

RIDUZIONE E CONTENIMENTO DELL'ESPOSIZIONE, CALCOLI PREVISIONALI E SCHERMATURE¹

Daniele Andreuccetti, IFAC-CNR, Firenze

1. Introduzione

L'esigenza di ridurre l'intensità del campo elettromagnetico presente in una determinata regione si manifesta in varie situazioni. Contenere l'esposizione di individui entro livelli ritenuti sicuri ed evitare interferenze su dispositivi elettronici sensibili sono sicuramente i casi più tipici. In questo documento, faremo principalmente riferimento al primo di questi casi, sebbene molte delle considerazioni sviluppate siano facilmente applicabili anche ai problemi di compatibilità elettromagnetica tra apparecchiature.

Per affrontare questi problemi, occorre partire dal riconoscere il ruolo di due attori principali: la **sorgente** che genera il campo elettromagnetico e la **vittima** che si trova nella regione controllata e la cui esposizione si desidera diminuire. Per la soluzione, si hanno a disposizione tre strategie diverse. Si può intervenire sulla sorgente, riducendone l'intensità o modificandone altre caratteristiche di emissione; oppure si può allontanare la sorgente dalla regione da proteggere; infine, si possono utilizzare specifici dispositivi in grado di ridurre l'intensità del campo, agendo sull'accoppiamento elettromagnetico fra la sorgente e la vittima. Chiameremo genericamente **schermi** questi dispositivi e **schermatura** la tecnologia relativa al loro impiego.

Nella prima parte di questo documento saranno illustrati alcuni concetti generali alla base dei metodi di *schermatura*. Nella seconda, ci occuperemo in particolare dei metodi di riduzione dell'esposizione applicabili alle emissioni degli elettrodotti ad altissima tensione.

2. Quando occorre adottare una tecnica di contenimento dell'esposizione?

Si possono adottare due atteggiamenti nei confronti di questo problema: un atteggiamento **radicale** ed un atteggiamento **razionale**. Chi adotta il primo, considera il campo elettromagnetico come elemento estraneo all'ambiente, quindi indesiderato, e sostiene l'opportunità di adottare in ogni caso qualunque provvedimento di riduzione sia disponibile, a prescindere dai valori di campo in gioco. Chi propende per un approccio più razionale, richiede che siano individuate delle **soglie** al di sotto delle quali i valori di campo possano essere considerati sicuri; in questo caso, si adotteranno provvedimenti di riduzione solo in corrispondenza di quei siti dove una valutazione preliminare abbia fatto prevedere valori superiori alla soglia prestabilita.

Sebbene l'approccio *radicale* possa sembrare allettante, in quanto apparentemente in grado di fornire la massima tutela possibile, tuttavia esso risulta meno attraente se si considera che le risorse investite per un intervento non necessario (quindi tale da non portare alcun beneficio *certo* in termini sanitari) dovranno essere distolte da altri settori, dove forse avrebbero potuto far conseguire risultati migliori.

Il principale problema connesso con l'adozione di un atteggiamento *razionale* risiede invece, come si intuisce facilmente, nella definizione dei **valori di soglia**. Il riferimento preferenziale dovrebbe ovviamente essere costituito dalle normative di sicurezza nazionali ed internazionali. Esistono però opinioni diverse, sostenute soprattutto da alcune

¹ Testo preparato dall'autore ed utilizzato come materiale didattico per i corsi sulla protezione dai campi elettromagnetici organizzati dall'ANPEQ (Associazione Nazionale Professionale Esperti Qualificati in Radioprotezione).

organizzazioni di carattere ambientalista e di tutela dei consumatori, secondo le quali i valori proposti dalle normative non proteggono sufficientemente la popolazione, poiché non tengono in debito conto dell'eventuale rischio associato ad esposizioni croniche a campi di bassissimo livello.

PRIMA PARTE: LA SCHERMATURA DEL CAMPO ELETTROMAGNETICO²

3. L'efficacia schermante

L'*efficacia schermante* è una figura di merito che esprime quantitativamente l'abilità di uno schermo a ridurre l'intensità del segnale elettromagnetico che investe un punto determinato; è prassi utilizzare per questa grandezza la formulazione logaritmica in decibel (dB) ed il simbolo SE_{dB} (dall'inglese *shielding effectiveness*). In particolare, l'efficacia schermante nei confronti del **campo elettrico** è definita dalla relazione:

$$SE_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{E_1}{E_2} \right) \quad (1)$$

Dove E_1 è l'ampiezza del campo elettrico misurata in un punto prefissato, prima del posizionamento dello schermo ed E_2 è l'ampiezza del campo elettrico misurata nello stesso punto, dopo il posizionamento dello schermo.

In modo analogo si possono definire l'efficacia schermante nei confronti del campo magnetico e della densità di potenza della radiazione.

4. Che cosa schermare

In linea di massima, le schermature realizzate per mezzo di *contenitori chiusi* sono più efficaci di quelle basate su schermi parziali, sebbene in entrambi i casi le prestazioni reali siano significativamente degradate dalla presenza di aperture.

L'approccio concettualmente preferibile è quello di racchiudere tutta la **sorgente** in un contenitore chiuso, perché in questo modo si fa ricadere sulla stessa ogni disagio o limitazione conseguente all'applicazione dello schermo. Tuttavia, non sempre questo approccio è percorribile. Non lo è sicuramente se abbiamo a che fare con una *sorgente intenzionale a diffusione* (come per esempio un trasmettitore per telecomunicazioni), perché la schermatura renderebbe impossibile l'erogazione del servizio a cui la sorgente è destinata. Viceversa, schermare la sorgente può essere un approccio perseguibile nel caso di *sorgenti accidentali* (la cui emissione non è funzionale al servizio svolto: si pensi per esempio ad un apparecchio elettrodomestico) e anche nel caso di *sorgenti intenzionali ad emissione localizzata*, qualora si possa racchiudere dentro lo schermo, oltre alla sorgente, anche tutta la regione in cui essa svolge il suo compito. Un esempio tipico di quest'ultima situazione si ha con il forno a microonde.

Quando la schermatura completa della sorgente non è tecnicamente praticabile, la seconda opzione da considerare dovrebbe essere la schermatura completa della **vittima**. Se vi sono motivazioni economiche o inaccettabili limitazioni alla fruibilità delle zone da proteggere che sconsigliano l'adozione anche di questa seconda opzione, si deve ricorrere all'interposizione di schermi parziali (lastre) o all'impiego di dispositivi di altro tipo, in grado di abbattere l'intensità del campo.

² Questa parte è la sintesi di alcuni paragrafi del capitolo "La schermatura dei campi elettromagnetici", di D.Andreuccetti e C.Riminesi, in "La schermatura dei campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici: principi generali, aspetti teorici e applicazioni pratiche", Franco Angeli Editore Milano 2006, a cura di Paolo Bevitoli.

5. Lo schermo ideale

Presentiamo adesso un semplice modello teorico in grado di descrivere il comportamento di uno schermo ideale e di valutarne l'efficacia schermante. Il modello è basato sull'analisi dei fenomeni che si verificano quando un'onda elettromagnetica piana incide perpendicolarmente sulla superficie dello schermo, costituito da una lastra piana omogenea indefinitamente estesa, avente spessore uniforme t e realizzata con materiale metallico o comunque buon conduttore. La lastra separa due semispazi, uno contenente la *sorgente* l'altro contenente la *vittima*. L'onda che la investe viene in parte **riflessa** sull'interfaccia aria-conduttore ed in parte **trasmessa** all'interno dello schermo. La riflessione è a tutti gli effetti un meccanismo schermante, poiché la potenza associata all'onda riflessa non investe la vittima, come invece avverrebbe in assenza dello schermo. A questo meccanismo è associata una **perdita per prima riflessione**, per la quale utilizzeremo nel seguito il simbolo $R_{dB}^{(1)}$ per indicarne il valore numerico espresso in decibel.

L'onda trasmessa all'interno del materiale schermante subisce una attenuazione nel propagarsi in esso; ad essa è associata una **perdita per assorbimento**, per la quale useremo il simbolo A_{dB} .

Giunta infine in prossimità dell'interfaccia conduttore-aria, l'onda subisce una seconda riflessione e solo una parte di essa viene trasmessa oltre lo schermo, verso la vittima; indicheremo col simbolo $R_{dB}^{(2)}$ l'entità della **perdita per seconda riflessione**.

Alla seconda riflessione possono far seguito riflessioni successive sulle due superfici di discontinuità. Queste portano ad un peggioramento dell'efficacia schermante, che esprimeremo quantitativamente col termine B_{dB} , il cui valore è sempre negativo.

In definitiva, è possibile considerare l'efficacia schermante di una lastra piana indefinita come il risultato della sovrapposizione dei contributi di quattro meccanismi di azione principali, legati rispettivamente alla riflessione sulla prima superficie di discontinuità (aria-metallo), all'assorbimento dentro allo spessore metallico, alla riflessione sulla seconda superficie di discontinuità (metallo-aria) ed alle riflessioni multiple. In formule avremo:

$$SE_{dB} = R_{dB}^{(1)} + A_{dB} + R_{dB}^{(2)} + B_{dB} \quad (2)$$

Analizzeremo ora quantitativamente i fenomeni sopra descritti, limitandoci per brevità a riportare i principali risultati, cioè le espressioni matematiche per i termini dell'equazione (2), in grado di legare l'efficacia schermante ai parametri caratteristici del problema.

Consideriamo quindi un'onda piana polarizzata linearmente, che incide normalmente sulla superficie di separazione tra il mezzo di provenienza (mezzo 1, che supporremo essere l'aria o il vuoto) ed il mezzo che costituisce lo schermo (mezzo 2, che supporremo essere un materiale metallico).

5.1 Efficacia schermante dovuta alle riflessioni sulle superfici di discontinuità

Per come si è formulato il problema, risulta evidentemente che il campo elettrico ed il campo magnetico sono paralleli alle superfici di discontinuità introdotte dallo schermo. D'altronde, partendo dalle equazioni generali del campo elettromagnetico (equazioni di Maxwell) scritte in forma integrale, è possibile dimostrare [1, par.3-6,6-9,10-16] che le componenti tangenziali dei campi si conservano quando attraversano una superficie di discontinuità. Se ricordiamo che ciascuna componente elettrica è legata alla corrispondente componente magnetica attraverso l'**impedenza d'onda** ed indichiamo con ζ_1 l'impedenza d'onda nel primo materiale (il mezzo di provenienza) e con ζ_2 quella nel secondo materiale (lo schermo), si giunge con pochi passaggi a dimostrare che il contributo all'efficacia

schermante nei confronti del campo elettrico dovuto alla prima riflessione sull'interfaccia aria-metallo è dato da:

$$R_{dB}^{(1)} = 20 \log_{10} \left(\frac{\zeta_1 + \zeta_2}{2\zeta_2} \right) \quad (3)$$

Con un procedimento simile, per il campo magnetico si trova:

$$R_{dB}^{(1)} = 20 \log_{10} \left(\frac{\zeta_1 + \zeta_2}{2\zeta_1} \right) \quad (4)$$

Un ragionamento analogo può essere applicato alla seconda interfaccia (metallo-aria), scambiando ovviamente i ruoli dei termini ζ_1 e ζ_2 . Si trova quindi:

$$\begin{aligned} R_{dB}^{(2)} &= 20 \log_{10} \left(\frac{\zeta_2 + \zeta_1}{2\zeta_1} \right) \quad \text{per il campo elettrico} \\ R_{dB}^{(2)} &= 20 \log_{10} \left(\frac{\zeta_2 + \zeta_1}{2\zeta_2} \right) \quad \text{per il campo magnetico} \end{aligned} \quad (5)$$

dove si sono adottate implicitamente le ipotesi che l'impedenza d'onda nel primo materiale sia la stessa da entrambe le parti dello schermo e che le riflessioni su entrambe le superfici siano descrivibili in termini di una transizione tra due semispazi omogenei indefiniti. Si può dimostrare che queste schematizzazioni conducono a determinare un limite superiore per l'efficacia schermante. Il contributo complessivo R_{dB} all'efficacia schermante dovuto alle due riflessioni principali sulla prima e sulla seconda superficie di discontinuità, vale in definitiva:

$$R_{dB} = R_{dB}^{(1)} + R_{dB}^{(2)} = 20 \log_{10} \left[\frac{(\zeta_1 + \zeta_2)^2}{4\zeta_1\zeta_2} \right] \quad (6)$$

Esso risulta uguale per il campo elettrico e per il campo magnetico: questa identità è una conseguenza dell'aver schematizzato l'interazione del campo con la superficie dello schermo in termini di un'onda piana e, soprattutto, nell'aver imposto che l'impedenza d'onda sia uguale ai due lati dello schermo. Vedremo in seguito come rimuovere questa limitazione, inaccettabile alle frequenze estremamente basse.

Per utilizzare le espressioni trovate, dobbiamo evidentemente esprimere il valore dell'impedenza d'onda nei due mezzi in funzione dei parametri del problema e delle caratteristiche dielettriche dei materiali coinvolti.

5.2 L'impedenza d'onda nel dielettrico ai due lati dello schermo

L'impedenza d'onda ζ_i nel mezzo 1 che riempie lo spazio ai due lati dello schermo (e che abbiamo supposto essere l'aria o il vuoto), dipende in maniera rilevante solo dalla distanza della sorgente dalla superficie dello schermo, rapportata alla lunghezza d'onda del campo. La forma di questa dipendenza è in generale assai complessa, perché funzione delle caratteristiche tecniche della sorgente; in particolare, occorre distinguere le **sorgenti di tipo elettrico** (a struttura aperta, sedi di elevate differenze di potenziale e basse correnti, che generano in loro prossimità un campo in cui prevale la componente elettrica) dalle **sorgenti di tipo magnetico** (a struttura chiusa, sedi di basse differenze di potenziale ed elevate correnti, che generano in loro prossimità un campo in cui prevale la componente magnetica). È possibile ricavare delle relazioni utili agli scopi di questa trattazione studiando l'andamento del campo generato da sorgenti particolarmente semplici, quali i dipoli elementari. Questa analisi si trova in molti libri di testo [1, par.14-3,14-12]; in questa sede ci limitiamo a richiamarne in forma schematica i principali risultati, per un inquadramento generale e ad una descrizione sommaria di quello che accade.

Il parametro a cui è opportuno riferirsi per confrontare la distanza r tra sorgente e schermo con la lunghezza d'onda λ risulta essere la quantità $\lambda/2\pi$. Se la distanza r è **maggiore** di questa quantità, allora il campo elettromagnetico incidente sullo schermo ha le caratteristiche dell'onda piana nello spazio libero. Per distanze r **minori** del parametro indicato, l'impedenza d'onda tende a crescere linearmente avvicinandosi a *sorgenti di tipo elettrico*, tende a diminuire proporzionalmente alla distanza per le *sorgenti di tipo magnetico*. Non si deve però pensare che, avvicinandosi sufficientemente ad una sorgente, sia possibile sperimentare impedenze di campo arbitrariamente grandi o arbitrariamente piccole. In realtà, si può far vedere che l'impedenza d'onda non sale mai oltre e non scende mai sotto al valore corrispondente, in prima approssimazione, all'*impedenza interna della sorgente* ζ_s . Tuttavia, poiché tale valore non sempre è noto o stimabile, questa limitazione viene spesso ignorata.

In definitiva, l'andamento dell'impedenza d'onda ζ_1 in aria o nel vuoto, in funzione della distanza r da una sorgente elementare funzionante alla frequenza f (e quindi con lunghezza d'onda $\lambda=c/f$, dove c è la velocità di fase pari, come è noto, a circa 3×10^8 m/s) e caratterizzata da una impedenza interna ζ_s , è illustrato schematicamente nella Tabella 1 (relativa alle sorgenti *elettriche*) e nella Tabella 2 (per le sorgenti *magnetiche*). In queste tabelle, ϵ_0 e μ_0 sono la permittività elettrica e la permeabilità magnetica assolute dello spazio vuoto, mentre la quantità ζ_0 (detta *impedenza intrinseca* dello spazio vuoto) vale circa 376.7Ω ; ϵ e μ sono la permittività elettrica e la permeabilità magnetica assolute del materiale (metallico) che costituisce lo schermo.

Distanza dalla sorgente r	Impedenza d'onda ζ_1
$r \geq \frac{\lambda}{2\pi}$	$\zeta_1 \approx \zeta_0 \equiv \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$
$\frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\zeta_0}{\zeta_s} \leq r \leq \frac{\lambda}{2\pi}$	$\zeta_1 \approx \frac{\lambda}{2\pi r} \zeta_0$
$r \leq \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\zeta_0}{\zeta_s}$	$\zeta_1 \approx \zeta_s$

Tabella 1 - Impedenza d'onda in aria o nel vuoto, in funzione della distanza r da una sorgente di tipo elettrico (impedenza interna ζ_s maggiore dell'impedenza intrinseca dello spazio vuoto ζ_0).

Distanza dalla sorgente r	Impedenza d'onda ζ_1
$r \geq \frac{\lambda}{2\pi}$	$\zeta_1 \approx \zeta_0 \equiv \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$
$\frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\zeta_s}{\zeta_0} \leq r \leq \frac{\lambda}{2\pi}$	$\zeta_1 \approx \frac{2\pi r}{\lambda} \zeta_0$
$r \leq \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\zeta_s}{\zeta_0}$	$\zeta_1 \approx \zeta_s$

Tabella 2 - Impedenza d'onda in aria o nel vuoto, in funzione della distanza r da una sorgente di tipo magnetico (impedenza interna ζ_s minore dell'impedenza intrinseca dello spazio vuoto ζ_0).

5.3 L'impedenza d'onda nel materiale che costituisce lo schermo

Per determinare il valore dell'impedenza d'onda ζ_2 nel secondo mezzo, quello che costituisce lo schermo, si deve considerare come il campo elettromagnetico si propaga in esso; queste considerazioni saranno utili poi anche per determinare il contributo A_{dB} all'efficacia schermante dovuto all'assorbimento subito dall'onda nell'attraversarlo. A questo fine, occorre partire dal sistema delle equazioni di Maxwell nella formulazione differenziale valida in un materiale omogeneo, privo di sorgenti e dotato di permittività elettrica assoluta ϵ , di permeabilità magnetica assoluta μ e di conducibilità elettrica σ . La soluzione generale del sistema in questione, in regime armonico sinusoidale con frequenza f e pulsazione $\omega = 2\pi f$, risulta essere costituita da un'onda elettromagnetica che si attenua esponenzialmente mentre si propaga dentro il materiale metallico. L'ampiezza dell'onda in funzione della penetrazione x risulta infatti essere data da:

$$E(x) = E_0 \exp\left(-\frac{x}{\delta}\right) \quad (7)$$

Dove E_0 è il valore dell'ampiezza del campo all'interfaccia aria-metallo e:

$$\delta = -\frac{1}{\text{Im}(k)} \quad (8)$$

con:

$$k^2 = -j\omega(\sigma + j\omega\epsilon)\mu \quad (9)$$

La quantità δ ha le dimensioni di una lunghezza, rappresenta la profondità a cui l'ampiezza del campo si riduce ad una frazione pari a $1/e$ del suo valore al momento dell'ingresso nello schermo e prende il nome di **profondità di penetrazione** del campo elettromagnetico nello schermo; lavorando un po' sulle equazioni (8) e (9), se ne può ricavare l'espressione in caso di materiali metallici o comunque buoni conduttori (per i quali risulta $\sigma \gg \omega\epsilon$), come sono di norma i materiali di cui sono costituite le schermature elettromagnetiche. Si trova:

$$\delta \approx \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (10)$$

Spessore t	Impedenza di barriera ζ_2
$t \gg \delta$	$\zeta_2 \approx \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} \approx \frac{\sqrt{2}}{\delta\sigma}$
Caso generale	$\zeta_2 \approx \frac{1}{\left(1 - e^{-\frac{t}{\delta}}\right)} \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} \approx \frac{\sqrt{2}}{\delta\sigma \left(1 - e^{-\frac{t}{\delta}}\right)}$
$t \ll \delta$	$\zeta_2 \approx \frac{\delta}{t} \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} \approx \frac{\sqrt{2}}{t\sigma}$

Tabella 3 - Impedenza di barriera di uno schermo piano, in funzione del suo spessore t e delle caratteristiche elettromagnetiche del materiale che lo costituisce

Partendo dalle stesse equazioni di base, è possibile ricavare anche l'espressione dell'impedenza d'onda ζ_2 , chiamata **impedenza di barriera** dello schermo, in funzione del suo spessore t e delle caratteristiche elettromagnetiche del materiale che lo costituisce; supponendo di nuovo che questo sia metallico (buon conduttore) si giunge a trovare la

situazione descritta in Tabella 3, dove si è utilizzata anche l'equazione (10) per introdurre la profondità di penetrazione δ .

5.4 Efficacia schermante dovuta all'assorbimento nel metallo

L'espressione fornita dell'equazione (7) per l'ampiezza del campo elettrico all'interno del materiale schermante in funzione della penetrazione x , consente di calcolare agevolmente di quanto si attenua l'onda nell'attraversare l'intero spessore t dello schermo e quindi di determinare il parametro A_{dB} che caratterizza le perdite per assorbimento nel materiale. Non è difficile trovare che:

$$A_{dB} = 20 \log_{10} \left(e^{\frac{t}{\delta}} \right) = 20 \frac{t}{\delta} \log_{10} e \approx 8.686 t \sqrt{\pi f \sigma \mu} \quad (11)$$

5.5 Degradazione dell'efficacia schermante dovuta alle riflessioni multiple

Come si è detto, le riflessioni multiple all'interno della lastra-schermo portano ad un **degrado** dell'efficacia schermante. Infatti, una parte dell'onda riflessa indietro sulla seconda superficie di discontinuità (metallo-aria), può riuscire a raggiungere ugualmente la vittima grazie ad una nuova riflessione sulla prima superficie di discontinuità; ulteriori riflessioni multiple possono portare altri contributi al campo che raggiunge la vittima.

Tuttavia, i contributi dovuti alle riflessioni multiple hanno subito – rispetto al contributo principale – almeno altri due attraversamenti dello schermo, con conseguenti attenuazioni dovute all'assorbimento nello stesso. È lecito dunque aspettarsi che il loro apporto sia trascurabile, a meno che lo schermo non abbia un bassissimo potere assorbente (misurato dal parametro A_{dB}). Come regola pratica, si ritiene in genere che il contributo delle riflessioni multiple sia trascurabile se risulta $A_{dB} \geq 15$ dB. In caso contrario, occorre correggere il valore dell'efficacia schermante, tenendo conto anche del termine B_{dB} ; senza poter qui entrare nei dettagli, si può dimostrare che in prima approssimazione risulta:

$$B_{dB} \approx 20 \log_{10} \left| 1 - e^{-\frac{(1+j)2t}{\delta}} \right| \quad (12)$$

A questo punto si hanno a disposizione, seppure dedotti sulla base di un modello teorico rudimentale ed a tratti non completamente rigoroso, tutti gli elementi necessari a caratterizzare il funzionamento di uno schermo piano nelle diverse situazioni operative. Nel prossimo paragrafo vedremo come applicare nella pratica, cioè alla soluzione di problemi reali, le conoscenze fin qui acquisite.

5.6 Procedura applicativa ed osservazioni generali

È bene innanzitutto tenere presente che nessun problema reale di schermatura può essere risolto per via interamente teorica, specie se la teoria è basata su un modello semplificato come quello appena esposto. Il modello teorico deve essere considerato solo un strumento utile per una prima valutazione del problema. L'applicazione pratica del modello passa tipicamente attraverso i passi seguenti.

Si deve innanzitutto stabilire se la sorgente è di tipo **elettrico** (cioè sede di elevate differenze di potenziale e basse correnti, con alta impedenza interna ζ_s) oppure di tipo **magnetico** (sede di basse differenze di potenziale ed elevate correnti, con bassa impedenza interna ζ_s). Si dovrebbe anche, se possibile, stimare l'impedenza interna ζ_s della sorgente.

Occorre poi determinare la frequenza f e la lunghezza d'onda λ a cui la sorgente emette e la distanza r tra questa e la posizione dello schermo. Con questi parametri, è possibile determinare l'impedenza d'onda ζ_1 nel mezzo esterno allo schermo, facendo riferimento alla Tabella 1 per le sorgenti elettriche, alla Tabella 2 per le sorgenti magnetiche.

Infine, è necessario procurarsi la conducibilità elettrica σ , la permeabilità magnetica assoluta μ e lo spessore t dello schermo, in modo da poter calcolare la profondità di penetrazione δ (equazione (10)) e l'impedenza d'onda ζ_2 (Tabella 3) in esso. A questo scopo, può risultare utile la Tabella 4, che riporta le caratteristiche dei metalli più comunemente utilizzati per le schermature.

	Conducibilità σ [MS/m]	Permeabilità magnetica assoluta μ [μH/m]
Rame	58,0	1,26
Oro	40,6	1,26
Alluminio	34,8	1,26
Zinco	17,4	1,26
Ferro	9,86	1260 (<i>a bassa frequenza</i>)
Mumetal	1,74	100000 (<i>a bassa frequenza</i>)

Tabella 4 – Valori tipici della conducibilità σ e della permeabilità magnetica assoluta μ dei metalli comunemente impiegati per le schermature

Si hanno a questo punto a disposizione tutti i parametri necessari a calcolare l'efficacia schermante con le relazioni (2), (6), (11) e, se necessario, (12).

Si osservi che il ferro, avendo una conducibilità pari a circa 1/6 di quella del rame, ma una permeabilità magnetica 1000 volte maggiore, viene ad avere – a parità di frequenza – una profondità di penetrazione circa 13 volte minore di quella del rame ed una impedenza di barriera quasi 77 volte maggiore. Questo rende il ferro più efficace del rame, sia per quanto riguarda il meccanismo di assorbimento, sia – per alcune combinazioni di spessori e distanze dalla sorgente – per quello della riflessione del campo a bassa impedenza, cioè del campo magnetico. Tutto ciò però si applica solo a frequenze relativamente basse (fino ad alcune decine di kilohertz al massimo), perché salendo in frequenza la permeabilità dei materiali ferromagnetici tende a diminuire: oltre 1 MHz la maggior parte di essi ha una permeabilità relativa praticamente uguale ad 1.

5.7 Sorgenti a bassissima frequenza

Come abbiamo già avuto modo di osservare, la teoria presentata non soddisfa le aspettative se viene applicata ai campi a bassissima frequenza, per esempio ai campi degli elettrodotti. È ben noto infatti come qualsiasi schermo reale sia molto efficace nell'abbattere il campo elettrico e invece assai poco efficace nei confronti del campo magnetico. Risulta quindi inaccettabile una teoria che, per una data sorgente ed un dato schermo, fornisca la stessa efficacia schermante nei confronti di entrambe le componenti del campo. Questa situazione è conseguenza del modello posto alla base della teoria, che si fonda sulla riflessione di un'onda piana vincolata a conservare la stessa impedenza d'onda ai due lati dello schermo.

L'artificio che permette di utilizzare la teoria anche alle bassissime frequenze ed ottenere previsioni in ragionevole accordo con l'esperienza, consiste nel considerare la sorgente reale (per esempio: un elettrodotto) come sovrapposizione di due sorgenti virtuali indipendenti: una sorgente di puro campo elettrico (impedenza infinita), attraverso la quale valutare l'efficacia schermante nei confronti, appunto, del campo elettrico ed una sorgente di "puro"

campo magnetico (impedenza nulla), con la quale stabilire l'efficacia schermante nei confronti di questo secondo agente fisico.

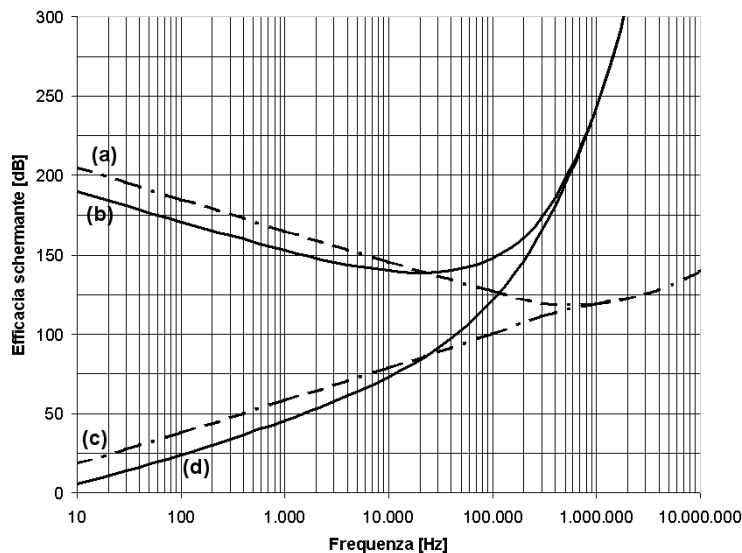


Figura 1 – Efficacia schermante di una lastra di rame (linee (a) e (c)) o di ferro (linee (b) e (d)) in funzione della frequenza da 10 Hz a 10 MHz. La lastra ha uno spessore di 0.1 mm e si trova a 100 m da una sorgente di campo elettrico (linee (a) e (b)) o di campo magnetico (linee (c) e (d))

5.8 Considerazioni ed esempi

Non è facile discutere in generale il comportamento dell'efficacia schermante in funzione della frequenza, a causa dell'elevato numero di parametri in gioco: le proprietà elettromagnetiche del materiale di cui è costituito lo schermo, il suo spessore, la distanza dalla sorgente, le caratteristiche di quest'ultima. Alcune considerazioni generali possono essere svolte con riferimento alla Figura 1 ed alla Figura 2, costruite sulla base della procedura sopra delineata e con riferimento alle condizioni specificate nelle rispettive didascalie.

La prima cosa che balza agli occhi è la facilità con cui si possono ottenere elevatissimi valori dell'efficacia schermante SE_{dB} alle frequenze a cui il campo è radiativo (oltre 500 kHz circa, nel caso in esempio), soprattutto con il ferro, avvantaggiato da un elevato valore della permeabilità magnetica, che compensa abbondantemente la minore conducibilità elettrica.

A frequenze più basse, cioè in regime di campo reattivo, si ottengono ancora ottimi valori dell'efficacia schermante solo per il campo elettrico, mentre il campo magnetico risulta più difficile da schermare.

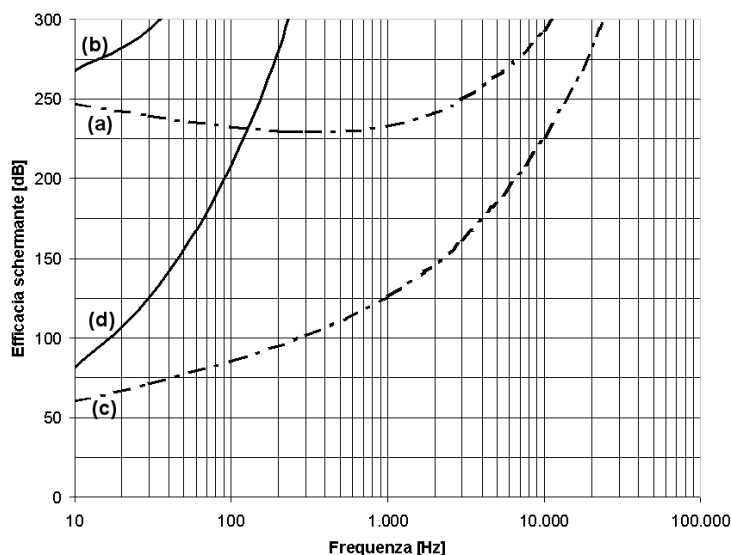


Figura 2 – Efficacia schermante di una lastra di rame (linee (a) e (c)) e di ferro (linee (b) e (d)) in funzione della frequenza da 10 Hz a 100 kHz. La lastra ha uno spessore di 1 cm e si trova a 100 m da una sorgente di campo elettrico (linee (a) e (b)) o di campo magnetico (linee (c) e (d))

6. Degradazione dell'efficacia schermante dovuta alle aperture

L'efficacia schermante di uno schermo **ideale** è, in molti casi, estremamente elevata, con valori che sembrerebbero in grado di consentire la soluzione della stragrande maggioranza dei problemi di schermatura. In realtà, quei valori devono essere interpretati come indicativi delle proprietà schermanti del **materiale** in sé, piuttosto che dei **manufatti** realizzati con esso. La situazione diviene infatti assai meno ottimistica quando si passi a considerare le situazioni **reali**, in cui non si ha più a che fare con lastre indefinitamente estese, ma piuttosto con **contenitori** dotati di **aperture**.

Esistono effetti, come le *risonanze dimensionali*, che peggiorano l'efficacia schermante di un contenitore – anche ermeticamente chiuso – rispetto a quella di uno schermo ideale. Ma la degradazione di gran lunga maggiore proviene dalla necessità di praticare nei contenitori delle aperture, come per esempio le porte e le finestre nelle stanze delle abitazioni. Schematizzando il problema, le *aperture* costituiscono infatti dei passaggi attraverso i quali il campo elettromagnetico può attraversare uno schermo metallico, provocando così una riduzione dell'efficacia schermante, la cui entità dipende principalmente dalle dimensioni dell'apertura rispetto alla lunghezza d'onda.

Ogni apertura può essere caratterizzata quantitativamente da una figura di merito, comunemente denominata **perdita dell'apertura**, per la quale useremo il simbolo L_{dB} (ricorrendo, al solito, alla formulazione logaritmica in decibel); si richiama l'attenzione sul fatto che ad un valore *minore* del fattore L_{dB} corrisponde una *perdita maggiore* e quindi un *peggioramento più marcato* della schermatura. Sotto ipotesi semplificatrici e cautelative, è possibile far vedere che l'efficacia schermante $SE_{dB}^{(a)}$ comprensiva dell'effetto di n aperture, ciascuna caratterizzata da una perdita $L_{dB}^{(i)}$, può essere calcolata da quella iniziale SE_{dB} del solo schermo con la relazione seguente:

$$SE_{dB}^{(a)} = -20 \log_{10} \left(10^{-\frac{SE_{dB}}{20}} + \sum_{i=1}^n 10^{-\frac{L_{dB}^{(i)}}{20}} \right) \quad (13)$$

L'espressione (13) è interessante perché mostra come l'efficacia schermante complessiva sia pesantemente condizionata dai meccanismi di perdita, cioè dalle aperture. Anzi, in molti casi, è la peggiore tra le aperture (quella, cioè, caratterizzata dal più basso valore del parametro L_{dB}) che determina di fatto l'efficacia schermante finale di uno schermo.

6.1 Valutazione della perdita di una apertura

Consideriamo innanzitutto una apertura **rettangolare** di dimensioni $W \times S$, con $W \geq S$. La perdita di schermatura da essa provocata dipende dalla direzione di polarizzazione del campo elettrico; poiché, in genere, questa direzione non è nota, occorre cautelativamente riferirsi al caso peggiore, che ha luogo quando il lato lungo W è diretto ortogonalmente al campo elettrico. Qualitativamente, quello che succede in questo caso, almeno per aperture allungate e piccole rispetto alla lunghezza d'onda, è che le correnti superficiali presenti sullo schermo vengono interrotte dall'apertura e provocano la comparsa di un dipolo elettrico oscillante tra i due bordi vicini della stessa, che irradia (anche) verso l'altra parte dello schermo. Invece, un'apertura allineata parallelamente al campo perturba di meno la distribuzione della corrente sullo schermo e quindi la sua efficacia schermante, come è illustrato in Figura 3.

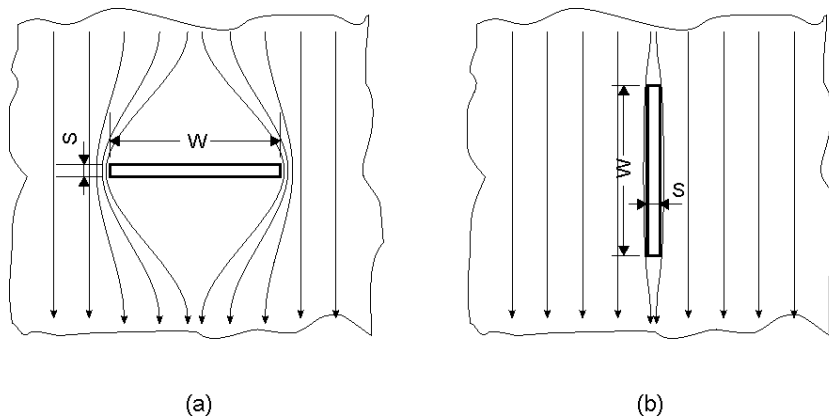


Figura 3 – Rappresentazione qualitativa dell'effetto di un'apertura sulla distribuzione di corrente sulla superficie di uno schermo piano

È possibile costruire un modello analitico che porta a stimare la perdita di una apertura stabilendone un'analogia formale con una linea di trasmissione coplanare "*parallel-plate*"; si giunge ad ottenere l'espressione seguente:

$$L_{dB} = -12.5 \text{ dB} + 10 \log_{10} \left(\frac{\lambda^2}{WS} \right) + C \quad (14)$$

dove il termine correttivo C , in genere di piccola entità, tiene conto di due effetti secondari, denominati rispettivamente "effetto guida d'onda al cut-off" e "effetto ombra". Detto in estrema sintesi, il primo effetto tiene conto dello spessore finito dello schermo in cui è praticata l'apertura e quindi dell'attenuazione subita dal campo nel percorrerla, mentre il secondo si riferisce specificatamente ai contenitori chiusi (non esiste cioè negli schermi piani) ed è dovuto al diagramma di radiazione con cui l'apertura illumina l'interno del contenitore.

Come si vede dall'equazione (14), la qualità della schermatura si degrada sempre di più (cioè il parametro L_{dB} *diminuisce*) al crescere della frequenza; esiste però un limite inferiore a

questo fenomeno, perché si può dimostrare che la perdita L_{dB} di una data apertura non scende al di sotto di un valore minimo espresso da:

$$L_{dB} \geq 6 \log_{10} \left(\frac{W}{S} \right) + C \quad (15)$$

Ad esempio, un'apertura di 10 cm x 1 mm alla frequenza di 10 MHz comporta una perdita L_{dB} il cui termine principale (escluso cioè il fattore correttivo C) vale circa 57 dB. Se essa costituisce l'unico meccanismo di perdita in uno schermo con una SE_{dB} di 75 dB, dall'equazione (13) si trova che l'efficacia schermante complessiva si riduce a 56 dB, cioè in pratica viene determinata quasi totalmente dalla apertura stessa. Essa quindi si degrada sempre più al crescere della frequenza, fino ad un valore minimo di 12 dB, come stabilito dall'equazione (15).

Le considerazioni espone per un'apertura rettangolare si applicano anche ad un'apertura **circolare** di diametro D , purché nella (14) si sostituisca al prodotto WS l'area del cerchio $\pi D^2/4$ e nella (15) si ponga $W = S = D$.

7. Conclusioni parte prima

Si sono introdotte le definizioni ed i concetti fondamentali inerenti le problematiche di schermatura di un campo elettromagnetico. Si è presentato un modello teorico semplificato in grado di descrivere il comportamento di uno schermo metallico piano, di prevederne le proprietà, stimarne l'efficacia schermante e valutare gli effetti delle aperture praticate in esso.

Il modello teorico deve essere considerato come una linea guida per affrontare i passi iniziali necessari a risolvere un problema di riduzione dell'esposizione ad un campo elettromagnetico attraverso l'utilizzo di una schermatura.

PARTE SECONDA: LA RIDUZIONE DEL CAMPO MAGNETICO DEGLI ELETTRODOTTI

L'esigenza di ridurre i livelli di campo magnetico a frequenza industriale (50/60 Hz) generati dagli elettrodotti ad alta tensione è molto sentita perché, a fronte di valori che in prossimità delle linee più impattanti possono superare la *decina* di microtesla, vi sono controverse segnalazioni di possibili rischi già a livelli di pochi *decimi* di microtesla. Non sono quindi rari i casi in cui si vorrebbe disporre di tecniche di contenimento dell'esposizione in grado di abbattere il campo presente in un ambiente residenziale con un'efficacia superiore ai 10 e talvolta anche ai 20 dB.

8. Possibili approcci

Come già rilevato, le tecniche di contenimento dell'esposizione possono essere classificate in tre categorie, che qui riepiloghiamo con particolare riferimento agli elettrodotti.

1. Tecniche che intervengono sulla sorgente, riducendone intrinsecamente l'emissione a parità di caratteristiche nominali (tensione di esercizio e potenza trasportata):
 - a. impiego di sostegni a geometria compatta, con ridotta interdistanza tra i vari conduttori di fase;
 - b. utilizzo di linee in cavo trifase con isolante solido, aereo oppure interrato (nel caso dell'interrato vi è anche un effetto schermante del terreno, che però riguarda solo il campo elettrico);
 - c. adozione di configurazioni di cablaggio *split-phase* tra cui, per citare il caso più semplice, l'impiego di una doppia terna in luogo di una semplice terna.

2. Provvedimenti che sfruttano l'attenuazione del campo con la distanza e quindi puntano ad allontanare i conduttori dell'elettrodotto dai siti sensibili:
 - a. aumento dell'altezza dei sostegni (ovvero innalzamento della linea);
 - b. scelta di un percorso alternativo, che allontani l'elettrodotto dal sito sensibile considerato.
3. Ricorso alle *schermature* propriamente dette, cioè a dispositivi che abbattano il campo a cui è esposta la vittima, senza agire direttamente sull'emissione della sorgente e senza allontanare la vittima da essa:
 - a. schermature tradizionali: necessitano di lastre di materiale ferromagnetico di spessore rilevante e danno luogo quindi ad infrastrutture ingombranti, pesanti, costose e, sovente, di difficile inserimento in ambienti abitativi;
 - b. impiego di circuiti di compensazione attivi o passivi.

Esistono anche tecnologie più avanzate su cui non ci potremo addentrare. Ci limitiamo a fare cenno agli elettrodotti blindati con isolamento a gas, nei quali si trae vantaggio sia dalla compattezza della struttura, sia dall'esistenza di una blindatura metallica.

9. Valutazione dell'efficacia dell'intervento

La disponibilità di uno strumento di valutazione teorica dei livelli di campo attesi è un prerequisito fondamentale per l'analisi e l'applicazione di una tecnica di riduzione dell'esposizione. Uno strumento del genere non solo agevola l'identificazione delle situazioni che richiedono un intervento, ma soprattutto rende possibile valutare preventivamente il grado di efficacia delle diverse soluzioni applicabili, permettendo di scegliere la più adeguata.

Il caso degli elettrodotti ad alta tensione è, sotto questo aspetto, tra i più fortunati, perché il campo magnetico disperso può essere determinato per via teorica con buona precisione, a partire da un insieme di informazioni tecniche di solito ragionevolmente accessibili.

Nella maggior parte dei casi, risultati sufficientemente accurati possono essere ottenuti utilizzando un algoritmo di calcolo basato su un modello bidimensionale della linea elettrica, nel quale l'elettrodotto è assimilato ad un fascio di conduttori rettilinei indefiniti, paralleli tra di loro ed al terreno. Questo modello è codificato in una specifica norma CEI [2] e può essere implementato senza particolari difficoltà con qualunque linguaggio di programmazione, o anche semplicemente con un comune *spreadsheet* elettronico. L'algoritmo in questione si trova anche descritto in dettaglio nel manuale del programma CAMPI sviluppato all'IFAC-CNR [3], col quale sono state realizzate le valutazioni presentate nel prossimo paragrafo.

10. Analisi di alcune delle metodiche disponibili

Presentiamo adesso un approfondimento di alcune delle metodiche sopra citate.

10.1 Utilizzo di sostegni compatti

Il campo magnetico generato da un elettrodotto dipende in maniera sensibile dalle mutue distanze tra i vari conduttori che costituiscono la linea, cosicché l'adozione di sostegni "compatti", che tendono a ridurre per quanto possibile quelle distanze, comporta una marcata riduzione dell'intensità del campo in tutti i punti circostanti l'elettrodotto, anche e soprattutto ad una certa distanza da esso.

10.2 Interramento

L'interramento di un tratto di linea comporta una riduzione pressoché totale del campo elettrico, grazie all'azione schermante operata dal terreno; questo infatti, a differenza dell'aria (assimilabile ad un isolante), si comporta come un buon conduttore elettrico.

Quello che però maggiormente ci interessa in questa sede è la maggior compattezza (ovvero la minore interdistanza mutua tra i vari conduttori) di un elettrodotto interrato rispetto alla configurazione aerea, resa possibile dall'utilizzo di materiali isolanti caratterizzati da una rigidità dielettrica migliore di quella dell'aria.

La compattezza della struttura determina una rapida attenuazione dell'intensità del campo magnetico all'aumentare della distanza dalla linea. Di conseguenza, mentre nelle immediate vicinanze di una linea interrata ci si devono aspettare valori dello stesso ordine di grandezza di quelli riscontrabili sotto una linea aerea di caratteristiche corrispondenti, non appena ci si allontani anche di pochi metri dalla linea interrata i valori attesi decadono assai rapidamente a livelli che, per la linea aerea, richiederebbero distanze di molte decine di metri.

Questo è ben visibile in Figura 4, dove vengono riportati i profili laterali ad 1 metro dal suolo dell'induzione magnetica generata da un elettrodotto semplice terna 132 kV/450 A di tipo aereo con sostegni standard a traliccio e di tipo interrato a trifoglio; nel primo caso il conduttore più basso si trova ad una altezza di 18 metri dal suolo, nel secondo il centro del trifoglio è interrato ad una profondità di circa 1.5 metri.

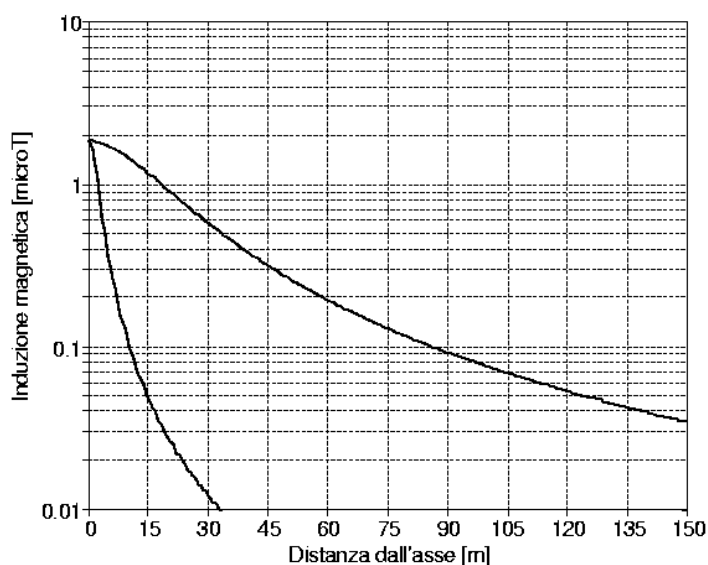


Figura 4 – Profilo laterale dell'induzione magnetica ad 1 metro dal suolo, generata da un elettrodotto semplice terna 132 kV/450 A; curva superiore: linea aerea con sostegni standard a traliccio e conduttore più basso posto a 18 metri dal suolo; curva inferiore: linea interrata a trifoglio con il centro del trifoglio posto ad una profondità di circa 1.5 metri

10.3 La tecnica "split-phase"

Una delle tecniche più efficaci per abbattere il campo magnetico generato da un elettrodotto è quella nota col termine *split-phase*, che consiste nel ripartire tra due o più

conduttori la corrente trasportata da un singolo conduttore di fase, così da avere correnti minori su ciascun conduttore e contemporaneamente poter scegliere la configurazione di cablaggio in modo da ottenere la massima cancellazione tra i contributi dei conduttori stessi al campo totale.

Una forma minimale di questa tecnica può consistere nel convertire a doppia terna ottimizzata una tratta a semplice terna, a parità di tensione e di potenza trasportata.

La Figura 5 illustra il risultato della sostituzione di una tratta a semplice terna da 380 kV/1 MW (corrente 1500 A) con una a doppia terna ottimizzata di uguale tensione e potenza (la corrente scende quindi a 750 A); come al solito, in figura viene riportato il profilo laterale dell'induzione magnetica ad 1 metro dal suolo. In entrambi i casi, si fa riferimento ai sostegni standard a traliccio e ad una altezza minima dei conduttori di 25 metri dal suolo.

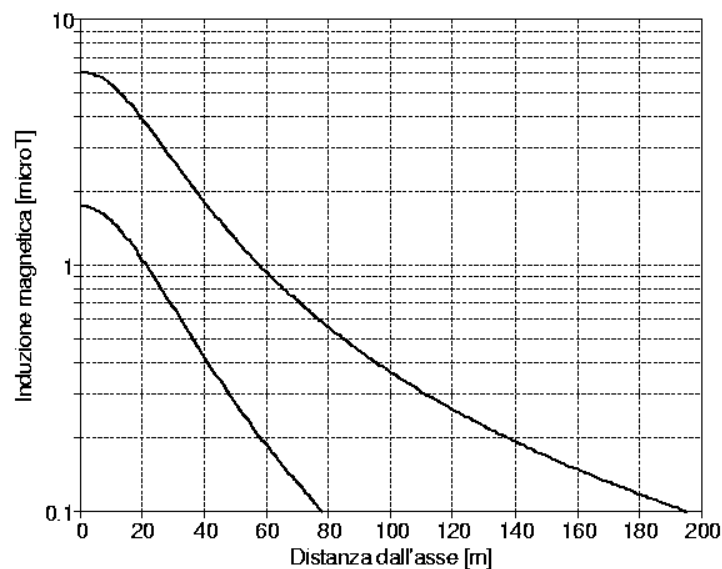


Figura 5 – Profilo laterale dell'induzione magnetica ad 1 metro dal suolo, generata da linee a 380 kV/1 MW con sostegni standard a traliccio e conduttore più basso posto a 25 metri dal suolo; curva superiore: linea a semplice terna (corrente 1500 A); curva inferiore: linea a doppia terna ottimizzata (corrente 750 A)

10.4 Innalzamento dei sostegni

In linea di massima, aumentare l'altezza dei sostegni significa allontanare i conduttori dai siti sensibili e quindi ridurre il campo valutato in tali punti. Occorre però una precisazione. Il metodo risulta abbastanza efficace per abbattere i valori riscontrabili direttamente al di sotto di un elettrodotto o nelle sue immediate vicinanze (al massimo alcune decine di metri), mentre è assai poco efficace per ridurre i valori ad una certa distanza (oltre un centinaio di metri). Questo comportamento è ben documentato in Figura 6, che mostra il profilo laterale dell'induzione magnetica ad 1 metro dal suolo, generata da un elettrodotto semplice terna 380 kV/1500 A con sostegni standard a traliccio; in figura, si confronta la situazione in cui il conduttore più basso si trova a 15 metri dal suolo con quella in cui l'altezza minima dal suolo è di 35 metri.

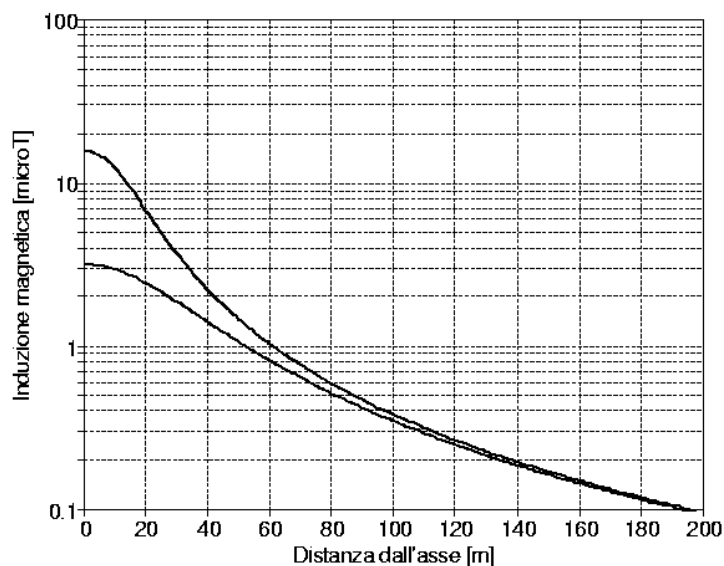


Figura 6 – Profilo laterale dell'induzione magnetica ad 1 metro dal suolo, generata da un elettrodotto semplice terna 380 kV/1500 A con sostegni standard a traliccio; curva superiore: conduttore più basso a 15 metri dal suolo; curva inferiore: conduttore più basso a 35 metri dal suolo

10.5 Alternative di tracciato

La scelta di un percorso alternativo può rappresentare in alcuni casi una possibilità per ridurre il campo magnetico presente in un sito sensibile, qualora l'alternativa permetta di aumentare la distanza di tale sito dall'elettrodotto sorgente del campo. Come indicazione di massima, potrà essere utile ricordare che il campo magnetico a grande distanza da un elettrodotto ("grande" rispetto alla mutua distanza tra i conduttori della linea) è con buona approssimazione inversamente proporzionale al quadrato della distanza stessa.

A proposito delle alternative, occorre tenere ben presenti le considerazioni che seguono, nel caso in cui ci si ponga come obiettivo finale la riduzione del rischio cancerogeno ipoteticamente associato all'esposizione al campo magnetico.

Se ammettiamo che il campo magnetico possa effettivamente avere un ruolo nello sviluppo di alcuni tipi di tumori allora, secondo molti pareri autorevoli, si deve prendere in considerazione l'eventualità che questo effetto **non abbia una soglia**, ma esista invece un aumento di rischio proporzionale al livello di esposizione. Secondo questa ipotesi, valori comunque bassi potrebbero avere un rilievo sanitario, specialmente se associati alla esposizione di una popolazione numerosa. In altre parole, l'impatto sanitario complessivo verrebbe a dipendere non solo dal livello di campo, ma anche dalla numerosità del campione di popolazione esposto a quel livello. In questa situazione, lo spostamento di una linea mirato a ricondurre al di sotto di un valore prefissato (per esempio 0,4 μT) il valore di campo atteso in un sito isolato potrebbe comportare un aumento, anziché una diminuzione, dell'impatto sanitario complessivo qualora, avvicinando per esempio la linea ad un agglomerato di edifici, si provochi un (piccolo) aumento dell'esposizione di un numero elevato di individui, pur se l'esposizione stessa resta ovunque inferiore al valore limite prefissato. Naturalmente, questa considerazione cessa di avere rilievo se si accetta l'esistenza

di una soglia al di sotto della quale il rischio si azzerava: a questo proposito, va ricordato il pronunciamento dello IARC (*International Agency for Research on Cancer*) del giugno 2001, secondo il quale “*Children who are exposed to residential ELF magnetic fields less than 0.4 microTesla have no increased risk for leukaemia*”.

10.6 Schermatura del campo magnetico a frequenza industriale mediante circuiti di compensazione³

Una metodica di riduzione del campo magnetico generato da un elettrodotto, che a tutti gli effetti può essere considerata una *schermatura*, seppure non convenzionale, è la tecnica basata sull'impiego dei cosiddetti **circuiti di compensazione**.

Il concetto di base è semplice: si posiziona nella regione in cui si vuole ridurre il campo un conduttore che formi un circuito chiuso e si fa scorrere in esso una corrente alternata a 50 Hz, in modo che il campo magnetico da essa generato cancelli il più possibile il campo generato dall'elettrodotto da schermare.

A differenza delle schermature realizzate mediante lastre e contenitori, la grande accuratezza con cui è possibile determinare il campo magnetico generato da un insieme di conduttori, unita alla bassa influenza che hanno su di esso gli edifici ed altri oggetti, rende possibile caratterizzare compiutamente un circuito di compensazione dal punto di vista teorico, oppure predeterminarne con grande precisione le prestazioni in fase di progetto. A questo scopo, esistono appositi strumenti software, che permettono di ottimizzare i numerosi parametri in gioco ai fini della minimizzazione del campo nell'area occupata dalla *vittima*.

La tecnica prevede due varianti concettualmente distinte: l'impiego di circuiti di compensazione **attivi** – nei quali un apposito generatore si occupa di mantenere la giusta corrente nel circuito schermante – oppure di circuiti **passivi**, dove la corrente nel circuito viene generata per induzione elettromagnetica proprio dal flusso di campo magnetico che si desidera schermare. In quest'ultimo caso, si trae vantaggio dalla legge di Lenz che, come è noto, stabilisce che il campo magnetico generato dalla corrente indotta tende a cancellare il campo primario che l'ha generata.

Entrambe le varianti presentano vantaggi e svantaggi. Nel caso dei circuiti *passivi*, si ha un margine di manovra limitato per il controllo della corrente, potendosi agire solo sull'impedenza del circuito stesso. Con i circuiti *attivi*, è invece possibile agire anche sul generatore di alimentazione. Questi ultimi consentono quindi, almeno in teoria, di ottenere risultati migliori, a fronte però di una maggior complessità ed onerosità del sistema.

Le soluzioni basate sui circuiti di compensazione presentano sempre un certo impatto, sia economico sia visivo. Entrambi possono essere limitati integrando le **funi di guardia** nel circuito e diminuendo quindi il numero dei *nuovi* conduttori da inserire nel sistema. L'impatto visivo (ma non quello economico) può essere limitato anche **interrando** parte del circuito di compensazione. In ogni caso, questi accorgimenti penalizzano ovviamente le possibilità di ottimizzazione legate al posizionamento dei conduttori.

La principale difficoltà che si incontra con i circuiti di compensazione risiede nel fatto che, mentre il campo generato dalla linea ha una polarizzazione **ellittica**, quello generato dal circuito di compensazione ha invece polarizzazione **lineare** ed è quindi in grado di annullare

³ Questo paragrafo è la sintesi di un paragrafo del capitolo “La schermatura dei campi elettromagnetici”, di D.Andreuccetti e C.Riminesi, in “La schermatura dei campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici: principi generali, aspetti teorici e applicazioni pratiche”, Franco Angeli Editore Milano 2006, a cura di Paolo Bevitori.

solo in parte e solo in modo localizzato il campo primario. Per questo motivo, difficilmente con un circuito di compensazione si possono raggiungere valori di efficacia schermante superiori a 20 dB e, in ogni caso, solo in aree molto limitate. Più facilmente, o in aree più estese, si possono ottenere valori fino a 10 dB.

11. Conclusioni parte seconda

Esistono diversi provvedimenti tecnici in grado di ridurre il livello del campo magnetico generato da un elettrodotto. L'innalzamento dei sostegni, l'individuazione di percorsi alternativi e l'interramento rappresentano alcune delle opzioni disponibili, sebbene comportino numerosi problemi di varia natura; possibilità interessanti e per alcuni versi meno problematiche consistono nell'adozione di sostegni a geometria compatta e nella trasformazione a doppia terna di tratte a semplice terna; buoni risultati in casi particolari possono essere ottenuti con l'adozione di circuiti di compensazione attivi o passivi.

Per lo svolgimento dell'attività di controllo, di identificazione dei siti che richiedono interventi e soprattutto di verifica preventiva dell'efficacia delle varie soluzioni disponibili, risulta di grande aiuto la disponibilità di uno strumento di valutazione teorica del campo magnetico generato da un elettrodotto. Una specifica norma CEI, la 211-4 [2], descrive un algoritmo di semplice implementazione in grado di fornire risultati adeguati all'impiego in applicazioni di questo tipo.

In ogni caso, una volta che si siano definiti i criteri per decidere in quali casi intervenire e si siano quindi evidenziati i siti dove è richiesto un intervento, occorre la collaborazione del gestore delle infrastrutture per stabilire quale provvedimento tecnico sia più adatto a ciascuna situazione contingente. Chi ha l'onere del controllo potrà successivamente farsi carico di ulteriori valutazioni per accertare l'efficacia dell'intervento e l'entità del beneficio conseguito.

12. Bibliografia

1. J.D.Kraus: "Electromagnetics", McGraw-Hill International Student Edition, Singapore 1984.
2. CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano): "Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche", Norma CEI 211-4, Milano, 1996.
3. D.Andreuccetti: "Manuale del programma CAMPI per il calcolo del campo elettrico e dell'induzione magnetica generati da linee elettriche versione 4.1", CNR - Istituto di Fisica Applicata «Nello Carrara», Firenze, maggio 2002, <http://www.ifac.cnr.it/pcemni/manuale.pdf>.
4. AA.VV.: "La schermatura dei campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici: principi generali, aspetti teorici e applicazioni pratiche", Franco Angeli Editore Milano 2006, a cura di Paolo Bevitori.