

UNA REVISIONE DI LETTERATURA SUI CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI A BASSE FREQUENZE*

Vito Santarcangelo¹, Anna Di Cuia²

¹ Centro Studi S.r.l. , Zona Industriale Loc. Sant'Antuono - 84035 Polla (SA)

² I.R.C.S.S. Istituto Tumori "Giovanni Paolo II" - Farmacia Ospedaliera – Via O. Flacco ,65, 70124 Bari (BA)

*autore di riferimento - email: info@iinformatica.it

Riassunto

Nel presente lavoro viene affrontata la tematica dei campi elettrici e magnetici alle basse frequenze. In particolare, nel caso di studio in oggetto, viene effettuata una revisione di letteratura dal punto di vista dell'impatto biologico, questione oggi di estrema attualità, per la sempre più crescente diffusione di dispositivi elettrici ed elettronici nella nostra quotidianità.

1. INTRODUZIONE

Una delle problematiche che da anni è al centro di un dibattito scientifico, in gran parte ignorato dall'opinione pubblica, è certamente quella riguardante le esposizioni ai campi elettrici e magnetici rientranti nella cosiddetta banda ELF (*Extremely Low Frequency*, da 30 a 300 Hz). A questi campi appartengono anche i campi elettrici e magnetici a frequenza industriale, ovvero i campi indotti nell'ambiente dalle linee di trasporto e di distribuzione dell'energia elettrica (elettrrodotti) e dagli impianti industriali e domestici per il suo trattamento (centrali, cabine di trasformazione) ed utilizzo, la cui frequenza di funzionamento in Europa è di 50 Hz. Per facilitare la lettura a coloro che non abbiano familiarità con l'argomento, in questa introduzione sono riepilogati alcuni concetti di fisica generale. Il *campo elettrico* è una regione di spazio dove si manifestano forze sulle

cariche elettriche, dando possibilmente origine, se le cariche sono libere di muoversi, a correnti elettriche; analogamente, un *campo magnetico* (fig.1) è una regione di spazio dove si manifestano forze sui dipoli magnetici e sulle correnti elettriche; anche il campo magnetico è in grado di generare correnti nei materiali conduttori, poiché determina in essi un campo elettrico indotto. Diversi parametri permettono di descrivere le caratteristiche fisiche dei campi; qui ci interessano in particolare l'*ampiezza* (che è una misura della intensità delle forze prodotte dai campi) e la *frequenza* (che indica quanto rapidamente l'ampiezza varia nel tempo); quest'ultima si misura in "hertz" (simbolo Hz), l'intensità del campo elettrico si misura in "volt/metro" (V/m), l'intensità del campo magnetico in "tesla" (T); essendo questa un'unità di misura molto grande, si utilizzano spesso i sottomultipli "millitesla" (mT) e "microtesla" (μT) e "nanotesla" (nT).

Gli effetti biologici dei campi elettromagnetici a bassa frequenza sono diventati argomento di notevole importanza scientifica e numerose ricerche hanno contribuito alla comprensione dell'ambiente elettromagnetico a cui siamo esposti, e, in definitiva, all'effetto nocivo di questi campi.

Nel lavoro verranno brevemente presentati i campi ELF, e dopo una digressione sui potenziali cellulari, sarà presentata una analisi della letteratura esistente. Sono introdotti alcuni strumenti di epidemiologia come Rapporto Addizionale (OR) e il Rischio Relativo (RR), che sono due metriche usate per confrontare una popolazione di prova (osservati) con una popolazione di controllo (prevista) per un oggetto specifico (ad es. il Cancro). Maggiore è l'OR (rapporto osservati/previsti) maggiore è l'associazione tra un agente e l'oggetto esaminato. Il Rapporto Relativo (RR) è la probabilità che un soggetto, appartenente ad un gruppo esposto a determinati fattori, sviluppi la malattia, rispetto alla probabilità che un soggetto appartenente ad un gruppo non esposto sviluppi la stessa malattia.

Concludiamo questa introduzione, con l'auspicio che l'articolo risulti chiaro ed esaustivo e susciti interesse nel lettore.

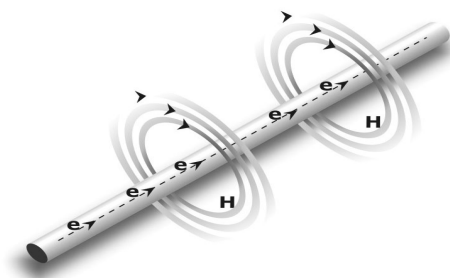


Fig. 1: Campo magnetico indotto da una corrente

2. ESPOSIZIONE AI CAMPI ELF IN UN AMBIENTE RESIDENZIALE E NEI MEZZI DI TRASPORTO [1]

In un ambiente residenziale possiamo distinguere il sistema di distribuzione interno costituito dai collegamenti dell'impianto e la messa a terra, e il sistema di distribuzione esterno costituito da linee interrato (principalmente per basse e medie tensioni) o aeree e dai relativi impianti di trasformazione.

E' utile sottolineare che le linee elettriche (fig.2) possono essere suddivise in:

- linee elettriche di trasporto ad altissima tensione (AAT- 220-380 kV): dedicate al trasporto dell'energia elettrica, collegano le centrali di produzione elettrica alle stazioni di distribuzione;
- linee elettriche di distribuzione o linee di sub trasmissione ad alta tensione (AT – in prevalenza 132-150 kV) : collegano le stazioni elettriche di distribuzione alle grandi utenze o alle cabine primarie per la distribuzione della media tensione;
- linee elettriche di distribuzione a media tensione (MT – 15-30 kV) : collegano le cabine primarie di distribuzione con le cabine secondarie e le medie utenze industriali;
- linee elettriche di distribuzione a bassa tensione (BT – 220-380V) : collegano le cabine secondarie con le utenze della zona.

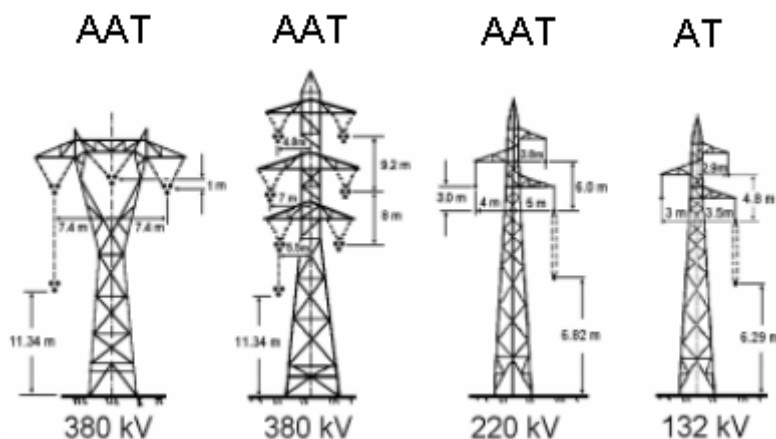


Fig. 2: Linee aeree per la distribuzione della AAT o AT

Le linee aeree sono essenzialmente costituite da un fascio di conduttori "attivi", da isolatori, da funi di guardia e da sostegni. La distribuzione di carica elettrica presente sui conduttori produce un campo elettrico, e la

corrente che circola nei conduttori genera un campo magnetico. Dalle indagini effettuate a ridosso delle linee elettriche emerge che il campo elettrico viene ben schermato dalle pareti dell'edificio e dagli alberi anche in caso di alta e altissima tensione, mentre ciò non avviene per il campo magnetico (fig.3) che interessa con valori superiori alla norma abitazioni entro una fascia di 50-100 metri.

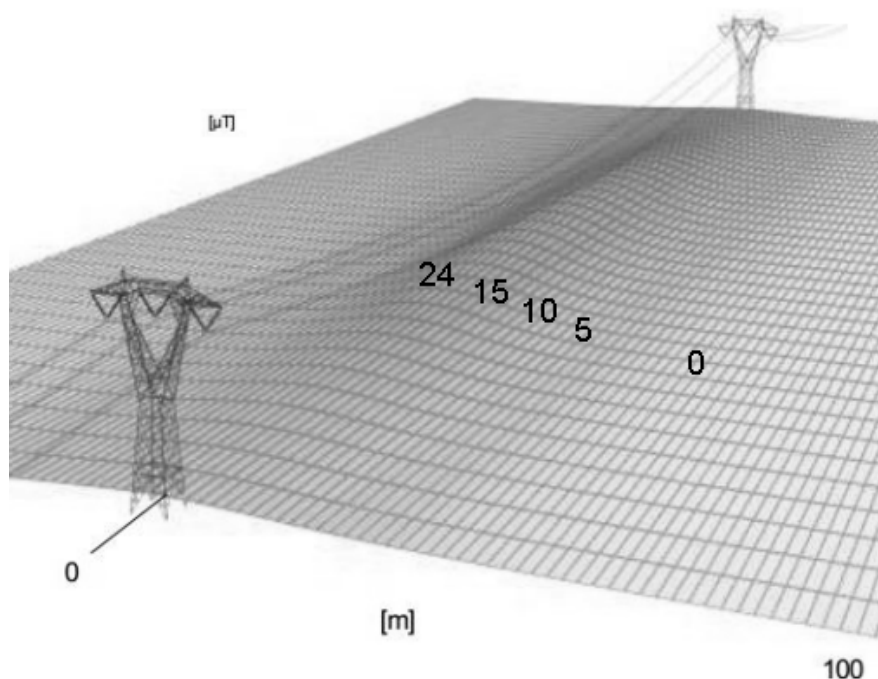


Fig. 3: Induzione magnetica in funzione della distanza rilevata nelle vicinanze delle linee aeree (valori di 24 μT sono rilevati nel centro della linea)

Diverso è il caso delle linee interrato a 1,5-2 metri nel sottosuolo. Le linee interrato sono problematiche e anti-economiche nel caso di utilizzo per le altissime e alte tensioni, perciò vengono utilizzate essenzialmente per il trasporto di bassa e media tensione. Tuttavia, in questo caso i campi elettrico e magnetico vengono ben schermati dal terreno, che si comporta come un buon conduttore.

Accanto alle linee elettriche, le infrastrutture di trasformazione della tensione elettrica risultano una ulteriore fonte di campi elettrici e magnetici a 50 Hz, quali le stazioni primarie (per la conversione da AAT ad AT), le

cabine primarie o sottostazioni (per la conversione AT in MT), le cabine secondarie (per la trasformazione MT/BT). Per le stazioni primarie e le cabine primarie si hanno campi che si attenuano più facilmente rispetto a quelli prodotti dagli elettrodotti. Le cabine secondarie sistemate all'esterno dell'edificio hanno un campo attenuato dalle pareti dell'edificio, mentre nel caso di cabine all'interno degli edifici si possono rilevare campi magnetici anche di alcuni microtesla.

Campi elettrici e magnetici all'interno degli edifici possono essere rilevati in presenza di errori di cablaggio/impianto. I più comuni che generano campi magnetici rilevanti, sono relativi ad una errata o inesistente messa a terra dell'impianto.

La normativa italiana, DPCM 08/07/2003, disciplina l'esposizione della popolazione ai campi elettrici e magnetici a bassa frequenza (50 Hz), fissando:

- i limiti per il campo elettrico (5000 V/m);
- i limiti per l'induzione magnetica (100 μ T);
- i valori di attenzione (10 μ T) e gli obiettivi di qualità (3 μ T) per l'induzione magnetica.

Il decreto prevede, inoltre, la determinazione di distanze di rispetto dalle linee elettriche secondo metodologie da individuare. Vi sono, inoltre, delle restrizioni ulteriori a livello regionale. Ad esempio, la LR 27/93 del Veneto disciplina, a livello regionale, l'esposizione della popolazione ai campi elettrici e magnetici, stabilendo le distanze tra elettrodotti esistenti e nuove abitazioni (o edifici caratterizzati da tempi di permanenza prolungati), tali che a 1,5 m dal suolo non siano superati i valori di campo elettrico e magnetico rispettivamente pari a 500 V/m e 0,2 μ T.

A livello di letteratura, da uno studio [6] si evince che la densità del flusso magnetico associata ai cablaggi esterni in un ambiente residenziale può andare da meno di 0.03 ad un massimo di 8 μ T, sebbene i valori sono generalmente sotto 1 μ T per la maggior parte delle case. Tuttavia, c'è una tendenza nell'utilizzo elettrico ad incrementare il voltaggio della linea di distribuzione della corrente e minimizzare la resistenza. Alla stessa maniera dell'aumento della tensione così aumenta l'intensità del campo elettrico, e gli studi riportano che gli effetti nocivi associati all'esposizione al campo magnetico possono essere peggiori in presenza di un forte campo elettrico [2].

Fra le ulteriori fonti di produzione di campi a bassa frequenza vi sono gli elettrodomestici, dove la maggiore preoccupazione riguarda quelli con le maggiori densità di flusso magnetico e lunghi tempi di esposizione. Le

coperte elettriche, per esempio, sono in contatto con il corpo per diverse ore ogni notte. I nuovi modelli, con l'autocontrollo della temperatura, generano campi magnetici meno impattanti. Gli asciugacapelli e i rasoi elettrici generano un campo magnetico elevato vicino la testa. Le seghe elettriche generano campi magnetici elevati e possono essere di interesse per l'utilizzatore.

Tra gli elettrodomestici per la casa gli apriscatole generano alcuni dei più alti campi registrati (da 50 a 150 μT a 15 cm).

Da ciò segue che l'esposizione cumulativa massima giornaliera può essere attribuita agli elettrodomestici, al cablaggio interno ed esterno delle linee elettriche a seconda delle circostanze. Gli individui che vivono nello stesso edificio possono essere esposti a differenti campi magnetici a seconda del tempo che spendono nelle varie camere e al tipo di elettrodomestico che usano. Queste differenze, che non furono considerate nei primi studi epidemiologici, possono spiegare molte delle discrepanze nei risultati, di conseguenza gli studi epidemiologici futuri devono necessariamente prenderli in considerazione.

Sempre da letteratura [7], si apprende che esposizioni elevate si sono maggiormente verificate nel tessile, nel settore dei mezzi di trasporto e nell'industria metallurgica. Riguardo il lavoro tessile, le sarte e i sarti che usano le macchine da cucire industriali sono esposti a campi elevati (dell'ordine di alcuni μT). Nel settore dei servizi, gli elettricisti, e gli operatori delle centrali elettriche, sostanzialmente sono tra quelli con la più alta esposizione ai campi magnetici (dell'ordine di alcuni μT).

Nel settore del metallo, i saldatori e quelli che si occupano di elettrolitizzazione o raffinazione dell'alluminio sono anch'essi maggiormente esposti a campi magnetici (dell'ordine di alcuni μT).

Coloro che effettuano riparazioni elettriche, e che riparano le apparecchiature elettriche possono essere anche esposti a campi magnetici, come pure l'igienista dentale (mediamente 0.64 μT) e l'addetto alle proiezioni nel cinema (mediamente 8 μT).

Per quanto concerne i mezzi di trasporto, gli aeroplani generano un campo magnetico di 400 Hz. I maggiori campi sono nella cabina di pilotaggio con valori massimi di 10 μT . Nella zona passeggeri dell'aeroplano i valori comuni sono tra 3 e 0.3 μT . Dal momento che i voli durano diverse ore, le esposizioni cumulative possono essere rilevanti. I dipendenti e i passeggeri sono anche esposti a radiazioni cosmiche, superiori alla media, a queste altitudini.

Con l'avvento dei treni ad alta velocità, il mondo ferroviario è risultato coinvolto dal problema dei campi ELF. Infatti, per i treni TAV si utilizza una alimentazione 2 x 25 kV a 50 Hz (fig.4).

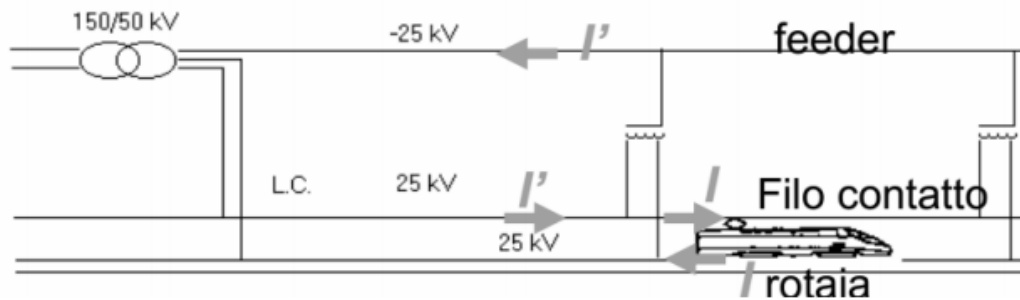


Fig. 4: Linea TAV [8]

Le correnti transanti nella linea di contatto generano campi magnetici all'interno della carrozza. Studi effettuati sui treni TAV [8] (fig.5), mostrano valori di campo magnetico di molto superiori ai limiti normativi. Ciò dipende dalla difficoltà della schermatura di tutte le aree del treno (si rilevano problematiche negli angoli della carrozza e nelle vicinanze dei finestrini) e dall'onerosità di una schermatura effettuabile mediante mumetal (lega metallica dotata di alta permeabilità magnetica e quindi eccellente schermante), che comporterebbe un maggiore peso del mezzo stesso.

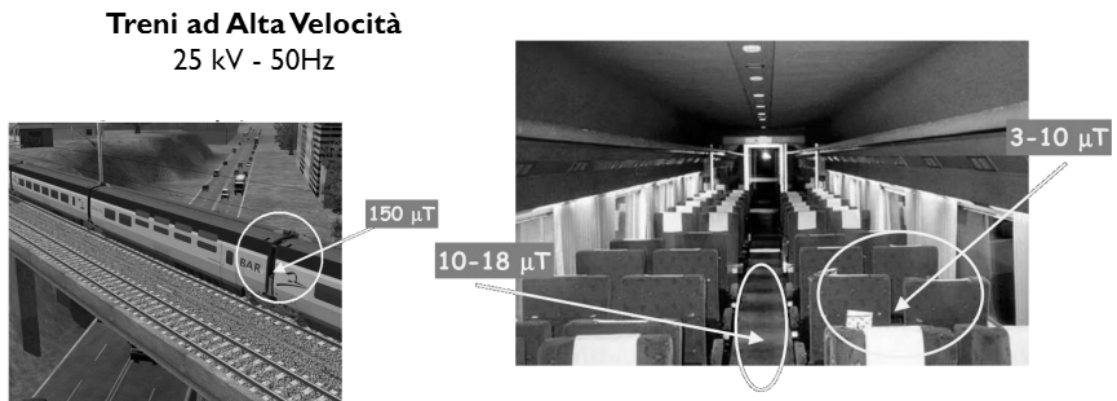


Fig. 5: Campi magnetici rilevati su TAV [8]

Il monitoraggio di autoveicoli sottolinea campi magnetici molto più bassi rispetto a quelli dei treni o degli aerei.

Chi è alla guida è esposto a campi magnetici elevati in veicoli di lusso con attrezzature elettroniche e in veicoli di grandi dimensioni, presumibilmente a causa della vicinanza con l'alternatore. La ventola di raffreddamento, il climatizzatore, il riscaldamento oltre allo stile di guida (l'accelerazione) contribuiscono al campo magnetico del veicolo. I motociclisti sono esposti a campi magnetici elevati in eccesso di 3 μT sul sedile della motocicletta.

3. LA CELLULA E IL POTENZIALE DI MEMBRANA

Per poter comprendere appieno l'impatto del campo magnetico sul corpo umano è importante fornire al lettore una piccola sintesi nozionistica sulla cellula e sul concetto di potenziale di membrana. Ogni cellula può essere considerata come un microcosmo virtuale della vita: essa è infatti la più piccola unità in grado di svolgere tutte le attività vitali e tutte, pur essendo alcune più complesse di altre, contengono i compartimenti chimici e fisici, per il proprio mantenimento, crescita e divisione. Sono in grado di trasformare l'energia da una forma ad un'altra e di utilizzare tale energia per svolgere diversi tipi di lavoro, da quello meccanico alla sintesi chimica.

Le cellule immagazzinano le informazioni genetiche nella molecola di DNA, le quali vengono fedelmente duplicate e trasferite alla progenie.

Sebbene le cellule possano sembrare morfologicamente diverse, le loro caratteristiche fondamentali sono simili.

Innanzitutto, una cellula è in grado di tenere separato il suo contenuto dall'ambiente, per questo motivo tutte le cellule sono racchiuse in una *Membrana Plasmatica*. Devono, poi, essere in grado di immagazzinare materie prime ed energia e di scambiarla con l'ambiente in modo estremamente regolato. Pertanto la membrana plasmatica deve servire da barriera selettiva, rendendo l'interno della cellula un compartimento isolato con composizione chimica alquanto diversa da quella dell'ambiente esterno [9].

Le membrane cellulari sono una componente fondamentale di tutte le cellule perché fungono, come abbiamo detto prima, da *barriera di permeabilità* tra il citoplasma (ossia tutta la porzione di una cellula contenuta all'interno della membrana) e il liquido extracellulare.

Il passaggio di molecole attraverso la membrana è pertanto di importanza vitale per molti processi cellulari e per il passaggio di molte sostanze dall'interno all'esterno della cellula e viceversa.

A tal proposito, tra i vari tipi di trasporti trans-membrana, il **trasporto attivo** è il più meritevole di attenzione, in quanto può avvenire utilizzando direttamente energia, o è legato al metabolismo in modo più indiretto. Quindi, poiché il trasporto attivo è dipendente dal metabolismo, può essere inibito da qualsiasi sostanza che interferisca con il metabolismo energetico.

Un esempio molto importante di trasporto attivo di membrana è la **pompa Na⁺/K⁺-ATPasi** (fig.6). Questa pompa utilizza direttamente ATP (che è la forma di energia direttamente utilizzabile dalla cellula) per trasportare Na⁺ fuori dalla cellula e K⁺ all'interno.

Nel citoplasma di gran parte delle cellule animali le concentrazioni del Na⁺ e del K⁺ sono, rispettivamente, inferiore e superiore alle concentrazioni che gli stessi ioni hanno nel liquido extracellulare. Questa situazione dipende dall'azione della Na⁺/K⁺-ATPasi presente nella membrana plasmatica.

Questa pompa trasferisce 3 ioni Na⁺ fuori dalla cellula e 2 ioni K⁺ all'interno, per ogni molecola di ATP idrolizzata (cioè utilizzata, in quanto questa pompa utilizza proprio l'energia di legame del fosfato terminale della molecola di ATP, che viene rotto, liberando energia, per idrolisi; **ATP** sta per **Adenosina Trifosfato** ed è formata dall'*Adenina*, che è una *base azotata*, uno *zucchero pentoso*, il *Ribosio*, e da *tre gruppi fosfato*; è un *reagente necessario per la sintesi dell'RNA*, ma *soprattutto è il collegamento fra il catabolismo, che porta alla formazione di prodotti più semplici e poveri di energia, e l'anabolismo, che invece è un processo che richiede energia e che porta alla sintesi di molecole organiche più complesse a partire da sostanze più semplici*).

Questo trasporto di Na⁺ e K⁺ operato da questa pompa è anche detto "*Peristalsi molecolare*".

La fosforilazione (aggiunta di un gruppo fosfato) e la de-fosforilazione (perdita di un gruppo fosfato) ciclica consentono alle proteine di alternarsi in 2 conformazioni, E₁ ed E₂.

Nella conformazione E₁ i siti di legame per gli ioni hanno alta affinità per il Na⁺ e bassa per il K⁺ e sono rivolti verso il citoplasma, mentre nella conformazione E₂, i siti sono rivolti verso il liquido extracellulare e la loro affinità è invertita.

In questo modo viene fissato Na⁺ e dissociato il K⁺ (E₁) nel citosol e fissato K⁺ e dissociato il Na⁺ (E₂) nel liquido extracellulare. Attraverso la membrana plasmatica della gran parte delle cellule animali esiste una differenza di potenziale (voltaggio). Normalmente il citoplasma è elettronegativo rispetto al mezzo extracellulare. La differenza di potenziale elettrico attraverso la membrana plasmatica della cellula a riposo è chiamato

Potenziale Trasmembrana di Riposo, che ha un ruolo chiave nell'eccitabilità delle cellule muscolari e nervose ed in altri tipi di risposte cellulari.

Uno ione tende a fluire attraverso una membrana se esiste attraverso questa membrana una differenza di concentrazione per quello ione, o una **differenza di potenziale elettrico** ($\Delta\mu$) che include i contributi della differenza sia della concentrazione sia del potenziale elettrico alla tendenza dello ione a fluire attraverso la membrana.

Una differenza di potenziale elettrochimico di uno ione attraverso una membrana rappresenta una differenza di energia chimica potenziale. Questa differenza di energia di potenziale può essere utilizzata per eseguire lavoro. Uno ione che sia distribuito in equilibrio attraverso una membrana deve soddisfare l'**Equazione di Nerst**:

$$RT\ln[X^+]^A/[X^+]^B + zF(E^A - E^B) = 0$$

$$zF(E^A - E^B) = RT\ln[X^+]^A/[X^+]^B = RT/zF\ln[X^+]^A/[X^+]^B$$

$[X^+]^A$ = concentrazione dello ione X^+ nel compartimento acquoso A separato dal compartimento B da una membrana;

$[X^+]^B$ = concentrazione dello ione X^+ nel compartimento acquoso B separato dal compartimento A da una membrana;

R = costante dei gas;

T = temperatura assoluta;

$\ln[X^+]^A/[X^+]^B$ = logaritmo naturale del rapporto di concentrazione di X^+ ai due lati della membrana;

z = n° cariche dello ione (+2 per Ca^{++} , -1 per Cl^- , ecc);

F = costante di Faraday;

$E^A - E^B$ = differenza di potenziale elettrico attraverso la membrana;

N.B. all'equilibrio si ha che $\Delta\mu=0$; $\Delta\mu$ =differenza di potenziale elettrochimico dello ione tra il lato A e B della membrana.

Possiamo utilizzare questa equazione per sapere se uno ione è in equilibrio o per calcolare quale debba essere la differenza di potenziale elettrico attraverso la membrana affinché un particolare ione sia in equilibrio, ossia $E^A - E^B$ necessari per generare una forza elettrica, $zF(\bullet)$, che sia uguale ed opposta alla forza del gradiente chimico.

Il citoplasma contiene un eccesso di ioni negativi che non possono diffondere attraverso la membrana. Una coppia di ioni diffusibili

monovalenti, X^+ e Z^- , che possono raggiungere l'equilibrio attraverso la membrana soddisfano invece l'**equazione di Gibbs - Donnan**, espressa dalla seguente relazione:

$$[X]_{in} [Z]_{in} = [X]_{ext} [Z]_{ext}$$

dove “in” ed “ext” indicano rispettivamente il citoplasma e il mezzo esterno. Tutte le cellule hanno un potenziale trans-membrana di riposo negativo, cioè il citoplasma è elettronegativo rispetto al liquido extracellulare. Pertanto la diffusione di ioni attraverso la membrana plasmatica lungo i gradienti di potenziali elettrochimici contribuisce al potenziale di riposo della membrana.

Il flusso di un determinato ione attraverso la membrana plasmatica tende a portare il potenziale di riposo della membrana verso il potenziale di equilibrio, come previsto dall'equazione della **conduttanza di membrana**:

$$E_m = \frac{g_K}{\Sigma g} E_K + \frac{g_{Na}}{\Sigma g} E_{Na} + \frac{g_{Cl}}{\Sigma g} E_{Cl}$$

con

$$\Sigma g = (g_K + g_{Na} + g_{Cl})$$

dove g ed E rappresentano, rispettivamente, la *conduttanza della membrana* e il *potenziale di equilibrio dello ione indicato alla base*.

La conduttanza è il reciproco della resistenza ($g = 1/R$). Più la membrana è permeabile ad uno ione, maggiore è la conduttanza della membrana e quella dello ione. L'equazione della conduzione di membrana stabilisce che il potenziale elettrico attraverso la membrana risulta dalla media ponderata dei potenziali di equilibrio di tutti gli ioni ai quali la membrana è permeabile, in questo caso Na^+ , K^+ e Cl^- .

Il fattore ponderale per ciascuno ione è quella frazione della conduttanza ionica totale della membrana (la somma delle singole conduttanze ioniche, Σg) dovuta a quel particolare ione.

Si noti che la somma dei fattori ponderati per gli ioni deve essere uguale ad 1, in modo tale che se il fattore ponderato di uno ione aumenta, gli altri devono ridursi.

L'equazione della conduttanza della membrana mostra che maggiore è la conduttanza della membrana per un particolare ione, maggiore è la capacità per quello ione di portare il potenziale di membrana verso il proprio potenziale di equilibrio.

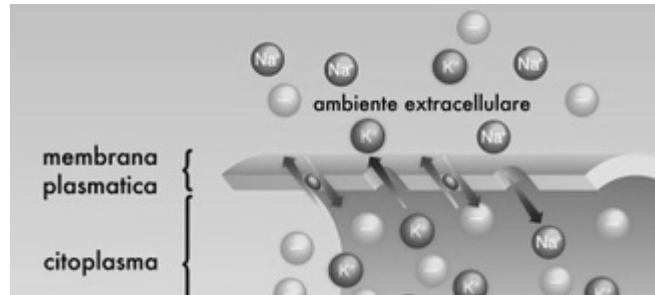


Fig. 6: Pompa sodio-potassio

Concludendo questa panoramica, possiamo asserire che il potenziale di membrana si assesta tra i -70mV e -90mV e varia a seconda delle cellule. La cellula per adempiere a tutte le sue funzioni metaboliche deve mantenere un potenziale di membrana negativo di 70 mV . Quando si manifesta una patologia, a seconda della sua gravità, la cellula perde in parte o totalmente la sua funzionalità. La cellula malata perde energia, la concentrazione di ossigeno nei tessuti diminuisce quindi non c'è sufficiente ATP disponibile, questo causa una diminuzione della funzione della pompa sodio-potassio ed il voltaggio della membrana cellulare scende fino a $-40 / -50\text{ mV}$ (nelle cellule tumorali si abbassa fino a -25 mV) [5].

4. RISPOSTA BIOLOGICA [2]

I principali nessi riscontrati da evidenze scientifiche relativi alle risposte biologiche dovute ai campi ELF sono la produzione di melatonina, la mitosi e la sintesi del DNA e la variazione del flusso di ioni in particolare quelli del calcio.

La Melatonina è un neuroormone che regola il ciclo del sonno, gli ormoni sessuali, e la riproduzione. E' prodotta dalla ghiandola pineale (fig.7), una ghiandola a forma di pisello sensibile alla luce localizzata al centro del cervello. Negli animali la ghiandola pineale serve come una bussola (rileva le variazioni dei campi geomagnetici), come un orologio (rileva i cambiamenti nella luce visibile, una parte dello spettro EMF, e induce il sonno), e come un calendario (rileva i cambiamenti nel fotoperiodo ed induce l'ibernazione nonché l'ovulazione e così controlla il ciclo riproduttivo negli animali a riproduzione stagionale). La Melatonina segue alcuni cicli naturali, maggiore di notte che durante il giorno ed è associata al sonno ristoratore. E' elevata nella popolazione giovane, particolarmente nei

neonati che spendono molto tempo a dormire, cosa opposta negli anziani che hanno difficoltà a dormire. Essa è stata, inoltre, collegata con i cambiamenti dei livelli di serotonina e dei disordine affettivo stagionale (SAD), una forma di depressione che è accompagnata da prolungati periodi di stanchezza. La Melatonina è stata usata per curare i disturbi del sonno.

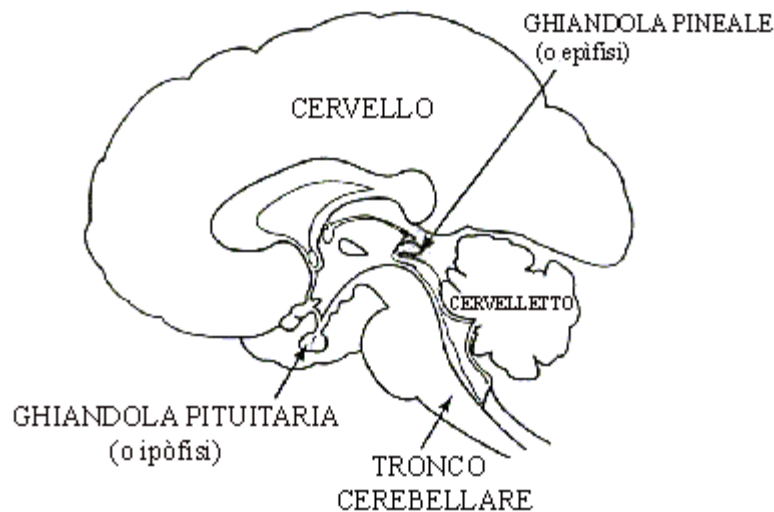


Fig. 7: La ghiandola pineale

Vi sono diverse evidenze che collegano i cambiamenti della melatonina all'esposizione a campi elettromagnetici. Infatti, da letteratura [10] è ben noto il fatto che la ghiandola pineale è sensibile ai cambiamenti nelle frequenze elettromagnetiche sia della luce visibile e sia delle sorgenti a radio-frequenza. Il tempo di esposizione è un fattore che influenza la produzione della Melatonina. Se l'esposizione all'EMF si verifica la sera può interferire con la concentrazione notturna di melatonina e influenzare il sonno ma se si verifica nella prima parte della giornata non ne influenza la produzione. La Melatonina controlla anche la concentrazione degli ormoni sessuali. Elevati livelli di melatonina sono associati alla produzione di bassi livelli di estrogeni. Ciò è di notevole rilevanza, infatti la crescita di alcuni tipi di tumori al seno è promossa dagli estrogeni, non a caso, le donne in post-menopausa hanno un aumento del rischio di sviluppare il cancro al seno se assumono integratori di estrogeni. Gli elevati livelli di melatonina (che sopprimono i livelli di estrogeni) possono avere un effetto protettivo su questa forma di tumore. Al contrario se i picchi di melatonina notturni sono ridotti e i livelli di estrogeni rimangono alti, risulta favorita questa forma di

cancro al seno. La melatonina è considerata un agente chimico anticancro naturale. Se le concentrazioni endogene di melatonina sono ridotte, la capacità del corpo di combattere le cellule cancerose potrebbe essere compromessa, portando ad una più aggressiva espansione del cancro. Le donne che dormono sotto le coperte elettriche hanno livelli più bassi di melatonina [11], il che mostra come la regolazione della melatonina è influenzata dalla frequenza della linea di alimentazione elettrica. Dal momento che la melatonina controlla il ciclo riproduttivo, si potrebbero così spiegare alcuni aborti spontanei di donne che dormono in un ambiente soggetto ad ELF (es. utilizzatori di coperte elettriche).

La Melatonina, inoltre, è sintetizzata a partire dalla serotonina, un neurotrasmettitore associato con la depressione. Squilibri nel ciclo serotonina/melatonina giustificano i sintomi associati alla depressione delle persone che vivono vicino alle linee elettriche o lavorano in ambienti altamente elettromagnetici.

L'interazione dei campi magnetici con la produzione di melatonina ha perciò nessi con il cancro al seno, aborti spontanei e depressione, e per questa ragione è una delle probabili candidate per spiegare il meccanismo responsabile per alcuni dei bioeffetti dei campi elettromagnetici.

Il secondo aspetto che mostra interazioni fra campi magnetici e corpo umano è la mitosi e sintesi del DNA. La dinamica della riproduzione cellulare è complessa ma sono stati rilevati cambiamenti nella mitosi, in funzione delle fluttuazioni del campo magnetico, in studi fatti in laboratorio [12].

La terza evidenza riguarda la risonanza molecolare. Se la risonanza è un fenomeno che caratterizza atomi o molecole allora queste frequenze potrebbero a loro volta interagire [13]. Il modello che ha ricevuto il sostegno empirico è quello della risonanza del ciclotrone. La frequenza alla quale gli ioni risuonano dipende dalla loro massa, dalla carica e dalla forza del campo magnetico statico. La corrente alternata a tale frequenza di risonanza può trasferire più energia a questi ioni e quindi disturbare il loro movimento interno. Gli effetti sono essenzialmente localizzati, e tale aspetto va considerato in studi di tale ambito. A tal proposito vi sono degli studi di letteratura che riguardano la risonanza e la molecola del calcio. Da tali studi si evince che il tessuto cerebrale dei pulcini appena nati rilascia ioni calcio quando essi sono esposti a frequenze radio modulate a specifiche frequenze (15,45,75,105 e 135 Hz). Di conseguenza alcune frequenze risultano importanti per gli effetti biologici [14]. Il calcio è critico per molti processi cellulari e cambiamenti in questi flussi possono avere un effetto significativo sulla flora e la fauna. A livello cellulare infatti la "cascata di

calcio” presiede a numerosi processi biochimici quali la sintesi di nucleotidi, proteine, stimolazione della moltiplicazione e differenziazione cellulare.

5. REVISIONE DI LETTERATURA

In questa sezione vengono riassunti gli studi epidemiologici presenti in letteratura [2] in merito all’analisi della risposta biologica su popolazioni sottoposte ad onde ELF. Gli studi epidemiologici sul cancro si sono concentrati essenzialmente su 2 popolazioni principali: i bambini nei settori residenziali e gli adulti nei settori occupazionali. I principali tipi di cancro associati all’esposizione ad onde ELF sono la leucemia, i tumori del sistema nervoso e, in misura minore, il linfoma tra i bambini; la leucemia, tumori del sistema nervoso e cancro al seno tra gli adulti. A prescindere dalla metrica utilizzata, considerati nel complesso, molti degli studi [2] sulla leucemia infantile suggeriscono rapporti addizionali (OR) di circa 1. Le distanze critiche sembrano essere approssimativamente di 50 m da una linea elettrica e le densità critiche del flusso magnetico sono circa 0.2 μ T. Due meta-analisi [2] sul cancro infantile concludono che l’esposizione alle densità dei flussi magnetici superiori a 0.4 μ T sono correlate ad un incremento del rischio di leucemia infantile. La prima di queste meta-analisi include dati provenienti da 9 continenti e si basa su 3.203 casi e 10.338 controlli. Intorno al valore di 0.4 μ T il rischio relativo è 2.0, con un range da 1.27 fino a 3.13, che è statisticamente significativo. ($p = 0.002$). Questo significa che c’è un rischio 2 volte maggiore di sviluppare la leucemia nei bambini. Fortunatamente, una piccolissima percentuale (0.8%) dei bambini in questi studi è esposta a campi di circa 0.4 μ T.

La seconda meta-analisi si basa su 19 studi condotti a Wartenberg (Berlino), da cui si evince che con l’esposizione diffusa a campi magnetici ci potrebbe essere un incremento dal 15 al 25% del tasso di leucemia infantile.

Negli Stati Uniti fra i 175 e i 240 casi di leucemia infantile potrebbero essere dovuti all’esposizione ai campi ELF.

Per gli adulti, la correlazione tra esposizioni ai campi ELF e leucemia, tumore al cervello e cancro al seno, è rilevante se vista nel suo complesso.

Tra i vari tipi di cancro, quello con il valore di OR maggiore è il cancro al seno nell’uomo. Esiti negativi di gravidanze, aborti spontanei, deformazioni congenite, e malattie alla nascita sono state correlati all’esposizione materna a campi elettromagnetici in ambito lavorativo oltre all’uso di coperte elettriche, letti ad acqua riscaldati, sistemi di

riscaldamento elettrici. Lo sviluppo del tumore infantile (particolarmente del tumore al cervello) e le deformazioni congenite sono state correlate con l'esposizione paterna a campi ELF in ambito lavorativo.

Due studi di Weitheimer e Leeper, uno che esamina l'uso di coperte elettriche e letti ad acqua riscaldati e l'altro che esamina i riscaldamenti elettrici nelle camere da letto, mostrano che la perdita del feto aumenta quando il concepimento avviene durante i mesi di maggiore freddo (da gennaio a febbraio) per i parenti esposti ad una fonte di EMF durante la notte. Le case in cui le coperte elettriche e il riscaldamento elettrico da soffitto non sono usati, non mostrano evidenze stagionali nella perdita fetale. Le coperte elettriche possono generare campi magnetici elevati come 4 μ T a una distanza di 5 cm, e i riscaldamenti elettrici da soffitto producono campi magnetici nell'ambiente approssimativamente di 10 μ T e campi elettrici di 10-50 V/m.

Studi remoti in vivo con i ratti hanno mostrato che l'esposizione a campi elettrici elevati riducono la concentrazione di testosterone nel plasma e riducono la vitalità degli spermatozoi.

Wilkins e Kountras condussero uno studio di tipo "caso-controllo" sui bambini nati nell'Ohio che erano morti di tumore al cervello durante il 1959 e il 1978. Nella maggior parte dei casi di controllo i padri erano assemblatori elettrici, installatori e riparatori (OR 2.7, 95% CI= 1.2-6.1); saldatori e falegnami (OR= 2.7, 95% CI= 0.9-8.1); o contadini (OR= 2.0, 95% CI= 1.0-4.1). Anche se i prodotti chimici non possono essere esclusi come potenziali fattori scatenanti, questi settori (tranne forse l'agricoltura) tendono ad avere la più alta esposizione EMF.

Alcune evidenze sperimentali suggeriscono che la depressione è associata e può essere indotta con l'esposizione a campi elettromagnetici. Gli studi epidemiologici hanno trovato valori elevati di OR relativi ai sintomi simili alla depressione e ai suicidi tra persone che vivono vicino a linee di trasmissione. Poole e coll. (1993) condussero un sondaggio telefonico a persone che vivevano affianco a linee telefoniche prendendo una popolazione di controllo selezionata casualmente dall'elenco telefonico.

Una maggiore percentuale di sintomi di depressione fu registrata tra le persone che vivevano affianco alle linee rispetto alla popolazione di controllo. Il rapporto addizionale fu 2.1 (1.3-3.4, 95% l'intervallo di confidenza).

In contrasto al cancro, pochissimi studi hanno esaminato l'associazione tra l'esposizione occupazionale all'EMF e la malattia di Alzheimer. Un caso di studio controllato [15] includeva 3 serie indipendenti di malattia di Alzheimer:

- non familiare in Finlandia (2 serie)
- California , USA (1 serie)

La malattia di Alzheimer non familiare fu volta a minimizzare le influenze genetiche nell'eziologia della malattia. I rapporti addizionali significativamente elevati (OR 3.9, 1.7-8.9 95% CI) furono osservati per la serie combinata di dati per le femmine che lavoravano per la prima volta come sarte e stiliste.

L'OR per i maschi fu anche al di sopra di 1 (OR 1.9) ma non fu statisticamente significante.

Le macchine da cucire generano campi magnetici molto elevati, molto maggiori rispetto a quelli delle occupazioni elettriche. Più studi si sono focalizzati sulla malattia di Alzheimer e sull'esposizione, ma richiedono l'analisi di maggiori campioni di dati .

Il valore significativo dell'OR in questi studi è inquietante se i risultati possono essere generalizzati ad una popolazione più ampia.

Alcuni studi [16] collegano l'esposizione EMF alla sclerosi laterale amiotrofica (SLA). Tre studi hanno riportato un incremento statisticamente significativo nella SLA, con un rischio relativo da 1.3 a 3.8, per i lavoratori di ambito elettrico. Il California Program EMF classifica le EMF come possibili agenti causali nella SLA. Sia la malattia di Alzheimer che la SLA sono malattie neurodegenerative.

6. CONCLUSIONI E SVILUPPI

Il presente lavoro ha cercato di fornire al lettore una panoramica sui campi ELF artificiali e dei possibili impatti con il corpo umano. Tale tematica comporta notevoli sviluppi in ambito di ricerca, sperimentazione e brevettazione e risulta perciò una tematica sempre più d'interesse da parte dei centri di ricerca universitaria e industriale. Dalla conoscenza dei campi ELF si potranno sicuramente ottenere applicazioni utili in ambito medico e in ambito conoscitivo dell'essere umano. Basti pensare che le onde ELF non sono solo artificiali, infatti, all'interno della ionosfera (strato inferiore della atmosfera terrestre) si rilevano delle onde ELF caratterizzate da una frequenza portante di 7,8 Hz (chiamata risonanza di Schumann), che corrisponde alla frequenza di risonanza dell'ippocampo nei mammiferi. La risonanza [5] è un fenomeno di tipo ondulatorio che avviene quando una vibrazione ne genera un'altra ad essa uguale per fase e frequenza. Le cellule del corpo umano sono in grado di rispondere a frequenze di risonanza

emesse da cellule vicine o sono inficcate a livello di potenziale di membrana da campi magnetici limitrofi. Uno studio recente [3] mostra come dall'analisi dei segnali dell'EEG si evinca che il corpo umano assorbe, rileva e reagisce a segnali ELF e in particolare alla risonanza di Schumann [4]. Rinviamo una trattazione accurata su tali argomenti di interazione umana e onde ELF in successivi lavori.

BIBLIOGRAFIA

- [1] **Bevitori P.** (2007), La schermatura dei campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici, *Franco Angeli*
- [2] **Havas M.** (2004), Biological Effects of Low Frequency Electromagnetic Fields, *Electromagnetic Environments and Health in Buildings. Spon Press, London, 535 pp.*
- [3] **Cvetkovic D., Fang Q. and Cosic I.** (2008), Multiple human electrophysiological responses to extremely low frequency pulsed electromagnetic field exposures: a pilot study, *Estonian Journal of Engineering*, Vol. 14 Issue 2, p.138
- [4] **Cvetkovic D., Fang Q. and Cosic I.** (2006), Human Electrophysiological Signal Responses to ELF Schumann Resonance and Artificial Electromagnetic Fields , *FME Transactions* 34, 93-103
- [5] **Giannini F.** (2010), La cellula e l'organismo: la reazione ai campi magnetici, *Consform Sas Elettromedicali*
- [6] **Havas M.** (2000), Biological effects of non-ionizing electromagnetic energy: A critical review of the reports by the US National Research Council and the US National Institute of Environmental Health Sciences as they relate to the broad realm of EMF bioeffects, *Environmental Reviews* 8:173-253
- [7] **Havas M.** (2002), Intensity of Electric and Magnetic Fields from Power Lines within the Business District of Sixty Ontario Communities, *The Science of the Total Environment*
- [8] **Feliziani M.**, Valutazione dei campi Valutazione dei campi e.m. ad alta frequenza (RF), dei campi elettrici e magnetici ELF e dei campi magnetici statici, *Università de L'Aquila*

- [9] **Solomon E., Berg L., Martin D.** (2013), *Biologia, Edises*, 2013
- [10] **Liburdy R., Sloma T., Sokolic R. and Vaswen P.** (1993), ELF magnetic fields, breast cancer and melatonin: 60 Hz fields block melatonin's oncostatic action on ER positive breast cancer cell proliferation. *Journal of Pineal Research*, 14:89-97.
- [11] **Wilson B.W., Wright C.** (1990), Evidence for an effect of ELF electromagnetic fields on human pineal gland function. *Journal of Pineal Research*, 9:259-269, 1990
- [12] **Liboff A.R., Williams T.** (1984), Time-varying magnetic fields: Effect on DNA Synthesis. *Science* 223:818-820
- [13] **Blackman C.F., Blanchard J.P., Benane S.G., and House D.E.** (1994), Empirical test of an ion parametric resonance model for magnetic field interactions with PC-12 cells, *Bioelectromagnetics* 15:239-260
- [14] **Blackman C.F.** (1985), Effects of ELF (1-120Hz) and modulated (50Hz) RF fields on the efflux of calcium ions from brain tissue in vitro. *Bioelectromagnetics* 6:1-11.
- [15] **Sobel E., Davanipour Z., Sulkava R., Erkinjuntti T., Wikstrom J., Henderson V.W., Buckwalter G., Bowman J.D. and Lee P-J** (1995), Occupations with exposure to electromagnetic fields: A possible risk factor for Alzheimer's disease. *American Journal of Epidemiology* 142:515-523.
- [16] **Deapen, D.M., and Henderson B.E.** (1986), A case-control study of amyotrophic lateral sclerosis. *American Journal of Epidemiology* 123:790-798.

REVIEW ON LOW FREQUENCY ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS

Summary

In this paper is presented the topic of electric and magnetic fields at low frequencies. In particular, in the case study is carried out a review of the literature from the point of view of biological disease, extremely relevant today, for the ever growing popularity of electric and electronic devices in our daily lives.