

IMPLICAZIONI INTERDISCIPLINARI

I MECCANISMI D'INTERAZIONE DEL CAMPO ELETTROMAGNETICO CON I TESSUTI BIOLOGICI

INTRODUZIONE

I campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici (CEM) interagiscono con le cariche della materia e pertanto anche con i tessuti biologici. I tessuti biologici da un punto di vista fisico, si comportano a seconda della frequenza dei campi e del tipo di tessuto, come conduttori più o meno cattivi, oppure come dielettrici con perdite. La dipendenza dalla frequenza e il loro comportamento, dato che in genere non hanno proprietà magnetiche, è descritto da due grandezze fondamentali: la conducibilità elettrica σ e la costante dielettrica assoluta ϵ . Esse si assumono come grandezze scalari dipendenti dalla frequenza. La conoscenza di queste grandezze, ottenuta per mezzo di modelli teorici, o attraverso sperimentazione diretta, consente di affrontare anche per i tessuti biologici i problemi riguardanti l'interazione e la propagazione dei campi in questo particolare mezzo. Nei meccanismi d'interazione sono rilevanti i fenomeni di cessione dell'energia del campo elettromagnetico al tessuto, di spostamento delle cariche elettriche (o polarizzazione), con conseguente alterazione dei campi interni e dei potenziali. Riguardo ai meccanismi di cessione d'energia, l'energia del campo è ceduta alle cariche elettriche (elettroni, ioni, molecole dipolari e multipolari) che sono poste in movimento (traslate o ruotate). Durante il moto le cariche collidono con le altre molecole del tessuto trasferendo così la loro energia meccanica in calore. Inoltre le cariche elettriche, a seconda della loro massa, reagiscono più o meno rapidamente alle variazioni del campo e questo dà luogo a una serie di interessanti fenomeni dipendenti dalla frequenza. A frequenze basse, e per campi elettrici e magnetici quasi statici, sono rilevanti i fenomeni di polarizzazione all'interno dei tessuti biologici e le correnti indotte che si generano. A questo proposito per queste frequenze si può assumere che il campo elettrico e magnetico agiscano indipendentemente. Nei casi in cui ci si trovi in presenza di campi magnetici variabili sono anche importanti le dimensioni del corpo che interagisce con i CEM rispetto alla lunghezza d'onda λ e le orientazioni relative.

CARATTERIZZAZIONE ELETTRICA DEI TESSUTI BIOLOGICI NELL'INTERAZIONE CON I CEM

I tessuti biologici costituiti da fluidi extracellulari contenenti strutture cellulari e intracellulari che si presentano a varie scale dimensionali da 10^{-9} m (per esempio gli ioni e piccole molecole dipolari) fino a 10^{-5} (piccoli gruppi di cellule) e aggregati cellulari aventi dimensioni maggiori di vari ordini grandezza sono caratterizzati da numerose superfici di separazione (membrane cellulari, membrane intracellulari, ecc.) che impediscono in vario grado gli spostamenti liberi o indotti dei costituenti e delle cariche. Le membrane cellulari sono anche considerate le principali strutture dove si esplicano le interazioni tra i campi CEM e i sistemi biologici. Le cellule sono strutture complesse e fortemente disomogenee che racchiudono varie sottostrutture quali nuclei e organelli separati anch'essi da membrane interne, macromolecole proteiche, DNA ecc.. A loro volta le membrane sono costituite principalmente da fosfolipidi combinati con proteine. I fosfolipidi sono composti che mostrano una preponderanza di gruppi non polari, a catena aperta con due lunghe code e un gruppo di testa polare disposti a doppio strato. È evidente che nella interazione con i CEM un tale "miscuglio" è difficile da trattare come somma di singoli costituenti da un punto di vista quantitativo. L'approccio macroscopico consiste allora nel considerare i tessuti come miscugli di differenti costituenti assimilabili a mezzi viscosi e densi a contenuto variabile di acqua, dotati di capacità di termoregolazione (se viventi), nei quali sono in sospensione ioni, molecole e aggregati con distribuzione di carica elettrica.

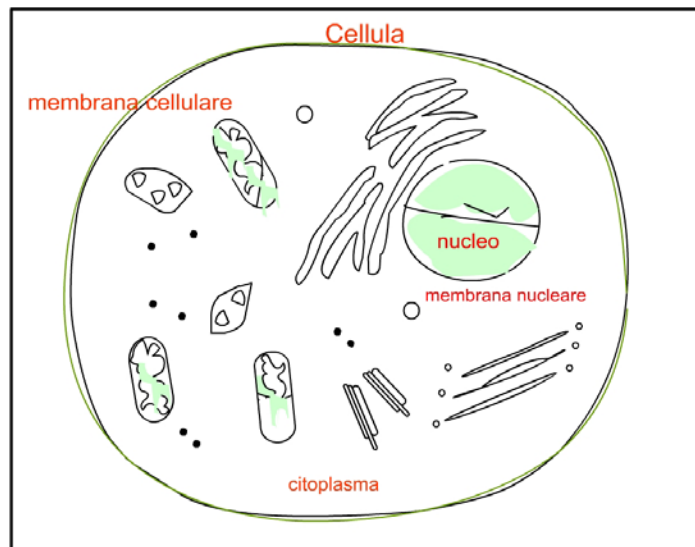


Figura1 - Rappresentazione schematica di una cellula con alcune strutture e organelli interni

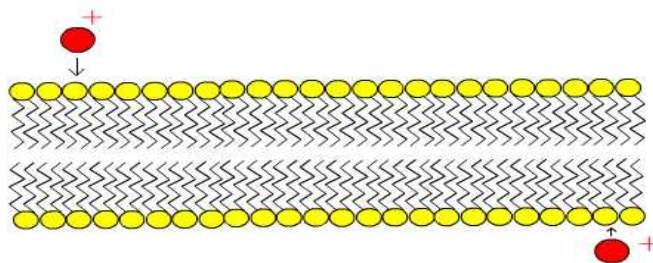


Figura 2 - Rappresentazione schematica della membrana plasmatica (cellulare). Sono riportati anche degli ioni positivi in prossimità delle teste polari idrofile.

Questo miscuglio costituito da differenti ioni, molecole e aggregati molecolari interagisce con il campo elettrico indotto dai campi esterni con due diverse classi di risposta alla sollecitazione: con correnti elettriche di conduzione, tanto più intense quanto maggiore è la conducibilità σ dei tessuti e con effetti di polarizzazione che dipendono in modo non semplice dalla costante dielettrica locale ϵ ;

Da un punto di vista elettromagnetico, relativamente alla frequenza considerata, possiamo pensare ai tessuti biologici come dielettrici capaci di immagazzinare e dissipare energia dei campi elettromagnetici. Pertanto possiamo trattare questo particolare mezzo come un *dielettrico dispersivo e dissipativo*. Per esempio un buon conduttore riflette quasi completamente le onde elettromagnetiche e dissipa energia a causa delle correnti indotte che in esso si producono. Al contrario, un dielettrico è quasi completamente trasparente alle onde elettromagnetiche ma può immagazzinare una parte di energia. I tessuti biologici, in una certa misura, possono fare le due cose. Nella teoria elettromagnetica l'unica grandezza fisica che può tener conto di questi meccanismi è la permittività dielettrica relativa in forma complessa: $\epsilon_{rel} = \epsilon_r - j\epsilon_i$. Infatti il primo termine reale ϵ_r tiene conto dell'accumulo temporaneo dell'energia nel mezzo, il secondo termine ϵ_i , immaginario, chiamato fattore di perdita, è funzione della conducibilità σ . Il termine immaginario è responsabile della dissipazione dell'energia elettromagnetica mentre il rapporto tra i due, che indica se siamo più o meno in presenza di conduttore o di dielettrico, viene indicato in letteratura come tangente di perdita. Pertanto, la determinazione di ϵ_r e σ , alle frequenze di interesse, consente di sapere tutto, o quasi, riguardo alla interazione dell'onda con il tessuto biologico. I valori di ϵ_r e σ sono riportati in un intervallo di frequenza da 0 a 1THz (10^{12} Hz) nella figura 3. È interessante notare che per frequenze basse il tessuto biologico esibisce valori di ϵ_r dell'ordine di 10^6 - 10^7 . Questo vuol dire che un campo elettrico esterno che penetra il tessuto si riduce dello stesso fattore. Per esempio un campo esterno di un 10 kV/m all'interno del tessuto si abbatte fino a ≈ 10 mV/m. Questa peculiarità conferita a tutti gli organismi viventi dalle membrane

cellulari rappresenta una specie di difesa naturale. È proprio in virtù di questa proprietà che, per esempio, gli uccelli si possono posare su una linea ad alta tensione senza riportare danni. Le membrane cellulari e gli altri organelli sub cellulari, quali i mitocondri, nuclei, ecc., fanno sì che ϵ_r dei tessuti sia molto più grande dei singoli costituenti cellulari presi separatamente. Ad esempio il valore di ϵ_r dell'acqua, che costituisce in larga parte i tessuti, è circa 80. Pertanto, la stessa intensità di campo, all'interno di un mezzo come l'acqua, produrrebbe un campo interno con valori almeno 10000 volte maggiori rispetto ai campi interni che si stabiliscono nei tessuti.

Le proprietà amagnetiche insieme alla isotropia dei tessuti biologici, come si è visto, semplificano un po' il problema. Le proprietà elettriche dei tessuti si possono riassumere con le grandezze $\sigma(\omega)$, $\epsilon(\omega)$ riportate in figura 3. La permittività dielettrica ϵ_r dei tessuti decresce con la frequenza secondo l'andamento in figura e, a basse frequenze, presenta dei valori notevolmente più alti, soprattutto se paragonata ai valori dei solidi o liquidi omogenei costituenti gli stessi tessuti. Per esempio, un organismo composto di oltre l'80 % d'acqua e di altri composti che considerati come materiali omogenei hanno dei valori relativamente bassi di permittività dielettrica (ad esempio per l'acqua si ha $\epsilon_r \approx 80$), come aggregati cellulari essi esibiscono valori di $\epsilon_r > 10^6$ alle basse frequenze. In figura 3 si può notare (tratto continuo della curva) che ϵ_r decresce con la frequenza. Sono varie le cause che intervengono per stabilire questa tendenza generale di dispersione del tessuto. Per campi quasi statici il valore di ϵ_r è massimo. Infatti, le cariche ioniche intorno alle membrane determinano i valori della permittività dielettrica del mezzo alle basse frequenze. Tale regione di dispersione è indicata con α e la permittività dielettrica si abbassa di due ordini di grandezza, al crescere della frequenza, in relazione alla mobilità degli ioni intorno alle membrane. Per frequenze ancora più elevate le macromolecole e le cariche delle membrane plasmatiche inclusa la capacità elettrica intrinseca della stessa, subentrano nei processi di interazione dei campi e.m. con i tessuti. Perciò a partire dalle frequenze intorno al kHz, si instaura un altro meccanismo e la costante dielettrica si abbassa ancora di un paio d'ordini di grandezza (regione di dispersione β). È la capacità di membrana che gioca un ruolo piuttosto importante intorno a queste frequenze in queste due regioni di dispersione.

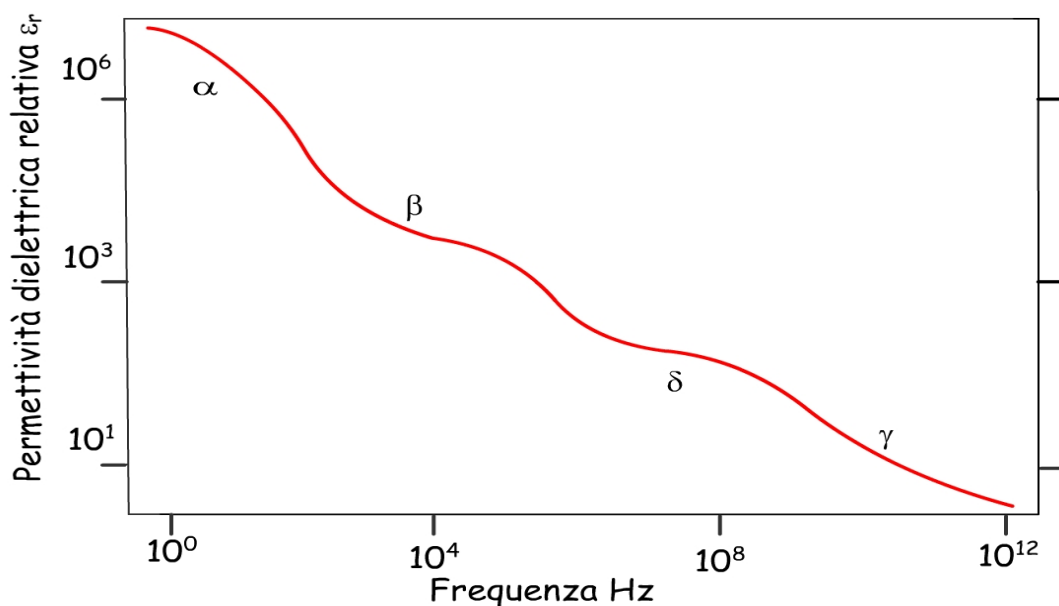


Figura 3 - Escursione dei valori ϵ_r nel campo di frequenza da 1 Hz a 1 THz..

Il meccanismo è qui di seguito brevemente descritto. I campi elettrici a bassa frequenza caricano i mini condensatori della membrana e fanno accumulare le cariche all'interfaccia di separazione di cellule e tessuti (spazio intra-extra cellulare). Al crescere della frequenza comunque il tempo di accumulo di queste cariche in prossimità delle membrane diminuisce (prima che si siano accumulate i campi elettrici si invertono, cambiando verso alle velocità delle cariche) pertanto la permittività dielettrica decresce e questa tendenza permane nel campo di frequenza 10 kHz–100 MHz. Nel campo di frequenza 100-1000 MHz, (regione di dispersione δ) sono i moti di orientazione delle molecole polari dell'acqua legate alle proteine o ad altre strutture cellulari a influenzare il valore di ϵ_r . Questa tendenza si mantiene fino al limite della banda investigata e comunque gli altri cambiamenti della permittività dielettrica si hanno quando i livelli, prima rotazionali e poi vibrazionali delle varie macromolecole polari e dell'acqua cominciano ad essere via via interessati, per frequenze maggiori di 20 GHz (regione di dispersione γ).

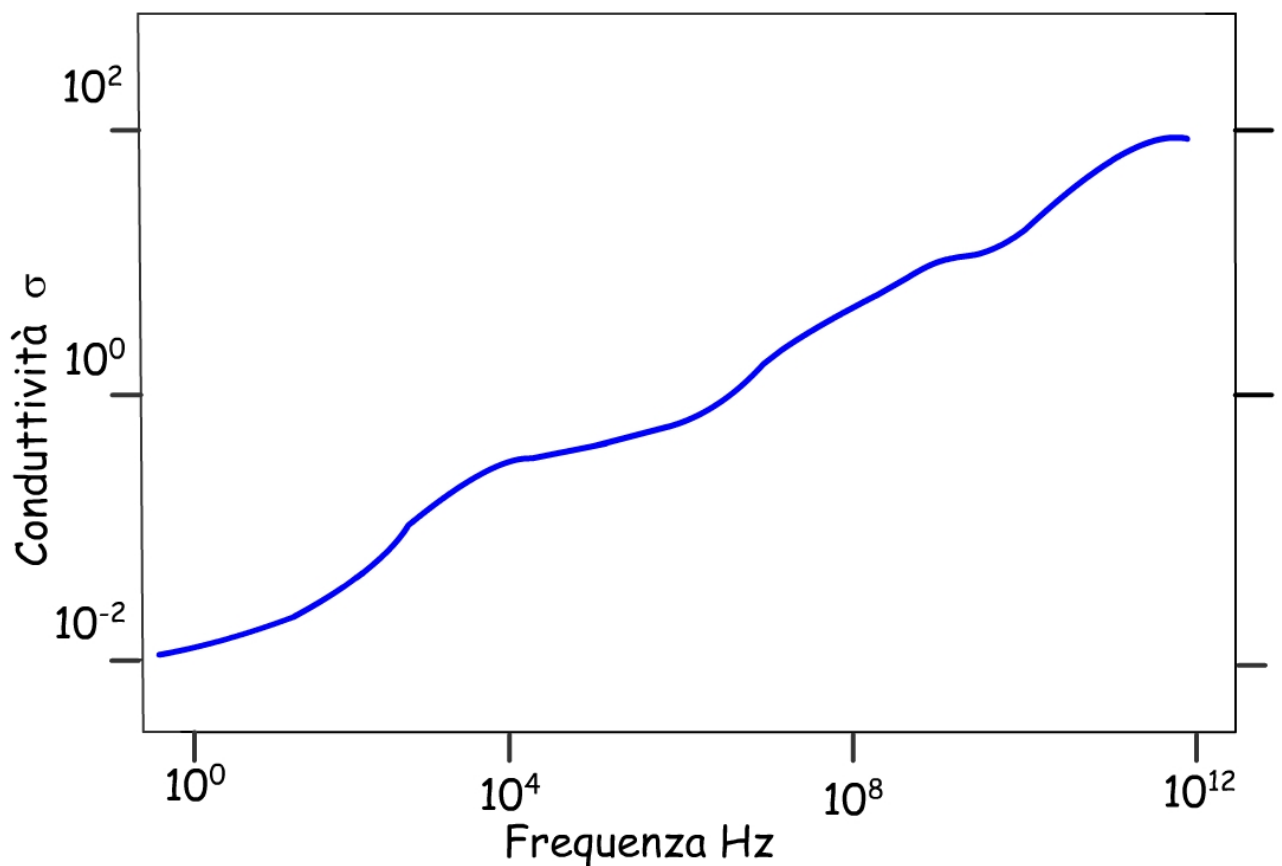


Figura 4 - Escursione dei valori σ nel campo di frequenza da 1 Hz a 1 THz.

Per quanto riguarda la conducibilità σ la sua dipendenza dalla frequenza è descritta dalla curva in figura 4. Vi è una cosiddetta conducibilità σ_{dc} (conducibilità in corrente continua) dovuta agli ioni presenti nel citoplasma e nei fluidi extracellulari. Un secondo tipo di conducibilità è di tipo dispersivo poiché dipende dalla frequenza. Tale conducibilità aumenta con la frequenza. Schematizzando come in un circuito elettrico, i mini condensatori plasmatici a bassa frequenza non si lasciano attraversare dai campi elettrici (impedenza data da $1/\omega C$), essi operano come un filtro di reiezione a bassa frequenza. Pertanto, solo correnti di conduzione relativamente basse possono fluire.

Per frequenze via via crescenti (>1 kHz) i “condensatori plasmatici” cominciano a risultare cortocircuitati lasciando scorrere correnti RF relativamente intense poiché i fluidi intra-extra cellulari partecipano alla conduzione senza essere impediti dalle membrane plasmatiche. Un semplice schema circuitale, con resistenze e capacità intra-extra cellulare, che tiene conto delle caratteristiche elettriche del tessuto biologico. In tale schema semplificato si possono già dedurre le conducibilità σ_{dc} e σ_{RF} e altre caratteristiche dielettriche dovute soprattutto alla presenza della membrana plasmatica

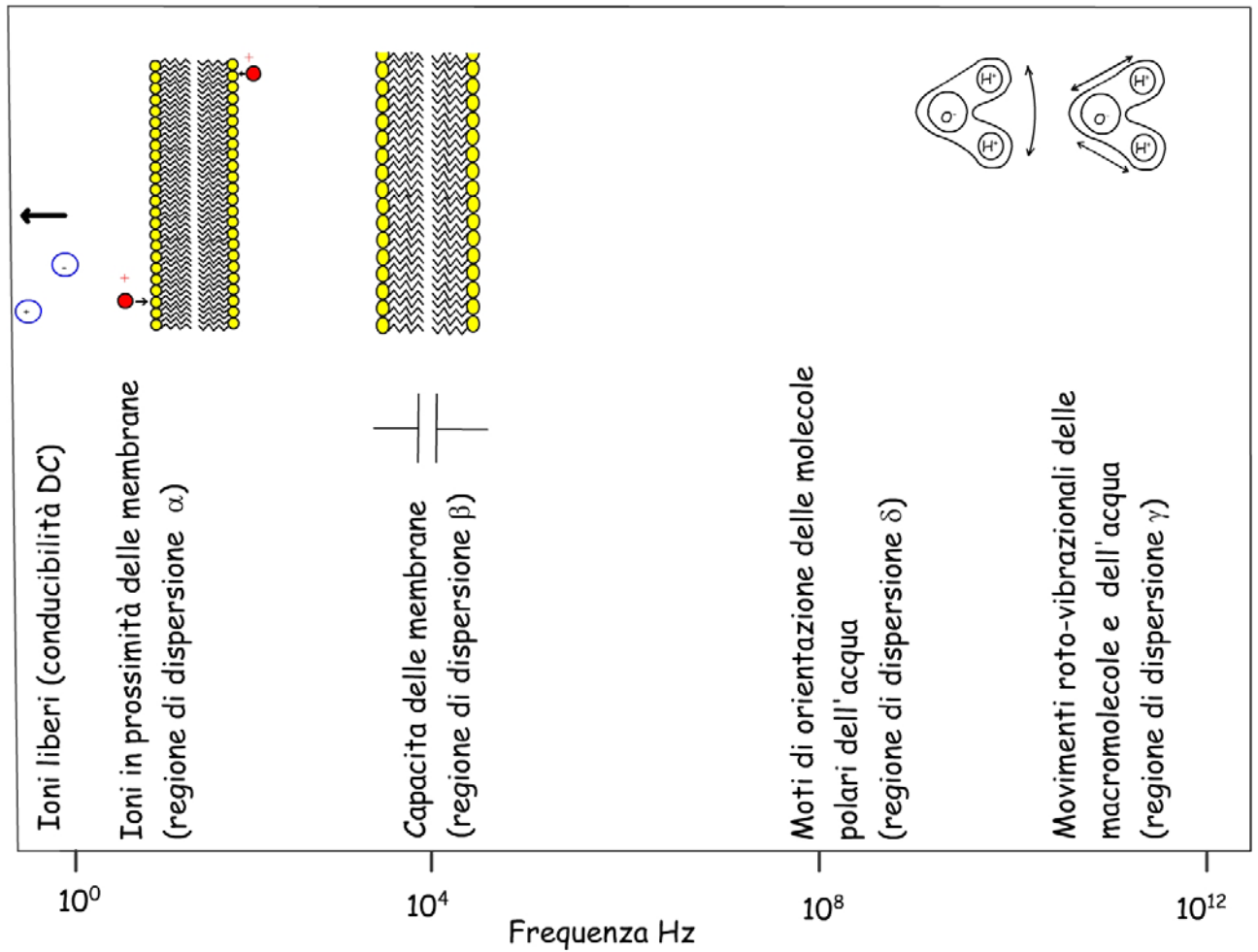


Figura 5. Meccanismi di dispersione e caratteristiche dei tessuti biologici.

A frequenze sempre più elevate è il comportamento della molecola polare dell'acqua a stabilire le condizioni di conduttività. Il comportamento in generale è dominato dal fatto che campi elettrici oscillanti a frequenze sempre più elevate, a causa dell'inerzia delle cariche, perdono di efficacia nel conferire alle stesse cariche, sia la mobilità traslazionale, sia la mobilità rotazionale. La conduttività σ influenza anche la penetrazione dei campi nei tessuti. Partendo dalle frequenze più basse e andando alle frequenze più elevate la profondità di penetrazione δ diminuisce. Pertanto, come abbiamo visto, è soltanto il valore della conduttività elettrica σ in funzione della frequenza che influenza questa grandezza.

Come abbiamo visto, al variare della frequenza variano sia ϵ_r che σ e questo porta a distinguere le varie grandezze di base (grandezze dosimetriche) dei vari campi di frequenza impiegati. Si distinguono per questo i vari campi di frequenza. In maniera sintetica si assume, in genere, che alle basse frequenze, fino a 10 kHz, prevalgano alcuni meccanismi e che le grandezze significative siano la densità di corrente (A/m^2) e la corrente di contatto (A). Mentre alle alte frequenze i meccanismi predominanti sono quelli di tipo termico e le grandezze significative sono il SAR (W/kg), e la densità di potenza (W/m^2). Per questa ragione, nei fenomeni riguardanti l'interazione dei campi elettromagnetici con i tessuti biologici, i due ambiti di frequenza sono trattati separatamente.

I MECCANISMI D'INTERAZIONE ALLE BASSE FREQUENZE

L'interazione dei campi elettrici e magnetici alle basse frequenze si deve ai campi elettrici e magnetici che generano correnti nei tessuti. Questi, non avendo in generale proprietà magnetiche, sono pressoché trasparenti ai campi magnetici. I campi elettrici e magnetici agiscono indipendentemente se le frequenze sono relativamente basse. Inoltre si è quasi sempre in condizioni di campo cosiddetto "vicino". Tali condizioni si realizzano quando la distanza della sorgente dei campi è inferiore a qualche lunghezza d'onda. Il campo magnetico terrestre, di circa 40 micro Tesla, un campo di tutto rispetto, non interagisce significativamente con i tessuti. Per un breve periodo di tempo gli organismi viventi possono sopportare, per quel che se ne sa, fino a diversi Tesla, se il campo di induzione magnetica è statico. Infatti nella risonanza magnetica nucleare (NMR) si arriva fino a qualche Tesla, senza che il paziente sotto esame se ne avveda. Per i campi magnetici variabili il discorso cambia completamente. Tali campi, non interagiscono direttamente con i tessuti che, ovviamente, sono trasparenti anche ai campi magnetici variabili nel tempo. I campi magnetici variabili, però, generano nello spazio, e quindi anche nei tessuti, campi elettrici variabili alla stessa frequenza. Sono poi questi campi elettrici a interagire con le cariche come è stato mostrato. Un paziente sotto esame NMR non sarebbe altrettanto in sicurezza se mancasse l'alimentazione della bobina che produce tale campo. La variazione nel tempo del campo magnetico genererebbe un campo elettrico molto intenso. I campi elettrici esterni all'interno dei tessuti sono ridotti di un fattore ϵ_r . Riassumendo, l'interazione dei campi elettrici e magnetici alle basse frequenze, in particolare alla frequenza di 50 Hz, è caratterizzata dai seguenti aspetti fondamentali:

- l'induzione magnetica \mathbf{B} interna ai tessuti viene assunta uguale a quella esterna \mathbf{B}_o poiché μ non varia rispetto al suo valore nel vuoto ($\mu = \mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m);

- il campo magnetico esterno di induzione \mathbf{B}_o , alla frequenza f , genera per induzione e.m. un campo elettrico interno ai tessuti, alla stessa frequenza f , di intensità proporzionale ad f ;

- il campo elettrico esterno \mathbf{E}_o , alla frequenza f , genera un campo elettrico interno ai tessuti alla stessa frequenza f ridotto di un fattore ϵ_r ;

i due campi elettrici interni danno luogo a densità di corrente \mathbf{J} esprimibili attraverso le seguenti espressioni:

$$\mathbf{J} = K f \mathbf{E}_o \text{ [A/m}^2\text{]} \quad (\text{densità di corrente prodotta dal campo elettrico } \mathbf{E}_o)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \pi r f \mathbf{B}_o \text{ [A/m}^2\text{]} \quad (\text{densità di corrente prodotta dall'induzione esterna } \mathbf{B}_o)$$

essendo K un fattore di forma espresso in [S/Hz] m e r il raggio della "spira" con la quale si concatena il flusso di induzione \mathbf{B}_o .

A titolo di esempio assumendo una conducibilità media per tutti i tessuti pari a 0,1 S/m, gli ordini di grandezza dei campi elettrici interni \mathbf{E}_i e delle corrispondenti densità di corrente \mathbf{J}_i indotti nella testa e nel tronco di un uomo, dai campi esterni imperturbati $\mathbf{E}_o = 1$ kV/m e $\mathbf{B}_o = 1\mu$ T, alla frequenza di 50 Hz sono riportati in tabella.

Campo esterno imperturbato	Volume piccolo assimilabile alla testa di un uomo		Volume medio assimilabile al tronco di un uomo	
	E_i ($\mu\text{V}/\text{m}$)	J_i ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	E_i ($\mu\text{V}/\text{m}$)	J_i ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)
$E_0 = 1 \text{ kV}/\text{m}$	500	50	1500	150
$B_0 = 1 \mu\text{T}$	15	1.5	50	5

Campi elettrici interni e densità di correnti indotte generati dai corrispondenti campi esterni sulla testa e sul tronco di un uomo. Per confronto, le densità di correnti fisiologiche sono dell'ordine dei mA/m^2 . In figura 6 sono schematicamente riportate le correnti indotte che si stabiliscono all'interno del tessuto quando è sottoposto all'azione di un campo elettrico (a) e magnetico (b).

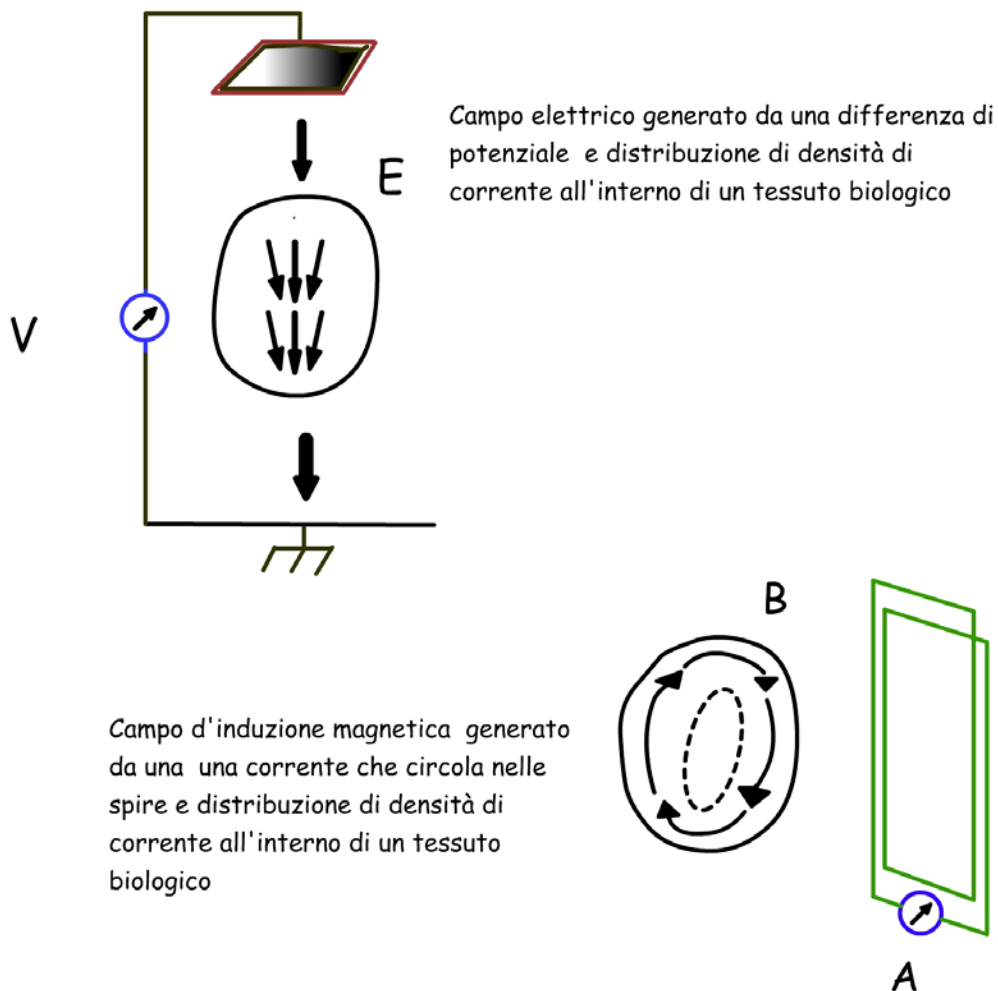


Figura 6 - Esempio di meccanismo d'interazione a bassa frequenza dove prevalgono fenomeni di generazione di correnti indotte da parte dei campi elettrici e magnetici nei tessuti.

In questa breve descrizione, abbiamo poco accennato a tutta una serie di fenomeni di interazione che non mettono in gioco rilevanti densità di corrente e altri fenomeni cosiddetti "atermici". Tali fenomeni riguardano interazioni con campi elettromagnetici a bassa intensità che però producono effetti biologici quali cambiamenti di potenziali delle membrane cellulari, forzano alcuni flussi ionici, orientano proteine e cellule, solo per citare alcuni effetti.

I MECCANISMI D'INTERAZIONE ALLE ALTE FREQUENZE

Un piatto di patate all'interno del forno a microonde ci aiuta a capire i principi dell'interazione dei campi elettromagnetici alle alte frequenze. Il piatto fatto di materiale dielettrico (non conduttore) non assorbe energia e, se non fosse per il contatto diretto con le patate, rimarrebbe freddo. In quanto al contenuto del piatto, le cose vanno un po' diversamente. I campi elettrici delle microonde interagiscono principalmente con le molecole polari d'acqua costringendole a seguire le sue vibrazioni (circa 1 miliardo di vibrazioni al secondo alla frequenza di funzionamento del magnetron). Nel seguire queste oscillazioni le molecole sono anche sottoposte a un attrito molecolare che in definitiva riscalda le patate. Le pareti del forno di ottimo materiale conduttore sono poco scaldate dalle microonde in quanto la profondità di penetrazione interessa solo gli strati molto superficiali del conduttore stesso. Se inavvedutamente mettessimo un pezzo di metallo all'interno del forno in breve tempo questo si scalderebbe a causa delle correnti a radio frequenza indotte nel materiale conduttore.

Questo spiega grossolanamente il comportamento dei dielettrici (piatto), dielettrico dissipativo (patate) e conduttore (metallo).

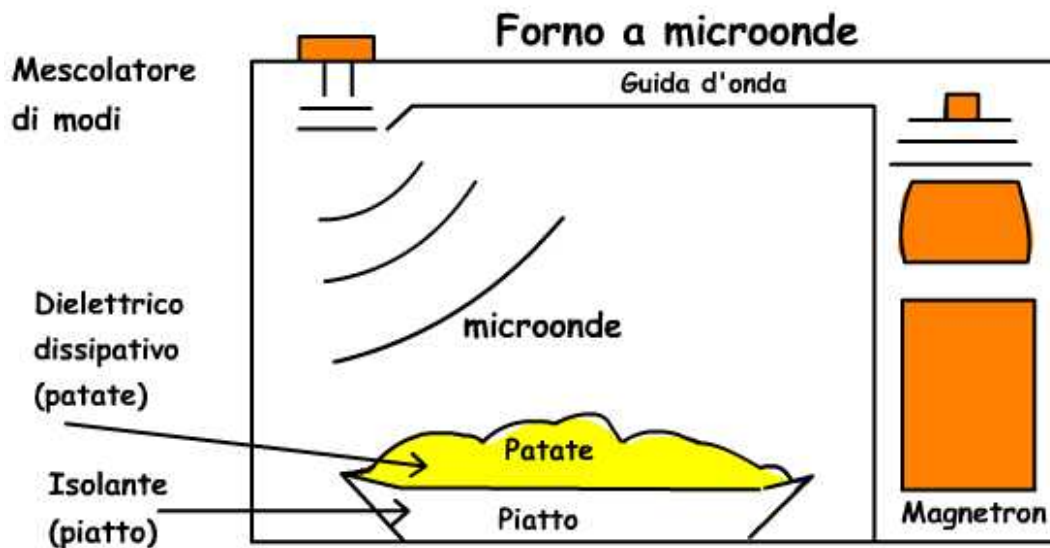


Figura 7 - Esempio di meccanismo d'interazione ad alta frequenza

Quando un'onda elettromagnetica incide su un mezzo biologico, parte di essa viene riflessa e parte viene trasmessa attraverso il mezzo stesso in relazione agli indici di rifrazione, o per rimanere nell'ambito delle grandezze trattate, in relazione a ϵ_r .

La parte della radiazione che si trasmette subisce una attenuazione, e quest'ultima è funzione del fattore di perdita ϵ_i o della conducibilità σ che a sua volta dipende dalla frequenza. La profondità di penetrazione δ , cioè la profondità alla quale il campo si riduce circa al 37% del suo valore, è data da: $\delta = \sqrt{2 / \omega \sigma \mu}$ dove ω è la pulsazione angolare dell'onda incidente ($\omega = 2\pi f$) e μ la permeabilità magnetica. Da quest'ultima si evince che all'aumentare della frequenza, cioè di ω , le onde hanno sempre più difficoltà nel penetrare il mezzo.

Per la classe degli effetti di interesse sanitario è necessario esaminare i meccanismi di interazione dei campi elettromagnetici alle alte frequenze anche dal punto di vista energetico. I meccanismi di interazione riguardano l'attivazione di stati traslazionali, rotazionali e vibrazionali (dipendenti dalla frequenza) di dipoli permanenti o di cariche spaziali (polarizzazioni/oscillazioni) con il ritorno successivo allo stato fondamentale (rilassamento) attraverso scattering o cessione di energia ai vari gradi di libertà possibili. In tale contesto i meccanismi di polarizzazione possibili sono i seguenti:

- polarizzazione atomica (formazione di dipoli);
- polarizzazione molecolare (spostamento delle posizioni di equilibrio dei singoli atomi per azione del campo sulle cariche che realizzano il legame molecolare);
- polarizzazione per orientamento (dipoli permanenti);
- polarizzazione di carica spaziale (distorsione della distribuzione delle cariche elettriche "intrappolate" su interfacce che non possono scaricarsi).

Nell'intervallo indicato (100 kHz - 10 GHz) si instaurano meccanismi di cessione di energia da parte del campo elettromagnetico ai tessuti. La grandezza dosimetrica significativa che rappresenta tali meccanismi è il tasso di assorbimento specifico SAR definito dalla derivata rispetto al tempo dell'energia dw dissipata in un elemento di massa dm di tessuto biologico contenuto in un elemento di volume dv di densità ρ .

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dw}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dw}{\rho dv} \right) \quad [W/kg]$$

Il SAR può essere riferito a due situazioni espositive diverse:

- SAR specifico o locale che è il rateo di energia trasferita ad un elemento ρdv di tessuto;
- SAR medio che è la quantità totale di energia trasferita al corpo nell'unità di tempo divisa per la massa totale M del corpo.

$$SAR \text{ medio} = \frac{w}{M}$$

Questo fenomeno di cessione energetica, in pratica, dipende anche da altri fattori che sono le condizioni di risonanza e la polarizzazione del campo elettromagnetico rispetto alle massime dimensioni del mezzo in esame. Ad esempio in figura 8 è riportato il SAR alle varie frequenze nel caso in cui il campo elettrico sia parallelo alla massima dimensione lineare del corpo.

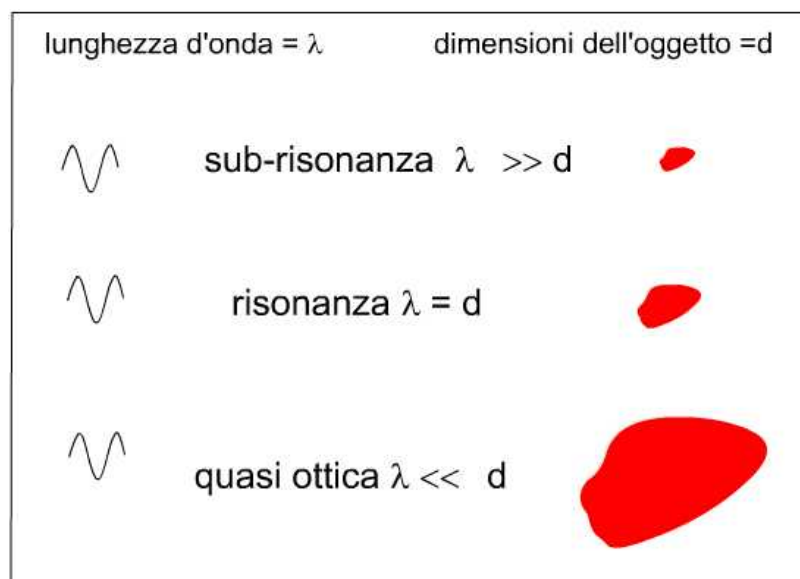


Figura 8 - Fenomeni di risonanza nell'interazione dei campi con i tessuti biologici. In tale contesto è importante anche la polarizzazione (direzione del campo elettrico rispetto alle geometrie in gioco).

I valori massimi dell'assorbimento di energia si hanno nelle condizioni di risonanza. Condizione questa data da: $\lambda_t = d$. Essendo, λ_t la lunghezza d'onda all'interno del tessuto e d le dimensioni massime del corpo. Nelle condizioni di sub-risonanza, cioè quando $\lambda_t \gg d$, la cessione di energia attraverso questo meccanismo è minima. Nelle condizioni di sovrarisonanza $\lambda_t \ll d$, il trasferimento di energia elettromagnetica in calore perde efficacia rispetto ai valori in caso di risonanza. Per frequenze oltre i 20 –30 GHz la grandezza di base più importante diventa la densità di potenza W/m^2 . Come abbiamo visto, per frequenze via via crescenti, la profondità di penetrazione si riduce al millimetro o meno. In tal caso gli effetti sono di natura locale e riguardano essenzialmente la superficie investita.