

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE

Corso di Laurea in
INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Campi Elettromagnetici a Radiofrequenza e Radioprotezione

Relatore
Marco Santagiustina

Laureando
Samuele Calderari

Anno Accademico 2019/2020

Data di laurea: 14 luglio 2020

Indice

Introduzione	2
1 Primo Capitolo	3
1.1 La storia delle onde elettromagnetiche	3
1.2 Caratteristiche delle onde elettromagnetiche	5
2 Secondo Capitolo	9
2.1 La radioprotezione e le grandezze fondamentali	9
2.2 Effetti dell'esposizione a radiazioni RF	12
2.2.1 Effetti acuti di natura termica	12
2.2.2 Effetti cronici per bassi livelli di esposizione	12
2.2.3 Presunti effetti con elevato tempo di latenza di natura tumorale	13
2.3 I principi della radioprotezione	14
2.4 Limiti di esposizione stabiliti dall'ICNIRP	15
2.4.1 Limiti di esposizione per la popolazione in Italia	16
3 Terzo Capitolo	18
3.1 Tipologie di studi sulla cancerogenicità delle radiazioni RF	18
3.2 Evidenze degli studi sulla cancerogenicità delle radiazioni RF	20
3.2.1 Quadro d'insieme sugli studi in vivo	20
3.2.2 Quadro d'insieme sugli studi in vitro	20
3.2.3 Quadro d'insieme sugli studi sulle co-esposizioni	21
3.2.4 Quadro d'insieme sugli studi epidemiologici	21
4 Quarto Capitolo	23
4.1 Il cellulare	23
4.2 Lo studio INTERPHONE	25
5 Quinto Capitolo	29
5.1 Il responso del WHO	29
Conclusione	35
Bibliografia	36

Introduzione

Questo elaborato vuole portare l'attenzione sugli effetti che i campi elettromagnetici, in particolare a radiofrequenza, hanno sulle persone, analizzando e discutendo le vigenti normative di radioprotezione atte a tutelare la salute pubblica.

L'obiettivo di questo lavoro è di descrivere in maniera più oggettiva possibile queste tematiche, oggetto di un forte dibattito soprattutto in questi ultimi anni, cercando di esporre le evidenze scientifiche di cui si dispone, per trarre delle conclusioni.

Il primo capitolo presenta in breve le tappe fondamentali che hanno portato alla scoperta delle onde elettromagnetiche, per poi terminare con la presentazione delle principali caratteristiche di queste ultime.

Il secondo capitolo introduce i principi della radioprotezione, portando l'attenzione sulle onde a radiofrequenza e descrivendone gli effetti misurabili e non, chiarendo il significato delle grandezze fisiche in gioco, in relazione ai limiti di legge attuali.

Il terzo capitolo espone le principali tipologie di esperimenti atti a determinare la pericolosità dell'esposizione a queste radiazioni, riportandone i maggiori risultati e spiegando brevemente il senso delle grandezze statistiche impiegate.

Il quarto capitolo collega le informazioni precedenti, applicandole ad un dispositivo presente nella vita di tutti: il cellulare, facendo riferimento ai risultati di INTERPHONE, uno degli studi più importanti rispetto alla sua possibile correlazione con la carcinogenesi.

Il quinto ed ultimo capitolo illustra il responso dato dal WHO, in particolare dalla IARC, analizzando i criteri con i quali sono state scritte le normative vigenti che tutelano le persone dall'esposizione alle onde a radiofrequenza.

L'elaborato cerca dunque di trarre delle conclusioni e fare chiarezza di fronte alla molteplicità di prese di posizione rispetto ad un argomento di fondamentale importanza nella società attuale, su cui non tutti sono adeguatamente informati.

Primo Capitolo

1.1 La storia delle onde elettromagnetiche

La comprensione delle tappe che portarono alla scoperta delle onde elettromagnetiche è di grande interesse, infatti, in questo caso è avvenuta prima la deduzione teorica e solo successivamente è stata ottenuta la conferma sperimentale.

L'interesse verso lo studio della luce ebbe un forte impulso nella seconda metà del XVII secolo con Isaac Newton, il quale fu tra i primi ad occuparsi dei fenomeni ottici, tra i quali la scomposizione in colori della luce bianca. Grazie ad esperimenti e osservazioni raccolte dal 1672, arrivò alla pubblicazione di un trattato: *Opticks*, nel 1704, il quale consisteva in una raccolta delle sue teorie in merito. In questo testo, Newton sosteneva che la luce fosse costituita da particelle dotate di massa e in questo modo riusciva a dare una spiegazione alle sue ipotesi, formando così la prima teoria corpuscolare della luce.

In opposizione al suo operato, il contemporaneo Christiaan Huygens proponeva una teoria ondulatoria, che venne successivamente rafforzata anche dagli esperimenti di Thomas Young, il quale, seppur ammirasse Newton, dimostrò nel 1801 con il celebre “*esperimento della doppia fenditura*”, che la luce era soggetta al fenomeno dell'interferenza, proprio delle onde. Nonostante il risultato ottenuto, il lavoro di Young non venne accettato dalla comunità scientifica, in particolare dalla Royal Society, fino a quando, vent'anni dopo, il francese Augustin Fresnel portò i risultati dei suoi studi. Quest'ultimo, infatti, dimostrò che la luce si propagava con velocità inferiore se attraversava un mezzo più denso e se fosse stata corretta la teoria corpuscolare di Newton, sarebbe dovuto accadere il contrario.

Dal 1820 fino alla fine del secolo, l'operato della comunità scientifica si orientò verso la comprensione dei fenomeni elettrici e magnetici, abbandonando temporaneamente la ricerca di una teoria della luce.

In primo luogo, il danese Hans Christian Ørsted fu il primo a dedurre una possibile connessione tra le correnti elettriche e il magnetismo, grazie anche alle scoperte nell'elettrodinamica fatte dal francese André-Marie Ampère, da cui la legge relativa ai campi magnetici generati da una corrente, che porta il suo nome.

Un ulteriore contributo fu quello di Michael Faraday, il quale, nel 1831 scoprì il fenomeno dell'induzione elettromagnetica, secondo cui una variazione del flusso di campo magnetico attraverso un circuito conduttore, generava in esso delle correnti indotte.

Questo studio venne completato nel 1834 da Heinrich Friedrich Emil Lenz, il quale intuì che le correnti indotte erano tali da contrastare la variazione di flusso e cercavano dunque di riportare il sistema in una condizione di equilibrio.

Tutte queste scoperte portarono lo scozzese James Clerk Maxwell a formulare una teoria che unificasse i concetti di elettricità e magnetismo, ma che includesse la magnetostatica e l'elet-

trostatica, condensando dunque tutte le leggi dell'elettromagnetismo nel testo: “*A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*”, la cui pubblicazione avvenne nel 1865.

Proprio in questo testo comparvero per la prima volta le equazioni di Maxwell, di cui ne viene ripotata in seguito la versione attuale (dovuta ad Heaviside) valida nel vuoto, in forma differenziale.

1. Legge di Gauss per il campo elettrico: $\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$
2. Legge di Gauss per il campo magnetico: $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
3. Legge di Faraday: $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
4. Legge di Ampère-Maxwell: $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$

Di notevole importanza fu la modifica della quarta equazione, nella quale Maxwell riprese la legge di Ampère, apportandone una correzione rappresentata dall'ultimo termine: la corrente di spostamento. La legge originale, infatti, non funzionava nel circuito RC con un'opportuna scelta della curva chiusa, poiché non giustificava la presenza di una corrente, che Maxwell scoprì essere dovuta ad una variazione del campo elettrico.

Queste equazioni, tuttavia, avevano anche carattere predittivo poiché la loro soluzione risultava essere l'equazione di un'onda: l'onda elettromagnetica, della quale non si aveva ancora una conferma sperimentale.

L'intuizione di Maxwell fu di considerare la luce come un'onda elettromagnetica, dal momento che la soluzione delle equazioni aveva una velocità di propagazione nel vuoto pari a: $c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$, da lui identificata come la velocità della luce nel vuoto, perché il valore che aveva ottenuto era prossimo alla velocità della luce misurata da altri scienziati europei.

Il lavoro di Maxwell fu il punto di partenza per gli studi successivi che, nel 1886, portarono il fisico tedesco Heinrich Rudolf Hertz a confermare sperimentalmente l'esistenza delle onde elettromagnetiche. Quest'ultimo, inoltre, fu il primo a mettere a punto degli strumenti per generare le radiazioni elettromagnetiche e per misurarne alcuni parametri significativi come la frequenza, la lunghezza d'onda e la velocità, facendo un passo decisivo verso il loro impiego nelle telecomunicazioni.

Bisognerà aspettare i primi anni del 1900 affinché le onde elettromagnetiche vengano utilizzate per le comunicazioni wireless a distanza, grazie all'operato di Guglielmo Marconi, il quale sfruttò i risultati ottenuti da Maxwell e da Hertz per creare il primo sistema di radiotelegrafia di scala globale, posando le basi per le telecomunicazioni moderne.

1.2 Caratteristiche delle onde elettromagnetiche

Le onde elettromagnetiche sono onde trasversali costituite da un vettore campo elettrico e da un vettore campo magnetico dipendenti l'uno dall'altro, in accordo con le equazioni di Maxwell. Entrambi i campi vettoriali hanno un andamento sinusoidale, sono in fase, sono ortogonali e si propagano con la stessa velocità.

Sotto l'approssimazione di onda piana e nell'ipotesi in cui il campo elettrico \mathbf{E} sia orientato solo lungo \hat{x} e il campo magnetico \mathbf{H} sia orientato solo lungo \hat{y} , la radiazione elettromagnetica si propaga lungo \hat{z} con le rispettive espressioni:

- $E_x(z, t) = |E_x^+| \cos(\omega t - kz + \varphi_+) + |E_x^-| \cos(\omega t + kz + \varphi_-)$
- $H_y(z, t) = |H_y^+| \cos(\omega t - kz + \varphi_+) + |H_y^-| \cos(\omega t + kz + \varphi_-)$

Partendo da queste equazioni e conoscendo il mezzo in cui si propaga la radiazione elettromagnetica, risulta possibile determinare alcuni parametri fondamentali come la pulsazione ω , la costante di propagazione (o di fase) k e la velocità di propagazione (o di fase) $v_f = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$.

Queste tre grandezze, inoltre, sono legate tra loro dalla seguente relazione: $k = \omega\sqrt{\mu\epsilon} = \frac{\omega}{v_f}$.

Altri parametri degni di nota sono rappresentati dalle ampiezze massime dei due campi, le quali sono in proporzione secondo un coefficiente definito impedenza intrinseca: $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$, tale per cui valgono le relazioni: $H_y^+ = \frac{E_x^+}{\eta}$, $H_y^- = -\frac{E_x^-}{\eta}$ e $\vec{H} = \hat{z} \times \vec{E}$.

Dal momento che si tratta di onde elettromagnetiche, è ragionevole esprimere la velocità di fase nel seguente modo: $v_f = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} = \frac{c_0}{n}$, dove c_0 è la velocità della luce nel vuoto che è pari a circa 300.000 km/s e $n = \sqrt{\mu_r\epsilon_r}$ è l'indice di rifrazione del mezzo attraversato dalla radiazione.

Due ulteriori grandezze fondamentali sono la lunghezza d'onda λ e la frequenza f , entrambe legate alla velocità di propagazione dalla relazione: $v_f = \lambda f$.

Questi ultimi due parametri si utilizzano per classificare le radiazioni all'interno dello spettro elettromagnetico, distinguendo: onde a bassa frequenza, onde radio, microonde, radiazione infrarossa, luce visibile, radiazione ultravioletta, raggi X e raggi γ , rispettivamente da quelle aventi frequenza minore (lunghezza d'onda maggiore) a quelle aventi frequenza maggiore (lunghezza d'onda minore).

Non è tuttavia possibile stabilire un netto confine tra una banda e quelle adiacenti, pertanto vi possono essere delle lievi differenze nella classificazione, a seconda dell'ambito in questione. [1]

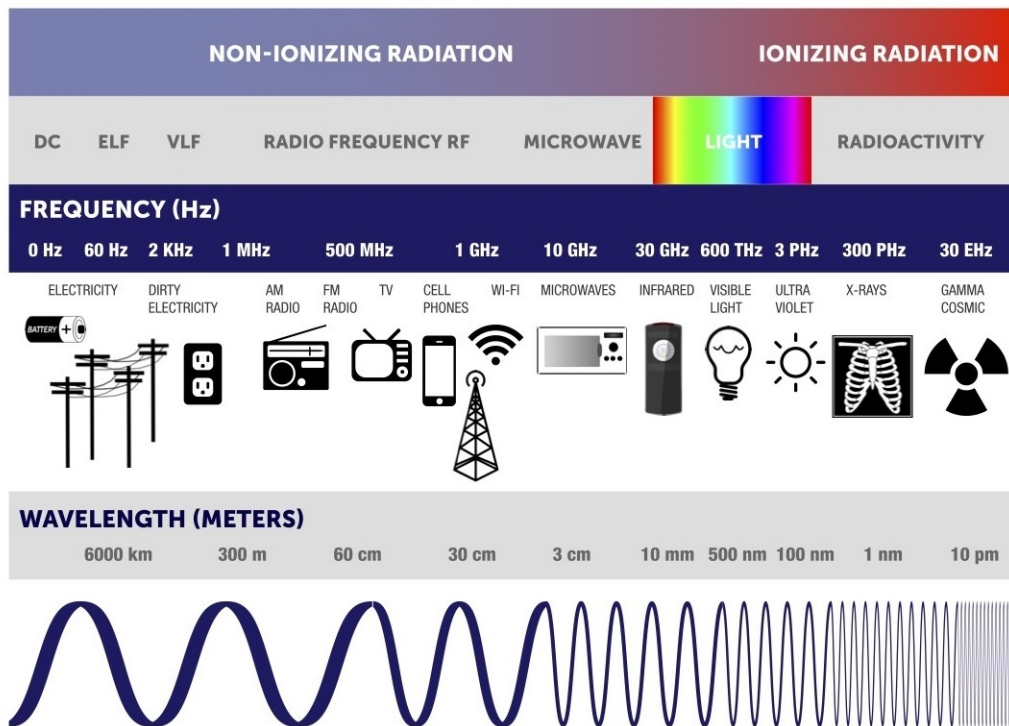


Figura 1.1: Suddivisione dello spettro elettromagnetico in base alla frequenza e alla lunghezza d'onda delle radiazioni (tratto da [2])

In primo luogo, si identificano le onde a bassa frequenza e le onde radio: le prime si estendono fino alla soglia di 100 kHz, le altre ricoprono la banda rimanente sino alla frequenza di 300 GHz.

Queste due porzioni di spettro elettromagnetico sono a loro volta suddivise in varie sottocategorie, a seconda delle rispettive applicazioni.

In particolare, partendo dalle basse frequenze, si possono individuare nell'ordine: frequenze minori di 3 Hz, ELF (3 – 30 Hz), SLF (30 – 300 Hz), ULF (300 Hz – 3 kHz), VLF (3 – 30 kHz) ed infine LF (30 – 300 kHz).

Le applicazioni di queste onde vanno dalla rilevazione magnetotellurica della struttura della Terra, passando per la distribuzione dell'energia elettrica, per i servizi di navigazione e per la radiolocalizzazione, fino ad arrivare ai radiofari.

Nella fascia successiva si possono identificare le onde a frequenza intermedia MF (300 kHz – 3 MHz), utilizzate per la radiodiffusione AM.

Per frequenze maggiori di 3 MHz, invece, si parla di onde ad alta frequenza e si possono distinguere nell'ordine: HF (3 – 30 MHz), VHF (30 – 300 MHz), UHF (300 MHz – 3 GHz), SHF (3 – 30 GHz), EHF (30 – 300 GHz), tra le quali sono incluse anche le microonde, che si estendono da 300 MHz a 300 GHz.

Anche in questo caso le applicazioni sono svariate e vanno dalla radiodiffusione a onde corte e FM, passando per la telefonia cellulare, per i segnali TV e per i forni a microonde, arrivando fino alle comunicazioni radar e alla radioastronomia.

Il blocco successivo è quello della radiazione infrarossa (IR), che si estende da 300 GHz fino a 430 THz e, pur non essendo visibile all'occhio umano, risulta percettibile sotto forma di calore, basti pensare che circa il 40% della radiazione solare viene emessa nella regione infrarossa dello spettro elettromagnetico.

Grazie anche alla proprietà sopra citata, vi sono molteplici applicazioni di questa radiazione,

in particolare in ambito militare, ad esempio nell'acquisizione di bersagli, nella sorveglianza e nei dispositivi di visione notturna.

Nelle frequenze da 430 THz a 750 THz si estende l'intervallo di luce visibile, che rappresenta la più piccola frazione dello spettro elettromagnetico, l'unica ad essere percettibile dall'occhio umano.

La luce visibile, inoltre, rappresenta il 50% della radiazione solare emessa ed è fondamentale per garantire la vita sulla Terra. Queste onde trovano un utilizzo sia in ambito naturale, con il processo di fotosintesi attuato dalle piante, sia in ambito artificiale, con l'utilizzo di pannelli fotovoltaici in grado di produrre elettricità.

L'impiego maggiore dunque, è lo sfruttamento dell'energia trasportata da queste onde, dal momento che è molto maggiore rispetto a quella trasportata dalle onde radio.

La fascia successiva è quella della radiazione ultravioletta (UV), che copre la banda di frequenze da 750 THz a 30 PHz e rappresenta l'ultima porzione (ca. 10%) di radiazione solare emessa.

La radiazione ultravioletta vanta molteplici applicazioni, tra le quali l'identificazione di batteri all'interno del cibo avariato o la rilevazione di falsi nelle opere d'arte. Quest'ultimo impiego, in particolare, sfrutta la proprietà dei materiali di emettere fluorescenza se investiti da onde ultraviolette e a seconda della loro datazione, emettono radiazioni di colore diverso.

Le onde con frequenze che vanno da 30 PHz a 30 EHz sono denominate raggi X e trovano impiego in ambito medico, ma a causa dell'elevata energia trasportata da queste radiazioni, sono in grado di provocare mutazioni del DNA e quindi l'esposizione va limitata allo stretto necessario.

Un'altra applicazione di queste radiazioni sono i telescopi a raggi X, utilizzati in astronomia, i quali riescono a rilevare e analizzare questi raggi provenienti dallo spazio profondo.

L'ultimo intervallo è rappresentato dai raggi γ , i quali ricoprono le frequenze maggiori di 30 EHz e sono in grado di attraversare completamente la materia.

Questi raggi possono essere emessi da nuclei radioattivi come conseguenza di transizioni tra due livelli energetici e pertanto si manifestano in molte reazioni nucleari.

I fotoni di queste radiazioni possiedono un'energia da 10.000 a 10.000.000 di volte superiore a quella trasportata dalla luce visibile e per questo sono estremamente dannosi per l'uomo.

Nonostante lo spettro elettromagnetico sia così vasto, solo una parte riesce ad oltrepassare le regioni dell'atmosfera, in particolare risultano osservabili dalla Terra buona parte delle onde radio e la luce visibile. I raggi γ , i raggi X e la radiazione ultravioletta, invece, vengono interamente bloccati.

Dal momento che la maggior parte di queste radiazioni risulterebbero dannose per gli esseri viventi, l'atmosfera ha una funzione protettiva e anche per questo motivo l'evoluzione non ha sviluppato gli organi sensoriali atti a percepirle. [1]

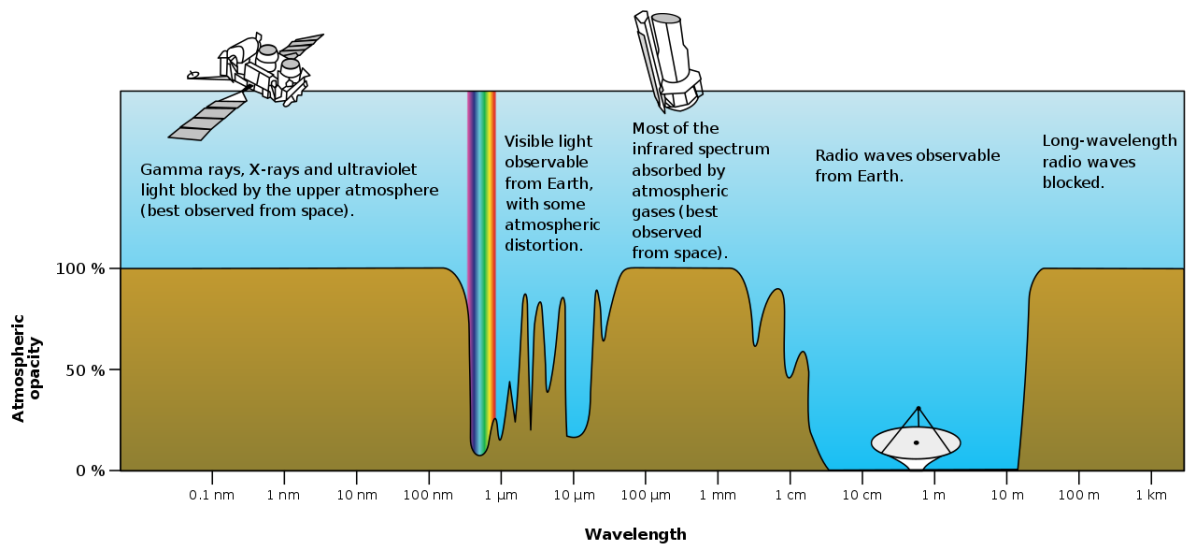


Figura 1.2: Livello di assorbimento delle radiazioni appartenenti alle varie regioni dello spettro elettromagnetico da parte dell'atmosfera (tratto da [3])

Per gli argomenti che verranno trattati in seguito, è utile suddividere lo spettro elettromagnetico in radiazioni ionizzanti e non ionizzanti.

Le prime includono i raggi ultravioletti a frequenza maggiore, i raggi X e i raggi γ , mentre le altre comprendono tutte le categorie sottostanti.

Le radiazioni ionizzanti sono denominate così perché trasportano abbastanza energia per separare gli elettroni dagli atomi e dalle molecole colpite, ionizzandoli.

Secondo Capitolo

2.1 La radioprotezione e le grandezze fondamentali

Come accennato in precedenza, nello spettro elettromagnetico è possibile distinguere le radiazioni non ionizzanti e quelle che invece sono in grado di ionizzare la materia.

Proprio per queste ultime è stato necessario creare delle norme per regolamentarne l'esposizione, dal momento che è certo che siano estremamente dannose per l'uomo.

Per quanto riguarda le prime, non c'è ancora chiarezza e per questo motivo meritano una trattazione più approfondita.

Per affrontare queste tematiche, grazie alla scoperta degli effetti nocivi delle radiazioni ionizzanti avvenuta intorno al 1920, nacque il concetto di radioprotezione.

“La **radioprotezione** è la disciplina che studia i metodi per salvaguardare l'uomo dai danni biologici che radiazioni di qualunque genere possono provocare.” [4]

Alla luce di tutto ciò, nel 1928 venne istituita un'organizzazione internazionale, che nel 1950 prenderà il nome di ICRP (International Commission on Radiological Protection), il cui scopo è di emanare raccomandazioni sul valore della dose massima di radiazione che può essere assorbita dall'uomo senza danno.

Di fondamentale importanza è stata anche l'istituzione dell'ICRU (International Commission on Radiological Units), la quale si è occupata della definizione delle grandezze e delle unità di misura che intervengono nella radioprotezione, tra cui si denotano: la dose assorbita, la dose equivalente, la dose efficace e il SAR.

Le prime tre grandezze sono relative alle radiazioni ionizzanti, l'ultima è propria delle radiazioni a radiofrequenza e viene così definita:

“Nella fisica sanitaria, il **SAR** (Specific Absorption Rate) è la misura del tasso di assorbimento di energia da parte del corpo umano esposto a radiazioni ed è espressa in watt al chilogrammo (W/kg).” [5]

Il SAR è definito dalla relazione: $SAR_V = \frac{\int_V \frac{1}{2} \sigma(\mathbf{r}) |\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2 dV}{\int_V \rho(\mathbf{r}) dV} = \frac{\text{Potenza EM assorbita nel volume } V}{\text{massa del volume } V}$, nella quale si denotano le seguenti grandezze:

- $\sigma(r)$ è la conducibilità elettrica equivalente del campione
- $|E(r)|$ è il valore massimo dell'intensità del campo elettrico
- $\rho(r)$ è la densità del campione
- V è il volume del campione

Tipici volumi di riferimento per la valutazione del SAR sono:

- Volumetti di 1g di massa (SAR_{1g})
- Volumetti di 10g di massa (SAR_{10g})
- La testa (SAR_{head} , SAR_H)
- Il corpo intero ($SAR_{\text{whole-body}}$, SAR_{WB})

La stima del SAR indotto dall'esposizione a campi elettromagnetici è un problema molto complesso, perché dipende da molti fattori come:

- Vicinanza alla sorgente
- Rapporto lunghezza d'onda/dimensione del corpo
- Polarizzazione del campo rispetto alla posizione del corpo
- Forma del corpo
- Posizione rispetto ad un piano di massa
- Proprietà elettromagnetiche dei tessuti
- Proprietà termiche/biologiche dei tessuti (ad esempio gli occhi sono poco vascolarizzati e quindi soggetti a più facile riscaldamento)

Per questi motivi, vengono utilizzati dei modelli analitici grazie ai quali è possibile approssimare il corpo umano con volumi omogenei di varia forma (sfere, sferoidi prolatti, ellissoidi, cilindri) e si calcola la potenza assorbita nell'ipotesi di irraggiamento da un'onda piana uniforme. In questo modo si riescono ad ottenere stime qualitative sulla dipendenza del fenomeno dai vari parametri.

Un'ulteriore grandezza degna di nota per la stima del SAR è lo spessore di penetrazione, definito come la distanza attraverso un materiale alla quale il modulo del campo elettrico diminuisce di un fattore $\frac{1}{e}$ rispetto al valore sulla superficie. Quest'ultimo parametro è dato dalla relazione: $\delta_S = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega \epsilon}{\sigma}\right)^2 - \frac{\omega \epsilon}{\sigma}}}$, in cui si può individuare un primo termine come quello

dell'approssimazione di buon conduttore e un secondo termine che rappresenta un fattore di correzione nel momento in cui cade l'ipotesi appena citata; lo spessore di penetrazione si misura in metri (m).

I tessuti del corpo umano, infatti, sono approssimabili come buoni conduttori fino a frequenze di qualche decina di MHz, ma per frequenze più alte questo non è più valido, dunque bisogna utilizzare l'espressione completa della costante di attenuazione α . [6]

La figura 2.1 riportata in seguito conferma l'analisi relativa allo spessore di penetrazione, evidenziando l'inadeguatezza dell'approssimazione di buon conduttore per i tessuti corporei, a partire da frequenze di alcune decine di MHz. In questo caso, infatti, si rileva un significativo aumento dello spessore di penetrazione, in particolare per quanto riguarda il tessuto adiposo.

Dalla figura 2.2 si rileva una riflessione quasi totale del campo elettrico incidente sui principali tessuti corporei fino alle frequenze dell'ordine del MHz, per frequenze maggiori si rileva una progressiva diminuzione del coefficiente di riflessione, specialmente nel tessuto adiposo, il quale arriva a riflettere meno della metà della radiazione per frequenze dell'ordine del GHz.

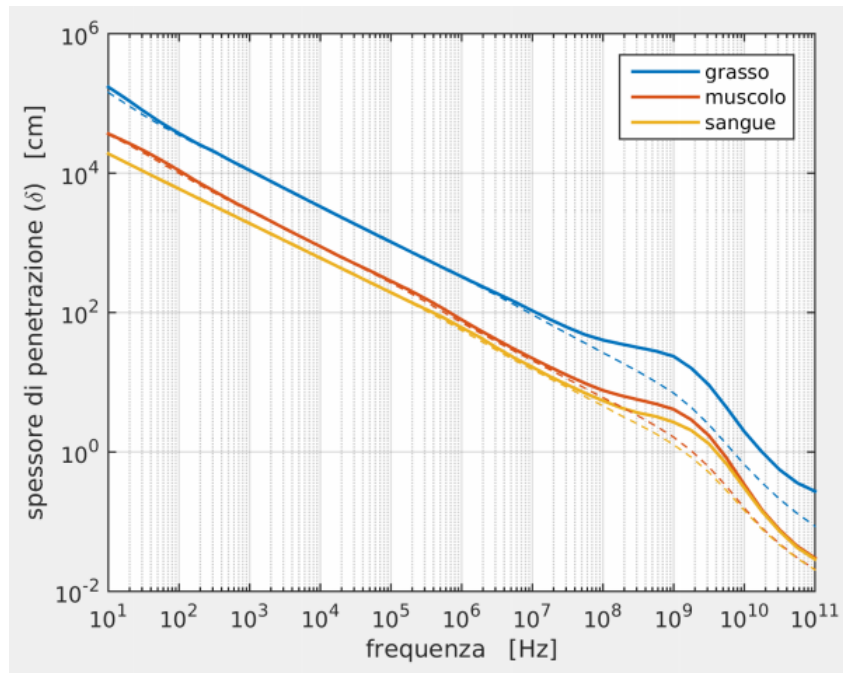


Figura 2.1: Spessore di penetrazione calcolato per incidenza normale in funzione della frequenza; le curve tratteggiate si riferiscono alla formula approssimata per i buoni conduttori (tratto da [6])

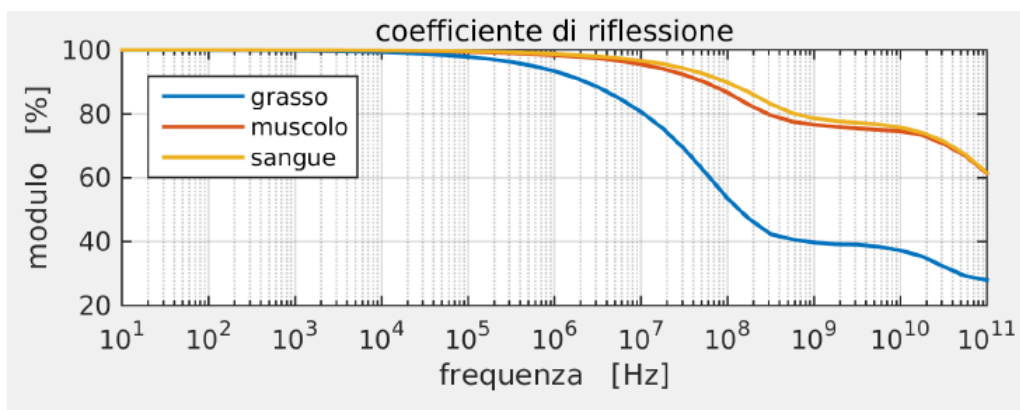


Figura 2.2: Coefficiente di riflessione del campo elettrico per incidenza normale, in funzione della frequenza (tratto da [6])

2.2 Effetti dell'esposizione a radiazioni RF

Analizzando gli effetti sanitari sull'uomo delle radiazioni elettromagnetiche a radiofrequenza, che sono stati accertati o ipotizzati, si possono individuare:

1. effetti acuti di natura termica
2. effetti cronici per bassi livelli di esposizione, un tempo definiti non termici
3. presunti effetti con elevato tempo di latenza di natura tumorale.

2.2.1 Effetti acuti di natura termica

Questa categoria di effetti è osservabile in seguito ad un forte aumento delle correnti indotte nel corpo o in un prolungato aumento della temperatura, che può determinare danni localizzati agli organi più sensibili al calore come il cristallino (cataratta) e i testicoli (sterilità).

Studi dosimetrici ormai consolidati ed affidabili consentono di stabilire una corrispondenza tra questi aumenti di corrente indotta e di temperatura e l'intensità dei campi elettromagnetici esterni, attraverso due grandezze fisiche: la densità di corrente e il SAR.

I campi elettromagnetici a radiofrequenza d'elevata intensità possono dar luogo, come detto, ad effetti acuti chiaramente documentati e ben compresi, ma i normali livelli d'esposizione cui la popolazione è soggetta negli ambienti di vita, sono di gran lunga inferiori ai livelli di soglia per questo genere di effetti.

Per esempio, nel caso delle stazioni radio base utilizzate per la telefonia mobile, le basse potenze irraggiate e le caratteristiche molto direzionali dell'emissione, che lasciano relativamente in ombra (cioè non esposte) le aree accessibili in vicinanza delle antenne, portano senz'altro ad escludere un effetto di riscaldamento dei tessuti in qualsiasi condizione di esposizione.

Affinché si verifichino effetti di questo genere sono necessarie esposizioni a dosi rilevanti agli organi bersaglio (valori di SAR almeno di alcune decine di W/kg) per tempi di esposizione piuttosto prolungati. [7]

2.2.2 Effetti cronici per bassi livelli di esposizione

Questi effetti sono caratterizzati da alterazioni biologiche, da modificazioni transitorie di proprietà elettriche e magnetiche delle molecole e delle cellule senza effetti dimostrabili o collegabili ai fenomeni biofisici.

Tra le patologie segnalate da alcuni studi si denotano: mal di testa, depressione, sonnolenza e convulsioni epilettiche, tutte attribuite al fenomeno di "electricity hypersensitivity", in cui però non c'è una chiara relazione con l'esposizione ai campi elettromagnetici a radiofrequenza. La Comunità Scientifica Internazionale, pertanto, è giunta alla conclusione che i dati scientifici finora disponibili non forniscono un'adeguata dimostrazione di un reale rapporto causa-effetto tra campi elettromagnetici e comparsa di "electricity hypersensitivity" e che le conoscenze sul possibile meccanismo (o sui meccanismi) alla base di queste patologie sono del tutto inadeguate. Quest'ultima sindrome, quindi, non risulta ad oggi posta in relazione all'esposizione a campi elettromagnetici.

Le uniche evidenze degli effetti delle radiazioni a radiofrequenza, invece, sono state individuate in alcune categorie di lavoratori addetti ai radar, alle radio e alle telecomunicazioni, a carico del sistema nervoso centrale, del sistema neurovegetativo e del sistema cardiocircolatorio, soltanto per esposizioni prolungate nel tempo (molti anni) ad intensità di campo elettromagnetico di svariate decine di volt per metro. [7]

2.2.3 Presunti effetti con elevato tempo di latenza di natura tumorale

In un limitato numero di studi epidemiologici, è stata suggerita una connessione tra l'esposizione a campi elettromagnetici a radiofrequenza in ambienti di vita e di lavoro ed un aumento del rischio di cancro.

Tali studi ipotizzano che le radiazioni emesse dai cellulari e in minor parte dalle stazioni radiobase, possano agire come agenti promotori di neoplasie, se combinati con la vicinanza alla sorgente ed il tempo prolungato di esposizione.

Gli studi epidemiologici sugli effetti tumorali dell'esposizione a radiofrequenze pubblicati fino ad oggi non consentono però di formulare valutazioni conclusive, a causa dell'eterogeneità dei disegni di indagine, delle carenze nelle valutazioni dell'esposizione e delle insufficienti dimensioni numeriche delle popolazioni in studio. [7] [8]

La prima categoria precedentemente descritta rappresenta gli effetti fisici che si possono misurare, le altre due si possono raggruppare nei cosiddetti effetti biologici, per i quali è nettamente più complicato trarre delle conclusioni oggettive e attendibili. Per questo motivo, diventa importante distinguere gli effetti biologici in effetti di tipo stocastico e deterministico.

Gli effetti stocastici sono caratterizzati da una probabilità di accadimento in funzione della dose ricevuta e dall'assenza di qualsiasi valore di soglia per la loro manifestazione; per essi, non è possibile stabilire a livello individuale un nesso di causalità tra effetto osservato e dose ricevuta. Gli effetti deterministici si verificano, invece, soltanto quando la dose eccede determinati valori e la loro gravità dipende dalla dose ricevuta. I valori di soglia dei vari effetti deterministici sono di norma conosciuti e sempre piuttosto elevati in confronto con i livelli di dose oggi riscontrabili nelle situazioni di maggior interesse pratico. [4]

2.3 I principi della radioprotezione

Alla luce della classificazione proposta al paragrafo precedente, si può definire l'obiettivo centrale della radioprotezione, il quale riguarda la limitazione degli effetti stocastici (per es., carcinogenesi). Per fare ciò, l'ICRP ha definito i seguenti tre principi relativi alle radiazioni ionizzanti, successivamente riadattati anche per quelle a radiofrequenza:

- Principio di giustificazione
- Principio di ottimizzazione
- Principio del limite di dose

Il primo principio è così formulato: “nuovi tipi o nuove categorie di pratiche che comportano un'esposizione alle radiazioni ionizzanti debbono essere giustificati, anteriormente alla loro prima adozione o approvazione, dai loro vantaggi economici, sociali o di altro tipo rispetto al detrimento sanitario che ne può derivare” (D.Lgs. 230/95 art. 2 comma 1).

In altre parole, è necessario fare un accurato bilancio tra i benefici di ogni tipo, inclusi quelli economici, ottenibili per mezzo delle attività in esame e i rischi ad essa connessi, ritenendo giustificate le sole attività che comportino un beneficio netto e dimostrabile per la società o per gli individui esposti.

Per ottimizzazione si intende che: “qualsiasi pratica deve essere svolta in modo da mantenere l'esposizione al livello più basso ragionevolmente ottenibile, tenuto conto dei fattori economici e sociali” (D.Lgs. 230/95 art. 2 comma 3).

Secondo l'impostazione dell'ICRP una corretta applicazione dei primi due principi dovrebbe essere sufficiente a garantire un'efficace protezione dalle radiazioni, soprattutto ai fini della tutela della sanità a livello generale.

Poiché ciò in taluni casi potrebbe non garantire una sufficiente protezione del singolo, specie per le esposizioni dovute alla combinazione di più di una pratica, è stato introdotto il terzo principio, secondo cui, sempre nella forma recepita dalla legislazione italiana: “La somma delle dosi derivanti da tutte le pratiche non deve superare i limiti di dose stabiliti per i lavoratori esposti, gli apprendisti, gli studenti e gli individui della popolazione” (D.Lgs. 230/95 art. 2 comma 4).

Dal momento che è sempre più diffuso l'impiego di dispositivi che emettono campi elettromagnetici di frequenza inferiore alla soglia di ionizzazione, è nata la necessità di regolamentare anche l'esposizione a queste ultime radiazioni.

Uno tra gli organismi internazionali che si occupano di protezione dalle radiazioni non ionizzanti è l'ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), istituita nel 1992, la quale ha riproposto i primi due principi e ha modificato l'ultimo in accordo con i limiti di dose per l'esposizione a queste radiazioni. [9]

2.4 Limiti di esposizione stabiliti dall'ICNIRP

La definizione dei limiti di dose per le radiazioni non ionizzanti stabiliti dall'ICNIRP avviene attraverso un approccio scientifico sequenziale, il quale viene riportato in seguito:

1. Revisione sistematica della letteratura
2. Individuazione degli effetti nocivi
3. Identificazione dell'effetto critico
4. Applicazione di coefficienti di riduzione
5. Definizione delle restrizioni di base
6. Derivazione dei livelli di riferimento

Affinché risulti possibile definire standard di esposizione di documentabile efficacia è fondamentale l'esistenza di effetti nocivi scientificamente dimostrati, con relazioni dose-risposta ben caratterizzate in termini qualitativi e quantitativi.

Si considerano scientificamente dimostrati gli effetti documentati da evidenze epidemiologiche e/o sperimentali affidabili (non imputabili a errori o distorsioni), riproducibili (replicati in modo indipendente e/o consistenti tra studi con diverso disegno), comprensibili in termini di meccanismo d'interazione e coerenti con altre conoscenze scientifiche pertinenti.

Alla luce di queste considerazioni, si possono distinguere due tipologie di limiti:

- per gli effetti deterministici viene identificato un valore soglia di esposizione
- per gli effetti stocastici viene definito un livello accettabile di rischio

Questi limiti vengono calcolati applicando opportuni fattori di riduzione al livello di esposizione relativo all'effetto critico (effetto nocivo evidenziato al più basso livello di esposizione), tenendo conto, quindi, dell'inevitabile incertezza delle stime di rischio e della variabilità individuale nelle risposte biologiche.

Dal momento che gli standard internazionali per i campi a radiofrequenza sono finalizzati alla prevenzione degli effetti nocivi accertati, sono stati presi in considerazione solamente gli effetti deterministici, per i quali è stato possibile identificare un valore soglia. Il livello critico di esposizione per questi effetti corrisponde ad un tasso di assorbimento specifico di energia mediato sul corpo intero pari a 4 W/kg.

Le linee guida ICNIRP, in particolare, prevedono restrizioni di base in termini di SAR e livelli di riferimento in termini di intensità del campo elettrico in volt al metro (V/m), come evidenziato dal grafico sottostante.

Le restrizioni di base per i lavoratori corrispondono a valori di SAR pari a 0,4 W/kg per le esposizioni a corpo intero e a 10 W/kg per esposizione localizzate, invece, per la popolazione generale i corrispondenti valori di SAR sono 0,08 W/kg e 2 W/kg. Si noti che il valore limite del SAR a corpo intero per il pubblico corrisponde a un cinquantesimo (1/50) del valore critico. Queste restrizioni sono indipendenti dalla banda di frequenza perché si riferiscono direttamente all'energia assorbita che, convertita in calore all'interno del corpo, può provocare danni da surriscaldamento generale o locale.

A causa dei meccanismi di accoppiamento del campo elettromagnetico con il corpo umano, però, a parità di livello di campo esterno, l'assorbimento di energia varia in funzione della frequenza e per questa ragione le linee guida prevedono livelli di riferimento di intensità del campo elettrico variabili per frequenza. [10]

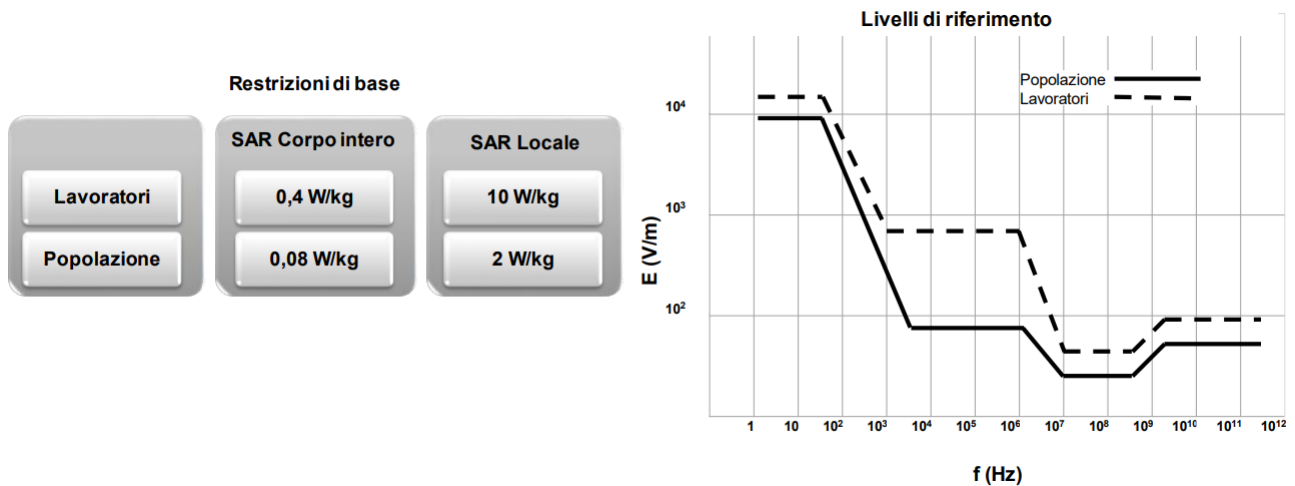


Figura 2.3: Restrizioni di base in termini di SAR e livelli di riferimento per l'intensità di campo elettrico secondo le linee guida ICNIRP (tratto da [10])

Nonostante le linee guida precedentemente esposte, l'ICNIRP ha lasciato totale libertà ai singoli stati di individuare dei limiti per la propria area di competenza.

In particolare, l'Unione Europea ha adottato gli standard sopra riportati per la prevenzione dei rischi per la salute dovuti all'esposizione a campi a radiofrequenza, sia per la popolazione generale (Raccomandazione 1999/519/CE), sia per i lavoratori (Direttiva 2013/35/UE).

Paesi come l'Italia, invece, hanno preferito adottare misure più restrittive, come descritto in seguito.

2.4.1 Limiti di esposizione per la popolazione in Italia

Per quanto riguarda la popolazione generale, con il DPCM 8/7/2003 relativo ai campi elettromagnetici a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz, la normativa italiana ha recepito gli standard ICNIRP per la maggior parte delle fonti di esposizione a radiofrequenza, ad esclusione delle sorgenti fisse radiotelevisive e per le telecomunicazioni. Per queste particolari sorgenti, infatti, sono stati fissati limiti più restrittivi pari a 20 V/m nell'intervallo delle frequenze compreso tra 3 MHz e 3 GHz, nonché valori di attenzione e obiettivi di qualità.

I valori di attenzione consistono nel livello di riferimento di 6 V/m da non superare nelle aree a permanenza prolungata (> 4 h); gli obiettivi di qualità, invece, prevedono che lo stesso valore di riferimento di 6 V/m sia rispettato anche in aree esterne intensamente frequentate, quali luoghi destinati ad attività sociali.

A seguito delle modifiche al DPCM 8 luglio 2003 introdotte dalla Legge 221/2012, sia i valori di attenzione sia gli obiettivi di qualità, sono da intendersi non più come valori mediati su sei minuti, ma come valori mediati nell'arco delle 24 ore.

La scelta del legislatore italiano di individuare valori di attenzione e obiettivi di qualità in termini di livelli di campo elettrico inferiori a quelli fissati per i limiti, deriva da un approccio di tipo cautelativo, nel tentativo di limitare ipotetici rischi di effetti a lungo termine, pertanto, il fattore di riduzione è completamente arbitrario. [10]

Frequenza (MHz)	ICNIRP Livello Riferimento	ITALIA Valore Limite	ITALIA Valore attenzione e obiettivo qualità
10-100	28 V/m	20 V/m	6 V/m
915	42 V/m		
1800	58 V/m		
2000-2700	61 V/m		

Figura 2.4: Confronto tra i limiti vigenti in Italia e i livelli di riferimento ICNIRP per le bande di frequenza utilizzate dagli emittenti radiotelevisivi e da impianti per le telecomunicazioni (tratto da [10])

Alla luce dei valori sopra riportati, bisogna considerare che il valore di attenzione di 6 V/m previsto dalla normativa italiana, va applicato in tutte le abitazioni e uffici, pertanto, risulta essere anche il livello di riferimento valido nelle aree urbanizzate.

Tenendo conto della tipica variabilità dei livelli di emissione da impianti quali le stazioni radio base, i livelli massimi di esposizione consentiti dalla normativa nazionale sono quindi, nelle aree urbane, di gran lunga inferiori a quelli fissati dall'ICNIRP, risultando dieci volte più bassi alle frequenze di circa 2 GHz (2000 MHz), tipiche di alcuni sistemi di telefonia mobile. [10]

Terzo Capitolo

3.1 Tipologie di studi sulla cancerogenicità delle radiazioni RF

Gli effetti termici delle radiazioni elettromagnetiche a radiofrequenza sono ben accertati, a tal punto che i limiti di esposizione a queste ultime sono ben noti, come descritto nel capitolo precedente.

Per quanto riguarda gli effetti biologici ed in particolare la possibilità di rischi per la salute dovuti ad esposizioni a lungo termine, invece, non ci sono risultati chiari. Vengono dunque proposte le conclusioni tratte dai maggiori studi effettuati, portandone alcuni esempi significativi. Questi studi sono definiti: sperimentali, se vengono effettuati su animali da laboratorio (studi in vivo) o su sistemi biologici isolati (studi in vitro); osservazionali, se vengono effettuati direttamente sugli esseri umani (studi epidemiologici). [10]

Gli studi in vivo permettono di rilevare effetti nocivi di agenti chimici o fisici a carico di diversi organi e sistemi, pertanto rappresentano la metodologia più idonea per una valutazione tossicologica accurata. In particolare, i punti di interesse analizzati negli studi di carcinogenesi su animali consistono nella crescita, nella sopravvivenza, nell'incidenza di tumori (benigni e maligni) e nella frequenza di specifiche neoplasie accertate mediante analisi istopatologiche.

Questi studi utilizzano topi e ratti da laboratorio aventi corrispondenze genomiche con l'uomo tra il 70 e il 90%, i quali rappresentano un ottimo punto di riferimento per quelle che sarebbero le evidenze sugli umani. Questi roditori, inoltre, hanno una vita media breve e si riproducono rapidamente, permettendo così di condurre studi transgenerazionali, monitorando attività comportamentali e misurando bio-indicatori ed effetti dipendenti dall'età.

Gli studi in vitro, invece, vengono effettuati su sistemi biologici isolati, quali colture cellulari o componenti sub-cellulari. A differenza degli studi in vivo, essi consentono un'analisi più dettagliata dei parametri in esame, sono più rapidi, relativamente meno costosi e presentano minori limitazioni riguardo alle condizioni di esposizione da testare.

I risultati di tali studi, tuttavia, non sono semplici da interpretare e non sono direttamente correlabili alla valutazione del rischio, poiché i sistemi isolati mancano dei meccanismi omeostatici dell'organismo nella sua interezza.

Gli studi sperimentali precedentemente descritti si prestano, inoltre, a valutare l'effetto di esposizioni combinate da radiazioni a radiofrequenza e altri agenti chimici o fisici (co-esposizioni). Tali studi, sebbene meno numerosi, sono di grande interesse sia perché riproducono le condizioni reali di esposizione delle persone (di solito esposte contemporaneamente a più di un agente), sia perché forniscono informazioni utili alla valutazione di eventuali meccanismi non-termici d'interazione tra campi elettromagnetici e biosistemi.

Gli studi epidemiologici, invece, sono molto efficaci perché vengono effettuati direttamente sulle persone, ma richiedono molto tempo (anche decenni) e possono essere compromessi da fattori confondenti, che ne influenzano i risultati. Questi studi, inoltre, sono studi statistici, pertanto, è necessario definire alcune grandezze che si riveleranno utili per la comprensione dei risultati riportati in seguito. [10]

Data seguente tabella contenente i dati relativi alla popolazione osservata:

	Numero di Malati	Numero di Non Malati
Esposti	a	b
Non Esposti	c	d

Tabella 3.1: Schema rappresentante i dati della popolazione osservata

In primo luogo, si identifica il **rischio relativo** (RR, Risk Rate) come il rapporto tra la frequenza della malattia tra chi è stato esposto e tra chi non è stato esposto.

Esso è esprimibile dalla relazione: $RR = \left[\frac{a}{a+b} \right] / \left[\frac{c}{c+d} \right]$.

Nel caso in cui $RR > 1$, si identifica un rischio maggiore di contrarre la patologia in esame, tuttavia, statisticamente parlando, RR indica una correlazione significativa se maggiore di 2 o 3 (ad esempio nel caso del fumo di tabacco RR vale circa 30). [11]

Un secondo parametro è il **rapporto di probabilità** (OR, Odds Ratio), definito come il rapporto tra la probabilità di incontrare la malattia se si è esposti e la probabilità di ammalarsi in assenza di esposizione; si esprime con la relazione: $OR = \left[\frac{a}{b} \right] / \left[\frac{c}{d} \right]$.

Anche in questo caso, un valore dell'OR > 1 sta a significare che il fattore di rischio può essere implicato nella comparsa della malattia, con l'accorgimento prima citato. [12]

Un'ulteriore grandezza è il **rapporto d'incidenza standardizzato** (SIR, Standardized Incidence Ratio), ovvero una stima della presenza di una malattia in una popolazione, rispetto a quanto ci si potrebbe aspettare in una popolazione di confronto più ampia designata come "normale" o media.

Esso si può identificare come: $SIR = \frac{\text{casi osservati che incontrano la malattia}}{\text{casi che ci si aspetta si ammalino in condizioni "normali"}}$.

Un ultimo valore è il **rapporto di mortalità standardizzato** (SMR, Standardized Mortality Ratio), identificabile come una stima della mortalità di una malattia in una popolazione, rispetto a quanto ci si potrebbe aspettare in una popolazione di confronto più ampia designata come "normale" o media.

Esso è definito dalla relazione: $SMR = \frac{\text{numero di decessi osservati}}{\text{numero di decessi che ci si aspetta in condizioni "normali"}}$.

Per questi ultimi due casi, un valore di SIR o SMR pari a 1, indica un'incidenza di incontrare la malattia / morire pari a quella di una popolazione media, maggiore è il valore e maggiore è il numero di volte con cui l'effetto analizzato si manifesta rispetto ad una popolazione "normale". [13] [14]

Tutte queste grandezze risultano valide una volta definito un intervallo di confidenza (CI, confidence interval), ovvero un intervallo all'interno del quale ricade con una certa probabilità (solitamente 95%) la stima del parametro.

Tutti gli studi epidemiologici, infine, sono tali per cui se il campione analizzato è piccolo, sono poco significativi e se è grande, diventa difficile controllare tutti i parametri del problema.

3.2 Evidenze degli studi sulla cancerogenicità delle radiazioni RF

3.2.1 Quadro d'insieme sugli studi in vivo

In sintesi, gli studi sperimentali sugli animali non hanno evidenziato la presenza di effetti cancerogeni dovuti all'esposizione a radiazioni RF, ad eccezione di casi isolati e poco chiari, di cui ne viene riportato un esempio in seguito. Queste conclusioni si possono trarre non solo dagli studi meno recenti, che possono essere considerati meno precisi dal punto di vista dei protocolli e dei sistemi di esposizione, ma il tutto è stato confermato anche negli studi degli ultimi dieci anni, i quali sono ben strutturati e sono basati su tecniche dosimetriche più accurate.

Nonostante questo, tra il 2016 e il 2018 si sono conclusi due grandi studi sperimentali su ratti da laboratorio (più di 2400 esemplari) condotti dal National Toxicology Program (NTP) negli USA e dall'Istituto Ramazzini in Italia, i quali forniscono alcune evidenze a supporto dell'ipotesi di cancerogenicità dei campi elettromagnetici a radiofrequenza.

Entrambi gli studi riscontrano un incremento di gliomi maligni e di una rara tipologia di neoplasia (schwannoma cardiaco) tra gli animali esposti rispetto ai non esposti, mentre non viene evidenziato alcun eccesso per quanto riguarda i numerosi altri tipi di tumore esaminati. Sia nello studio italiano, sia in quello statunitense, gli incrementi di schwannomi cardiaci interessano esclusivamente i ratti maschi, ma non i ratti femmina, mentre per i gliomi maligni vale il viceversa, pertanto questi incrementi sono limitati al sesso dei ratti. In questi due studi, inoltre, l'aumento d'incidenza è stato osservato in corrispondenza di livelli di esposizione non confrontabili, perché molto diversi tra loro: 6 W/kg in termini di SAR_{WB} nello studio dell'NTP, a fronte di 0,1 W/kg nello studio dell'Istituto Ramazzini. Questi valori, tra le altre cose, sono più elevati dei limiti di legge stabiliti dall'ICNIRP, i quali prevedono un limite di 0,08 W/kg per la popolazione generale e anche per questo il fenomeno di carcinogenesi non è così rilevante. Lo studio portato avanti dall'Istituto Ramazzini afferma, inoltre, di aver riscontrato un aumento statisticamente significativo degli schwannomi cardiaci dovuti ad un'esposizione a radiazioni caratterizzate da un campo elettrico di intensità pari a 50 V/m, ad una frequenza di 1,8 GHz. Anche se in questo caso il limite delineato dall'ICNIRP pari a 58 V/m è maggiore, lo studio analizzava i ratti dopo un'esposizione a tutto corpo per 19 ore al giorno, da vita prenatale a morte spontanea, che è nettamente superiore all'esposizione alla quale sono sottoposte le persone.

In conclusione, questi due nuovi studi forniscono evidenze sicuramente importanti, ma non sembrano né modificare in modo sostanziale il quadro d'insieme delle evidenze scientifiche riguardo il potenziale rischio cancerogeno da esposizione ai campi elettromagnetici a radiofrequenza, né ridurre le incertezze che tuttora sussistono su questa problematica.

I risultati forniti da questi studi possono tuttavia dare indicazioni per ulteriori ricerche a riguardo. [10] [15]

3.2.2 Quadro d'insieme sugli studi in vitro

In una considerevole percentuale degli studi in vitro disponibili non sono stati evidenziati danni al DNA a seguito dell'esposizione a radiazioni a radiofrequenza. Nonostante ciò, da alcune indagini sono emerse delle alterazioni genetiche, ma l'effetto sembra esser dipeso dal tipo cellulare e dai parametri elettromagnetici impiegati (frequenza, modulazione del segnale).

Risulta particolarmente interessante notare, che in molti degli studi che riportano effetti, siano state individuate anomalie del fuso mitotico, indicatori di danno al DNA transitorio e riparabile.

Al contrario, nella maggior parte degli studi che non riportano effetti, sono state evidenziate aberrazioni cromosomiche, indicatori di danno al DNA permanente e irreparabile. [10]

3.2.3 Quadro d'insieme sugli studi sulle co-esposizioni

Per quanto riguarda gli studi sulle co-esposizioni a radiazioni a RF e ad agenti chimici o fisici, i risultati sono in contraddizione, dal momento che sono stati rilevati aumenti, riduzioni o nessun effetto dell'esposizione a queste onde indipendentemente dallo specifico protocollo sperimentale adottato.

Poiché il numero di questi studi è limitato e i protocolli di co-esposizione sono numerosi (differenti trattamenti chimici e fisici, differenti condizioni di esposizione, differenti tipi cellulari, differenti parametri biologici esaminati) non è possibile al momento trarre conclusioni definitive e la rilevanza dei risultati per la salute umana è poco chiara. [10]

3.2.4 Quadro d'insieme sugli studi epidemiologici

Per quanto riguarda gli studi epidemiologici, non portano a risultati chiari sulla correlazione tra l'esposizione di campi a radiofrequenza e l'incremento del tasso di carcinogenesi nella popolazione interessata. Questo è evidenziato sia dai maggiori studi riguardanti le stazioni radiobase riportati nella seguente tabella, sia dagli studi relativi al cellulare che verranno trattati in maniera più dettagliata al capitolo successivo, perché di rilevanza maggiore. [10]

Studio	Fonte di esposizione	Esito	Distanza	Risultati
Maskarinec 1994 <i>Hawaii</i>	Trasmittitori radio a bassa frequenza	Incidenza	0-2.6 miglia	OR=2.0 (0.06-8.3) vs >2.6 miglia
Hocking 1996 <i>Sydney (Australia)</i>	Antenna TV	Incidenza	n.d.	RR=1.58 (1.07-2.34)
		Mortalità	n.d.	RR=2.32 (1.35-4.01)
Dolk 1997a <i>UK</i>	TV e radio FM	Incidenza	0-2 km	SIR=1.12 (0.61-2.06)
Dolk 1997b <i>Sutton Coldfield (UK)</i>	TV e radio FM	Incidenza	0-2 km	29.7 casi attesi
McKenzie 1998 <i>Sydney (Australia)</i>	Antenna TV	Incidenza	n.d.	RR=1.38 (0.99-1.91) per $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Cooper 2001 <i>Sutton Coldfield (UK)</i>	TV e radio FM	Incidenza	0-2 km	SIR=1.13 (0.03, 6.27)
			0-10 km	SIR=1.08 (0.71, 1.59)
Michelozzi 2002 <i>Cesano (Italia)</i>	Stazione radio	Incidenza	0-6 km	SIR=2.2 (1.0-4.1)
Park 2004 <i>Corea</i>	Trasmittitori radio AM	Mortalità	n.d.	SMR=2.29 (1.05-5.98)
Merzenich 2008 <i>Germania Ovest</i>	Trasmittitori radio/TV	Incidenza	0-2 km	OR=1.04 (0.65-1.67) vs 10-15 km

Tabella 3.2: Riassunto dei maggiori studi epidemiologici relativi alle stazioni radiobase, con i relativi esiti (tratto da [16])

Dall'analisi dei risultati sulle stazioni radiobase, infatti, si può notare che i valori di RR e OR, rientrano tutti in un range di qualche unità, che a fini statistici non rappresentano risultati molto significativi.

Per quanto riguarda gli studi che hanno riportato un esito di SIR e SMR di qualche unità, essi mostrano una correlazione tra esposizione a radiazioni a radiofrequenza e l'insorgere di alcuni

tumori, ma queste correlazioni sono deboli (e quindi probabilmente dovuti a fluttuazioni statistiche), inconsistenti, (ci sono casi in cui il valore di SIR è compreso tra 0 e 1, ciò significherebbe un'incidenza minore rispetto ad una popolazione "normale") e nel complesso non mostrano un aumento del rischio all'aumentare dell'esposizione.

La bassa qualità di alcuni studi (quelli meno recenti) è una probabile causa delle correlazioni trovate e, tra le altre cose, gli studi non coinvolgono un numero di persone sufficienti a determinare in modo attendibile eventuali effetti deboli dovuti a queste esposizioni.

In conclusione, nonostante sia disponibile una grande quantità di studi sugli effetti delle radiazioni a radiofrequenza, i risultati ottenuti non sembrano identificare una correlazione tra la carcinogenesi e tali esposizioni. Laddove questa sembra esserci, risulta debole e spesso associata a fluttuazioni statistiche e quindi non si può considerare attendibile.

Quarto Capitolo

4.1 Il cellulare

Alla luce delle informazioni presentate nei capitoli precedenti, si dedica questo capitolo all'analisi dell'esposizione dovuta all'uso di un dispositivo che è sempre più presente nella vita di tutti: il cellulare.

In uno studio del 2016 si stimava che nel 2020 vi sarebbero stati 5,4 miliardi di persone in possesso di un cellulare e questo dato è ancora più impressionante se messo in relazione ad altri dati riportati nel grafico sottostante.

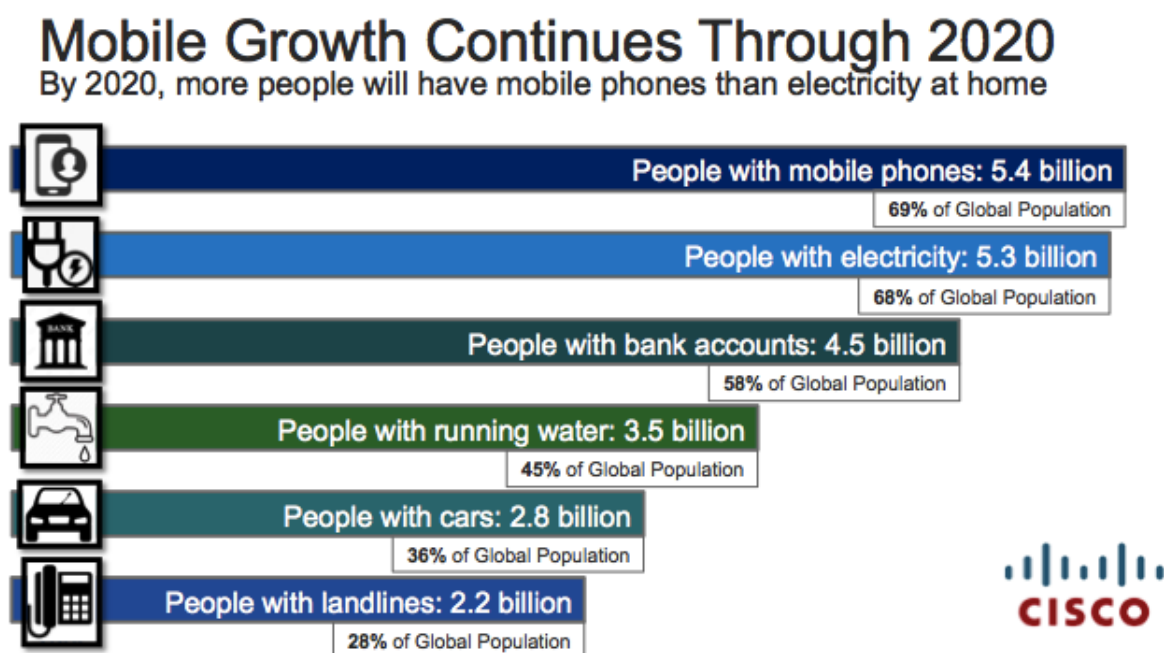


Figura 4.1: Confronto tra numero di persone che possiedono il cellulare e numero di persone in possesso di altri beni di maggiore necessità (tratto da [17])

Il rapido sviluppo di questa tecnologia e l'elevata diffusione che è stata riscontrata in pochi anni, hanno dato luogo alla necessità di stabilire delle normative per regolamentare l'emissione di radiazioni da parte di questi dispositivi.

I cellulari, infatti, sono sorgenti di radiazioni appartenenti alla fascia delle radiofrequenze, in particolare trasmettono nell'intervallo da 450 a 2700 MHz e l'esposizione a cui gli utenti sono soggetti, presenta caratteristiche ben precise: è episodica, discontinua e molto localizzata.

L'esposizione si può definire episodica, perché ha luogo solo se il cellulare viene utilizzato, infatti, nella modalità stand-by, questi dispositivi emettono segnali di brevissima durata e ad intervalli di diverse ore, rappresentando così un contributo trascurabile all'esposizione dell'utente.

Per quanto riguarda la discontinuità, si fa riferimento all'andamento della potenza emessa dal dispositivo durante le chiamate vocali, il quale è tutt'altro che costante, in quanto dipende da molti fattori, ma presenta comunque un valore medio molto basso rispetto al valore massimo (di picco), avente durata molto limitata.

In primo luogo, il sistema è costantemente in grado di identificare quale dei due interlocutori della conversazione sta parlando, trasmettendo il segnale solo in questo caso e, di conseguenza, non attiva il canale di trasmissione quando si è in ascolto. Un'ulteriore caratteristica, è data dalla capacità di calibrare i livelli di potenza trasmessa, in funzione della distanza da una stazione radio base, in particolare si avrà una potenza minima in prossimità di queste stazioni e la potenza trasmessa sarà massima ai margini della cella di copertura.

Nonostante questo, effettuare una telefonata in presenza di barriere che schermano il segnale o in una zona con scarsa copertura, porterà ad un aumento consistente delle radiazioni emesse dal cellulare, rispetto ad essere in condizioni di buona ricezione. L'esposizione a queste radiazioni, pertanto, è soggetta a molte variazioni dovute a vari fattori, tra i quali l'efficienza della copertura di rete del territorio gioca un ruolo fondamentale.

L'esposizione alle radiazioni emesse da questi dispositivi, infine, è strettamente localizzata, a tal punto che, durante una chiamata con il cellulare appoggiato all'orecchio, l'assorbimento di energia è confinato all'area della testa a stretto contatto con la sorgente, con spessore di penetrazione nei tessuti dell'ordine di qualche centimetro (Si veda la figura 2.1 del secondo capitolo). Bisogna tenere presente, inoltre, che ad una distanza di 30 cm dal dispositivo, l'intensità di campo elettrico risulta ridotta dell'80-90% e per questo l'utilizzo del vivavoce o degli auricolari comporta notevoli riduzioni a livello di esposizione alla quale le persone sono soggette. [10]

I dispositivi cellulari, come le altre sorgenti di radiazioni a radiofrequenza, sono stati regolamentati dall'ICNIRP, il quale ha fornito delle indicazioni sui valori soglia a tutela della salute, lasciando però ad ogni stato, la sovranità nel decidere i limiti per la propria area di competenza. Per i paesi europei, in particolare, l'ente di riferimento per la definizione degli standard relativi ai cellulari è il CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization), il quale ha definito dei limiti di SAR locale pari a 2 W/kg su un volume di 10g. Negli Stati Uniti, invece, è l'FCC (Federal Communications Commission) la commissione che si occupa di definire questi standard ed ha posto il limite a 1.6 W/kg su un volume di 1g. [18] [19]

4.2 Lo studio INTERPHONE

A causa della scarsa attendibilità degli studi epidemiologici, la possibile correlazione tra il processo di carcinogenesi e l'utilizzo sempre più frequente del cellulare, non era stata presa in considerazione nella definizione dei valori di riferimento sopra riportati e per far fronte a questa mancanza, nel 2000, la IARC (International Agency for Research on Cancer) lanciò uno studio internazionale denominato *INTERPHONE Study* a riguardo. Questo studio ha monitorato per ben dieci anni gli effetti dell'uso del cellulare sul rischio di contrarre tumori nei tessuti che più assorbono l'energia emessa da questi dispositivi, in particolare: tumori cerebrali (il glioma e il meningioma) e tumore al nervo acustico.

INTERPHONE appartiene alla categoria di studi denominata caso-controllo, ovvero studi osservazionali in cui si cerca di identificare i fattori che possono contribuire ad una determinata condizione medica.

“Uno **studio caso-controllo** va concepito come uno studio nel quale: i “casi” rappresentano tutti i casi di malattia che si sarebbero verificati in un'ipotetica coorte (gruppo di persone che condividono una caratteristica o un'esperienza in comune all'interno di un periodo definito), i “controlli” rappresentano un campione della popolazione senza l'evento/malattia in studio e devono essere selezionati in modo da rappresentare coloro che, se avessero sviluppato la malattia, sarebbero stati selezionati come casi.” [20]

Lo studio INTERPHONE ha raccolto i dati in ben tredici stati differenti ed ha incluso 2765 casi di glioma, 2425 casi di meningioma, 1121 casi di neuroma acustico e 7658 persone di controllo, coprendo un intervallo di età tra i 30 e i 59 anni, rappresentando il più grande studio epidemiologico svolto nel campo della carcinogenesi dovuta all'esposizione a onde a radiofrequenza.

Lo studio è stato costruito facendo compilare ai soggetti scelti dei questionari in formato digitale o intervistandoli personalmente, ove possibile, per capire se coloro che avevano manifestato un tumore tra quelli riportati, erano stati soggetti ad un uso molto intenso del cellulare o erano stati a stretto contatto con altri fattori di rischio noti e le stesse domande venivano poi riproposte alle persone sane, per poter fare un confronto.

Il questionario, in particolare, era costituito da domande che vertevano sull'uso del cellulare (molto in dettaglio), sull'uso di altri dispositivi wireless, sull'esposizione a radiazioni dovute all'attività lavorativa e sull'esposizione ad altri fattori di rischio (inclusi il fumo e la storia della situazione medica familiare). Sono state poste, inoltre, domande specifiche sull'esposizione ad agenti molto rumorosi, per quanto riguarda i casi ed i rispettivi controlli del neuroma acustico. Sia per quanto riguarda i tumori cerebrali sia per quanto riguarda i tumori al nervo acustico, lo studio ha riportato un valore di OR di poco ridotto in coloro che non hanno fatto un uso regolare del cellulare, in particolare sono stati ottenuti i seguenti valori:

- OR = 0.81 per il glioma, considerando su un intervallo di confidenza (CI) pari al 95%, con valori compresi nel range da 0.70 a 0.94
- OR = 0.79 per il meningioma, considerando su un intervallo di confidenza (CI) pari al 95%, con valori compresi nel range da 0.68 a 0.91
- OR = 0.85 per il tumore al nervo acustico, considerando su un intervallo di confidenza (CI) pari al 95%, con valori compresi nel range da 0.69 a 1.04

Il risultato più interessante, tuttavia, è dato dai valori relativi alle persone che hanno effettuato nel corso della loro vita, un numero di ore di chiamata maggiore o uguale a 1640 (68 giorni circa), che rappresentano la fascia di persone presa in esame, con un periodo di attività maggiore

dal primo utilizzo del cellulare.

In particolare, sono stati identificati:

- OR = 1.40 per il glioma, considerando su un intervallo di confidenza (CI) pari al 95%, con valori compresi nel range da 1.03 a 1.89
- OR = 1.15 per il meningioma, considerando su un intervallo di confidenza (CI) pari al 95%, con valori compresi nel range da 0.81 a 1.62
- OR = 1.32 per il tumore al nervo acustico, considerando su un intervallo di confidenza (CI) pari al 95%, con valori compresi nel range da 0.88 a 1.97

Se si considerano questi ultimi dati, si può notare che i valori di OR in media si aggirano intorno al valore unitario e i valori massimi sono comunque inferiori a 2, indicazione del fatto che, nonostante l'elevato numero di ore di utilizzo, la probabilità di contrarre il cancro è poco superiore rispetto ai soggetti che non ne fanno un uso regolare.

Questi risultati inoltre, come riporta la IARC in un rapporto del 2011, sono facilmente stati condizionati da fluttuazioni statistiche dovute al confronto tra le risposte date dagli intervistati e l'effettiva realtà dei fatti, dal momento che il questionario era basato su dati che le persone dovevano ricordare, anche a distanza di molto tempo e per questo non suggeriscono incrementi statisticamente significativi. Quest'ultima dichiarazione trova ulteriore conferma anche nei risultati degli studi di validità: un insieme di studi condotti insieme ad INTERPHONE, con il compito di valutare l'attendibilità dei dati raccolti e aiutando nella loro interpretazione. In particolare, rispetto alle autovalutazioni relative all'uso del cellulare, questi studi hanno evidenziato una sovrastima specie nella fascia di elevato utilizzo, escludendo di fatto una correlazione con la comparsa del cancro.

La correttezza della dosimetria adottata (numero di ore di utilizzo), infine, può facilmente essere messa in discussione, dal momento che l'esposizione dipende fortemente dalla distanza del cellulare dal corpo e dalla distanza con la stazione radiobase, a causa del sistema di limitazione della potenza di emissione. [21]

Alla luce di queste considerazioni, tuttavia, bisogna tenere presente che negli anni in cui è stato fatto questo studio, il cellulare non aveva una diffusione così elevata come adesso e la fascia di età degli utilizzatori era più limitata.

Secondo i dati ISTAT, per esempio, nel 2000, il 56% degli italiani di età uguale o superiore a 11 anni faceva uso del cellulare, il maggior numero di utenti si osservava tra i giovani di 20-24 anni (80%) e la frequenza diminuiva poi progressivamente con l'età.

Nel 2006, invece, l'uso del cellulare si era esteso al 77% degli italiani di età uguale o superiore a 6 anni, con un massimo nella fascia d'età 15-54 anni (90-95%) e un minimo tra gli over-75 (27%) e attualmente le percentuali sono aumentate.

Questi dati lasciano trasparire che il numero di anni in cui le persone stavano a contatto con questo dispositivo era ridotto rispetto al contesto odierno. [10]

A conclusione di quest'analisi relativa allo studio INTERPHONE, è importante citare uno studio svedese svoltosi tra il 1997 e il 2003, che ha riscontrato valori di OR più preoccupanti.

In particolare, quest'ultimo è costituito da due studi caso-controllo rispettivamente per il glioma e per il neuroma acustico, considerando 905 casi con tumore maligno, 1254 casi con tumore benigno e 2162 controlli, di età compresa tra i 20 e gli 80 anni, di cui in seguito si riportano i risultati. [22]

Study	Period covered	Study type	Age (years)	Tumour type	No. of cases	OR* (95% CI)	Comments
Hardell <i>et al</i> 2006b, Sweden	1997–2003	Case–control	20–80	Glioma, high-grade	281	1.4 (1.1 to 1.8)	>1-year latency of cell phone use
					71	3.1 (2.0 to 4.6)	>10-year latency of cell phone use
					39	5.4 (3.0 to 9.6)	>10-year latency of ipsilateral cell phone use
					23	2.2 (1.3 to 3.9)	>10-year latency of cordless phone use
					10	4.7 (1.8 to 13)	>10-year latency of ipsilateral cordless

Tabella 4.1: Risultati dello studio condotto da Hardell *et al*, riguardante la correlazione tra uso del cellulare e del cordless e l'insorgere del glioma (tratto da [22])

Study	Period covered	Study type	Age (years)	No. of cases	OR* (95% CI)	Comments
Hardell <i>et al</i> 2006a, Sweden	1997–2003	Case–control	20–80	130	1.7 (1.2 to 2.3)	>1-year latency of cell phone use
				20	2.9 (1.6 to 5.5)	>10-year latency of cell phone use
				10	3.5 (1.5 to 7.8)	>10-year latency of ipsilateral cell phone use
				4	1.0 (0.3 to 2.9)	>10-year latency of cordless phone use
				3	3.1 (0.8 to 12)	>10-year latency of ipsilateral cordless phone use

Tabella 4.2: Risultati dello studio condotto da Hardell *et al*, riguardante la correlazione tra uso del cellulare e del cordless e l'insorgere del neuroma acustico (tratto da [22])

Dalla tabella 4.1 emergono valori di OR pari a 5.4 per i cellulari e 4.7 per i cordless, osservati dopo più di 10 anni dal primo utilizzo, dimostrando un significativo incremento rispetto al campione di controllo. Bisogna sottolineare, tuttavia, che il numero di casi in questione è comunque ridotto: 39 e 10 rispettivamente, ma rappresenta comunque valori molto superiori rispetto ai corrispettivi dello studio INTERPHONE.

Nella tabella 4.2, invece, si osservano valori di OR pari a 3.5 per i cellulari e 3.1 per i cordless, osservati dopo più di 10 anni dal primo utilizzo. Anche in questo caso, i risultati evidenziano un incremento non trascurabile rispetto al campione di controllo, ma il numero di casi è molto limitato: 10 e 3 rispettivamente. [22] [23]

Sulla base di queste evidenze, lo studio svedese sembrerebbe mettere in discussione i risultati dello studio INTERPHONE. Nelle sue valutazioni, però, la IARC ha considerato che il numero di casi che denotano valori di OR molto elevati è limitato e per questo non modificano il quadro generale sugli studi epidemiologici.

Alla luce dei risultati di questi due studi, tuttavia, bisogna considerare che le emissioni di radiazioni dei sistemi di allora (2G) erano maggiori rispetto a quelle attuali (3G e 4G); infine, va ribadito che gli studi epidemiologici, essendo studi statistici, sono in grado di dimostrare una possibile correlazione ma non sono atti a dimostrare una relazione di causa-effetto.

Quinto Capitolo

5.1 Il responso del WHO

Alla luce degli aspetti presentati nei capitoli precedenti, è necessario analizzare il rapporto fornito dal WHO (World Health Organization) ed in particolare dalla sua divisione già citata in precedenza, la IARC, rispetto alla cancerogenicità delle radiazioni RF.

Quest'ultima ha un programma di attività denominato "Monografie", dedicato all'identificazione e alla valutazione degli agenti (chimici, fisici etc.) promotori dei tumori negli esseri umani. Le valutazioni della IARC, in particolare, vengono effettuate da esperti internazionali, i quali analizzano la letteratura scientifica e la revisionano sistematicamente, in accordo con le scoperte più recenti. Queste valutazioni, tuttavia, non riguardano la probabilità che si sviluppi un tumore in conseguenza dell'esposizione ad uno specifico agente (*Odds Ratio*, *Risk Rate*), ma riguardano il potenziale di cancerogenicità dell'agente (*Hazard Ratio*). [10]

Il **rapporto di rischio** (HR, Hazard Ratio) è definito come il rapporto tra due tassi di rischio (*hazard rate*) associati ad un evento, in due determinate condizioni che si vogliono paragonare. In analisi di sopravvivenza, i tassi di rischio h rappresentano la probabilità di morte nell'unità di tempo considerata (giorni, mesi, anni, ecc...).

Il rapporto di rischio è dunque esprimibile come: $HR = \frac{h_1}{h_0}$, in cui h_0 rappresenta il tasso di rischio nei pazienti di controllo e h_1 identifica il tasso di rischio in quelli soggetti all'evento preso in analisi. [24] [25]

Per determinare la qualità e la forza delle evidenze a favore dell'ipotesi che l'agente in questione causi il cancro, gli esperti della IARC analizzano il materiale scientifico facendo riferimento a dei criteri ben definiti e le pubblicazioni esaminate includono:

- studi di caratterizzazione dell'esposizione umana all'agente
- studi epidemiologici sui tumori tra le persone esposte all'agente (evidenza nell'uomo)
- studi sperimentali sui tumori in animali da laboratorio trattati con l'agente (evidenza nell'animale)
- studi sui meccanismi attraverso cui si sviluppano i tumori in risposta all'agente (evidenze di meccanismi di interazione)

Le evidenze provenienti dagli studi epidemiologici, dagli studi su modelli animali e dagli studi sui meccanismi d'azione vengono valutate separatamente e poi classificate in base allo schema sviluppato dall'agenzia.

Il processo di valutazione si conclude con l'assegnazione dell'agente ad uno dei quattro gruppi in cui si articola oggi la classificazione finale (*overall*) della IARC.

Si riportano in seguito le tabelle con le descrizioni dei criteri utilizzati per classificare gli agenti cancerogeni, suddivisi per categoria di studi presa in considerazione. [10]

Linea di evidenza	Forza dell'evidenza	Significato e criteri di classificazione
Uomo	<i>Sufficiente</i>	È stata stabilita un'associazione causale tra esposizione all'agente e cancro negli esseri umani. Ovvero, è stata osservata un'associazione positiva tra esposizione all'agente e cancro in studi nei quali effetti casuali o dovuti a distorsioni e/o a confondimento sono stati esclusi con ragionevole certezza.
	<i>Limitata</i>	È stata osservata un'associazione positiva tra esposizione all'agente e cancro la cui interpretazione causale è credibile, ma effetti casuali o dovuti a distorsioni e/o confondimento non possono essere esclusi con ragionevole certezza.
	<i>Inadeguata</i>	Gli studi disponibili sono di qualità, coerenza o precisione statistica insufficienti per trarre conclusioni sulla presenza o assenza di un'associazione causale tra esposizione e cancro, oppure non sono disponibili dati sul cancro nell'uomo.
	<i>Suggestiva di non-cancerogenicità</i>	Sono disponibili numerosi studi di alta qualità che coprono l'intera gamma di livelli di esposizione che gli esseri umani possono incontrare e sono coerenti tra loro nel non mostrare un'associazione positiva tra esposizione all'agente e tumori studiati a qualsiasi livello di esposizione osservato. I risultati di questi studi (da soli o in combinazione) dovrebbero avere intervalli di confidenza stretti con il limite superiore al di sotto o vicino al valore nullo. Distorsioni ed effetti di confondimento sono stati esclusi con ragionevole sicurezza e gli studi sono stati considerati informativi. La conclusione di "evidenza suggestiva di non-cancerogenicità" è limitata alle sedi tumorali, alle popolazioni, alle fasi di vita, alle condizioni e livelli di esposizione, nonché alle durate di osservazione, considerate dagli studi disponibili. Inoltre, la possibilità di un rischio molto piccolo ai livelli di esposizione studiati non può mai essere esclusa.

Tabella 5.1: Criteri di classificazione delle evidenze sull'uomo (tratto da [10])

Linea di evidenza	Forza dell'evidenza	Significato e criteri di classificazione
Animali da esperimento	<i>Sufficiente</i>	<p>È stata stabilita una relazione causale tra esposizione all'agente e cancro negli animali da esperimento, sulla base di un'aumentata incidenza di neoplasie maligne o di un'appropriata combinazione di neoplasie benigne e maligne in:</p> <ol style="list-style-type: none"> a. due o più specie di animali o b. due o più studi indipendenti in una specie effettuati in tempi diversi o in diversi laboratori e/o con protocolli diversi. <p>Anche un'aumentata incidenza di neoplasie maligne o di un'adeguata combinazione di neoplasie benigne e maligne in entrambi i sessi di una singola specie in uno studio ben condotto, idealmente in accordo alle Buone Pratiche di Laboratorio (BPL), può fornire evidenza sufficiente.</p> <p>Eccezionalmente, un'evidenza sufficiente di cancerogenicità può essere fornita da un singolo studio in una sola specie e in un solo sesso, quando i tumori maligni insorgono a un livello insolito per incidenza, sede, tipo di tumore o età all'occorrenza, oppure quando vi sono chiare osservazioni di tumori in sedi multiple.</p>
	<i>Limitata</i>	<p>I dati suggeriscono un effetto cancerogeno ma sono limitati per consentire una valutazione definitiva perché, ad esempio:</p> <ol style="list-style-type: none"> a. l'evidenza di cancerogenicità è limitata a un singolo esperimento e non soddisfa i criteri per l'evidenza sufficiente; b. l'agente aumenta l'incidenza solo di neoplasie benigne o lesioni con potenziale neoplastico incerto; c. l'agente aumenta la molteplicità di tumori o diminuisce la latenza tumorale, ma non aumenta l'incidenza del tumore; d. l'evidenza di cancerogenicità è limitata agli studi di iniziazione-promozione; e. l'evidenza di cancerogenicità è limitata agli studi osservazionali su animali non da laboratorio (es. animali da compagnia); f. ci sono questioni irrisolte sull'adeguatezza del disegno, della realizzazione o dell'interpretazione degli studi disponibili.
	<i>Inadeguata</i>	<p>Gli studi non possono essere interpretati come indicanti la presenza o l'assenza di un effetto cancerogeno a causa di importanti limiti qualitativi o quantitativi, oppure non sono disponibili dati sul cancro negli animali da esperimento.</p>
	<i>Suggestiva di non-cancerogenicità</i>	<p>Sono disponibili studi ben condotti (es. condotti in accordo alle BPL) che coinvolgono entrambi i sessi di almeno due specie e dimostrano che, entro i limiti dei test utilizzati, l'agente non è cancerogeno. La conclusione di "evidenza suggestiva di non-cancerogenicità" è limitata alla specie, ai siti tumorali, all'età all'esposizione, nonché alle condizioni e livelli di esposizione considerati dagli studi disponibili.</p>

Tabella 5.2: Criteri di classificazione delle evidenze sugli animali da esperimento (tratto da [10])

Linea di evidenza	Forza dell'evidenza	Significato e criteri di classificazione
Meccanismi d'azione	<i>Forte</i>	<p>È disponibile un numero considerevole di studi su una serie di endpoint pertinenti alla cancerogenesi in una o più specie di mammiferi, i cui risultati sono coerenti nell'indicare la potenzialità cancerogena dell'agente. Test in vitro su cellule di mammiferi non umani ed esperimenti su specie non mammifere possono fornire prove corroboranti, ma in genere non forniscono di per sé prove convincenti. Tuttavia, risultati coerenti su diversi sistemi di test in diverse specie possono fornire una forte evidenza. Si sottolinea che l'aggettivo "forte" si riferisce al peso delle evidenze, non alla potenza.</p> <p>Questa classificazione viene applicata a tre distinti argomenti:</p> <ol style="list-style-type: none"> a. Forte evidenza che l'agente appartiene, sulla base di considerazioni meccanicistiche, a una classe di agenti uno o più membri della quale sono stati classificati come cancerogeni o probabilmente cancerogeni per l'uomo. Le considerazioni possono andare oltre le relazioni quantitative struttura-attività per incorporare somiglianze nell'attività biologica rilevanti per le caratteristiche chiave comuni tra sostanze chimiche dissimili. b. Forte evidenza che l'agente presenta caratteristiche-chiave degli agenti cancerogeni. In questo caso, sono possibili tre descrittori: <ol style="list-style-type: none"> 1) La forte evidenza deriva da studi su esseri umani esposti (i risultati relativi a un tipo specifico di tumore possono essere utili in questa determinazione). 2) La forte evidenza deriva da studi su cellule o tessuti umani primari (i.e., campioni biologici ottenuti dall'uomo come negli studi di esposizione ex vivo; cellule primarie umane e/o altri sistemi umanizzati). 3) La forte evidenza deriva da studi su sistemi sperimentali (può includere uno o alcuni studi su cellule e tessuti primari umani). c. Forte evidenza che il meccanismo di cancerogenicità negli animali da esperimento non è operante negli esseri umani. <p>Questa classificazione non si applica quando vi è forte evidenza meccanicistica che l'agente presenta caratteristiche-chiave degli agenti cancerogeni.</p>
	<i>Limitata</i>	<p>L'evidenza è suggestiva, ma:</p> <ol style="list-style-type: none"> a. gli studi coprono una gamma ristretta di esperimenti, endpoint rilevanti e/o specie; b. ci sono incoerenze inspiegabili tra studi con disegno simile; c. ci sono incoerenze inspiegabili tra studi su diversi endpoint o su diversi sistemi sperimentali.
	<i>Inadeguata</i>	<p>I risultati che di solito conducono alla conclusione di evidenza meccanicistica inadeguata includono:</p> <ol style="list-style-type: none"> a. pochi o nessun dato disponibile; b. questioni irrisolte sull'adeguatezza del disegno, della realizzazione o dell'interpretazione degli studi; c. i risultati disponibili sono negativi.

Tabella 5.3: Criteri di classificazione dei meccanismi d'azione (tratto da [10])

In seguito si riporta la tabella finale con la classificazione di cancerogenicità (*overall*), utilizzando i risultati relativi alle tabelle precedenti.

Linea di ricerca			Classificazione
Uomo	Animali	Meccanismi	
Sufficiente	Non necessaria	Non necessaria	Cancerogeno per gli esseri umani (Gruppo 1)
Limitata o Inadeguata	Sufficiente	Forte (b)-(1)	
Limitata	Sufficiente	Forte (b)-(2-3), Limitata o Inadeguata	Probabile cancerogeno per gli esseri umani (Gruppo 2A)
Inadeguata	Sufficiente	Forte (b)-(2)	
Limitata	Meno di Sufficiente	Forte (b)-(1-3)	
Inadeguata	Non necessaria	Forte (a)	
Limitata	Meno di sufficiente	Limitata o Inadeguata	Possibile cancerogeno per gli esseri umani (Gruppo 2B)
Inadeguata	Sufficiente	Forte (b) (3), Limitata o Inadeguata	
Inadeguata	Meno di sufficiente	Forte (b) (1-3)	
Limitata	Sufficiente	Forte (c) (meccanismo non operante nell'uomo)	
Inadeguata	Sufficiente	Forte (c) (meccanismo non operante nell'uomo)	Non classificabile riguardo alla cancerogenicità per gli esseri umani (Gruppo 3)
Ogni altra combinazione non precedentemente esplicitata			

Tabella 5.4: Criteri di classificazione di cancerogenicità delle sostanze analizzate, in base alle evidenze riscontrate e ai meccanismi d'azione (tratto da [10])

Rispetto alla prassi in vigore fino al 2018, sono state apportate alcune modifiche alla classificazione conclusiva, osservabili nella tabella sopra riportata, in particolare, è stata introdotta una procedura standardizzata di valutazione delle evidenze derivanti dagli studi sui meccanismi d'azione a livello cellulare e subcellulare ed è stato abolito il preesistente Gruppo 4 (agente probabilmente non cancerogeno).

Alla luce delle caratteristiche sopra presentate, è di interesse presentare il responso fornito dalla IARC rispetto la cancerogenicità delle radiazioni RF, la cui classificazione è avvenuta nel maggio 2011.

Per la valutazione, sono state esaminate le evidenze scientifiche disponibili e sono stati espressi giudizi distinti sulle evidenze epidemiologiche relative alle esposizioni professionali, alle esposizioni dovute a sorgenti ambientali o a telefoni mobili, e sulle evidenze di cancerogenicità negli animali da laboratorio.

A conclusione di questo lavoro, i campi elettromagnetici a radiofrequenza sono stati classificati nel gruppo 2B (agenti possibilmente cancerogeni) in base a limitata evidenza nell'uomo, limitata evidenza negli animali e debole supporto fornito dagli studi sui meccanismi, come riportato nella tabella seguente. [10]

Sorgenti di esposizione	Evidenza nell'uomo	Evidenza nell'animale	Overall
Professionali	Inadeguata		Gruppo 2B (possibili cancerogeni)
Ambientali	Inadeguata	Limitata	
Telefoni mobili	Limitata		

Tabella 5.5: Riepilogo dei risultati sulle evidenze rispetto all'esposizione alle radiazioni a radiofrequenza (tratto da [10])

Si tiene a specificare, che il risultato precedente rileva solamente una limitata evidenza epidemiologica e quest'ultima è basata sull'incremento del rischio di glioma (e in minor misura di neuroma acustico) in relazione all'uso di telefoni mobili osservato in alcuni degli studi epidemiologici considerati più importanti.

La IARC, a conclusione di tutto ciò, ha ritenuto utile precisare che i campi elettromagnetici a radiofrequenza sono classificati nel gruppo 2B, perché c'è un'evidenza tutt'altro che conclusiva che l'esposizione possa causare il cancro negli esseri umani o negli animali.

Conclusione

In questa tesi, dopo una presentazione di carattere generale sulla storia della scoperta delle onde elettromagnetiche e sulle caratteristiche di queste ultime, si porta l'attenzione sulle radiazioni a radiofrequenza.

Successivamente, vengono riportati i principi fondamentali della radioprotezione, con riferimento alle normative delineate dall'ICNIRP, con un focus sulla posizione presa dall'Italia, evidenziando le grandezze fisiche in questione, di cui il SAR gioca un ruolo fondamentale.

Sono state analizzate, inoltre, le tipologie di studi che hanno portato alla formazione delle linee guida per la decisione dei limiti di legge precedentemente citati, riportandone i rispettivi risultati. Questi ultimi, tuttavia, non hanno permesso di identificare una correlazione tra esposizione a radiazioni RF e processo di carcinogenesi, infatti, anche laddove fosse presente un incremento significativo di casi, spesso è stata riscontrata un'inaffidabilità dei risultati dovuta a fluttuazioni statistiche.

Nell'elaborato, tra le altre cose, è presentato un approfondimento sul cellulare, un dispositivo sempre più frequente nella vita di tutti, sul quale sono emerse numerose teorie rispetto al suo possibile legame a forme di neoplasie cerebrali (glioma e meningioma). Per questo motivo è stato riportato l'esito di uno degli studi più significativi in materia: lo studio INTERPHONE. Quest'ultimo studio, nonostante coinvolgesse un campione di persone molto ampio per una durata di 10 anni, non ha riscontrato incrementi significativi di fenomeni di carcinogenesi nei pazienti esposti alle radiazioni, rispetto al campione di controllo.

L'ultima parte del lavoro, è dedicata al responso fornito dal WHO ed in particolare dalla IARC in merito, la quale ha classificato le radiazioni RF nel gruppo 2B (possibilmente cancerogeno). In conclusione, quindi, non si può delineare alcuna relazione di causa-effetto tra l'esposizione alle onde elettromagnetiche a radiofrequenza e l'insorgere di tumori, dal momento che le evidenze riportate dagli studi effettuati sono tutt'altro che conclusive e per questo la questione rimane aperta per possibili studi futuri.

Bibliografia

- [1] Ulaby, *Fondamenti di campi elettromagnetici. Teoria e applicazioni*, McGraw-Hill Education, 2019
- [2] www.emfaware.org/sources-of-emf.html
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Visible_spectrum
- [4] www.treccani.it/enciclopedia/radiprotezione
- [5] www.treccani.it/enciclopedia/sar
- [6] M. Santagiustina, Appunti del corso di Campi Elettromagnetici e Propagazione, Università di Padova, 2019
- [7] Dott.Roberto Moccaldi, *Effetti sulla salute in relazione ai campi elettromagnetici a radiofrequenza (telefonia mobile)*, CNR
- [8] www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/en/
- [9] Mario Basta, Enrico Borra, Carlo Maria, Castellani Elena, Liccione Andrea, Luciani Sandro Merolli, Elia Rossi, Sandro Sandri, *Radioprotezione, opuscolo per la formazione del personale esposto a radiazioni ionizzanti per ragioni professionali*, ENEA e Istituto di Radioprotezione, 2008
- [10] Susanna Lagorio, Laura Anglesio, Giovanni d'Amore, Carmela Marino, Maria Rosaria Scarfi, *Radiazioni a radiofrequenze e tumori: sintesi delle evidenze scientifiche*, Istituto Superiore di Sanità, 2019
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Relative_risk
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Odds_ratio
- [13] www.sciencedirect.com/topics/medicine-and-dentistry/standardized-incidence-ratio
- [14] C. Magnani, Appunti del corso di Statistica e Biometria, Università del Piemonte Orientale, 2009
- [15] <https://www.ramazzini.org/comunicato/ripetitori-telefonia-mobile-listituto-ramazzini-comunica-gli-esiti-del-suo-studio/>
- [16] P. Michelozzi, Appunti dal Seminario di Sanità Pubblica, Università di Brescia, 2012
- [17] <https://newsroom.cisco.com/press-release-content?articleId=1741352>
- [18] www.fcc.gov/general/specific-absorption-rate-sar-cellular-telephones
- [19] https://en.wikipedia.org/wiki/Specific_absorption_rate

- [20] www.treccani.it/enciclopedia/epidemiologia-morbilita-e-mortalita_%28Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica%29
- [21] Dr Christopher Wild, *IARC Report to the Union for International Cancer Control (UICC) on the Interphone Study*, IARC, 2011
- [22] www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2092574/#ref2
- [23] <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19513546/>
- [24] C. Magnani, *Appunti del corso di Epidemiologia e Statistica Medica*, Università di Modena e Reggio Emilia, 2008
- [25] www.statsimprove.com/it/2019/04/05/come-interpretare-nella-pratica-il-valore-dell-hazard-ratio