico hanno una configurazione molto complessa, poiché sono disaccoppiati tra loro. E ed H non sono ricavabili uno dall'altro attraverso un semplice rapporto. Entrambi i campi dipendono fortemente dalla dislocazione delle rispettive sorgenti fisiche (cariche e correnti) sull'elemento radiante, e le caratteristiche geometriche ed elettriche dei conduttori che costituiscono la sorgente hanno un ruolo fondamentale nella loro determinazione. I campi hanno un comportamento molto simile a quello dei campi statici per questo sono definiti quasi-statici. Non c'è trasmissione di energia in quanto i campi si richiudono sulla sorgente e non ha quindi senso parlare di densità di potenza irradiata. Ad esempio si potrebbe avere nelle immediate vicinanze della sorgente un elevatissimo campo elettrico ed un campo magnetico praticamente nullo con una densità di potenza risultante nulla ma, sicuramente, non sono trascurabili gli effetti dell'elevato campo elettrico. Il campo con queste caratteristiche è detto reattivo. [I-6]

In Figura I-13 è schematizzato la distinzione tra le varie zone.

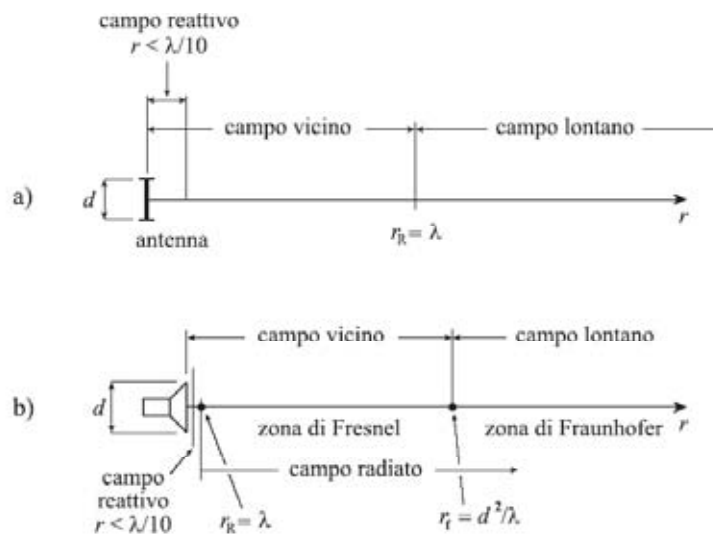


Figura I-13. Zone di Campo [I-6].

1.9 SAR

Nell'esposizione a campi elettromagnetici risulta difficoltoso quantificare l'interazione tra un campo elettromagnetico e un corpo biologico ad esso esposto. Questo è il compito della dosimetria. Il problema della dosimetria dei campi elettromagnetici non ionizzanti consiste cioè nella:

- quantificazione della potenza assorbita da un organismo biologico immerso in un campo elettromagnetico;
- determinazione della distribuzione di tale potenza nell'organismo esposto.

Il problema sorge anche perché le grandezze che possono essere misurare con relativa facilità sono la densità di potenza del campo elettromagnetico incidente (campo lontano: *propagazione ondosa*), oppure le intensità del campo elettrico e/o del campo magnetico (campo vicino: *campi reattivi*). Purtroppo, a differenza del caso delle radiazioni ionizzanti, non esiste un legame semplice tra densità di potenza incidente e potenza assorbita: la conoscenza dell'intensità e della polarizzazione del campo esterno non danno informazione diretta sugli stessi parametri relativi al campo interno. La misura diretta della distribuzione di potenza depositata in un sistema biologico presenta grosse difficoltà, e per ovvi motivi non può essere fatta direttamente sull'uomo. D'altra parte, i risultati della sperimentazione animale non sono direttamente utilizzabili per l'uomo, poiché la configurazione di campo interno, come si vedrà meglio nel capitolo III, dipende fortemente dalla forma e dalle dimensioni dell'oggetto assorbente. Quello che si può dire è che nella gamma di frequenze superiori a qualche centinaio di kHz gli effetti biologici prodotti dall'esposizione al campo elettromagnetico sono per lo più correlati con la densità di potenza assorbita P oppure, in modo del tutto equivalente, con la densità di corrente $J = (2\sigma P)^{1/2}$ o con il campo interno $E = (2P/\sigma)^{1/2}$, dove σ è la conducibilità elettrica del corpo esposto. Il problema della dosimetria, ovvero il problema di quanto il campo interagisce con l'elemento biologico, può dunque essere ricondotto al calcolo di un parametro riassuntivo denominato *SAR* (*specific absorption rate*), che esprime la potenza assorbita per unità di massa (W/kg) ed è dato dalla seguente espressione:

$$SAR = \frac{1}{2\rho} \sigma E^2 \qquad \text{Eq. I-31}$$

dove: E = campo elettrico interno (valore di picco) (V/m)

ρ = densità del tessuto biologico (kg/m³)

σ = conducibilità del tessuto biologico (S/m)

La conducibilità σ include le perdite dipolari e dipende dal tipo di tessuto e dalla frequenza del campo incidente, come sarà discusso nel capitolo III.

Poiché anche la densità ρ e il campo interno E dipendono dal tipo di tessuto (l'uomo è ben lontano dall'essere un corpo omogeneo, σ e ρ sono funzioni di punto), il SAR medio deve essere calcolato integrando sul volume del corpo assorbitore:

$$SAR_m = \frac{1}{V} \int \frac{\sigma(x, y, z)}{2\rho(x, y, z)} E^2(x, y, z) dV \quad \text{Eq. I-32}$$

Il SAR_m è un parametro di particolare importanza, in quanto è ciò che in generale viene misurato sperimentalmente. Quando V è il volume dell'intero corpo, si parla di SAR "whole-body" (WB).

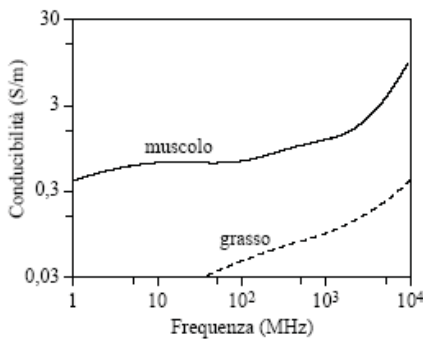


Figura I-14 Conducibilità dei tessuti biologici nella gamma 1 MHz ÷ 10 GHz.

Per concludere questa breve introduzione alla terminologia, un'altra grandezza, spesso utilizzata in letteratura, è il SAR normalizzato ($NSAR$) alla densità di potenza incidente $S_i = E_i^2 / 2\eta_0$:

$$\frac{SAR}{S_i} \quad (\text{W/kg})/(\text{mW/cm}^2) \quad \text{Eq. I-33}$$

Quando si sia espresso l'accoppiamento al campo incidente in termini del *SAR* normalizzato (*NSAR₀*) ad una opportuna densità di potenza incidente *S_{i0}* (ad esempio *S_{i0}* = 1 mW/cm²), è immediato il calcolo della potenza assorbita per una arbitraria densità di potenza incidente *S_i*:

$$NSAR = \frac{SAR}{SAR_i} \qquad \text{Eq. I-34}$$

Il *SAR_m* fornisce, a meno di una costante che dipende dalle unità di misura, la quantità di calore rilasciata al corpo e dà quindi un'idea della sollecitazione termica a cui un organismo è sottoposto. La crescita di temperatura risultante da un dato carico termico non è legata soltanto alla potenza assorbita: essa dipende dai meccanismi fisiologici di termoregolazione e dalle condizioni psicrometriche (temperatura ambiente, umidità relativa, etc.) e non è quindi semplicemente proporzionale al *SAR_m*. Inoltre, mentre l'assorbimento di potenza elettromagnetica è praticamente indipendente dalla presenza di abiti per frequenze fino a qualche GHz, lo smaltimento di calore in eccesso da parte dell'organismo (che avviene principalmente attraverso la superficie) dipende soprattutto dalle caratteristiche termiche del vestiario.

Tanto per dare qualche ordine di grandezza, il calore dissipato dall'organismo umano in condizioni di metabolismo basale è dell'ordine di 1 - 2 W/kg, e sale a circa 4 W/kg per un uomo che cammina a passo rapido. Ci si può aspettare che valori medi di *SAR* WB inferiori a 1 W/kg non costituiscano un carico eccessivo per il sistema di termoregolazione.

Mentre il *SAR_m* fornisce la quantità media di calore rilasciata ad un corpo (o parte di esso), il *SAR* esprime la potenza depositata in un volumetto di tessuto arbitrariamente piccolo; la conoscenza della distribuzione del *SAR* in un sistema biologico permette di individuare eventuali concentrazioni locali di potenza in particolari zone dell'organismo [I-6].

I.10 Bibliografia

- [I-1] C. Mencuccini, V. Silvestrini, *Fisica II Elettromagnetismo Ottica*, Liguori Editore, 1994.
- [I-2] D. Andreuccetti, M. Poli e P. Zanichelli, “*Elementi di fisica delle onde elettromagnetiche e nozioni di base sugli indicatori di rischio*”, Atti del Convegno Nazionale dBA-1998 "Dal rumore ai rischi fisici", Modena, 17-19 Settembre 1998
- [I-3] A.A. V.V., “*La protezione dai campi elettromagnetici*”, TuttoNormel, Edizioni TNE, Novembre 2003.
- [I-4] G. G. Daquino, “*Radiazioni non ionizzanti, campi elettromagnetici*”, Seminario di studio in materia di igiene e sicurezza, INFN – Sezione di Torino, 5-7 Giugno 2001.
- [I-5] *IEEE Standard Definitions of Terms for Radio Wave Propagation*, IEEE Std 211-1997 (Revision of IEEE Std 211-1990).
- [I-6] D. Andreuccetti, M. Bini, et al, *Protezione dai campi elettromagnetici non ionizzanti*, IROE “Nello Carrara” CNR, Firenze 2001.

II Campi elettromagnetici e tessuti biologici

II.1 Introduzione

Nel I capitolo si è parlato di radiazioni non ionizzanti e si è detto che, anche se di alta intensità, non provocano ionizzazione in un sistema biologico. Sono però in grado di penetrare e provocare effetti, ma questo non significa automaticamente danno, come spesso si pensa. Ma quali effetti possono provocare i campi elettromagnetici? E soprattutto quanto possono essere dannosi per l'uomo e gli altri esseri viventi? Per dare una risposta a questa domanda, scienziati di tutto il mondo stanno lavorando da più di trent'anni producendo una miriade di studi condotti su volontari, animali organi cellule tessuti e studi epidemiologici. Anche l'Organizzazione Mondiale della Sanità (World Health Organization, WHO), nel 1996, ha avviato l' International Electromagnetic Field Program (International EMF Program) per verificare le evidenze scientifiche di possibili effetti sulla salute dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenze da 0 a 300 GHZ. Tra gli obiettivi del programma vi è quello di valutare la letteratura scientifica per riportare informazioni su quegli effetti che hanno un riscontro oggettivo. In questo capitolo, saranno affrontati una sintetica trattazione di come i campi penetrano nei tessuti, ed una chiarificazione sui termini danno ed effetti, per poter infine fornire un quadro degli effetti dei campi suddividendoli in radiofrequenza (RF) ed frequenze estremamente basse (ELF), utilizzando quanto dichiarato ad oggi dal WHO.

II.2 Penetrazione del campo elettrico e magnetico e propagazione del campo elettromagnetico nei tessuti biologici

Per comprendere come i campi elettromagnetici penetrano all'interno dei tessuti biologici si consideri dapprima il caso statico e quello delle basse frequenze (ELF), per cui si può descrivere il legame tra campo esterno e campo interno adottando il modello semplificato di Figura II-1, che permette di schematizzare il tessuto mediante un mezzo seminfinito di caratteristiche elettriche tipiche dei tessuti stessi. Si considerano pertanto i due mezzi, aria e tessuto biologico, aventi rispettivamente costanti dielettriche ϵ_1 e ϵ_2 , e conducibilità σ_1 e σ_2 . Alle basse frequenze, il campo elettrico esterno, o applicato, è sempre maggiore di molti ordini di grandezza rispetto al campo medio risultante interno ad un tessuto biologico, che quindi è in grado di schermare efficacemente il campo elettrico [II-1]. Questa è una conseguenza diretta delle condizioni al contorno che derivano dalle equazioni di Maxwell [II-2].

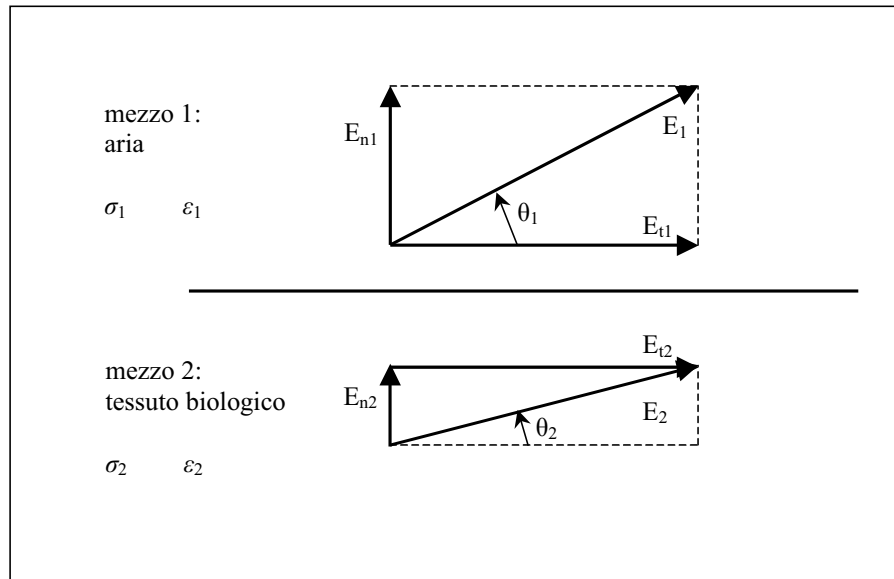


Figura II-1 Simbologia utilizzata nella descrizione delle condizioni al contorno per le componenti del campo elettrico.

Sia per il campo statico sia per quello variabile nel tempo (sempre a basse frequenze), vale la relazione, che esprime la continuità, alla superficie di separazione tra i due mezzi, della componente tangenziale del campo elettrico, ovvero della quantità scalare che si ottiene proiettando il vettore campo elettrico lungo la direzione individuata dalla superficie di separazione:

$$E_{t1} = E_{t2} \quad \text{Eq. II-1}$$

Per il solo caso statico vale, invece, come conseguenza della continuità della componente normale della densità di corrente fra due mezzi non conduttori, la seguente espressione:

$$\sigma_1 E_{n1} = \sigma_2 E_{n2} \quad \text{Eq. II-2}$$

dove con E_n viene denotata la componente normale del campo, anch'essa quantità scalare ottenuta proiettando il vettore campo elettrico nella direzione ortogonale alla superficie di separazione.

L'orientazione del campo elettrico totale in entrambi i mezzi può essere rappresentata dalla tangente dell'angolo che il campo elettrico forma con la linea di separazione:

$$\operatorname{tg} \theta_1 = \frac{|E_{n1}|}{|E_{t1}|} \quad \operatorname{tg} \theta_2 = \frac{|E_{n2}|}{|E_{t2}|} \quad \text{Eq. II-3}$$

Da queste equazioni si ottiene la relazione che esprime il legame tra gli angoli θ_1 e θ_2 :

$$\operatorname{tg} \theta_1 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \operatorname{tg} \theta_2 \quad \text{Eq. II-4}$$

L'aria (mezzo 1) possiede una conduttività [II-1] σ_1 pari a 10^{-13} S/m, mentre un valore tipico della conducibilità per un tessuto biologico σ_2 è di circa 10^{-1} S/m. Per cui $\operatorname{tg} \theta_1 = 10^{12} \operatorname{tg} \theta_2$ e quindi anche per piccolissimi valori dell'angolo θ_2 , ovvero anche nella situazione di campo elettrico interno al tessuto biologico parallelo alla superficie di separazione, $\operatorname{tg} \theta_1$ assume valori elevati e dunque θ_1 può essere considerato pari a $\frac{\pi}{2}$. Pertanto il campo elettrostatico in aria alla superficie di separazione tra aria e tessuto biologico deve essere praticamente perpendicolare alla superficie e quindi, tenendo conto delle equazioni 1) e 2) e dei valori tipici indicati delle conducibilità, risulta spiegata la proprietà schermante del corpo umano relativa al campo elettrostatico. Infatti, il campo incidente sul tessuto biologico subisce un'attenuazione di circa 10^{12} .

La situazione è virtualmente la stessa alle frequenze ELF, sebbene l'equazione (2) viene sostituita dalle seguenti relazioni:

$$\sigma_1 E_{n1} - \sigma_2 E_{n2} = -j\omega \rho_s \quad \text{Eq. II-5}$$

e

$$\varepsilon_1 E_{n1} - \varepsilon_2 E_{n2} = \rho_s \quad \text{Eq. II-6}$$

dove E_{n1} ed E_{n2} rappresentano in questo caso le componenti normali dei fasori \vec{E}_1 ed \vec{E}_2 rappresentativi dei campi variabili nel tempo e ρ_s rappresenta la densità di carica superficiale. Dalla

combinazione delle due si ottiene:

$$E_{n1} = \frac{\sigma_2 + j\omega\varepsilon_2}{\sigma_1 + j\omega\varepsilon_1} E_{n2} \quad \text{Eq. II-7}$$

la quale a 50 Hz, con i valori delle conducibilità pari a $\sigma_2 = 10^{-1}$ S/m e $\sigma_1 = 10^{-13}$ S/m, e con quelli della costante dielettrica pari a $\varepsilon_2 \approx 10^{-5}$ F/m per il tessuto biologico e $\varepsilon_1 \approx 10^{-11}$ per l'aria, fornisce la seguente approssimazione:

$$E_{n1} \cong \frac{\sigma_2}{j\omega\varepsilon_1} E_{n2} = -j3,1 \cdot 10^7 E_{n2} \quad \text{Eq. II-8}$$

Questo risultato, insieme alle equazioni (1) e (3), mostra che anche in questo caso il campo in aria deve essere praticamente perpendicolare alla superficie di separazione: $\text{tg}\theta_1 \approx 3,1 \cdot 10^7 \text{tg}\theta_2$. Il tessuto biologico è, quindi, ancora in grado di schermare in maniera efficace il campo elettrico esterno. [II-3].

Si può quindi affermare che tale materiale (il tessuto biologico) distorce il campo elettrico nelle sue vicinanze in modo tale che il campo esterno risulta quasi perpendicolare alla superficie di separazione con l'aria. Quindi il campo totale interno al tessuto può essere considerato pari alla sola componente normale. In tal modo, con i valori tipici dei parametri sopra menzionati, per il caso statico e per la frequenza di 50 Hz sono valide rispettivamente le seguenti relazioni, da intendersi come rapporto tra le intensità dei vettori corrispondenti:

$$\frac{E_{\text{interno}}}{E_{\text{esterno}}} \approx 10^{-12} \quad \text{Eq. II-9}$$

$$\frac{E_{\text{interno}}}{E_{\text{esterno}}} \approx \pi 10^{-8} \quad \text{Eq. II-10}$$

Tali risultati assumono espressioni leggermente diverse qualora la superficie di separazione tra aria e tessuto biologico non è più piana ed infinita [II-1].

Nella Tabella II-1 vengono riportati i valori della conducibilità per alcune parti del corpo

umano.

<i>Regione</i>	<i>Conducibilità elettrica (S/m)</i>
Volume globale	0,1
Cuore	0,7
Cervello	0,7
Intestino	0,03
Polmoni	0,1
Fegato	0,1

Tabella II-1 Valori della conducibilità per alcune parti del corpo umano

Per quanto riguarda invece il campo magnetico interno al tessuto biologico, esso risulta, sia nel caso statico sia nel caso di variabilità temporale con frequenza appartenente alle ELF, uguale al campo esterno, in quanto la permeabilità di molti di tali tessuti è praticamente uguale alla permeabilità magnetica μ_0 dello spazio libero. Dunque dal punto di vista magnetico non vi è discontinuità tra i due mezzi.

Si veda ora cosa succede per frequenze sopra le ELF. All'aumentare della frequenza la costante dielettrica dei tessuti biologici, ϵ_2 , decresce rapidamente a causa delle diverse modalità di polarizzazione di tali materiali [II-3] e il campo esterno non è più necessariamente perpendicolare alla superficie del tessuto biologico, come mostra la Figura II-2, nella quale è riportato, al variare della frequenza, l'andamento decrescente del rapporto $tg\theta_1/tg\theta_2$ [II-1]. Inoltre, quando la lunghezza d'onda assume valori dello stesso ordine di grandezza delle dimensioni tipiche di esseri umani e/o animali (20 MHz), bisogna considerare la presenza delle onde e la loro propagazione. Inoltre, è necessario sottolineare che in corrispondenza di tali frequenze diviene importante il fenomeno noto come effetto pelle, che limita la penetrazione del campo esterno. La propagazione delle onde elettromagnetiche nei mezzi biologici è governata dalla costante dielettrica, dalla conducibilità, dalla configurazione della sorgente e da fattori geometrici che descrivono la struttura del tessuto. Quando il raggio di curvatura della superficie del corpo è grande rispetto alla lunghezza d'onda e alla larghezza del fascio della radiazione incidente, possono essere usati modelli di tessuto planari per stimare l'energia assorbita e la sua distribuzione all'interno del corpo. Tale energia altrimenti, sarà imposta dalla dimensione del corpo, dalla curvatura della sua superficie, dal rapporto tra le dimensioni del corpo e la lunghezza

d'onda e dalle caratteristiche della sorgente.[II-1]. Sotto tale ipotesi di tessuto biologico occupante uno spazio semi-indefinito delimitato appunto da una superficie piana di separazione, un'onda elettromagnetica piana e uniforme incidente tale superficie viene riflessa per soddisfare le condizioni al contorno (Eq. II-1 e Eq. II-6 e relazioni simili per il campo magnetico) e la parte trasmessa subisce attenuazione a causa degli effetti dissipativi, essendo il tessuto biologico un mezzo con perdite.

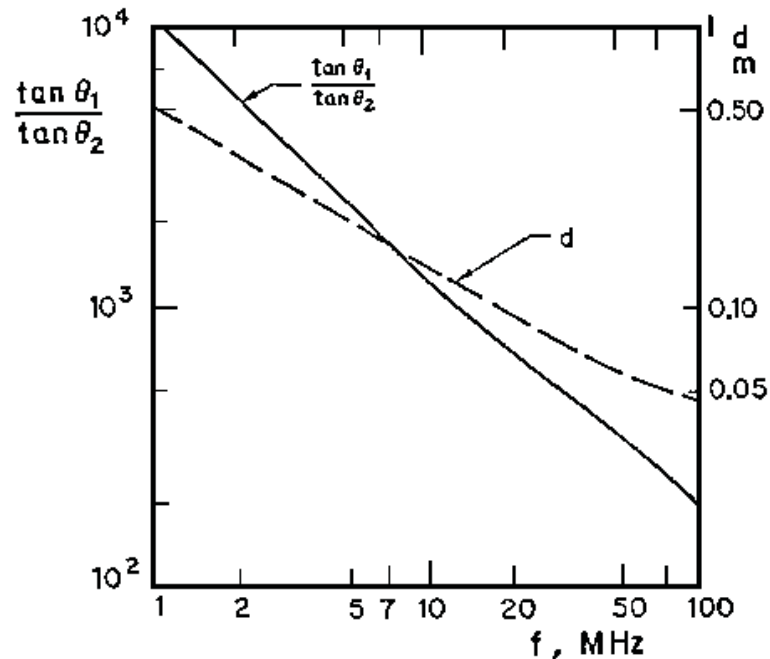


Figura II-2 Orientazione delle componenti del campo E alla superficie di separazione aria-muscolo (o rapporto delle componenti normali dei campi alla superficie; profondità (d) alla quale la componente del campo parallela alla superficie decresce del 50% circa ($d=0.693d$)).

Senza perdere di generalità, si può supporre, inoltre, che l'onda incidente sia polarizzata linearmente. Infatti, come già accennato nel capitolo precedente, la più generica polarizzazione del campo, che è ellittica, può essere sempre scomposta nella sovrapposizione di due onde polarizzate linearmente. Facendo allora riferimento alla Figura II-3 che rappresenta il caso di un'onda polarizzata linearmente lungo l'asse x , proveniente dal mezzo indicato con 1, fino ad ora considerato aria, e incidente ortogonalmente la superficie di separazione con il tessuto biologico, è possibile scrivere le espressioni del campo elettrico e magnetico dell'onda piana uniforme che si propaga nel verso positivo

delle z nel modo seguente [II-4]:

$$\vec{E}^i(z) = \vec{E}_0^i e^{-j\vec{k}^i \cdot \vec{r}} = E_0^i \hat{e}_0^i e^{-jk_1 z} = E_0^i \hat{x}_0^i e^{-jk_1 z} \quad \text{Eq. II-11}$$

$$\vec{H}^i(z) = \vec{H}_0^i e^{-j\vec{k}^i \cdot \vec{r}} = H_0^i \hat{h}_0^i e^{-jk_1 z} = H_0^i \hat{y}_0^i e^{-jk_1 z} \quad \text{Eq. II-12}$$

dove $\vec{k}^i = k_1 \hat{\beta}_0^i$ rappresenta il vettore di propagazione dell'onda nel mezzo 1, la cui ampiezza, se il mezzo presenta perdite, risulta essere una quantità complessa pari a $k_1 = \omega \sqrt{\mu_1 \left(\varepsilon_1 - j \frac{\sigma_1}{\omega} \right)}$. Nel caso che si sta considerando, ovvero quello dell'aria l'ampiezza di tale vettore è reale e pari a $k_1 = \omega \sqrt{\mu_1 \varepsilon_1} = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$.

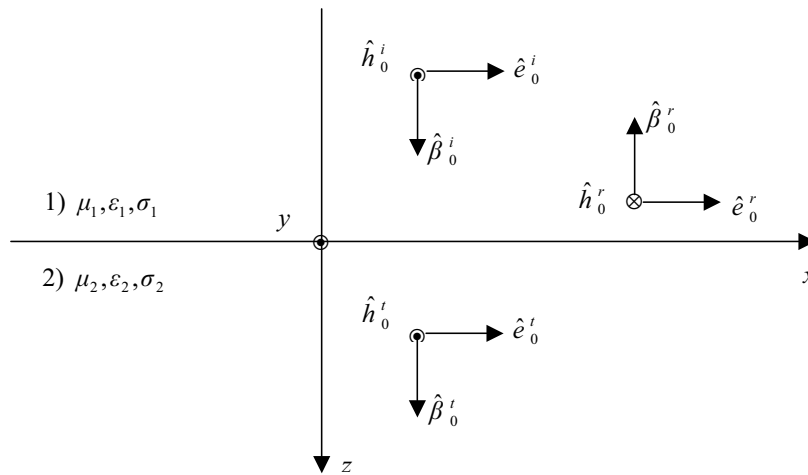


Figura II-3 Polarizzazione dell'onda incidente, riflessa e trasmessa nel caso di incidenza ortogonale

Applicando le condizioni di continuità del campo elettrico e magnetico tangenziali sulla superficie, si dimostra che anche le onde riflesse e trasmesse sono piane e uniformi e dunque assumono espressioni analitiche analoghe a quelle dell'onda incidente. In Figura II-3 sono mostrati, con ovvio significato dei simboli, i vettori che indicano le direzioni di propagazione dell'onda trasmessa e riflessa, $\hat{\beta}_0^t$ e $\hat{\beta}_0^r$ rispettivamente, e le direzioni di polarizzazione dei campi elettrici e magnetici

trasmessi e riflessi. Per questa particolare situazione di incidenza, il coefficiente di riflessione, definito dal rapporto delle ampiezze (complesse) del campo elettrico dell'onda riflessa e di quello dell'onda incidente, e il coefficiente di trasmissione, definito dal rapporto tra le ampiezze (complesse) del campo elettrico dell'onda trasmessa e di quello dell'onda incidente, assumono rispettivamente le seguenti espressioni:

$$\Gamma = \frac{E_0^r}{E_0^i} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad \text{Eq. II-13}$$

e

$$T = \frac{E_0^t}{E_0^i} = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} = 1 + \Gamma \quad \text{Eq. II-14}$$

dove E_0^i , E_0^r ed E_0^t rappresentano rispettivamente le ampiezze (complesse) del campo elettrico dell'onda incidente, riflessa e trasmessa.

dove η_1 e η_2 sono l'impedenza caratteristica del mezzo 1 e 2 rispettivamente. Tale grandezza, definita nel capitolo 1 come rapporto tra l'ampiezza del campo elettrico e quella del campo magnetico di un'onda piana che si propaga in un mezzo, può essere scritta ulteriormente nel modo seguente:

$$\eta = \left(\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon} \right)^{1/2} \quad \text{Eq. II-15}$$

Si deduce quindi che Γ e T sono in generale quantità complesse, anche quando il mezzo 1 è l'aria, per la quale η si riduce alla quantità reale $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$, poiché il mezzo 2 che si sta supponendo essere tessuto biologico, alle radiofrequenze possiede solitamente un'impedenza caratteristica complessa.

La Tabella II-2 riporta l'ampiezza del coefficiente di riflessione alla superficie di separazione tra vari tessuti biologici.

	Freq. (MHz)	Aria	Grasso (osso)	Polmone	Muscolo (pelle)	Sangue	Soluz. salina
Aria	433	0	46	76	82	81	83
	915	0	43	73	78	79	80
	2450	0	41	71	76	77	79
	5800	0	39	70	75	76	78
	10000	0	37	70	74	76	78
Grasso (osso)	433		0	46	56	56	60
	915		0	43	52	54	57
	2450		0	42	50	53	57
	5800		0	42	50	53	56
	10000		0	45	52	54	58
Polmone	433			0	14	13	19
	915			0	12	14	18
	2450			0	10	15	19
	5800			0	10	14	19
	10000			0	10	13	18
Muscolo (pelle)	433				0	4	6
	915				0	4	7
	2450				0	5	10
	5800				0	4	9
	10000				0	3	9
Sangue	433					0	6
	915					0	4
	2450					0	5
	5800					0	5
	10000					0	6
Soluz. salina	433						0
	915						0
	2450						0
	5800						0
	10000						0

Tabella II-2 -Coefficiente di riflessione (valore percentuale) tra tessuti biologici a 37° C.

Le densità della potenza incidente e della potenza riflessa, considerate a ridosso dell'interfaccia (precisazione questa superflua se in entrambi i semi-spazi il mezzo che li riempie è senza perdite), sono rispettivamente [II-5]:

$$W_i = \operatorname{Re} \left(\frac{1}{\eta_i^*} \right) \frac{|E_0^i|^2}{2} \quad \text{Eq. II-16}$$

$$W_r = \operatorname{Re} \left(\frac{1}{\eta_i^*} \right) \frac{|E_0^r|^2}{2} \quad \text{Eq. II-17}$$

Si può quindi definire il coefficiente di riflessione della potenza come il seguente rapporto:

$$\frac{W_i}{W_r} = \frac{|E_0^r|^2}{|E_0^i|^2} = |\Gamma|^2 \quad \text{Eq. II-18}$$

Se η_1 è reale si verifica che la densità della potenza entrante nell'interfaccia è uguale a $W_i - W_r$. Pertanto la densità di potenza trasmessa attraverso l'interfaccia è $W_t = W_i - W_r$ e si ha per il coefficiente di trasmissione della potenza la seguente espressione:

$$\frac{W_t}{W_i} = 1 - |\Gamma|^2 \quad \text{Eq. II-19}$$

In Figura II-4 è riportato l'andamento del coefficiente di trasmissione T nell'intervallo di frequenza 1÷100 MHz per l'interfaccia aria-muscolo. Dai valori che tale coefficiente assume si deduce che l'ampiezza del campo elettrico trasmesso nel tessuto muscolare è considerevolmente più piccola rispetto a quella del campo elettrico proveniente dal mezzo 1, ovvero dall'aria.

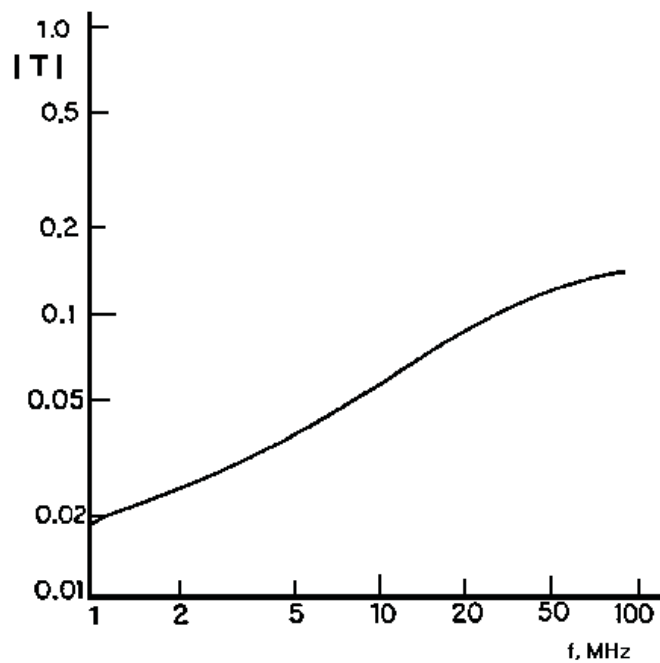


Figura II-4 Ampiezza del coefficiente di trasmissione T per campo incidente \vec{E}^i polarizzato parallelamente alla superficie di separazione. $T = E_0^t / E_0^i$; coefficiente di riflessione $\Gamma = E_0^r / E_0^i = T - 1$.

In Figura II-5 è mostrata la frazione della potenza totale incidente che viene trasmessa sempre all'interno di un tessuto muscolare. L'andamento crescente evidenzia che la perdita per riflessione all'interfaccia decresce con la frequenza.

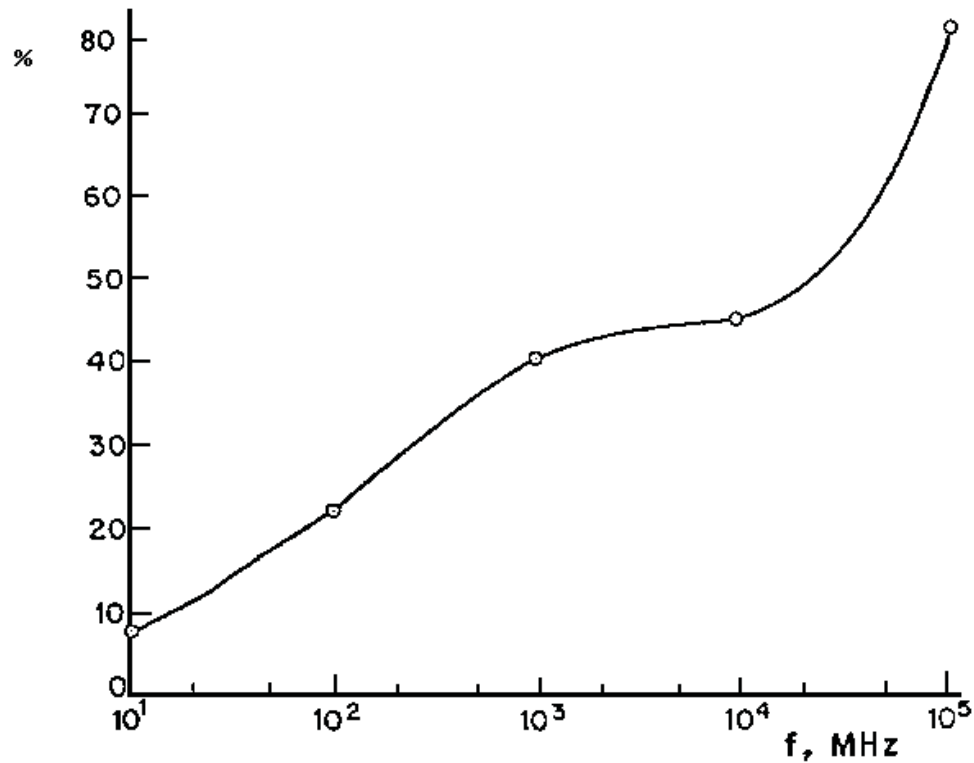


Figura II-5 Rapporto tra potenza trasmessa e potenza incidente espresso come percentuale della potenza incidente. Interfaccia aria-muscolo, incidenza perpendicolare (equazione 19).

Tuttavia, per un tessuto situato più internamente questo effetto è controbilanciato dall'effetto pelle. Infatti, essendo il materiale biologico un mezzo con perdite, parte dell'energia viene assorbita. L'onda che si trasmette non è uniforme e l'ampiezza del campo, sia elettrico sia magnetico, decresce esponenzialmente all'aumentare della distanza dalla superficie di separazione con una legge che può essere espressa nel seguente modo:

$$g(z) = Ae^{-\frac{z}{\delta}} \quad \text{Eq. II-20}$$

dove $g(z)$ rappresenta appunto l'ampiezza del campo alla distanza z dalla superficie e A rappresenta l'ampiezza del campo appena all'interno del tessuto biologico che, a causa della riflessione, assume valori molto inferiori rispetto ai valori dell'ampiezza del campo incidente.

Da tale equazione è possibile definire la profondità di penetrazione, o profondità di pelle δ , come la distanza alla quale il campo risulta pari a $1/e (= 0,368)$ del valore che assume appena all'interno del tessuto.

L'espressione seguente di δ è quella che si ottiene quando la superficie di separazione tra due mezzi infiniti è piana. Tuttavia essa può essere ragionevolmente applicata nel caso di strutture cilindriche sotto la condizione che il rapporto tra il raggio di curvatura e la profondità di pelle (r_0/δ) sia maggiore di cinque. Per un buon conduttore ($\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \approx 1$) tale espressione è:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad \text{Eq. II-21}$$

Poiché per un tessuto biologico il rapporto $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$ è compreso tra 0,1 e 10 su un intervallo di frequenza molto ampio, è necessario fornire per la profondità di penetrazione un'espressione più accurata:

$$\delta = \frac{1}{\omega \left[\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} - 1 \right) \right]^{1/2}} \quad \text{Eq. II-22}$$

La diminuzione dell'intensità del campo con la distanza dalla superficie di separazione indicata dall' Eq. II-23, diventa significativa per molti tessuti biologici alle frequenze ove $r_0/\delta > 5$ non è soddisfatta. Tuttavia, l'errore risultante dall'uso delle equazioni II-20 II-21 o II-22 con oggetti curvi è minore quando $z < \delta$; così per $z = 0,693\delta$, il valore corretto di $g(z)$, ottenuto risolvendo l'equazione delle onde in coordinate cilindriche, differisce dal valore che si ottiene utilizzando l'equazione 20 ($g(z) = 0,5A$) solo del 20% anche quando r_0/δ è molto piccolo. Per tale motivo spesso si riporta al

variare della frequenza l'andamento della distanza $d=0,693\delta$, invece che δ , alla quale il campo decresce fino a metà del valore che assume appena all'interno del tessuto. La Figura II-2 mostra infatti i valori che tale grandezza assume sull'intervallo di frequenza 1÷100 MHz per un tessuto muscolare ottenuti utilizzando l'equazione II-22 con i valori di σ ed ε tipici di tale tipologia di tessuto. E' evidente che l'effetto pelle diventa significativo per gli uomini ed i vertebrati più grandi a frequenze >10 MHz. Ad analoga conclusione si giunge osservando inoltre l'andamento della profondità di penetrazione (*Depth of penetration D.O.P.*, δ) per diversi tessuti riportati nella figura seguente (bisogna osservare che sull'asse delle ordinate è riportato il $\log(\delta)$).

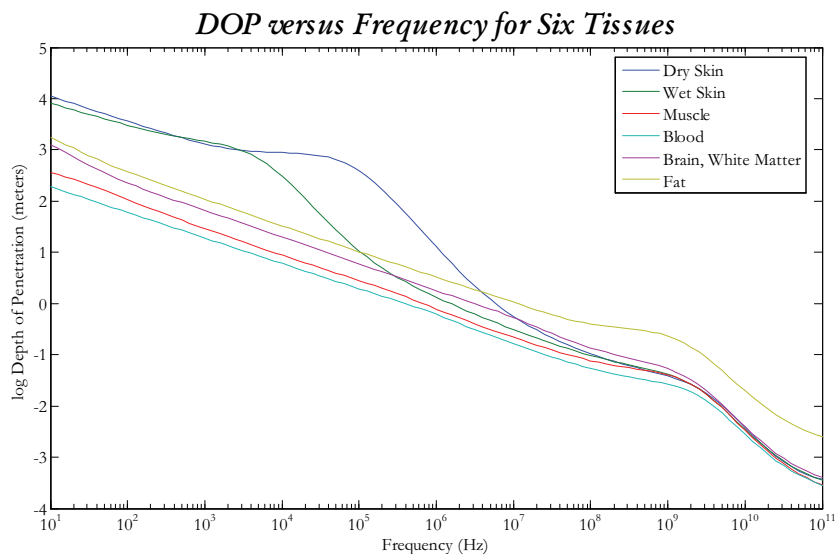


Figura II-6 Andamento del logaritmo della profondità di penetrazione al variare della frequenza per diversi tessuti biologici (blu: pelle secca, verde scuro: pelle umida, rosso: muscolo; celeste: sangue; viola: cervello; verde chiaro: grasso)

Il fatto che la profondità di penetrazione decresce con la frequenza, compensa la diminuzione di riflessione e di conseguenza la potenza totale, penetrante entro la superficie, decresce rapidamente.

Oltre alla riflessione sulla superficie di separazione aria-tessuto, ulteriori riflessioni hanno luogo ad ogni discontinuità tra materiali diversi. Possono verificarsi, infatti, riflessioni multiple tra la pelle e gli strati di tessuto sottocutanei, con una conseguente modifica dei coefficienti di riflessione e di trasmissione. In Tabella II-3 è mostrata l'ampiezza del coefficiente di riflessione sulla superficie di

separazione tra muscolo e materiali organici con basso contenuto d'acqua, tipo grasso od osso.

Freq. (MHz)	σ	ϵ_r	$\sigma/\omega\epsilon_0\epsilon_r=p$
1	0.40	2000	3.6
10	0.63	160	7.1
100	0.89	72	2.2
10^3	1.65	50	0.59
10^4	10.3	40	0.46
10^5	80	6	2.4

Tabella II-3 Ampiezza del coefficiente di riflessione e trasmissione

La situazione è nella realtà più complicata poiché l'onda, che fino ad ora si è supposta incidere in modo ortogonale alla superficie di separazione, in generale ha una direzione di propagazione che forma un angolo non nullo con la normale alla superficie stessa. Inoltre, bisogna considerare un'onda con una polarizzazione generica e quindi è necessario scomporla nelle due componenti aventi polarizzazione parallela e ortogonale alla superficie. Tale decomposizione è indicata nelle figure seguenti dove con il pedice h si considera la polarizzazione orizzontale (campo elettrico con polarizzazione parallela alla superficie) e con quello v la polarizzazione verticale (campo magnetico polarizzato parallelamente alla superficie).

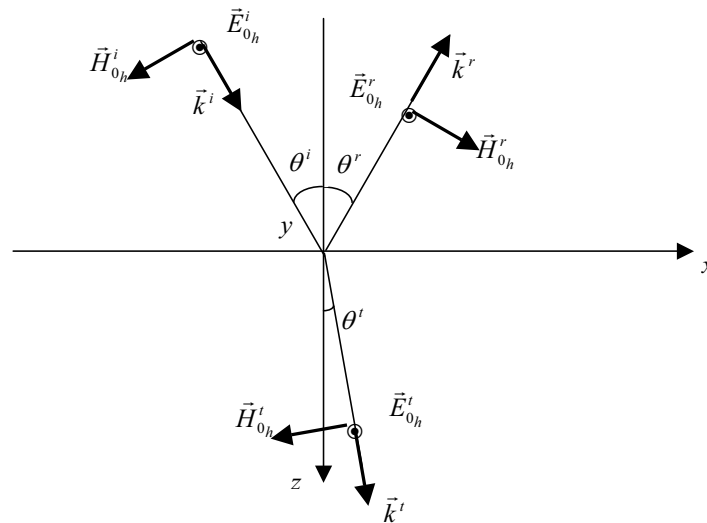


Figura II-7 Polarizzazione orizzontale

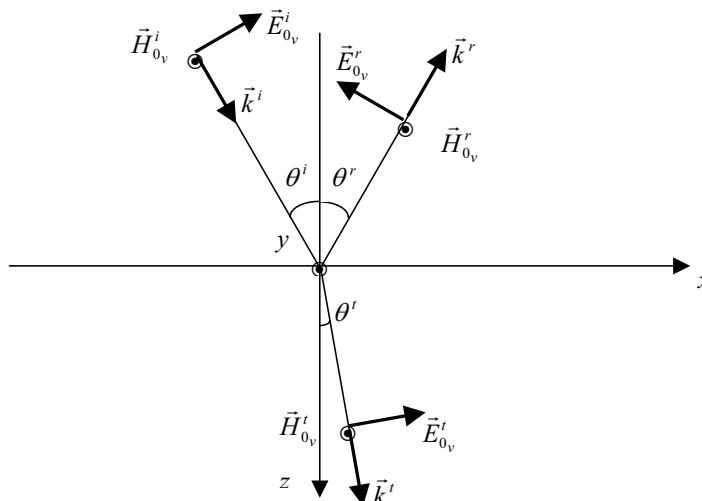


Figura II-8 Polarizzazione verticale

I coefficienti di trasmissione e di riflessione assumono espressioni diverse per i due tipi di polarizzazione e divengono anche funzioni dell'angolo di incidenza.

II.3 Effetto biologico e danno

Nella letteratura protezionistica in generale e in quella riferita alle radiazioni non ionizzanti (NIR) in particolare, si riscontra spesso un uso improprio dei termini interazione, effetto biologico e danno, improprietà che sembrano riflettere un certo grado di confusione concettuale. È, pertanto, opportuno chiarire che:

a) quando un organismo interagisce con un campo elettromagnetico, il suo equilibrio elettrico viene sicuramente perturbato, senza che ciò si traduca automaticamente in un effetto biologico apprezzabile e tanto meno in un danno;

b) per poter parlare di effetto biologico si deve essere in presenza di variazioni morfologiche e/o funzionali a carico di strutture di livello superiore in senso organizzativo. Per inciso, le informazioni che si ottengono con studi sui sistemi molecolari sono utili per la conoscenza dei meccanismi di interazione o patogenetici ma non autorizzano estrapolazioni ai livelli organizzativi più complessi come

tessuti, organi, sistemi ed organismi;

c) il verificarsi di un effetto biologico non significa necessariamente la produzione di un danno alla salute. Infatti, per poter parlare di danno occorre che l'effetto 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, così come l'organismo risente di altre condizioni ambientali quali la temperatura, l'umidità, la presenza di altre nocività, etc. Si tenga, inoltre, presente che un determinato effetto su una certa struttura può indurre effetti secondari o indiretti, apparentemente sconnessi dall'effetto primario, tanto che non è infrequente il verificarsi di un periodo di latenza. Infine, l'ambiente esterno con le sue molteplici e polimorfe sorgenti di nocività influisce negativamente sull'organismo anche quando una per una non raggiungono la soglia di danno.

Le differenze tra effetti biologici ed effetti dannosi si riflettono anche sulla scelta del criterio di determinazione degli standard di sicurezza (scelta di una soglia fenomenologica o di una soglia patologica).

II.4 Effetti dei campi a radio frequenza (RF)

Per quanto riguarda i campi a radio frequenza (300 Hz – 300 GHz) pur non provocando ionizzazione sono però in grado di produrre effetti sui sistemi biologici che sono essenzialmente riscaldamento e induzione di correnti elettriche, e dipendono dalla frequenza e dalla intensità. Si riassume quanto segue [6]:

- Per frequenze al di sopra di 10 GHz pochissima energia penetra nei tessuti, come visto nel paragrafo II-2. La grandezza dosimetrica fondamentale per i campi RF al di sopra di 10 GHz è l'intensità del campo, misurata come densità di potenza in watt al metro quadro (W/m^2) o, nel caso di campi deboli, in milliwatt al metro quadro (mW/m^2) o in microwatt al metro quadro ($\mu W/m^2$). Affinché si verificino effetti di danno alla salute, come cataratte oculari e ustioni della pelle, per effetto dell'esposizione a campi RF al di sopra di 10 GHz, occorrono densità di potenza superiori a $1000 W/m^2$. Questi livelli non si riscontrano nella vita quotidiana. Essi esistono invece nelle immediate vicinanze di radar di potenza. Le attuali normative di esposizione impediscono la presenza dell'uomo in queste aree.

-
- Per frequenze tra 1 MHz e 10 GHz i campi, come visto, penetrano nei tessuti e producono calore a seguito dell'assorbimento di energia in questi tessuti. La profondità di penetrazione dei campi RF nel tessuto dipende dalla frequenza del campo ed è maggiore alle frequenze più basse. La grandezza dosimetrica fondamentale a queste frequenze è il SAR (vedi paragrafo I-8) entro una data massa di tessuto. Occorre un SAR di almeno 4 W/kg per produrre effetti nocivi per la salute, come cataratte oculari e ustioni della pelle, in persone esposte a campi RF entro questo intervallo di frequenza.
 - La maggior parte degli effetti nocivi che possono verificarsi a seguito di esposizioni possono essere spiegati come risposta ad un riscaldamento indotto, che a sua volta dà luogo ad un aumento della temperatura dei tessuti o del corpo superiore a $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il riscaldamento indotto nei tessuti corporei può provocare varie risposte fisiologiche e risposte legate alla termoregolazione, compresa una ridotta capacità di svolgere attività mentali o fisiche quando la temperatura del corpo aumenta. Effetti del genere sono stati segnalati in persone soggette a stress termici, come, ad esempio, persone che lavoravano in ambienti surriscaldati o che soffrivano di una febbre prolungata. Il riscaldamento indotto può influenzare lo sviluppo fetale. Difetti alla nascita possono verificarsi soltanto se la temperatura del feto aumenta per ore di $2\text{-}3\text{ }^{\circ}\text{C}$ all'ora. Il riscaldamento indotto può anche influenzare la fertilità maschile e portare all'induzione di opacità oculari (cataratta). E' importante sottolineare che la maggior parte degli studi condotti a frequenze superiori a 1 MHz hanno analizzato i risultati di esposizioni acute ad alti livelli di campi RF, cioè ad esposizioni che non si riscontrano nella vita quotidiana.
 - Per frequenze al di sotto di 1 MHz i campi non producono riscaldamento significativo. Essi inducono piuttosto correnti e campi elettrici nei tessuti, misurati in termini di densità di corrente, in ampere al metro quadro (A/m^2), che è la grandezza dosimetrica fondamentale per campi di frequenza inferiore a circa 1 MHz. Le numerose reazioni chimiche implicate nei processi vitali sono associate a normali correnti "di fondo" di circa $10\text{ mA}/\text{m}^2$. Densità di corrente indotta al di sopra di almeno $100\text{ mA}/\text{m}^2$ possono interferire con il normale funzionamento del corpo e provocare contrazioni muscolari involontarie.

Sono stati rilevati altri effetti di tipo non termico per esposizioni a livelli bassi di campi. Ad esempio alcuni studi segnalano l'alterazione della attività elettrica cerebrale nei gatti e nei

conigli, attraverso variazioni di mobilità degli ioni calcio. Questo effetto è stato segnalato anche in tessuti e cellule isolati. Altri studi hanno suggerito che l'esposizione a campi di bassa intensità modifichino il tasso di proliferazione delle cellule, alterino l'attività enzimatica, o agiscano sui geni del DNA delle cellule. Tuttavia, questi effetti non sono ben accertati e le loro implicazioni per la salute umana non sono comprese abbastanza bene. E' necessario quindi colmare questo vuoto conoscitivo.

Alcuni studi hanno poi destato preoccupazione circa un aumento del rischio di cancro legato alla esposizione a radio frequenza soprattutto legato all'uso dei cellulari. A tale proposito le attuali evidenze scientifiche indicano come improbabile che i campi a radiofrequenza inducano o promuovano tumori, e studi mirati sui cellulari e stazioni radio base confermano questo.

Diversi studi su animali esposti a campi a radiofrequenza simili a quelli emessi dai telefoni cellulari non hanno trovato nessuna evidenza di induzione o promozione di tumori cerebrali. Nel 1997 uno studio ha indicato che i campi a radiofrequenza accrescevano il tasso di sviluppo di linfomi in ratti geneticamente modificati, ma le implicazioni sanitarie di questo studio non sono ancora chiare. Sono in corso diverse ricerche per confermare questi risultati e stabilire se abbiano rilevanza per il cancro nell'uomo.

Tre studi epidemiologici recentemente conclusi non hanno trovato nessuna evidenza convincente di aumenti del rischio di insorgenza di cancro o di alcuna altra malattia, in relazione all'uso di telefoni cellulari.

Infine c'è però da dire che dispositivi elettronici di uso comune, come i telefoni mobili, e molti altri, possono provocare interferenze elettromagnetiche in altri apparati elettrici. Si deve quindi esercitare cautela quando si usano telefoni mobili in prossimità di dispositivi elettromedicali sensibili, utilizzati in unità ospedaliere di terapia intensiva. I telefoni mobili possono, in rari casi, provocare interferenze anche in certi altri apparati medicali, come i pacemaker cardiaci e gli apparecchi acustici. Quindi riepilogando si può dire che: l'esposizione a campi RF può causare riscaldamento o indurre correnti elettriche nei tessuti corporei. Il riscaldamento costituisce la principale interazione dei campi RF ad alta frequenza al di sopra di circa 1 MHz. Al di sotto di circa 1 MHz, l'azione dominante dell'esposizione a RF è l'induzione

di correnti elettriche nel corpo. Una revisione dei dati scientifici svolta dall'OMS nell'ambito del Progetto internazionale campi (Monaco, Novembre 1996) ha concluso che, sulla base della letteratura attuale, non c'è nessuna evidenza convincente che l'esposizione a RF abbrevi la durata della vita umana, né che induca o favorisca il cancro, ma ha anche evidenziato che sono necessari ulteriori studi, per delineare un quadro più completo dei rischi sanitari, specialmente per quanto concerne un possibile rischio di cancro connesso all'esposizione a bassi livelli di campi RF.

II.5 Effetti alle ELF

Il modo in cui i campi ELF interagiscono con i tessuti viventi è l'induzione, nei tessuti stessi di campi elettrici e magnetici (paragrafo II.2), e quindi di correnti indotte. Questo è l'unico meccanismo di azione accertato per questi campi [7]. Comunque, l'intensità delle correnti indotte dai campi ELF ai livelli comunemente riscontrati nel nostro ambiente è di solito molto inferiore alle massime correnti che si sviluppano naturalmente nel corpo. A tal proposito [II-8], circa eventuali effetti biologici causati da correnti indotte si riassume che:

- Le correnti endogene nel corpo arrivano tipicamente fino a 10mA/m^2 , anche se, durante certe funzioni, le stesse possono essere anche molto più alte.
- Tra 1 e 10mA/m^2 sono riportati solo effetti biologici di scarsa entità.
- Tra 10 e 100mA/m^2 effetti visivi (magnetofosfene) e possibili effetti sul sistema nervoso, facilitazione nella mobilitazione degli ioni calcio per la ricostruzione ossea di fratture
- Tra 100 e 1000mA/m^2 cambiamenti nel sistema nervoso centrale, soglie di stimolazione cellulare e possibili rischi per il cuore
- Sopra 1000mA/m^2 extrasistole, possibile fibrillazione ventricolare e pericolosi effetti per il cuore

In Figura II-9 è possibile vedere i valori di soglia del campo magnetico sinusoidale per alcuni effetti biologici.

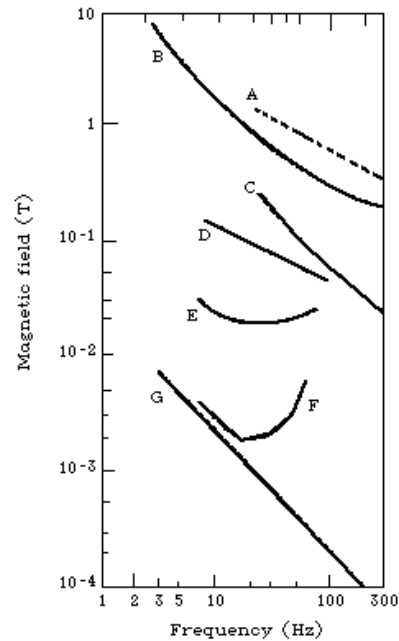


Figura II-9 Valori soglia per campo magnetico sinusoidale per differenti effetti biologici

In dettaglio le curve indicano

- A Soglia per stimolare la fibrillazione cardiaca
- B Soglia per la stimolazione extrasistolica con uno stimolo di durata >1s
- C Soglie di stimolazione di cellule eccitabili per produrre i cambiamenti di membrana di cellule singole
- D Soglie per effetti sui potenziali evocati in uomini
- E Soglie per avere magnetofosfeni
- F magnetofosfeni in 10 % volontari
- G Questa indica le densità di corrente calcolate per una sfera di raggio 6-7,5 cm e conduttività 0.2 S/m usata come modello per cuore e testa. Questa curva sta ad indicare i livelli delle attività elettriche di cuore e cervello

Limitando a non più di 10 mA/m² la densità delle correnti indotte nella testa e nel tronco da un'esposizione continua a campi elettrici e magnetici a 50/60 Hz, si dovrebbe garantire una sicurezza di

esposizione Per indurre nella parte superiore del corpo umano una densità di corrente media di 10 mA/m² a 50 Hz occorrerebbe un campo elettrico di circa 25 kV/m o un campo magnetico di circa 5 mT.

Nel 1979 è stato pubblicato uno studio epidemiologico che presentava un aumento della incidenza di tumore infantile, leucemia, in bambini residenti vicino ad elettrodotti. Questo studio ha fatto sorgere preoccupazione circa il fatto che i campi alle frequenze industriali possano provocare il tumore. A tal proposito nel giugno del 2001 l’Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC)¹, un’istituzione specialistica dell’OMS, ha completato il primo stadio del processo di valutazione dei rischi sanitari, in base al grado di evidenza scientifica, classificando i campi ELF come possibilmente cancerogeni per l’uomo [II-9], in Tabella II-4 è riportata tale classificazione. Dall’analisi dei dati aggregati di diversi studi ben condotti è emersa un’associazione statistica piuttosto coerente tra un raddoppio del rischio di leucemia infantile e campi magnetici a frequenza industriale (50 o 60 Hz) in ambienti residenziali (50 o 60 HZ), di intensità superiore a 0.4 microtesla. Nonostante la gran mole di dati, rimane ancora incerto se l’aumento dell’incidenza di leucemie sia dovuto esclusivamente all’esposizione ai campi magnetici o a qualche altro fattore ed i campi siano corresponsabili.

Campi magnetici ELF	possibili cancerogeni per l’uomo (Gruppo 2B)
Campi elettrici ELF	non sono classificabili in relazione alla loro cancerogenicità nell’uomo (Gruppo 3)
Campi elettrici e magnetici statici	non sono classificabili in relazione alla loro cancerogenicità nell’uomo (Gruppo 3)

Tabella II-4 : Classificazione IARC (Monografia 80 - 2002) delle EMF

¹ Si veda Appendice 3

II.6 Bibliografia

- [II-1] C. Polk, E. Postow, *Handbook of biological effects of electromagnetic fields*, CRC Press, 1986.
- [II-2] J. A., *Electromagnetic Theory*, McGraw-Hill, New York, 1941.
- [II-3] M. D'Amore, *Compatibilità Elettromagnetica*, Siderea, Roma, 2003.
- [II-4] G. Gerosa, L. Lampariello, *Lezioni di campi elettromagnetici*, Edizioni Ingegneria 2000, Roma, 1995.
- [II-5] G. Conciauro, *Introduzione alle onde elettromagnetiche*, McGraw-Hill, Milano, 1993.
- [II-6] WHO (World Health Organization), *Campi a frequenza estremamente bassa e cancro*, Promemoria n. 263 sui CAMPI ELETTROMAGNETICI E SALUTE PUBBLICA, Ottobre 2001
- [II-7] WHO (World Health Organization), *Effetti sanitari dei campi a radiofrequenza*, Promemoria n. 183 sui CAMPI ELETTROMAGNETICI E SALUTE PUBBLICA, revisione Maggio 1998
- [II-8] WHO (World Health Organization), *Environmental health criteria 69: Magnetic fields*. Geneva 1987
- [II-9] IARC (International Agency for Research on Cancer), *IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: Non-Ionizing Radiation. Part. 1: Static and Extremely Low Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields*. Vol. 80. Lyon, 2002.

III Sorgenti di campo elettrico, magnetico, elettromagnetico

III.1 Introduzione

Nel parlare di tecniche di riduzione delle emissioni di campo non si può non considerare le sorgenti che generano tali campi. In particolare le sorgenti di **campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici** sono numerose e come detto nella prefazione sia di origine “**naturale**” che “**artificiale**”. Le prime sono da ricondursi, prevalentemente, a fenomeni di origine cosmica (tempeste elettromagnetiche collegate all'attività solare), atmosferica (fenomeni temporaleschi) e geologica (campo magnetico terrestre e sue anomalie). Le seconde riguardano, invece, tutte quelle apparecchiature prodotte dall'uomo che emettono i suddetti campi. In questo documento saranno trattate ovviamente, questo secondo tipo suddividendole in sorgenti di campo a bassa frequenza (50 Hz) e sorgenti di campo ad alta frequenza (100 kHz a 300 GHz) in accordo con la suddivisione in frequenze utilizzata dai decreti legge n. 199 del 28/8/2003 e n. 200 del 29/8/2003. Inoltre poiché tali sorgenti sono numerose la descrizione sarà rivolta a quelle che più comunemente possono incontrarsi. Per quanto riguarda la bassa frequenza si considereranno le linee elettriche, le cabine di trasformazione e sarà fatto un riferimento anche alle apparecchiature elettriche che utilizzano la corrente di rete (50 Hz). Per quanto riguarda l'alta frequenza, dato l'elevato numero di sorgenti, si limiterà la trattazione a quelle per telecomunicazioni.

III.2 Sorgenti in bassa frequenza

III.2.1 Linee elettriche e cabine di trasformazione

L'energia elettrica generata negli impianti di produzione (centrali) viene trasmessa lungo linee elettriche aeree o cavi interrati e distribuita presso le singole utenze. Queste linee hanno incontrato, da parte dell'opinione pubblica, una crescente opposizione per motivi di tipo estetico ed ambientale; successivamente, si è aggiunto il possibile effetto sulla salute causato dall'esposizione delle persone ai campi elettromagnetici. Peraltro la fascia di servitù del terreno, associata alle linee, costituisce un'ulteriore difficoltà per la costruzione e la gestione del sistema.

Al fine di ridurre le perdite di potenza, l'energia elettrica viene trasmessa con una tensione di esercizio pari a 220 o 380 kV, corrispondenti all'altissima tensione (AAT). Le stazioni primarie abbassano l'altissima tensione a livelli compresi tra 132 e 150 kV, relativi questi ultimi all'alta tensione

(AT); le grandi utenze (grandi fabbriche, poli industriali, raffinerie, ecc.) si allacciano generalmente all'alta tensione, poiché sono caratterizzate da assorbimenti di potenza elevati. La distribuzione dell'energia elettrica avviene, invece, in media tensione (MT) e in bassa tensione (BT). Le cabine primarie AT/MT, infatti, svolgono la funzione di abbassare la tensione di esercizio dall'alta tensione a valori compresi tra 15 e 20 kV; le cabine secondarie MT/BT, a loro volta, abbassano la tensione di esercizio dalla media alla bassa tensione, ovvero la familiare 230/400 V delle utenze domestiche e similari. Le utenze comprendenti il settore del terziario e della piccola e media industria, sono allocate alla media tensione; le utenze domestiche, invece, in virtù della modesta potenza richiesta, sono allacciate alla bassa tensione. La Figura III-1 mostra la rete elettrica nel suo insieme.

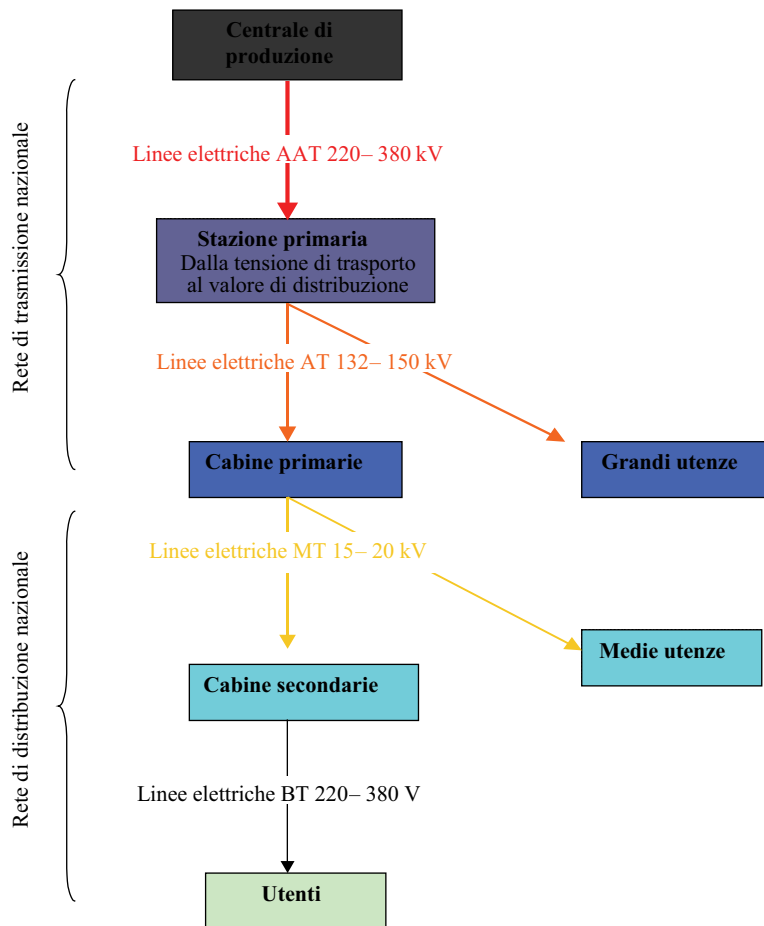


Figura III-1 – Schema rete elettrica

Una tipica linea elettrica consiste di conduttori ancorati, attraverso isolatori, ad una serie di supporti (piloni i tralicci). Gli isolatori supportano un singolo conduttore o più su cui è trasportata una fase. Si parla di fase poiché la produzione, la trasmissione e la distribuzione dell'energia elettrica è fatta tramite sistema trifase, cioè tramite linee elettriche formate da terne di conduttori alimentati da tensioni alternate aventi stessa frequenza (isofrequenziali) e intensità, ma sfasate tra loro di $\frac{2}{3}$ del periodo². I conduttori di ogni fase sono sospesi abbastanza lontano tra loro e dai tralicci per prevenire scariche e cortocircuiti tra le fasi o tra fase e terra (attraverso le strutture di supporto). Alle basse frequenze, i campi elettrici e magnetici possono essere considerati separati ed indipendenti. Le tensioni di esercizio del sistema elettrico sono caratterizzate da un valore efficace³ che non varia in maniera apprezzabile nel tempo, sicché il campo elettrico generato presenta anch'esso un valore efficace praticamente costante nel tempo. Poiché le correnti che circolano nelle linee dipendono dal carico, vale a dire dalla richiesta di potenza degli utilizzatori finali, il campo magnetico varia nel tempo, con tipiche oscillazioni sia quotidiane (tra il giorno e la notte), sia stagionali. L'andamento e il valore massimo dell'intensità dei campi dipendono, inoltre, dalla configurazione geometrica e dalle reciproche distanze tra i conduttori di fase. Tenendo presente che i conduttori sono collegati tra due tralicci in modo da formare una catenaria, la misura dell'intensità dei campi non va fatta in prossimità dei sostegni, bensì nel punto in cui i cavi si trovano alla minore distanza dal suolo, ovvero al centro della campata. Le Figura III-2 e Figura III-3 riportano gli andamenti tipici del campo elettrico e magnetico al suolo [III-1], relativi a tre diverse tipologie di linee aeree, nella sezione trasversale corrispondente al centro della campata. Entrambi i campi presentano i valori più elevati al di sotto dei conduttori: la massima intensità di campo elettrico, per una linea a 380 kV a semplice terna, è generalmente dell'ordine di 7-8 kV/m; la massima induzione magnetica, per la medesima linea a pieno carico, è circa 22 μ T. Si può notare, inoltre, come i campi decrescano molto rapidamente nelle prime decine di metri dal centro della linea, mentre a distanze superiori la diminuzione sia molto più lenta.

² La scelta del sistema trifase storicamente è dovuta alla possibilità di creare campi magnetici rotanti, necessari al funzionamento delle macchine elettriche.

³ Per valore efficace si veda paragrafo 5.4 nota 1

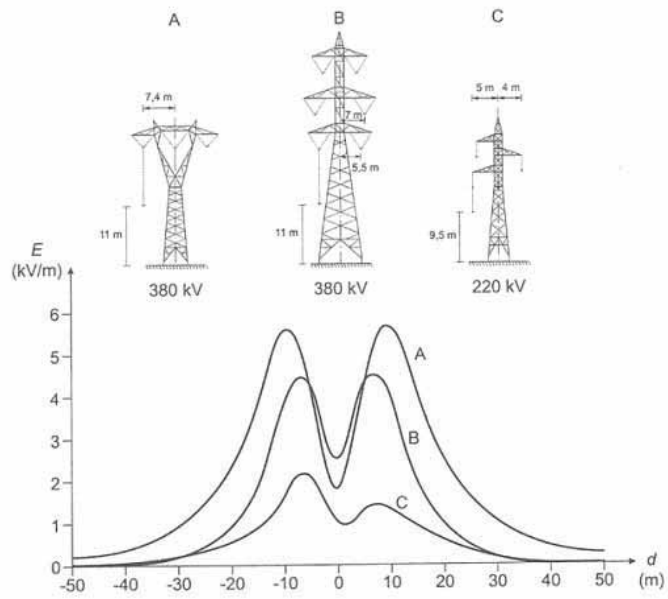


Figura III-2 Andamenti del campo elettrico emesso da linee elettriche aeree.

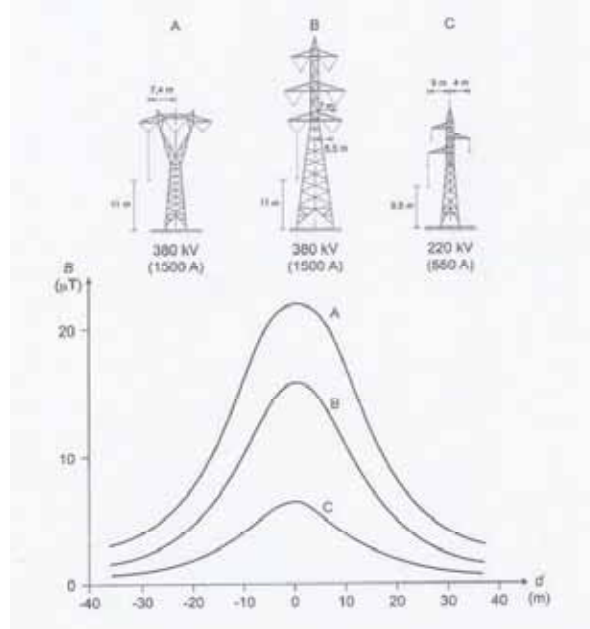


Figura III-3 – Andamenti del campo magnetico emesso da linee elettriche aeree.

Un'alternativa alle linee elettriche aeree è costituita dalle linee in cavo interrate, utilizzate soprattutto per la media e la bassa tensione. Il campo elettrico al suolo generato da tali linee risulta di intensità trascurabile, a causa dell'effetto combinato dell'azione schermante delle guaine metalliche e del terreno. Il campo magnetico, invece, non risente della presenza del terreno; esso, inoltre, diminuisce rapidamente con la distanza dall'asse della linea.

La Figura III-4 mostra il confronto tra il campo magnetico generato da linee aeree con quello generato da cavi interrati [III-1]. Si nota come per quest'ultimi l'intensità massima del campo sia più elevata, ma presenti anche un'attenuazione trasversale più pronunciata.

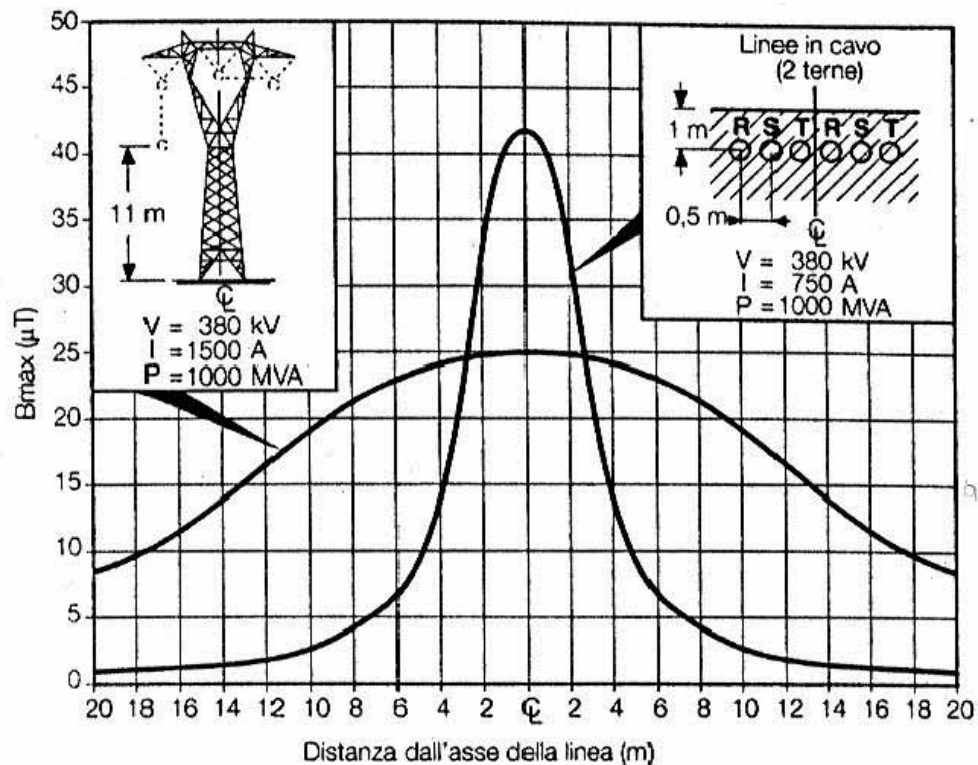


Figura III-4 Andamenti del campo magnetico emesso da una linea elettrica aerea e da una linea in cavo interrata.

Nelle sottostazioni di alta tensione si rilevano, ad altezza di 1 m sul terreno, induzioni magnetiche di alcune centinaia di microtesla. Tuttavia nelle aree nelle quali il personale opera abitualmente l'induzione magnetica non supera generalmente 1 mT.

In cabine di media e bassa tensione si registrano induzioni di alcune decine di microtesla. In condizioni di normale funzionamento, il campo magnetico presente all'esterno delle cabine può ritenersi trascurabile ad una distanza dalle mura perimetrali maggiore di 10-20 m.

III.2.2 Apparecchiature elettriche

Gli impianti per la trasmissione e la distribuzione dell'energia elettrica non sono le uniche sorgenti di esposizione delle persone ai campi elettrici e magnetici a bassa frequenza. Sono molteplici, infatti, le apparecchiature per uso industriale e civile in grado di generare campi, generalmente magnetici, di elevata intensità.

Nelle abitazioni il campo elettrico prodotto dagli elettrodomestici è modesto, poiché la tensione di alimentazione è bassa (230 V) e gli involucri degli apparecchi costituiscono un'efficace schermatura.

Vicino agli elettrodomestici e agli altri apparecchi elettrici di uso comune si hanno invece campi magnetici che possono raggiungere valori di decine o centinaia di microtesla, molto più intensi di quelli dovuti alle linee ad alta tensione. I medesimi dispositivi, inoltre, possono emettere un campo magnetico di intensità sensibilmente diversa a seconda del modello e della manifattura. Si deve rilevare, ad ogni modo, che l'intensità del campo magnetico decresce rapidamente all'aumentare della distanza dalla sorgente.

Negli uffici con un numero ridotto di apparecchiature, solitamente si presentano campi magnetici di intensità confrontabili con quelli presenti in ambienti residenziali; negli uffici con un maggior numero di apparecchiature, si possono rilevare notevoli livelli di fondo, generati dalle elevate correnti circolanti nei circuiti primari dell'impianto elettrico. I livelli di induzione magnetica, dovuti ad apparecchiature elettriche di uso corrente negli uffici, hanno valori di induzione magnetica fino ad alcuni microtesla. Anche in ambiente ospedaliero si riscontrano induzioni di alcuni microtesla, dovuti alla presenza delle apparecchiature elettromedicali.

Alcuni tipi di impianti industriali, caratterizzati dall'assorbimento di correnti di migliaia di ampere, possono generare elevate induzioni magnetiche fino ad alcuni millitesla. Si pensi, ad esempio, agli apparati per la saldatura ad arco, oppure ai forni ad arco e a induzione magnetica. Livelli di induzione magnetica fino ad alcune decine di microtesla si rilevano per macchinari di comune impiego

negli ambienti industriali quali tornio, tranciatrice, compressore, fresa, elettrosega.

III.3 Sorgenti in alta frequenza

L'elemento fondamentale per tutti gli apparati di telecomunicazioni è l'antenna: trasduttore elettromagnetico (e.m.), ovvero interfaccia tra campi elettromagnetici guidati (e.g., tramite conduttori, cavi, guide d'onda, guide dielettriche, microstriscie) fino alla porta d'ingresso (e.g., morsetti, flangia, superficie ideale) e radiazione elettromagnetica irradiata attraverso la porta di uscita (e.g., filo, struttura di conduttori, bocca, superficie ideale) nello spazio esterno tramite onde elettromagnetiche. [III-2], e quindi una struttura in grado sia di ricevere che trasmettere il segnale.

Un antenna è detta isotropa quando irradia in ogni direzione con la stessa intensità. La rappresentazione grafica delle proprietà di radiazione di un antenna, cioè l'intensità di potenza che viene irradiata nelle varie direzioni, sono rappresentate tridimensionalmente da un solido di radiazione o bidimensionalmente da un diagramma di radiazione. In Figura II-5 e Figura II-6 sono rappresentati il solido ed il diagramma di radiazione di un antenna. Per l'antenna isotropa il solido di radiazione è rappresentato da una sfera mentre il diagramma di radiazione da un cerchio. L'antenna isotropa nella realtà non esiste ma è una astrazione utile per confronto con i diagrammi di radiazione di tutte le altre antenne, ed infatti è definito guadagno di un'antenna il rapporto fra la potenza irradiata dall'antenna in esame nella direzione di massima irradiazione e la potenza che irradierebbe un'antenna isotropa nella stessa direzione se fosse alimentata con la stessa potenza. Il guadagno d'antenna è una misura di quanto direzionale sia un'antenna ed è misurato in decibel.

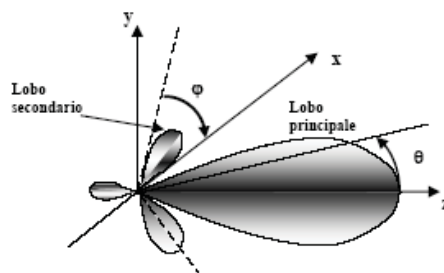


Figura III-5 Solido di radiazione di un antenna

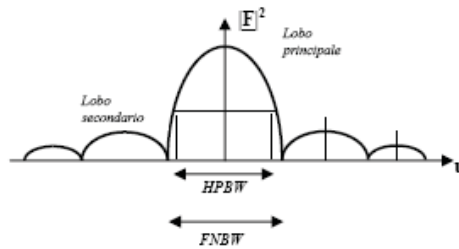


Figura III-6 Diagramma di radiazione di un antenna

Le antenne in base alla forma possono essere classificate secondo la loro struttura e configurazione in:

- 1 Antenne lineari: antenne la cui struttura è di tipo filiforme, in generale di spessore finito (sottile) e a geometria variabile (rettilinea e non) ad esempio dipoli, spire, monopoli, antenne Beverage, antenna rombica, antenna a elica, antenna biconica, antenna a farfalla.
- 2 Antenne ad apertura: antenne la cui struttura presenta una porzione di superficie piana (bocca) attraverso la quale avviene l'irradiazione di onde e.m. (tale bocca può essere rappresentata anche da una superficie dielettrica, come nelle antenne a lente) ad esempio antenna a guida troncata, antenna a tromba, microstriscia.
- 3 Antenne a riflettore: antenne che presentano un illuminatore (e.g., antenne ad apertura) che irradia verso uno o più riflettori metallici, avente caratteristiche di irradiazione e.m. altamente direttive ad esempio antenna a riflettore parabolico, antenna a riflettore angolare, antenna a riflettore fuori-asse, antenna a doppio riflettore di tipo Cassegrain.
- 4 Allineamenti di antenne: configurazioni mono o bi-dimensionali di antenne (dette primarie, di tipo lineare o ad apertura) alimentate con opportuna distribuzione di ampiezza e fase, avente caratteristiche di irradiazione elettromagnetica. altamente direttive e facilmente riconfigurabili ad esempio allineamento mono e bi-dimensionali a dipoli risonanti, allineamento mono e bi-dimensionali in guida fessurata, allineamento a microstriscia, allineamento di tipo log-periodico, allineamento di tipo Yagi-Uda, allineamento mono e bi-dimensionale con antenne primarie "attive".

Per completezza di esposizione si descriveranno ora i più comuni apparati per

telecomunicazioni. Questi si possono suddividere in apparati che collegano due punti dello spazio (ponti radio, trasmissioni via satellite, radar), o sistemi di diffusione (radiotelevisivi, radiomobili).

III.3.1 Sistemi punto-punto

Fanno parte di questa categoria i ponti radio, le telecomunicazioni via satellite e i radar. Gli impianti generalmente sono situati in aree non accessibili al pubblico, in modo che le onde elettromagnetiche non incontrino ostacoli lungo il cammino di propagazione[III-3].

I *ponti radio* sono sistemi che realizzano il collegamento tra due punti (punto - punto) oppure tra un punto ed altri punti (punto - multipunto), posti anche a parecchi chilometri di distanza, utilizzando le onde elettromagnetiche in alternativa ai cavi o alle fibre ottiche. Vengono impiegati in svariati tipi di applicazioni: collegamenti tra studi radiotelevisivi, trasmissioni dati, controlli degli impianti, attività di soccorso. Le frequenze di esercizio variano tra 0,5 e 20 GHz in bande di frequenza assegnate molto strette; le potenze in antenna sono dell'ordine dei watt o al massimo delle decine di watt. L'apparato irradiante è costituito generalmente da uno specchio di forma parabolica illuminato da un lanciatore (antenna a dipolo, antenna a tromba) posto nel fuoco della parabola come in Figura III-7. I sistemi possono essere unidirezionali o bidirezionali. Nella maggioranza dei casi una singola antenna è usata per trasmettere e per ricevere simultaneamente; sono usate sia la polarizzazione verticale che quella orizzontale, e spesso sono presenti entrambe sulla stessa antenna. Le antenne dei ponti radio sono caratterizzate da un elevato guadagno e da un'elevata direttività, poiché l'energia che non viene captata dal ricevente è perduta dal servizio; di conseguenza, la radiazione diffusa prodotta nelle vicinanze del sistema radiante, al di fuori del fascio di trasmissione, risulta estremamente ridotta.

I campi elettromagnetici emessi da questi apparati possono creare problemi di sicurezza solo agli eventuali operatori che lavorano in stretto contatto con l'antenna, quando l'apparato è in funzione. Anche in questo caso, data la bassa potenza e le grandi dimensioni dell'antenna, la densità di potenza sulla superficie della parabola non supera i $100 \div 200 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.



Figura III-7 Ponte radio.

Le *telecomunicazioni via satellite* rappresentano anch'essi un sistema alternativo, in rapido sviluppo, a quelle via cavo. Tali sistemi vengono usati principalmente per la trasmissione di dati e di immagini in digitale, per il telerilevamento da satellite e la gestione di satelliti commerciali e militari.

Le frequenze più comunemente utilizzate vanno dai GHz alle decine di GHz; le potenze assorbite variano da qualche decina di W a poco più di 1 kW per canale.

Le antenne sono caratterizzate da un alto guadagno (a partire da 60 dB) e da un'elevata direttività. La potenza radiata da ogni antenna a terra in uno specifico momento dipende dalle condizioni climatiche e dai canali in uso.

I *radar* sono dispositivi utilizzati per la determinazione della posizione e della velocità di oggetti nello spazio. Gli impieghi del radar spaziano dalla meteorologia, ai dispositivi di radioassistenza, all'autovelox in uso presso la Polizia di Stato. In Figura III-8 è mostrato un radar parabolico.

Le frequenze utilizzate sono di solito superiori a 1 GHz, mentre le potenze variano da pochi milliwatt ad alcuni megawatt, a seconda del tipo di applicazione

A seconda del funzionamento, i radar si distinguono in due tipologie: radar ad impulsi e radar Doppler. Il radar ad impulsi emette un breve impulso elettromagnetico, seguito da una pausa più lunga di attesa dell'eventuale segnale di ritorno, riflesso dall'ostacolo. La frazione di tempo in cui la sorgente

emette effettivamente energia è pertanto molto bassa e le potenze medie sono di diversi ordini di grandezza inferiori a quelle di picco. Il radar Doppler emette un'onda continua e rivela solo la presenza di oggetti in movimento, la cui frequenza è più alta se l'oggetto si avvicina e più bassa se si allontana.

Tutti i tipi di radar impiegano antenne con elevata direttività, con fasci irradiati molto stretti, e pertanto all'esterno della zona dell'impianto riservata agli addetti ai lavori e al di fuori del fascio di trasmissione, l'esposizione è trascurabile. Il campo nella direzione di massimo irraggiamento, nei grossi impianti, può raggiungere valori elevati anche a distanze di qualche centinaio di metri; in genere, non si verifica che vengano intercettate posizioni accessibili alla popolazione.



Figura III-8 Radar parabolico.

III.3.2 Apparati a diffusione

Lo spettro di frequenza occupato dagli apparati a diffusione va da circa 0,5 MHz (radio a modulazione d'ampiezza) fino a circa 1 GHz (televisioni private e pubblica, ecc.) (Figura III-9) con potenze massime comprese tra alcuni chilowatt e centinaia di chilowatt.

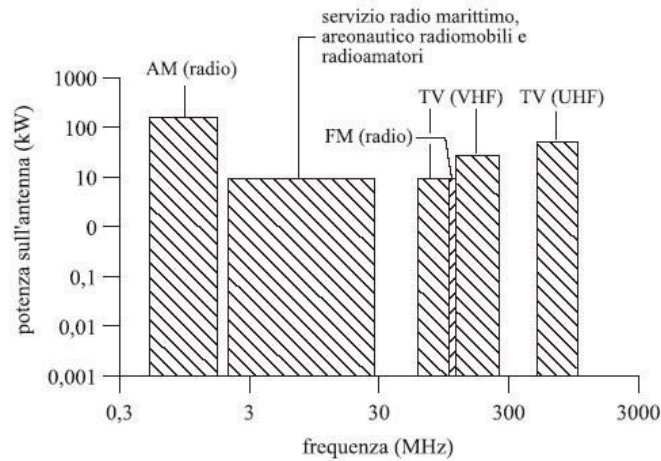


Figura III-9 Allocazione in frequenza e potenze massime tipiche degli apparati a diffusione.

Questi apparati sono facilmente individuabili nell'ambiente per le antenne trasmettenti, alti tralicci metallici che costituiscono essi stessi il radiatore elettromagnetico o hanno funzione di sostegno per il radiatore vero e proprio. Alcuni esempi di queste stazioni trasmettenti sono riportati in Figura III-10. L'apparato è completato dal generatore di potenza elettromagnetica, collegato all'antenna con opportuno cavo. Il segnale raramente è prodotto in loco ma vi arriva con un collegamento a ponte radio o via cavo.

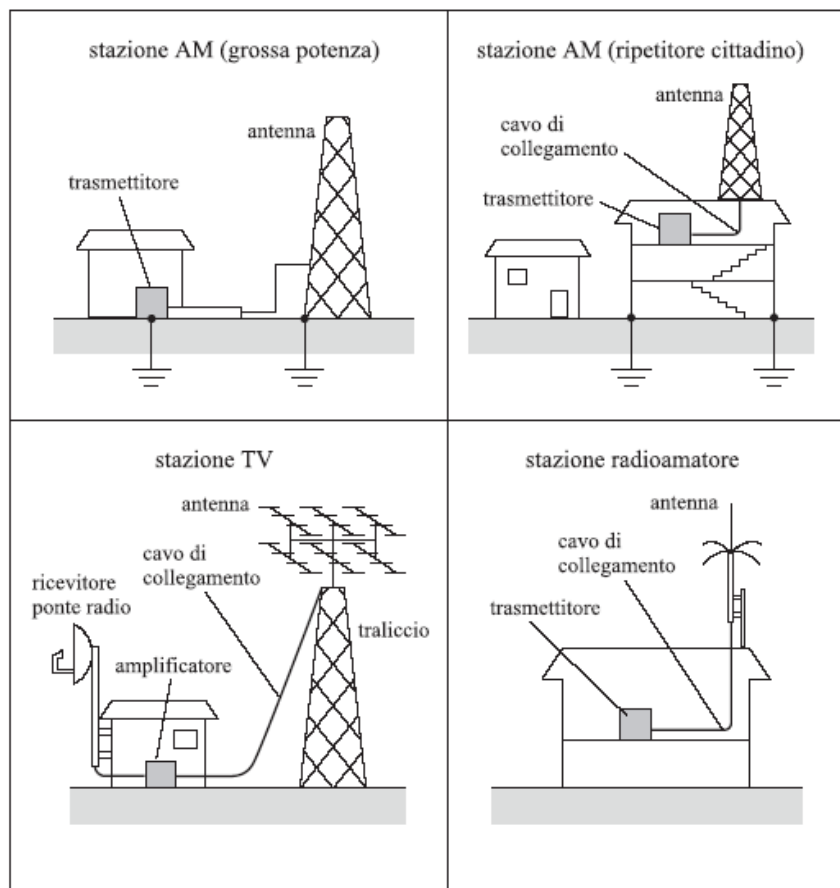


Figura III-10 Alcuni esempi di apparati a diffusione.

I *ripetitori radiotelevisivi* (Figura III-11) sono costituiti da impianti di varia grandezza e potenza. Le frequenze utilizzate cadono nell'intervallo compreso tra 155 kHz e 862 MHz, come riportato in Tabella III-1.

Servizio radiofonico	Onda Lunga (OL)	(155 ÷ 286) kHz
	Onda Media (OM)	(525 ÷ 1605) kHz
	Onda Corta (OC)	(3950 ÷ 26100) kHz
	Modulazione di Frequenza (FM)	(87,5 ÷ 108) MHz
Servizio televisivo	Banda I e III (VHF)	(47 ÷ 230) MHz
	Banda IV e V (UHF)	(470 ÷ 862) MHz

Tabella III-1 Bande di frequenze dei sistemi di diffusione radiotelevisivi.



Figura III-11 Ripetitore televisivo.

Gli impianti trasmettenti sono normalmente installati su tralicci metallici posti ad una certa distanza dal suolo o, più raramente, sui tetti di edifici; gli impianti FM-TV, infatti, possono essere installati sia in ambienti isolati sia in ambienti urbani.

Gli impianti OL, OM e OC sono installati al di fuori dei centri abitati con una fascia di rispetto piuttosto estesa, poiché la struttura irradiante necessita di superficie circostante di terreno affinché si abbia una buona propagazione del segnale. I siti prescelti per l'installazione dei ripetitori televisivi sono in maggioranza località collinari o montane dalle quali è possibile irradiare su vaste aree.

Le potenze degli impianti OL OM e OC variano da qualche centinaio di W per piccoli impianti fino al centinaio di kW per gli impianti di rilevanza nazionale. Per gli impianti FM-TV, i ripetitori di carattere locale hanno potenze dell'ordine dei W, mentre gli impianti a copertura nazionale od internazionale arrivano alle centinaia di kW.

Le esposizioni maggiori, pertanto, si riscontrano in prossimità di antenne isotrope collocate nei centri abitati, e in edifici posti lungo la direzione di emissione di antenne direzionali.

Le antenne radiofoniche più grandi sono poste su tralicci con a lato griglie piatte verticali (Figura III-12), rettangolari o cilindriche, mentre nelle aree urbane sono più frequenti quelle a pettine con cinque o dieci denti laterali a forma di T (Figura III-13).

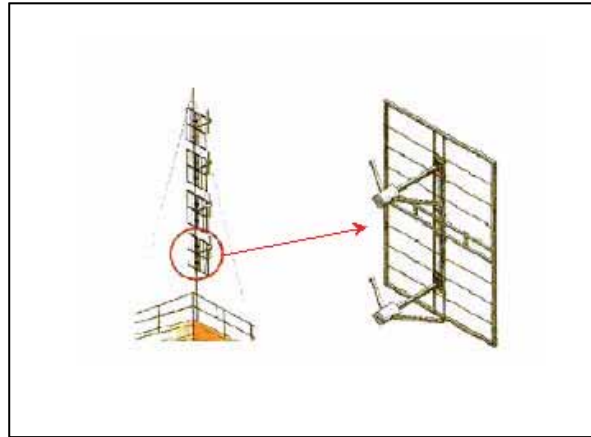


Figura III-12 Antenna radiofonica con particolare di una griglia.

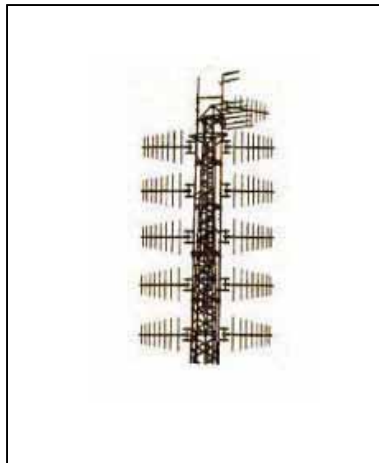


Figura III-13 Antenna radiofonica a pettine.

I sistemi radiomobili che saranno trattati approfonditamente nel capitolo successivo includono tutte le trasmissioni che avvengono tramite dispositivi, quali telefoni senza fili, apparecchi montati su

veicoli e apparecchiature per radioamatori. Questi dispositivi sono usati per comunicazioni a livello privato e pubblico, per attività professionali e non professionali.

Le unità portatili sono piccoli dispositivi con una singola antenna corta a stilo o monopolo; le apparecchiature per radioamatori richiedono un'antenna più lunga per operare efficientemente.

Le bande di frequenza utilizzate variano da 27 MHz fino ai 1800 GHz (telefoni cellulari UMTS); i livelli di potenza variano a seconda del tipo di apparecchiatura utilizzata, in genere minori di 10 W.

Un telefono cellulare può emettere una potenza di circa 250 mW; l'emissione media durante una conversazione, in vicinanza di una stazione radiobase (SRB), si riduce ad alcune decine di mW. I telefoni cellulari non emettono onde elettromagnetiche, anche se accesi, quando non vengono utilizzati per parlare, ad eccezione degli sporadici segnali emessi per mantenere il contatto con le SRB.

I *sistemi radiocellulari* sono dispositivi che permettono la comunicazione da un telefono portatile ad una SRB. Il territorio interessato dal servizio è suddiviso in celle, ciascuna servita da una SRB. Un sistema di controllo provvede al riconoscimento e alla gestione di ogni singolo telefono portatile da parte della SRB più vicina. Ogni SRB è dotata di un certo numero di canali radio per la trasmissione dei segnali degli utenti della cella. Tali canali radio sono suddivisi su un insieme di celle, facenti parte di un cluster. Gli stessi canali sono utilizzati dagli altri cluster, in modo da riutilizzare le stesse frequenze. Ciò pone un limite alla potenza di ciascuna SRB: infatti, affinché il sistema funzioni correttamente, non devono sussistere interferenze tra cluster differenti. Le antenne trasmettenti di una SRB sono formate da un insieme di dipoli collineari, disposti verticalmente e in modo tale che l'ampiezza verticale del fascio sia molto stretta (circa 7°), rispetto a quella del fascio orizzontale, e il fascio diretto verso il basso abbia un angolo di tilt, ovvero un'inclinazione verso il basso. A seconda delle necessità tecniche, delle caratteristiche e dell'ampiezza dell'area geografica da coprire, le SRB possono essere omnidirezionali o settoriali. Generalmente le SRB utilizzate in Italia sono di entrambi i tipi, e possono essere montate su torri, tetti e terrazzi di alte costruzioni. Le antenne omnidirezionali a basso guadagno (Figura III-14 a) sono in grado di illuminare uniformemente il segnale in tutte le direzioni. Utilizzando questo tipo di antenna, la SRB è costituita da un'antenna ricevente e da una trasmittente posta al centro della cella. Questa soluzione è usata per coprire zone a bassa intensità di traffico, come ad esempio autostrade e zone rurali vaste e pianeggianti. Queste antenne sono montate su torri ad altezza variabile, ed hanno un numero di canali attivi da 10 a 15, con una Potenza Effettiva

Radiante (EPR) di circa 100 W per canale. Con le antenne direttive ad alto guadagno (Figura III-14 b) si può suddividere una cella in un certo numero di settori (SRB settoriale), ognuno dei quali è illuminato da un'antenna direttiva. Ogni settore può essere considerato come una cella, con un'ampiezza di 120° o di 60° ; l'altezza delle torri varia dai 15 ai 50 metri, l'EPR per canale assume valori compresi tra 20 e 50 W, con un numero di canali che può variare tra 30 e 45.

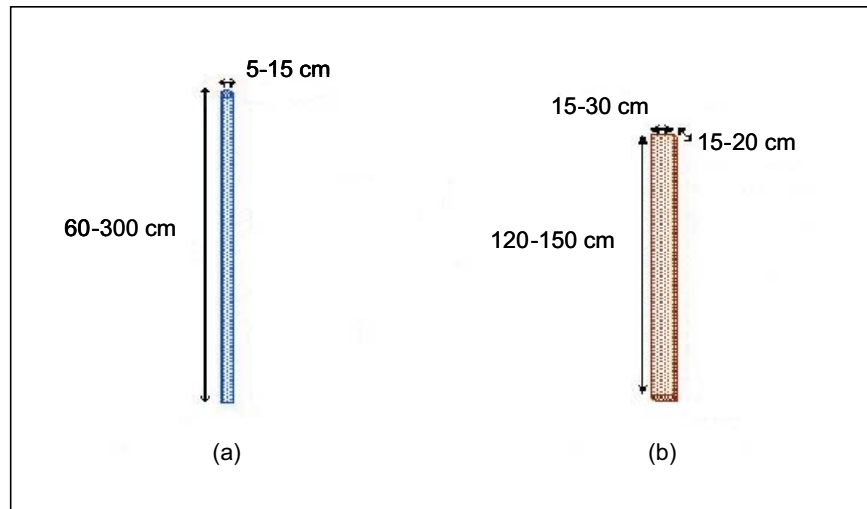


Figura III-14 Antenne omnidirezionali (a) e direttive (b).

In generale una SRB di tipo settoriale (Figura III-15) è costituita da un insieme di antenne direzionali a dipolo, montate su strutture portanti costituite da un traliccio di sostegno di altezza variabile, e da supporti metallici disposti nelle tre direzioni con sfasamento di 120° l'uno rispetto all'altro; questo consente di realizzare l'installazione di più celle sulla stessa struttura portante.

Ogni singola cella è costituita da quattro antenne, montate verticalmente su un braccio; delle quattro antenne due sono di ricezione, posizionate sugli estremi del braccio, mentre le altre due centrali effettuano la trasmissione del segnale. La struttura così determinata forma un triangolo equilatero ed è montata su un traliccio portante, posizionato su un terrazzo di un edificio oppure direttamente piantato nel terreno. Lo sfasamento di 120° di ogni singola cella e la geometria di irradiazione delle singole antenne sono tali da non consentire la somma delle potenze: ogni antenna irradia con la sua potenza nella direzione di orientamento e non influenza le altre.



Figura III-15 Stazioni radiobase di tipo settoriale

La scelta della forma e delle dimensioni delle celle di copertura è influenzata sia dal numero di SRB che si vuole installare, sia dalla necessità di sfruttare a pieno i vantaggi del riuso delle frequenze. Per garantire elevate capacità di traffico, occorre seguire una strategia di copertura cellulare che riduca la dimensione delle celle e l'EPR per canale nelle aree a maggiore intensità di traffico. Le ultime generazioni di antenne direttive, a seconda dell'ampiezza del territorio e dell'intensità del traffico, raggiungono un valore di ERP per canale di 10 W o meno, con un numero di canali pari a 57.

Se viene utilizzata un'antenna omnidirezionale, una SRB può servire una sola cella (nel cluster da sette celle), che è detta in questo caso cella omnidirezionale, mostrata nella Figura III-16.

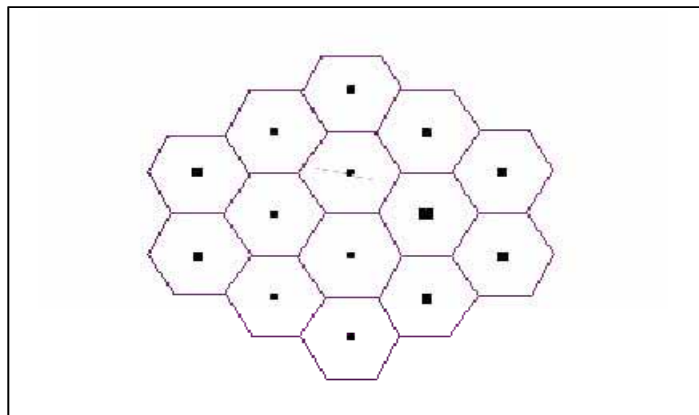


Figura III-16 Struttura di copertura ad antenne omnidirezionali.

Se invece viene utilizzata un'antenna settoriale (ogni settore di 120° o di 60°), la SRB può coprire tre celle contigue nei cluster da 21 celle (Figura III-17).

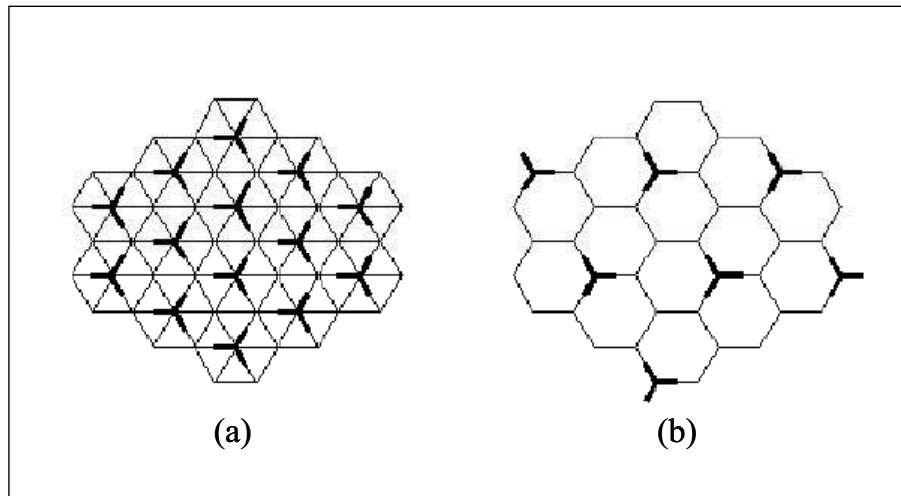


Figura III-17 Strutture di copertura ad antenne direzionali: antenne poste al centro delle celle (a) e sui vertici delle celle (b).

Generalmente i fasci dell'antenna hanno un angolo di tilt verso il basso minore di 10° , così che l'esposizione verso il pubblico al fascio principale non è mai possibile a distanze radiali inferiori a 58 metri. A queste distanze, poiché i valori dei campi e della potenza decrescono con il quadrato della distanza, gli stessi sono ridotti di un fattore 10.000. I lobi laterali, che potrebbero interessare la popolazione, hanno livelli di potenza che sono almeno 20 dB inferiori a quello del fascio principale, e quindi sono trascurabili. In Figura III-18, la SRB utilizza un pannello trasmittente di 10° sul piano verticale (6° di tilt) e 65° sul piano orizzontale

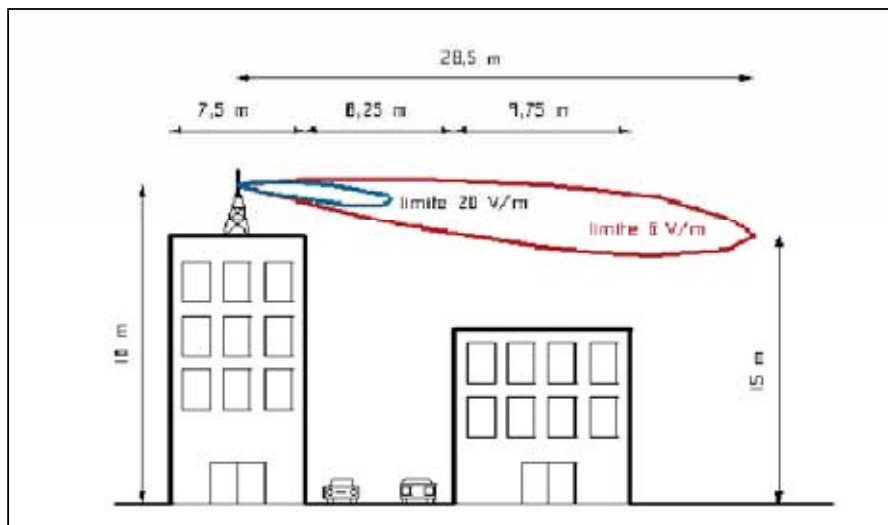


Figura III-18 Diagramma di irradiazione di una SRB sul piano verticale.

Utilizzando antenne di tipo omnidirezionale poste al centro delle celle, si può minimizzare il numero di SRB ottenendo la copertura massima a parità di raggio della cella; per ottenere un riuso maggiore della frequenza, grazie ad una minore interferenza tra i canali, si utilizzano antenne direttive poste al centro della cella o sui vertici di essa. Le antenne sono realizzate per inviare l'informazione su una vasta area intorno all'apparato o per "illuminare" una zona a distanza. Nel primo caso si usano antenne a basso guadagno (dimensione dell'antenna compresa tra circa $0,7\lambda$ e $0,25\lambda$; guadagno G minore di 2,5) e angolo di irraggiamento orizzontale di 360° ; nel secondo caso si usano antenne ad alto guadagno (combinazione di dipoli schierati, ciascuno di dimensioni circa $\lambda/2$, guadagno dell'ordine delle decine, fino al cen-tinaio e angolo di irraggiamento orizzontale inferiore a 180°). La zona "coperta" da un'antenna ai fini della ricezione, è quella in cui l'onda elettromagnetica arriva con un'intensità di campo elettrico di qualche millivolt per metro. Questi livelli di campo sono molto inferiori agli standard di sicurezza più restrittivi esistenti al mondo. Alcuni rilevamenti fatti in grandi aree urbane negli USA, agli inizi degli anni settanta, hanno dato, come risultato, che solo l'1% della popolazione è esposto a livelli di densità di potenza superiori a $1\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (campo elettrico, E , uguale a circa $2\ \text{V}/\text{m}$). Il campo irradiato non può essere considerato fonte di inquinamento elettromagnetico neppure per questi apparati e i livelli significativi per la salute umana sono limitati alle zone circostanti l'antenna trasmittente (50-100 m). Nel caso dei trasmettitori a modulazione d'ampiezza (onde medie) i campi significativi si verificano in pratica nella zona d'induzione. In pratica si possono trovare campi

dell'ordine di 100 V/m a qualche decina di metri dalla base dell'antenna trasmittente (ad es. trasmettitore onde medie con 100 kW di potenza della portante, e fino a 50 kW di potenza di modulazione). Ragioni tecniche, logistiche ed economiche e il progressivo aumento della emittenza pubblica e privata ha determinato il concentramento, in aree di dimensioni limitate, di un gran numero di apparati trasmittenti. Questa condizione si verifica particolarmente sulla cima dei rilievi in prossimità di grossi centri urbani. Un'analisi dettagliata dei livelli di campo esistenti in prossimità di tali siti è estremamente complicata. Misure qualitative effettuate con strumenti a larga banda hanno riscontrato livelli di densità di potenza da 0,03 a 0,1 mW/cm² (10 ÷ 20 V/m) in vicinanza di tali siti (decine di metri dalla recinzione).

III.3.3 Approfondimento sui sistemi radiomobili

I sistemi radiomobili costituiscono tutti quei sistemi di comunicazione radio, i quali, utilizzando appunto il mezzo radio come supporto trasmissivo, hanno come scopo primario quello di rendere possibile una connessione continuativa, “*anytime and anywhere*”, fra due o più utenti, anche in una situazione di mobilità relativa. Essi sono sistemi in grado di fornire servizi sia di tipo monomediale, con orientamento soprattutto verso i servizi voce, come si è verificato in modo prevalente a partire dall'introduzione delle reti mobili fino alla fine degli anni '90, sia di tipo multimediale, come avviene in misura crescente a partire dai primi anni 2000.

L'uso di un accesso radio basato sulla disponibilità limitata di porzioni di spettro radio è, assieme alla mobilità, il tratto più caratteristico e qualificante dei sistemi mobili. Un'ulteriore caratteristica peculiare di tali sistemi, forse meno “visibile”, è la condivisione delle risorse di accesso. Da questo punto di vista una rete mobile, qualunque sia la sua tecnica realizzativa, comprende sempre un'interfaccia radio caratteristica dell'accesso, i cui aspetti fondamentali sono legati alla necessità di schemi di accesso multiplo, di meccanismi di risoluzione delle contese sia di pre-assegnazione sia di utilizzazione, di meccanismi di risoluzione delle collisioni e del sovraccarico.

L'uso dello spettro radio ha anche altre implicazioni specifiche delle reti mobili, in termini di pianificazione, progettazione e realizzazione dell'infrastruttura di rete (per esempio, la pianificazione e il progetto della copertura dell'accesso radio, la previsione e descrizione del traffico, includendo l'effetto della mobilità), di definizione di obiettivi e requisiti di qualità di servizio (per esempio, è possibile e accettabile sia pure in modo sporadico interrompere sessioni applicative in corso), di

regolamentazione (per esempio, compatibilità tra diversi sistemi, regole di allocazione dello spettro radio).

Per fissare un quadro di riferimento, conviene classificare i sistemi mobili, riferendosi in particolare alla complessità e alla gamma di servizi offerti. Sono oggi identificabili le categorie seguenti:

- sistemi di radioavviso (*paging systems*);
- sistemi radiomobili privati (sistemi utilizzati per la gestione di reti chiuse orientate ad uno specifico servizio);
- sistemi cordless;
- sistemi cellulari;
- sistemi di accesso radio locale (*Wireless Local Area Network, WLAN*);
- sistemi di comunicazione personali satellitari.

I *sistemi di radioavviso* sono costituiti da un “*call center*” che raccoglie le chiamate di avviso da destinare agli utenti del servizio e le inoltra attraverso l’infrastruttura di diffusione radio allo scopo di allertare i terminali di utente. Caratteristica specifica di questi sistemi è la modalità diffusiva unidirezionale di comunicazione e la limitatezza dell’informazione trasferita verso l’utente.

I *sistemi radiomobili privati* (designati *trunking systems* nella letteratura anglossassone) sono specializzati per comunicazioni di tipo punto-multipunto e per la distribuzione di messaggi e di comunicazioni finalizzate al controllo e gestione di una flotta di unità mobili (per esempio, veicoli di trasporto terrestre, navi, emergenze, forze di pubblica sicurezza) su una regione geografica che può arrivare a dimensioni nazionali.

I *sistemi cordless* sono stati introdotti come mezzo per eliminare il cordone di raccordo nei terminali telefonici (*wireless telephony*) in ambienti prevalentemente chiusi, comunque con raggio limitato a poche centinaia di metri. La comunicazione avviene tra uno o più terminali, quasi sempre telefonici, e una stazione base fissa (eventualmente più stazioni insieme a ripetitori possono essere

utilizzate per estendere la copertura).

I *sistemi cellulari* propriamente detti offrono comunicazioni normalmente di tipo punto-punto, bidirezionali, con capacità variabili da pochi kbit/s a centinaia di kbit/s, ad utenti in movimento fino a qualche centinaio di km/h, con copertura ormai molto capillare e su aree estremamente estese (anche continenti, per esempio l'Europa e decine di Paesi extra-europei per il GSM). Caratteristiche di una rete cellulare sono l'impiego di terminali sofisticati dal punto di vista dell'elaborazione trasmissiva, potenza massima in trasmissione relativamente elevata (dell'ordine di un W per i terminali mobili), elevata complessità funzionale della parte fissa della rete, allo scopo di garantire continuità alle sessioni applicative, robustezza, sicurezza, ampia flessibilità nella gestione e tariffazione delle risorse di rete.

Le WLAN sono nate come alternativa infrastrutturale alle LAN, *Local Area Network*, reti cablate che consentono la connessione tra due o più stazioni di lavoro indipendenti (computer) e/o altri dispositivi predisposti per la connessione in rete (stampanti, unità di backup, modem, ecc.), all'interno di un'area ristretta e privata (in genere uffici e laboratori) [III-4]. Tale tipologia di rete è stata progettata con lo scopo di mantenere gli stessi servizi, senza la necessità di un'infrastruttura capillare di connessione in cavo (da qui il termine *wireless*), che la rende utile in contesti particolari, come ad esempio edifici storici, insediamenti temporanei, meeting. Inoltre, la crescita molto rapida della capacità disponibile in aria apre la possibilità di estendere l'impiego di WLAN a servizi di fonìa e multimediali e a contesti delimitati di accesso pubblico (per esempio, aeroporti, centri commerciali). Rimangono caratteristiche di una WLAN un raggio di copertura limitato, tipicamente al di sotto del km, con potenze massime quindi non superiori a qualche centinaio di mW, e una complessità nettamente inferiore rispetto a quella di una rete cellulare, sia del terminale di utente per quanto riguarda l'elaborazione del segnale e i protocolli che esso esegue, sia e soprattutto della parte fissa di rete, che si avvale in modo essenziale dell'esistente infrastruttura di rete fissa per esempio, una LAN tradizionale.

Infine, i *sistemi satellitari* si propongono di offrire servizi di comunicazioni mobili con copertura globale a livello mondiale. Trovano nicchie di applicazione dove non è possibile realizzare un'infrastruttura di copertura terrestre (per esempio, in mare aperto) o dove risulta non economico (aree disabitate) o anche laddove le comunicazioni mobili terrestri non sono praticabili per effetto di disastri che ne impediscono temporaneamente la fruibilità.

Nel seguito l'esposizione dei concetti e fa riferimento ai sistemi cellulari e a quelli con copertura locale (WLAN). Vari aspetti sono in comune con i sistemi cordless e con quelli satellitari, meno con quelli di radioavviso e di dispacciamento; questi del resto sono concepiti per contesti applicativi piuttosto limitati e rappresentano quindi realtà relativamente marginali nello sviluppo di sistemi di comunicazione mobili.

Il resto di questo paragrafo è dedicato all'illustrazione del concetto di cella radio e alle motivazioni e criteri di dimensionamento, senza pretesa di esaurire l'argomento, ma con l'obiettivo di fornire i concetti di base.

III.3.4 Architettura e struttura di una rete cellulare

In una rete cellulare si possono distinguere le seguenti parti (Figura III-19):

- i terminali mobili;
- l'accesso radio; esso comprende i sistemi che assicurano la copertura radio e permettono l'accesso ai servizi di rete;
- la rete dorsale, comprendente un insieme di nodi di commutazione in grado di effettuare oltre al normale controllo e trasferimento delle informazioni come in una rete per terminali fissi, anche funzioni di gestione della mobilità e della sicurezza;
- il sistema di gestione, che svolge le tipiche funzioni di gestione (monitoraggio e valutazione delle prestazioni, allarmistica, manutenzione) nello specifico contesto della rete radiomobile.

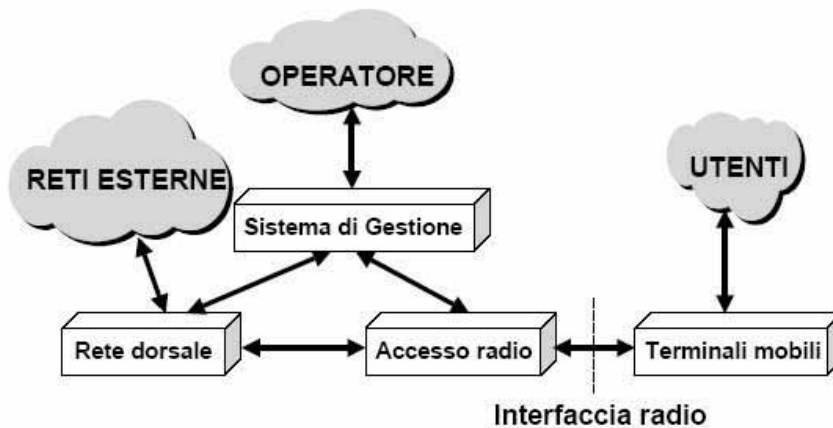


Figura III-19 Struttura generale di una rete cellulare

Queste parti permettono l'interazione di tre "soggetti": gli utenti delle risorse della rete mobile, che ne fanno uso in quanto clienti di uno o più dei servizi offerti da queste reti; l'operatore, che mette in campo, esercita e amministra l'infrastruttura di rete; le reti esterne, con i propri operatori, clienti, fornitori di servizio, cioè le reti tecnologicamente eterogenee rispetto alla rete mobile considerata ovvero amministrativamente distinte da essa (per esempio la rete GSM di un operatore rispetto a quella di un altro operatore). L'operatore può esso stesso fornire servizi, ovvero i fornitori di servizi che usano l'infrastruttura della rete cellulare possono essere soggetti distinti dall'operatore di rete (non mostrati nella Figura III-19).

Si analizzano ora più in dettaglio i sistemi componenti delle singole parti della rete.

Per quanto riguarda i terminali mobili, essi vengono classificati a seconda della potenza nominale, in tre categorie:

- 1 veicolari: sono montati su veicoli con antenna esterna che può emettere fino a 20 W;
- 2 portatili: fino a 8 W all'antenna, sono trasportabili, ma hanno bisogno di una notevole fonte di alimentazione per il funzionamento (es. PC portatili, fax, etc.);
- 3 personali (*hand-terminal*): fino a 2 W all'antenna, è il "telefonino".

Nella Tabella III-2 sono riportati i valori della potenza massima nominale e della potenza media del sistema cellulare GSM (*Global System for Mobile communications*), introdotto in Europa a partire

dal 1991 nella banda intorno a 900 MHz, e del sistema DCS (*Digital Cellular System*), introdotto nel 1993 come estensione del GSM intorno alla banda 1800 MHz.

Classe	Potenza massima nominale (W)		Potenza media nominale (mW)	
	GSM 900 MHz	DCS 1800 MHz	GSM 900 MHz	DCS 1800 MHz
1	-	1	-	120
2	8	0,25	960	30
3	5	4	600	480
4	2	-	240	-
5	0,8	-	96	-

Tabella III-2 Potenza massima e nominale per GSM

Per quanto riguarda l'accesso radio esso comprende le stazioni base. Si distinguono in *punti di accesso* (variamente denominati in relazione a specifiche tecnologie: per esempio, *Base Transceiver Station*, BTS o più semplicemente BS, nel GSM, *Node-B* nell'UMTS, *Access Point* nelle WLAN) e in *stazioni base* propriamente dette (*Base Station Controller*, BSC, nel GSM, *Radio Network Controller*, RNC, nell'UMTS; *access router* nelle WLAN). I punti di accesso (PA nel seguito) comprendono generalmente le antenne e i ricetrasmittitori, e sfruttando una nomenclatura tipica delle reti i costituenti di quello che è il livello fisico. Un insieme di punti di accesso fa capo ad una stazione base la quale svolge funzioni logiche relative soprattutto alla gestione delle risorse radio e riferibili maggior parte al livello di collegamento e, in minima parte, al livello di rete. Le stazioni base sono posizionate sul territorio in modo da garantire una copertura elettromagnetica dello stesso. I concetti legati alla copertura saranno descritti in un apposito paragrafo.

Per quanto riguarda la rete dorsale (*core network*) della rete cellulare, a cui sono collegate le stazioni base, le architetture variano a seconda del tipo di rete.

Nel caso delle reti cellulari pubbliche, quali per esempio il GSM, il GPRS, l'UMTS, la rete dorsale consta di un insieme di nodi di commutazione interconnessi, in grado di svolgere le normali funzioni di rete relative alla gestione delle comunicazioni. In genere, tali nodi sono distinti funzionalmente in due categorie: nodi di accesso (NA nel seguito) e nodi gateway (NG nel seguito). Questi ultimi sono equipaggiati con hardware e software aggiuntivo rispetto a quelli del primo tipo per

effettuare l'interconnessione con specifiche reti esterne. Nel seguito si userà il termine generico nodo per designare un nodo di commutazione della rete dorsale, riservando i termini *nodo di accesso* e *nodo gateway* rispettivamente per quei nodi che sono direttamente connessi ad una o più stazioni base e per quelli che sono interconnessi a reti esterne. L'attributo esterno si riferisce a una rete tecnologicamente o amministrativamente eterogenea rispetto a quella considerata. Per esempio, nel caso di una rete UMTS, la parte dorsale (core network UMTS) può essere interconnessa con reti GSM, Internet, la rete telefonica, la ISDN, ma anche con altre reti UMTS gestite da operatori diversi.

Nel caso di una WLAN normalmente non è prevista un'architettura specifica, ma sfrutta strutture preesistenti, come ad esempio può essere una LAN, con però l'aggiunta delle funzioni necessarie per la gestione della mobilità ed eventualmente della sicurezza.

Per quanto riguarda il sistema di gestione, questo comprende, ad esempio, il piano di controllo dei nodi, definito come insieme delle funzioni di trattamento e trasferimento dei dati di controllo (segnalazione), ed è strutturato per far fronte alla specificità dell'accesso radio e alla mobilità dei terminali: esso svolge quindi, accanto alle normali funzioni di gestione chiamata, e della comunicazione, le funzioni di gestione della mobilità e della sicurezza ed eventualmente funzioni di trans-codifica dei formati di trasporto della rete di accesso radio in quelli usati nella rete dorsale e viceversa.

Sono infine elementi costitutivi fondamentali del sistema di gestione le basi di dati distribuite che contengono informazioni sui clienti della rete. Si tratta di elementi le cui funzioni appartengono completamente ai piani di controllo (gestione della mobilità, inclusi gli aspetti di sicurezza) e di gestione e non trattano informazioni del piano di utente. Lo scopo di una base di dati sui clienti è mantenere le informazioni di identità, quelle concernenti i servizi sottoscritti, con i relativi profili di personalizzazione, quelle relative alla gestione della mobilità (raggiungibilità, con un identificativo dell'area di localizzazione ove si trova, stato di disponibilità dell'utente e caratteristiche del TM correntemente in uso), quelle relative alla sicurezza (per esempio, dati per l'autenticazione e la riservatezza), quelle per la tariffazione e la contabilizzazione degli addebiti e la successiva fatturazione.

Per concludere la comunicazione tra i sistemi componenti l'architettura delle reti per radio mobili avviene attraverso interfacce che sono oggetto di standardizzazione. Ciò consente ad un operatore di integrare in una stessa rete apparati funzionali costruiti da produttori diversi (architettura di

tipo "aperto"), purché si siano attenuti alle specifiche. La cooperazione tra sistemi remoti avviene invece mediante l'esecuzione di protocolli che permettono un colloquio (logico) diretto anche tra sistemi non adiacenti (cioè non facenti capo ad una medesima interfaccia).

III.3.5 Architettura GSM

Quanto detto nel precedente paragrafo è ora rivisto nel caso specifico dell'architettura del GSM. Nella Figura III-20 viene mostrata come esempio l'architettura logica del sistema GSM. Le entità di rete sono raggruppate in tre aree: la rete d'accesso, il *core network* (la rete fissa) e la rete di gestione, definite rispettivamente, BSS (*Base Station Sub-system*), NSS (*Network and Switching Sub-system*) ed OMSS (*Operation and Maintenance Sub-system*).

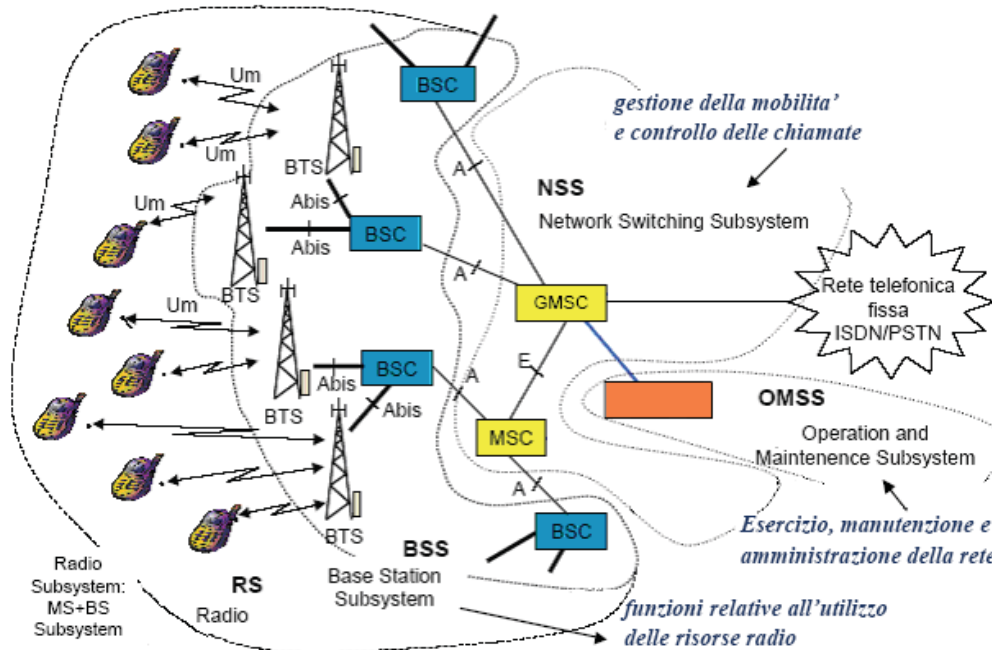


Figura III-20 Architettura di una rete GSM

La sezione relativa alla rete di accesso è maggiormente descritta nella Figura III-21, e può essere ulteriormente separata in accesso radio e rete fissa d'accesso. E' importante sottolineare che si tratta dell'unico collegamento radio all'interno della rete GSM, difatti ogni altro collegamento tra le varie unità della rete avviene via cavo. Il BSS è costituito dalle BTS e dalle BSC le quali, come già

menzionato, coordinano rispettivamente il livello fisico dell'interfaccia radio e la gestione delle risorse radio [III-5]. Le BTS sono connesse con tipologia a stella ai BSC, vale a dire, a ciascuna stazione base sono connessi direttamente una molteplicità di PA. A loro volta i BSC, sono connessi a stella ai nodi di commutazione, gli MSC (*Mobile Services Switching Center*), sparsi sul territorio gestito dall'operatore della rete GSM. Un MSC speciale è il *Gateway-MSC*, (GMSC), che permette l'interconnessione della rete GSM con le reti esterne (es. ISDN e PSTN).

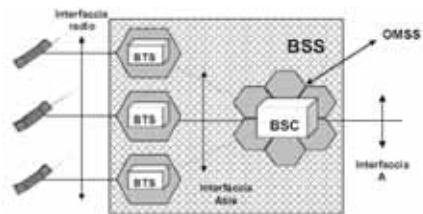


Figura III-21 Architettura della rete di accesso radio nel GSM.

L'architettura della rete GSM è, quindi, di tipo gerarchico con al vertice le centrali MSC, come indicato in Figura III-22. Questa struttura si riflette in una suddivisione (sempre gerarchica) del territorio in aree. Tali aree sono elencate di seguito.

- 1 Area 1 o *GSM Service Area*: è l'area all'interno della quale un utente GSM può raggiungere il servizio offerto dagli operatori e corrisponde all'insieme di tutti i paesi europei che hanno aderito al GSM.
- 2 Area 2 o *Operator*: è l'area dove la copertura disponibile è offerta da un operatore GSM.
- 3 Area 3 o *MSC Area*: è l'area coperta dalle BTS connesse allo stesso commutatore MSC.
- 4 Area 4 o *Location Area (LA)*: è la parte di un'area MSC controllata da un BSC.
- 5 Area 5 o *Cell*: è l'area minima, denominata cella, entro cui viene offerto il servizio GSM e corrisponde all'area di copertura di una BTS. Ogni cella fa parte di una LA.

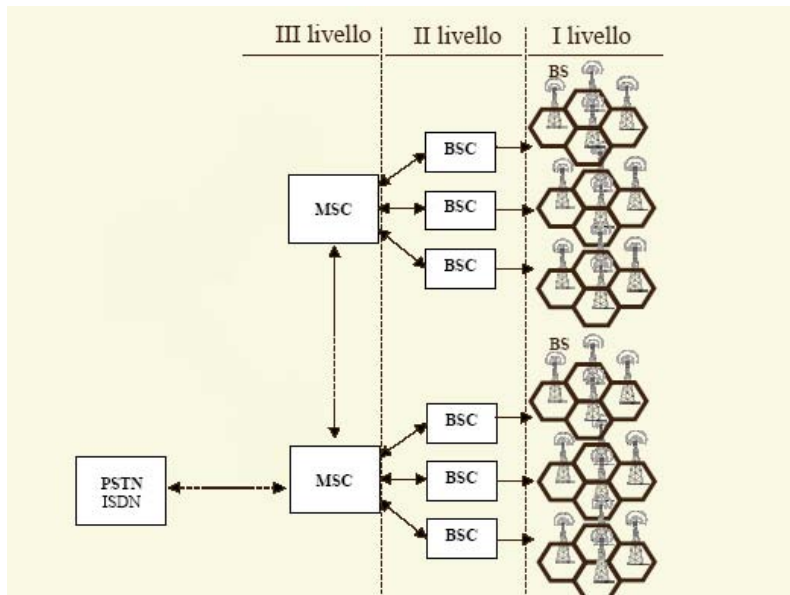


Figura III-22 Livelli gerarchici dell'architettura di rete GSM.

Solo per confronto nella Figura III-23, invece, è mostrata la struttura dell'accesso radio nel caso di una rete UMTS (*UMTS Terrestrial Radio Access Network* UTRAN). Si può osservare come essa sia del tutto simile a quella del GSM. I cosiddetti nodi B sono gli analoghi delle BTS, anche se possono presentare un'architettura interna più complessa, prevedendo una molteplicità di BTS co-locate che condividono blocchi funzionali comuni, con un site-controller. L'equivalente del BSC è il *Radio Network Controller* (RNC), il quale assieme ai nodi B costituisce il *Radio Network Subsystem* (RNS). Diversamente dal GSM in questo caso è possibile l'interconnessione diretta di due RNC.

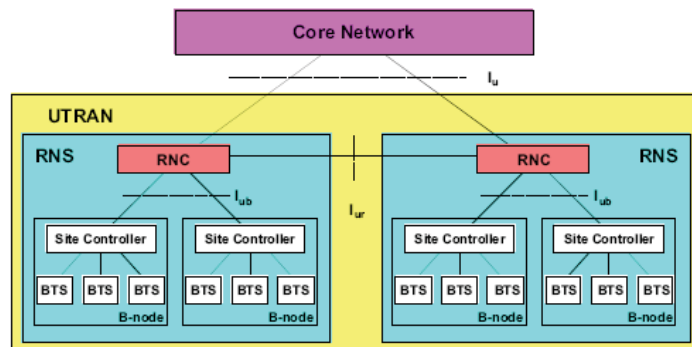


Figura III-23 Architettura della rete di accesso radio UMTS.

III.3.6 Accesso radio e copertura

Dal punto di vista dell'accesso radio, una rete mobile è caratterizzata dalla porzione di spettro assegnata al servizio, la cui entità complessiva viene di seguito indicata con B (Hz), e dall'area di copertura, la *service area*, valere a dire la porzione di spazio nella quale è disponibile l'accesso ai servizi offerti dalla rete. Questi ultimi sono tipicamente di natura bidirezionale e richiedono quindi la possibilità di trasferire le informazioni di utente e di controllo da e verso i terminali mobili. Si definisce con il termine *uplink* il collegamento in salita, il verso è quello che va dal terminale mobile all'infrastruttura fissa, e con *downlink* il collegamento in discesa (il verso è ovviamente opposto). Bisogna sottolineare che queste definizioni si applicano nel caso in cui i terminali mobili comunicano mediante un'infrastruttura fissa di rete, ossia con una rete con punti di accesso fissi. Poiché non è possibile coprire vaste estensioni territoriali con un unico ricetrasmittitore, a causa dell'attenuazione delle onde elettromagnetiche e della limitata potenza emessa dai terminali mobili, l'area complessiva di servizio è suddivisa in tante sub-aree, che si sovrappongono solo parzialmente (come precedentemente descritto per la rete GSM). In ognuna di esse, la copertura elettromagnetica è assicurata da un apposito ricetrasmittitore (la stazione base punto di accesso). Queste sub-aree, chiamate celle, assumono nella realtà della propagazione delle onde elettromagnetiche, forme geometriche largamente irregolari soprattutto a causa degli ostacoli presenti sul territorio. Tuttavia, per le operazioni di pianificazione spesso si fa riferimento a forme poligonali regolari, ad esempio a celle di forma esagonale. La scelta di tale forma è dovuta essenzialmente al fatto che le figure esagonali consentono (almeno idealmente) di coprire aree piane senza nessuna zona scoperta e senza sovrapposizioni. Con una tale copertura le antenne ricetrasmittenti delle celle adiacenti ad una cella sono tutte equidistanti, ciò non si avrebbe se si scegliessero, per esempio, celle quadrate. Queste sub-aree però, costituiscono solo una schematizzazione teorica di una realtà decisamente più complessa. In ciascuna di tali celle, il sistema radiomobile deve provvedere a rendere possibile la comunicazione da parte di una molteplicità di utenti. La porzione di spettro disponibile per l'accesso radio è quindi condivisa dai terminali mediante tecniche di accesso con assegnazione statica e dinamica. Nel caso di assegnazione statica, la capacità del mezzo radio, ovvero la potenzialità di trasferire l'informazione d'utente, viene suddivisa in "sub-canali" fisici, ognuno dei quali è assegnato ad un singolo utente per tutta la durata della comunicazione (pre-assegnazione individuale). Di conseguenza la tecnica di accesso multiplo statica definisce il "canale fisico" come quella risorsa sufficiente per il trasferimento del flusso di informazioni relativo ad uno specifico utente. E' evidente quindi che il concetto di "canale" non è sempre associato ad una

diversa porzione dello spettro radio, ma varia a seconda del tipo di accesso multiplo al mezzo radio adottato (per esempio, a divisione di frequenza, di tempo, di codice). Invece, nel caso di assegnazione dinamica il mezzo radio viene trattato come una risorsa singola a cui gli utenti possono accedere, per un limitato intervallo di tempo che non coincide in genere con la durata della comunicazione, secondo le loro necessità di trasferimento e nel rispetto di opportune procedure di controllo (protocolli). In altre parole, l'utente può impegnare la risorsa più volte per intervalli di tempo minori della durata di comunicazione e negli intervalli residui, la risorsa può essere impegnata da altri utenti. La capacità del mezzo è assegnata a domanda o pre-assegnata collettivamente a seconda che l'accesso sia consentito a qualunque utente o solo a quelli che possiedono un'autorizzazione di accesso, ottenuta all'inizio dell'evoluzione della comunicazione. [III-6]

III.4 Bibliografia

- [III-1] TuttoNormel, *“La protezione dai campi elettromagnetici”*, Edizioni TNE, novembre 2003.
- [III-2] F.S. Marzano e N. Pierdicca – *Appunti del corso di Antenne – Cap. 1: Fondamenti di antenne*
- [III-3] D. Andreuccetti, M. Bini, et al, *“Protezione dai campi elettromagnetici non ionizzanti”*, IROE “Nello Carrara” CNR, Firenze 2001.
- [III-4] Randazzo Leone, Garattini Andrea, Righi Davide, *“Guida alle reti: LAN”*, Arnoldo Mondadori Editore, 2004].
- [III-5] G. Catalano, D. Sorbara, E. Spreafico, *“GPRS – Accesso Radio - Architettura di Rete - Protocolli e Servizi”*, Tilab, 2002, Torino
- [III-6] A. Roveri: *“Reti di Telecomunicazioni”*, Principi Generali, Scuola Superiore G. Reiss Romoli, L'Aquila, 1995.

Parte seconda: Normative

IV Linee guida e normative per l'esposizione a campi elettromagnetici

IV.1 Introduzione

Numerose organizzazioni internazionali e Stati, a causa dell'interesse sempre crescente verso i possibili effetti dei campi elettromagnetici sulla salute umana e sull'ambiente, hanno sentito l'esigenza di fornire linee guida e/o normative che regolino l'esposizione per la popolazione ed i professionalmente esposti. Poiché la relazione causa-effetto ed i meccanismi di interazione tra campo applicato ed effetto rilevato, relativamente alle tipiche potenze di emissione, non sono ancora del tutto noti e comprovati, anzi, si è in presenza di un'accentuata incertezza scientifica, il principio ispiratore di numerose politiche cautelative è il principio di precauzione. Questo induce a tutelarsi di fronte ad un possibile rischio potenzialmente serio fissando limiti di esposizione cautelativi in attesa dei risultati e delle verifiche della ricerca scientifica. Sarà di seguito affrontata una breve rassegna delle normative internazionali, nazionali ed italiane per fornire una panoramica della situazione attuale in termini di esposizione ai campi elettromagnetici.

IV.2 Normative internazionali

IV.2.1 Linee guida ICNIRP [IV-1]

Il più accreditato lavoro metodologico in termini di limitazione della esposizione a campi elettromagnetici è stato pubblicato nel 1998 dalla Commissione Internazionale per la Protezione dalle Radiazioni Non Ionizzanti (ICNIRP¹), organizzazione non governativa che ha fornito i limiti di esposizione a campi elettrici e magnetici variabili nel tempo per frequenze comprese tra 0 e 300 GHz nel documento dal titolo "*Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*". Tale lavoro è diventato un riferimento fondamentale per altre linee guida internazionali e numerose normative nazionali.

La prima azione intrapresa dall'ICNIRP è stata di effettuare un'approfondita ed ampia revisione critica delle pubblicazioni scientifiche su studi condotti sull'interazione tra esposizione a campi elettromagnetici ed effetti biologici. Successivamente, ha preso in considerazione solo quelli in cui fosse chiaro ed evidente il meccanismo dell'interazione tra campo applicato e oggetto esposto e nei

¹ Si veda Appendice 4

quali fosse accertato un effetto biologico. In Tabella IV-1 sono riportate le tipologie di studi analizzate dall'ICNIRP, il tipo di effetto indagato e la presenza o meno di un effetto.

Tipologia di studi		Effetti oggetto di studio	Presenza
Studi epidemiologici su pubblico e professionalmente esposti		Effetti diretti sulla riproduzione Effetti diretti cancerogeni	No No
STUDI DI LABORATORIO	Su volontari	Effetti diretti sulla percezione del campo; Effetti diretti sull'attività cardiaca; Effetti diretti sulla stimolazione di nervi periferici e muscoli; Effetti diretti sulle funzioni visive; Effetti diretti di riscaldamento e termoregolazione (HF); Effetti diretti uditivi(HF) Effetti indiretti delle correnti di contatto ² (percezione, dolore scossa dolorosa, scossa grave) (ELF, HF)	No Si Si Si Si Si Si
	Su cellule e animali	Effetti diretti sulle proprietà strutturali e funzionali della membrana cellulare; Effetti diretti sui tessuti; Effetti diretti teratogeni e sullo sviluppo; Effetti diretti cancerogeni (Iniziatore e promotore) Effetti diretti sulla melatonina Effetti diretti sul sistema di termoregolazione (HF); Effetti diretti fisiologici dovuti ad assorbimento di energia elettromagnetica T>1°(HF); Effetti diretti di cancerogenesi a MW (Iniziatore e promotore) Effetti diretti uditivi(HF)	Si Si No No No Si Si No Si

Tabella IV-1 : Tipologie di studi ed effetti biologici

Partendo solo da questi ultimi e considerando solo gli effetti biologici che per loro natura o entità potessero avere una rilevanza sanitaria, l'ICNIRP ha selezionato dei valori di soglia di particolari grandezze fisiche per le quali vi è un collegamento diretto con l'effetto biologico. Le grandezze dosimetriche significative sono la densità di corrente indotta (J), per gli effetti dei campi elettrici e magnetici a bassa frequenza (inferiore ai 10 MHz), il tasso di assorbimento specifico (SAR), per gli effetti termici dei campi elettromagnetici a radiofrequenza e microonde, e la densità di potenza (S) per

² Si intende di contatto anche la corrente che fluisce in un individuo posto nelle immediate vicinanze di un oggetto a differente potenziale elettrico.

frequenze tra 10 e 300 GHz. Al disopra di tali valori di soglia, si cominciano a riscontrare gli effetti biologici prodotti dall'interazione dei campi esterni con i tessuti del corpo umano. Dividendo questi valori per opportuni fattori cautelativi, tanto più grandi quanto maggiore è il grado di incertezza legato all'effetto, sono stati ricavati i limiti di esposizione, o restrizioni di base, per la popolazione (in rosso) e per i professionalmente esposti, come riportati in Tabella IV-2. Tali limiti ad oggi rappresentano il più importante riferimento. Da un punto di vista operativo, però, l'intensità di campo elettrico (E), l'intensità di campo magnetico (H), l'intensità di induzione magnetica (B) e la densità di potenza (S_{eq}) sono più facilmente misurabili. Pertanto l'ICNIRP, attraverso opportuni modelli dosimetrici ed in condizioni di massimo accoppiamento tra campo ed individuo esposto (condizione di caso peggiore), ha ricavato, a partire dai valori dei limiti di base, i valori dei livelli di riferimento per queste grandezze. Questi valori sono stati ottenuti considerando l'ipotesi del caso peggiore in modo da assicurare che il rispetto dei livelli di riferimento garantisca sicuramente il rispetto dei livelli di base. Il viceversa, vale a dire il caso in cui i livelli di riferimento non siano rispettati, il superamento dei livelli di base deve essere verificato di volta in volta. In Tabella IV-3 sono indicati i valori di riferimento per le grandezze di interesse, rispettivamente per il pubblico (in rosso) ed i professionalmente esposti. Nelle tabelle delle linee guida ICNIRP la suddivisione della scala delle frequenze è leggermente differente da quella qui utilizzata, e tale scelta è stata fatta per poterne fare miglior uso in successivi confronti con altri livelli di riferimento.

Come scopo principale, le linee guida dell'ICNIRP sono state sviluppate per proteggere dagli effetti acuti dell'esposizione, i quali al momento sono quelli accertati ed hanno permesso la definizione dei valori di soglia, ma non si esprimono sugli effetti a lungo termine dell'esposizione. Per questi ultimi l'ICNIRP non esclude la possibilità che si possano verificare. Tuttavia le sperimentazioni attuali sono inconsistenti tra loro, e non permettono la definizione di limiti numerici scientificamente e logicamente fondati per la prevenzione di detti effetti.

Frequenze utilizzate ³			J (mA/m ²) ⁴	SAR (W/kg) ⁵ corpo intero		SAR localizzato testa e tronco		SAR localizzato arti		S (mJ/kg) ⁶	
Hz	Basse frequenze	0÷1	40	8							
		1÷4	40/f	8/f							
		4÷8	10	2							
		8÷25	10	2							
kHz	Basse frequenze	0,025÷0,82	10	2							
		0,82÷1	10	2							
		1÷2,5	f/100	f/500							
		2,5÷3	f/100	f/500							
		3÷65	f/100	f/500							
		0,065÷0,1	f/100	f/500							
		0,1÷0,15	f/100	f/500	0,4	0,8	10	2	20	4	
MHz	Basse frequenze	0,15÷1	f/100	f/500	0,4	0,8	10	2	20	4	
		1÷10	f/100	f/500	0,4	0,8	10	2	20	4	
		10÷110			0,4	0,8	10	2	20	4	
		110÷300			0,4	0,8	10	2	20	4	
		300÷400			0,4	0,8	10	2	20	4	
		400÷2000			0,4	0,8	10	2	20	4	
GHz	Basse frequenze	2÷10			0,4	0,8	10	2	20	4	
		>10									50

Tabella IV-2 : Restrizioni di base delle linee guida ICNIRP (1998)

³ f è la frequenza in Hz

⁴ J è inteso come valore efficace

⁵ Valori di SAR mediati sul corpo intero per un intervallo di 6 minuti. I valori di SAR localizzato (testa e tronco) si ottengono dal SAR medio moltiplicato per un fattore 25; il SAR localizzato (arti) si ottiene moltiplicando per un fattore 50. Il SAR localizzato è mediato su una qualunque massa continua di 10 g di tessuto

⁶ S deve essere mediata su una qualunque superficie di 20 cm² di area esposta e su un qualunque periodo di 86/f^{0,5} minuti (f in GHz) per compensare il sempre minore spessore di penetrazione all'aumentare della frequenza.

Frequenze utilizzate ⁷		E (V/m)		H (A/m)		B (T)		Seq (W/m ²) ⁸		IC (mA) ⁹		
Hz	0÷1			1.63*10 ⁵	3.2*10 ⁴	2*10 ⁵	4*10 ⁴			1	0.5	
	1÷4	20*10 ³	10*10 ³	1.63*10 ⁵ /f ²	3.2*10 ⁴ /f	2*10 ⁵ /f ²	4*10 ⁴ /f ²			1	0.5	
	4÷8	20*10 ³	10*10 ³	1.63*10 ⁵ /f ²	3.2*10 ⁴ /f	2*10 ⁵ /f ²	4*10 ⁴ /f ²			1	0.5	
	8÷25	20*10 ³	10*10 ³	2*10 ⁴ /f	4*10 ⁴ /f	2.5*10 ⁴ /f	5*10 ³ /f			1	0.5	
kHz	Basse frequenze	0,025÷0,82	500/f	250/f	20/f	4/f	25/f	5/f			1	0.5
		0,82÷1	610	250/f	24,4	5	30,7	6.25			1	0.5
		1÷2.5	610	250/f	24,4	5	30,7	6.25			1	0.5
		2.5÷3	610	250/f	24,4	5	30,7	6.25			0.4*f	0.2*f
		3÷65	610	87	24,4	5	30,7	6.25			0.4*f	0.2*f
		0,065÷0,1	610	87	1.6/f	5	2/f	6.25			0.4*f	0.2*f
		0,1÷0,15	610	87	1.6/f	5	2/f	6.25			40	20
		0,15÷1	610	87	1.6/f	0.73/f	2/f	0.92/f			40	20
		1÷10	610/f	87/f 0.5	1.6/f	0.73/f	2/f	0.92/f			40	20
		10÷110	61	28	0,16	0.073	0,2	0.092	10	2	40	20
110÷300	61	28	0,16	0.073	0,2	0.092	10	2				
300÷400	61	28	0,16	0.073	0,2	0.092	10	2				
400÷2000	3*f 0.5	1.375f 0.5	0.008*f 0.5	0.0037*f 0.5	0.01*f 0.5	0.0046*f 0.5	f/40	f/200				
GHz	2÷10	137	61	0,36	0.16	0,45	0.20	50	10			
	>10	137	61	0,36	0.16	0,45	0.20	50	10			

Tabella IV-3 : Livelli di riferimento delle linee guida ICNIRP (1998)

IV.3 Normative europee

IV.3.1 Raccomandazione 1999/519/CE [IV-2]

Il Consiglio dell'Unione Europea nel 1999 ha approvato, con il solo voto contrario dell'Italia, una Raccomandazione (1999/519/CE) per l'adozione, da parte di tutti gli Stati membri, di un sistema

⁷ f è espressa nelle unità indicate nella prima colonna

⁸ S_{eq} è la densità di potenza dell'onda piana equivalente

⁹ La frequenza va riportata in kHz

comune di protezione basato sulle indicazioni fornite dalle linee guida dell'ICNIRP. In questo documento il Consiglio raccomanda di stabilire un quadro normativo concordato, che sia basato sui migliori dati scientifici e sui pareri più autorevoli disponibili nel settore, e che contenga limiti fondamentali e livelli di riferimento per l'esposizione ai campi elettromagnetici, tenendo presente che i limiti di esposizione si basano sui soli effetti accertati. E' demandato tuttavia ai singoli Stati il compito di fornire un livello di protezione più elevato di quello di cui alla Raccomandazione. Inoltre, il Consiglio invita ciascuno Stato membro a tenere in considerazione i progressi delle conoscenze scientifiche e della tecnologia in relazione ai sistemi di protezione dalle radiazioni non ionizzanti. Per quanto riguarda i limiti di base ed i livelli di riferimento, negli allegati II e III della Raccomandazione sono forniti i valori numerici per la sola popolazione, valori che coincidono con quelli indicati dall'ICNIRP e già riportati nella Tabella IV-2 e nella Tabella IV-3, di cui riportiamo l'andamento con la frequenza nel Grafico IV-1e nel Grafico IV-2 Grafico IV-2rispettivamente per il campo elettrico e il campo magnetico.

Livelli di riferimento del campo elettrico E

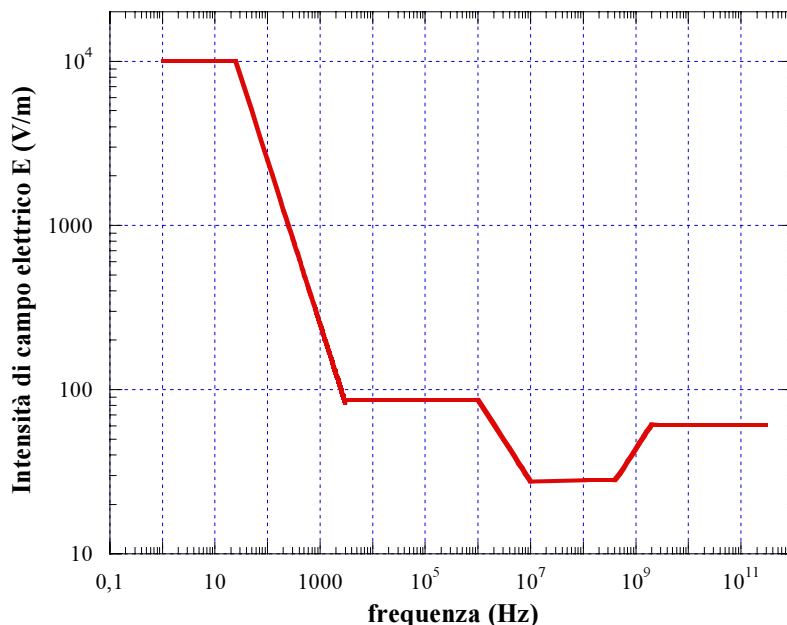


Grafico IV-1 : Livelli di riferimento per intensità di campo elettrico fissati dalla Raccomandazione Europea del 12/07/1999 per l'esposizione della popolazione.

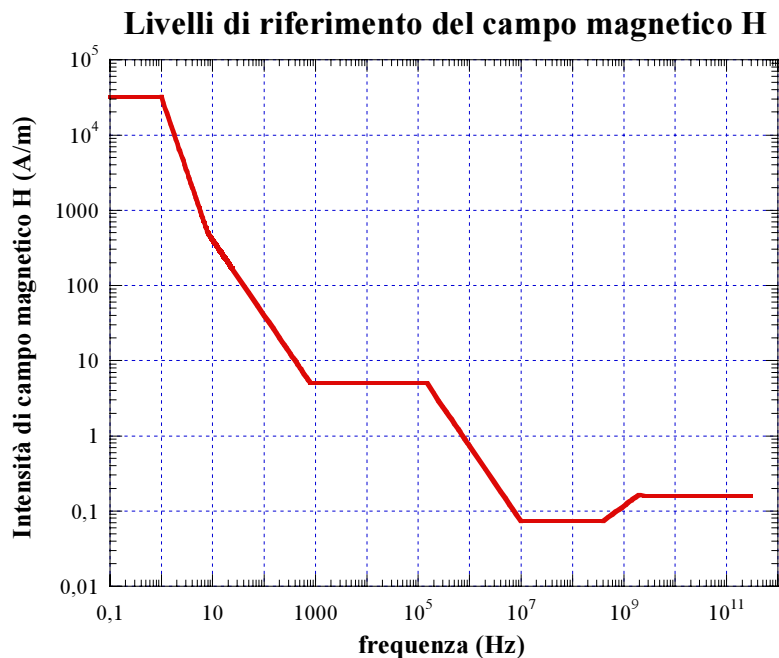


Grafico IV-2 : Livelli di riferimento per intensità di campo magnetico fissati dalla Raccomandazione Europea del 12/07/1999 per l'esposizione della popolazione.

IV.3.2 Posizione comune (CE) N. 10/2004

Per quanto riguarda i professionalmente esposti è di questo anno l'emanazione di una direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio dell'Unione Europea (Posizione comune (CE) N. 10/2004 G.U.C.E 16 marzo 2004) che stabilisce, le *“prescrizioni minime di protezione dei lavoratori contro i rischi per la loro salute e la loro sicurezza che derivano, o possono derivare dall'esposizione ai campi elettromagnetici (da 0 a 300 GHz) durante il lavoro”*. La direttiva prende in considerazione solo gli effetti nocivi a breve termine sperimentati sul corpo umano derivanti da circolazione di correnti indotte e dall'assorbimento di energia nonché da correnti di contatto. Non sono presi in considerazione ipotizzati effetti a lungo termine e i rischi risultanti da contatto con conduttori di tensione. In questa direttiva i valori soglia sono in tutto uguali a quelli forniti dalle linee guida dell'ICNIRP con la sola differenza che in questo contesto si parla di limiti di base e di valori di azione invece che di limiti di base e di livelli di riferimento (i valori di azione concettualmente coincidono con i livelli di riferimento). Nel Grafico IV-3 sono riportati al variare della frequenza i valori di azione del campo elettrico, mentre nel Grafico IV-4 sono mostrati quelli relativi al campo magnetico.

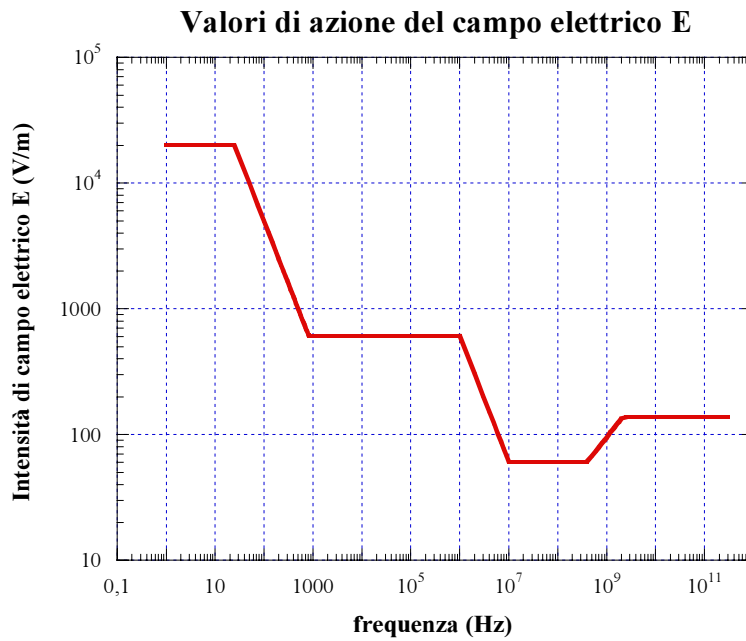


Grafico IV-3 : Valori di azione del campo elettrico stabiliti dalla Posizione Comune per i professionalmente esposti.

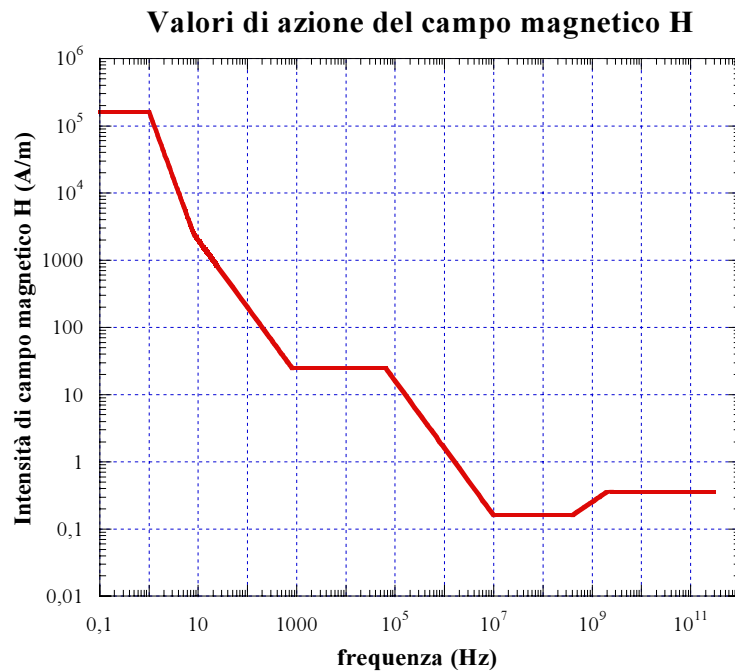


Grafico IV-4 : Valori di azione del campo magnetico stabiliti dalla Posizione Comune per i professionalmente esposti.

A livello europeo nel 1994 il CENELEC (Comitè Européen de Normalisation Electrotechnique), aveva approvato linee guida sperimentali per l'esposizione umana applicabili agli intervalli 0 – 10 kHz e 10 kHz – 300 GHz. Tali norme, pubblicate nel 1995 dal CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano) sono coerenti con le linee guida dell'ICNIRP e riportano i valori dei limiti di base dei livelli di riferimento. Le norme in questione sono:

- Norma CEI 111-1 “Esposizione umana ai campi elettromagnetici ad alta frequenza. Rapporto informativo”
- Norma CEI 111-2 “Esposizione umana ai campi elettromagnetici- Bassa frequenza (0 ÷ 10kHz)”
- Norma CEI 111-3 “Esposizione umana ai campi elettromagnetici - Alta frequenza (10 kHz ÷ 300 GHz) ”

Le norme CEI 111-2 e CEI 111-3 non sono più valide poiché sostituite dalla Raccomandazione Europea del 12 luglio 1999.

IV.4 Normativa Italiana [IV-3][IV-4][IV-5]

La situazione della normativa italiana in materia di protezione dalle esposizioni a campi elettromagnetici ha il suo punto di forza nella Legge quadro n.36 del 22.2.2001, entrata in vigore nel marzo del 2001. La Legge recepisce le raccomandazioni della Comunità Europea, ma con alcune diversità per quanto riguarda i limiti di esposizione. La Legge stabilisce le definizioni principali all'art.3 e precisa che deve intendersi:

- per esposizione: la condizione di una persona soggetta a campi elettrici, magnetici o elettromagnetici o a correnti di contatto di origine artificiale;
- per limite di esposizione: il valore del campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico considerato come valore di immissione, definito ai fini della tutela della salute da effetti acuti, che non deve essere superato in alcuna condizione di esposizione della popolazione e dei lavoratori;

¹⁰ Si veda Appendice 3

-
- per valore di attenzione: il valore del campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico considerato come valore di immissione che non deve essere superato negli ambienti abitativi, scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze prolungate e che costituisce misura di cautela degli effetti a lungo termine;
 - per obiettivi di qualità: i criteri localizzativi, gli standard urbanistici, le prescrizioni e le incentivazioni per l'utilizzo delle migliori tecnologie disponibili, nonché i valori di campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico definiti dallo Stato secondo le previsioni di cui all'art.4, comma 1 lettera a) ai fini della progressiva minimizzazione dell'esposizione ai campi medesimi.

L'introduzione di questi valori è una novità della normativa italiana che non trova riscontro nella Raccomandazione Europea;

La Legge prevede (art.4) che i limiti di esposizione, i valori di attenzione e gli obiettivi di qualità vengono fissati con i seguenti strumenti:

- A) Per la popolazione con Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri su proposta del Ministro dell'Ambiente di Concerto con il Ministro della Sanità;
- B) Per i lavoratori e le lavoratrici, ferme restando le disposizioni previste dal Decreto Legislativo 19.9.94 n. 626 e successive modificazioni, con Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri, su proposta del Ministro della Sanità, sentiti i Ministri dell'Ambiente e del lavoro e della previdenza sociale.

Per quel che concerne il punto A), in data 8.7.2003 sono stati emanati, con notevole ritardo rispetto a quanto stabilito dalla legge 36/01, che in realtà prevedeva la loro emanazione entro 60 giorni dall'entrata in vigore della legge medesima, due Decreti del Presidente del Consiglio dei Ministri. Uno riguardante "la fissazione dei 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" (pubblicato sulla G.U. n. 200 del 29.8.2003), dove per elettrodotto si intende l'insieme delle linee elettriche, delle sottostazioni e delle cabine di trasformazione; il secondo concernente la "fissazione dei 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” (pubblicato sulla G.U. n. 199 del 28.8.2003). Per tutti i campi generati a frequenze comprese nell’intervallo fra 0 e 100 kHz con l’esclusione di quelli a 50 Hz generati dagli elettrodotti, il Decreto n. 200 stabilisce che i limiti per le esposizioni sono quelli indicati dalla Raccomandazione Europea del 1999, mentre per i campi generati dagli elettrodotti sono stabiliti i seguenti valori:

- per i limiti di esposizione:
 - 100 μ T per l’induzione magnetica
 - 5 kV/m per il campo elettrico
- per i valori di attenzione
 - 10 μ T per l’induzione magnetica (considerata come mediana nelle 24 ore)
- per gli obiettivi di qualità
 - 3 μ T per l’induzione magnetica (considerata come mediana nelle 24 ore)

A titolo di misura cautelare per la protezione da possibili effetti a lungo termine, i valori di attenzione e gli obiettivi di qualità si devono ottenere in corrispondenza di aree di gioco per l’infanzia, di ambienti abitativi, di ambienti scolastici e di luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore. Gli obiettivi di qualità si riferiscono però alla progettazione di nuovi elettrodotti in corrispondenza di tali aree e alla progettazione di nuovi insediamenti e di nuove dette aree in vicinanza di elettrodotti preesistenti. In realtà ad una più attenta osservazione, per tutto l’intervallo di frequenze tra 0 e 100 kHz i limiti di esposizione della normativa italiana seguono i livelli di riferimento della Raccomandazione Europea, sia per quanto riguarda i valori di induzione magnetica sia quelli di campo elettrico.

Il Decreto n. 199 relativo a campi emessi a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz stabilisce che per sorgenti di campi elettromagnetici generati in questo intervallo di frequenze non riconducibili ai sistemi fissi di telecomunicazione e radiotelevisivi si applica l’insieme delle restrizioni stabilite dalla Raccomandazione Europea del 12 luglio 1999. Per i campi generati dai sistemi fissi di telecomunicazione e radiotelevisivi invece stabilisce:

- per i limiti di esposizione i valori sintetizzati nella tabella di seguito:

Frequenze	Intensità di campo elettrico E (V/m)	Intensità di campo magnetico H (A/m)	Densità di potenza D (W/m ²)
0.1 ÷ 3 MHz	60	0.2	
3 ÷ 3000 MHz	20	0.05	1
3 ÷ 300 GHz	40	0.01	4

Tabella IV-4 : Livelli di esposizione decreto n.199 del 29.8.2003

- per i valori di attenzione sono riportati nella tabella seguente:

Frequenze	Intensità di campo elettrico E (V/m)	Intensità di campo magnetico H (A/m)	Densità di potenza D (W/m ²)
0.1 MHz ÷ 3 MHz	6	0.016	
3 MHz ÷ 300 GHz	6	0.016	0.10

Tabella IV-5 : Valori di attenzione decreto n.199 del 29.8.2003

- per gli obiettivi di qualità i valori sono riportati nella tabella seguente:

Frequenze	Intensità di campo elettrico E (V/m)	Intensità di campo magnetico H (A/m)	Densità di potenza D (W/m ²)
0.1 MHz ÷ 3 MHz	6	0.016	
3 MHz ÷ 300 GHz	6	0.016	0.10

Tabella IV-6 -. Obiettivi di qualità Decreto n.199 del 29.8.2003

Per i limiti di esposizione i valori sono da intendersi come valori efficaci ed ottenuti mediando su un'area equivalente alla sezione verticale del corpo umano e su un qualsiasi intervallo di 6 minuti. Da notare che rispetto ai livelli di riferimento indicati nella Raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea del 1999, l'Italia ha limiti più restrittivi come si può osservare nel Grafico IV-5 per l'intensità del campo elettrico E e nel Grafico IV-6 per l'intensità del campo magnetico H. Questi due grafici mostrano l'andamento dei limiti di esposizione sull'intero intervallo di frequenze preso in esame da entrambi i Decreti, ovvero da 0 a 300 GHz. Inoltre si può osservare la coincidenza dei limiti fissati dal Decreto n. 200 con quelli stabiliti nella Raccomandazione Europea nell'intervallo 0 – 100 kHz.

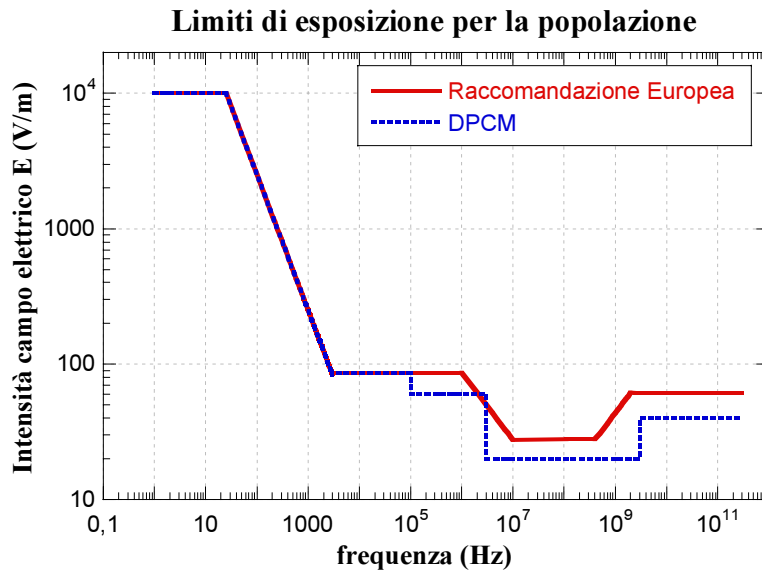


Grafico IV-5 : Confronto tra i limiti di esposizione per l'intensità di campo elettrico stabiliti dalla normativa italiana e i livelli di riferimento fissati dal Consiglio dell'Unione Europea.

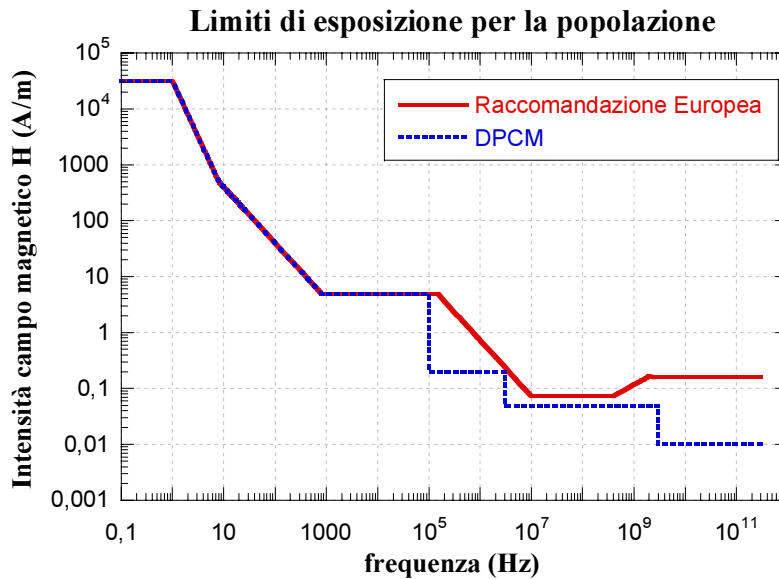


Grafico IV-6 : Confronto tra i limiti di esposizione per l'intensità di campo magnetico stabiliti dalla normativa italiana e i livelli di riferimento fissati dal Consiglio dell'Unione Europea.

Per quanto concerne i valori di attenzione sono stabiliti per la protezione da possibili effetti a lungo termine dovuti ai campi alle frequenze in oggetto del Decreto, per esposizioni di durata non

inferiore alle quattro ore in ambienti abitativi interni e loro pertinenze esterne (balconi, terrazze ecc.). Sono ottenuti mediando su un'area equivalente alla sezione verticale del corpo umano e su un qualsiasi intervallo di 6 minuti.

Da notare, infine che per gli obiettivi di qualità si parla di valori di campo calcolato o misurato nelle aree intensamente frequentate. Anche questi valori sono ottenuti mediando su un'area equivalente alla sezione verticale del corpo umano e su un qualsiasi intervallo di 6 minuti. Inoltre in questo Decreto è affrontato anche il caso di esposizione multipla e viene stabilito che la somma dei relativi contributi normalizzati deve essere minore di uno. In caso contrario dovrà essere effettuata una riduzione a conformità come descritto nell'allegato C del Decreto stesso.

Per quanto riguarda i professionalmente esposti deve ancora essere emanato un decreto apposito e per ora l'unico riferimento possibile è la legge quadro 626 sulla sicurezza dei lavoratori.

IV.5 Bibliografia

- [IV-1] *“Linee guida ICNIRP”* dal sito <http://www.icnirp.org>
- [IV-2] *“Raccomandazione Europea 12 luglio 1999”* pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale Comunità Europea del 30 luglio 1999
- [IV-3] *“Legge quadro n. 36 del 22 febbraio 2001 sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici ”*, pubblicato sulla Gazzetta ufficiale il 7 marzo 2001
- [IV-4] *“DPCMn 199 8 luglio 2003 relativo alla fissazione dei limiti di esposizione dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz”* pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale il 28 agosto 2003.
- [IV-5] *“DPCM n. 200 8 luglio 2003 (50 Hz) relativo alla fissazione dei 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”* pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale il 29 agosto 2003

Parte terza: “Tecnologie e tecniche di riduzione”

V Tecniche di riduzione del campo magnetico generato da elettrodotti

V.1 Introduzione

Utilizzando quanto sino ad ora descritto, si ha che alle basse frequenze (50 Hz) non esiste correlazione tra il campo elettrico ed il campo magnetico: il primo dipende dalla tensione elettrica impressa agli impianti, il secondo è legato alle correnti circolanti negli impianti stessi. E' lecito, pertanto, trattare i campi separatamente, come generati da sorgenti praticamente distinte. Per quanto riguarda il campo elettrico (capitolo III) l'andamento tipico decresce allontanandosi dall'asse della linea, con valore massimo che non supera gli 8 kV/m per una semplice terna a 380 kV. Spostandosi a distanza pari alla fascia di rispetto (28 m nel caso della terna in esame) il valore del campo scende al di sotto di 3 kV/m quindi ben al di sotto del limite di 6 kV/m stabiliti dalla normativa. Inoltre, come visto nel capitolo II, il corpo umano è in grado di schermare il campo elettrico. Infatti, considerando ad esempio un valore massimo di 10 kV/m, la densità di energia totale prodotta nel corpo di un uomo è di circa $4.42 \cdot 10^{-4} \text{ J/m}^3$ pari ad una densità di potenza nel corpo di circa $10 \text{ } \mu\text{W/m}^3$ che è molto più piccola del calore prodotto dal metabolismo basale, quindi il riscaldamento provocato è del tutto trascurabile. A tutto ciò è da aggiungere che alla frequenza in esame il campo elettrico è facilmente schermabile attraverso strutture conduttrici. Differente è il discorso per il campo magnetico. Intanto il corpo umano non scherma come nel caso di campo elettrico. Secondo, come visto nel capitolo III c'è un massimo di 22 μT (sempre per una terna a 380 kV e corrente in servizio normale pari a 1500 A) e ponendosi a distanza pari alla fascia di rispetto si hanno ancora 5 μT che sono fuori legge per quanto previsto dalla normativa per elettrodotti di nuova costruzione e per quanto riguarda il raggiungimento degli obiettivi di qualità. Per tutti questi motivi non si prenderanno in esame tecniche di mitigazione per il campo elettrico, in quanto non risultano problematiche critiche, ma saranno affrontate tutte quelle che consentono una riduzione del campo magnetico.

I valori di campo magnetico emesso, come già visto nelle formule del capitolo I, dipendono direttamente ed in modo prevalente dalla corrente di esercizio; poiché su tale grandezza non è possibile intervenire, diminuendone l'intensità, è necessario agire sulle distanze relative ai conduttori, o sulla creazione di campi uguali di intensità ma di verso opposto, oppure sull'utilizzo di materiali ferromagnetici capaci di deviare il flusso del campo magnetico.

Il presente lavoro offre una panoramica su tali metodologie, con particolare attenzione alle tecniche di riduzione del campo magnetico prodotto dalle linee elettriche aeree ed in cavo. I principali metodi sviluppati riguardano la configurazione geometrica della linea e cioè la disposizione dei conduttori, nudi o in cavo, e la forma dei sostegni. Inoltre varie indagini sono state condotte sulle modalità di installazione dei cavi interrati in configurazioni monopolari, allo scopo di ridurre l'intensità del campo magnetico rilevabile in superficie. Infine sono state analizzate diverse configurazioni di schermi di materiale conduttore e ferromagnetico relativamente ai soli cavi interrati. Viene fatto anche cenno alla mitigazione del campo magnetico prodotto dalle cabine di trasformazione primarie e secondarie.

Per poter meglio comprendere su quali parametri andranno ad agire i possibili interventi di riduzione si premetterà la trattazione analitica del campo prodotto da una terna trifase.

V.2 Calcolo del campo magnetico prodotto dalle linee aeree [V-1] [V-2]

Il calcolo del campo magnetico a frequenza industriale prodotto dalla linea aerea multiconduttore è eseguito utilizzando la semplice legge di Biot-Savart. Per tenere conto della presenza del terreno si applica il metodo delle immagini elettriche. A ciascun conduttore della linea in Figura V-1 (a), si associa il conduttore immagine ottenendo la configurazione rappresentata in Figura V-1 (b). [V-1] I conduttori immagine si possono considerare in posizione simmetrica rispetto ai conduttori sorgente, solo nel caso di terreno di conducibilità infinita. In realtà se il terreno presenta una conducibilità finita γ con valori tipici compresi tra 0,001 S/m e 0,01 S/m la posizione del conduttore immagine è definita dalla somma dell'altezza del corrispondente conduttore sorgente e della profondità di penetrazione della corrente nel terreno, data dall'espressione:

$$\delta_p = (\pi f \mu_o \gamma)^{-1/2} \quad \text{Eq. V-1}$$

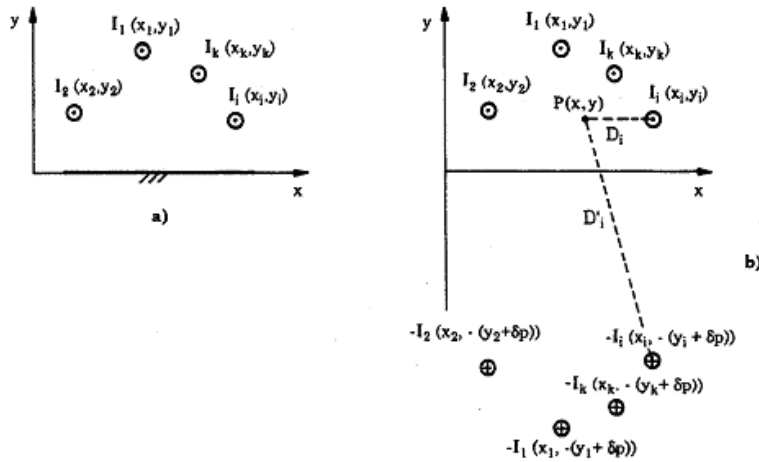


Figura V-1 : Configurazione di linea aerea sul terreno (a) e rappresentazione equivalente con correnti immagini (b)

Si deve peraltro osservare che la profondità di penetrazione nel terreno a 50 Hz risulta compresa tra 711 m e 2250 m per valori di conducibilità rispettivamente di 0,01 S/m e 0,001 S/m. Ciò significa che il campo magnetico in punti prossimi alla linea è scarsamente influenzato dalla presenza dei conduttori immagine, dunque la presenza del terreno è a tal fine poco rilevante.

L'induzione magnetica prodotta dal generico i -esimo conduttore nel punto P di Figura V-1 (b), presenta componenti secondo l'asse x e l'asse y , esprimibili nella seguente forma :

$$B_{xi} = -\frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{y - y_i}{D_i^2} \right) I_i \quad \text{Eq. V-2}$$

$$B_{yi} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{x - x_i}{D_i^2} \right) I_i \quad \text{Eq. V-3}$$

in cui la distanza D_i vale :

$$D_i = \left[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \right]^{1/2} \quad \text{Eq. V-4}$$

Nel caso in cui si consideri l'influenza dei conduttori immagine, si hanno le seguenti espressioni:

$$B_{xi} = -\frac{\mu_o}{2\pi} \left(\frac{y - y_i}{D_i^2} - \frac{y + y_i + \delta_p}{D_i'^2} \right) I_i \quad \text{Eq. V-5}$$

$$B_{yi} = \frac{\mu_o}{2\pi} \left(\frac{x - x_i}{D_i^2} - \frac{x - x_i}{D_i'^2} \right) I_i \quad \text{Eq. V-6}$$

in cui la distanza dell'iesimo conduttore immagine dal punto P è data da:

$$D_i' = \left[(x - x_i)^2 + (y + y_i + \delta_p)^2 \right]^{1/2} \quad \text{Eq. V-7}$$

Le componenti dell'induzione risultante nel punto P si ottengono considerando le componenti parziali nelle seguenti espressioni:

$$B_x = \sum_{i=1}^n B_{xi} \quad \text{Eq. V-8}$$

$$B_y = \sum_{i=1}^n B_{yi} \quad \text{Eq. V-9}$$

Qualora si voglia tenere conto della variazione dell'altezza dei conduttori, descritta da una catenaria, si deve utilizzare una adatta procedura di calcolo nella quale i conduttori vengono discretizzati e ciascun tratto di fissata altezza sul terreno è considerato sorgente elementare di campo magnetico. Il campo risultante prodotto dalla linea aerea trifase nel punto *P* ruota attorno al proprio punto di applicazione descrivendo un'ellisse; si dice pertanto che il campo è polarizzato ellitticamente. Il valore efficace *B* di un campo polarizzato ellitticamente si può calcolare nel modo seguente:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad \text{Eq. V-10}$$

in cui *B_x* e *B_y* sono i valori efficaci lungo gli assi x e y del campo *B*.

Si ponga il caso delle linee in configurazione piana e a trifoglio, come mostrato in Figura V-2.[V-2]

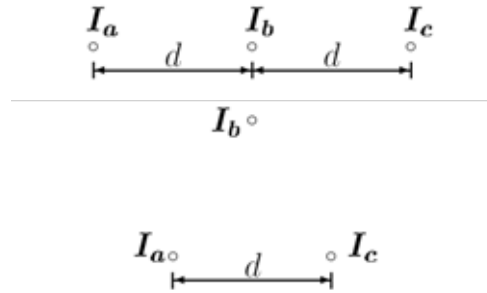


Figura V-2 : Configurazioni in posa piana e a trifoglio.

Se la distanza r dal punto in cui si vuole calcolare il campo è molto maggiore della reciproca distanza tra i conduttori d di un sistema trifase, supposto simmetrico ed equilibrato con corrente di linea di valore efficace I , è possibile operare uno sviluppo in serie binomiale arrestato al 2° ordine. Si ottengono le seguenti formule rispettivamente per la linea in configurazione piana e a trifoglio:

$$B(r) \cong \frac{\sqrt{3}dI}{5r^2} \quad \text{Eq. V-11}$$

$$B(r) \cong \frac{\sqrt{3}dI}{5\sqrt{2}r^2} \quad \text{Eq. V-12}$$

Nel caso di linea a doppia terna, si distinguono due casi:

1. Linee simmetriche.
2. Linee antisimmetriche.

Le cui geometrie sono mostrate in Figura V-3 [V-2]

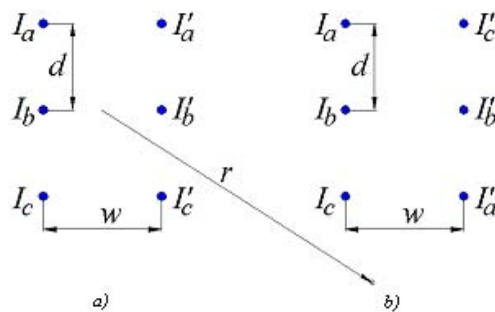


Figura V-3 : Disposizione della linea a doppia terna simmetrica (a) e antisimmetrica (b).

Nel primo caso il campo è dato dalla seguente espressione:

$$B(r) \cong \frac{\sqrt{3}\mu_0 d}{\pi r^2} I \quad \text{Eq. V-13}$$

Nel secondo, è necessario arrestare lo sviluppo in serie al secondo ordine, in quanto la componente del 2° ordine risulta nulla:

$$B(r) \cong \frac{\mu_0 d}{\pi r^3} \sqrt{d^2 + 3wI} \quad \text{Eq. V-14}$$

V.3 Schermatura del campo magnetico a frequenza industriale

V.3.1 Calcolo dell'efficienza di schermatura (SE) degli schermi elettromagnetici [V-1].

La schermatura del campo magnetico a frequenza industriale interessa fenomeni elettromagnetici che si sviluppano nella regione di campo vicino ($r \ll \lambda_{50\text{Hz}}/2\pi$) per sorgenti a bassa impedenza.

Si consideri la configurazione riportata in Figura V-4 [V-1] in cui la sorgente di campo magnetico, costituita da un conduttore rettilineo indefinito percorso da corrente sinusoidale di frequenza f , sia schermata da una lastra piana indefinita di spessore d , avente conducibilità σ , permeabilità μ , permittività ϵ_s .

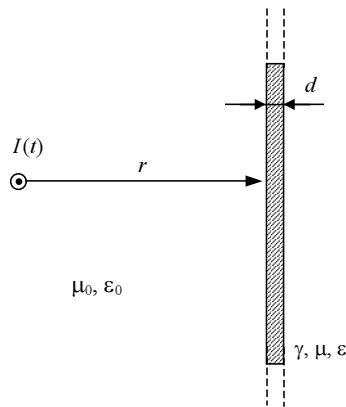


Figura V-4 : Configurazione schermante elementare.

La prestazione dello schermo, che per semplicità è supposto indefinito in modo da non dovere considerare gli effetti dei bordi, può essere analizzata mediante una procedura analitica basata sull'analogia esistente tra i fenomeni propagativi del campo elettromagnetico nello schermo e delle onde di tensione e corrente in una linea a costanti distribuite. Il metodo presenta notevole semplicità sia nella formulazione che nell'applicazione, ed inoltre consente di motivare fisicamente i fenomeni fondamentali che governano il processo di schermatura.

Secondo la procedura sviluppata in analogia al modello di una linea di trasmissione, l'efficienza di schermatura (SE) del campo magnetico è definita dalla seguente espressione:

$$SE = 20 \log(H / \hat{H}) \quad \text{Eq. V-15}$$

in cui H e \hat{H} sono rispettivamente il campo magnetico in un punto in assenza e in presenza dello schermo. Utilizzando il modello della linea di trasmissione l'efficienza di schermatura può essere rappresentata nella seguente forma:

$$SE = R_{dB} + A_{dB} + B_{dB} \quad \text{Eq. V-16}$$

Il coefficiente R_{dB} tiene conto delle riflessioni iniziali sulla prima faccia, dovute alla differenza tra l'impedenza d'onda del campo incidente e l'impedenza caratteristica dello schermo. Il coefficiente A_{dB} è dovuto all'attenuazione che subisce la prima onda nella propagazione lungo lo schermo. Il coefficiente B_{dB} tiene conto delle riflessioni multiple che si verificano su entrambe le facce dello schermo nel fenomeno di propagazione; si noti che tali riflessioni contribuiscono ad aumentare il campo trasmesso nella regione oltre lo schermo, e pertanto il coefficiente B_{dB} ha valore negativo, al contrario di R_{dB} e A_{dB} . Il coefficiente di riflessione R_{dB} , il coefficiente di assorbimento A_{dB} ed il coefficiente di riflessioni multiple B_{dB} hanno rispettivamente le seguenti espressioni:

$$R_{dB} = 20 \log \left| \frac{(\eta_s + z_w)^2}{4\eta_s z_w} \right| \quad \text{Eq. V-17}$$

$$A_{dB} = 20 \log |e^{m_s d}| \quad \text{Eq. V-18}$$

$$B_{dB} = 20 \log \left| 1 - \left(\frac{\eta_s - z_w}{\eta_s + z_w} \right)^2 e^{-\bar{m}_s d} \right| \quad \text{Eq. V-19}$$

in cui, nella regione di campo vicino, l'impedenza intrinseca dello schermo η_s , la costante di propagazione dello schermo m_s e l'impedenza d'onda in aria della sorgente di campo magnetico z_w assumono rispettivamente le seguenti espressioni:

$$\eta_s = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} \quad \text{Eq. V-20}$$

$$m_s = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} \quad \text{Eq. V-21}$$

$$z_w = \frac{E_\theta}{H_\phi} = \eta_0 \frac{j/(\beta_0 r) + 1/(\beta_0 r)^2 - j/(\beta_0 r)^3}{j/(\beta_0 r) + 1/(\beta_0 r)^2} \cong 2\pi f \mu_0 r \quad \text{Eq. V-22}$$

L'impedenza intrinseca dell'aria e la costante di fase sono rispettivamente

$$\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} \quad \text{Eq. V-23}$$

$$\beta_0 = \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0} \quad \text{Eq. V-24}$$

Per schermi in materiale conduttore o ferromagnetico la Eq. V-20 e la Eq. V-21 si semplificano secondo le espressioni:

$$\eta_s = (1 + j)\sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \quad \text{Eq. V-25}$$

$$m_s = (1 + j)\sqrt{\frac{(\omega\mu\sigma)}{2}} \quad \text{Eq. V-26}$$

Nell'ipotesi che risulti $z_w \gg \eta_s$ (schermo buon conduttore) e ritenendo valida la Eq. V-22, il coefficiente di riflessione diviene:

$$R_{dB} = -102 + 10 \log \frac{\sigma r^2}{\mu} \text{ dB} \quad \text{Eq. V-27}$$

Minore è l'impedenza dello schermo, maggiore è la perdita per riflessione. L'impedenza dello schermo può essere minimizzata usando materiali con elevata conducibilità e bassa permeabilità. Se con tale espressione si ottiene un numero negativo, R_{dB} si pone uguale a zero ed inoltre si trascura il termine correttivo per le riflessioni successive. Se invece il valore è positivo, la (6) fornisce scarsa precisione in quanto l'ipotesi $z_w \gg \eta_s$ non è valida.

Il coefficiente di riflessione multipla vale:

$$B_{dB} = 20 \log \left| 1 - e^{-\frac{d}{\delta_p}} \right| \text{ dB} \quad \text{Eq. V-28}$$

In cui δ_p è la profondità di penetrazione:

$$\delta_p = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad \text{Eq. V-29}$$

Se lo spessore $d \gg \delta_p$ si può ritenere nullo B_{dB} . Ciò non avviene, generalmente, a frequenza industriale per i materiali conduttori; i materiali ferromagnetici, invece, grazie alla elevata permeabilità presentano valori di profondità di penetrazione inferiori che consentono di trascurare B_{dB} .

Il coefficiente di assorbimento assume la seguente forma:

$$A_{dB} = 20 \log \left| e^{-\frac{d}{\delta_p}} \right| = 8,69 \frac{d}{\delta_p} \text{ dB} \quad \text{Eq. V-30}$$

ovvero

$$A_{dB} = 15,4d \sqrt{\mu \sigma f} \text{ dB} \quad \text{Eq. V-31}$$

Tale espressione mostra valori crescenti con la conducibilità e la permeabilità magnetica dello schermo.

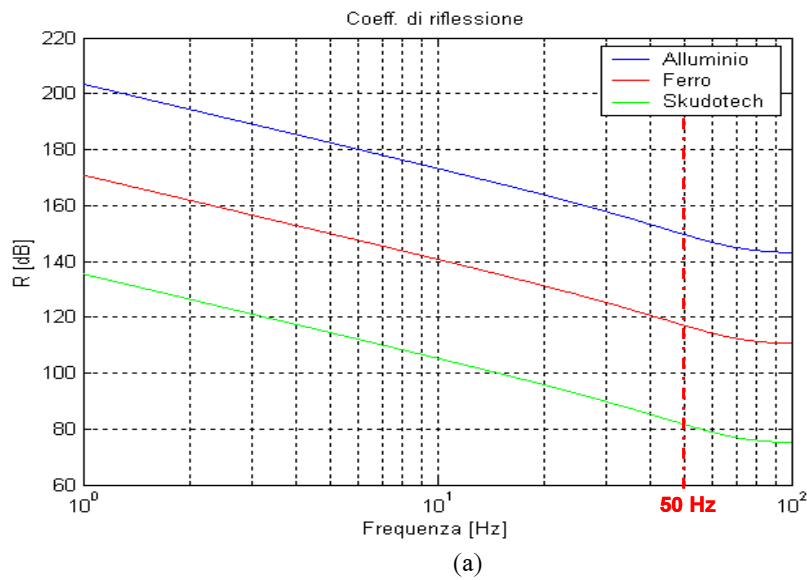
Lo schermo sia costituito con uno dei tre differenti materiali aventi i valori di conducibilità, permittività relativa e permeabilità relativa riportati in Tabella V-1.

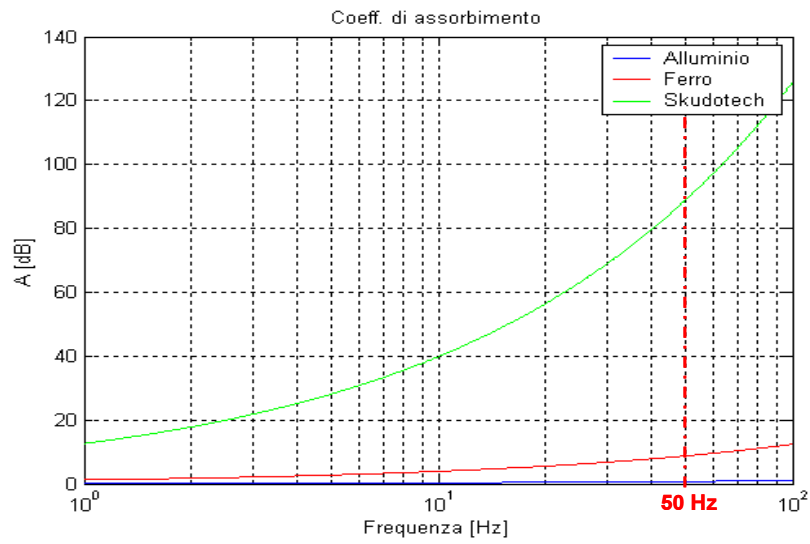
Materiale	σ [S/m]	ϵ_r	μ_r
Alluminio	$3,70 \cdot 10^7$	1	1
Skudotech®	$1,77 \cdot 10^6$	1	300.000
Ferro	$1,03 \cdot 10^7$	1	500

Tabella V-1 : Caratteristiche elettriche e magnetiche dei materiali considerati.

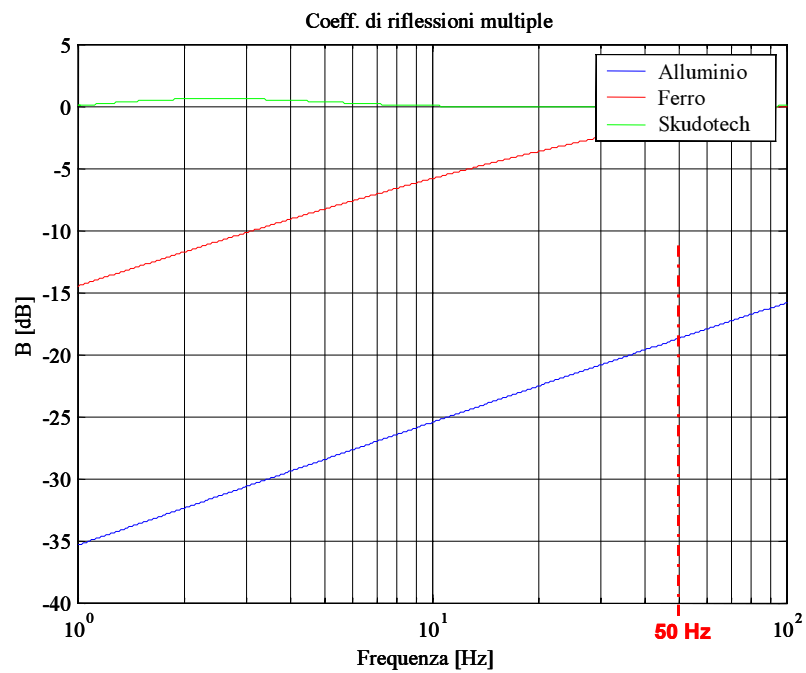
Lo Skudotech® è un materiale ferromagnetico con elevata permeabilità prodotto dalla Selite s.r.l.

La Figura V-5 mostra gli spettri a bassa frequenza dei coefficienti di riflessione (R_{dB}), di assorbimento (A_{dB}), di riflessioni multiple (B_{dB}) e di efficienza di schermatura (SE_{dB}) calcolati per ciascuno dei materiali considerati per la distanza conduttore-schermo $r=10$ cm e lo spessore dello schermo $d=1$ mm.





(b)



(c)

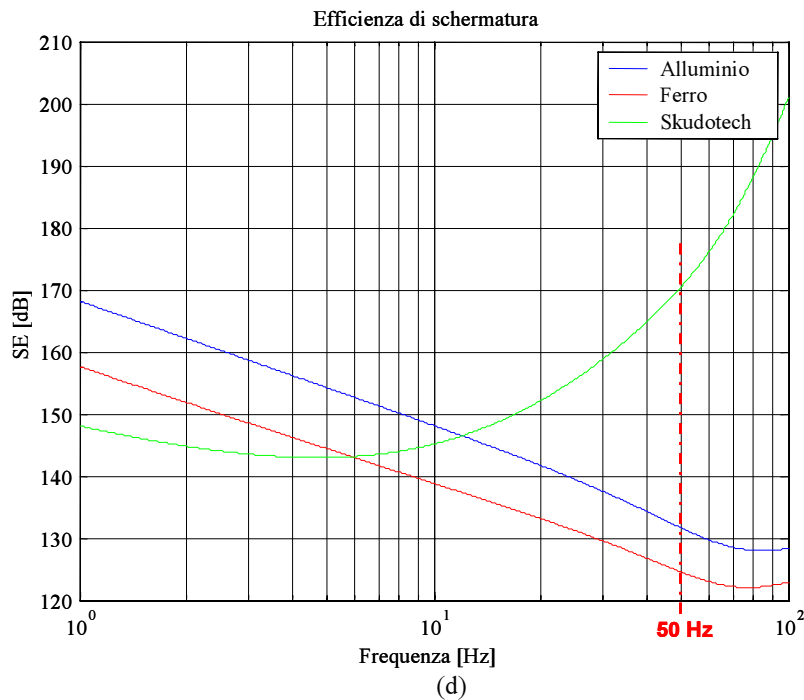


Figura V-5 : Spettri dei coefficienti di riflessione (a), di assorbimento (b) e di riflessioni multiple (c) e dell'efficienza di schermatura (d) [1].

In generale, a frequenza industriale, i materiali magnetici sono ritenuti i più indicati per la schermatura in quanto, pur presentando una conducibilità minore rispetto ai materiali conduttori, hanno una permeabilità di diversi ordini di grandezza più elevata.

V.3.2 *Caratterizzazione del campo magnetico generato da linee trifasi [V-3].*

Nelle pratiche realizzazioni, le caratteristiche geometriche della sorgente e della configurazione schermante possono essere notevolmente complesse e dunque richiedono lo sviluppo di procedure numeriche per il calcolo dell'efficienza di schermatura. A tal fine, viene preliminarmente svolta un'analisi per valutare l'influenza della configurazione geometrica sulla distribuzione spaziale del campo magnetico.

Sono state analizzate tre linee di energia in cavo rispettivamente in posa orizzontale, verticale e a trifoglio, le cui sezioni trasversali sono mostrate in Figura V-6. I tre conduttori, supposti di sezione infinitesima, sono percorsi da correnti sinusoidali di frequenza 50 Hz e valore efficace di 100 A,

costituenti una terna simmetrica. Non viene considerato l'effetto del terreno, in quanto il suo contributo è trascurabile.

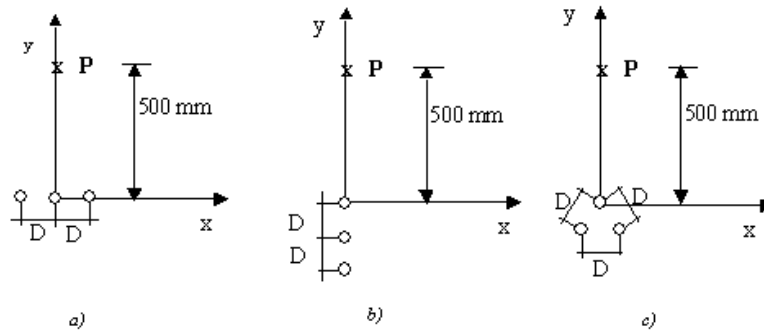


Figura V-6 : Sezioni trasversali delle linee in configurazione di posa piana (a), verticale (b) e a trifoglio (c)

Nella geometria bidimensionale si calcolano le componenti di induzione magnetica secondo i due assi cartesiani in un punto fissato aumentando la distanza tra i conduttori da 10 mm fino a 250 mm. L'induzione magnetica B e le sue componenti lungo l'asse x e l'asse y sono stati calcolati in un punto P situato a 0,5 m lungo l'asse y , per differenti valori della mutua distanza D tra i conduttori. I risultati sono riportati in Figura V-7. Si può notare che nel caso di cavi in posa orizzontale la componente B_y , prodotta dai due conduttori laterali, è quella dominante mentre la componente B_x , dovuta principalmente al conduttore centrale, è fortemente attenuato dalla presenza dei cavi laterali solo per bassi valori di D . Per valori più elevati di D , tra 100 mm a 250 mm, il valore di D aumenta di 30 volte. Nella configurazione di posa verticale, vi è la sola componente B_x nel punto P , e l'influenza della distanza D è più debole del caso di posa orizzontale. Nella configurazione di posa a trifoglio, la componente B_x prodotta dal conduttore centrale è attenuata dalla presenza degli altri due conduttori, e all'aumentare di D il campo B aumenta con lo stesso andamento già visto per la configurazione in posa verticale.

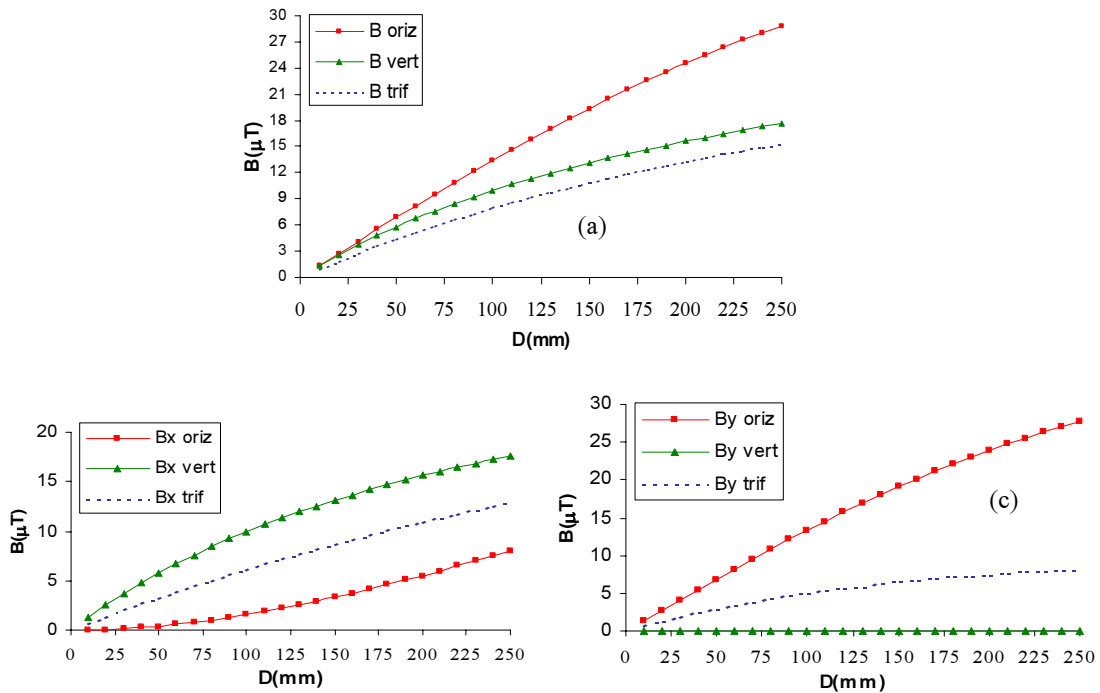


Figura V-7 : Induzione B (a) e sue componenti lungo gli assi x (b) e y (c) calcolati nel punto P di Figura V-1 in funzione della mutua distanza D tra i conduttori

V.3.3 *Prestazioni degli schermi elettromagnetici [V-3].*

La precedente analisi permette di valutare le prestazioni schermanti degli schermi aperti in relazione a differenti configurazioni di posa delle sorgenti di campo magnetico, costituite da terne di conduttori in posa orizzontale e verticale, percorsi da correnti di valore efficace di 100 A che costituiscono un sistema trifase equilibrato. Il calcolo è stato effettuato con un software basato sul metodo degli elementi finiti bidimensionale. Si suppone che lo schermo piano e di lunghezza infinita sia di materiale di conducibilità infinita (PEC) o di permeabilità magnetica infinita (PMC). Si considera la configurazione di Figura V-8 in cui la linea è nel piano parallelo allo schermo alla distanza di 10 cm. Lo schermo ha una larghezza di 2 m e uno spessore di 3 mm. L'induzione magnetica è calcolata ad una distanza di 2 m dallo schermo.

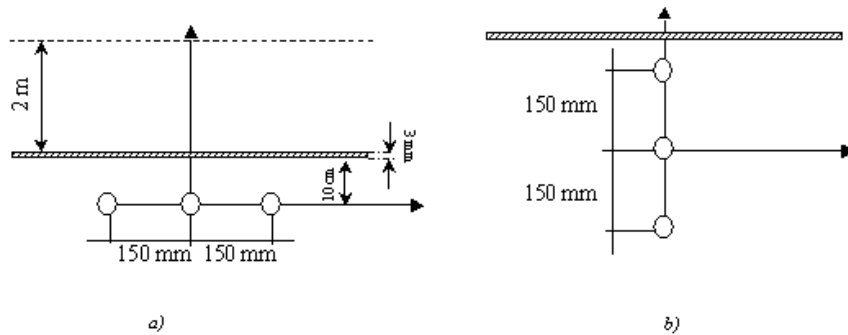


Figura V-8 : Configurazione dei conduttori in posa orizzontale (a) e verticale (b) [3].

La

Figura V-9 mostra i profili di induzione magnetica in assenza di schermo e con schermo PEC o PMC.

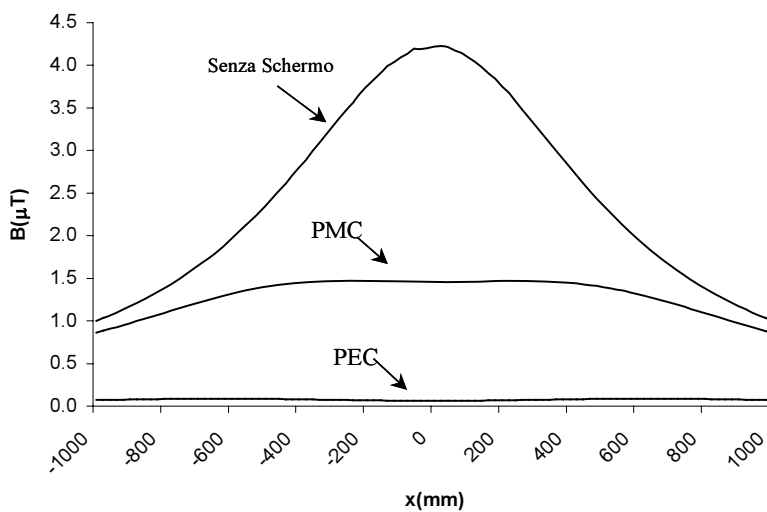


Figura V-9 : Profilo laterale di induzione magnetica a distanza $D = 2$ m per posa orizzontale.

Il calcolo è ripetuto per la configurazione di Figura V-10 in cui la linea è nel piano ortogonale allo schermo.

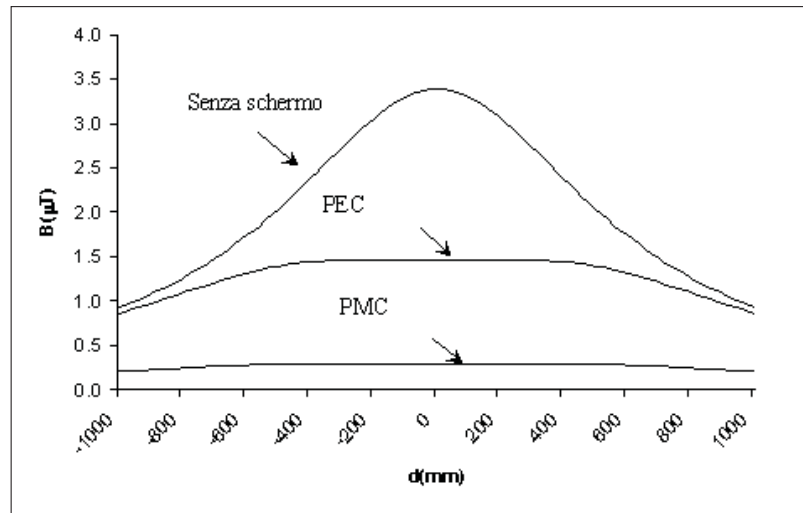


Figura V-10 : Profilo laterale di induzione magnetica a distanza $D = 2$ m per posa verticale [V-3].

Gli andamenti ottenuti mostrano come sia conveniente utilizzare materiali conduttori per schermare la configurazione di posa orizzontale e materiali ferromagnetici per la configurazione di posa verticale.

I motivi di tali prestazioni vanno ricercati nelle componenti del campo magnetico in assenza dello schermo. Infatti, i materiali buoni conduttori attenuano il campo in virtù della legge di Lenz: le correnti indotte nello schermo producono un campo magnetico che si oppone al campo che le ha generate. Tale modalità di schermatura è comunemente detta “eddy currents cancellation”. La modalità di schermatura dei materiali magnetici è invece definita “flux shunting”: la presenza del materiale magnetico crea una via di richiusura a bassa riluttanza per il flusso. Per configurazione verticale, nei punti vicini all’asse, il valore della componente normale del campo magnetico è trascurabile e, dunque, risultano modeste le correnti indotte nello schermo, mentre risulta elevata la componente tangenziale, che è efficacemente schermata dai materiali ferromagnetici. Quando la configurazione è orizzontale il comportamento è inverso.

Si intende ora valutare l’efficienza di schermatura di materiali conduttori e ferromagnetici rimuovendo l’ipotesi di conducibilità e permeabilità infinita. Si considera quindi l’alluminio con conducibilità $\sigma = 2,8 \cdot 10^7$ S/m e ferro con $\sigma = 1,03 \cdot 10^7$ S/m e permeabilità magnetica relativa di 500,

1.000, 2.000 e 4.000. Per le suddette configurazioni sono stati calcolati i profili di induzione magnetica. Sono riportati gli andamenti calcolati per tre distanze, pari a 100 mm, 1000 mm e 2000 mm, e lungo l'asse della sorgente. La Figura V-11 mostra che per punti vicini allo schermo, a causa della minore profondità di penetrazione, l'effetto schermante dei materiali magnetici risulta maggiore, mentre nei punti lontani dall'asse è preferibile l'alluminio.

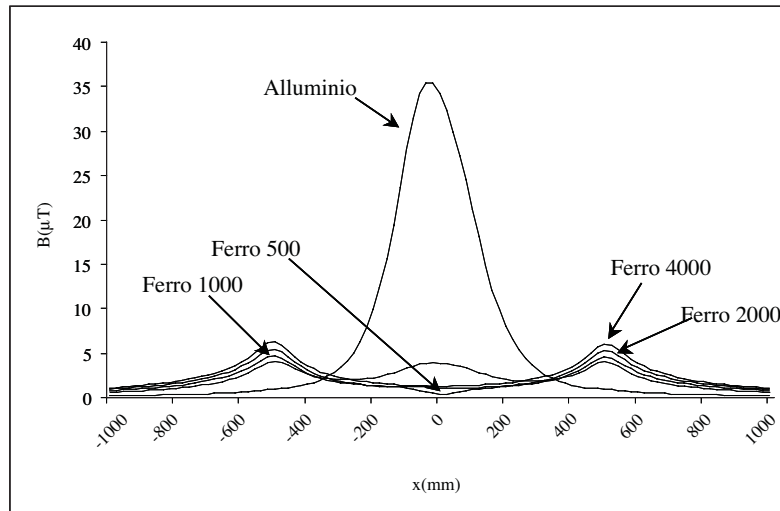


Figura V-11 : Profilo laterale di induzione magnetica a distanza $D = 0,1$ m per configurazione orizzontale.

Dalla Figura V-12 alla Figura V-13 si nota che all'aumentare della distanza diviene sempre maggiore la differenza di efficienza di schermatura tra l'alluminio e i materiali magnetici. Il grafico di Figura V-14 mostra il profilo di induzione magnetica lungo l'asse y . È interessante sottolineare che l'efficienza di schermatura per i materiali magnetici si riduce all'aumentare della permeabilità. Tale fenomeno è dovuto al fatto che al crescere della permeabilità relativa i materiali tendono a comportarsi come PMC che, come visto, con questo tipo di sorgenti è poco efficace. La Figura V-15 mostra il profilo di induzione magnetica a distanza 2 m al variare dello spessore dello schermo quando è realizzato in alluminio. L'efficienza di schermatura aumenta notevolmente nel passaggio da 1 a 2 mm, per poi crescere sempre più lentamente. La profondità di penetrazione dell'alluminio è di 12 mm: l'alluminio risulta ancora efficiente per spessori pari a $\delta_p/2$.

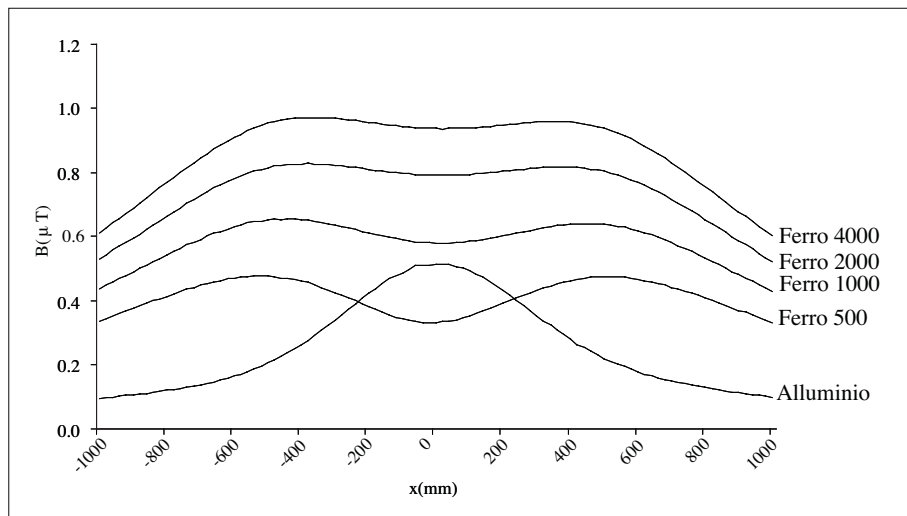


Figura V-12 : Profilo laterale di induzione magnetica a distanza $D = 1$ m per posa orizzontale

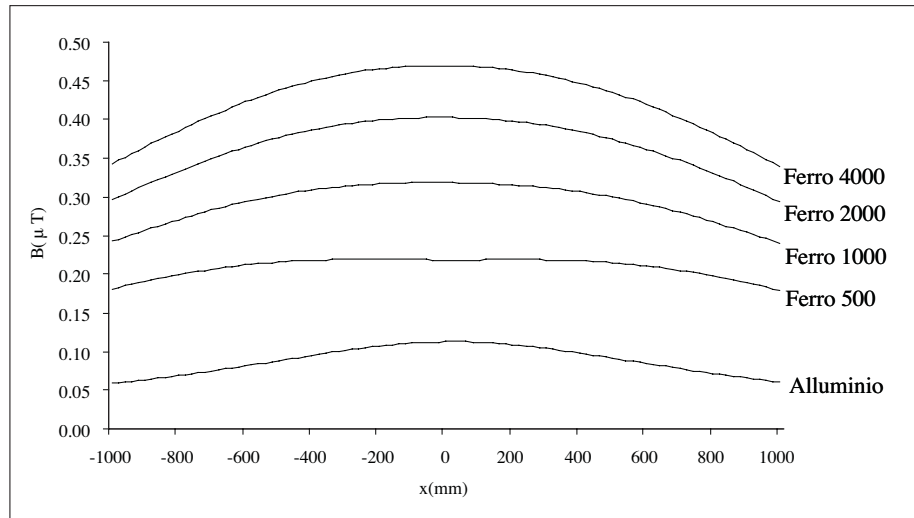


Figura V-13 : Profilo laterale di induzione magnetica a distanza $D=2$ m per posa orizzontale.

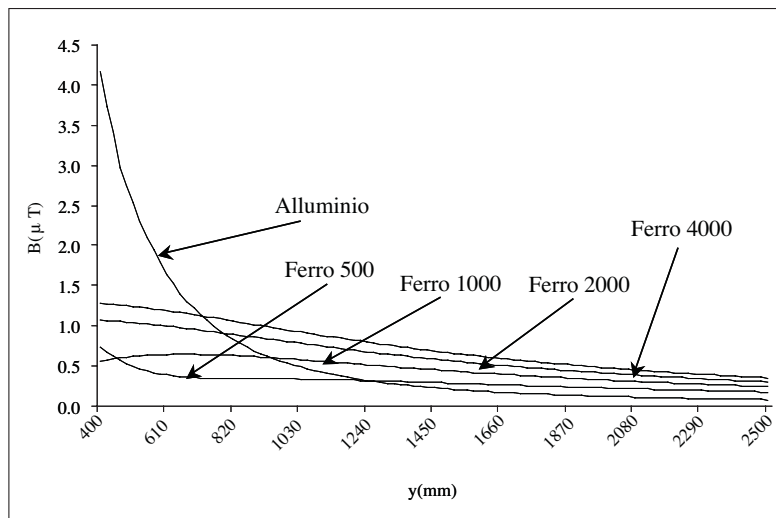


Figura V-14 : Profilo di induzione magnetica lungo l'asse y per posa orizzontale.

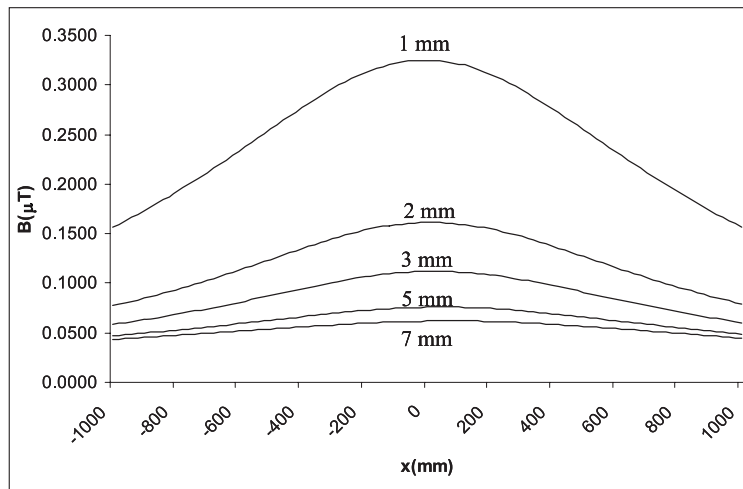


Figura V-15 : Profilo laterale di induzione magnetica a distanza $D = 2$ m per sorgente orizzontale al variare dello spessore dello schermo.

La Figura V-16 mostra che anche nel caso di sorgente verticale, per punti vicini allo schermo, l'efficienza di schermatura dei materiali magnetici risulta maggiore per via della minore profondità di penetrazione.

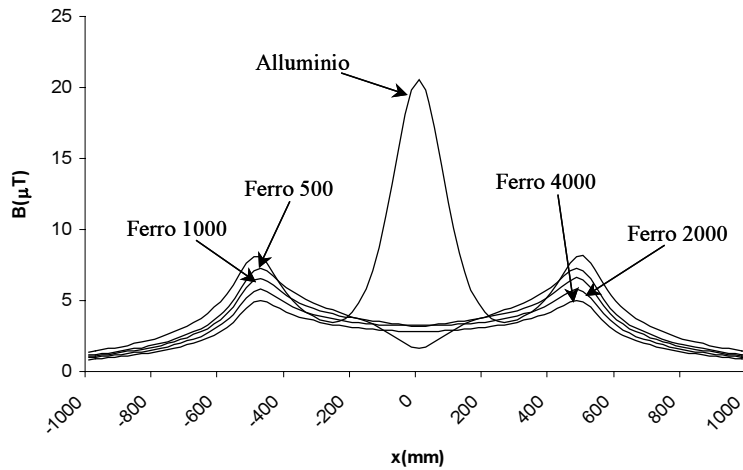


Figura V-16 : Profilo laterale di induzione magnetica a distanza $D = 0,1$ m per posa verticale

All'aumentare della distanza i materiali magnetici continuano ad essere preferibili ai materiali buoni conduttori. La Figura V-17 mostra l'andamento del campo magnetico a distanza $D = 2$ m dai conduttori. L'utilizzo di configurazioni schermanti chiuse permette di ottenere valori di schermatura particolarmente elevati.

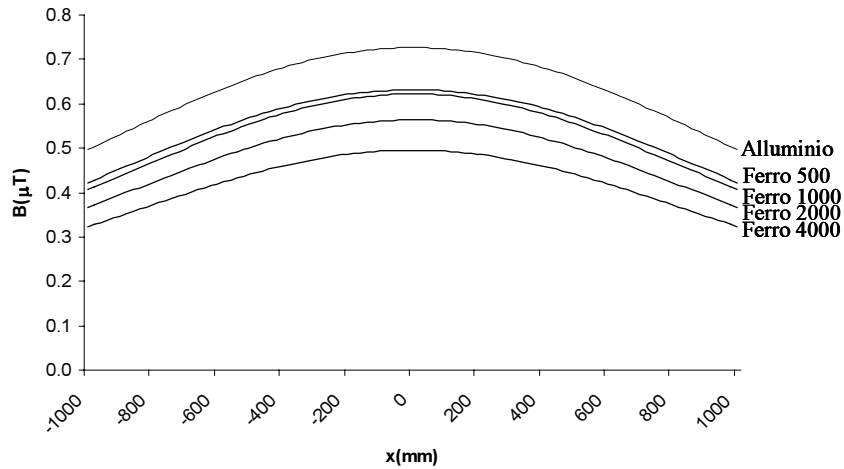


Figura V-17 : Profilo laterale di induzione magnetica a distanza $D = 2$ m per posa verticale.

Per configurazioni trifasi prendiamo in esame il caso in Figura V-18 la realizzazione di uno schermo collettivo per un cavo tripolare. In queste condizioni risulta molto vantaggioso l'utilizzo di materiali magnetici. Infatti, per le piccole distanze schermo-sorgente solitamente in gioco, l'impedenza d'onda del campo magnetico prodotto dalla sorgente risulta comparabile con l'impedenza intrinseca dello schermo quando questo è realizzato con materiali buoni conduttori (alluminio o rame), come mostrato in Figura V-19.

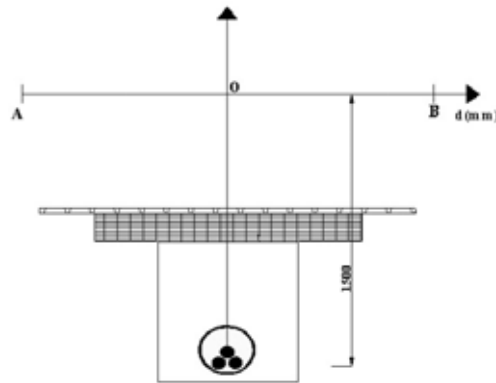


Figura V-18 : Configurazione di posa di un cavo tripolare con schermo chiuso.

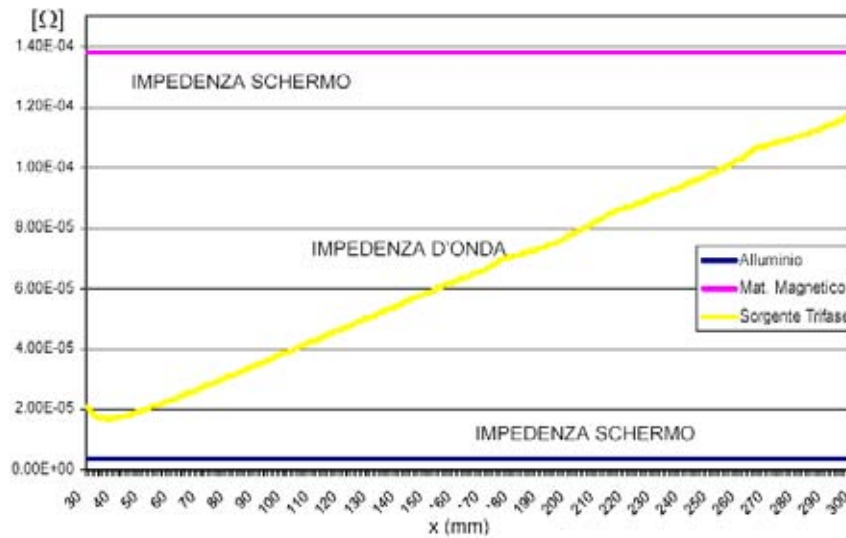


Figura V-19 : Confronto tra le impedenze d'onda di schermi chiusi costituiti da materiali conduttori e magnetici.

Prendiamo ad esempio in considerazione una terna di conduttori trifasi disposti a trifoglio e schermati attraverso un tubo realizzato in alluminio e in ferro ($\mu_r = 1.000$, $\sigma = 1,03 \cdot 10^7$ S/m). La Figura V-20 mostra il diverso comportamento dei due materiali. In via generale è possibile affermare che utilizzando materiali magnetici l'efficienza di schermatura cresce al crescere della permeabilità magnetica relativa e dello spessore dello schermo, mentre si riduce all'aumentare della distanza schermo-sorgente. Per i materiali buoni conduttori, invece, cresce al crescere della distanza schermo-sorgente e dello spessore. Tuttavia, come nel caso di schermi aperti, per spessori superiori a $\delta_p/2$ non vi sono ulteriori riduzioni apprezzabili.

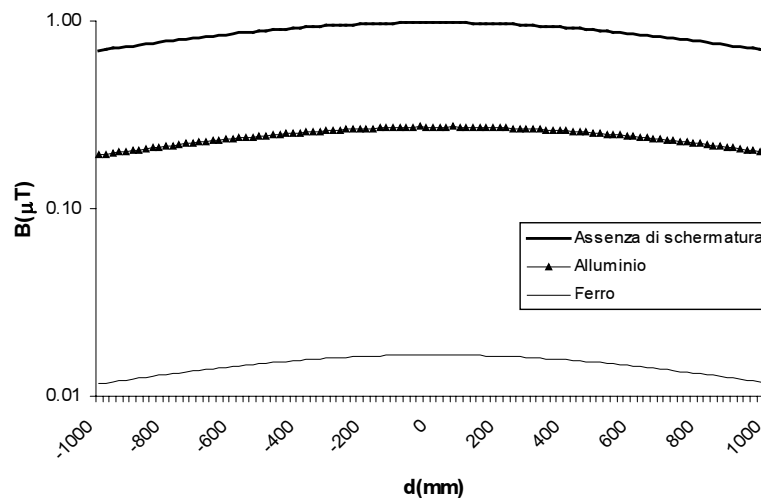


Figura V-20 : Confronto tra gli andamenti del campo magnetico in presenza di schermi chiusi di alluminio e in ferro.

V.4 Tecniche di riduzione del campo magnetico generato da linee elettriche aeree.

Le linee elettriche aeree sono sorgenti di campi elettrici e magnetici la cui intensità può interessare la popolazione. I valori di emissione di tali campi dipendono dalle tensioni e dalle correnti impresse alla linea stessa; in proposito, si deve ricordare che mentre il valore efficace del campo elettrico può considerarsi costante nel tempo, in quanto la tensione della linea non subisce variazioni apprezzabili, al contrario il campo magnetico segue l'andamento della corrente assorbita soggetta, nell'arco della giornata, a fluttuazioni considerevoli. Gli altri parametri di cui tener conto sono: la distanza dalla linea, la distanza reciproca tra i conduttori, la configurazione geometrica dei conduttori,

l'eventuale presenza delle funi di guardia e, solo per il campo elettrico, della vegetazione e delle pareti degli edifici.

V.4.1 *Spostamento/innalzamento dei sostegni [V-4]*

In Figura V-21 sono mostrati gli andamenti dei valori efficaci¹ del campo di induzione magnetica B, calcolato al livello del suolo, in funzione della distanza laterale di una linea aerea di alta tensione 380 kV e corrente 1.500 A, in configurazione a portale, al variare dell'altezza minima dal suolo della linea stessa; si può notare come il campo diminuisca di intensità all'aumentare di entrambe le predette distanze.

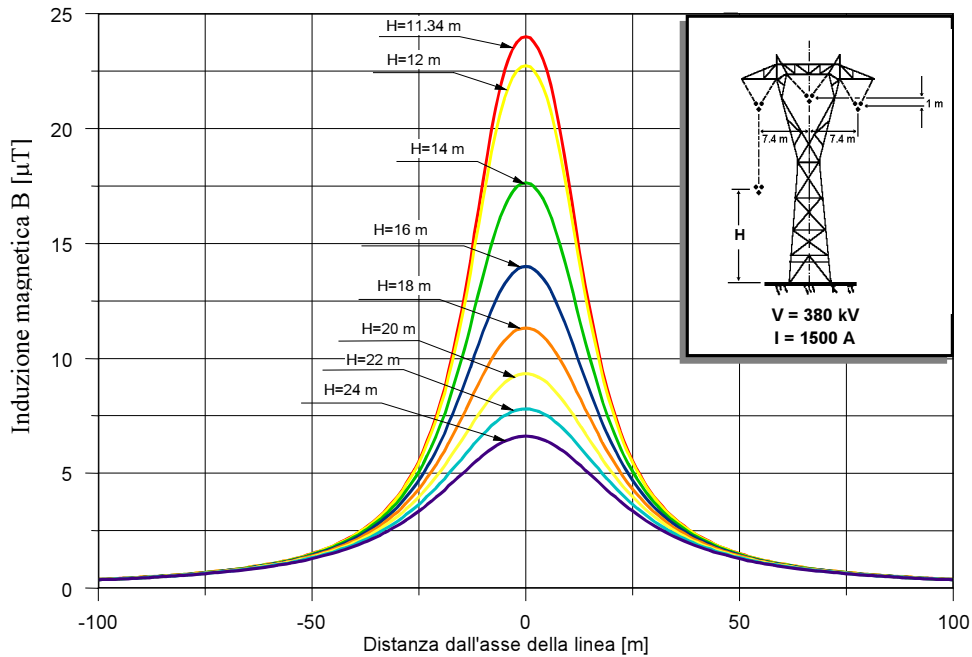


Figura V-21 : Profili laterali di B, ad 1 m dal suolo, di una linea aerea a 380 kV con corrente di fase di 1.500 A.

E' evidente come un accorgimento per la riduzione dei campi consista nell'aumentare la distanza dei soggetti esposti dalle sorgenti, secondo la Eq. V-10, ad esempio aumentando l'altezza del sostegno oppure spostando lateralmente quest'ultimo; si può rilevare, infatti, come il campo di

¹ Il valore efficace di una grandezza periodica A(t), di periodo T, è uguale a $A_{\text{eff}} = (1/T) \int_0^T [a(t)]^2 dt)^{0.5}$

induzione magnetica B subisca un abbattimento superiore al 50% per altezze da terra dei conduttori che variano da 11,34 m a 24 m. Tuttavia, in presenza di particolari condizioni territoriali o di vincoli ambientali, tali rimedi risultano impraticabili; in particolare, l'innalzamento del sostegno è una soluzione attuabile solo in via eccezionale. Il costo al chilometro totale indicato nella Tabella V-2 [V-4] tiene conto degli interventi di innalzamento dei sostegni e di spostamento della linea, ed è basato su dati ENEL.

Tensione di esercizio [kV]	Lunghezza [km]	Costo unitario [k€/km]
380	9.767	516
220	10.336	361
120÷150	37.032	361
Linea MT (conduttore nudo)	214.870	31
Linea BT (conduttore nudo)	354.014	13

Tabella V-2 : Costo unitario per il risanamento di linee aeree ENEL mediante spostamento/innalzamento dei sostegni .

C'è da aggiungere che lo spostamento delle linee può comportare un aumento del costo unitario causato dalla necessità di acquisire nuove servitù. Sul territorio del Comune di Roma i dati di ACEA S.p.A. relativi all'anno 2000 prevedevano un costo pari a 46.000 €/km; inoltre non va trascurata l'eventualità di dover predisporre varianti al tracciato della linea, con conseguenti percorsi più lunghi e costi proporzionalmente crescenti.

V.4.2 Riconfigurazione della geometria dei conduttori

Per ridurre il campo magnetico, a parità di corrente, si può anche agire modificando la disposizione dei conduttori. Tali metodologie consistono principalmente nella riconfigurazione della geometria dei conduttori di fase, nello sdoppiamento di ciascuna fase in più conduttori disposti opportunamente, e nella riduzione delle distanze reciproche tra i conduttori.

A titolo di esempio, la Figura V-22 [V-4] mostra il confronto tra il profilo laterale dell'induzione magnetica in valore efficace B a 1 m dal suolo, relativo ad una linea a semplice terna a

380 kV di tipo tradizionale con conduttori in configurazione orizzontale, e quelli generati da tre diverse disposizioni dei conduttori (a parità di distanza tra le fasi e di altezza da terra del conduttore più basso), per correnti di 1 kA. Per il calcolo dell'induzione magnetica si vada in proposito l'Eq. V-11. La stessa figura mostra il valore dell'induzione magnetica associato a ciascuna configurazione, rapportato a quello della soluzione tradizionale (A), al variare della distanza dall'asse della linea. Come si può osservare, tra le configurazioni esaminate quella triangolare con vertice rivolto verso il basso (D) produce il minore livello; si noti, tuttavia, che i vantaggi offerti in termini di riduzione del campo magnetico vanno a scapito di una maggiore altezza dei sostegni.

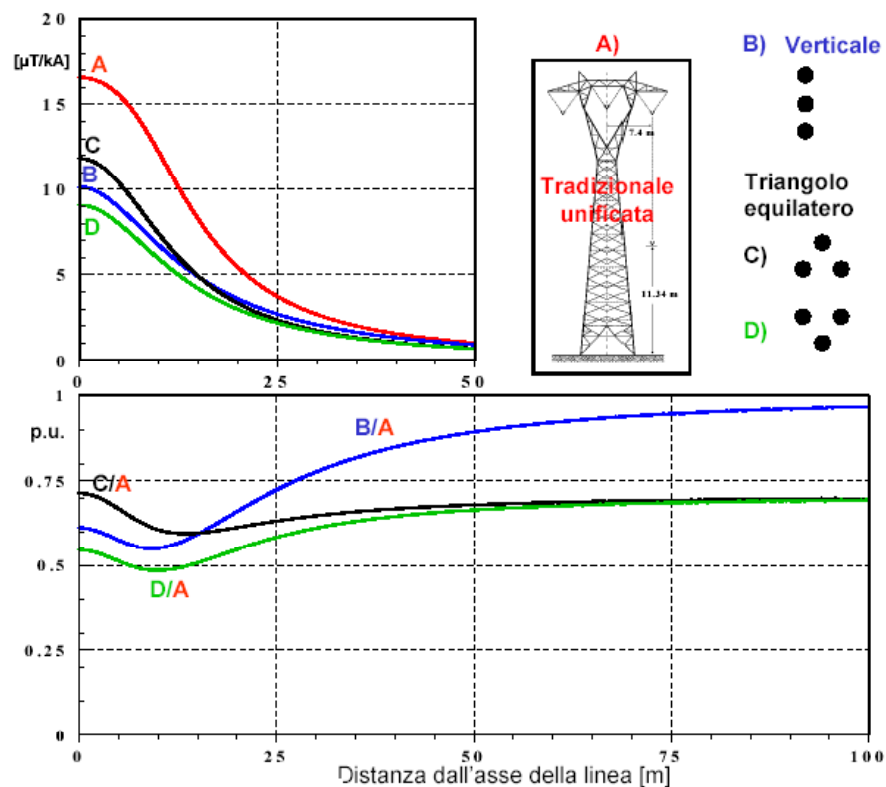


Figura V-22 : Profili laterali dell'induzione magnetica B a 1 m dal suolo di una linea a 132 kV di tipo tradizionale e di un'analogha linea di tipo compatto con correnti di fase di 375 A .

Nella linea a fasi sdoppiate (*split-phase*) una o più fasi vengono suddivise in due o più conduttori. Alcune possibili disposizioni geometriche dei conduttori, ottenute suddividendo due delle

tre fasi in due o tre conduttori ciascuna, sono rappresentate nella Figura V-23 assieme ai rispettivi profili di induzione magnetica ($I=1.500$ A, distanza tra le fasi $D=5,5$ m, altezza dei conduttori sul terreno $H=11,34$ m).

La Figura V-23 riporta inoltre, a titolo di confronto, il profilo laterale relativo ad una linea con configurazione triangolare senza sdoppiamento delle fasi e tre configurazioni ottenute sdoppiando (a,b) o triplicando (c) due delle tre fasi. Va rilevata, comunque, la difficoltà di realizzare sostegni per linee di questo tipo in grado di offrire adeguate caratteristiche meccaniche ed elettriche.

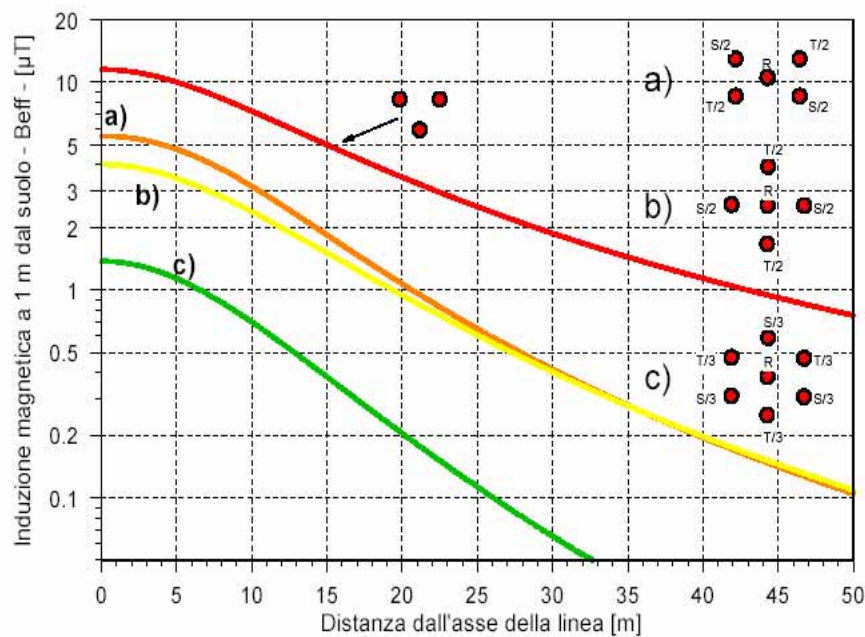


Figura V-23 : Confronto profili laterali dell'induzione magnetica per una linea a semplice terna e tre configurazioni ottenute con correnti di fase di 1.500 A.

Tuttavia, questa soluzione comporta maggiore impatto visivo a causa del maggiore numero di conduttori e della conseguente maggiore dimensione dei sostegni; maggiore complessità strutturale dei sostegni e prevedibili maggiori difficoltà nell'esercizio dei lavori di manutenzione sotto tensione; si deve tener conto anche di una maggiorazione dei costi fino a due volte.

Un'altra tecnologia di mitigazione è costituita dallo sdoppiamento della singola terna trifase, ovvero dalla *linea a doppia terna* Figura V-24.



Figura V-24 : Linea a doppia terna

In questo caso però la situazione si complica notevolmente, poiché la disposizione reciproca delle fasi di ciascuna terna gioca un ruolo nella distribuzione del campo magnetico. Infatti le direzioni dei flussi di potenza nelle due terne, e quindi delle correnti, non sono costanti, ma variano con le condizioni di esercizio della linea. Pertanto è necessaria una valutazione di tipo probabilistico dell'esposizione media, al fine di tener conto non solo delle variazioni temporali dell'intensità delle correnti, ma anche della loro direzione. A titolo di esempio, in Figura V-25 [V-4] sono riportati gli andamenti del campo magnetico relativi ad una linea a doppia terna di tipo unificato, con disposizioni delle fasi omologhe, riferiti al caso migliore (fasi antisimmetriche) e peggiore (fasi omologhe affacciate), ricavate con la Eq. V-12 e la Eq. V-13. Questa tecnologia comporta l'impossibilità di eseguire i lavori di manutenzione sotto tensione. Inoltre è considerevole l'impatto visivo unito ad una notevole complessità strutturale dovuta al maggior numero di conduttori e sostegni; la maggiorazione dei costi arriva fino a due volte.

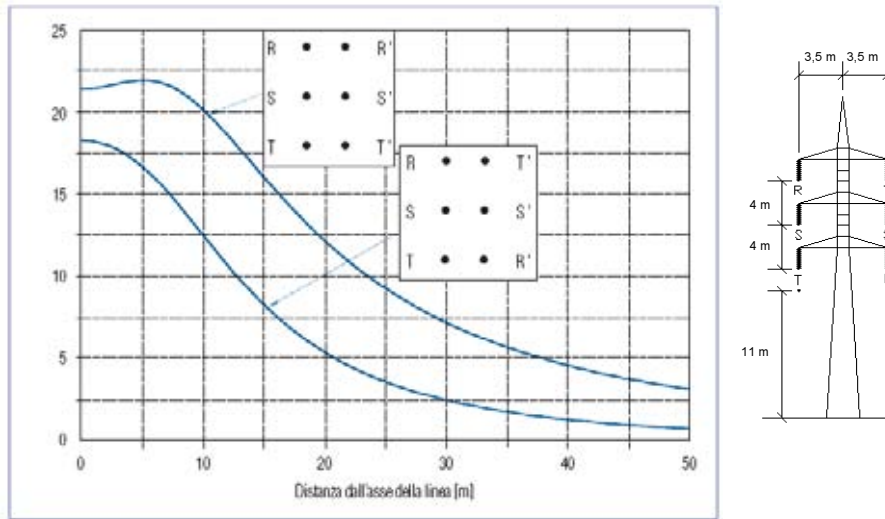


Figura V-25 : Profili laterali dell'induzione magnetica per una linea a doppia terna con due diverse disposizioni delle fasi omologhe con correnti di fase di 1.500 A.

V.4.3 Linee compatte

Uno dei rimedi, particolarmente efficace per ridurre il campo magnetico a parità di corrente, prevede l'adozione delle cosiddette *linee compatte*, caratterizzate da una ridotta distanza tra le fasi (Figura V-26). Infatti, come è evidente dalla Eq. V-10, Eq. V-11 e le seguenti, il ravvicinamento delle fasi, a parità di corrente trasportata, comporta la riduzione del campo emesso. In pratica, rispetto a una linea tradizionale, la riduzione del campo magnetico ottenibile, ottimizzando la disposizione dei conduttori e compattando la linea stessa, non supera il 50% nella zona sottostante la linea, ove si presenta il valore massimo del campo, e risulta anche minore (circa il 30%) nelle zone più distanti. Queste tipologie di linee aeree, a fronte di un notevole abbattimento del campo magnetico, presentano problemi di natura meccanica che non ne consentono un uso generalizzato. In effetti, a causa della ridotta distanza tra le fasi, questi sostegni non permettono al tracciato degli elettrodotti di seguire gli stessi angoli possibili con le linee tradizionali, ed inoltre limitano la lunghezza massima delle campate. Un'ulteriore limitazione consiste anche nell'impossibilità di esecuzione dei lavori di manutenzione sotto tensione con le metodologie oggi disponibili; la maggiorazione dei costi risulta fino a due volte. La Figura V-27 [V-4] mostra un confronto tra le linee a semplice terna, a doppia terna tradizionale e a doppia terna compatta.



Figura V-26 : Linea compatta a singola terna.

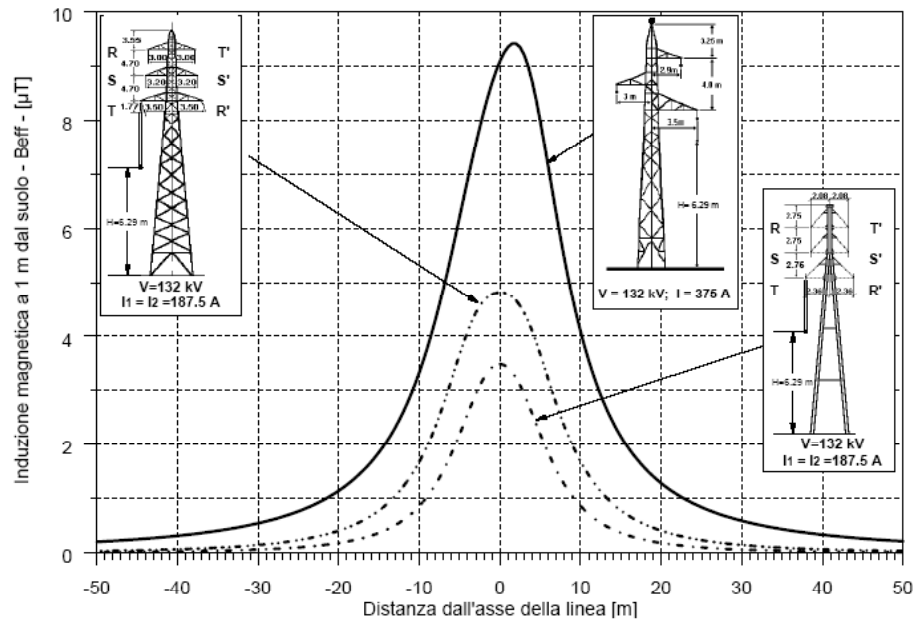


Figura V-27 : Profili trasversali di B, a 1 m dal suolo, di linee a terna semplice, a doppia terna tradizionale e a doppia terna compatta (132 kV, 375 A)

V.4.4 Circuiti di compensazione

Le correnti indotte da un campo magnetico in un circuito passivo generano, a loro volta, un campo magnetico che tende ad opporsi al campo inducente. Questo principio può essere adottato per ridurre il campo magnetico associato alle linee elettriche, installando conduttori aggiuntivi paralleli ai conduttori di linea, e connettendoli in modo tale da creare una o più spire secondo la rappresentazione di Figura V-28 [V-4]. Il campo magnetico generato dalla corrente che percorre le fasi della linea crea un flusso che si concatena con la spira passiva inducendo in essa una forza elettromotrice che a sua volta produce la corrente a cui è associato il campo magnetico di compensazione. Allo scopo di rendere il campo magnetico della spira in opposizione a quello inducente, si cerca di ridurre la resistenza del circuito e di compensarne in parte l'impedenza induttiva inserendo, nello stesso circuito, un condensatore. In pratica, la corrente indotta nella spira risulta sempre molto inferiore a quella di linea. Un'adeguata progettazione della spira di compensazione richiede pertanto programmi di calcolo dedicati che consentano di determinare sia la posizione ottimale della spira stessa, in relazione alla configurazione della linea aerea, sia il valore della capacità del condensatore da porre in serie. I circuiti di compensazione possono essere anche attivi cioè percorsi da correnti fornite da sorgenti indipendenti: il valore efficace e la fase delle correnti sono scelte in modo da generare un campo magnetico di opposizione a quello che si vuole ridurre.

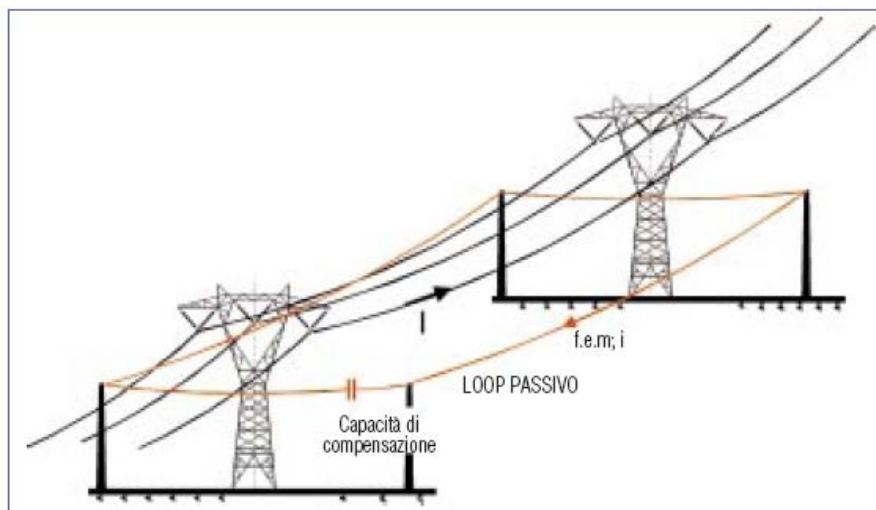


Figura V-28 : Schema di un circuito passivo di compensazione.

La Figura V-29 [V-4]riporta i risultati del calcolo effettuato per determinare le caratteristiche ottimali di un loop di compensazione e della relativa capacità serie che ottimizzano la riduzione del valor medio del campo magnetico. E' stato condotto il calcolo sia su una sezione continua compresa da -50 m a +50 m dall'asse di una semplice terna a 380 kV (loop 1), sia solo in un tratto compreso tra 10 m e 30 m dall'asse stesso da entrambe le parti (loop 2): come si può notare, utilizzando il loop 2 la migliore efficienza nella zona prescelta va a scapito di quella nella zona centrale. Questa tecnologia comporta, però, un maggiore impatto visivo a causa del maggiore numero di conduttori e delle strutture di supporto del circuito compensativo, nonché una maggiorazione del costo di 1,5 volte.

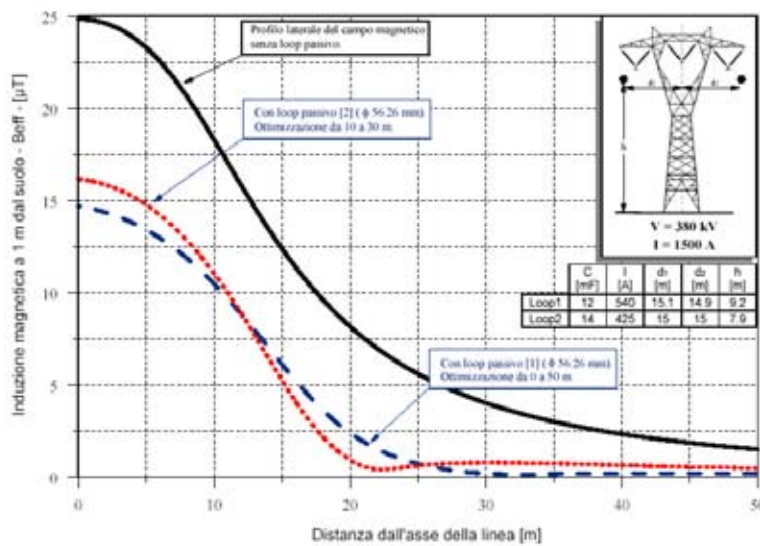


Figura V-29 : Attenuazione del campo magnetico generato da una linea a 380 kV dopo l'applicazione di un loop di compensazione lungo 400 m e largo 30 m.

V.5 Linee in cavo interrato.

L'impiego di cavi interrati consente di mitigare l'emissione del campo magnetico, grazie alla riduzione delle reciproche distanze tra i conduttori di fase rispetto alla configurazione in linea aerea. La soluzione in cavo interrato viene principalmente impiegata nei centri urbani, per le linee di bassa e media tensione; per quanto riguarda invece le linee di distribuzione e trasmissione ad alta tensione (da 132/150 kV fino a 380 kV), l'impiego dei cavi è prevalentemente limitato a brevi collegamenti e per penetrazione in grandi centri urbani. Il ricorso ai cavi di alta tensione è ipotizzabile anche per

collegamenti di alcune decine di chilometri di lunghezza; per ragioni di ordine tecnico legate alla potenza reattiva capacitiva, lunghezze di collegamento superiori richiedono l'utilizzo di sistemi di compensazione (reattanze shunt). L'interramento delle linee elettriche costituisce, tuttavia, una tecnica di risanamento che solo parzialmente risolve il problema dell'emissione di campo magnetico. Ciò è dovuto al fatto che la profondità di posa dei cavi interrati è considerevolmente inferiore all'altezza minima dal suolo della catenaria delle linee aeree, e pertanto in prossimità dell'asse della linea la distanza dalle sorgenti di campo risulta inferiore nel caso dei cavi interrati. Dalla Figura V-30 si può infatti osservare che, alla quota di 1 m sul suolo e in prossimità dell'asse della linea, il campo di induzione magnetica emesso dalla linea in cavo in posa piana è maggiore di quello emesso dalla linea aerea a portale; tuttavia, allontanandosi dall'asse della linea, e quindi all'aumentare della distanza dalle sorgenti, l'induzione magnetica emessa dalla linea in cavo decresce più rapidamente. Pertanto la linea in cavo, pur consentendo il rispetto dei limiti di legge nel caso di vicinanza con edifici, non può considerarsi una soluzione definitiva a causa delle elevate emissioni in prossimità dell'asse della linea. L'attenuazione trasversale del campo magnetico è invece più accentuata per il cavo, con l'effetto che il campo magnetico si estingue rapidamente con la distanza.

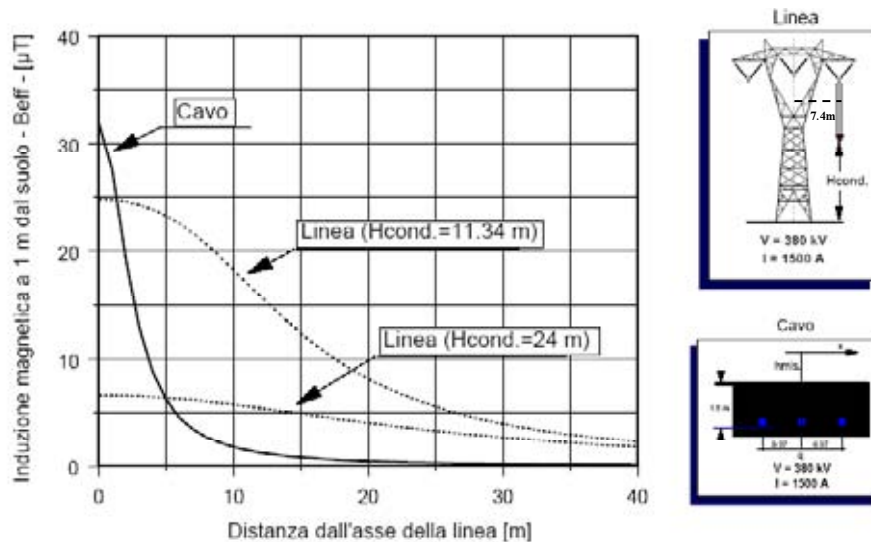


Figura V-30 : Profili laterali di B di una linea aerea a portale e di una terna di cavi interrati a 380 kV, 1.500 A.

L'interramento della linea aerea è necessario quando per ragioni tecniche di impatto urbano non sono possibili altri interventi di risanamento. Spesso gli interramenti si presentano di difficile

realizzazione per mancanza di idonea viabilità o di spazi per contenere le aree terminali. Inoltre anche con l'interramento delle linee in cavo il valore dell'induzione magnetica può risultare anche molto più elevato di quello generato dalla linea aerea, come precedentemente osservato. E' necessario allora ricorrere ad opportuni accorgimenti adottabili sia in fase di progettazione del cavo che all'atto della scelta della soluzione impiantistica, i quali oltre a fare lievitare i costi di installazione possono produrre declassamenti nella portata dei cavi e difficoltà nelle attività di manutenzione straordinaria.

V.5.1 Riconfigurazione della geometria di posa.

Una sensibile riduzione del valore massimo del campo magnetico prodotto dalle linee in cavo si può ottenere con una riduzione della distanza tra i cavi in posizione orizzontale o disponendo i cavi a trifoglio secondo le configurazioni di Figura V-31 [V-4]. La disposizione dei cavi a trifoglio, con la usuale connessione degli schermi in *cross bonding*, consente di ottenere buoni risultati (riduzione del campo magnetico di circa il 70%), ma la portata della linea può subire consistenti diminuzioni (4÷12%) rispetto alla posa con cavi in piano. La connessione delle guaine in *solid bonding* unitamente alla posa a trifoglio risulta leggermente più efficace (4÷6% di ulteriore riduzione del campo rispetto alla posa a trifoglio), mentre si riduce la portata della linea (6÷20% in meno rispetto alla posa in piano).

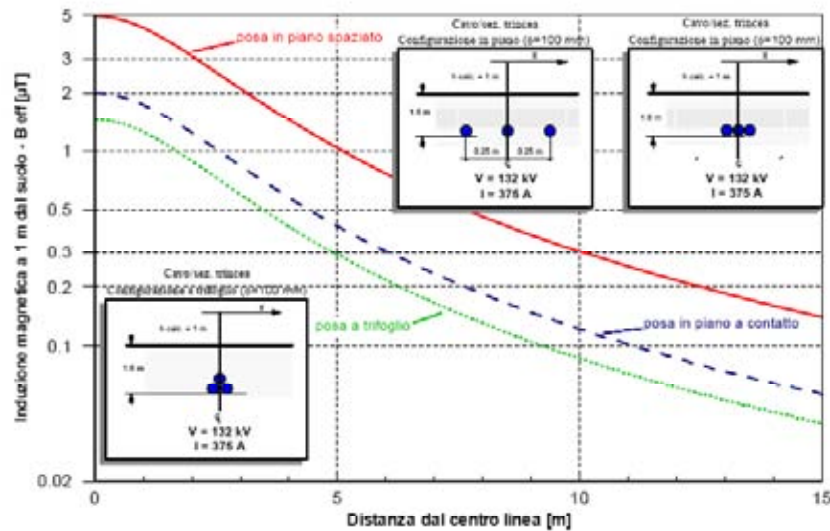


Figura V-31 : Profili laterali di B a 1 m dal suolo di linee in cavo interrate a 132 kV, 375 A con posa in piano o a trifoglio.

V.5.2 Schermature dei cavi

Un altro sistema per ridurre l'emissione di campo magnetico in prossimità di una linea interrata è l'utilizzo di schermi. Si considerino le due linee trifasi interrate con cavi in posa piana o a trifoglio aventi le sezioni trasversali rappresentate in Figura V-32; i cavi sono immersi in sabbia compatta a bassa resistività termica, la rimanente profondità dello scavo è riempita con materiale betonabile.

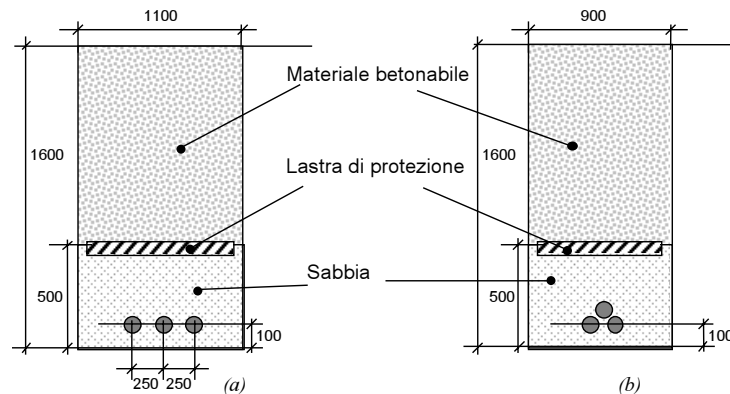


Figura V-32 : Sezione della trincea di scavo per posa piana (a) o a trifoglio (b) della linea in cavo (dimensioni in mm).

Nell'analisi sono considerate le seguenti tre categorie di configurazioni schermanti:

- schermi aperti in materiale conduttore;
- schermi aperti in materiale ferromagnetico;
- schermi chiusi.

Come materiale conduttore si utilizza l'alluminio poiché è caratterizzato da un ottimo rapporto tra le prestazioni schermanti, legate alla conducibilità elettrica offerta, duttilità, facilità di lavorazione e costo al chilogrammo del materiale grezzo. Tuttavia, nell'utilizzo di schermi in alluminio, è necessario tener conto del costo addizionale dovuto alla nichelatura elettrolitica del materiale per la protezione dalla corrosione. Per gli schermi in materiale ferromagnetico, sono stati considerati un normale ferro da carpenteria (Fe360B), lo Skudotech e la lega Alloy-49; questi ultimi due materiali sono pressoché insensibili agli agenti chimici presenti nei comuni terreni. Per ciascuno dei materiali ferromagnetici è stata considerata la relativa curva di magnetizzazione B-H per tenere conto della eventuale saturazione. Le caratteristiche dei materiali considerati sono riportate in Tabella V-3 [V-5]

MATERIALE CONDUTTORE					
	σ [S/m]	ϵ_r	μ_r	<i>spessore</i>	
Alluminio	$3,70 \cdot 10^7$	1	1	1÷4 mm	
MATERIALI FERROMAGNETICI					
	σ [S/m]	ϵ_r	μ_r	<i>spessore</i>	<i>B di saturazione</i>
Skudotech®	$1,77 \cdot 10^6$	1	300.000	0,1÷0,4 mm	0,5÷0,65 T
Alloy-49 ²	$2,07 \cdot 10^6$	1	10.000	0,2÷0,5 mm	0,8÷1,0 T
Ferro ³	$1,03 \cdot 10^7$	1	500	10÷100 mm	-

Tabella V-3 : Caratteristiche elettriche e magnetiche dei materiali schermanti considerati .

Il livello di induzione magnetica di riferimento è valutato considerando le configurazioni di posa di Figura V-11, in assenza di schermi, con cavi EPR1000 percorsi da una corrente trifase equilibrata a 50 Hz di valore efficace $I_n=800$ A. La Figura V-33 [V-5] mostra i profili trasversali calcolati all'altezza $h=1$ m sul terreno. Come previsto, la vicinanza dei cavi nella posa a trifoglio ha l'effetto di ridurre il campo magnetico generato. Tuttavia non bisogna sottovalutare l'effetto del mutuo riscaldamento tra i cavi in termini di riduzione della portata a limite termico.

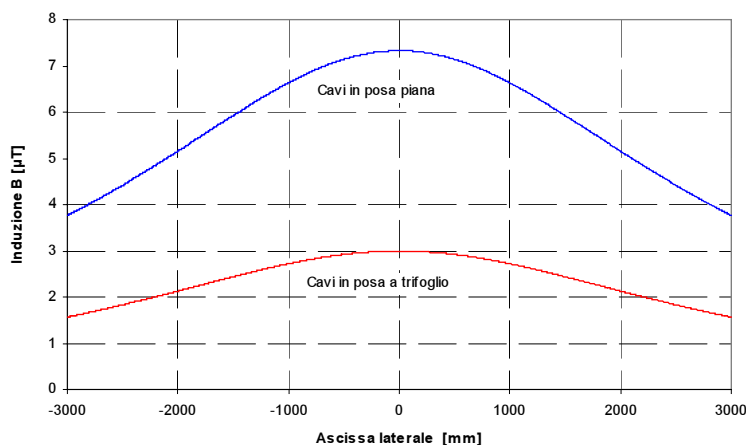


Figura V-33 : Profili trasversali di induzione magnetica ad 1 m sul terreno per posa piana e posa a trifoglio della terna di cavi .

² Carbonio 0,02%, Silicio 0,35%, Manganese 0,5%, Nickel 48,0%

³ Carbonio 0,2%, Fosforo 0,05%, Zolfo 0,05%

Alla categoria degli schermi aperti di materiale conduttore appartengono le 4 configurazioni riportate nella Figura V-34 [V-5], per ciascuna delle quali lo schermo è realizzato in alluminio con spessore $d=2$ mm. I profili trasversali di induzione magnetica generati dalle linee in posa piana e a trifoglio sono riportati nelle Figura V-35 e Figura V-36 per ciascuna delle quattro configurazioni schermanti considerate.

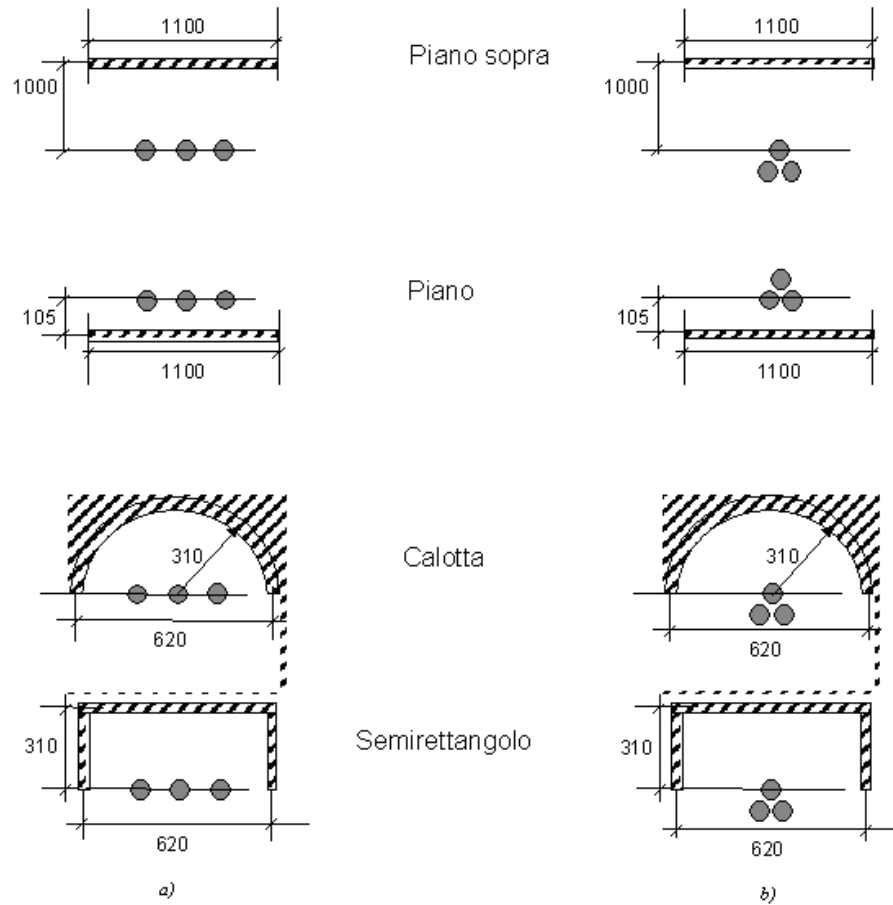


Figura V-34 : Configurazioni schermanti di linea in posa piana (a) o a trifoglio (b) (dimensioni in mm).

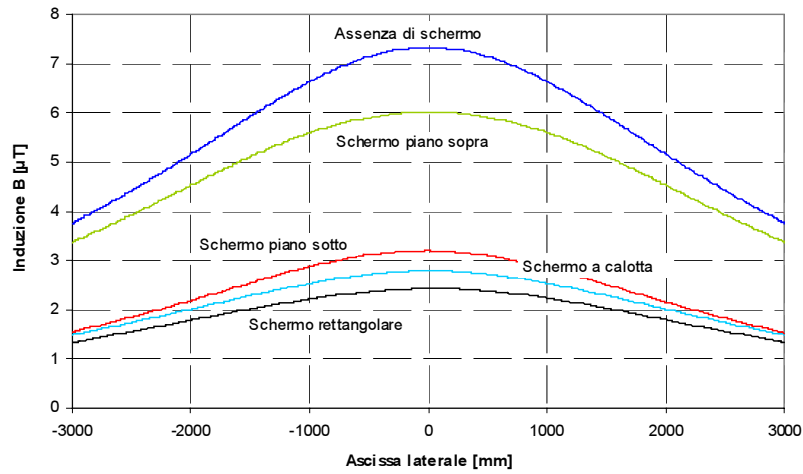


Figura V-35 : Profili trasversali di induzione magnetica della linea in piano ad 1 m sul terreno per diverse configurazioni schermanti di alluminio [V.5].

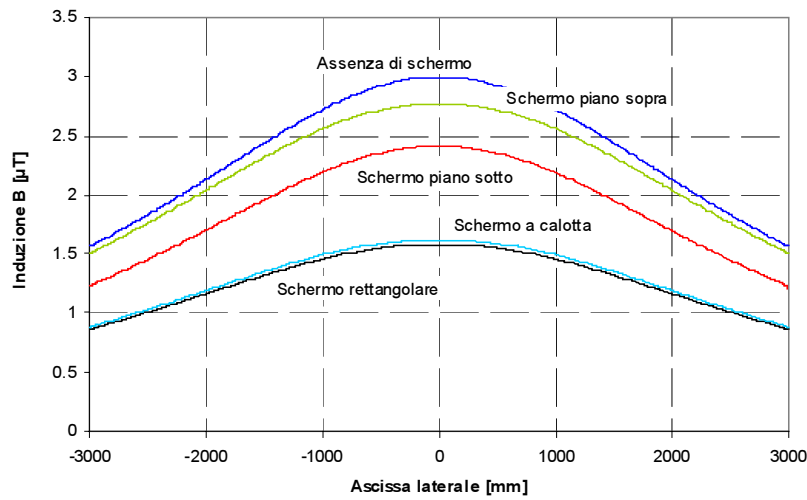
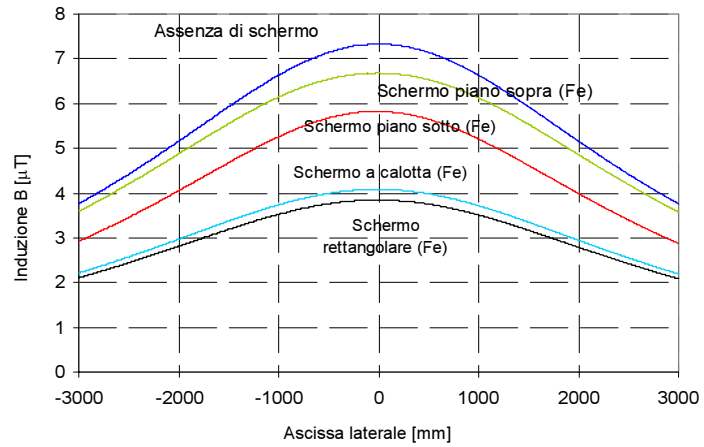
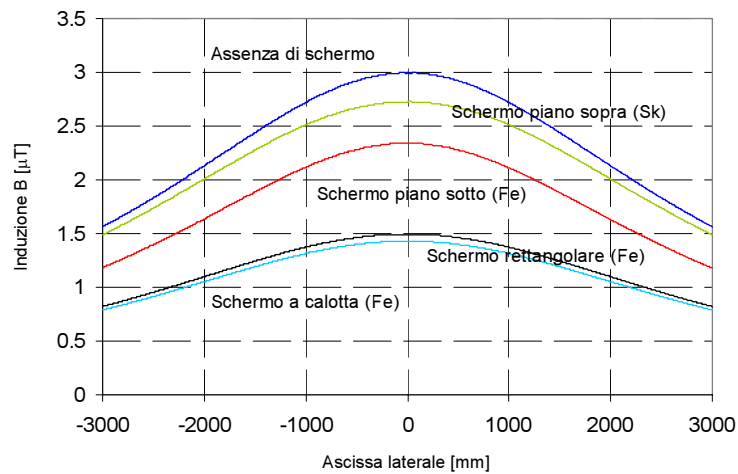


Figura V-36 : Profili trasversali di induzione magnetica della linea a trifoglio ad 1 m sul terreno per diverse configurazioni schermanti di alluminio [V.5].

L'analisi sviluppata in precedenza viene ripetuta considerando schermi in ferro o Skudotech aventi le caratteristiche indicate in Tabella V-3. I profili di induzione magnetica calcolati per i due tipi di posa sono rappresentati in Figura V-37; inoltre la Figura V-38 mostra le mappe di flusso di induzione per schermi piani, rettangolari e a calotta di Skudotech.



(a)



(b)

Figura V-37 : Profili trasversali di induzione magnetica ad 1 m sul terreno delle linee in piano (a) e a trifoglio (b) con diverse configurazioni schermanti [V.5].

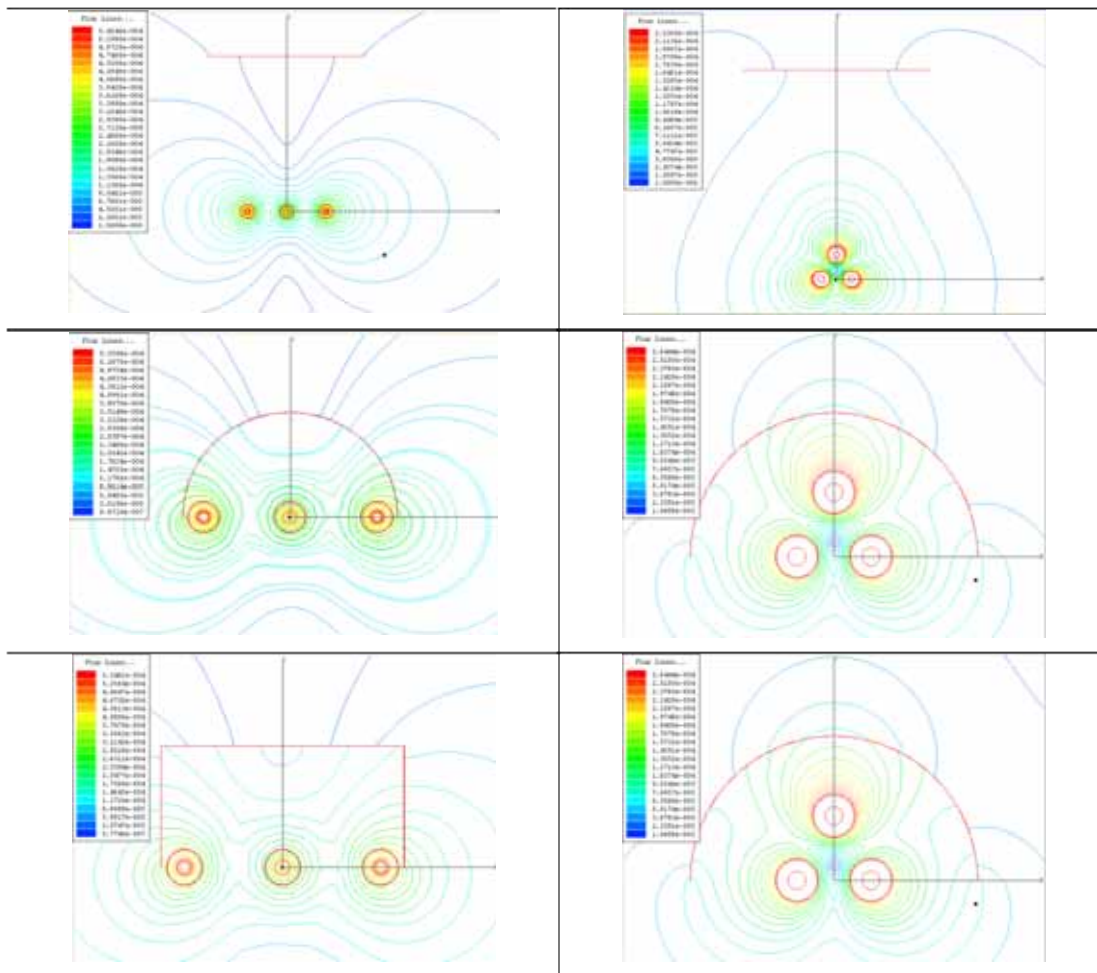


Figura V-38 : Linee di flusso per schermi piani, rettangolari ed a calotta di Skudotech per le due configurazioni di posa piana e a trifoglio [V.5].

I risultati ottenuti mostrano come la sagomatura curvilinea dello schermo sia maggiormente efficiente nell'attenuazione del campo magnetico, soprattutto per posa a trifoglio dei cavi.

Un ulteriore miglioramento delle prestazioni schermanti offerte dai materiali ferromagnetici è ottenibile avvicinando lo schermo alla sorgente di campo. Tale operazione, tuttavia, sottopone lo schermo ad un campo d'induzione incidente maggiore aumentando il problema della saturazione del materiale ferromagnetico; inoltre, il avvicinamento di masse metalliche percorse da correnti di linea o

di Foucault provoca fenomeni di scambio di calore reciproco, riducendo la portata a limite termico della linea in cavo.

La schermatura con le lastre, considerati anche i maggiori oneri dovuti al fatto che va generalmente eseguita una trincea più larga della norma, comporta un maggiore onere di circa il 20% rispetto alla normale posa; i tempi di posa aumentano di circa il 10%.

L'uso di schermi chiusi tubolari consente di ottenere rispetto agli schermi aperti migliori prestazioni schermanti, ma comporta maggiore difficoltà di posa, di accesso ai cavi e di limitazione del ricambio d'aria. Una tale scelta è stata operata da ACEA Distribuzione S.p.A. per un tratto sperimentale della linea in cavo a 150 kV sita in Roma tra Laurentina e Capannelle: la configurazione progettata e realizzata dalla Pirelli S.p.A. è rappresentata in Figura V-39 [V-6]

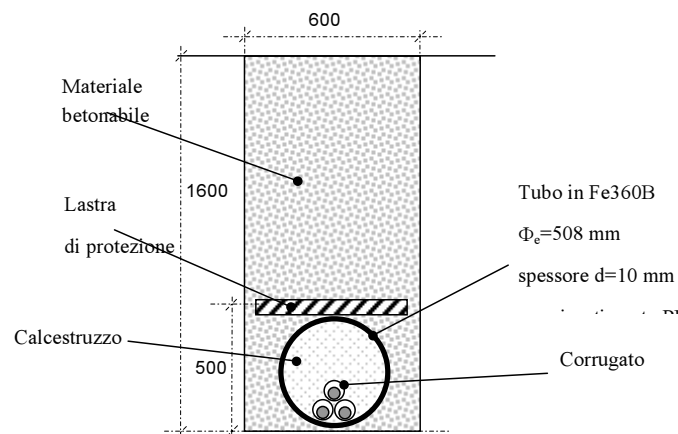
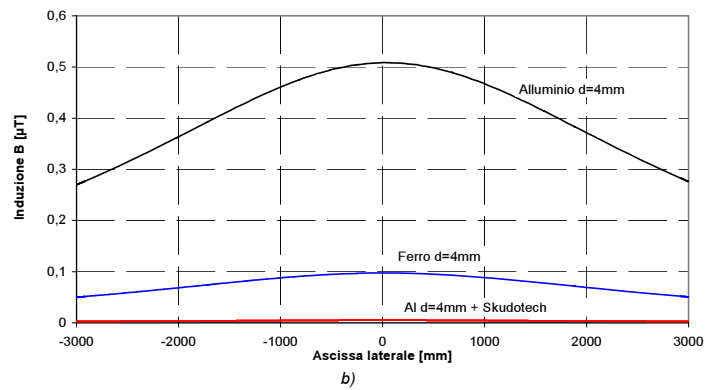
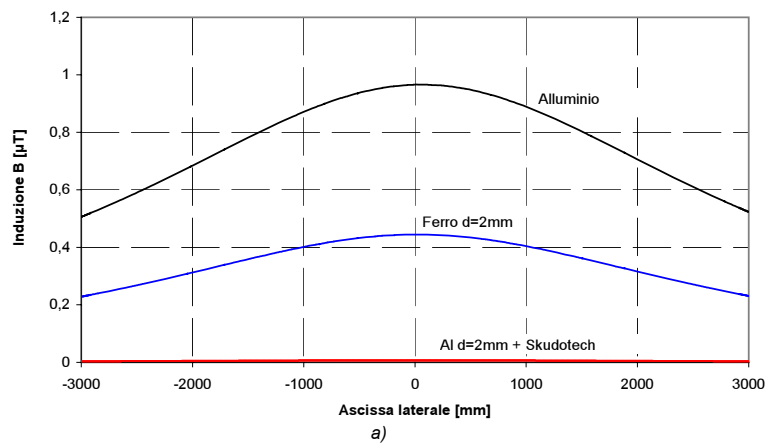
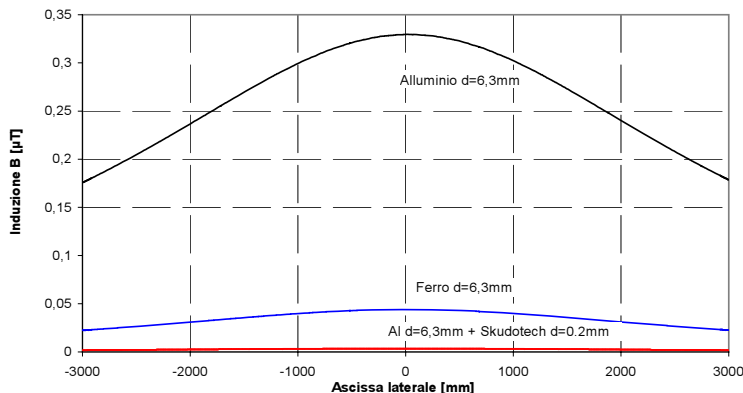


Figura V-39 : Sezione della trincea dello scavo con tubo in ferro (dimensioni in mm).

Il profilo di induzione magnetica ad 1 m sul terreno ha un valore massimo inferiore a $0,2 \mu\text{T}$: tale risultato è dovuto all'uso del tubo in ferro di 10 mm di spessore.

Allo scopo di analizzare soluzioni schermanti alternative, sono eseguite simulazioni della configurazione con tubo di alluminio o di ferro o di alluminio sormontato da uno strato di 0,2 mm di Skudotech: lo spessore del tubo è considerato uguale a 2 mm, 4 mm e 6,3 mm. I profili trasversali di induzione magnetica ad 1 m sul terreno generati dal sistema trifase simmetrico di corrente di 800 A, sono riportati in Figura V-40 [V-6].





c)

Figura V-40 : Profili trasversali di induzione magnetica ad 1 m sul terreno prodotti dalla linea a 150 kV schermata con tubo di spessore 2 mm (a), 4 mm (b) e 6,3 mm (c) [V.5].

Si osservi che l'obiettivo di qualità di $3 \mu\text{T}$ previsto dalla legge è raggiunto utilizzando gli schermi tubolari di 2 mm indicati in Figura V-40(a). La schermatura a tubo comporta un maggior onere di circa il 25% per forniture e lavori rispetto alla normale posa. I tempi di posa, invece, risultano sensibilmente più lunghi, aumentando di circa il 40÷50%, il che comporta anche maggiori costi per le occupazioni e le licenze di scavo. Inoltre l'uso del tubo rende eventuali interventi di manutenzione o riparazione invasivi e difficoltosi.

L'analisi sviluppata consente di evidenziare le prestazioni schermanti di differenti configurazioni per la riduzione dell'inquinamento magnetico ambientale a frequenza industriale prodotto da linee in cavo interrato. Assumendo come obiettivo dell'analisi il soddisfacimento dell'obiettivo di qualità di $3 \mu\text{T}$, le configurazioni schermanti previste risultano essere le seguenti:

- (a) Cavi a trifoglio schermo a tubo di alluminio con strato di Skudotech® ($d=2+0.2$ mm, diametro esterno $\Phi_e=620$ mm).
- (b) Cavi a trifoglio schermo a tubo di ferro ($d=2$ mm, , diametro esterno $\Phi_e=620$ mm).
- (c) Cavi a trifoglio schermo a tubo di alluminio ($d=2$ mm, , diametro esterno $\Phi_e=620$ mm).
- (d) Cavi a trifoglio schermo a calotta di ferro ($d=2$ mm).
- (e) Cavi a trifoglio schermo rettangolare di ferro ($d=2$ mm).
- (f) Cavi a trifoglio schermo rettangolare di Skudotech ($d=0,2$ mm)
- (g) Cavi a trifoglio schermo rettangolare di alluminio ($d=2$ mm).
- (h) Cavi a trifoglio schermo a calotta di Skudotech ($d=0,2$ mm).

- (i) Cavi in posa piana schermo a calotta di alluminio ($d=2$ mm).
- (j) Cavi a trifoglio schermo piano sotto di ferro ($d=2$ mm).
- (k) Cavi a trifoglio schermo piano sotto di Skudotech ($d=0,2$ mm).
- (l) Cavi a trifoglio schermo piano sotto di alluminio ($d=2$ mm).
- (m) Cavi in posa piana schermo rettangolare di alluminio ($d=2$ mm).
- (n) Cavi a trifoglio schermo piano sopra di ferro ($d=2$ mm).
- (o) Cavi a trifoglio schermo piano sopra di Skudotech ($d=0,2$ mm).
- (p) Cavi a trifoglio schermo piano sopra di alluminio ($d=2$ mm).
- (q) Cavi in posa piana schermo a calotta di alluminio ($d=2$ mm).

La Tabella V-4 mostra una comparazione qualitativa dei pregi/difetti derivanti dall'uso di alcune delle precedenti configurazioni schermanti.

		PREGI			DIFETTI			
		Limitazione campo B	Diminuzione costi scavi	Semplicità di posa	Diminuzione portata	Difficoltà d'accesso	Corrosione	Saturazione
Posa	Cavi a trifoglio	☺	☺		☹			
	Cavi in posa piana	☹		☺				
Materiale	Alluminio	☺					☹	
	Ferro	☺					☹	☺
	Skudotech®	☺					☺	☹
Tipo di schermo	lastra sopra			☺		☺		
	lastra sotto			☺		☺		
	Schermo rettangolare	☺				☺		
	Schermo a calotta	☺				☺		
Schermo chiuso	tubo di Fe360B	☺	☺	☹	☺	☹	☹	
	tubo di Alluminio	☺	☺	☹	☺	☹	☹	
	tubo di Alluminio + Skudotech®	☺	☺	☹	☺	☹	☺	☹

☺ Buono ☺ Discreto ☹ Insufficiente

Tabella V-4 : Comparazione dei pregi/difetti derivanti dall'uso delle configurazioni schermanti analizzate.

La prestazione degli schermi di materiale magnetico o conduttore è influenzata dalla tipologia di posa dei cavi. Se la posa è in piano i materiali conduttori come l'alluminio si comportano meglio dei materiali magnetici (ferro, Skudotech). Se la posa è a trifoglio lo schermo magnetico è migliore dello schermo conduttore. Gli schermi di materiale magnetico attenuano la componente tangenziale di campo

magnetico, mentre gli schermi di materiale conduttore attenuano la componente normale, per questo i due materiali si comportano diversamente a seconda del tipo di sorgente da schermare. Se domina la componente di campo normale allo schermo, come nel caso della posa piana dei conduttori, gli schermi conduttori sono migliori degli schermi magnetici. Se la componente di campo dominante è quella tangenziale (cavi in posa a trifoglio) è lo schermo magnetico ad essere migliore dello schermo conduttore. Per entrambe le configurazioni di posa i migliori risultati si ottengono con schermo tubolare: in tal caso, infatti, non si hanno gli effetti di bordo tipici degli schermi aperti. Il diverso comportamento del ferro rispetto all'alluminio può essere spiegato attraverso il confronto fra l'impedenza intrinseca dei due materiali e l'impedenza d'onda della sorgente. Il coefficiente di riflessione dipende dalla differenza tra l'impedenza d'onda della sorgente e l'impedenza intrinseca dello schermo; più tale differenza è grande e più alto è il coefficiente di riflessione. In prossimità dello schermo i materiali magnetici hanno un coefficiente di riflessione maggiore di quello dell'alluminio, mentre allontanandosi l'impedenza d'onda della sorgente si avvicina alla impedenza intrinseca del ferro e si allontana da quella dell'alluminio, per cui il coefficiente di riflessione aumenta per l'alluminio e diminuisce per il ferro. La posa in opera di configurazioni schermanti, per le linee in cavo interrato, oltre a costituire una barriera per l'accesso alla linea stessa, ha un effetto negativo in termini di circolazione d'aria e mutuo riscaldamento dei cavi, soprattutto in caso di posa ravvicinata o a trifoglio delle singole fasi della linea in cavo ed inclusione di queste in uno schermo chiuso, con conseguente riduzione della portata a limite termico della linea e dunque declassamento della stessa. Inoltre la segregazione della linea in cavo costituisce un ostacolo aggiuntivo per l'esecuzione delle opere di manutenzione ordinaria e manutenzione su guasto della linea stessa. In tal caso, infatti, i cavi sono accessibili solo previa apertura o rimozione dello schermo introducendo oneri aggiuntivi nell'intervento e per le operazioni di ripristino. La realizzazione stessa della configurazione schermante, in termini di progettazione, approvvigionamento dei materiali e posa in opera degli schermi, introduce costi aggiuntivi per la linea in cavo che possono essere tutt'altro che trascurabili nel computo complessivo dell'intervento di realizzazione. Infine costi aggiuntivi sono imputabili a tecniche di protezione da fenomeni di corrosione (protezioni catodiche, zincatura, nichelatura elettrolitica, ecc.), da introdurre in caso si scelgano materiali schermanti sensibili agli agenti elettrochimici presenti nel terreno.

V.5.3 *Elettrodotti blindati*

Le linee di trasmissione isolate in gas SF₆, Gas-Insulated Transmission Lines (GIL), sono sistemi di trasmissione sotterranei di grande capacità di trasporto di energia elettrica: possono arrivare a trasmettere potenze dell'ordine di 2.000-3.000 MW per terna [7].

Confrontati con i più comuni cavi XPLE, che vengono generalmente utilizzati, i GIL offrono una maggiore capacità di trasporto, ma per il loro costo, sommato alle infrastrutture necessarie (sono spesso installati in galleria), essi sono stati finora considerati per particolari situazioni in cui si debbono trasportare grandissime quantità di potenza per brevi distanze. Dal punto di vista costruttivo i GIL sono costituiti da un involucro esterno cilindrico (quasi sempre in alluminio) e da un conduttore interno di sezione tubolare. L'involucro assolve a due distinti compiti: meccanico, per il contenimento del gas isolante (SF₆ puro o miscelato con N₂) mantenuto ad una pressione di qualche atmosfera; elettrico, svolgendo un ruolo equivalente a quello delle guaine dei normali cavi (controllo del campo elettrico nell'intorno del conduttore di potenza). Si noti inoltre che, in confronto alle linee in cavo, la limitata capacità di esercizio (sia pure di circa quattro volte superiore a quella di una linea aerea, ma circa 4-7 volte inferiore a quella di una linea in cavo, nei casi di 380 kV) non richiede compensazione reattiva anche con grandi lunghezze. I tre involucri di un elettrodotto blindato devono essere cortocircuitati fra loro e ben connessi a terra alle estremità di ciascuna tratta: ciò dà luogo in genere a ridotte tensioni di contatto e consente inoltre negli involucri la circolazione di correnti, in opposizione di fase rispetto alle correnti circolanti nei conduttori, che tendono ad annullare i campi magnetici prodotti dalle sole correnti di fase.

A titolo di esempio, la Figura V-41 mostra i profili laterali dell'induzione magnetica calcolati per un elettrodotto blindato a 380 kV con correnti di fase di 3000 A (corrispondente a una potenza trasmessa di circa 2.000 MVA) e tenendo conto della corrente indotta negli involucri corto circuitati. E' da notare che l'impiego dei GIL permette una notevole riduzione del campo magnetico, sia in prossimità dell'asse della linea che lateralmente ad essa.

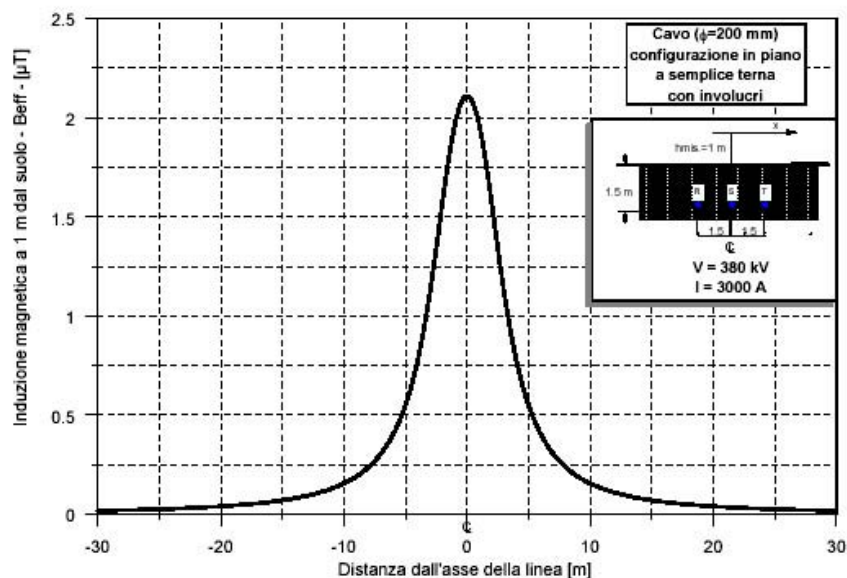


Figura V-41 : Livelli di induzione magnetica prodotti da un elettrodotto blindato a 380 kV con correnti di fase di 3.000 A [4].

V.5.4 Cavo a debole emissione di campo magnetico (green cable)

Il progetto di cavi di media e alta tensione a debole campo magnetico è stato sviluppato nel corso delle ricerche coordinate dal Prof. Marcello D'Amore nell'ambito del Programma di Ricerca Nazionale MIUR/CNR-ENEA "Salvaguardia dell'Uomo e dell'Ambiente dalle Emissioni Elettromagnetiche".

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti dalla ricerca teorica, e i successivi riscontri emersi dalla sperimentazione su prototipi.

Cavi di Alta Tensione monopolari [V-8]

La progettazione del cavo a debole emissione di campo magnetico prevede la realizzazione di un sottile schermo di materiale ferromagnetico ad alta permeabilità, da sovrapporre all'armatura accessibile in materiale buon conduttore. In tal modo si viene a realizzare uno schermo multistrato, in cui un materiale buon conduttore come il rame è interposto tra la sorgente di campo magnetico ed il materiale ferromagnetico ad elevata permeabilità.

La scelta delle modalità di collegamento a terra degli schermi dei cavi è condizionata dalla necessità di ottenere un buon livello di sicurezza ed un impatto minimo sul trasporto di energia elettrica. Il “single point bonding” prevede la messa a terra degli schermi ad una sola estremità della linea. Permette di contenere le correnti parassite a valori modesti limitando le perdite per effetto Joule che avrebbero un impatto negativo sulla portata massima del cavo. Il “solid bonding” comporta il collegamento a terra degli schermi ad entrambe le estremità. Consente di ottenere elevata sicurezza con lo svantaggio di notevoli correnti indotte sugli schermi. L’utilizzo del “cross bonding” degli schermi, infine, consente di ridurre le correnti parassite. Viene solitamente realizzato in corrispondenza della buca giunti ruotando i collegamenti degli schermi. In tal modo le correnti indotte su ogni schermo vengono bilanciate e si annullano reciprocamente. Nel progetto del nuovo cavo si adotta il “solid bonding” per lo schermo buon conduttore (rame) e il “single point bonding” per lo schermo ferromagnetico. Le Figura V-42 e Figura V-43 mostrano la configurazioni dei cavi con la messa a terra degli schermi.

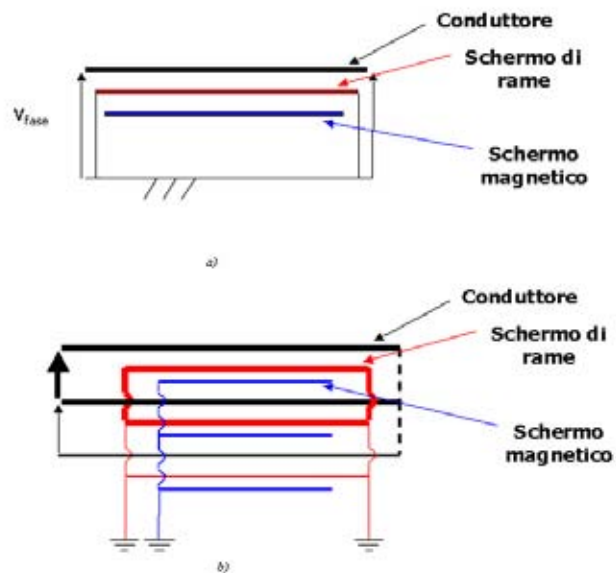


Figura V-42 : Schema bidimensionale del cavo monopolare e della messa a terra degli schermi: (a) “single point bonding” per lo schermo magnetico; (b) “solid bonding” per lo schermo di rame.

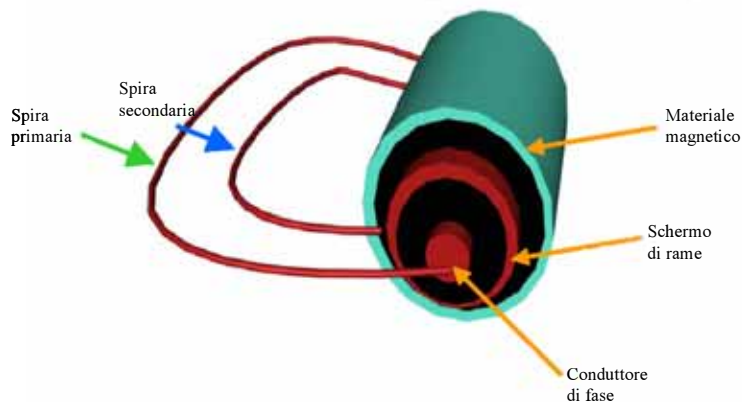


Figura V-43 : Schema tridimensionale del cavo a debole emissione di campo magnetico.

Il principio della schermatura si basa sulla combinazione degli effetti del materiale conduttore e di quello ferromagnetico. Sfruttando la messa a terra degli schermi di rame e l'effetto di contenimento delle linee di flusso del campo magnetico da parte dello schermo di materiale ferromagnetico, sugli schermi conduttori si inducono correnti parassite di intensità prossima alle correnti di linea. Tali correnti parassite generano un campo magnetico in opposizione a quello prodotto dalle correnti di linea. Si deve tuttavia rilevare che lo schermo ferromagnetico è soggetto ad elevata induzione magnetica che può provocarne la saturazione; inoltre la presenza delle correnti di linea e delle correnti parassite causa un consistente aumento di temperatura che può ridurre la portata a limite termico della linea. Per la linea AT, si è considerata una linea interrata a 150 kV costituita dai tre nuovi cavi con conduttori di alluminio di 1600 mm^2 , aventi la sezione di Figura V-44, distanti 25 cm in configurazione piana. Si è adottato uno schermo ferromagnetico di Alloy-49 di spessore 0,2 mm. La sezione dello schermo di rame è stata scelta considerando i seguenti due vincoli di progetto: la temperatura massima di $90 \text{ }^\circ\text{C}$ dell'isolante XLPE e il valore massimo di $3 \text{ } \mu\text{T}$ del profilo trasversale di induzione magnetica generato ad altezza di 1,5 m sull'asse della linea.

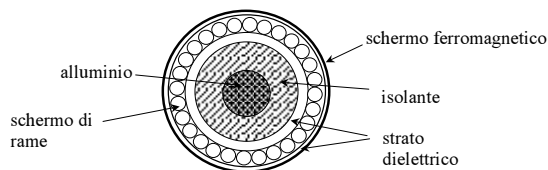


Figura V-44 : Rappresentazione schematica della sezione del cavo AT.

Il valore efficace della corrente di fase al limite termico dei tre cavi è stato calcolato mediante la rete termica equivalente considerando le perdite di potenza attiva dovute alla corrente nel conduttore e nello schermo di rame ed avendo trascurato le perdite negli strati dielettrici e nello schermo ferromagnetico. A titolo cautelativo si è assunto la condizione di uguaglianza dei valori efficaci delle correnti nei conduttori e negli schermi di rame. La Tabella V-5 riporta i valori di corrente a limite termico ottenuti per differenti sezioni dello schermo di rame: si rileva un “derating” della corrente del “green cable” rispetto al valore nominale del corrispondente cavo commerciale.

<i>Corrente nominale</i>	<i>Sezione dello schermo di rame</i>
<i>[A]</i>	<i>[mm²]</i>
660	300
694	350
773	500
800	560

Tabella V-5 : Corrente nominale per differenti sezioni dello schermo di rame.

Dal calcolo della matrice delle impedenze della linea, si dimostra che la linea con i nuovi cavi non richiede la trasposizione delle fasi, come invece avviene per le linee commerciali. E’ stato inoltre eseguito il calcolo della perdita di potenza attiva e della potenza reattiva: la Tabella V-6 presenta i valori ottenuti per la “green line” e per la linea con cavi commerciali. Si osserva che le perdite di potenza dei nuovi cavi sono 4-5 volte quelle della linea commerciale, tuttavia corrispondono ad una frazione percentuale della potenza nominale a limite termico

I_n [A]	“Green“ line		Cavi commerciali	
	P_d [kW/km]	Q_g [kVAR/km]	P_d [kW/km]	Q_g [kVAR/km]
660	178	-1.277	35	-1.106
694	184	-1.270	38	-1.090
773	195	-1.251	46	-1.057
800	201	-1.244	48	-1.023

Tabella V-6 : Valore della potenza attiva (P_d) e della potenza reattiva (Q_d) dissipate dal cavo AT a debole emissione di campo magnetico, per diversi valori di corrente nominale.

La Figura V-46 mostra i profili trasversali di induzione magnetica, ottenuti con un codice di calcolo agli elementi finiti, prodotti da correnti di fase di 800 A della linea con cavi commerciali e con i

nuovi cavi aventi sezione di rame di 560 mm^2 , disposti in posa piana a 25 cm di interdistanza (Figura V-45): il valore di picco si riduce da circa $32 \text{ }\mu\text{T}$ a circa $0,6 \text{ }\mu\text{T}$.

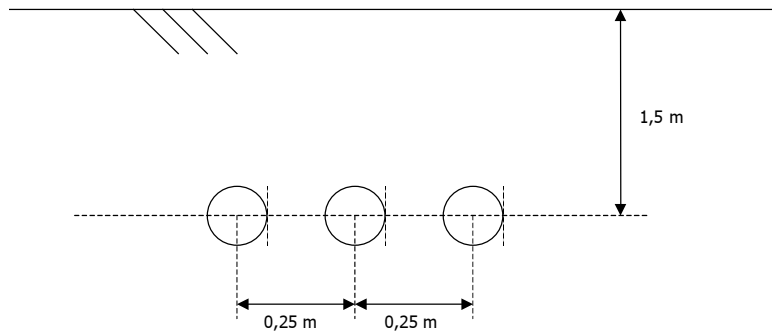


Figura V-45 : Posa dei cavi AT a debole emissione di campo magnetico e commerciali.

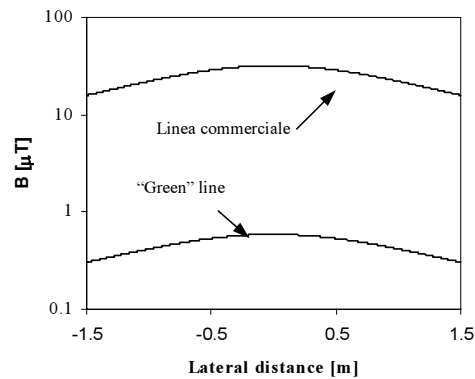


Figura V-46 : Profili laterali dell'induzione magnetica generata dalla linea trifase AT in cavo con configurazione orizzontale e correnti di fase di 800 A , alla distanza di $1,5 \text{ m}$.

Cavi di Media Tensione Monopolari [V-9]

I criteri di progetto del nuovo cavo di alta tensione sono stati utilizzati per definire anche i parametri elettrici e geometrici del cavo di media tensione. Il cavo MT $12/20 \text{ kV}$ a debole emissione di campo magnetico ha un conduttore di rame di 630 mm^2 , uno schermo di rame di 330 mm^2 ed uno

schermo ferromagnetico di Alloy-49 di 0,2 mm o di acciaio da carpenteria di 0,5 mm. La Figura V-47 e la Figura V-48 mostrano la sezione trasversale del cavo commerciale e del cavo a debole emissione di campo magnetico con le guaine in Alloy-49 e acciaio mentre nella Tabella V-7 indica i parametri elettromagnetici dei materiali utilizzati:

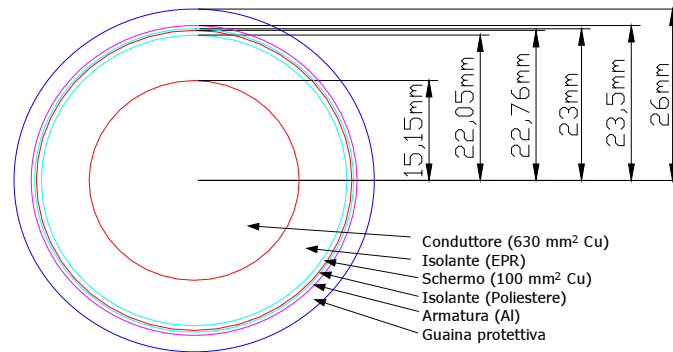
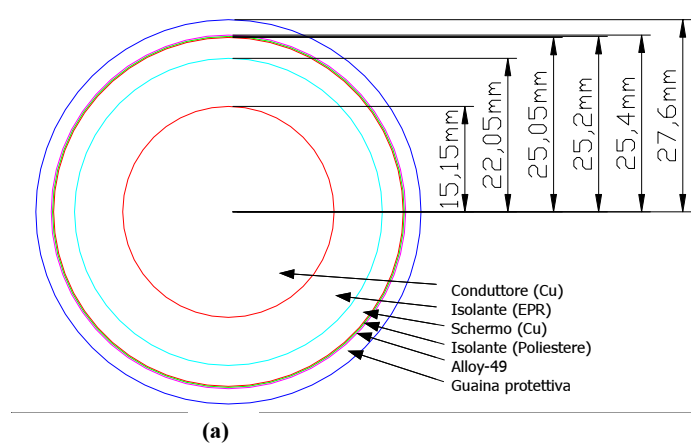


Figura V-47 : Schema del cavo commerciale MT.



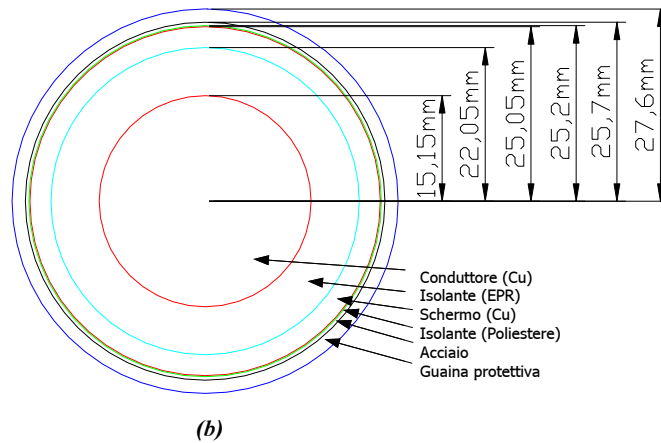


Figura V-48 : Schema del cavo MT a debole campo magnetico: (a) guaina in Alloy-49, (b) guaina in acciaio.

	σ [S/m]	ϵ_r	μ_r
Alluminio	$2,8 \cdot 10^7$	1	1
Rame	$5,8 \cdot 10^7$	1	1
EPR	$2 \cdot 10^{-8}$	2,5	1
Poliestere	10^{-8}	2,5	1
PVC	10^{-7}	3,5	1

Tabella V-7 : Parametri elettromagnetici cavo MT

La Figura V-49 e la Tabella V-8 mostrano la caratteristica di magnetizzazione dell'Alloy-49 e dell'acciaio. Si deve rilevare che la caratteristica B-H dell'Alloy-49 subisce una notevole riduzione della permeabilità magnetica e del livello di saturazione a causa del ridotto angolo di curvatura del cavo. L'acciaio, usato nei cavi a scopo di protezione meccanica, ha permeabilità magnetica relativa inferiore a 1.000 e costo notevolmente inferiore rispetto a quello dell'Alloy-49.

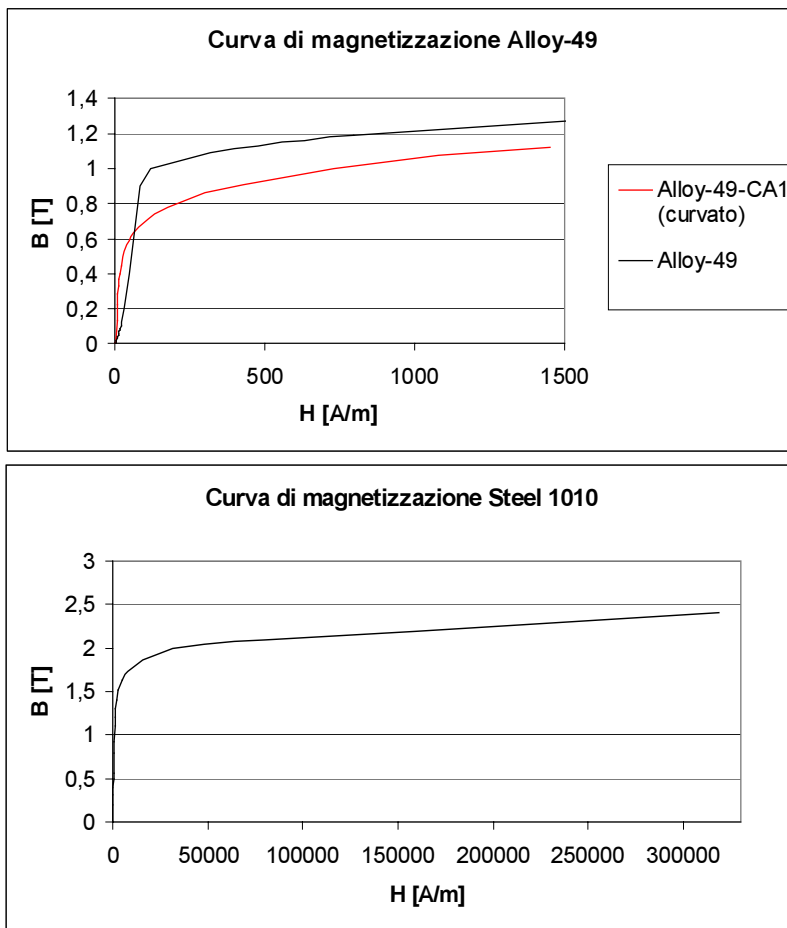


Figura V-49 : Caratteristiche elettromagnetiche dei materiale ferromagnetici:(a) Alloy-49, (b) acciaio.

	Permeabilità magnetica relativa μ_r	B di saturazione [T]
Alloy-49	15.000	0,8 - 1
Allot-49 CA1 (curvato)	8.000	0,6 - 0,8
Steel 1010	1.000	1,7 - 2

Tabella V-8 : Parametri elettromagnetici

E' stato realizzato il set-up di misura del campo magnetico generato dalla terna di cavi lunghi 12,5 m, distanti 20 cm in configurazione piana con corrente di fase di 570 A (limite termico). La Figura

V-50 mostra i profili trasversali di induzione magnetica misurati ad altezza di 1 m sull'asse della linea: La più elevata riduzione di campo si ha per il cavo con schermo di Alloy-49; si rileva una notevole attenuazione dell'induzione magnetica anche utilizzando schermi di acciaio.

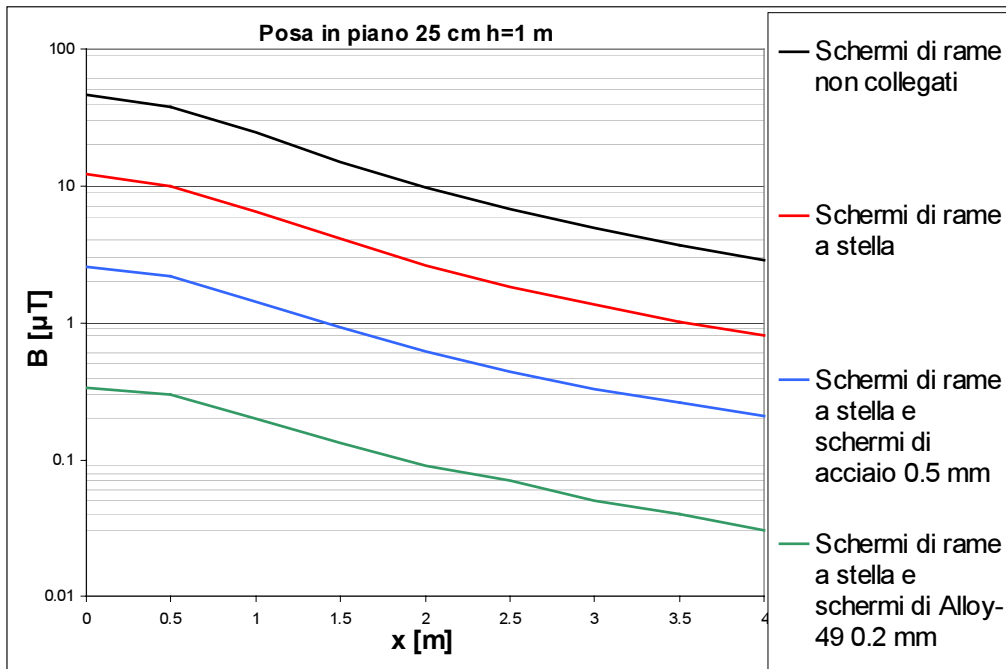


Figura V-50 : Confronto tra i valori di induzione magnetica rilevati a 1 m dall'asse della linea MT.

Nella simulazione della linea di media tensione, la perdita di potenza attiva è risultata 2,8 volte maggiore di quella prodotta dalla linea con cavi commerciali ed è stata confermata la caratteristica di simmetria elettrica della linea che rende non necessaria la trasposizione dei cavi.

I costi di una linea riguardano sia gli oneri per l'approvvigionamento dei materiali e di posa, sia gli oneri per l'energia perduta per effetto joule. Gli oneri per la posa sono comuni ad ogni scelta adottata ("green line" o cavo commerciale), e dipendono sostanzialmente dal progetto di installazione, dal tipo di strada sotto la quale va posata la linea, dalla presenza più o meno massiccia di sottoservizi, dai costi per il ripristino della strada e da molteplici altre condizioni. Si possono riassumere tali costi in tre categorie:

- canone per l'occupazione di spazi ed aree pubbliche (COSAP): ammonta a circa 28.842 €/km;

- forniture e lavori: riguardano i costi di scavo e delle giunzioni, terminazioni e prove dei cavi che vengono posati; tali costi, nel caso di posa piana a 0,8 m di profondità (trincea di dimensioni convenzionali di MT) sono valutabili mediamente intorno a 122.623 €/km; per tracciati particolarmente complessi si possono comunque raggiungere costi significativamente maggiori;

- oneri comunali escluso COSAP: tali costi sono valutabili intorno a 10.418 €/km.

I costi dovuti agli schermi di rame e a quelli di acciaio sono riportati in Tabella V-9.

	<i>Sezione [mm²]</i>	<i>Peso [kg/km]</i>	<i>Costo [€/km]</i>	<i>Peso* [kg/km]</i>	<i>Costo* [€/km]</i>
<i>Rame</i>	330	2.937	4.405,5	2.937	4.405,5
<i>Acciaio</i>	80	640	512	800	640
<i>TOTALE</i>	-	-	4.917,5	-	5.045,5

* con sormonto del 25%

Tabella V-9 : Costi degli schermi di rame e di acciaio.

La Tabella V-10 mostra i costi di esercizio aggiuntivi, che devono essere moltiplicati per tre per la terna di cavi.

<i>Costi di esercizio medi [€/km]</i>	
<i>Giornalieri</i>	44,22
<i>Settimanali</i>	269,48
<i>Mensili</i>	1.144,25
<i>Annuali</i>	1.2270,47

Tabella V-10 : Costi di esercizio aggiuntivi per cavo.

Infine viene riportato, in Tabella V-11, il confronto dei costi della “green line” e di una linea commerciale di media tensione: si nota che l'acciaio risulta più conveniente, in quanto a fronte di un notevole effetto schermante, se pure inferiore a quello fornito dall'Alloy-49, presenta un aggravio dei costi pari al 23% rispetto alla linea commerciale, contro il 32% dell'Alloy-49.

	Linea commerciale	“Green line” con schermi di Alloy-49	“Green line” con schermi di acciaio
Schermi di rame	100 mm ²	330 mm ²	330 mm ²
	4.005 €/km	13.216,5 €/km	13.216,5 €/km
Armatura	Al 73 mm ² (0,5 mm)	Alloy-49	acciaio (0,5 mm)
	1.182,6 €/km	19.072,2 €/km	1.536 €/km
Costi di esercizio annuali	18.834 €/km	55.645,41 €/km	55.645,41 €/km
Costi di installazione + accessori	161.883 €/km	161.883 €/km	161.883 €/km
Totale	185.904,6 €/km	246.396,1 €/km	232.280,91 €/km
	C_T	1,32 C_T	1,23 C_T

Tabella V-11 : Costi della “green line” e della linea commerciale di media tensione.

Cavi di Media Tensione Tripolari

In un cavo tripolare a debole emissione lo schermo di rame non è necessario ai fini dell’abbattimento del campo magnetico. Infatti la schermatura di una terna di cavi unipolari è concettualmente diversa da quella di un cavo tripolare: mentre nel primo caso si adotta una schermatura per correnti parassite (creando un campo magnetico opposto a quello generato dalla corrente di fase), nel secondo caso la schermatura è dovuta a fenomeni di riflessione e rifrazione sullo schermo magnetico che attenuano il campo che esce all’esterno dello stesso schermo.

Nella Figura V-51 e nella Figura V-52 vengono riportate le sezioni trasversali rispettivamente di un cavo commerciale e di un cavo a debole campo magnetico, in Tabella V-12 i parametri elettromagnetici del cavo tripolare.

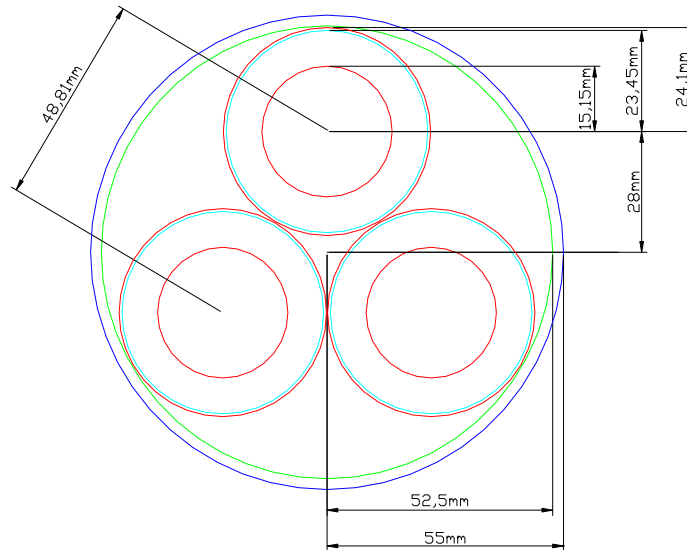


Figura V-51 : Cavo tripolare commerciale.

	σ [S/m]	ϵ_r	μ_r
Rame	$5.8 \cdot 10^7$	1	1
EPR	$2 \cdot 10^{-8}$	2.5	1
PVC	10^{-7}	3.5	1
Poliestere	10^{-8}	2.5	1

Tabella V-12 : Parametri elettromagnetici cavo tribolare commerciale

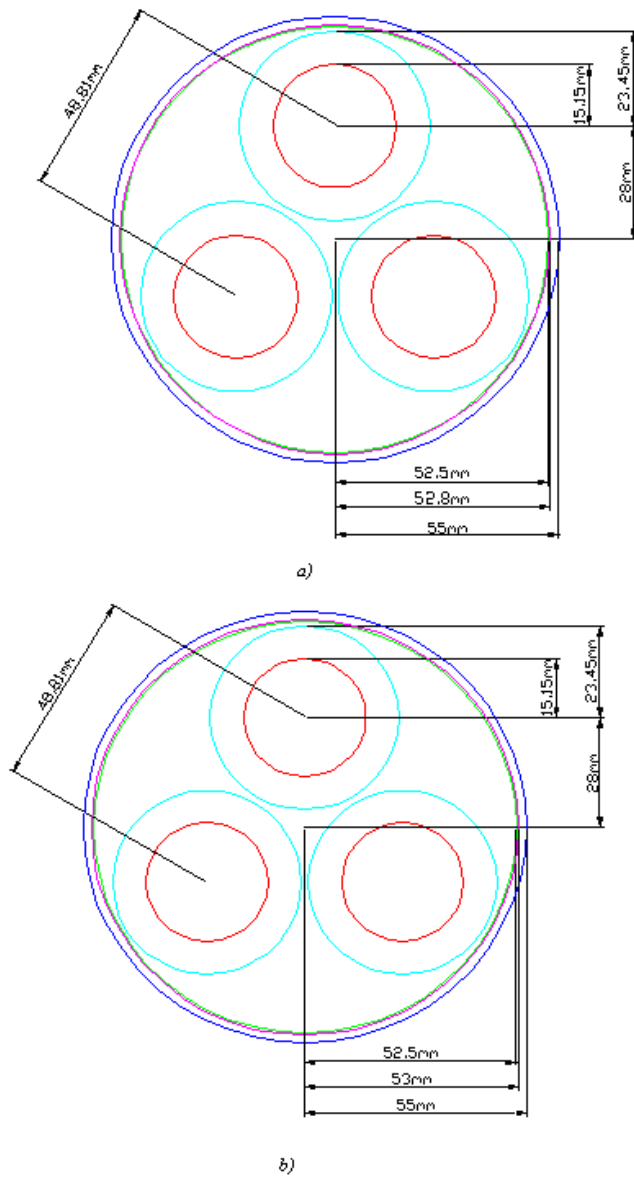


Figura V-52 : Sezioni del cavo a debole emissione con Alloy-49 (a) o acciaio (b).

In Figura V-53 vengono riportati a confronto i valori dell'induzione massima sul terreno, per correnti pari a 582 A e a distanza di 1 m dall'asse dei cavi, relativa alla linea commerciale e alla "green

line” con schermi in Alloy-49 e acciaio. Come per il caso del cavo monopolare, le prestazioni schermanti migliori sono dell’Alloy 49, ma anche l’acciaio presenta un notevole abbattimento del campo magnetico.

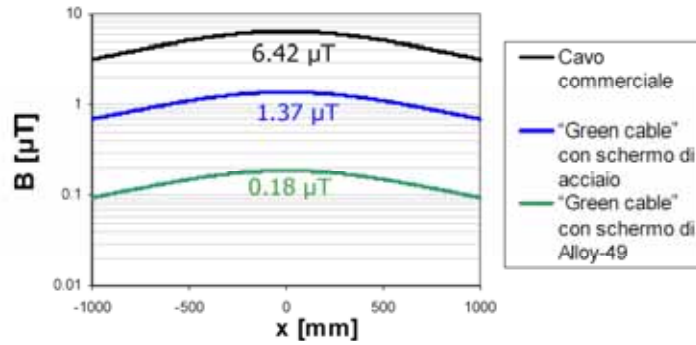


Figura V-53 : Confronto dell’induzione magnetica B

Le perdite di potenza di un cavo tripolare si possono assimilare alle perdite di tre cavi unipolari commerciali in posa a trifoglio. La portata a limite termico è molto simile (577 A nel caso di tre cavi unipolari a trifoglio, 582 A nel caso di cavo tripolare). Anche la potenza reattiva generata è simile dato che le reattanze di fase sono quasi coincidenti con quelle calcolate per una terna di cavi commerciali disposti a trifoglio. Si deve inoltre notare che per il cavo tripolare a debole emissione sono assenti le perdite aggiuntive di potenza attiva. Nell’analisi termica il cavo commerciale e il “green cable” hanno le stesse caratteristiche; infatti lo schermo di materiale magnetico nel “green cable” e gli schermi di rame nel cavo commerciale non sono percorsi da corrente e quindi non influenzano la temperatura dell’isolante. La rete termica considerata è la stessa per entrambe le tipologie di linea. L’unico costo aggiuntivo per il “green cable” tripolare è dovuto al materiale magnetico; peraltro l’Alloy-49 e ancora di più l’acciaio hanno un costo molto basso rispetto agli oneri di posa. Tenendo conto del sormonto del 25% si ottengono i pesi e i costi indicati in tabella Tabella V-13. Si noti che i costi aggiuntivi sono una percentuale modesta dell’intero costo di posa, manutenzione, accessori ecc.

	Sezione [mm ²]	Peso [kg/km]	Costo [€/km]	Peso ⁽¹⁾ [kg/km]	Costo ⁽¹⁾ [€/km]
Alloy-49	99	807,84	19.792	1.010	24.740
acciaio	165,7	1.325,6	1.060,48	1.657	1.325,6

(1) con sormonto del 25%

Tabella V-13 : Costi di Alloy-49 e acciaio.

In conclusione risulta conveniente adottare il “green cable” con schermo di acciaio in quanto presenta costi aggiuntivi molto ridotti e notevoli prestazioni schermanti.

V.6 Mitigazione dei campi magnetici emessi delle sottostazioni e delle cabine di trasformazione

V.6.1 Introduzione

Vengono riportate le soluzioni impiantistiche che consentono la riduzione del campo magnetico a frequenza industriale generato dalle cabine di trasformazione. Le soluzioni consistono sia in criteri progettuali e costruttivi, sia nell'utilizzo di opportune schermature.

La situazione risulta critica relativamente al caso delle cabine MT/BT, in quanto si è in presenza di elevate correnti circolanti nella sezione BT.

V.6.2 Cabine Primarie AT/MT

Le emissioni di campo magnetico che una cabina primaria genera nell'ambiente circostante dipendono in maniera rilevante oltre che dalla potenza erogata anche dalla disposizione delle apparecchiature. Da questo punto di vista, risulta difficile generalizzare i livelli di emissione prodotti dai centri di distribuzione, specie per le realizzazioni in blindato isolate in SF₆, in quanto queste apparecchiature possono essere variamente disposte per adattarsi alle caratteristiche degli spazi in cui sono installate.

In linea di massima, le cabine primarie AT blindate isolate in SF₆ hanno una configurazione più compatta, e godono quindi dell'effetto schermante dell'involucro; pertanto le emissioni sono più contenute, a parità di condizioni, rispetto ad una cabina con apparecchiature AT isolate in aria.

La Figura V-54 si riferisce ad una cabina elettrica primaria, alimentata da linee aeree a portali, con la sezione AT isolata in aria; e la Figura V-55 riporta i valori calcolati di induzione magnetica. I livelli di emissione prodotti nelle aree prospicienti alle recinzioni dipendono sostanzialmente dalla tipologia e dalla configurazione delle linee AT che la alimentano. Infatti le apparecchiature e le macchine, avendo una geometria molto compatta, hanno un raggio di influenza minore. Ai fini della minimizzazione del campo magnetico emesso, è opportuno cercare di curare il progetto in maniera tale che sia i trasformatori, sia i tracciati delle congiungenti di media tensione e delle linee in uscita, siano distanti il più possibile dalla recinzione della stazione, e pertanto dai fabbricati limitrofi.

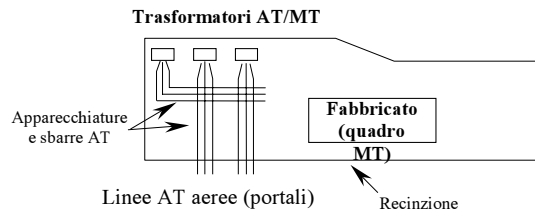


Figura V-54 : Schema di una cabina primaria AT/MT [10].

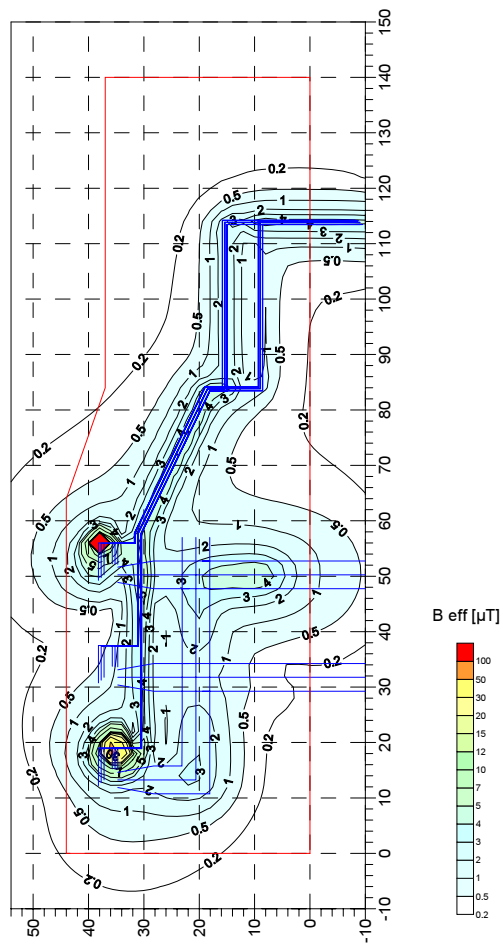


Figura V-55 : Mappe dell' induzione magnetica generata da una cabina AT/MT alimentata con linee aeree a portali e sezione AT isolata in aria [10].

V.6.3 Cabine Secondarie MT/BT

Le cabine MT/BT sono impianti che si trovano distribuiti in maniera pressoché uniforme sul territorio. Possono essere installate in manufatti esterni, qualora sia difficile reperire aree utili all'interno di fabbricati, ovvero nelle zone maggiormente urbanizzate, oppure in locali interrati. La Figura V-56 mostra lo schema semplificato di una cabina di distribuzione MT/BT.

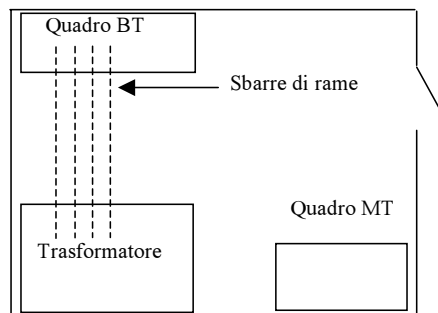


Figura V-56 : Schema di una cabina secondaria MT/BT [10].

Nella maggior parte delle cabine elettriche, il trasformatore è con isolamento in olio. Nelle installazioni più recenti, il quadro di MT è in SF₆, nelle meno recenti in aria. La costruzione del quadro di BT è molto varia: si hanno, infatti, quadri con componenti assemblati in loco e quadri prefabbricati del tipo protetto. I collegamenti trasformatore-quadro BT, nelle realizzazioni più datate, sono realizzati con sbarre di rame nudo.

La principale sorgente di campo magnetico è costituita dai circuiti di bassa tensione (quadri e conduttori), poiché sono percorsi dalle correnti più intense; si deve inoltre considerare il contributo al campo fornito dal trasformatore MT/BT.

La riduzione dell'induzione magnetica, all'esterno delle cabine di trasformazione MT/BT, può essere ottenuta razionalizzando la disposizione delle apparecchiature e con l'utilizzo di componenti particolarmente compatti, al fine di aumentare le distanze con le pareti e/o il solaio. Un possibile intervento consiste nella sostituzione del ponte di BT con conduttori (eventualmente opportunamente cordati), posati in canaline situate nel centro della cabina. Tale intervento permette di aumentare la distanza tra i conduttori di bassa tensione e l'esterno. Inoltre, l'avvicinamento del quadro di BT al trasformatore, limitando la lunghezza dei conduttori di BT, contribuisce positivamente alla riduzione dell'induzione magnetica all'esterno della cabina.

Nelle nuove installazioni si è dimostrata maggiore sensibilità al problema della riduzione dell'inquinamento elettromagnetico ambientale: la realizzazione di conduttori isolati e l'utilizzo di componenti di nuova generazione (dai trasformatori, ai quadri, agli interruttori) ha permesso di ridurre il campo magnetico generato. Si rivela, inoltre, la generale tendenza a costruire cabine MT/BT molto compatte. Come già osservato, nei casi in cui quadri e trasformatori sono di dimensioni limitate, è più facile che vi sia una maggiore distanza tra le apparecchiature elettriche produttrici di campi elettromagnetici e l'esterno. Nella Figura V-57 è rappresentato lo schema costruttivo di una cabina compatta.

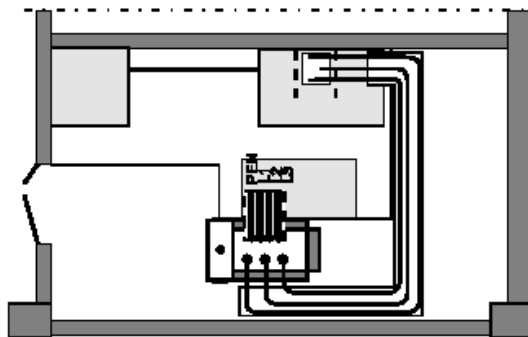


Figura V-57 : Schema costruttivo di cabina MT/BT compatta .

Nello schema si notano gli ampi spazi liberi presenti all'interno della cabina che permettono di realizzare notevoli distanze con le pareti. Il trasformatore è posto direttamente davanti al quadro di bassa tensione, riducendo così il percorso dei conduttori di bassa tensione isolati in cavo. Tale scelta consente la riduzione dell'altezza complessiva del comparto di bassa tensione (che solitamente può raggiungere 2,85 m per motivi di sicurezza), comportando, in tal modo, la riduzione del campo magnetico al di sopra della cabina. I cavi vengono posati in apposite canaline, poste nel pavimento della cabina: questa disposizione, quando risulta necessario, permette un'agevole realizzazione di una schermatura locale. La schermatura di cabine elettriche interrate si propone di attenuare il campo magnetico che attraverso il soffitto delle stesse cabine penetra negli ambienti soprastanti; questo problema è critico per le cabine interrate sotto gli edifici per uso abitativo. Pertanto l'analisi è stata rivolta al progetto di schermi da installare sul soffitto delle cabine.

Si consideri la cabina elettrica di distribuzione secondaria avente lo schema costruttivo rappresentato in Figura V-58.

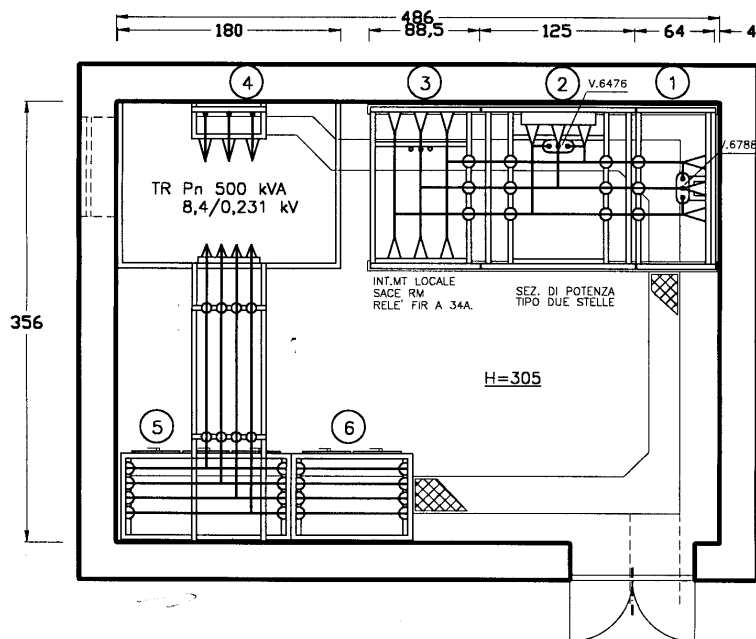


Figura V-58 : Schema della cabina elettrica di distribuzione secondaria.

I componenti della cabina che si configurano come sorgenti di campo magnetico sono i seguenti:

- quadro di media tensione a 8,4 kV isolato in aria (1, 2 e 3);
- trasformatore MT/BT in olio minerale, con tensione primaria 8,4 kV e tensione secondaria 400 V (4);
- sbarre di collegamento trasformatore/quadro di BT da 70x5 mm, 2 per ogni fase ed 1 per il neutro;
- quadro di bassa tensione (5 e 6).

Si considerano, quali principali sorgenti di campo magnetico, i conduttori di BT nel tratto trasformatore-quadro BT. I conduttori sono percorsi da correnti simmetriche ed equilibrate di 500 A, e pertanto non è stata considerata la presenza del neutro. Si osservi che l'effetto schermante del campo magnetico prodotto dal cassone del trasformatore in olio rende tale sorgente non rilevante. Lo schermo è costituito da un pannello posto sul soffitto della cabina, secondo la configurazione di Figura V-59. Si

è considerato uno schermo di alluminio con spessore di 3 mm, e di materiale ferromagnetico con spessore di 3 mm con $\mu_r = 1.000$.

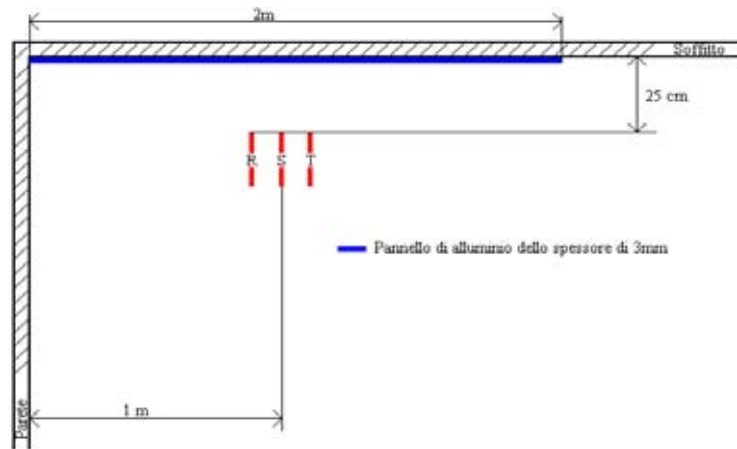


Figura V-59 : Pannello schermante sul soffitto della cabina elettrica.

La valutazione del campo magnetico è eseguita utilizzando un codice di calcolo agli elementi finiti. Si calcola il profilo dell'induzione magnetica nelle direzioni parallela e verticale al soffitto, assumendo gli assi di riferimento l e d rappresentati in Figura V-60.

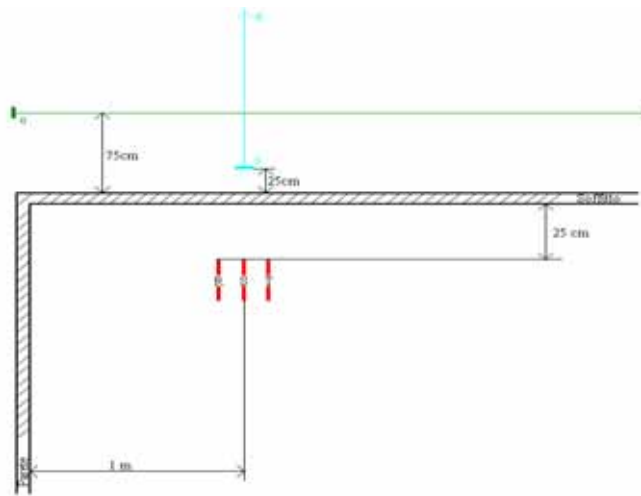
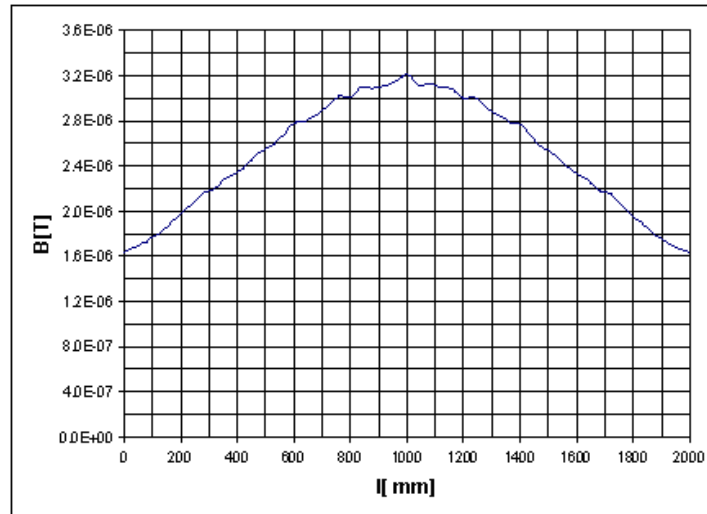
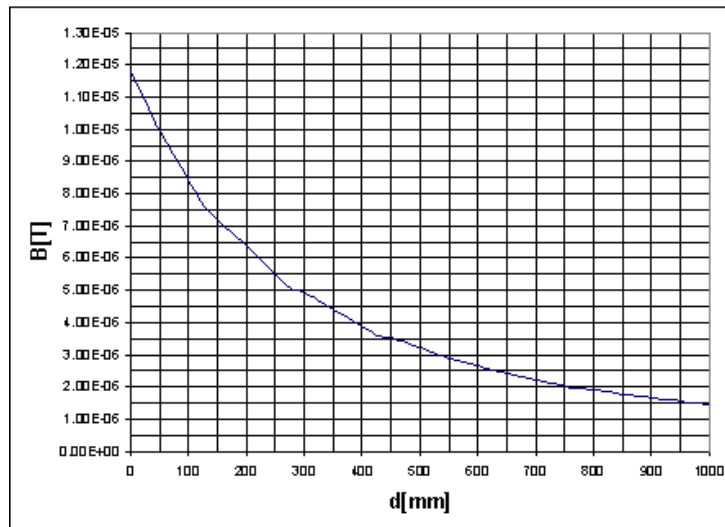


Figura V-60 : Assi di riferimento l e d dei profili di induzione magnetica.

La Figura V-61 mostra i profili di induzione magnetica calcolati in assenza di schermatura, mentre nella Figura V-62 e nella Figura V-63 si riportano i risultati ottenuti lungo l'asse orizzontale ad 1m dal soffitto della cabina, e lungo l'asse verticale con schermo ferromagnetico di spessore di 3 mm

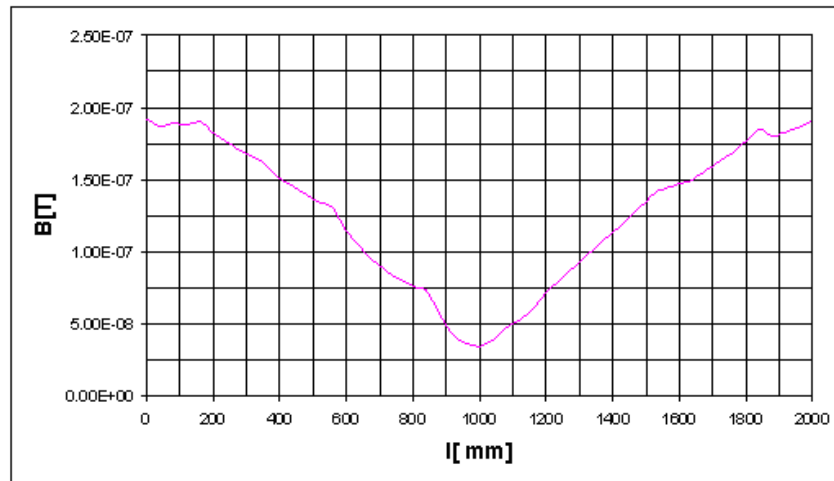


a)

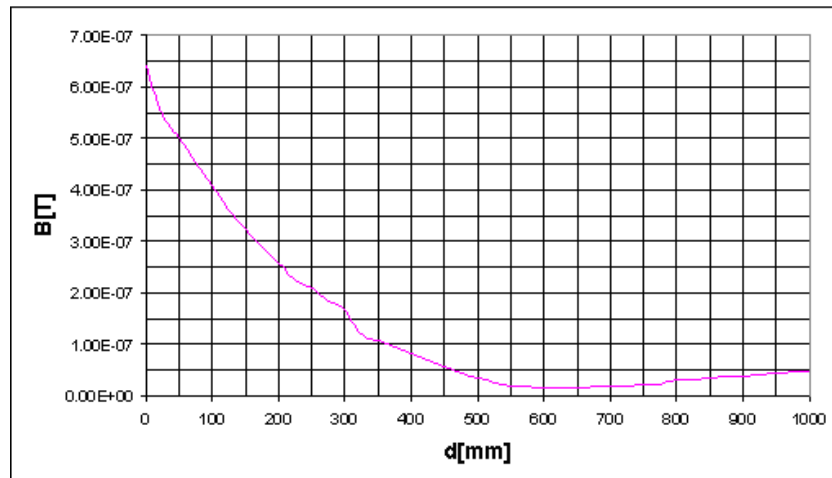


b)

Figura V-61 : Profilo di induzione magnetica lungo gli assi orizzontale (a) e verticale (b) in assenza di schermatura.

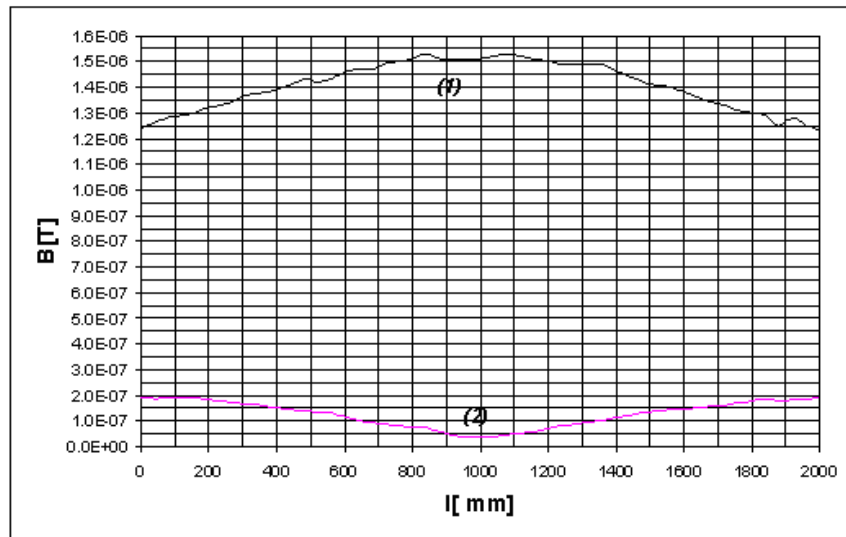


a)

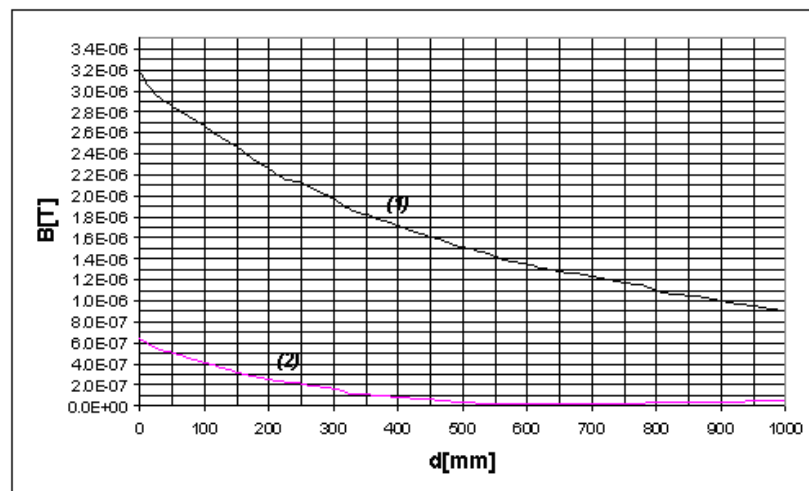


b)

Figura V-62 : Profilo di induzione magnetica lungo l'asse orizzontale (a) e l'asse verticale (b) con schermo di alluminio.



a)



b)

Figura V-63 : Profilo di induzione magnetica lungo l'asse orizzontale (a) e l'asse verticale (b) con schermo ferromagnetico.

In Figura V-63 sono riportate anche le curve di Figura V-62. L'ampiezza dell'induzione magnetica prodotta dai conduttori BT supera il valore di $12 \mu\text{T}$ in corrispondenza del pavimento dell'ambiente soprastante il soffitto della cabina.

La schermatura tramite un pannello di alluminio dello spessore di 3 mm collocato sul soffitto della cabina produce una notevole attenuazione dell'induzione magnetica che si riduce di circa dieci volte. Tale massimo non si ha in corrispondenza dell'asse delle sbarre di BT ma in prossimità del bordo dello schermo. L'incremento dello spessore dello schermo in alluminio da 3 mm a 5 mm non produce un aumento significativo dell'efficienza di schermatura. L'utilizzo di uno schermo costituito da materiale conduttore (3 mm di alluminio) e materiale ferromagnetico ad alta permeabilità (0,3 mm di Skudotech) fornisce un'attenuazione dell'induzione magnetica inferiore rispetto alla schermatura con solo materiale conduttore. La schermatura tramite un pannello in materiale ferromagnetico, dello spessore di 3mm e con permeabilità magnetica relativa pari a 1000, collocato sul soffitto della cabina, produce una modesta attenuazione dell'induzione magnetica. Il notevole aumento della permeabilità magnetica dello schermo non produce effetti significativi sull'efficienza di schermatura; il valore massimo dell'induzione magnetica si riduce di circa quattro volte, rispetto alla configurazione in cui è assente la schermatura. Un'elevata attenuazione dell'induzione magnetica si ottiene dunque installando uno schermo metallici buon conduttore sul soffitto della cabina; tale semplice soluzione che comporta costi modesti evita la schermatura completa della cabina stessa. I costi connessi con le attività di installazione degli schermi sono dell'ordine dell'8% del costo dell'intera cabina. Spesso, però, la semplice installazione di schermi, o lo smantellamento del ponte sbarre, non risolve in maniera esaustiva il problema. Tali costi potrebbero lievitare nel caso in cui sia necessario sostituire tutte le apparecchiature, ovvero procedere allo spostamento dell'impianto in altro sito.

Di particolare interesse è il progetto ACEA di nuove cabine elettriche MT/BT in superficie aventi la struttura rappresentata dallo schema di Figura V-64. Il quadro di BT è prefabbricato di tipo protetto, mentre il quadro di media tensione è isolato in SF₆. Il trasformatore è in olio naturale con potenza nominale di 630 kVA e rapporto di trasformazione 20.000/380 V. Il collegamento tra quadro BT e trasformatore è realizzato tramite conduttori di BT RG7R da 240 mm², quattro per ciascuna fase e due per il neutro. Il collegamento in entra ed esci di media tensione è realizzato tramite conduttori del tipo RG7H1RX da 150 mm², cordati ad elica visibile. Le pareti della cabina di trasformazione sono costituite da pannelli in acciaio Fe430 dello spessore di 3 mm. La permeabilità relativa dell'acciaio impiegato per la realizzazione dell'involucro, è assunta pari a 700; la permeabilità magnetica dell'acciaio può variare, però, in relazione ai processi di laminazione del materiale. Le sorgenti di campo magnetico considerate nelle simulazioni sono rappresentate dai conduttori di BT, nel tratto trasformatore-quadro BT, e dal quadro BT simulato con un sistema di sbarre conduttrici. Allo scopo di

semplificare la complessità della struttura si trascurano le sorgenti di minore rilevanza quali il trasformatore in olio MT/BT, i conduttori di MT nel tratto quadro MT-trasformatore e il quadro di MT.

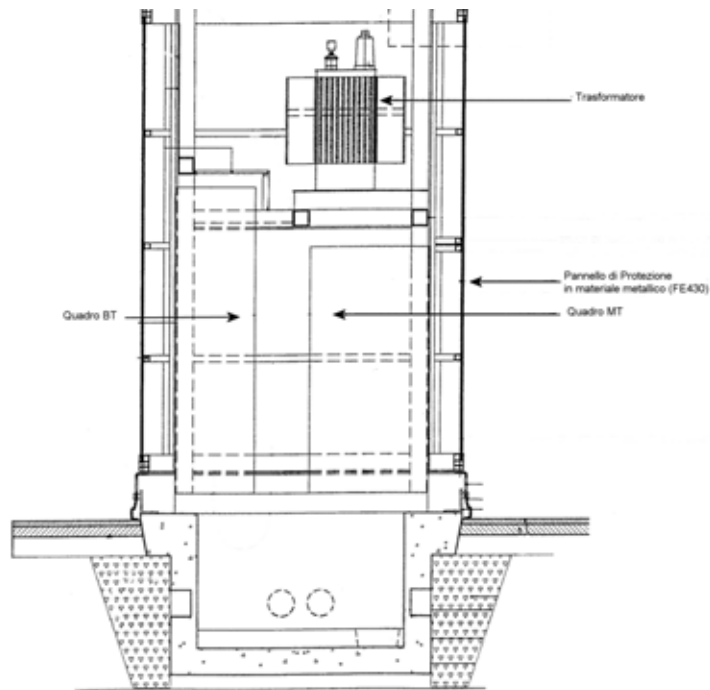


Figura V-64 : Schema costruttivo di una cabina elettrica in superficie.

Il progetto di schermatura per la riduzione del campo magnetico generato all'esterno prevede l'installazione dei seguenti componenti:

- pannelli di alluminio disposti all'interno delle pareti della cabina, dello spessore di 3 mm;
- pannelli di materiale ferromagnetico di spessore 2 mm, sull'involucro del quadro di BT;
- canale di materiale ferromagnetico di sezione rettangolare, attorno ai conduttori di BT.

La Figura V-65 mostra lo schema della cabina dotata di schermatura.

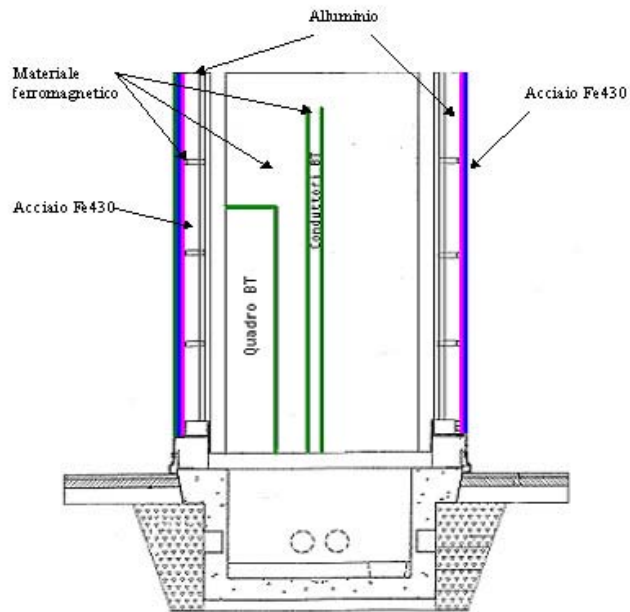


Figura V-65 : Schema della cabina dotata di schermatura.

La costruzione del modello geometrico è stata effettuata con codice di calcolo agli elementi finiti tridimensionali. Nel calcolo del campo magnetico, è stata considerata una corrente in valore efficace di 1.325 A nei circuiti di BT; tale valore di corrente fa riferimento alla potenza nominale del trasformatore ridotta del 20%. E' necessario sottolineare che nella simulazione non si tiene conto della non-linearità dei materiali magnetici utilizzati. Tuttavia, tenuto conto dell'intensità delle correnti, tale limitazione non comporta errori di calcolo: i materiali utilizzati, infatti, sono lontani dalle condizioni di saturazione. L'ampiezza dell'induzione magnetica ad 1 m sul suolo è calcolata lungo il perimetro della cabina elettrica ad una distanza dalle pareti di 0,5 m, ed in funzione della distanza dalle pareti della stessa cabina di trasformazione: nella Figura V-66 è rappresentato il sistema di riferimento utilizzato. La Figura V-67 riporta la mappa di induzione magnetica ad 1m sul suolo prodotta dalla cabina in presenza di una struttura di protezione in acciaio dello spessore di 3 mm, mentre la Figura V-68 : indica i profili di induzione magnetica lungo il perimetro della cabina ad una distanza di 0,5 m dalle pareti ad 1 m sul suolo. Per la stessa struttura la Figura V-69 mostra i profili di induzione magnetica orizzontale e

verticale ad 1 m sul suolo in funzione della distanza dalle pareti della cabina, lungo l'asse d di Figura V-45. In particolare, nella seconda è riportato il caso in cui le pareti della cabina di trasformazione siano costituite da pannelli di acciaio Fe430 dello spessore di 3 mm.

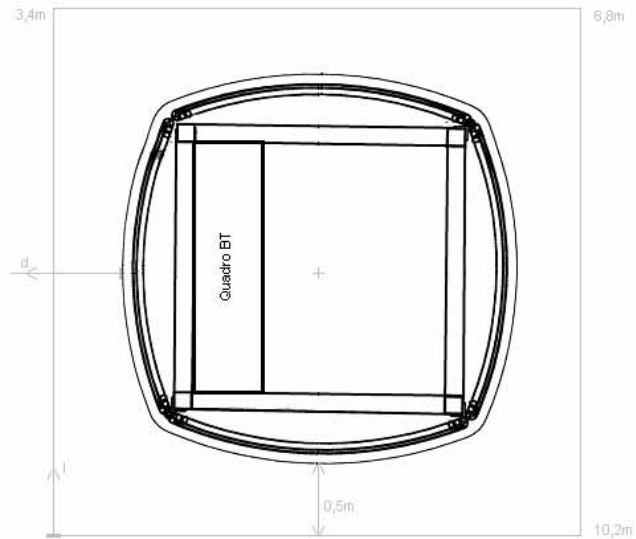


Figura V-66 : Sistema di riferimento dei profili di induzione magnetica.

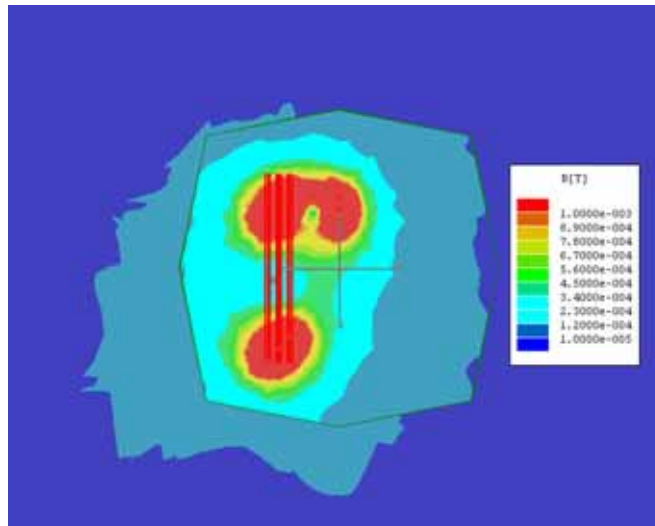


Figura V-67 : Mappa di induzione magnetica sul suolo prodotta dalla cabina in presenza di una struttura di protezione in acciaio.

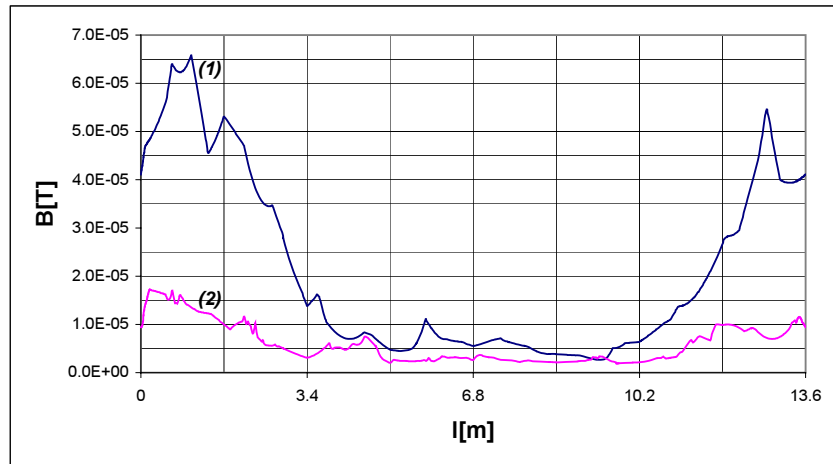


Figura V-68 : Profili di induzione magnetica lungo il perimetro della cabina: in assenza (1) e in presenza (2) della struttura di acciaio.

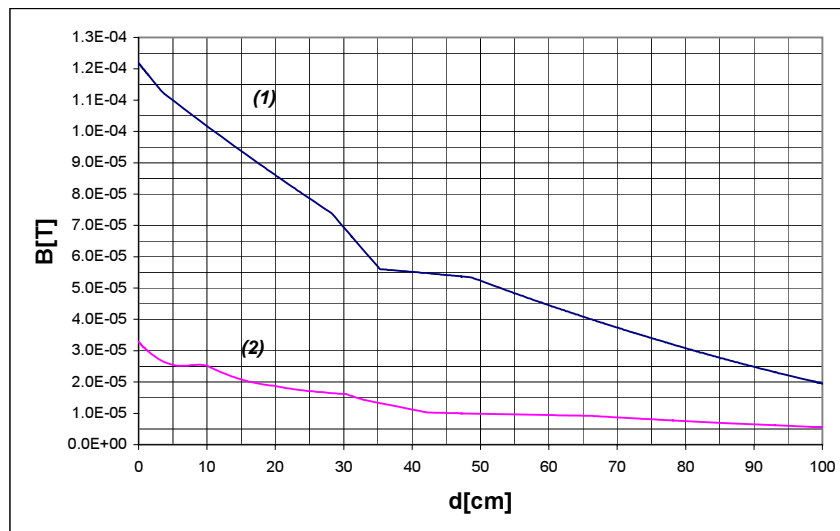


Figura V-69 : Profili di induzione magnetica orizzontale e verticale ad 1 m sul suolo in funzione della distanza dalle pareti della cabina, in assenza (1) e in presenza (2) della struttura di acciaio.

Si considera anche la schermatura tramite pannelli di alluminio, pannelli in materiale ferromagnetico ($\mu_r=4.000$) sull'involucro del quadro di BT ed un canale a sezione rettangolare, anche esso in materiale ferromagnetico ($\mu_r =4.000$), attorno ai conduttori di BT. La Figura V-70, la Figura V-71 e la Figura V-72 mostrano le distribuzioni di induzione magnetica calcolate.

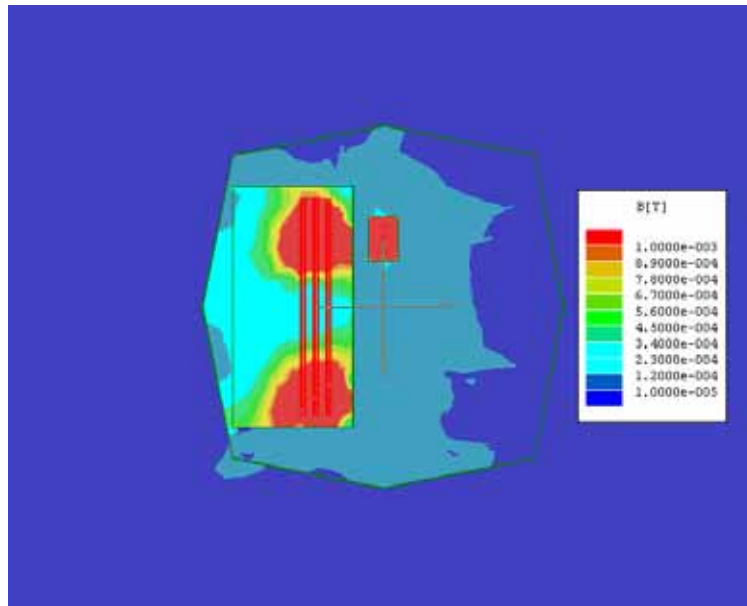


Figura V-70 : Mappa dell'induzione magnetica ad 1 m sul suolo prodotta dalla cabina dotata di schermatura.

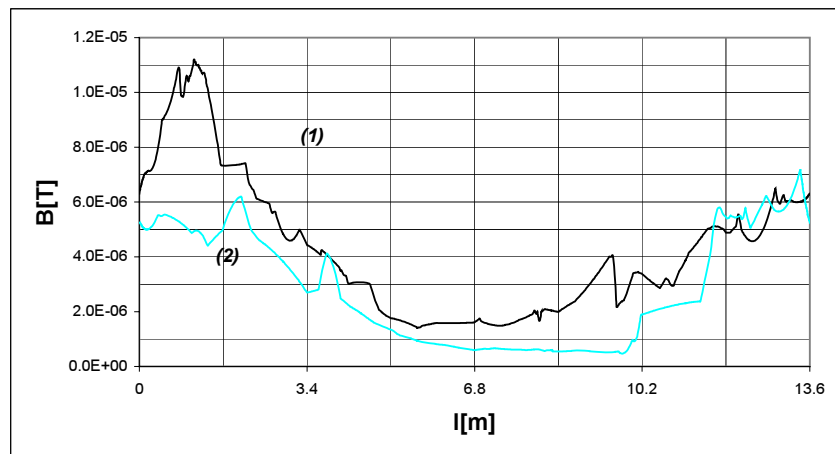


Figura V-71 : Profili di induzione magnetica lungo il perimetro della cabina schermata, ad una distanza di 0,5 m dalle pareti, a 1m sul suolo: (1) schermatura con pannelli di alluminio, (2) schermatura con pannelli di materiale ferromagnetico.

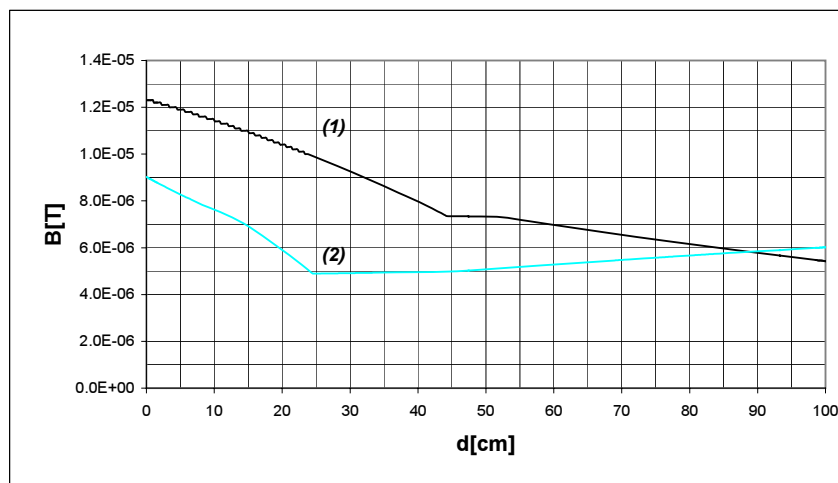


Figura V-72 : Profili di induzione magnetica ad 1 m sul suolo in funzione della distanza dalle pareti della cabina schermata lungo l'asse d: (1) schermatura con pannelli di alluminio, (2) schermatura con pannelli di materiale ferromagnetico.

Il modulo dell'induzione magnetica assume i valori massimi nella zona antistante il quadro di BT, mentre si mantiene molto più limitata in prossimità del quadro di MT. La presenza della struttura di protezione in acciaio, anche se caratterizzata da una modesta permeabilità, produce una notevole attenuazione dell'induzione magnetica all'esterno della cabina. Tuttavia l'induzione rimane elevata nella zona antistante il quadro di BT. La schermatura tramite pannelli di alluminio riesce solo in misura limitata ad attenuare l'induzione magnetica; tale risultato può essere attribuito alla notevole distanza degli schermi dalla sorgente, i quali vengono aggirati dal flusso magnetico generato dai conduttori. La presenza contemporanea di schermi conduttori e schermi ferromagnetici determina una buona attenuazione dell'induzione magnetica, soprattutto nella zona antistante il quadro di bassa tensione. In particolare, l'attenuazione risulta maggiore all'aumentare della permeabilità magnetica del materiale ferromagnetico utilizzato. La sola presenza degli schermi in materiale ferromagnetico fornisce un'attenuazione dell'induzione magnetica minore rispetto al caso in cui siano presenti schermi conduttori e schermi ferromagnetici. La differenza è notevole soprattutto in corrispondenza delle aperture, presenti tra l'involucro ferromagnetico, posizionato sul quadro di BT, e la parete della cabina ad esso adiacente. Ciò dipende dal fatto che tali aperture non permettono al materiale ferromagnetico di "contenere" il flusso all'interno del quadro di BT. L'ingente aumento della permeabilità magnetica dei pannelli in materiale ferromagnetico, sull'involucro del quadro di BT e attorno ai conduttori di BT, non

ha effetti notevoli sull'attenuazione dell'induzione magnetica. L'eliminazione del canale ferromagnetico, disposto attorno ai conduttori di bassa tensione, determina un notevole peggioramento dell'attenuazione dell'induzione magnetica.

In definitiva, i calcoli effettuati dimostrano che per ottenere valori dell'induzione magnetica inferiori a $10 \mu\text{T}$ all'esterno è sufficiente prevedere specifiche configurazioni schermanti da installare sul quadro di BT: ciò evita di ricorrere all'installazione di schermi in corrispondenza delle pareti della cabina. Dalle simulazioni è emerso inoltre che le inevitabili aperture, presenti tra l'involucro ferromagnetico posizionato sul quadro di BT e la parete della cabina ad esso adiacente, costituiscono un punto debole ai fini della schermatura.

Si dovrebbe, infine, ridurre l'induzione prodotta dai conduttori di BT ottimizzando la disposizione dei cavi, ed evitando così di utilizzare schermi chiusi, causa di indesiderati aumenti di temperatura.

V.7 Bibliografia

- [V-1] M. D'Amore, *"Compatibilità Elettromagnetica"*, Siderea Edizioni Scientifiche, Roma, 2003.
- [V-2] W.T. Kaune, L.E. Zaffanella, *"Analysis of magnetic fields produced far from electric power lines"*, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 7, No. 4, Oct. 1992, pp. 2082-2091.
- [V-3] M. D'Amore, E. Menghi, M.S. Sarto, *"Shielding techniques of low-frequency magnetic field from power cable lines"*, IEEE International Symposium on EMC, August 18-22, 2003, Boston, USA.
- [V-4] R. Conti, *"Riduzione del campo magnetico"*, rivista AEI, Vol. 88, dicembre 2001.
- [V-5] M. D'Amore, A. Scarlatti, G. Marsico, E. Menghi, *"Schermatura del campo magnetico a frequenza industriale di linee elettriche in cavo"*, atti Giornata di Studio AEI "Compatibilità elettromagnetica di apparati e sistemi elettrici ed elettronici: innovazione tecnologica e sviluppo industriale", Università di Roma "La Sapienza", 1 ottobre 2003, Roma, pp. 75-82.
- [V-6] A. Cipollone, A. Fabbri, E. Zendri, *"Techniques for shielding underground power lines to minimize the exposure to ELF magnetic field in residential areas"*, EMC Europe 2002, Sept. 9-13, 2002, Sorrento, Italy.
- [V-7] R. Benato, L. Fellin, A. Paolucci, *"Elettrodotti e innovazione: prestazioni e campi esterni degli elettrodotti blindati"*, atti della Giornata di Studio AEI "Elettrodotti e territorio: nuove tecnologie per ridurre l'inquinamento elettromagnetico", Padova, 22 novembre 2000.
- [V-8] M. D'Amore, F.M. Gatta, D. Paladino, M.S. Sarto, *"Design of new high-voltage "green" cables generating low magnetic field levels"*, IEEE Power Engineering Society, 2004 General Meeting, 6-10 June 2004, Denver, USA.
- [V-9] M. D'Amore, D. Paladino, M.S. Sarto, *"New double-shielded power cables generating low magnetic field levels"*, IEEE International EMC Symposium, Aug. 8-12, 2005, Chicago, USA.
- [V-10] A. Cipollone, A. Fabbri, *"Impatto tecnico economico prodotto dalla necessità di limitare il campo magnetico nella costruzione, nell'esercizio e nel risanamento degli impianti elettrici di distribuzione primaria e secondaria"*, Giornata di Studio AEI "Inquinamento elettromagnetico ambientale: tecniche e costi di controllo e risanamento", 27 settembre 2001, Roma.

VI Lavori preparatori per gli accordi di programma

VI.1 *Introduzione*

Il Ministero dell'Ambiente ha stipulato una convenzione con l'APAT per svolgere attività di ricerca per la promozione di nuove tecnologie e tecniche di costruzione degli impianti, per l'abbattimento e la riduzione dell'inquinamento elettromagnetico e, in collaborazione con gli enti gestori, per lo sviluppo di nuove tecnologie che abbiano lo stesso fine, in accordo con la Legge quadro n.36 art. 4 lettera f. La collaborazione degli enti gestori si concretizza nella stipula di accordi di programma, in cui i soggetti firmatari, l'APAT da una parte e l'eventuale o gli eventuali gestori dall'altra, definiscono le finalità dell'accordo, i relativi prodotti, le attività necessarie alla realizzazione di quest'ultimi, la durata ed i costi.

Per stilare gli accordi di programma con gli enti gestori, il primo problema affrontato è stato quello di identificare i possibili interlocutori. In questa sede si riportano i risultati emersi nelle attività di identificazione e caratterizzazione dei gestori relativi agli elettrodotti. Considerando che gli elettrodotti comprendono l'insieme delle linee dedicate al trasporto di energia elettrica per le utenze e le linee dedicate all'alimentazione del trasporto pubblico, sono state analizzate la struttura dell'intero settore elettrico italiano e la rete ferroviaria in modo da poter individuare i possibili soggetti firmatari degli accordi.

VI.2 *Individuazione degli enti gestori*

VI.2.1 *Il Sistema elettrico in Italia*

Per arrivare al suo utilizzatore finale, l'energia elettrica deve essere *prodotta* nelle centrali, *trasmessa* lungo le reti di trasporto e *distribuita* nei singoli luoghi d'uso. Tali passaggi vengono regolati da una specifica attività di gestione del sistema elettrico detta *dispacciamento*, ed infine è venduta al cliente finale. La normativa in vigore prevede due tipologie di clienti: quelli che possono liberamente scegliere il proprio fornitore (clienti del mercato libero) e quelli invece obbligati ad approvvigionarsi attraverso la società di distribuzione che esercita l'attività nel luogo in cui è ubicata l'utenza (clienti del mercato vincolato).



Figura VI-1 – Schema a blocchi del sistema elettrico italiano

VI.2.2 Le attività del sistema elettrico

Generazione

L'energia elettrica viene generata in impianti che trasformano in elettricità le fonti primarie di energia e la immettono nella rete di trasporto. Gli impianti di produzione sono principalmente:

- gli impianti termoelettrici tradizionali, funzionanti a carbone, ad olio combustibile e a gas; tra questi ultimi stanno assumendo sempre più importanza le centrali a ciclo combinato caratterizzate dalla massima efficienza (il rendimento è di poco inferiore al 60%) grazie all'utilizzo congiunto delle turbine a gas e delle turbine a vapore;
- gli impianti nucleari, che producono l'elettricità dal processo di fissione nucleare;
- gli impianti geotermici, che sfruttano il calore naturale dei serbatoi geotermici presenti nel sottosuolo;
- gli impianti di cogenerazione, capaci di produrre contemporaneamente sia calore che energia elettrica massimizzando lo sfruttamento del combustibile;
- gli impianti idroelettrici, azionati dal movimento dell'acqua.

Da qualche anno, anche in considerazione delle problematiche ambientali, si sta operando per sviluppare la produzione di energia da fonti rinnovabili anche attraverso la costruzione di:

- impianti eolici, che sfruttano l'energia del vento;
- impianti fotovoltaici, che utilizzano semiconduttori capaci di generare energia elettrica se colpiti dalle radiazioni solari;

-
- impianti a biomasse, che trasformano materiali organici di scarto di origine vegetale, non utilizzati per altri fini e destinati a decomporsi;
 - impianti di termovalorizzazione dei rifiuti.

Trasmissione

Per essere utilizzata nelle case e nelle strade, negli uffici e nelle fabbriche, l'energia elettrica deve essere trasportata dai centri di produzione o dalle linee di interconnessione con l'estero fino alla rete di distribuzione a cui sono collegati gli utenti finali. La trasmissione avviene mediante linee elettriche – aeree o interrate – costituite da conduttori lineari isolati, stazioni elettriche e di trasformazione. Per ridurre al minimo le dispersioni di energia lungo il tragitto, la tensione dell'elettricità viene aumentata dai 30 kV massimi della produzione ai valori compresi tra il 120 e i 380 kV. Le linee di trasmissione di energia elettrica sono, dunque, ad alta ed altissima tensione.

Distribuzione

L'attività di distribuzione dell'energia elettrica avviene attraverso reti capillari, costituite a loro volta da linee elettriche, stazioni di trasformazione e cabine presenti sul territorio, che portano l'elettricità agli utenti finali. Solitamente gli impianti industriali più grandi sono forniti ad alta tensione (alcuni grandi consumatori di energia elettrica possono essere collegati anche direttamente alla rete di trasmissione nazionale), le industrie ed il terziario hanno una fornitura di elettricità di media tensione, mentre le piccole imprese e gli utenti domestici di bassa tensione.

Dispacciamento

L'energia elettrica non è immagazzinabile, ma va prodotta, trasmessa e distribuita continuamente nella quantità richiesta dagli utenti. L'equilibrio di queste attività è garantito dal dispacciamento, che regola l'utilizzazione e l'esercizio coordinato degli impianti di produzione, della rete di trasmissione e dei servizi ausiliari. L'attività di dispacciamento consente, dunque, il controllo del sistema elettrico per garantire la fornitura dell'energia elettrica con la qualità predefinita.

VI.2.3 La gestione dell'attività

Le attività di produzione, importazione ed esportazione, acquisto e vendita di energia elettrica, per le quali non vigono condizioni di monopolio naturale, sono state liberalizzate con l'approvazione del

decreto legislativo n. 79 del 16 marzo 1999 (decreto Bersani) che ha recepito la direttiva comunitaria 96/92 concernente norme comuni per il mercato interno dell'energia elettrica.

Le attività di trasmissione e dispacciamento, invece, sono rimaste riservate allo Stato che le espleta attraverso la concessione ad una società per azioni, detenute dal Ministero dell'Economia e delle Finanze, il quale esercita i diritti dell'azionista d'intesa con il Ministero delle Attività Produttive. Questa società per azioni è chiamata Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale, GRTN.

Per quanto riguarda la distribuzione, il decreto n.79/99 ha previsto che l'attività sia attribuita fino al 31 dicembre 2030 ai diversi soggetti che già la svolgevano sulla base di concessioni rilasciate dal Ministero delle Attività produttive. E' stata anche consentita la razionalizzazione dell'attività attraverso l'aggregazione fra operatori e, in qualche caso, la cessione della rete di distribuzione e dei rami d'azienda da parte di ENEL alle imprese locali. Dal 1 gennaio 2031 l'affidamento della distribuzione a livello locale avverrà, invece, secondo regole concorrenziali, ovvero mediante gare ad evidenza pubblica.

Il settore elettrico è soggetto ai poteri di regolazione e controllo dell'Autorità per l'energia elettrica e il gas, struttura amministrativa indipendente, istituita con la legge n. 481 del 1995, con il compito di "garantire la promozione della concorrenza e dell'efficienza" nei settori dell'energia elettrica e del gas, nonché di "assicurare adeguati livelli di qualità" dei servizi. Le principali attività svolte dall'Autorità riguardano:

- la riforma delle tariffe del settore elettrico;
- le modalità di assegnazione della capacità di importazione di energia elettrica in presenza di limiti della capacità di trasporto sulla rete interconnessa;
- l'adozione di regole tecnico-economiche volte a garantire a tutti gli utenti della rete elettrica la libertà di accesso a condizioni imparziali, neutrali e trasparenti;
- la regolazione della qualità del servizio di fornitura di energia elettrica e del gas;
- la regolazione delle condizioni contrattuali di fornitura di energia elettrica e del gas;
- la valutazione di reclami, istanze e segnalazioni da parte dei consumatori o utenti.
- L'Autorità svolge anche funzione consultiva in relazione a provvedimenti di competenza di altre istituzioni, quali il Ministero delle Attività Produttive e l'Autorità Garante della Concorrenza e del Mercato.

GRTN [VI-1]

Il GRTN ha l'obbligo di connettere alla rete di trasmissione nazionale tutti i soggetti che ne facciano richiesta, senza discriminazioni e senza compromettere la continuità del servizio, nel rispetto delle regole tecniche e delle condizioni tecnico-economiche di accesso e di interconnessione fissate dall'Autorità per l'energia elettrica e il gas. Gestisce, senza discriminazione di utenti, la rete di trasmissione nazionale controllandone i flussi di energia, i relativi dispositivi di interconnessione e i servizi ausiliari necessari. Garantisce inoltre la sicurezza, l'affidabilità, l'efficienza e il minor costo del servizio e degli approvvigionamenti di energia e delibera gli interventi di manutenzione e sviluppo della rete di trasmissione nazionale. Inoltre deve rendere disponibili all'ente che coordina i sistemi di trasmissione europei (Union pour la Coordination du Transport de l'Electricité, UCTE) le informazioni necessarie al funzionamento sicuro ed efficiente delle reti interconnesse. Ogni anno poi, attraverso il Programma triennale di sviluppo, il GRTN pianifica e delibera gli interventi di sviluppo della rete elettrica di trasmissione nazionale e può, se il caso, indicare attività di aggiornamento relative all'ambito della stessa. (D.M. 23 Dicembre 2002). Nell'ottobre del 2003 la legge n.290 ha stabilito che il GRTN può anche essere proprietario della rete.

In accordo al D.lg. 79/99, il GRTN ha costituito due società: l'Acquirente Unico ed il Gestore del mercato elettrico. L'Acquirente Unico ricopre il ruolo di garante della fornitura di energia elettrica per i clienti del mercato vincolato, che deve essere assicurata in condizioni di continuità, sicurezza ed efficienza del servizio nonché di parità del trattamento, anche tariffario. Pertanto l'Acquirente Unico acquista energia elettrica, soprattutto attraverso il sistema delle offerte (borsa dell'energia), per rivenderla, sulla base di direttive dell'Autorità per l'energia e il gas, alle imprese distributrici per la quota destinata alla fornitura del mercato vincolato.

Il Gestore del mercato elettrico svolge invece le attività di:

- organizzazione del mercato elettrico secondo criteri di neutralità, trasparenza, obiettività, nonché di concorrenza tra produttori, assicurando la gestione economica di un'adeguata disponibilità della riserva di potenza;
- bilanciamento delle domande e offerte di energia e previsione degli obblighi di produttori e importatori di energia che non si avvalgono della contrattazione bilaterale;

-
- gestione, dall'entrata in funzione del dispacciamento di merito economico, della c.d. "Borsa dell'energia", punto d'incontro delle offerte di acquisto e vendita di energia e di tutti i servizi connessi.

VI.2.4 Infrastrutture del sistema elettrico [VI-1]

Fino ad ora sono state analizzate le attività della filiera e non si è detto nulla riguardo le infrastrutture. Per il trasporto dell'energia elettrica fino all'utente finale le due strutture fondamentali estese sull'intero territorio sono: la Rete di Trasmissione Nazionale e la Rete di Distribuzione.

Rete di Trasmissione Nazionale (RTN)

La Rete di trasmissione nazionale definita con Decreto Ministeriale del 25 giugno 1999 "*Determinazione dell'ambito della rete elettrica di trasmissione nazionale*", pubblicato sulla Gazzetta ufficiale 30 giugno 1999, 151, ha raggiunto, ad oggi, un'estensione complessiva di 43.180⁴ km di linee, comprendendo anche le linee in corrente continua. Include tutta la rete ad altissima tensione (pari a 22.848 km) con *tensione nominale* uguale o superiore a 220 kV e parte della rete ad alta tensione (per 20.332 km) con tensione nominale compresa tra 120 e 220 kV. In Figura VI-2 e in Figura VI-3 è mostrata la rete di trasmissione sull'intero territorio italiano, aggiornata al 31 dicembre 2001, rispettivamente per la linea a 220 kV e 380 kV.

⁴ Dati tratti dal sito del GRTN.

**RETE ELETTRICA ITALIANA 220 kV
(31 dicembre 2001)**

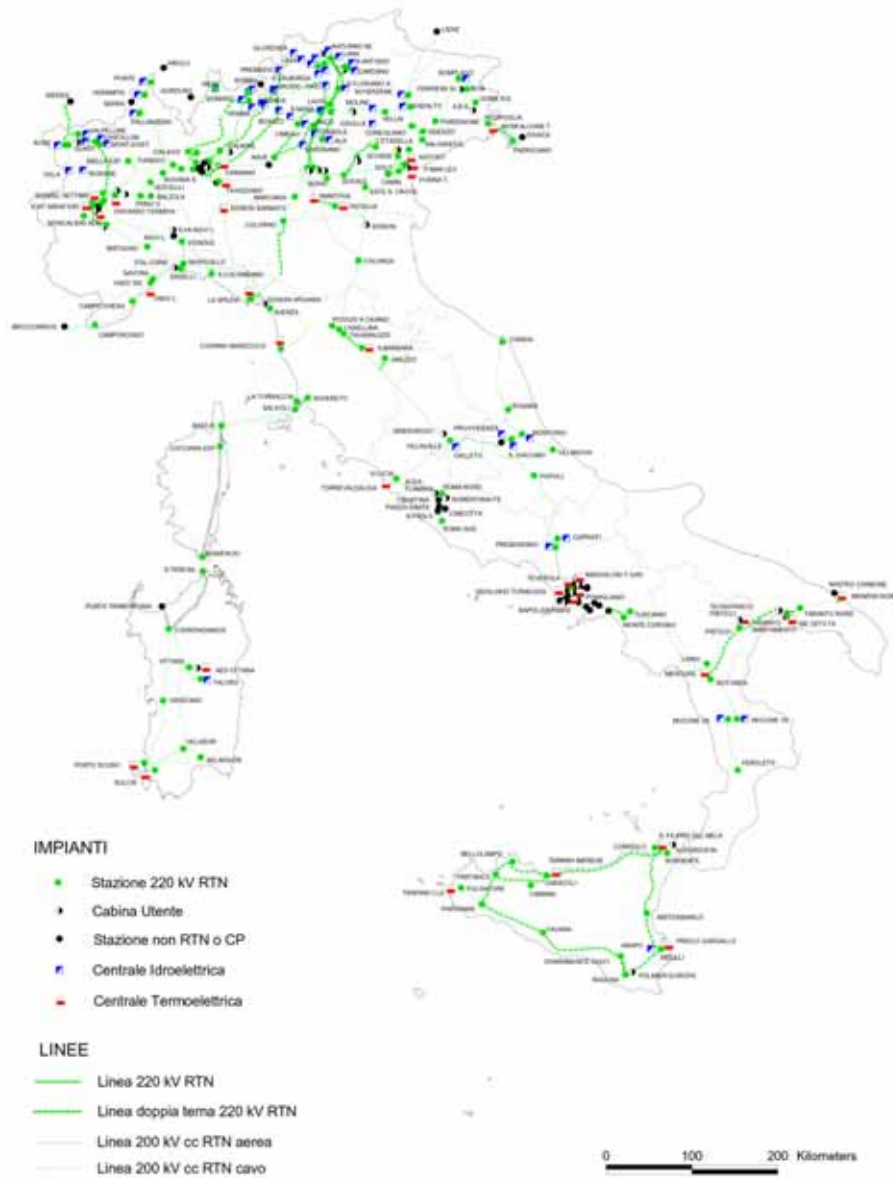


Figura VI-2 – Rete di trasmissione nazionale a 220 kV al 31 dicembre 2001.

**RETE ELETTRICA ITALIANA 380 kV
(31 dicembre 2001)**



Figura VI-3 - Rete di trasmissione nazionale a 380 kV al 31 dicembre 2001.

Comprende, inoltre, 16 linee di interconnessione con l'estero che permettono lo scambio di elettricità con i paesi esteri, nonché 267 stazioni che costituiscono i nodi delle suddette reti e che si suddividono tra stazioni di trasformazione da altissima ad alta tensione e stazioni di smistamento, essendo escluse le stazioni che hanno funzione di interconnessione con le reti di distribuzione, con centrali di produzione o con altre utenze. La grande industria, con altissimi fabbisogni di potenza (dell'ordine delle decine e centinaia di MW) è connessa, come già accennato, direttamente con la rete di trasmissione. In Tabella VI-1, Tabella VI-2, Tabella VI-3, Tabella VI-4 e Grafico VI-1 sono riepilogati i dati della rete di trasmissione nazionale così come indicati nel decreto del 1999 escludendo le reti o parti di reti in costruzione.

Operatori	Area territoriale								Tot km
	Torino	Milano	Venezia	Firenze	Roma	Napoli	Palermo	Cagliari	
ENEL Div. Trasm. km	2.988,686	2.180,687	2.619,336	2.040,613	2.654,426	2.776,555	1.746,597	861,060	17.867,960
Edison km		516,777	572,055	130,567					1.219,399
ENEL Div. Distr. km	57,200	106,043	104,551	211,330	99,182	433,637	8,800		1.020,743
AEM-MI km		792,168							792,168
Sondel km		194,500							194,500
AEC Bolzano km			69,614						69,614
ASM-BS km		55,028							55,028
ISE km						32,920			32,920
ENEL Div. Trasm. - AEM Torino km	23,608								23,608
AEM Torino km	19,260								19,260
FS km					10,700				10,700
ACEA km					8,500				8,500
ENEL Div. Prod. Km						1,625			1,625
AGSM Verona km			0,150						0,150
Totale per area km	3.088,754	3.845,203	3.365,706	2.382,510	2.772,808	3.244,737	1.755,397	861,060	21.316,175

Tabella VI-1 – Riepilogo chilometri di terne ad altissima tensione possedute da ciascun operatore per area territoriale

Operatori	Area territoriale								Tot km
	Torino	Milano	Venezia	Firenze	Roma	Napoli	Palermo	Cagliari	
ENEL Div. Distr.	1693,43	1345,38	1113,48	2043	2763	2293	1022,987	1402	13676,86
ENEL Div. Trasm.	150,153	447,682	802,122	552,3	450,5	471,1	750,459	125,1	3749,395
Edison	108,27	299,483	627,579						1035,332
ACEA					691,6				691,552
FS			60,26	99,93	153,3	56,8	55		425,265
AEM Milano		299,483							299,483
Sondel		230,595							230,595
AEM Torino Km	146,007								146,007
ASM Brescia		94,329							94,329
CAFFARO			82,7						82,7
AGSM Verona			58,62						58,62
AGIPPETROLI							31		31
ASMRovereto- AGSM Verona			16,3						16,3
ENEL Div. Prod.					0,67				0,67
Tot. per area km	2097,86	2716,95	2761,06	2695	4059	2821	1859,446	1527	20538,1

Tabella VI-2 - Riepilogo chilometri di terne ad alta tensione possedute da ciascun operatore per area territoriale (dati riferiti al 1999)

Operatori	Area territoriale								Tot N°
	Torino	Milano	Venezia	Firenze	Roma	Napoli	Palermo	Cagliari	
ENEL Div. Trasm.	35	34	39	29	22	26	15	13	13
ENEL Div. Prod.	5	2	11	1	4	5	1		29
Edison		1	6		1	2			10
Sondel		4							4
ENEL Div. Distr.					1	2	1		4
Totale per area N°	40	41	56	30	27	33	16	13	56

Tabella VI-3 – Riepilogo numero di stazioni di trasformazione possedute da ciascun operatore per area territoriale (dati riferiti al 1999)

Interconnessioni con l'estero		
Proprietà	Tensione	km
ENELDiv.Trasm.	380kV	344,565
ENELDiv.Trasm.	220kV	196,057
ENELDiv.Trasm.	200 kV cc	820,44
ENELDiv.Trasm.	132kV	1,88
Totale km		1362,942

Tabella VI-4 – Riepilogo linee di interconnessione con l'estero (dati riferiti al 1999)

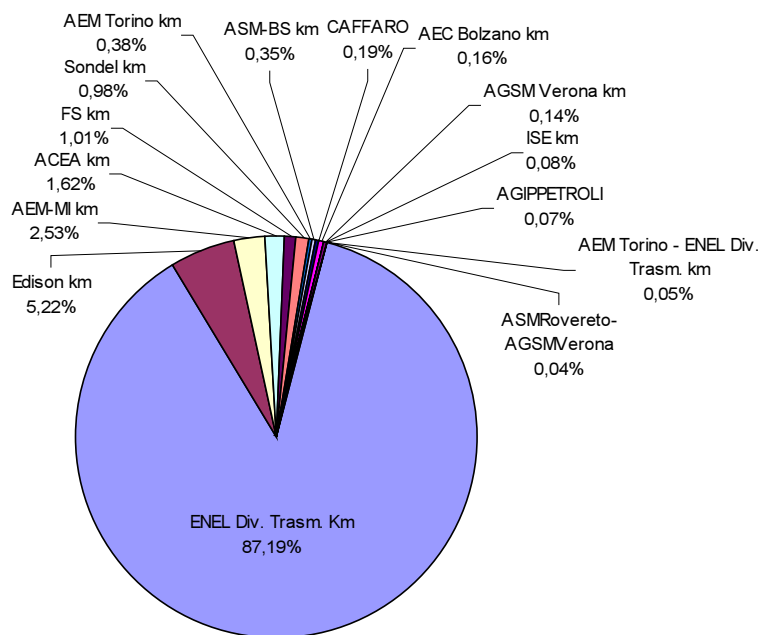


Grafico VI-1 – Distribuzione della proprietà della rete di trasmissione nazionale (dati al 1999).

Rete di distribuzione

E' un sistema altamente articolato, costituito da una rete di linee a media e bassa tensione che si estendono per una lunghezza totale dell'ordine di 900.000 km, e da stazioni e cabine di trasformazione

che modificano la tensione dell'energia elettrica. Questa articolazione è funzionale alla diversificazione dell'utenza, che si collega alla rete in punti diversi a seconda delle proprie esigenze energetiche. Infatti, come già menzionato nel paragrafo dedicato alla distribuzione, la piccola e media industria, che necessita di potenze variabili da alcuni MW a poche decine di kW, deve poter disporre di connessioni alle linee a media e bassa tensione mentre l'utenza domestica, con fabbisogno minore, è collegata alle linee di distribuzione a bassa tensione.

VI.2.5 La proprietà delle reti

La proprietà della rete di trasmissione è in capo a 16 titolari di rete, con ENEL proprietaria della maggior parte. I rapporti tra i proprietari della rete e il GRTN sono disciplinati da una convenzione tipo, approvata con decreto dall'allora Ministero dell'Industria del Commercio e dell'Artigianato in data 22 dicembre 2000⁵.

Le imprese che in Italia svolgono l'attività di distribuzione di energia elettrica sono attualmente poco meno di 200. Il settore è caratterizzato da una forte concentrazione della quota di mercato relativa alle prime 10 imprese e dalla presenza di un altissimo numero di piccoli operatori, oltre 150, che insieme servono meno dello 0,5% del mercato. In particolare ENEL Distribuzione con una quota di poco inferiore al 90%, anche dopo la cessione delle reti alle municipalizzate già conclusa in alcuni comuni, è la maggiore impresa del settore.

La cessione dei rami d'azienda da parte di ENEL Distribuzione alle società partecipate dagli enti locali è stata conclusa nei seguenti casi:

- a Trieste ACEGAS SpA ha acquistato le reti ENEL per un valore di oltre 11 milioni di euro relativo a 819 clienti finali;
- a Parma ENEL Distribuzione ha ceduto alla A.M.P.S. SpA la rete, rappresentativa di circa 40.000 clienti, per un controvalore di circa 57 milioni di euro;
- nei comuni di Roma e Formello le reti distributive di ENEL sono state acquistate da ACEA SpA per un corrispettivo di circa 570 milioni di euro;

⁵ Ora denominato Ministero delle Attività Produttive

- a Torino l'AEM ha ottenuto il trasferimento dei rami d'azienda di ENEL Distribuzione relativi alle attività di distribuzione e vendita al mercato vincolato, per un valore, stabilito dal Collegio degli Arbitratori a suo tempo costituito, di circa 248 milioni di euro, corrispondente a circa 293.000 clienti.
- AEM Cremona ha acquisito, per un valore vicino ai 9 milioni di euro, la parte di rete cittadina appartenente ad ENEL Distribuzione (120 km complessivi fra alta media e bassa tensione), che serve circa 2.200 utenti finali.

N° Clienti	ENEL Distribuzione	ACEA	AEM MI	AEM TO
n. clienti finali (prima della cessione reti ENEL)	29.700.000 (*)	n.d.	436.524	247.000
n. clienti finali (dopo la cessione reti ENEL)	n.d.	1.482.800	815.769	540.000

Tabella VI-5 - Clienti finali delle 4 maggiori imprese distributrici

(*) Valore al 1999

VI.2.6 Gli elettrodotti della rete ferroviaria

In seguito alla riorganizzazione delle ferrovie dello Stato la maggioranza degli elettrodotti della rete ferroviaria italiana è di proprietà RFI (Rete Ferroviaria Italiana), nata il 1° luglio 2001. RFI opera come "Gestore dell'infrastruttura nazionale" in regime di concessione pubblica, in forza dell'Atto di Concessione DM 138T del 31 ottobre 2000.

La rete elettrica ferroviaria consta di 9200 km di linee elettriche ad alta tensione, di 367 sottostazioni elettriche, di 22000 km di linee di contatto, di 1000 cabine MT/BT e di 5000 km di linee a media tensione.(dati riferiti al 2001), come indicato in tabella.

Tipologia di impianto elettrodotti ferroviari	
Linee elettriche ad alta tensione	9200 km
Sottostazioni elettriche	367
Linee di contatto	22000 km
Cabine MT/BT	1000
Linee a media tensione	5000 km

Tabella VI-6 – Infrastrutture degli elettrodotti ferroviari.

VI.3 Conclusioni

L'inquinamento da campi elettromagnetici causati da elettrodotti investe pienamente il settore della trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica nelle sue due strutture fondamentali, ed è quindi evidente come gli operatori di questi settori possano essere i possibili interlocutori per gli accordi di programma. Per quanto riguarda il sistema di trasmissione risulta che ci sia un unico gestore, il GRTN, mentre per il sistema di distribuzione si ha una pluralità di gestori, alcuni anche proprietari di parti di rete di trasmissione nazionale. Poiché l'azione degli accordi è di promuovere tecnologie e tecniche di costruzione di impianti per l'abbattimento e la riduzione dell'inquinamento elettromagnetico, e non avendo il GRTN strutture che possano occuparsi di questa problematica, gli accordi potranno essere stipulati con quegli operatori che siano gestori di rete nel settore della distribuzione e proprietari di rete nel settore della trasmissione e che abbiano storia, esperienza e competenze maturate nel tempo in tecnologie e tecniche costruttive e, tra questi, quelli per i quali una futura applicazione delle innovazioni tecnologiche oggetto di tali studi potrà avere il maggior impatto in termini di benefici per la riduzione dell'emissione.

VI.4 Bibliografia

[VI-1] Sito internet <http://www.grtn.it/ita/index.asp>

Appendici

A Appendice: Campo magnetico a 50 Hz emesso dagli elettrodomestici

A.1 Introduzione

Gli impianti per la trasmissione e la distribuzione dell'energia elettrica non sono come noto le uniche sorgenti di esposizione delle persone ai campi elettrici e magnetici a frequenza industriale. Sono molteplici, infatti, le apparecchiature per uso industriale e civile in grado di generare campi, generalmente magnetici, di elevata intensità. In particolare le apparecchiature elettriche di uso domestico di maggiore potenza possono generare nelle immediate vicinanze campi magnetici superiori al limite di 100 μT previsto dalle norme ICNIRP; tuttavia tali campi si riducono rapidamente allontanandosi dall'apparecchio assumendo valori molto bassi già a qualche decina di centimetri dalla sorgente. Gli apparecchi elettrici di uso domestico, specialmente gli elettrodomestici, essendo alimentati da basse tensioni generano campi elettrici di modesta intensità variabili fra alcuni volt/metro ed alcune decine di volt/metro. Inoltre il campo elettrico prodotto da tali sorgenti si attenua rapidamente fino a risultare praticamente trascurabile ad una distanza che a seconda dell'apparecchio è compresa fra pochi centimetri e circa 2 m.

In questa appendice sono stati presi in considerazione gli elettrodomestici e gli apparecchi elettrici in generale utilizzati in ambiente domestico, sia nelle normali e frequenti attività casalinghe, che nelle saltuarie attività di «bricolage» e del «fai da te». I dati utilizzati relativi all'emissione del campo magnetico a frequenza industriali sono riportati in [A-1]. Gli apparecchi elettrici sono stati divisi nelle due categorie di apparecchi portatili o mobili e di apparecchi fissi. Della prima categoria fanno parte gli apparecchi elettrici che per funzionare richiedono la presenza dell'utilizzatore che li impugna o che comunque è situato nelle immediate vicinanze di essi. Nella seconda categoria sono invece inclusi gli apparecchi elettrici che hanno una posizione fissa e che possono funzionare indipendentemente dalla presenza dell'utilizzatore abitualmente ad una certa distanza dalle persone.

Si riportano infine altri dati relativi al campo magnetico a frequenza industriale emesso da apparecchiature di uso domestico, rilevati negli Stati Uniti, reperibili nel sito indicato in [A-2].

A.2 Apparecchi elettrici portatili o mobili

I *rasoi elettrici* sono usati quotidianamente da una parte della popolazione maschile, per un periodo di tempo giornaliero mediamente di 15 minuti. Si osserva che i rasoi elettrici durante il funzionamento sono praticamente a contatto con il viso dell'utilizzatore che li impugna, e sono

ad una distanza dal busto compresa tra 10 cm e 20 cm. La misura di induzione magnetica in valore efficace è stata eseguita lungo i tre assi rappresentati nella

Figura A-1. I valori misurati per un rasoio da 8 W sono rappresentati in Tabella A-1.

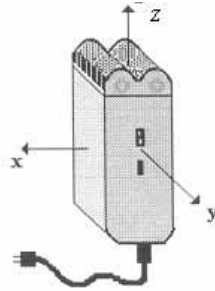


Figura A-1: Rappresentazione schematica di un rasoio elettrico.

Posizione/distanza	A rido	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm
Asse x	83,2	11,09	3,18	1,17	0,54	0,29
	924	20,24	3,89	1,29	0,59	0,32
Asse y	141	27,4	6,60	2,38	1,06	0,63
	771	34,6	7,07	2,61	1,12	0,66
Asse z	64,9	6,61	1,79	0,75	0,38	0,24
	76,8	8,01	1,89	0,80	0,42	0,25

Tabella A-1: Valori minimi e massimi di B [μ T] di un rasoio da 8 W.

Il viso dell'utente è esposto a un'induzione massima di circa 77 μ T lungo l'asse z, mentre per il busto si ha un massimo di circa 20 μ T lungo l'asse x. La Tabella A-2 mostra i valori misurati per tre diversi rasoi da 10 W.

Distanza/Posizione	Rasoio n.1			Rasoio n.2			Rasoio n.3		
	Asse x	Asse y	Asse z	Asse x	Asse y	Asse z	Asse x	Asse y	Asse z
A rido	158	151	92	67	150	86	53	164	95
	1.055	292	243	1.364	1.231	187	971	680	149
10 cm	58,2	28,9	20,0	31,9	-	20,8	31,9	34,3	14,4
15 cm	22,9	8,75	9	12,6	-	-	12	16,7	7,18
20 cm	11,1	4,48	4,52	6,66	-	5,05	5,47	7,96	3,74
30 cm	-	-	-	2,27	-	1,77	1,91	3,29	1,34

Tabella A-2 - Valori minimi e massimi di B [μ T] di tre rasoi da 10 W.

Come si può osservare, a ridosso di due rasoi nel lato dell'apparecchio ortogonale alla direzione dell'asse x orientata verso il busto dell'utilizzatore, si supera il valore di 1000 μT , mentre nel caso del terzo rasoio il valore è leggermente inferiore. I valori di B sul busto dell'utilizzatore variano da qualche microtesla ad alcune decine di microtesla, a seconda che si consideri una distanza di 10 cm o di 20 cm tra rasoio e busto e a seconda dell'apparecchio. I valori massimi di B sul viso (a ridosso, in corrispondenza dell'asse z) variano dal valore massimo di 243 μT per il rasoio n.1, al valore minimo di 149 μT per il rasoio n.3.

Le *tosatrici* generano campi magnetici anche più intensi di quelli prodotti da rasoi elettrici, ma si deve osservare che il loro uso non è molto diffuso. La Figura A-2 mostra in modo schematico una tosatrice, i dati ottenuti nelle misure sono riportati nella Tabella A-3.

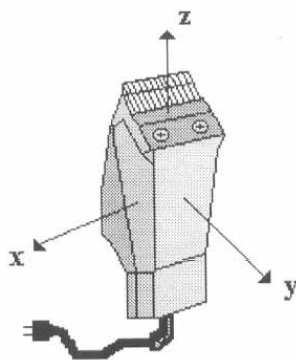


Figura A-2: Rappresentazione schematica di una tosatrice.

Posizione/distanza	A ridosso	5 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm
Asse x	126	63	35,4	11	5,13	2,5	1,59
	1.925	390	107,8	21,1	7,52	3,27	1,82
Asse y	268	78	39	10,2	3,91	1,80	0,93
	1.113	199	67,8	12,7	4,30	1,83	1
Asse z	216	90,5	37,7	9,6	3,76	1,87	1,01
	608	176	54,6	12,2	4,61	2,04	1,16

Tabella A-3: Valori minimi e massimi di B [μT] di una tosatrice.

La testa della persona risulta essere sottoposta ad un'induzione variabile tra circa 100 μT ed oltre 1000 μT .

Un altro tipo di apparecchio elettrico molto diffuso è l'asciugacapelli che a differenza dei primi due apparecchi considerati vengono utilizzati frequentemente. La Figura A-3 mostra lo schema dell'apparecchio in cui l'origine degli assi è fissato in corrispondenza della parte centrale dove è situato il motore. Le rilevazioni sono riferite al regime di funzionamento più frequente. La Tabella A-4 mostra i valori misurati per un apparecchio professionale da 1.200 W.

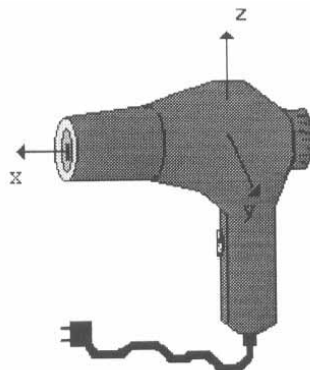


Figura A-3: Rappresentazione schematica di un asciugacapelli.

<i>Posizione/distanza</i>	<i>A rido</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>
<i>Asse x</i>	13,8-24,3	13,39	1,18	0,29
<i>Asse y</i>	9,5-33,5	2,08	0,43	0,17
<i>Asse z</i>	7,5-38,8	2,32	0,67	0,25

Tabella A-4: Valori di B [μ T] di un asciugacapelli professionale da 1.200 W.

Considerando una distanza tra il motore e il capo dell'utilizzatore compresa tra 10 e 20 cm, si osserva che quest'ultimo è esposto ad una induzione che va da circa 1 μ T ad oltre 13 μ T. I valori di B risultano più elevati per altri tipi di asciugacapelli non professionali e più utilizzati in ambiente domestico secondo i dati riportati in Tabella A-5.

<i>Posizione/distanza</i>	<i>A rido</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>
<i>Asse x</i>	111-223	17,8	4,42	1,71
<i>Asse y</i>	40-50	41,3	4,91	1,47
<i>Asse z</i>	32-58	46,3	5,27	1,61

Tabella A-5: Valori di B [μ T] di asciugacapelli non professionali di potenza compresa tra 350 e 1.200 W.

Considerando una distanza tra il motore degli asciugacapelli e la testa dell'utilizzatore variabile tra 10 cm e 20 cm, la tabella evidenzia valori di campo sul capo compresi tra un minimo di circa 4 μ T ed un massimo di circa 46 μ T.

I *ferri da stiro* alternano nel funzionamento periodi di accensione a periodi di “stand-by”; durante questa seconda fase il campo magnetico è trascurabile, mentre durante la prima fase assume i modesti valori riportati nella Tabella A-6.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>
<i>Ferro da stiro n.1</i>	0,02-6,03	0,61	0,16	0,07
<i>Ferro da stiro n.2</i>	0,03-5,77	1,05	0,28	0,09

Tabella A-6: Valori di B [μ T] di due ferri da stiro da 1.200 W.

La Tabella A-7 mostra i risultati delle misure eseguite in prossimità di un *aspirapolvere* da 1.100 W di costruzione abbastanza recente. I valori ottenuti non sembrano significativi ai fini dell'esposizione tenuto conto delle distanze con il busto della persona

<i>Posizione/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>30 cm</i>	<i>50 cm</i>	<i>70 cm</i>
<i>Asse x</i>	6,3-26,6	5,65	0,84	0,22	0,11
<i>Asse y</i>	0,87-115	16,6	1,48	0,43	0,17
<i>Asse z</i>	0,7-45,4	7,32	1,03	0,32	0,14

Tabella A-7: Valori di B [μ T] di un aspirapolvere da 1.100 W.

Inoltre sono state eseguite misure del campo magnetico generato da una *scopa elettrica* da 700 W, un *aspiratore professionale* di polvere e liquidi da 1.000 W ed una vecchia *lucidatrice per pavimenti* da 450 W. I valori misurati sono riportati in Tabella A-8.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>	<i>40 cm</i>	<i>50cm</i>
<i>Scopa elettrica</i>	2-210	22,4	5,62	2,19	0,99	0,57
<i>Aspiratore</i>	1,4-234	20,5	6,95	2,91	1,55	0,87
<i>Lucidatrice</i>	10-71,7	21,3	6,37	3,32	1,61	0,99

Tabella A-8: Valori di B [μ T] di scopa elettrica, aspiratore e lucidatrice.

In Tabella A-9 si riportano le rilevazioni di induzione magnetica effettuate in prossimità di due diversi sbattitori per dolci, entrambi da 180 W.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>
<i>Sbattitore n.1</i>	9-134	3,03	1	0,39
<i>Sbattitore n.2</i>	8,7-335	12,7	3,48	1,14

Tabella A-9: Valori di B [μ T] di due sbattitori per dolci da 180 W.

I valori di B misurati in corrispondenza delle mani dell'utilizzatore sono alquanto elevati:

- sbattitore n.1 : da 21 μ T a 91 μ T;
- sbattitore n.2 : da 15,5 μ T a 293,7 μ T.

Nella Tabella A-10 sono riportati i valori di B generati da due *frullatori*, il primo da 700 W ed il secondo da 800 W.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>
<i>Frullatore n.1</i>	54-222	13,6	3,55	1,54
<i>Frullatore n.2</i>	14-80	8,96	2,7	1,05

Tabella A-10: Valori di B [μ T] di due frullatori da 800 W.

E' stata misurata l'emissione di campo magnetico in prossimità di due centrifughe, la prima da 320 W con data d'acquisto risalente a più di 10 anni fa, e la seconda da 200 W più recente. I risultati sono riportati in Tabella A-11.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>	<i>40 cm</i>	<i>50cm</i>
<i>Centrifuga n.1</i>	87-1.054	134	35,7	15,5	7,76	4,45
<i>Centrifuga n.2</i>	1,27-141	4,67	3,39	2,24	1,37	0,64

Tabella A-11: Valori di B [μ T] di due centrifughe da 200 W.

Come si vede dalla tabella, la prima centrifuga, che è di vecchia costruzione, genera campi magnetici alquanto elevati; a ridosso di essa si superano i 1.000 μ T, mentre alla distanza di 40 cm, dove mediamente è situato il busto dell'utilizzatore, B è di circa 8 μ T. Per questo apparecchio, a differenza di quelli precedentemente analizzati, il valore di B in corrispondenza della testa dell'utilizzatore è poco meno di 3 μ T.

Si analizzano ora tre piccoli apparecchi mobili a pressione usati a volte in ambiente domestico, in cucina: uno *spremi-agrumi elettrico* da 20 W, un *macinino per caffè* da 100 W ed un *tritagliaccio*, anch'esso da 100 W. I risultati delle misure sono riportati in Tabella A-12.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>
<i>Spremi agrumi</i>	184	26,2	5,83	2,4
<i>Macinino per caffè</i>	7,4	0,62	0,16	0,06
<i>Tritagliaccio</i>	231	8,16	2,92	1,39

Tabella A-12: Valori di B [μ T] di uno spremi agrumi, di un macinino per caffè e di un tritagliaccio.

Se si considerano le distanze fra la sorgente di campo magnetico e il busto e fra la stessa sorgente e il capo dell'utilizzatore rispettivamente pari a 40 cm e 60 cm si hanno i valori di B indicati in Tabella A-13.

<i>Apparato/persona</i>	<i>mani</i>	<i>busto</i>	<i>testa</i>
<i>Spremi agrumi</i>	61	1.14	0.43
<i>Macinino per caffè</i>	5.39	0.04	0.03
<i>Tritagliaccio</i>	18.9	0.73	0.27

Tabella A-13: Valori di B [μ T] di uno spremi agrumi, di un macinino per caffè e di un tritagliaccio sulle mani, il busto e la testa dell'utilizzatore.

E' stato misurato il campo magnetico emesso da due diversi *tritattutto*, il primo molto vecchio da 180 W, il secondo più recente da 150 W. I risultati delle rilevazioni sono riportati in Tabella A-14. Considerando le usuali distanze sorgente-corpo dell'utilizzatore si hanno i valori di Tabella A-15.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>
<i>Tritattutto n.1</i>	48-352	18.68	4.92	1.84
<i>Tritattutto n.2</i>	4.7-70.3	7.59	1.68	0.72

Tabella A-14: Valori di B [μ T] di due tritattutto da 180 W e 150 W.

<i>Apparato/persona</i>	<i>mani</i>	<i>busto</i>	<i>testa</i>
<i>Tritattutto n.1</i>	100	0.81	0.24
<i>Tritattutto n.2</i>	17	0.35	0.12

Tabella A-15: Valori di B [μ T] di due tritattutto sulle mani, il busto e la testa dell'utilizzatore.

Come si può osservare, pur essendo le potenze dei due apparecchi quasi uguali, il tritattutto più vecchio, di oltre 20 anni fa, genera campi magnetici assai più elevati di quello di nuova generazione.

Si riportano in Tabella A-16 i risultati delle misurazioni su due *affettatrici*, la prima acquistata circa 25 anni fa, la seconda più recente; considerando le usuali distanze sorgente-corpo dell'utilizzatore, si hanno i valori di Tabella A-17. Si osserva che i valori sono elevati sulle mani, soprattutto per l'apparecchio più vecchio.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>	<i>40 cm</i>
<i>Affettatrice n.1</i>	9.5-1471	71.7	18.12	7.01	3.34
<i>Affettatrice n.2</i>	35.5-154	19.2	5.27	2.94	1.35

Tabella A-16: Valori di B [μ T] di due affettatrici.

<i>Apparato/persona</i>	<i>mani</i>	<i>busto</i>	<i>Testa</i>
<i>Affettatrice n.1</i>	400	3.34	1.14
<i>Affettatrice n.2</i>	53	1.35	0.40

Tabella A-17: Valori di B [μ T] di due affettatrici sulle mani, il busto e la testa dell'utilizzatore.

Si considerano ora apparecchi elettrici da cucina che non richiedono necessariamente la presenza dell' utilizzatore nelle loro immediate vicinanze. La Tabella A-18 mostra i valori di B generati da due diverse bisteccchiere elettriche grill, la prima da 1550 W e la seconda da 1900 W.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>
<i>Bisteccchiera n.1</i>	5.3-15.8	3.05	0.77	0.34
<i>Bisteccchiera n.2</i>	1.29-12.8	0.57	0.23	0.13

Tabella A-18: Valori di B [μ T] di due bisteccchiere da 1550 W e 1900 W.

Per concludere la trattazione sugli elettrodomestici mobili da cucina sono riportati in Tabella A-19 i valori di B misurati in corrispondenza di 4 apparecchi elettrici, un *tostapane* da 500 W, una *macchina per il caffè espresso* da 1000 W, un *apparecchio «grillette» per la cottura di spiedini di carne* da 1500 W, ed un *apparecchio* dotato di un motore da 16 W *che permette di mescolare la polenta* durante la sua preparazione. Dalla tabella si osserva che gli apparecchi generano campi magnetici contenuti.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>
<i>Tostapane</i>	0,28-5,93	0,56	0,18	0,09
<i>Macchina per caffè espresso</i>	0,5-8,15	1,52	0,53	0,25
<i>Apparecchio per spiedini</i>	13,5-16,7	3,29	1,02	0,51

Tabella A-19: Valori di B [μ T] di diversi apparecchi elettrici da cucina.

Si esaminano ora alcuni tipi di apparecchi elettrici mobili che si usano frequentemente in ambiente domestico in locali diversi dalla cucina, spesso situati in vicinanza delle persone. Un apparecchio usato molto frequentemente, soprattutto nei bagni, è il *termoventilatore* (piccola stufa elettrica con ventilatore); si riportano nella Tabella A-20 i valori di B misurati in prossimità di due termoventilatori, il primo di vecchia costruzione ed il secondo più recente, entrambi di potenza 2000 W. Il primo apparecchio genera un campo magnetico di valore elevato, circa 20 volte quello

emesso dal termoventilatore più moderno; a ridosso della parte posteriore di questi due apparecchi, sono stati misurati valori efficaci massimi rispettivamente di 703 μT e 17,5 μT .

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>	<i>40 cm</i>	<i>50cm</i>
<i>Termoventilatore n.1</i>	26-244	30.78	9.81	4.35	2.29	1.36
<i>Termoventilatore n.2</i>	1.7-15.5	1.36	0.42	0.19	0.09	0.06

Tabella A-20: Valori di B [μT] di due termoventilatori da 2000 W.

Un altro apparecchio domestico simile al precedente è il *ventilatore*. E' stato misurato il campo magnetico emesso da due ventilatori, il primo da 55 W, dotato di un'asta verticale per il sostegno, il secondo da 50 W con una base posizionabile su un tavolo. La Tabella A-21 mostra i valori di B misurati.

<i>Apparato/posizione</i>	<i>A ridosso</i>	<i>20 cm</i>	<i>40 cm</i>
<i>Ventilatore n.1</i>	32.7	0.72	0.4
<i>Ventilatore n.2</i>	53	0.43	0.06

Tabella A-21: Valori di B [mT] di due ventilatori da 55 W e 50 W.

Si analizzano ora i vari tipi di lampade utilizzate negli ambienti domestici. Le *lampade alogene da scrivania*, le quali hanno alla base del loro sostegno un trasformatore che le alimenta ad una tensione in genere pari a 12 V, generano campi magnetici alquanto elevati. Nella Tabella A-22 sono riportati i valori di B misurati in prossimità della base di quattro lampade alogene da scrivania di potenza 20 W.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>
<i>Lampada alogena n.1</i>	28.2-91.9	5.47	1.25	0.49
<i>Lampada alogena n.2</i>	29-70.6	5.74	1.40	0.55
<i>Lampada alogena n.3</i>	19-67.9	2.94	0.97	0.38
<i>Lampada alogena n.4</i>	26-48.6	3.36	1.04	0.45

Tabella A-22: Valori di B [μT] di quattro lampade alogene da 20 W

Per quanto riguarda le *lampade fluorescenti compatte*, occorre fare una distinzione fra lampade con alimentazione completamente elettronica ad alta frequenza (35 kHz), e lampade con alimentatore convenzionale. Sono state sottoposte a misura due lampade fluorescenti compatte, la prima da 23 W elettronica, e la seconda da 18 W con alimentatore convenzionale; i risultati delle misure di B sono riportati in Tabella A-23. Come si vede, l'emissione di campo magnetico a 50 Hz per le lampade fluorescenti compatte della nuova generazione (n.1) è notevolmente minore di quella relativa alle lampade fluorescenti tradizionali che utilizzano per la stabilizzazione un reattore (n.2).

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>
<i>Lampada fluorescente n.1</i>	0.56	0.02	0.02	0.02
<i>Lampada fluorescente n.2</i>	60.2	3.8	0.85	0.27

Tabella A-23: Valori di B [mT] di due lampade fluorescenti da 23 W e 18 W.

Le misure relative alle *lampade ad incandescenza* hanno evidenziato valori di campo magnetico molto modesti anche nelle immediate vicinanze.

Apparecchi elettrici mobili alquanto diffusi in ambiente domestico sono i *radio-registratori portatili*, i quali generano praticamente lo stesso valore di campo magnetico sia se sono in funzione, sia se sono spenti, ma con il conduttore di alimentazione collegato alla presa elettrica. I valori di B misurati di un radio-registratore da 20 W sono riportati in Tabella A-24. A ridosso della parte posteriore dell' apparecchio si è inoltre misurato un valore di B di 70,5 μ T.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>
<i>Radio-registratore</i>	0.34-15.2	2.07	0.82	0.41

Tabella A-24: Valori di B [μ T] di un radio registratore da 20 W.

Un'apparecchiatura usata frequentemente in ambiente domestico per fini terapeutici è *l'apparecchio per aerosolterapia*. E' stata effettuata una misurazione tridimensionale di B generato da un apparecchio di questo tipo, risalente a più di 10 anni fa. La Tabella A-25 mostra i risultati ottenuti.

<i>Posizione/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20cm</i>	<i>30 cm</i>	<i>40 cm</i>	<i>50 cm</i>	<i>60 cm</i>
<i>Asse x</i>	113-211	45.8	16.4	7.08	3.94	2.32	1.51
<i>Asse y</i>	331-1063	178	52.6	21.7	11.1	6.71	4.29
<i>Asse z</i>	330-1295	144	37.9	14	7.14	4.01	2.4

Tabella A-25: Valori di B [mT] di un apparecchio per aerosolterapia

Se si considera che gli apparecchi per aerosol si utilizzano in media per 20 minuti, con il capo ed il busto ad una distanza dall'apparecchio pari a circa 20 -30 cm lungo la direzione dell'asse y, si conclude che il corpo dell'utilizzatore è esposto durante tale periodo a un'induzione magnetica che va da un minimo di 20 μ T ad un massimo di oltre 50 μ T. Si deve rilevare che i valori di campo magnetico generati da apparecchi più recenti sono circa tre volte minori di quelli relativi all'apparecchio considerato di maggiore anzianità.

Nella Tabella A-26 sono riportati i valori di B misurati in corrispondenza di una *coperta elettrica* da 60 W. Essendo la coperta elettrica praticamente a contatto con tutta la superficie del corpo, si ha l'esposizione prolungata a valori di B dell'ordine di 2 μ T.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>
<i>Coperta elettrica</i>	0.4-2.27	0.25	0.18	0.13

Tabella A-26: Valori di B [mT] di una coperta elettrica da 60 W.

Si riportano ora le misure di campo magnetico generato da un «*baby phone*», sistema audio in grado di trasmettere a distanza il pianto del bambino. Il baby phone è formato da un trasmettitore e da un ricevitore; il ricevitore è in genere localizzato a 1-2 metri dai genitori, mentre il trasmettitore è posto nelle immediate vicinanze del bambino. Nella Tabella A-27 sono riportati i valori di B misurati in corrispondenza del trasmettitore di un baby phone di 2 W; esistono sul mercato apparecchi di maggiore potenza che generano valori di campo magnetico più elevati.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>
<i>Asse x</i>	9.9-107	2.75	0.48	0.17
<i>Asse y</i>	9-36.8	1.96	0.42	0.15
<i>Asse z</i>	9.8-152	5.58	0.94	0.32

Tabella A-27: Valori di B [μ T] di «baby phone» da 2 W

Gli *alimentatori* sono spesso posizionati in corrispondenza delle prese elettriche e può capitare che tali prese siano casualmente vicine a luoghi dove una persona trascorre lunghi periodi di tempo, come il letto, la scrivania, la poltrona o il tavolo della cucina. Nella Tabella A-28 si riportano i valori di B misurati per quattro diversi alimentatori.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>
<i>Alimentatore n.1 (12 V – 500 mA)</i>	51-234	7.92	2.39	0.95
<i>Alimentatore n.2 (11 V – 400 mA)</i>	65-150	12.3	2.26	0.90
<i>Alimentatore n.3 (12 V – 400 mA)</i>	21-167	9.19	1.71	0.60
<i>Alimentatore n.4 (2.8 V – 110 mA)</i>	17-292	8.55	1.46	0.40

Tabella A-28: Valori di B [μ T] di quattro alimentatori

In conclusione si riportano nella Tabella A-29 i valori di induzione magnetica risultati più critici in prossimità di apparecchi elettrici portatili o mobili.

<i>Apparato/posizione</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>	<i>40 cm</i>
<i>Lampada fluorescente compatta</i>	350	170	36	16.5	9.4
<i>Lampada alogena da scrivania</i>	60	36.9	25.9	18.5	14.2
<i>Lampada ad incandescenza</i>	568	264	85	42	29.6
<i>Rasoio elettrico</i>	23	10.2	9.28	7.9	6.7
<i>Asciugacapelli</i>	69.3	13.6	9.36	9.2	7.7
<i>Aspirapolvere</i>	950	262	70	42.2	25
<i>Termoventilatore</i>	59.6	34.4	23.3	15.7	10.2

Tabella A-29: Valori critici di B [μ T] prodotti da apparecchi elettrici mobili o portatili.

A.3 Apparecchi elettrici fissi

E' stato misurato il campo magnetico a 50 Hz in corrispondenza dello schermo di alcuni *televisori* di diversa marca, da 14 pollici a 28 pollici. I valori di B misurati sono riportati in Tabella A-30.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso in stand- by</i>	<i>A ridosso acceso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>
<i>TV – 14 pollici</i>	1.76	2.05-7.53	2.46	1.04	0.49
<i>TV – 16 pollici</i>	0.29	1.8-5.11	1.96	0.83	0.38
<i>TV – 21 pollici</i>	0.12	2.39-6.01	2.2	1.12	0.6
<i>TV - 25 pollici</i>	0.13	3.3-7.68	2.93	1.49	0.73
<i>TV – 27 pollici</i>	-	3.2-6.82	3.45	1.74	1.04
<i>TV – 28 pollici</i>	2.79	1.18-3.89	1.83	0.97	0.6

Tabella A-30: Valori di B [μ T] prodotti da televisori

L' intensità del campo magnetico generato non è direttamente proporzionale alle dimensioni del televisore, ma piuttosto alla sua qualità e anzianità. Inoltre si osserva che alcuni televisori generano campi magnetici non trascurabili anche in fase di "stand-by". Accanto ai televisori, spesso sono presenti anche i *videoregistratori*. Sono state effettuate misure in prossimità di alcuni di questi apparecchi, rilevando modesti valori di campo magnetico. Sono state eseguite misure di induzione magnetica prodotta da una *lavabiancheria* e da un *lavastoviglie*. I risultati delle misure sono riportati in Tabella A-31.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>	<i>40 cm</i>	<i>50 cm</i>
<i>Lavabiancheria</i>	0.09-27.5	12.6	9.56	7.16	4.57	3.38
<i>Lavastoviglie</i>	0.3-3.35	0.19	0.11	0.10	0.09	0.05

Tabella A-31: Valori di B [mT] prodotti da una lavabiancheria e da un lavastoviglie

I valori relativi alla lavabiancheria si riferiscono alla fase di centrifugazione; nelle altre fasi, che hanno una durata molto più elevata, i valori sono molto inferiori. Le lavastoviglie generano valori di campo magnetico bassi durante buona parte del funzionamento.

Si riportano in Tabella A-32i valori di B misurati per uno *scaldabagno elettrico* da 1200 W.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>20 cm</i>	<i>40 cm</i>	<i>60 cm</i>
<i>Scaldabagno</i>	27.7	1.23	0.2	0.08

Tabella A-32: Valori di B [mT] prodotti da uno scaldabagno elettrico da 1200 W

I valori di induzione magnetica misurati in vicinanza di un *forno elettrico* sono riportati in Tabella A-33. Il valore massimo di B a ridosso del forno è stato misurato in corrispondenza del suo pannello di comando. Si osserva che pur essendo i valori del campo magnetico abbastanza contenuti, se la cucina ha dimensioni limitate è possibile che una persona rimanga a lungo a poche decine di centimetri dall' apparecchio in funzione.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>
<i>Forno elettrico</i>	0.6-6.53	0.96	0.43	0.27

Tabella A-33: Valori di B [μ T] prodotti da un forno elettrico

Un apparecchio dello stesso tipo che genera valori di campo magnetico molto più elevati è il *forno a microonde*. E' stata effettuata una misura tridimensionale in corrispondenza di un forno a microonde da 750 W di larga diffusione; i valori efficaci massimi di B sono riportati in Tabella A-34. I forni a microonde, pur funzionando quasi tutti alla frequenza di 2450 MHz, generano campi magnetici a 50 Hz di notevole intensità.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>20 cm</i>	<i>40 cm</i>	<i>60 cm</i>	<i>80 cm</i>
<i>Asse x</i>	57-254	25.4	7.12	2.91	1.39
<i>Asse y</i>	8.3-76.6	7.91	2.29	1.01	0.51
<i>Asse z</i>	9-30.7	5.2	1.97	0.9	0.49

Tabella A-34: Valori di B [mT] prodotti da un forno a microonde da 750 W.

Nelle cucine sono presenti anche *frigoriferi*, *surgelatori*, *ventole sopra i fornelli e piastre elettriche*. Nella parte anteriore dei frigoriferi e dei surgelatori sono stati misurati valori di induzione magnetica molto bassi, quasi sempre molto inferiori ad 1 μ T. Le misure in corrispondenza degli altri due tipi di apparecchi hanno dato i risultati riportati in Tabella A-35.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>20 cm</i>	<i>40 cm</i>	<i>60 cm</i>
<i>Piastra elettrica</i>	2.1-13.5	0.35	0.16	0.05
<i>Ventola</i>	14.2	1.68	0.45	0.19

Tabella A-35: Valori di B [μ T] prodotti da una piastra elettrica e da una ventola

Nella Tabella A-36 si riportano i risultati della misura tridimensionale di B generato da una moderna *radiosveglia* da 3 W.

<i>Posizione/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>5 cm</i>	<i>10 cm</i>	<i>15 cm</i>	<i>20 cm</i>
<i>Asse x</i>	3.92-27.4	6.3	1.65	0.69	0.38
<i>Asse y</i>	1.03-8.56	1.49	0.66	0.36	0.21
<i>Asse z</i>	1.68-89.2	10.4	3.29	1.51	0.82

Tabella A-36: Valori di B [μ T] prodotti da una radiosveglia da 3 W

Altre apparecchiature elettriche sempre più diffuse anche all' interno degli ambienti domestici sono i *personal computer*. Sono state effettuate misure in vicinanza di PC di marche differenti, di vecchia costruzione o più recenti. L'induzione magnetica a 50 Hz presente a ridosso dei PC, dei relativi monitor e delle stampanti è molto basso, minore di 1 μ T.

A ridosso degli impianti stereo hi-fi sono stati rilevati valori di B a 50 Hz molto bassi, inferiori a 0,2 μ T già alla distanza di 20 cm dalla sorgente.

Valori di induzione molto bassi sono stati misurati per un interruttore generale/differenziale «salvavita», un videocitofono, per segreterie telefoniche ed i relativi telefoni.

Infine in Tabella A-37 sono riportati i valori del campo elettrico misurati in corrispondenza di alcuni apparecchi elettrici fissi.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20cm</i>	<i>30 cm</i>	<i>40 cm</i>
<i>Televisore da 14 pollici</i>	340	200	120	45	40
<i>Televisore da 29 pollici</i>	205	112	65	47	32
<i>Video registratore</i>	102	74	58	47	9
<i>Radiosveglia</i>	25	22.7	15	11.3	8.7
<i>Personal computer</i>	122	66	61.3	54.8	36.3

Tabella A-37: Valori di campo elettrico E [V/m] prodotti da alcuni apparecchi elettrici

A.4 Apparecchi elettrici per il «bricolage» ed il «fai da te»

Gli apparecchi elettrici di questo tipo sono generalmente portatili, per cui l'individuo che li utilizza è esposto a valori di campo magnetico non molto inferiori a quelli misurati a ridosso di essi. In Tabella A-38 sono riportati i valori efficaci massimi di B misurati per tre *trapani*, due *saldatrici* e una *sega elettrica*, mentre nella Tabella A-39 sono riportati i valori di B considerando la distanza di 30 cm tra l'utensile ed il busto dell'utilizzatore e di 40 cm tra l'utensile e la testa. Si può osservare a ridosso degli apparecchi i valori sono elevati, superano 2000 μT nel caso delle due *saldatrici*; queste ultime espongono il busto della persona che li utilizza a induzioni comprese tra 10 μT e 15 μT circa, mentre sulla testa dell'utilizzatore B varia da 4,6 μT a 7,4 μT .

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>	<i>40 cm</i>	<i>50 cm</i>
<i>Trapano da 310 W</i>	27-223	7.69	1.23	0.39	0.19	0.10
<i>Trapano da 600 W</i>	14-418	25.9	5.25	2.05	1.01	0.62
<i>Trapano da 700 W</i>	37-811	35	8.17	3.0	1.37	0.72
<i>Saldatrice da 100 W</i>	286-2676	165	42.6	14.5	7.36	4.21
<i>Saldatrice da 110 W</i>	476-2545	130	27.5	10.3	4.62	2.44
<i>Sega elettrica da 550 W</i>	7.17-175.6	15.3	3.2	1.15	0.54	0.29

Tabella A-38: Valori di B [μT] prodotti da alcuni apparecchi elettrici.

<i>Apparato/persona</i>	<i>mani</i>	<i>busto</i>	<i>Testa</i>
<i>Trapano da 310 W</i>	5.2-25.8	0.4	0.19
<i>Trapano da 600 W</i>	14-88	2.05	1.01
<i>Trapano da 700 W</i>	9-55	3	1.37
<i>Saldatrice da 100 W</i>	86-784	14.5	7.4
<i>Saldatrice da 110 W</i>	217-1890	10.3	4.6
<i>Sega elettrica da 550 W</i>	5.1-28.4	1.15	0.54

Tabella A-39: Valori di B [μT] prodotti da alcuni apparecchi elettrici sulle mani, il busto e la testa dell'utilizzatore.

Si analizzano ora altri utensili elettrici portatili che rispetto ai precedenti vengono usati ad una distanza dal corpo dell'utilizzatore ancora minore. La Tabella A-40 mostra i valori ottenuti per un *aspiratore-soffiatore* e due *tagliasiepe* e la Tabella A-41 mostra i valori di B misurati su mani, busto e testa

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>	<i>30 cm</i>	<i>40 cm</i>	<i>50 cm</i>
<i>Aspiratore-soffiatore da 1100 W</i>	14-1050	104.2	31.4	12.4	6.32	3.55
<i>Tagliasiepe da 420 W</i>	19-452	32.0	7.5	2.5	1.49	0.55
<i>Tagliasiepe da 330 W</i>	28-346	19.3	5.25	2.2	1.04	0.6

Tabella A-40: Valori di B[mT] prodotti da alcuni apparecchi elettrici

<i>Apparato/persona</i>	<i>mani</i>	<i>busto</i>	<i>testa</i>
<i>Aspiratore-soffiatore da 1100 W</i>	30-144	1050	6.32
<i>Tagliasiepe da 420 W</i>	34-54	7.5	1.49
<i>Tagliasiepe da 330 W</i>	28-138	5.25	1.04

Tabella A-41: Valori di B[μ T] prodotti da alcuni apparecchi elettrici su mani, busto e testa dell'utilizzatore.

Per gli utensili della tabella precedente, all'infuori dell'aspiratore-soffiatore, è stata considerata pari a 20 cm la distanza tra busto dell'utilizzatore ed apparecchio, mentre la distanza testa-utensile è stata di 40 cm. L'aspiratore-soffiatore è un apparecchio che durante il funzionamento viene tenuto a tracolla e quindi è appoggiato direttamente al ventre dell'utilizzatore, per cui la distanza busto-apparecchio è praticamente nulla. Il busto dell'utilizzatore dell'aspiratore-soffiatore è quindi esposto ad un'induzione molto elevata, maggiore di 1000 μ T mentre sulla testa B vale circa 6 μ T.

Si conclude la trattazione sugli utensili per il «bricolage» domestico, con i risultati delle misure relative ad una *mola*, due *compressori* ed una *saldatrice ad arco*, riportati in Tabella A-42.

<i>Apparato/distanza</i>	<i>A ridosso</i>	<i>20 cm</i>	<i>40 cm</i>	<i>60 cm</i>
<i>Mola da 225 W</i>	14-214	3.68	0.77	0.27
<i>Compressore da 1100 W</i>	12-593	32.27	8.15	2.87
<i>Saldatrice ad arco da 2150 W</i>	511	62.05	23.22	6.73

Tabella A-42: Valori di B[μ T] prodotti da alcuni apparecchi elettrici

Come si può osservare, pur avendo queste apparecchiature distanze di utilizzazione maggiori rispetto alle precedenti, esse generano valori di B alquanto elevati, soprattutto nel caso della saldatrice ad arco.

A.5 Ulteriori Dati

Alcuni anni fa è stata eseguita un'indagine negli USA sull'emissione del campo magnetico prodotto da apparecchiature domestiche in 20 abitazioni. Le misure sono state effettuate il più vicino possibile alla sorgente elettrica. I dati sono disponibili nel sito indicato in [A-2].

La Tabella A-43 mostra i valori misurati di induzione magnetica in valore efficace: si riportano i valori minimi e massimi, il valore medio in posizioni ravvicinate alla sorgente e nell'ultima colonna il valore ad un metro di distanza.

Apparato	B min / B max [μ T]	B medio [μ T]	B [μ T] a 1 m
Tostapane	0,2-10,2	2,9	1,7
Forno a micronde	2,3-92	31,9	7
Frigorifero	0,1-26,5	3,3	2
Congelatore	0,1-22,5	4,4	trascurabile
Miscelatore	0,1-190	32,3	20
Lavastoviglie	0,2-14,2	5,5	1
Apriscatole	30-888	267	3,3
Macchina caffè	0,3-24,5	7,7	trascurabile
Frullatore	2,2-78,3	23,5	trascurabile
Condizionatore	0,5-12,8	4,5	trascurabile
Scaldabagno	0,2-12,8	4,8	trascurabile
Ferro da stiro	0,6-25	4,8	trascurabile
Asciugacapelli	0,3-25,2	6,9	trascurabile
Rasoio elettrico	0,2-480	128	trascurabile
Ventilatore portatile	0,2-100	11,3	trascurabile
Ventilatore al soffitto	0,2-57	10,4	trascurabile
Asciugabiancheria	0,2-5,8	1,53	trascurabile
Accendigas	0,9-22	10	1,3
Lavabiancheria	0,2-15,5	6,8	trascurabile
Termosifone	0,3-4,9	2,4	trascurabile
Televisore	0,2-38,3	17,2	0,7
Radiosveglia	0,3-48,6	9,7	trascurabile
Sveglia	1,1-550	98,2	trascurabile
Scatola interruttore	0,2-25,6	6	2,4
Impianto stereo	0,2-2	0,9	trascurabile
Trapano	48,5-253	194	trascurabile
Sega circolare	120-150	133	trascurabile
Aspirapolvere	21-58,9	40	1,5
Personal computer	0,2-5,1	1,6	trascurabile

Tabella A-43: Valori di B[mT] prodotti da apparecchiature elettriche per uso domestico.

All'Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara" di Firenze sono state eseguite diverse campagne di misura del campo magnetico a 50 Hz in ambienti abitativi. Dall'analisi dei dati rilevati fino ad oggi sono emerse alcune considerazioni abbastanza generali. Il campo magnetico del fondo a 50 Hz negli ambienti domestici presenta una notevole variabilità temporale a breve e medio termine, nella quale è possibile talvolta riconoscere una ciclicità giorno/notte. Il campo risulta più elevato negli appartamenti condominiali e minore nelle abitazioni singole; ciò potrebbe essere dovuto all'influenza del cablaggio comune e al contributo degli appartamenti limitrofi. I valori tipici del fondo ambientale sono in genere abbondantemente al di sotto dei limiti di sicurezza raccomandati dalle normative. Informazioni possono essere ottenute nel sito indicato in [A-3].

A.6 BIBLIOGRAFIA

[A-1] “Relazione tecnica sulle misure di campo magnetico a 50 Hz effettuate in ambienti civili e industriali”, Cattedra di Impianti Elettrici, Facoltà di Ingegneria, Università di Roma La Sapienza, 1988.

[A-2] <http://www.pqs.it/Biblioteca/EMF.htm>.

[A-3] <http://www.iroe.fi.cnr.it/pcemmi/domarisp/b50dorig.htm>.

B Enti Normatori

B.1. International Electrotechnical Commission (IEC)

B.1.1. Informazioni Generali

La International Electrotechnical Commission (*IEC*) o Commissione Elettrotecnica Internazionale è la principale organizzazione che si occupa di preparare e pubblicare standard internazionali utilizzati come riferimento per la compilazione di standard nazionali nel settore elettrico ed elettronico e tecnologie associate. In Figura B-1 è mostrata la struttura organizzativa della IEC.



Figura B-1: Struttura organizzativa della IEC

Per il settore campi elettromagnetici ed esposizione umana è stata istituita la commissione tecnica 106 (TC), denominata “metodi per la valutazione dei campi elettrici magnetici ed elettromagnetici associati con l’esposizione umana”, con lo scopo di preparare gli standard internazionali per questo argomento. Il campo di azione della commissione riguarda le frequenze fra 0 e 300 GHz e copre le restrizioni di base ed i livelli di riferimento. I suoi obiettivi sono:

- Caratterizzazione dell’ambiente elettromagnetico con particolare attenzione all’esposizione umana
- Metodi di misura, strumenti e procedure
- Metodi di calcolo

-
- Metodi di valutazione per l'esposizione prodotta da sorgenti specifiche (tali metodi saranno presi in esame fino a quando non saranno istituite commissioni specifiche)
 - Standard di base per altre sorgenti
 - Valutazioni di incertezze

Sono esclusi:

- l'istituzione dei limiti di esposizione;
- metodi di mitigazione che saranno trattati da commissioni specifiche

B.1.2. Attività legate ai CEM

Il TC 106 della IEC, di costituzione relativamente recente, non ha ancora pubblicato nessuna norma, però ha attualmente in sviluppo sette progetti.

1. Progetto 62209: “Procedure per determinare il tasso di assorbimento specifico (SAR)”, suddiviso in:
 - Parte 1: Dispositivi mobili portatili senza filo (wireless) nell'intervallo di frequenze tra 300 MHz e 3 GHz;
 - Parte 2: Radio rice-trasmittenti, computer portatili con tecnologia wireless, terminali fissi e dispositivi wireless body-mounted inclusi accessori e trasmettitori multipli nel range di frequenze tra 30 MHz e 6 GHz;
2. Progetto 62226: “Metodi di calcolo per corrente indotta nel corpo umano da campi elettrici o magnetici alle basse e medie frequenze”, suddiviso in:
 - Parte 1: Scopo, termini di riferimento e definizioni
 - Parte 2: esposizione a campi magnetici
 - Parte 3: esposizione a campi elettrici
 - Parte 4: parametri elettrici ei tessuti umani
3. Progetto 62232: “Caratterizzazione dell'ambiente elettromagnetico a RF nelle vicinanze delle stazioni radio base utilizzate per la comunicazione radio mobile”
4. Progetto 62233: “Metodi di misura per campi elettrici e magnetici alle basse frequenze per apparati domestici relativamente all'esposizione umana”

-
5. Progetto 62311: “Criteri di valutazione che consentono il calcolo della compatibilità di apparati elettrici ed elettronici con standard per l’esposizione umana ai campi elettromagnetici (0-300 GHz)”
 6. Progetto 62234: “Misura e valutazione dell’esposizione umana a campi elettromagnetici ad alta frequenza (9 kHz – 300 GHz)”
 7. Progetto 62369: “Valutazione dell’esposizione umana a campi elettromagnetici per frequenze tra 0 e 300 GHz”, suddiviso in:
 - Parte 1: Campi prodotti da dispositivi usati per dispositivi di sorveglianza elettronica (Electronic Article Surveillance, EAS), per sistemi di identificazione a radiofrequenza (Radio Frequency Identification, RFID) e similari
 - Parte 2: Campi prodotti da dispositivi utilizzati per allarmi, per tracciamento, controllo e protezione, rilevazione e sicurezza, telecomandi e controlli, telemetria e simili dispositivi radio a bassa potenza e a corto raggio.

Lo sviluppo degli standard è eseguito da cinque working groups (WG), come indicato di seguito, la cui attività è legata all’evolversi dei progetti sopra elencati:

1. *WG1*: Metodi di misura e di calcolo delle correnti indotte e dei campi elettrici e magnetici a bassa frequenza (0 – 100 kHz)
2. *WG2*: Caratterizzazione dei campi elettrici e magnetici a bassa frequenza prodotti da apparecchiature specifiche
3. *WG3*: Misura e valutazione dell'esposizione umana ai campi elettromagnetici ad alta frequenza, da 9 kHz-300 GHz
4. *WG4*: Procedure per la caratterizzazione dei campi elettromagnetici ad alta frequenza e del SAR prodotti da diversi sistemi di telecomunicazione
5. *WG5*: Norma generica per la valutazione della compatibilità degli apparecchi elettrici ed elettronici con le norme sull'esposizione umana ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz

Esiste inoltre una proposta giapponese per la preparazione di linee guida per protocolli di misura dei campi magnetici generati da linee elettriche di potenza.

B.2. Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (CENELEC)

B.2.1. Informazioni Generali

Il CENELEC è un'organizzazione tecnica no-profit regolata dalla legislazione Belga e composta dalle Commissioni nazionali elettrotecniche di 28 paesi europei. Inoltre 7 commissioni nazionali del centro ed est Europa partecipano nel CENELEC come affiliate. L'attività del CENELEC è di preparare standard elettrotecnici che aiutino i singoli mercati e/o le singole aree economiche europee ad abbattere le barriere per il libero commercio di beni e servizi elettrotecnici ed elettronici, creando un nuovo mercato e tagliando i costi di conformità.

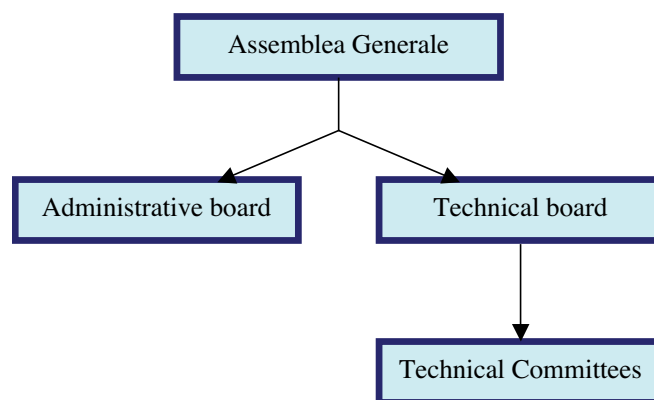


Figura B-2: – Struttura organizzativa del CENELEC

Le commissioni tecniche (TCs) sono responsabili della preparazione degli standard che loro competono. Sono composte da delegazioni nazionali designate dai membri del CENELEC e suddivise in sottocommissioni, task force e working group.

B.2.2. Attività legate ai CEM

Il CENELEC ha approvato nel novembre 1994 le linee guida sperimentali relative all'esposizione umana applicabili agli intervalli 0 Hz - 10 kHz e 10 kHz - 300 GHz. Tali norme, che fissano valori limite di base e di riferimento coerenti con quelli stabiliti successivamente dalle linee guida ICNIRP, ed ora ritirate dopo la pubblicazione della Raccomandazione Europea 1999/512/CE.

La commissione tecnica che si occupa dei campi elettromagnetici nell'ambiente, TC 106X, ha già pubblicato alcune norme ed ha una serie di progetti in preparazione.

Le norme pubblicate sono le seguenti:

- EN 50360:2001 e EN 50361:2001, rispettivamente norma di prodotto e norma di base per i telefoni cellulari (300 MHz-3 GHz).

- EN 50357:2001 e 50364:2001, rispettivamente norma di base e norma di prodotto per i sistemi di sorveglianza (EAS) e i sistemi di identificazione (RFID).

- EN 50371:2002, norma generica per gli apparecchi elettrici ed elettronici di bassa potenza.

- EN 50383:2002, EN 50384:2002 e EN 50385:2002, rispettivamente norma di base, norma di prodotto per i lavoratori e norma di prodotto per la popolazione per l'immissione sul mercato delle stazioni radio base della telefonia cellulare.

- EN 50366:2003, relativa alla valutazione dei campi elettromagnetici emessi dagli elettrodomestici, in collaborazione con il TC 61.

- R1 06-001 :2002, guida per i comitati di prodotto per la preparazione di norme relative all'esposizione umana ai campi elettromagnetici.

I progetti in fase piuttosto avanzata sono i seguenti:

1. PrEN 50392: estensione della EN 50371:2002, norma generica per gli apparecchi elettrici ed elettronici.
2. PrEN 50400 e PrEN 50401: rispettivamente norma di base e norma di prodotto per la messa in servizio delle stazioni radio base per la telefonia cellulare.
3. PrEN 50413: norma di base per le procedure generali di misura e di calcolo dei campi elettromagnetici nell'intera gamma di frequenza (0 Hz - 300 GHz).

Altri progetti all'esame dei relativi WG riguardano:

1. una norma di base per le misure in situ nelle stazioni radio base per la telefonia cellulare;
2. una norma di base e una norma di prodotto per i trasmettitori radio televisivi nelle bande MF e HF;
3. norme riguardanti i requisiti di sicurezza dei forni ad induzione e dielettrici industriali;
4. norme relative all'emissione dei sistemi di saldatura industriale.

B.3. Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI)

B.3.1. Informazioni Generali

Il CEI – Comitato Elettrotecnico Italiano, è l'Ente istituzionale riconosciuto dallo Stato Italiano e dall'Unione Europea, preposto alla normazione e all'unificazione in Italia del settore elettrotecnico, elettronico e delle telecomunicazioni. Le attività del CEI sono:

- Elaborare, pubblicare e diffondere le Norme tecniche nel settore elettrotecnico, elettronico e delle telecomunicazioni per materiali, apparecchi, macchine, impianti, processi e programmi stabilendone i relativi requisiti di qualità e sicurezza, affinché essi possano considerarsi rispondenti alla regola dell'arte;
- Provvedere alla simbologia, alla terminologia, all'unificazione e alla normativa nel settore elettrotecnico;
- Studiare i problemi di carattere scientifico e tecnologico connessi alle esigenze di impiego, funzionamento, sicurezza o altro nel settore elettrico;
- Stabilire criteri, metodi di prova e limiti finalizzati al raggiungimento di adeguati livelli di sicurezza, affidabilità e qualità dei prodotti o dei processi;
- Elaborare regole e procedure per prove e controlli di rispondenza alle norme tecniche;
- Fissare criteri di valutazione di laboratori, costruttori, singoli operatori, ai fini del loro accreditamento da parte dei competenti organismi;
- Promuovere e sviluppare la cultura tecnica con attività formative e informative di vario genere, con iniziative documentali ed editoriali complementari, anche attraverso corsi, convegni, seminari e con il supporto di manuali, guide, software applicativi e commentari tecnici;
- Promuovere e favorire l'attività di certificazione;
- Promuovere a livello internazionale l'armonizzazione delle Norme tecniche o deliberare sui progetti internazionali per assolvere i mandati ricevuti per ottemperare alle politiche comunitarie;
- Partecipare alle attività degli Enti europei ed internazionali di normazione, al fine di rendere operative e di diffondere in Italia le Direttive Comunitarie.

B.3.2. Attività legate ai CEM

Il CEI ha recepito le due norme CENELEC sopraccitate sui telefoni cellulari EN 50360 e EN 50361, predisponendo la traduzione in italiano (CEI 211-8 e 211- 9 rispettivamente), ed anche nella lingua originale inglese le due norme EN 50357 e EN 50364 sui sistemi EAS e RFID; sono state inoltre pubblicate, con la traduzione in italiano, come CEI 106-3 la norma generica EN 50371 e, come CEI 106-5, CEI 106-6, CEI 106-7, le tre norme europee sopra citate sull'immissione sul mercato delle stazioni radio base (EN 50383, EN 50384 e EN 50385).

E' stato infine recepito, nella lingua originale inglese, come CEI 106-4, il rapporto R106-001, relativo alla classificazione delle norme sull'esposizione umana ai campi elettromagnetici e contenente linee guida per i comitati di prodotto.

Con riferimento all'aggiornamento delle tre Guide CEI 211-6, 211-7 e 211-10, relative rispettivamente alle metodologie di misura e valutazione dei campi elettromagnetici a bassa frequenza, a quelle ad alta frequenza e all'installazione delle stazioni radio base per la telefonia cellulare, è stata pubblicata, nel Gennaio 2004, la prima variante (V1 alla CEI 211-10), che, attraverso due nuove appendici, tratta il problema della specificazione del software di valutazione dei campi elettromagnetici prodotti dalle stazioni radio base e quello dei metodi di misura dei segnali UMTS

C Appendice: Organismi internazionali

C World Health Organization (WHO)

C.1.1 Informazioni Generali

La World Health Organization o Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) è una di quelle organizzazioni Internazionali a base universale, intergovernativa indipendente a carattere permanente e a struttura aperta, con propri organi direttivi, con un proprio bilancio e Segretariato definiti nello Statuto delle Nazioni Unite come uno di queglii “Istituti Specializzati costituiti con accordi intergovernativi, ed aventi, in conformità ai loro statuti, vasti compiti internazionali nei campi economico, sociale,culturale, educativo, sanitario e simili”.

L’OMS ha una struttura complessa che comprende, in aggiunta agli organi centrali comuni anche alle altre agenzie specializzate delle Nazioni Unite (Assemblea,Consiglio Esecutivo, Segretariato e vari comitati), strutture regionali create dall’OMS stesso o organi regionali già esistenti integrati nell’Organizzazione

Sul sito <http://www.who.int> sono reperibili ulteriori informazioni

C.1.2 Attività legate ai CEM

L’OMS ha inserito tra i suoi argomenti principali i campi elettromagnetici di tutte le frequenze considerandoli una delle influenze ambientali più comuni e più velocemente crescenti. A tale scopo nel 1999 ha dato avvio al EMF International Project o Progetto Internazionale CEM per valutare la prova scientifica degli effetti possibili dei campi elettromagnetici statici e variabili sulla salute umana nella gamma di frequenza da 0 a 300 GHz. Gli obiettivi chiave del progetto sono:

- Fornire una risposta coordinata internazionale alle preoccupazioni circa gli effetti possibili sulla salute per esposizione a CEM
- Valutare la letteratura scientifica e stendere una relazione sugli effetti sulla salute,
- Identificare le lacune nella conoscenza di tale argomento e dove è necessario effettuare una ulteriore ricerca per dare una migliore valutazione di rischio per la salute,
- Promuovere un programma di ricerca finalizzato insieme con le agenzie fondatrici
- Incorporare i risultati della ricerca in monografie per i criteri sulla salute ambientale dell’OMS dove saranno valutati formalmente i rischi per la salute legati all’esposizione

- Fornire le informazioni sull'amministrazione dei programmi di protezione a CEM per il cittadino ed altre autorità, compreso le monografie sulla percezione, sulla comunicazione e sull'amministrazione di rischio dei CEM
- Fornire il consiglio alle autorità nazionali, altre istituzioni, grande pubblico ed operai, circa il pericolo derivato dall'esposizione di EMF e una qualsiasi misure necessarie per la mitigazione

Il progetto internazionale CEM è inserito all'interno delle attività dell'OMS come da figura

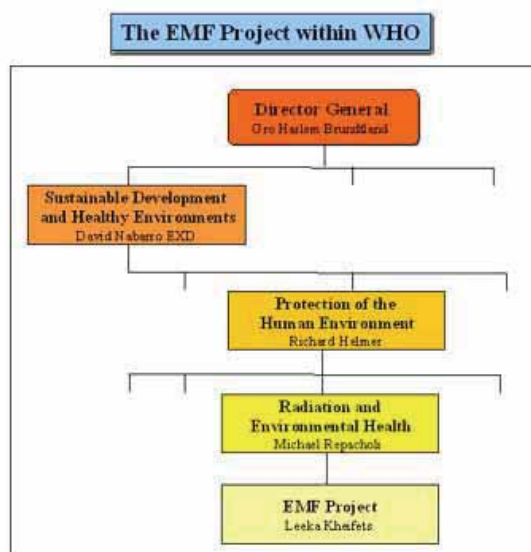


Figura C-1: Il Progetto EMF all'interno dell'organizzazione mondiale della sanità

L'organizzazione strutturale del progetto è mostrata nella figura ed è costituita da tre commissioni, i cui membri sono composti da 8 organizzazioni internazionali, 8 istituzioni collaboratrici e 54 autorità nazionali



Figura C-2: Organizzazione strutturale del progetto EMF

Per ulteriori informazioni <http://www.who.int/peh-emf/en/>

Dell'organizzazione mondiale della sanità fa parte anche l'Agenzia Internazionale sul Cancro (IARC), la cui missione è quella di coordinare e condurre ricerca sulle cause di cancro e meccanismi di carcinogenesi nell'uomo, di sviluppare strategie scientifiche per il controllo del cancro, ed in base ad una sua classificazione provvede a dare indicazioni sulla pericolosità o meno di un agente, come iniziatore e o promotore della patologia. La classificazione dell'IARC è basata sulla evidenza scientifica di cancerogenicità sull'uomo, ove siano disponibili dati epidemiologici, e sugli animali da esperimento, valutate separatamente. La classificazione prevede cinque categorie:

- Gruppo 1 : cancerogeni per l'uomo
- Gruppo 2A : probabili cancerogeni per l'uomo
- Gruppo 2B : possibili cancerogeni per l'uomo
- Gruppo 3 : agenti non classificabili per la cancerogenicità nell'uomo
- Gruppo 4 : agenti probabilmente non cancerogeni per l'uomo

L'Agenzia Internazionale di Ricerca sul Cancro di Lione, nel programma di identificazione e riconoscimento delle sostanze cancerogene fino al 2002 ha valutato ben 885 agenti (sostanze chimiche, esposizioni, agenti biologici e fisici) nelle 82 monografie ad oggi pubblicate, riconoscendo 88 cancerogeni di Gruppo 1, 64 agenti o misture o circostanze di esposizione di Gruppo 2A, 236 agenti o misture o circostanze di esposizione di Gruppo 2B, 496 agenti o misture o

circostanze di esposizione di Gruppo 3, 1 solo agente di Gruppo 4. In sono qui riportati alcuni esempi di comuni agenti classificati dalla IARC.

Classificazione	Agente
Cancerogeno per l'uomo (normalmente in base ad una forte evidenza di cancerogenicità nell'uomo)	<ul style="list-style-type: none"> • Asbesto • Iprite • Tabacco • Radiazione gamma
Probabilmente cancerogeno per l'uomo (normalmente in base ad una forte evidenza di cancerogenicità negli animali)	<ul style="list-style-type: none"> • Gas di scarico dei motori diesel • Lampade solari • Radiazione UV • Formaldeide
Possibilmente cancerogeno per l'uomo (normalmente sulla base di una evidenza nell'uomo che è considerata credibile, ma per la quale non si possono escludere altre cause)	<ul style="list-style-type: none"> • Caffè • Gas di scarico dei motori a benzina • Fumi di saldatura • Campi magnetici ELF

Tabella C-1: Esempi di classificazione IARC di alcuni agenti

Per quanto riguarda i campi elettromagnetici l'IARC ha separato i campi in bassa frequenza da quelli a radiofrequenza. Per i primi, nell'ultimo rapporto del 2002 "*IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans; Volume 80*" li ha classificati possibilmente cancerogeni. Per i campi ad alta frequenza non si è in grado di affermare se siano cancerogeni ma non se ne può neanche escludere la possibilità. E' prevista nel 2005 la conclusione di alcune ricerche che dovrebbero fornire materiale per un giudizio.

C.2 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)

C.2.1 Informazioni Generali

La Commissione Internazionale per la Protezione dalle Radiazioni Non Ionizzanti (ICNIRP) è un'istituzione indipendente formalmente riconosciuta dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), dall'Ufficio Internazionale del Lavoro (ILO) e dalla Commissione Europea (CE), con i quali collabora attivamente. E' una Commissione composta da quattordici scienziati indipendenti, con quattro comitati scientifici di esperti nei settori dell'epidemiologia, biologia, dosimetria e radiazione ottica.

L'ICNIRP basa la propria attività su alcuni principi fondamentali, chiaramente descritti in un proprio documento programmatico: fondamento scientifico, trasparenza delle scelte, indipendenza da considerazioni economiche e sociali, criteri definiti a priori.

La finalità principale della Commissione è fornire ai governi nazionali consulenza e indirizzo scientifico per lo sviluppo di normative e di altre misure protezionistiche nei confronti di campi elettromagnetici, radiazione ottica, radiazione laser ed ultrasuoni. A questo fine, la Commissione elabora ed aggiorna, in base alle nuove conoscenze, delle linee guida che costituiscono il riferimento fondamentale per la maggior parte dei Paesi. Le informazioni e raccomandazioni prodotte vengono diffuse attraverso il sito web, le pubblicazioni scientifiche sotto forma di review e rapporti, libri. Questo lavoro, combinato con quello della OMS, è confluito nella pubblicazione delle Linee guida sui limiti di esposizione ai CEM¹. Nell'autunno 2003, è stato eletto presidente di ICNIRP Paolo Vecchia, dell'Istituto Superiore di Sanità.

C.2.2 Attività legate ai CEM

La fondamentale attività dell'ICNIRP è quella di effettuare continue revisioni critiche dell'intero corpo della letteratura scientifica, per i campi sia a bassa, sia ad alta frequenza, attraverso una agenda dei lavori particolarmente fitta per i prossimi anni. La più recente revisione delle linee guida dell'ICNIRP è stata pubblicata nel 1998 e copre l'intero spettro dei campi elettromagnetici non ottici, fino alla frequenza di 300 GHz². Attorno alle indicazioni dell'ICNIRP si è creato un vasto consenso, ed oltre 20 paesi hanno fatto proprie le linee guida adottandole come proprie norme nazionali. L'OMS, dal canto suo, ha deciso di favorire ulteriormente questo consenso ed ha avviato, nell'ambito del Progetto Internazionale CEM, un'azione per l'armonizzazione delle normative a livello mondiale.

L'ICNIRP è stato accreditato dall'OMS per continuare il suo lavoro di revisore. Le sue revisioni costituiranno la base per le valutazioni di impatto sanitario programmate dall'OMS nel quadro del Progetto Internazionale Campi elettromagnetici.

D Principali progetti internazionali ed europei legati ai CEM

Numerosi organismi internazionali e nazionali stanno effettuando ricerche sulle implicazioni della esposizione dell'uomo ai campi elettromagnetici. In Tabella D-1 è riportato un elenco con il nome del progetto e l'organismo responsabile.

Progetto	Organizzazione
International EMF Project	World Health Organization (WHO)
EMF-RAPID Project	The National Institute of Environmental Health Sciences (NIEHS)
INTERPHONE Study	International Agency for Research on Cancer (IARC)
Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Static and Extremely Low-Frequency Electric and Magnetic Fields	International Agency for Research on Cancer (IARC)
Potential Health Implication from Mobile Communication Systems	European Action COST 281
Electromagnetic Fields	National Radiological Protection Board (NRPB)
Radio Frequency Safety	Federal Communications Commission (FCC)
Committee on Man and Radiation (COMAR)	IEEE Engineering in Medicine and Biology Society
Electromagnetic Fields and Human Health FAQs (by Prof. John E. Moulder, Ph.D.)	Medical College of Wisconsin
Report on Radiofrequency Fields	The Royal Society of Canada
Radiofrequency Radiation Dosimetry Handbook	USAF School of Aerospace Medicine, Aerospace Medical Division (AFSC)

Tabella D-1

Altri organismi che si occupano di CEM sono:

- Bioelectromagnetics Society (BEMS)
- European BioElectromagnetics Association (EBEA)
- Independent Expert Group on Mobile Phones (IEGMP)

