



3  
Università degli studi di Pavia  
Facoltà di Medicina

Corso di Laurea Triennale per

# **Tecnico della Prevenzione nell'Ambiente e nei Luoghi di Lavoro**

Insegnamento di *Campi Elettromagnetici*  
(Prof. Luca Perregrini)

Campi elettromagnetici:  
rischio, normativa, misura, riduzione a  
conformità

# Argomenti della lezione

---

- Rischio connesso alla diffusione dei campi elettromagnetici
- Normativa vigente
- Misura dei campi elettromagnetici
- Studi sul rischio elettromagnetico
- Riduzione rischio (prevenzione a livello di progetto o modifiche a posteriori): caso ELF

# Rischio

Problematiche diverse per diversi valori della frequenza:

ELF (Extremely Low Frequency): campi elettrici e magnetici oscillanti a frequenze inferiori a 300 Hz, (tipicamente a 50 Hz associate alla produzione, trasmissione ed uso dell'energia elettrica). Esposizione della popolazione prevalentemente a causa della presenza di elettrodotti, motori elettrici, trasformatori.

RF-MO (Radio Frequenza-Micro Onde): campi elettromagnetici caratterizzati da frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz (RF tra 100 kHz e 300 MHz, MO tra 300 MHz e 300 GHz). Esposizione della popolazione a causa degli impianti per telefonia cellulare, radio e tele diffusione, elettrodomestici, ecc.

# Rischio

---

Si distingue tra due diversi effetti:

effetti acuti o a breve termine: di solito dovuti a fenomeni di riscaldamento. Si prevengono imponendo limitazioni ai campi (o alle potenze) alle quali un soggetto può essere esposto

effetti a lungo termine: sviluppo di neoplasie (leucemia, cancro) o altro (?). Come contromisura si individuano e si adottano valori di cautela.

# Normativa

---

Limite di esposizione: valore che non deve essere MAI superato

Misura di cautela: valore che non deve essere superato in corrispondenza di edifici adibiti a permanenza superiore alle 4 ore e relative pertinenze

Obiettivo di qualità: valori da conseguire nel breve, medio e lungo periodo usando tecnologie e metodiche di risanamento disponibili al fine di minimizzare l'esposizione della popolazione. Fase di progettazione e realizzazione nonché adeguamento di quelli preesistenti, compatibilmente con la qualità del servizio svolto.

# Normativa

DPCM 8 luglio 2003 (GU n. 200 del 29-8-2003)

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.

Tipologia di esposizione	Campo elettrico (kV/m)	Induzione magnetica ( $\mu$ T)
Limiti massimi	5	100
Misura cautelare (aree gioco per l'infanzia, ambienti abitativi, ambienti scolastici e luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore giornaliere)		10 (media su 24 ore)
Obiettivi di qualità (nuove installazioni)		3 (media su 24 ore)

# Normativa

DPCM 8 luglio 2003 (GU n. 199 del 28-8-2003)

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.

Tipologia di esposizione	Frequenze (MHz)	Campo elettrico (V/m)	Campo magnetico (A/m)	Densità di potenza (W/m <sup>2</sup> )
Limiti massimi	0.1 – 3	60	0.2	1 4
	3 – 3000	20	0.05	
	3000 – 300000	40	0.01	
Valori di attenzione	0.1– 300000	6	0.016	0.1 (3 MHz – 300 GHz)
Obiettivi di qualità	0.1– 300000	6	0.016	0.1 (3 MHz – 300 GHz)

# Normativa

## Siti Internet dei maggiori enti normativi

Organizzazione	Sito Internet
American National Standard Institute	<a href="http://www.ansi.org">www.ansi.org</a>
Bioelectromagnetics Society	<a href="http://www.bioelectromagnetics.org">www.bioelectromagnetics.org</a>
European Bioelectromagnetics Association	<a href="http://www.ebea.org">www.ebea.org</a>
Federal Communications Commission	<a href="http://www.fcc.gov/oet/rfsafety">www.fcc.gov/oet/rfsafety</a>
International Comit for NIR Protection	<a href="http://www.icnirp.de">www.icnirp.de</a>
Institute of Electrical and Electronics Eng	<a href="http://www.ieee.org">www.ieee.org</a>
CENELEC	<a href="http://www.cenelec.it">www.cenelec.it</a>

# Normativa

## Limiti di base ICNIRP per i lavoratori

SAR mediato su tutto il corpo	SAR localizzato (Testa e tronco)	SAR localizzato (arti)
[W/Kg]	[W/Kg]	[W/Kg]
0.4	10	20

## Limiti di base ICNIRP per la popolazione comune

SAR mediato su tutto il corpo	SAR localizzato (Testa e tronco)	SAR localizzato (arti)
[W/Kg]	[W/Kg]	[W/Kg]
0.08	2	4

SAR: Specific Absorbation Rate

# Normativa

## Limiti di base per l'unione Europea

Valori si SAR	[W/Kg]
SAR mediato su tutto il corpo	0.08
SAR mediato su un cubo di 10g di massa (testa, tronco)	2.0
SAR mediato su un cubo di 10 g di massa (arti)	4.0

# Misura dei campi elettromagnetici

Il tipo di strumentazione e la metodologia da utilizzare nelle misure dei campi elettromagnetici si differenzia in relazione a:

- tipologia e all'eventuale molteplicità delle sorgenti
- caratteristiche del campo emesso dalla/e sorgenti (frequenza, tipo di modulazione, polarizzazione)
- caratteristiche del campo nel punto di misura (campo di dispersione, di induzione, di radiazione, vicino, lontano)
- obiettivo delle misure (sorveglianza, indagine sistematica, analisi puntuale, interventi di bonifica)

**MISURE DI ESPOSIZIONE:** servono a valutare le grandezze che caratterizzano il campo elettromagnetico cui l'organismo è esposto.

Intervallo di frequenze di interesse:  
100 kHz – 300 GHz

**MISURE DOSIMETRICHE:** servono a valutare l'energia assorbita dall'organismo umano esposto e a determinare la distribuzione dei campi all'interno dello stesso.

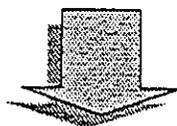
# Misura dei campi elettromagnetici

## MISURE DI ESPOSIZIONE

- Misure dell'intensità del campo elettrico  $E$  [V/m]
- Misure dell'intensità del campo magnetico  $H$  [A/m]
- Misure della densità di potenza  $S$  [W/m<sup>2</sup>]

E' necessario:

- conoscere in modo approfondito le caratteristiche degli strumenti di misura, il tipo di sensore utilizzato, il principio su cui si basa la misura;
- considerare qualsiasi effetto sulla misura.



E' possibile valutare se le misure debbano essere eseguite a banda stretta o a banda larga e se i valori significativi della grandezza misurata siano il valore efficace, il valore di picco o entrambi.

# Misura dei campi elettromagnetici

## STRUMENTAZIONE UTILIZZATA PER LA MISURA DEI CAMPI ELETTROMAGNETICI

Le misure di esposizione ai campi elettromagnetici possono essere effettuate secondo le seguenti modalità:

- a. Misure a “**banda larga**” (broadband) – nella banda di misura dello strumento entrano più righe dello spettro di frequenza del segnale. Gli strumenti a banda larga hanno, entro un certo intervallo, una sensibilità indipendente dalla frequenza e danno l’indicazione del campo senza dare informazioni sulla frequenza stessa.
- b. Misure a “**banda stretta**” (narrowband) – lo strumento è in grado di effettuare una misura separata per ogni riga dello spettro di frequenza del segnale. Gli strumenti a banda stretta possono essere sintonizzati su una frequenza selezionata e forniscono l’intensità del campo corrispondente alla stessa.

# Misura dei campi elettromagnetici

## STRUMENTAZIONE UTILIZZATA PER LA MISURA DEI CAMPI ELETTROMAGNETICI

Nel campo di frequenze 10 kHz – 300 GHz gli strumenti per la misura dei campi elettromagnetici si suddividono in :

- misuratori diretti del campo E o H;
- misuratori della temperatura.

Componenti basilari degli strumenti di misura sono:

- la sonda (sensore e trasduttore);
- i cavi di collegamento tra la sonda e l'unità di elaborazione e lettura;
- l'unità di elaborazione e lettura.

# Misura dei campi elettromagnetici

## STRUMENTAZIONE PER LA MISURA A LARGA BANDA

### TIPOLOGIE DEGLI STRUMENTI A BANDA LARGA

E' possibile operare la seguente classificazione degli strumenti a banda larga sulla base del tipo di trasduttore (rivelatore) utilizzato:

- a diodo;
- a bolometro;
- a termocoppia.

Tali strumenti possono essere utilizzati in entrambe le situazioni di campo vicino e campo lontano.

I sensori possono essere:

- isotropici
- non isotropici.

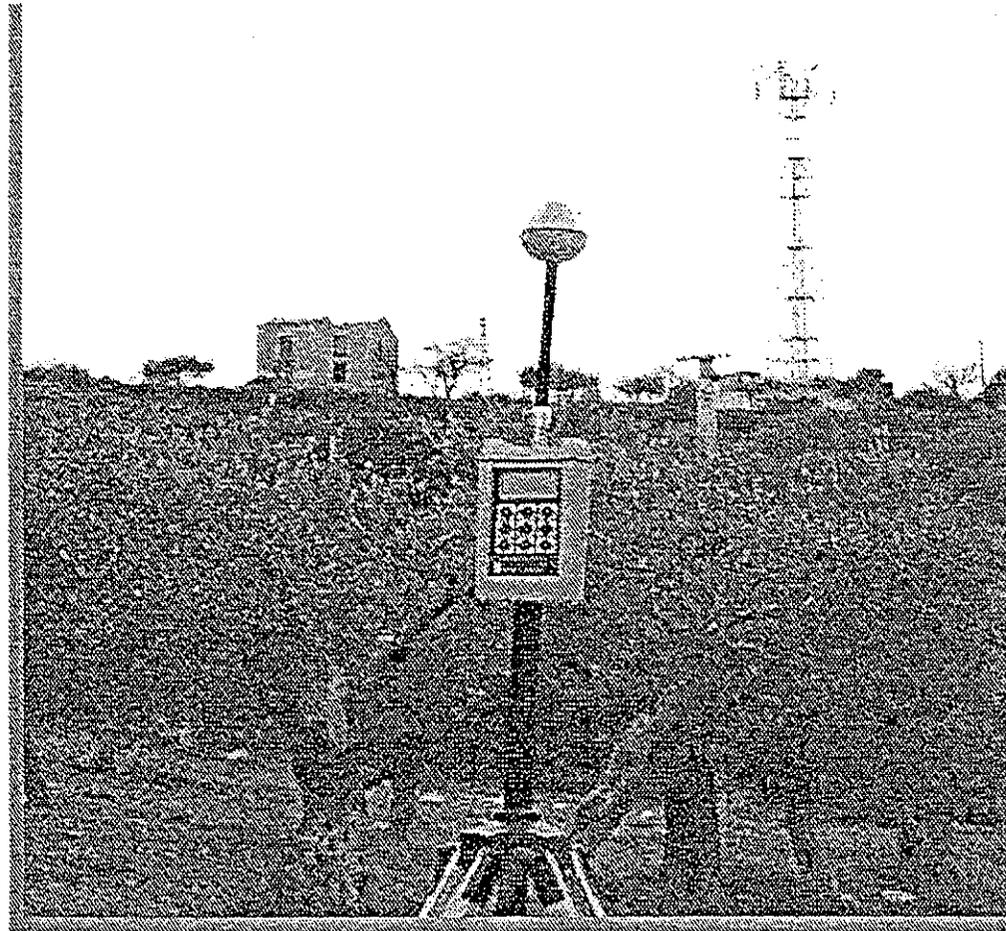
# Misura dei campi elettromagnetici

## STRUMENTAZIONE PER LA MISURA A LARGA BANDA

	Caratteristiche	Vantaggi	Svantaggi
<b>Strumenti a diodo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• risposta quadratica per piccoli segnali,</li> <li>• risposta lineare per segnali medi,</li> <li>• saturazione per segnali elevati,</li> <li>• rottura delle giunzioni per segnali estremamente elevati</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• alta sensibilità</li> <li>• ampia dinamica</li> <li>• elevato sovraccarico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• elevato errore di misura nell'uso per segnali radar pulsati e segnali multipli ad alti livelli</li> <li>• sensibilità alla temperatura</li> </ul>
<b>Strumenti a bolometro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• misurano l'innalzamento della temperatura di un termistore dovuto alla cessione di energia da parte del campo a RF</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• elevato livello di sovraccarico dovuto alla auto protezione dei termistori</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• deriva della lettura dello zero</li> <li>• deriva della sensibilità causate dalle variazioni della temperatura ambientale</li> </ul>
<b>Strumenti a termocoppia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• utilizzo di termocoppie a "film sottile" come elemento di rivelazione</li> <li>• risposta quadratica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• variazioni della temperatura ambientale ininfluenti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• possibilità di misura di campi di modesta entità</li> </ul>
<b>Sensori isotropici</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• misurano nel punto in esame la risultante del campo come radice quadrata della somma delle tre componenti nello spazio.</li> </ul> <p>Ad es.</p> $E = \sqrt{(E_x^2 + E_y^2 + E_z^2)}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• permettono di misurare diretta del valore massimo del campo globale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• non possono essere usati se si vuole conoscere il valore di una singola componente del campo in un punto dello spazio</li> </ul>
<b>Sensori non isotropici</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• danno informazioni sull'intensità del campo in funzione della direzione di orientamento del sensore</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• permettono di misurare le singole componenti del campo e di determinarne la polarizzazione</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• non è garantita l'unicità del punto di misura quando si vuole determinare il valore del campo globale</li> </ul>

# Misura dei campi elettromagnetici

## STRUMENTAZIONE PER LA MISURA A LARGA BANDA



# Misura dei campi elettromagnetici

## STRUMENTAZIONE PER LA MISURA A BANDA STRETTA

Nelle misure a banda stretta si utilizza la seguente strumentazione:

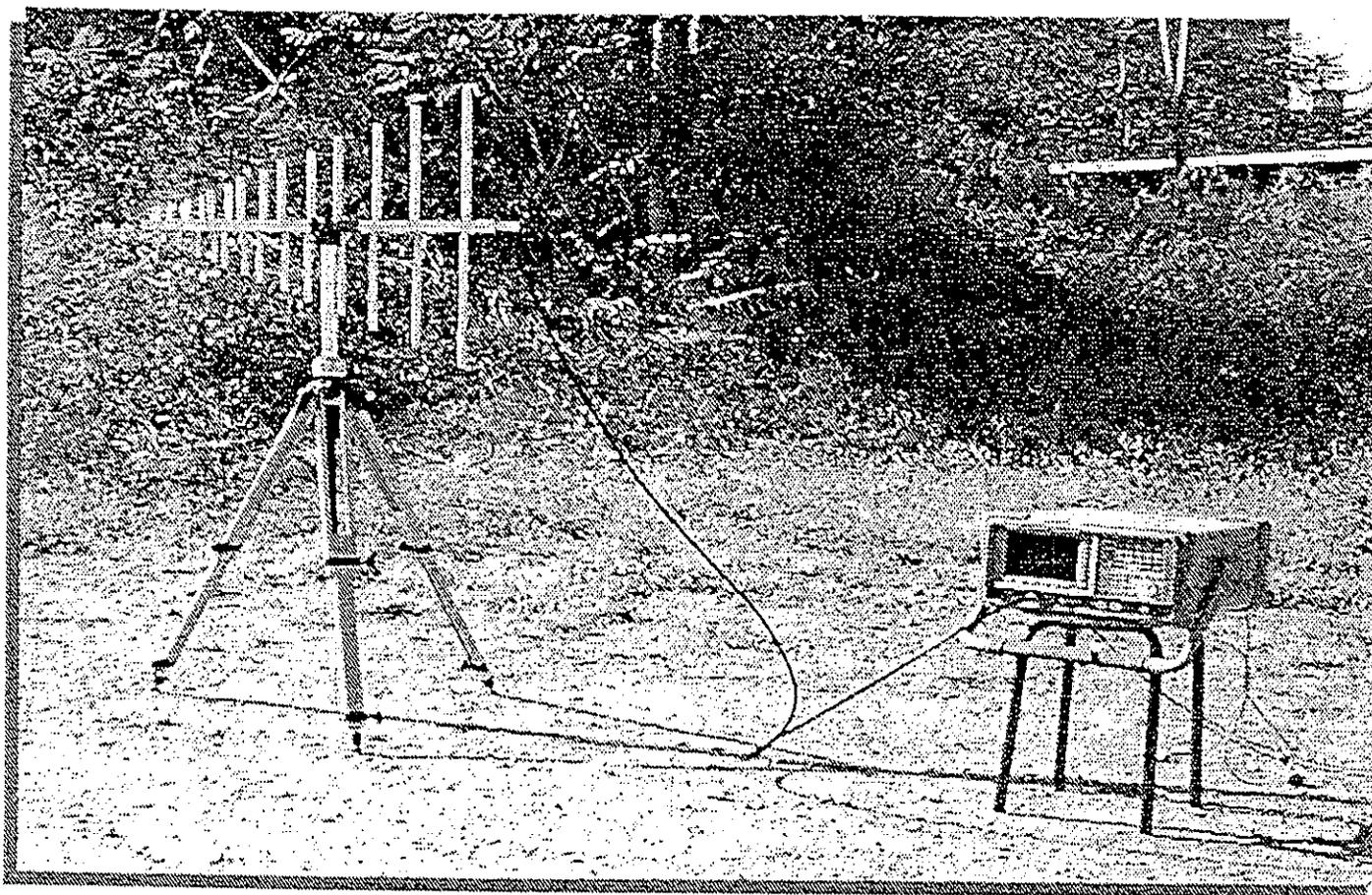
- antenna;
- cavi di collegamento;
- **analizzatore di spettro** (che visualizza lo spettro di frequenza della radiazione rilevata dall'antenna) o **ricevitore selettivo** (che, attraverso un circuito a sintonia, visualizza il segnale di tensione proveniente dall'antenne ad una selezionata frequenza).

Ai fini della riproducibilità delle misure a banda stretta degli strumenti di cui sopra dovranno essere documentati:

- il campo di frequenza coperto;
- la larghezza di banda a frequenza intermedia;
- l'attenuazione in ingresso;
- il tempo di spazzolamento;
- il tipo di antenna.

# Misura dei campi elettromagnetici

## STRUMENTAZIONE PER LA MISURA A BANDA STRETTA



# Misura dei campi elettromagnetici

## INCERTEZZA NELLA MISURA DEI CAMPI ELETTROMAGNETICI

Ciascuno dei componenti dei sistemi di misura introduce un proprio contributo all'incertezza di misura complessiva.

E' necessario pertanto che, dato il sistema di misura, siano note le seguenti informazioni:

- larghezza di banda dello strumento;
- errore risultante introdotto dal sensore o dalle antenne usate;
- errore risultante dal posizionamento dell'antenna;
- attenuazione, in funzione della frequenza, dovuta ai cavi e ai connettori;
- errori di calcolo.

# Misura dei campi elettromagnetici

---

## INCERTEZZA NELLA MISURA DEI CAMPI ELETTROMAGNETICI

Tra le principali condizioni costruttive ed operative degli strumenti che possono condurre ad incertezze di misura si hanno:

- sonde per la misura di un tipo di campo sensibili all'altro;
- accoppiamento dei cavi di collegamento al campo;
- accoppiamento tra sonda e corpi conduttori;
- effetto termoelettrico sui cavi di collegamento;
- effetti dei campi statici e quasi statici;
- risposte fuori banda;
- errori sistematici dipendenti dal buon funzionamento e dalla qualità del misuratore di campo.

# Misura dei campi elettromagnetici

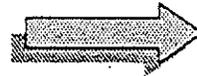
## INCERTEZZA NELLA MISURA DEI CAMPI ELETTROMAGNETICI

accoppiamento dei cavi di collegamento al campo



A frequenze inferiori a 1 MHz i cavi di collegamento possono comportarsi da elementi captanti e fornire un segnale RF all'unità di lettura causando una lettura più elevata del valore reale

accoppiamento tra sonda e corpi conduttori



In prossimità di elementi metallici si può verificare un accoppiamento diretto con gli elementi della sonda dovuto a campi a bassa frequenza (50-60 Hz)

effetto termoelettrico sui cavi di collegamento



Per effetto di differenze di resistenza lungo i cavi di collegamento si possono manifestare variazioni di potenza dissipata, dunque variazioni di temperatura che generano una quantità di tensione termoelettrica

# Misura dei campi elettromagnetici

## INCERTEZZA NELLA MISURA DEI CAMPI ELETTRROMAGNETICI

effetti dei campi statici e quasi statici



Ogni movimento della sonda o dell'unità di lettura all'interno di un campo statico può indurre una tensione che può aumentare o diminuire la lettura dello strumento.

risposte fuori banda



Le sonde sono sensibili ai campi al di fuori della loro banda di misura in modo diverso a seconda della loro natura.

errori sistematici



Esempi: non perfetta isotropicità del sensore, taratura non accurata degli strumenti, etc.

# Misura dei campi elettromagnetici

---

## PROVVEDIMENTI ATTI A RIDURRE L'INCERTEZZA

### MINIMIZZAZIONE DELLE FONTI DI IMPRECISIONE

Le imprecisioni si possono controllare mediante:

- **la procedura di misura** – l'impiego di metodi statistici aiuta a minimizzare le incertezze.
- **la procedura di utilizzo dello strumento**

# Misura dei campi elettromagnetici

## PROVVEDIMENTI ATTI A RIDURRE L'INCERTEZZA

Fonte di imprecisione	Procedura per riduzione	Note
Anisotropicità dei sensori	Orientare il sensore secondo il massimo livello ricevuto	
Sostegno del sensore	Porre l'asta del sostegno del sensore inclinata rispetto alla polarizzazione nota	Possibilmente porre l'asta ortogonale alla polarizzazione
Cavo di connessione sensore-strumento indicatore	I cavi devono essere posti ortogonali alla polarizzazione del campo	Per evitare tale problema usare cavi in fibra
Troppo ampia risposta in frequenza	Lo strumento deve essere usato nel corretto campo di frequenza	Assicurarsi che in questo campo di frequenza lo strumento fornisca risultati affidabili
Perturbazioni indipendenti dalla sorgente	Posizionare il sensore lontano dall'operatore e distanti da oggetti metallici	Installare il sensore su di un sostegno isolante ed effettuare la lettura a distanza tramite collegamento in fibra ottica
Livelli di campo emessi dalla sorgente estremamente variabili	Per caratterizzare la sorgente adeguatamente le misure devono essere fatte in numero e in un tempo significativo	Attualmente tutti gli strumenti consentono questa pratica
Risposta fuori dalla banda del sensore	Verificare sempre l'esistenza di sorgenti fuori dalla banda di funzionamento del sensore	Verificare sul manuale, se fornita, anche la risposta del sensore fuori dalla banda di funzionamento

# Misura dei campi elettromagnetici

## DOSIMETRIA

Nel campo di frequenze tra 1 MHz e 6 GHz, bande usate nella telefonia mobile, la grandezza dosimetrica comunemente usata per quantificare i livelli di esposizione a campi elettromagnetici è il SAR (Specific Absorbation Rate ovvero tasso di assorbimento specifico). Il SAR è definito come la velocità di assorbimento/dissipazione, ossia la derivata rispetto al tempo dell'incremento  $dW$  di energia dissipata/assorbita dalla massa infinitesima  $dm$  contenuta nel volume  $dV$  ( $\rho$  densità):

$$SAR = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial W}{\partial m} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial W}{\rho \partial V} \right) [W / kg]$$

# Misura dei campi elettromagnetici

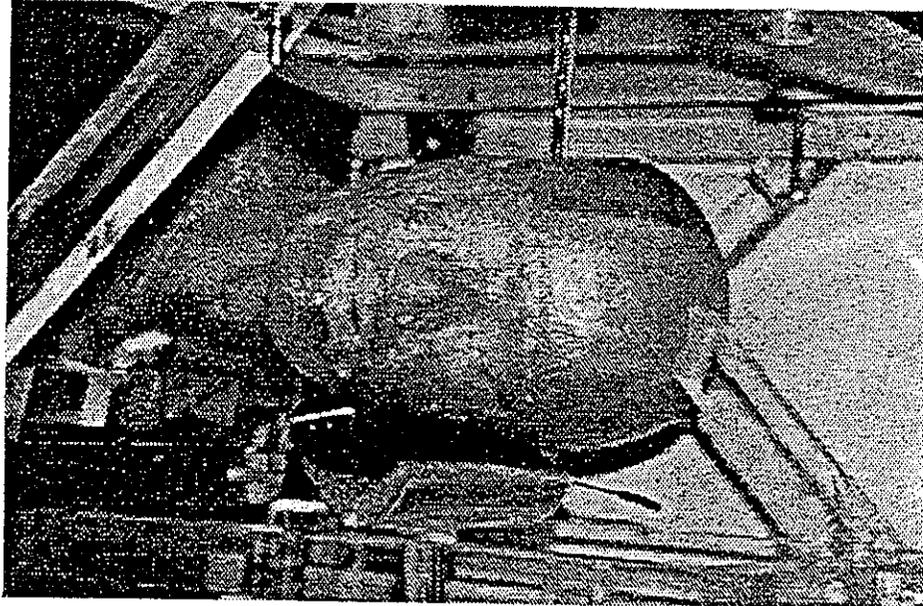
E' quindi sufficiente determinare la distribuzione del campo elettrico, o l'incremento spaziale di temperatura per risalire alla distribuzione spaziale di SAR, applicando le seguenti formule:

$$SAR(x, y, z) = \frac{\sigma(x, y, z) \cdot |E(x, y, z)|^2}{2\rho(x, y, z)}$$

$$SAR(x, y, z) = c_i(x, y, z) \cdot \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial t}$$

dove  $c_i$  è la capacità termica del tessuto considerato,  $\rho$  e  $\sigma$  sono rispettivamente la densità e la conducibilità,  $|E|$  è il modulo del campo elettrico e  $T$  è la temperatura misurata in gradi Kelvin.

# Misura dei campi elettromagnetici

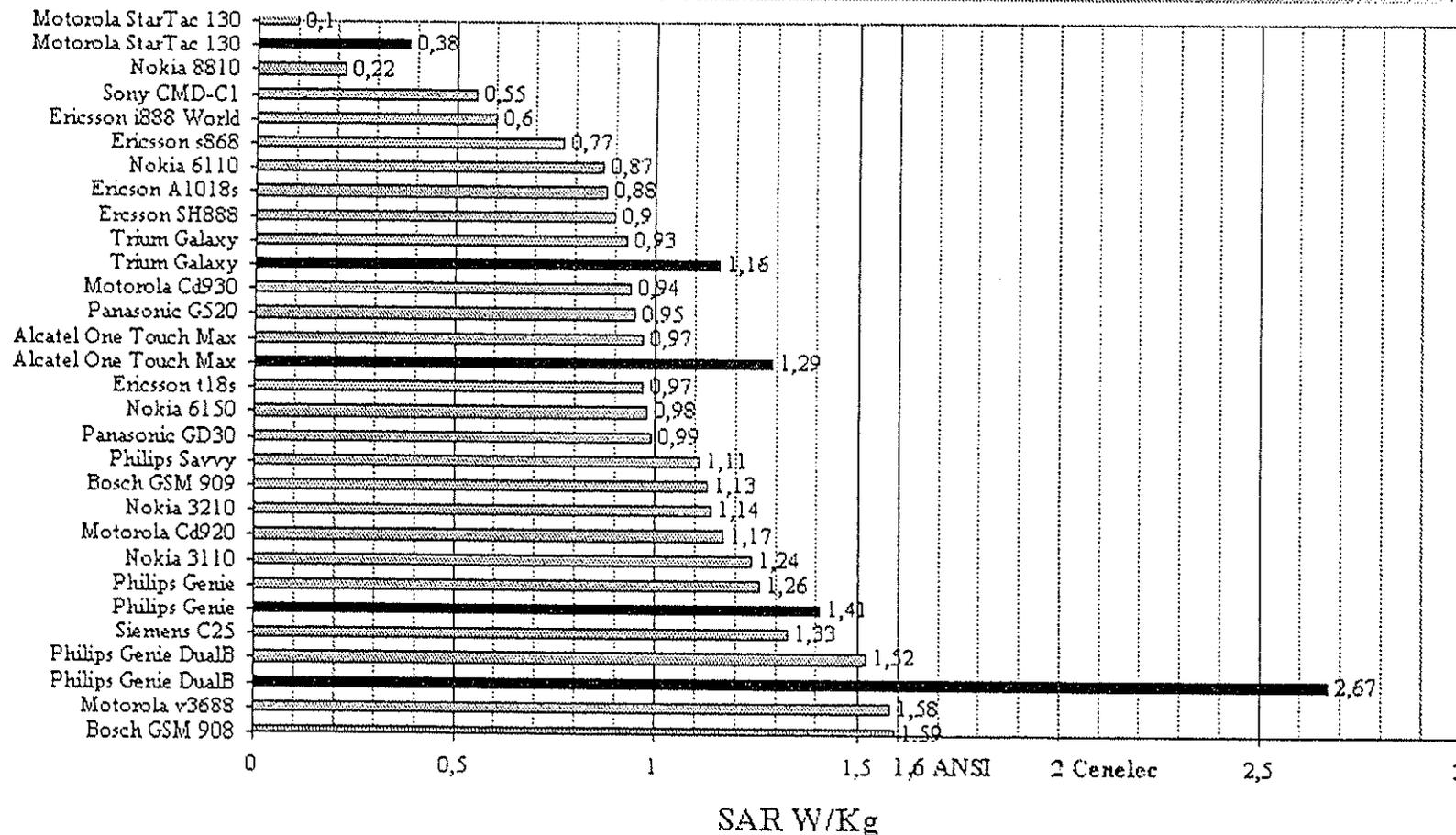


Fantoccio riempito di un liquido “cervello equivalente” utilizzato per misure di SAR



Definizione della  
“intended use position”

# Misura dei campi elettromagnetici



SAR misurato per ciascuno dei 25 cellulari testati; le misure contrassegnate in rosso sono relative al cellulare e con antenna non estratta. Sono indicati i valori limite fissati dalla normativa ANSI (1,6 W/Kg) e Cenelec (2 W/Kg)

# Misura dei campi elettromagnetici



# Misura dei campi elettromagnetici

---

Gli effetti conseguenti l'esposizione a campi elettromagnetici si definiscono a breve termine quando, si manifestano nell'arco dell'esposizione e ad un primo esame sono legati agli effetti termici provocati dai campi elettromagnetici ad alta frequenza sulle parti del corpo più molli e con minore irrorazione sanguinea. L'organo più sensibile agli effetti termici è il cristallino dell'occhio data la mancanza di vascolarizzazione che limita la sua capacità di disperdere calore, la tendenza dell'aumento della temperatura porta alla formazione di opacità. L'esposizione si ritiene priva di effetti biologici quando l'aumento di temperatura locale è inferiore a 1 °C. Da esperienze di laboratorio si ha che un SAR di [4 W/Kg] assorbito da un corpo adulto produce un aumento di temperatura di 1 °C dopo circa 20 minuti.

Si considera comunque che qualunque sopraelevazione termica viene compensata dal processo naturale di termo-regolazione, grazie al quale la circolazione del sangue all'interno dell'organismo trasferisce calore dalle zone interne a quelle esterne, dove diventano più efficaci i meccanismi di irraggiamento e smaltimento del calore.

# Riduzione rischio (ELF)

---

I metodi fondamentali a cui si può ricorrere per controllare il campo magnetico generato sorgenti ELF, e in particolare dagli elettrodotti, sono sostanzialmente tre:

- interrimento di tratti di elettrodotto;
- riconfigurazione dello schema dei conduttori (che nel caso di linee aeree comporta, in genere, lo sviluppo di nuovi tipi di sostegni);
- aggiunta di circuiti di compensazione passiva.

L'utilizzazione di schermi realizzati con materiali ad alta conducibilità o ad elevata permeabilità (o misti) trova applicazione pratica solo nella schermatura di piccoli volumi (ad esempio per la protezione di apparati elettronici da interferenze elettromagnetiche) o di sorgenti piccole e concentrate (quadri elettrici, cavi, ecc.) ma di fatto non rappresenta una soluzione praticabile per le linee elettriche.

# Riduzione rischio (ELF)

---

## **Interramento di tratti di elettrodotto cavi interrati**

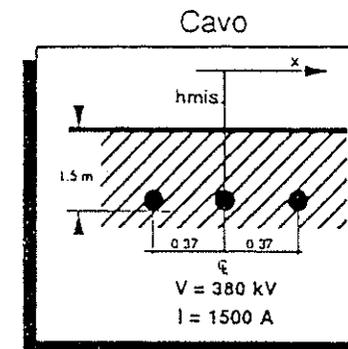
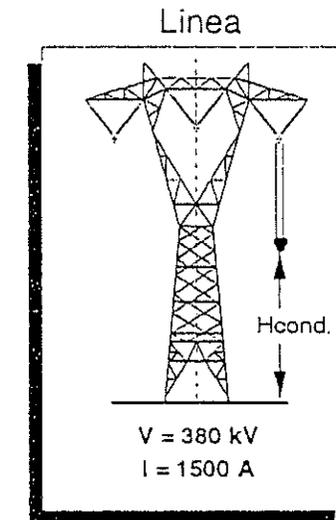
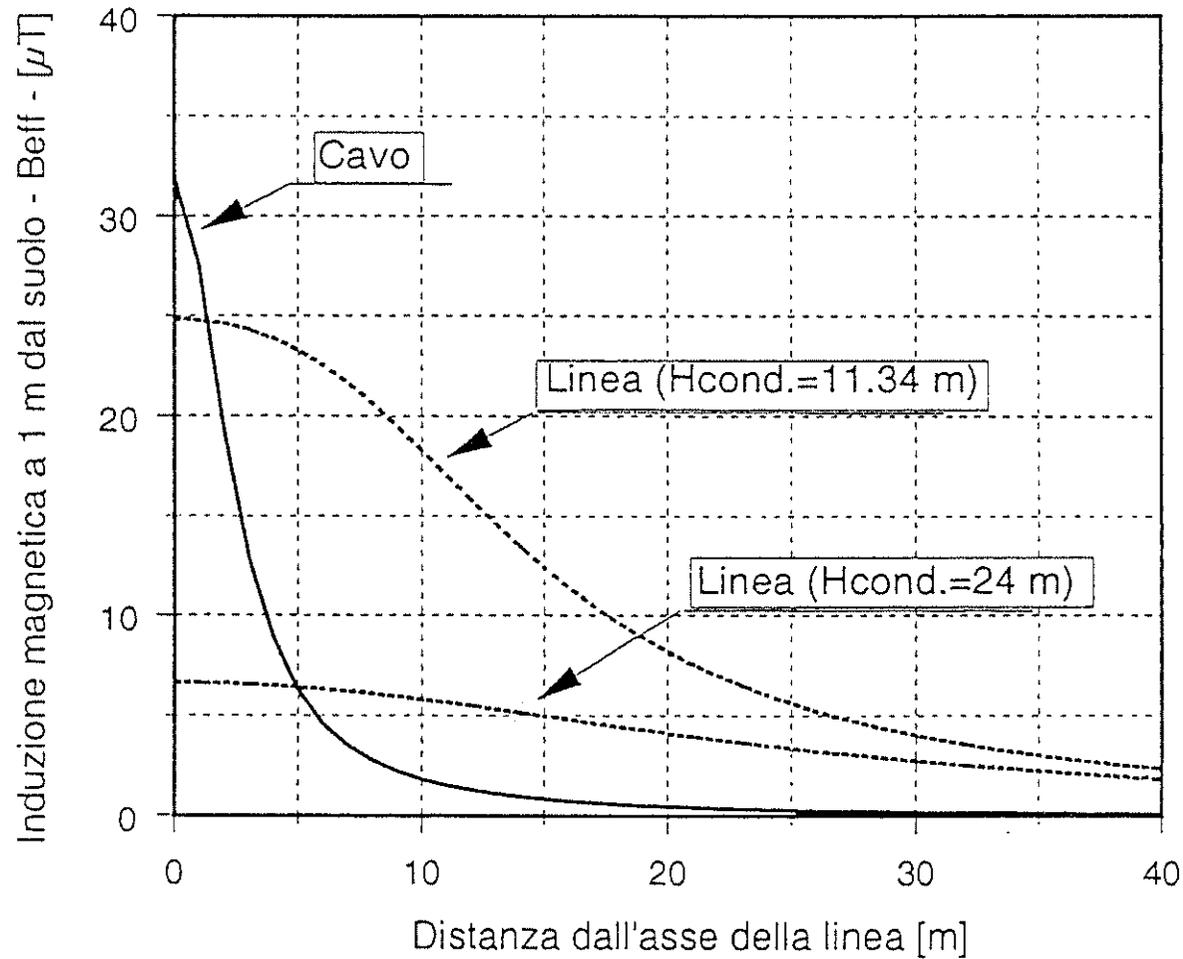
E' la tecnologia più consolidata con diffuse applicazioni per le tensioni 132 e 220 kV e con alcune soluzioni anche per il 380 kV. Queste ultime sono normalmente riservate per gli attraversamenti marini (Stretto di Messina, Stretto di Gibilterra, Golfo di Aqaba) e per particolari opere in aree metropolitane.

### **elettrodotti blindati - GIL (gas insulated lines)**

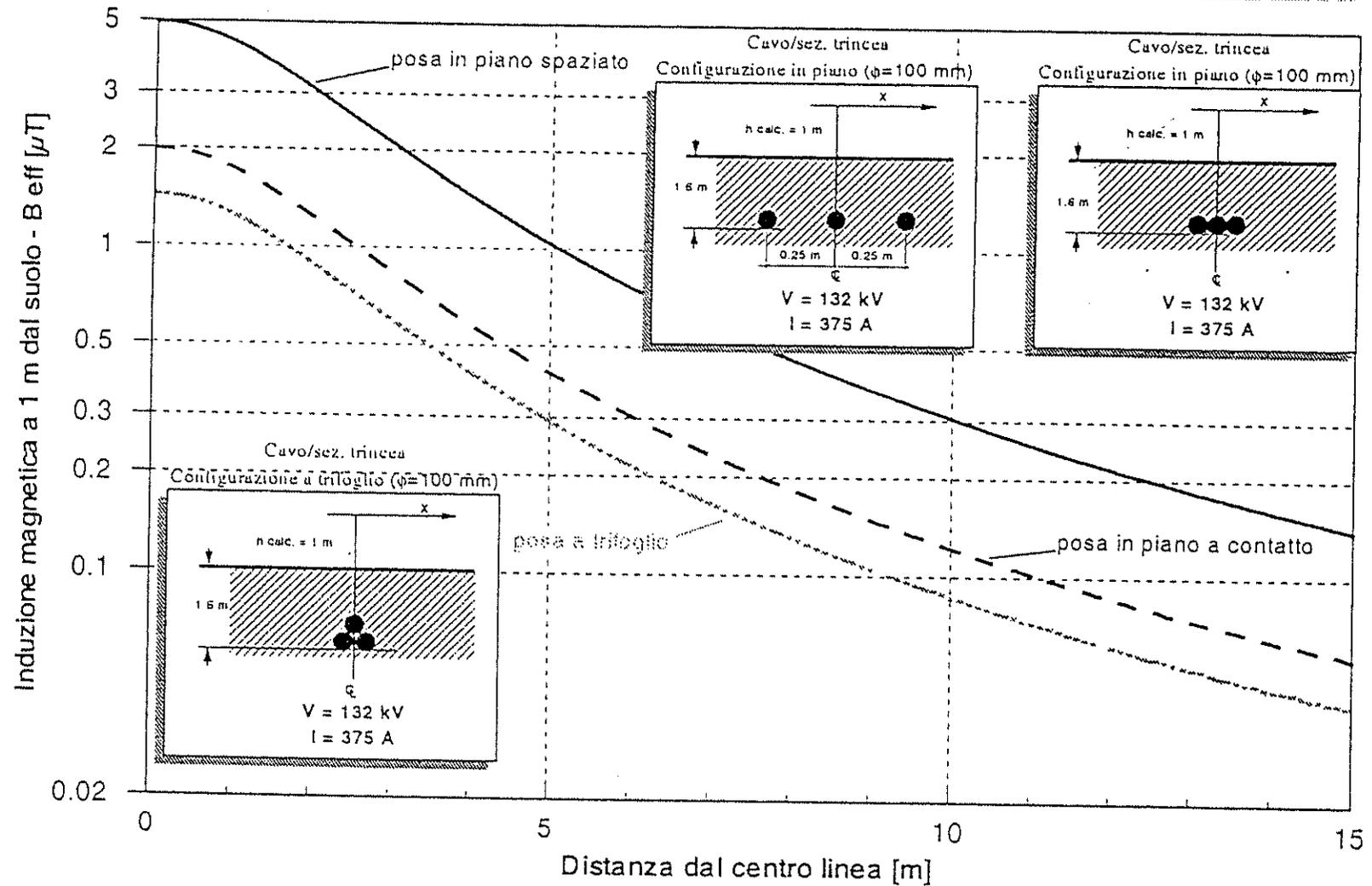
E' una tecnologia nuova, che prevede l'utilizzo di strutture blindate con isolamento gassoso ( $\text{SF}_6$ ) dei conduttori di potenza. Le applicazioni esistenti ad oggi hanno ancora caratteristiche di tipo sperimentale.

a fronte di sensibili riduzioni dei campi magnetici, l'interramento comporta costi molto elevati e, tra l'altro, non è esente da problemi sia di natura tecnica che ambientale.

# Riduzione rischio (ELF)



# Riduzione rischio (ELF)



# Riduzione rischio (ELF)

---

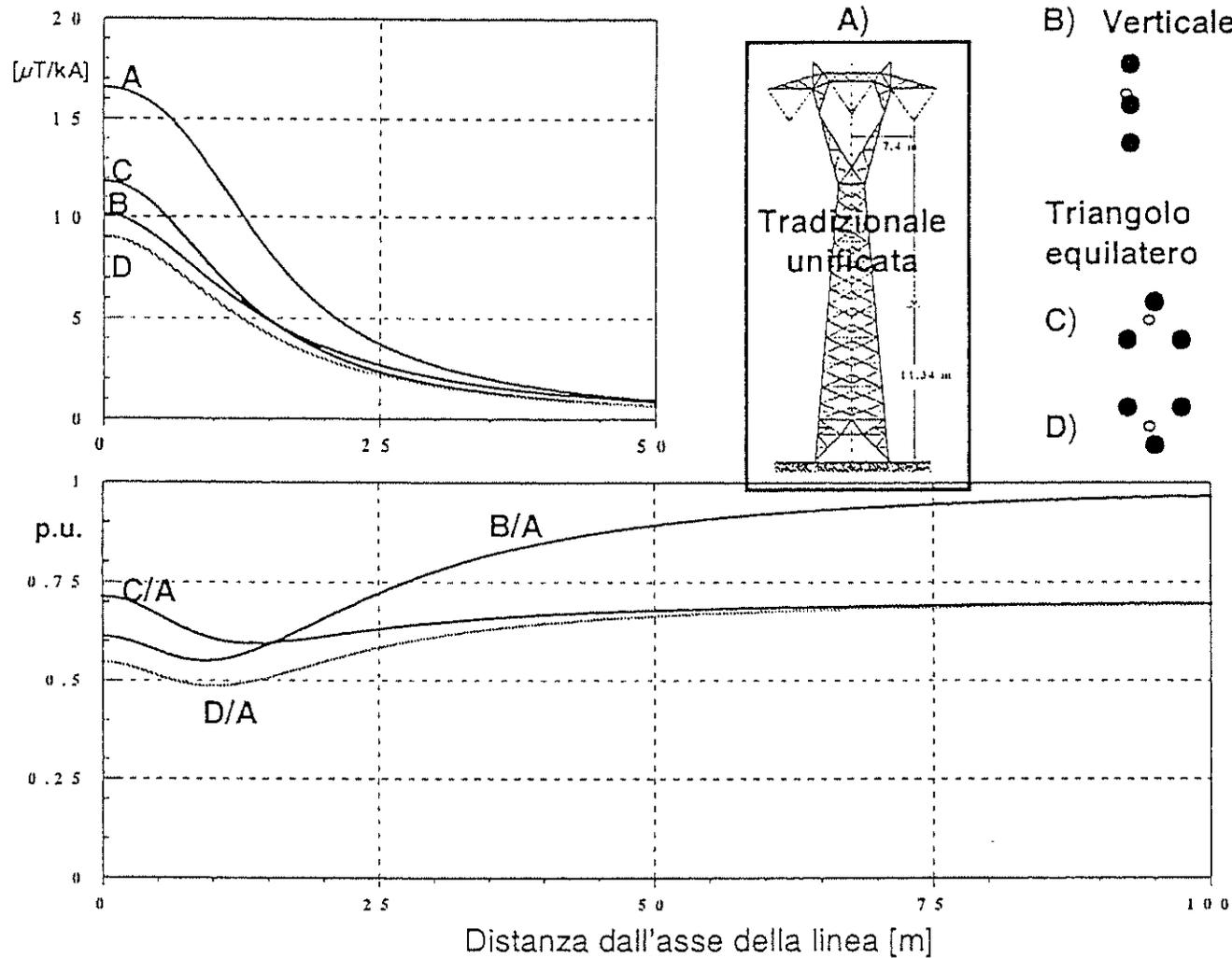
## Riconfigurazione dei conduttori

Per ridurre il campo magnetico (ed anche il campo elettrico) si può intervenire sulla geometria della linea (**disposizione dei conduttori di fase**) e tentare di "**compattare**" la linea stessa riducendo la distanza tra le fasi.

Per le linee a doppia terna, anche la disposizione reciproca delle fasi omologhe delle due terne gioca un ruolo importante.

Problemi di natura meccanica e di isolamento elettrico, oltre all'attuale impossibilità di effettuare lavori di manutenzione sotto tensione, pongono limitazioni all'impiego di soluzioni compatte. Inoltre, limitatamente alle linee AAT, la riduzione della distanza tra le fasi è condizionata dalla necessità di controllare l'effetto corona (rumore acustico).

# Riduzione rischio (ELF)



Confronto tra i profili laterali dell'induzione magnetica  $B_{eff}$  a 1 m dal suolo per quattro diverse disposizioni dei conduttori nello spazio

Si noti che a parità di altezza minima del conduttore più basso, i sostegni necessari per realizzare le soluzioni B, C e D presentano un'altezza fino a 20 m maggiore di quella del sostegno tradizionale unificato.

# Riduzione rischio (ELF)

---

## Linee compatte

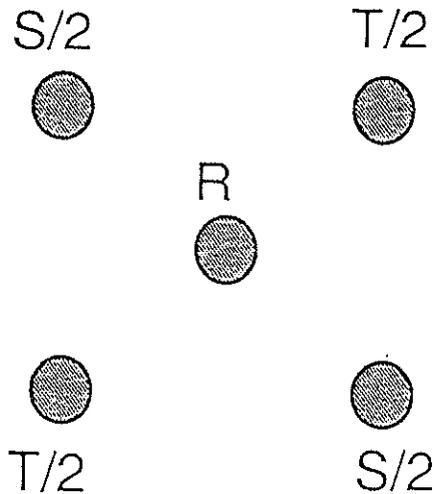
Attualmente l'ENEL ha già in esercizio tratte di linee a 132-150 kV compatte realizzate con sostegni tubolari monostelo a mensole isolanti oppure con sostegni compatti autostrallati.

Per quanto riguarda le linee 380 kV, L'ENEL ha completato prove di tipo su sostegni tubolari monostelo a mensole isolanti e prevede che la loro adozione possa avvenire in tempi brevi.

I benefici in termini di impatto ambientale e di riduzione dei campi è tuttavia contrastato dalle limitazioni di prestazioni dei singoli pali (riduzione delle campate e degli angoli massimi consentiti), dalla impossibilità di esecuzione dei lavori sotto tensione oltre che da un incremento dei costi di realizzazione.

# Riduzione rischio (ELF)

## Linea "split-phase"

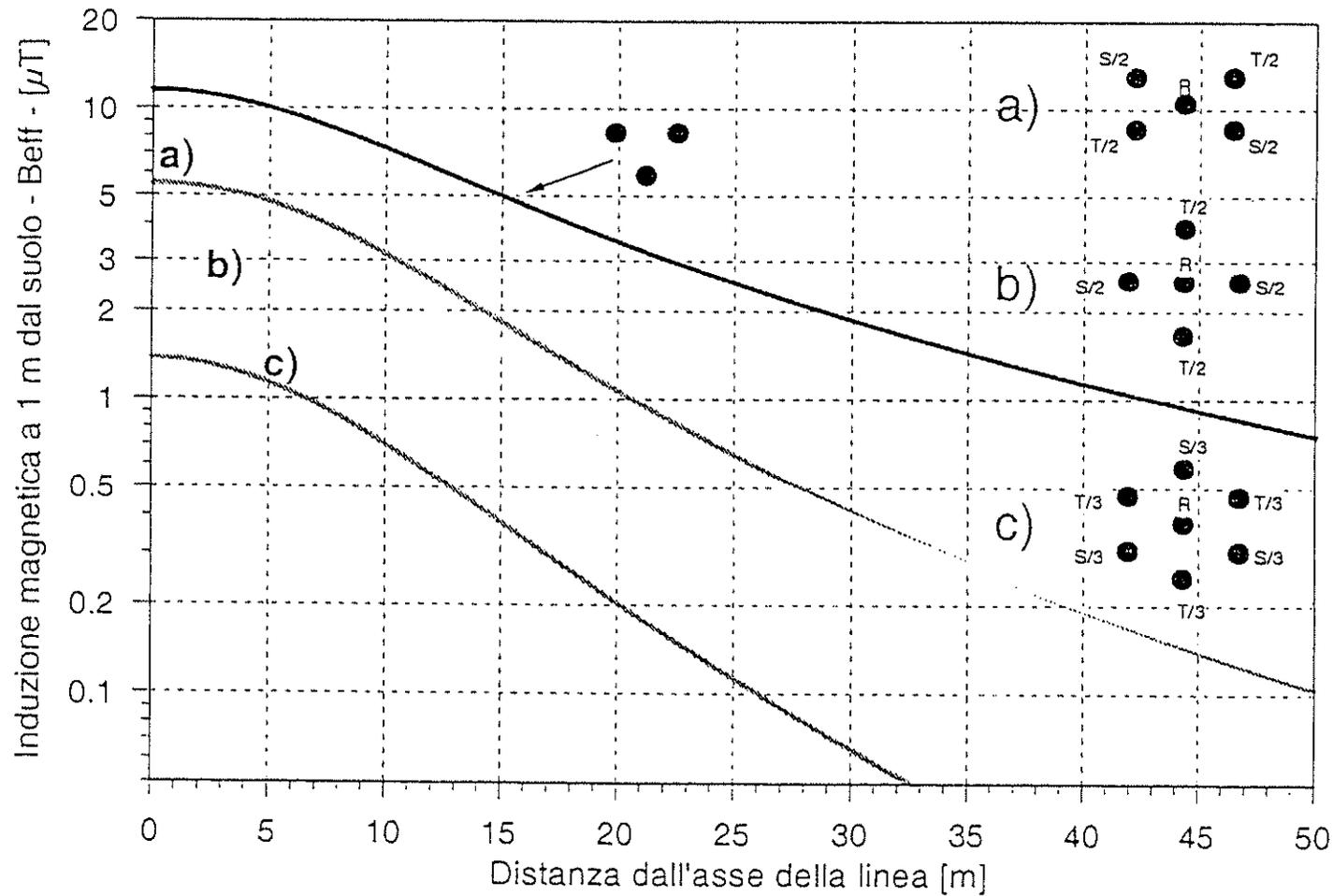


Una linea "split-phase" è ancora una linea trifase, ma con una o più fasi suddivise in due o più conduttori.

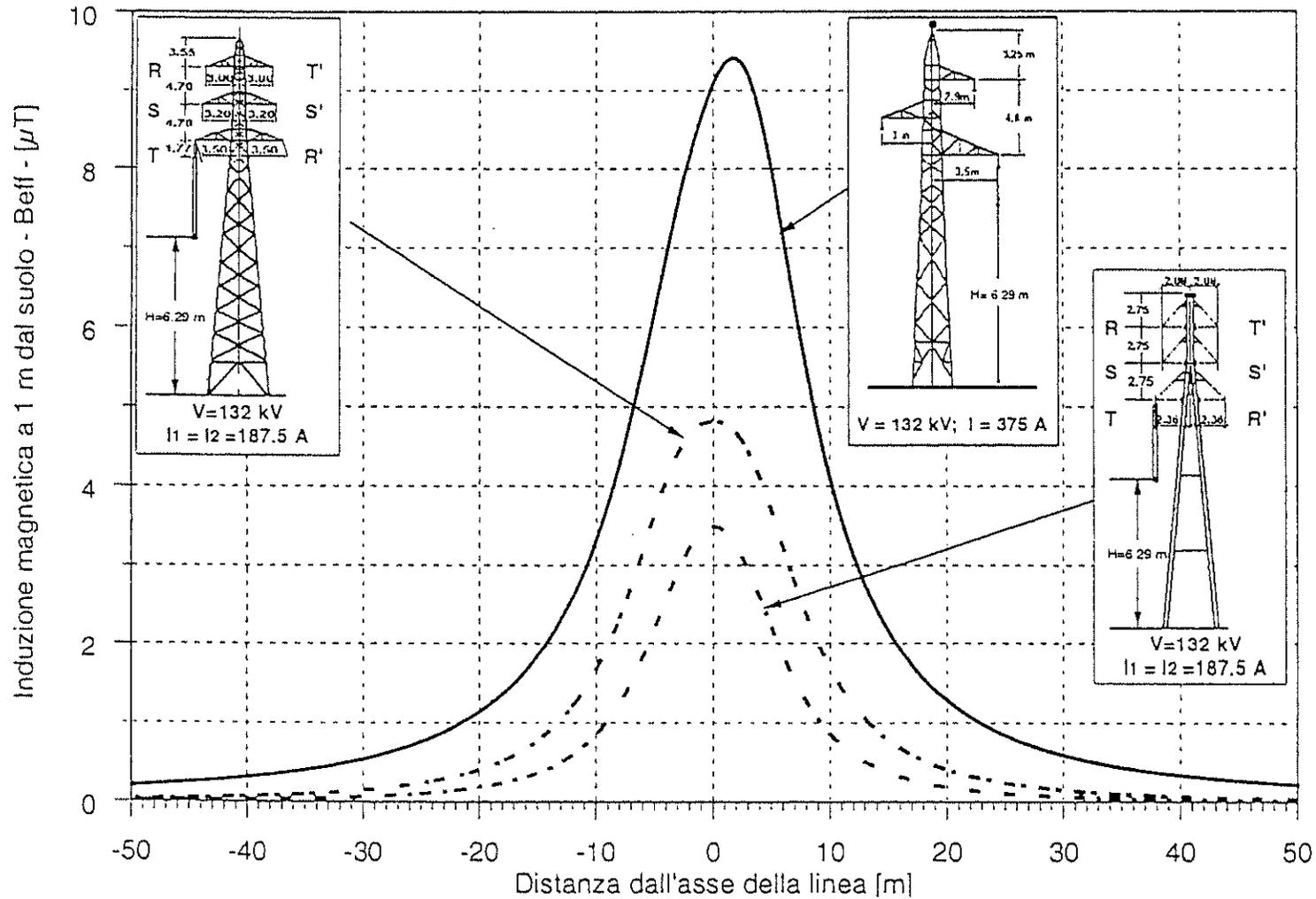
Rispetto ad una linea tradizionale, il campo magnetico prodotto da una linea "split-phase" è considerevolmente più basso. Anche il campo elettrico risulta più basso. Al contrario, le linee "split-phase" possono produrre un innalzamento del livello del rumore acustico per effetto corona. Anche in questo caso potrebbe inoltre risultare compromessa la possibilità di effettuare lavori di manutenzione sotto tensione.

**Attualmente nel mondo non esistono linee di questo tipo in esercizio.**

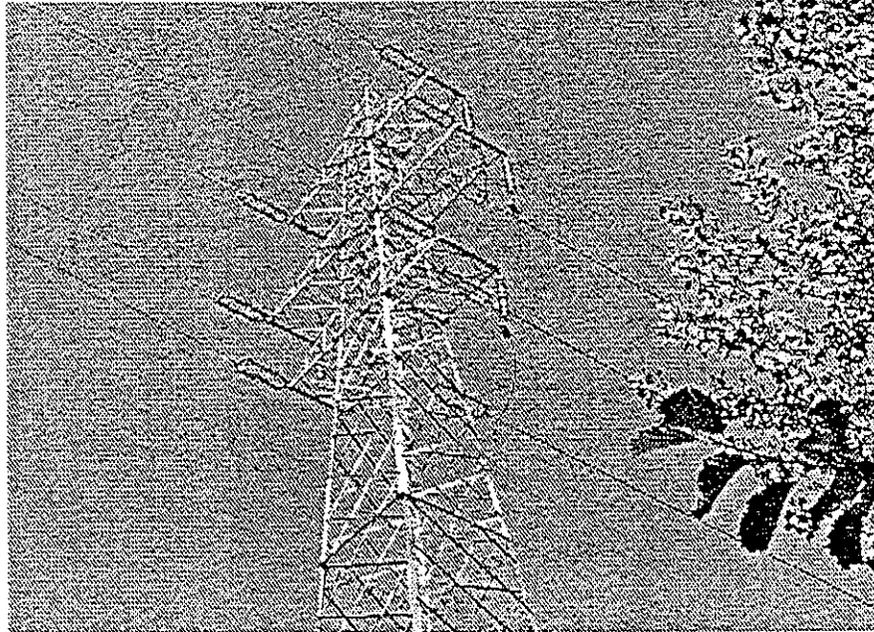
# Riduzione rischio (ELF)



# Riduzione rischio (ELF)



# Riduzione rischio (ELF)

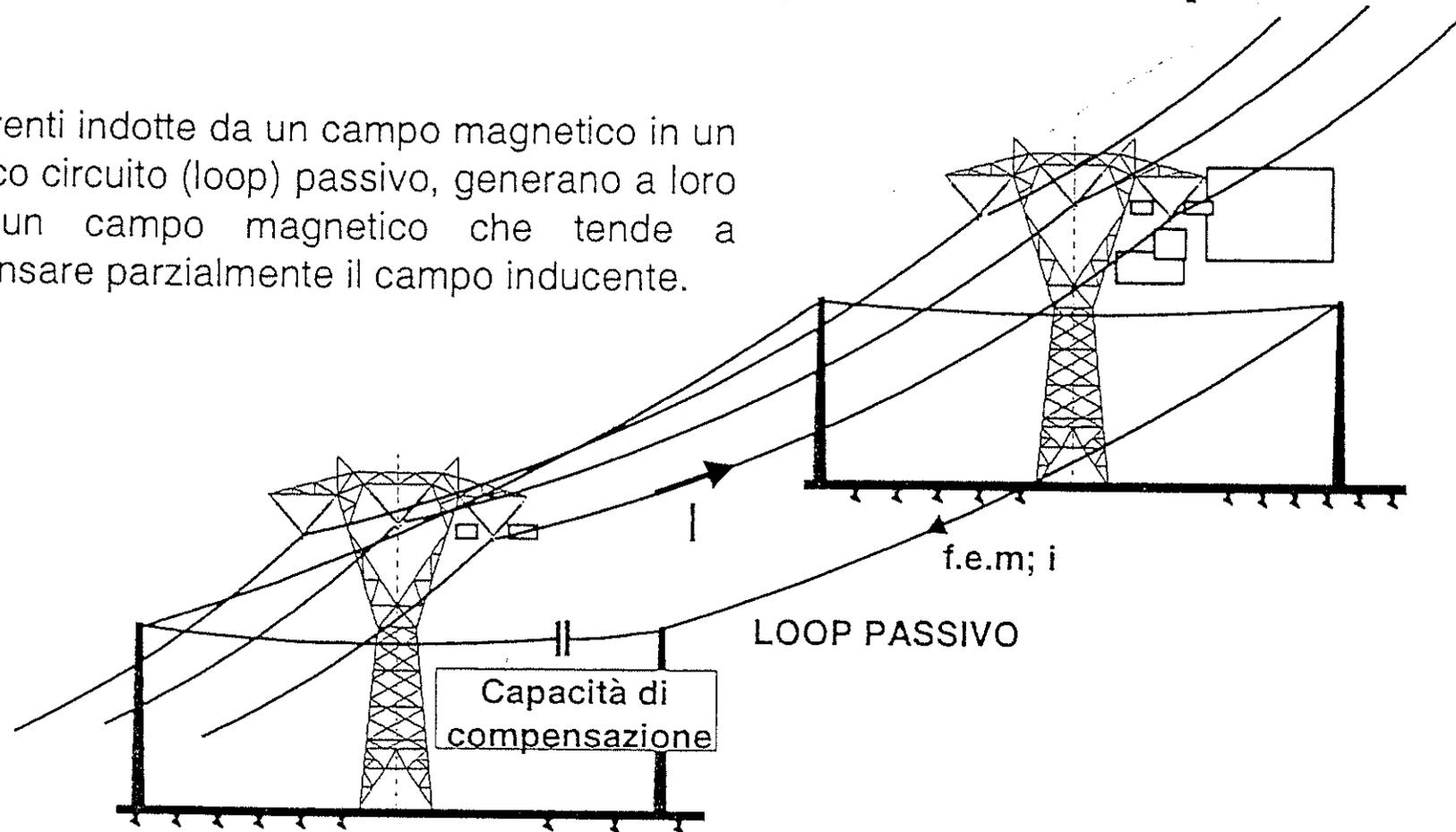


I benefici, in termini di riduzione del campo magnetico, sono tuttavia ottenuti a spese di realizzazioni più impattanti dal punto di vista visivo e paesaggistico sia per il notevole incremento delle altezze e delle dimensioni delle strutture portanti che per l'incremento del numero di conduttori.

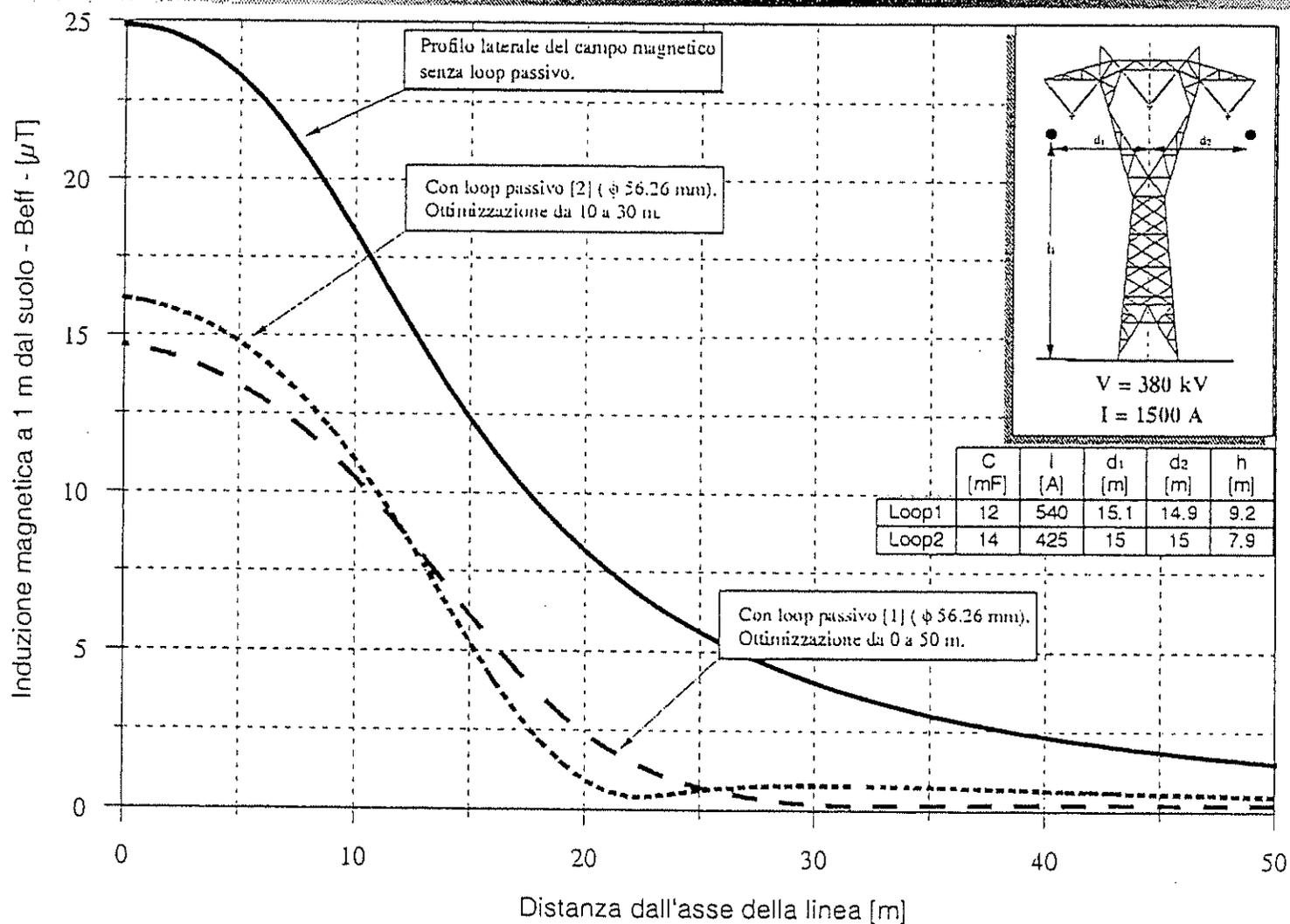
# Riduzione rischio (ELF)

## Aggiunta di circuiti di compensazione passiva

Le correnti indotte da un campo magnetico in un generico circuito (loop) passivo, generano a loro volta un campo magnetico che tende a compensare parzialmente il campo inducente.



# Riduzione rischio (ELF)



Calcolo del campo magnetico attenuato dall'applicazione ad una linea a 380 kV di un loop di compensazione lungo 400 m e largo 30m

# Riduzione rischio (ELF)

## Principali svantaggi delle soluzioni presentate rispetto alle linee ad alta tensione tradizionali

Interramento	<ul style="list-style-type: none"><li>• Difficoltà nell'esercizio della rete;</li><li>• Maggiore complessità nell'eseguire manutenzioni ed interventi su guasto con relativi incrementi dei tassi di indisponibilità;</li><li>• Maggiori limitazioni imposte all'uso dei terreni asserviti;</li><li>• Costo: da 3 fino a 6-8 volte.</li></ul>
Linee compatte <sup>(1)</sup>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Prestazioni meccaniche ridotte che pongono limitazioni di impiego.</li><li>• Impossibilità di esecuzione dei lavori di manutenzione sotto tensione con le metodologie oggi disponibili.</li><li>• Costo: fino a 2 volte.</li></ul>

(1) Nuove soluzioni strutturali già disponibili per linee AT ed allo studio per linee AAT (anche se non completamente intercambiabili con le soluzioni tradizionali).

# Riduzione rischio (ELF)

## Principali svantaggi delle soluzioni presentate rispetto alle linee ad alta tensione tradizionali

### Linee split-phase <sup>(1)</sup>

- Maggior impatto visivo a causa del maggior numero di conduttori e della maggior complessità dei sostegni.
- Maggiore complessità strutturale dei sostegni e prevedibili maggiori difficoltà nell'esecuzione dei lavori di manutenzione sotto tensione.
- Costo: fino a 2 volte

### Circuiti di compensazione (Loop) <sup>(2)</sup>

- Maggior impatto visivo a causa del maggior numero di conduttori e delle strutture di supporto del loop;
- Possibilità di risanare solo soluzioni puntuali;
- Costo: circa 1,5 volte.

(1) Attualmente sono solo oggetto di studio; non esistono al mondo applicazioni pratiche in esercizio.

(2) Esistono solo due applicazioni locali negli Stati Uniti.