



Associazione Italiana
di Radioprotezione



2020

BOLLETTINO

ANNO XLVII | VOLUME 178 | NUMERO 1-4 | LUGLIO 2020 | ISSN 1591-3481 | E-ISSN 2281-180X

**ASSOCIAZIONE ITALIANA
DI RADIOPROTEZIONE
AIRP**

AFFILIATA ALLA
INTERNATIONAL RADIATION
PROTECTION ASSOCIATION (IRPA)

CONSIGLIO DIRETTIVO 2019-2021

Mauro Magnoni, *Presidente*
Francesco Mancini, *Vicepresidente*
Luisella Garlati, *Segretario*
Gian Marco Contessa
Vittorio Festa
Sveva Grande
Rocco Marchese

REDAZIONE

Luisella Garlati, *Direttore*
Gian Marco Contessa
Vittorio Festa
Sveva Grande
Mauro Magnoni
Rocco Marchese

TIPOGRAFIA

Arti Grafiche Zacchetti, Milano

PROGETTO GRAFICO

MV Comunicazione, Milano

PER INFORMAZIONI E

CORRISPONDENZA

luisella.garlati@polimi.it
T. 02 2399 6371

Registrazione del Tribunale di Milano
n. 228 del 10 aprile 2008

Distribuzione gratuita ai soci AIRP

Tutti i soci dell'AIRP sono vivamente invitati a contribuire al Bollettino inviando articoli, commenti, recensioni, notizie e informazioni su argomenti di specifico interesse per la radioprotezione. I contributi dovranno essere firmati dall'autore o dagli autori. Gli articoli pubblicati riflettono esclusivamente le opinioni degli autori.

EDITORIALE

Il Comitato Direttivo AIRP 3

**I PROTAGONISTI DELLA RADIOPROTEZIONE
GIOVANNI SILINI: UNO SCIENZIATO E UNO STORICO,
DAL LAGO D'ISEO AL SIEVERT AWARD**

..... 5

ARTICOLI

**UN RECENTE SUPPLEMENTO
ALLA STORIA DEL LABORATORIO DI FISICA
DELL'ISTITUTO SUPERIORE DI SANITÀ**

M. Grandolfo, F. Napolitani, S. Risica, E. Tabet 9

**IL DECOMMISSIONING DEGLI IMPIANTI NUCLEARI:
L'EVOLUZIONE CONTINUA**

C. Osimani 15

**L'OTTIMIZZAZIONE DELLA RADIOPROTEZIONE
NEL CONTESTO NAZIONALE E INTERNAZIONALE**

G.M. Contessa, S.A. De Crescenzo, P. Rossi 31

**ASPETTI RADIOLOGICI DELL'USO DELLE CENERI
DI CIPPATO NELL'INDUSTRIA DELLE COSTRUZIONI**

*M. Garavaglia, M. Faure Ragani, M. Magnoni, S. Bucci,
E. Caldognetto, G. Candolini, C. Giovani, C. Nuccetelli, I. Peroni,
R. Rusconi, F. Trotti, L. Verdi* 41

**L'INTERCONFRONTO DI VALUTAZIONE DI DOSE INTERNA
ICIDOSE 2017**

C.M. Castellani 55

**SCHEDE DI AUTOVALUTAZIONE PER GLI AMBIENTI
DEDICATI ALLA MANIPOLAZIONE DI SORGENTI NON
SIGILLATE E ALLA PRODUZIONE DI RADIOFARMACI**

*G.M. Contessa, M.A. D'Avanzo, G. Cocomello, S. De Crescenzo,
M. Mattozzi, M. Pacilio, S. Sandri, F. Campanella* 69

**LE NUOVE LINEE GUIDA ICNIRP 2020
PER LA PROTEZIONE DEI LAVORATORI E DELLA
POPOLAZIONE GENERALE DALL'ESPOSIZIONE A CAMPI
ELETTROMAGNETICI A RADIOFREQUENZA**

C. Grandi 81

LE NUOVE LINEE GUIDA ICNIRP 2020 PER LA PROTEZIONE DEI LAVORATORI E DELLA POPOLAZIONE GENERALE DALL'ESPOSIZIONE A CAMPI ELETTROMAGNETICI A RADIOFREQUENZA

Carlo Grandi

Dipartimento di Medicina, Epidemiologia, Igiene del Lavoro e Ambientale - INAIL

INTRODUZIONE

Recentemente sono state pubblicate su *Health Physics* e rese disponibili al [link https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPrfgdl2020.pdf](https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPrfgdl2020.pdf) le nuove linee guida dell'*International Commission on Non Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) relative alla protezione dei lavoratori e della popolazione generale nei confronti dell'esposizione ai campi elettromagnetici a radiofrequenza, compresi nell'intervallo spettrale da 100 kHz a 300 GHz. Il documento include il testo delle linee guida, un'appendice di natura dosimetrica (appendice A) e un'appendice che riguarda l'esame della letteratura relativa ai rischi per la salute (appendice B), ciascuno con la propria sezione bibliografica. Sul sito *web* dell'ICNIRP sono anche presenti alcune FAQ (al [link https://www.icnirp.org/en/rf-faq/index.html](https://www.icnirp.org/en/rf-faq/index.html)), delle quali è peraltro disponibile una versione tradotta in italiano (al [link https://www.icnirp.org/cms/upload/ICNIRP_RFfaqs2020_italian.pdf](https://www.icnirp.org/cms/upload/ICNIRP_RFfaqs2020_italian.pdf)), e una breve presentazione *power point* delle nuove linee guida (al [link https://www.icnirp.org/en/activities/news/news-article/rf-guidelines-2020-published.html](https://www.icnirp.org/en/activities/news/news-article/rf-guidelines-2020-published.html)). Le nuove linee guida costituiscono l'aggiornamento, per la sola parte relativa alle radiofrequenze, delle linee guida ICNIRP pubblicate nel 1998, che includevano sia i campi a bassa frequenza che i campi a radiofrequenza (intervallo complessivo tra 1 Hz e 300 GHz). Per l'intervallo di frequenze 100 kHz – 10 MHz, nel quale possono essere rilevanti sia l'effetto di stimolazione elettrica dei tessuti sia l'effetto del riscaldamento, le linee guida 2020 aggiornano formalmente anche quanto previsto dalle linee guida ICNIRP 2010 (che a loro volta avevano aggiornato le

linee guida del 1998 per la parte relativa ai campi a bassa frequenza, a partire da 1 Hz), fornendo però indicazioni sovrapponibili a quelle delle stesse linee guida ICNIRP 2010.

È opportuno ricordare che le linee guida del 1998 hanno ispirato, sia per le basse frequenze sia per le radiofrequenze, i valori limite di esposizione e i valori d'azione riportati nella direttiva 2013/35/UE, relativa alla protezione dei lavoratori esposti a campi elettromagnetici durante il lavoro e recepita nel Capo IV del Titolo VIII del D.lgs. 81/2008.

Le nuove linee guida ICNIRP 2020 rappresentano da ora il riferimento scientifico più aggiornato per la protezione dei lavoratori e della popolazione generale dagli effetti dell'esposizione a radiofrequenze, che è opportuno sia tempestivamente conosciuto da coloro che svolgono attività di prevenzione nel settore, anzitutto come documento di buone prassi e in secondo luogo in previsione di futuri adeguamenti al progresso tecnico della normativa europea (ad iniziare della direttiva 2013/35/UE). Il presente contributo si propone di descrivere e commentare gli aspetti più rilevanti delle linee guida ICNIRP 2020, soffermandosi in particolare sull'articolazione del razionale protezionistico e sugli aspetti di termofisiologia alla base delle restrizioni adottate, oltre che sulle differenze più significative rispetto alle linee guida del 1998. Il contributo è stato strutturato seguendo a grandi linee il percorso del testo delle linee guida, attingendo ad alcune informazioni contenute nelle appendici e riportando, adattandole, le tabelle con i valori delle restrizioni di base e dei livelli di riferimento, unitamente alle relative specifiche in nota. La scopo del contributo non è di natura tecnico-operativa ma di aggiornamento scientifico-culturale per coloro che, a diverso titolo, si occupano di protezione dai campi elettromagnetici nell'ambito della sanità pubblica o della tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori. Si rimanda pertanto per ogni approfondimento o per altre finalità alle linee guida originali, indicate nei riferimenti. Le considerazioni conclusive sono di ordine del tutto generale e sono formulate "a botta calda", ossia a breve distanza temporale dalla pubblicazione delle linee guida medesime. Allo scopo di rendere più scorrevole la lettura del testo, le grandezze di volta in volta citate, le abbreviazioni e le relative unità di misura sono riportate in tabella 1, non necessariamente in ordine di citazione.

TABELLA 1. GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA CITATE NEL TESTO

GRANDEZZA	SIMBOLO	UNITÀ DI MISURA
Frequenza	f	Hertz (Hz), multipli: kilohertz (kHz), Megahertz (MHz) e Gigahertz (GHz)
Lunghezza d'onda	λ	Metri (m)
Tempo	t	Secondi (s)
Temperatura	T	Gradi centigradi ($^{\circ}\text{C}$)
Densità	ρ	Chilogrammi su metro cubo (kg m^{-3})
Capacità termica specifica	C	Joule su chilogrammo per grado ($\text{J kg}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Fattore di riscaldamento		Gradi per chilogrammo su watt ($^{\circ}\text{C kg W}^{-1}$)
Rateo di assorbimento specifico dell'energia	SAR	Watt su chilogrammo (W kg^{-1}), multiplo: kilowatt su chilogrammo (kW kg^{-1})
Assorbimento specifico dell'energia	SA	Joule su chilogrammo (J kg^{-1}), multiplo: kilojoule su chilogrammo (kJ kg^{-1}), sottomultiplo: millijoule su chilogrammo (mJ kg^{-1})
Densità di energia assorbita	U_{ab}	Joule su metro quadrato (J m^{-2})
Densità di energia incidente	U_{inc}	Joule su metro quadrato (J m^{-2})
Densità di energia incidente dell'onda piana equivalente	U_{eq}	Joule su metro quadrato (J m^{-2})
Densità di potenza assorbita	S_{ab}	Watt su metro quadrato (W m^{-2})
Densità di potenza incidente	S_{inc}	Watt su metro quadrato (W m^{-2})
Densità di potenza incidente dell'onda piana equivalente	S_{eq}	Watt su metro quadrato (W m^{-2})
Intensità di campo elettrico indotto (nelle linee guida ICNIRP 2020 definito campo elettrico interno, E_{int})	E_{ind}	Volt su metro (V m^{-1})
Intensità di campo elettrico incidente	E_{inc}	Volt su metro (V m^{-1})
Intensità di campo magnetico incidente	H_{inc}	Ampere su metro (A m^{-1})
Corrente elettrica	I	Ampere (A), sottomultiplo: milliampere (mA)
Densità di corrente indotta	J	Ampere su metro quadrato (A m^{-2})
Conducibilità	σ	Siemens su metro (S m^{-1})

Il campo di applicazione delle linee guida ICNIRP 2020 comprende la protezione dei lavoratori e della popolazione generale dalle esposizioni a campi a radiofrequenza, ma, analogamente alle precedenti linee guida, non include le esposizioni per motivi medici (diagnostici e terapeutici) e, con l'esclusione delle correnti da contatto, la protezione dagli effetti indiretti dell'esposizione, in particolare quelli su impianti metallici e in generale su dispositivi medici impiantabili o indossabili. Sono inoltre esclusi effetti indiretti quali l'innescò di matrici infiammabili o esplosive. Ricadono invece nel campo di applicazione le esposizioni di individui della popolazione generale a seguito di trattamenti in ambito cosmetico che utilizzano radiofrequenze qualora non vi sia il controllo da parte di un professionista medico qualificato, anche se l'ICNIRP specifica a margine che ogni decisione in merito è demandata alla regolamentazione dei singoli Paesi. La precisazione relativa alle applicazioni con finalità estetiche non era ovviamente presente nelle linee guida del 1998, anche perché allora l'utilizzo delle radiofrequenze nel settore non si era sviluppato.

BASI DEL RAZIONALE PROTEZIONISTICO

Il percorso per l'individuazione dei limiti di esposizione è maggiormente esplicitato e meglio articolato nel documento di linee guida del 2020 rispetto alle precedenti linee guida del 1998. Il razionale scientifico è infatti molto più dettagliato in termini di basi biologiche, termofisiologia e fattori di riduzione. Nonostante la notevole distanza temporale l'impianto protezionistico è però rimasto fondamentalmente lo stesso. Sono tuttavia presenti modifiche di un certo rilievo (riassunte nella tabella 2), soprattutto per quanto riguarda le situazioni espositive che comportano assorbimento locale dell'energia o assorbimento dell'energia a livello dei tessuti più superficiali del corpo (cute e cornea), in particolare su brevi intervalli di tempo, come sarà dettagliato più avanti. Gli aggiornamenti, quali l'introduzione di nuove restrizioni o la modifica/eliminazione di alcune delle restrizioni già presenti nelle precedenti linee guida, sono stati apportati in relazione all'evoluzione dello stato delle conoscenze, ma anche per tener conto della rapida implementazione dei nuovi protocolli di comunicazione, in particolare dello standard 5 G. La stessa ICNIRP ha ritenuto utile riassumere in una nota (disponibile al *link* <https://www.icnirp.org/en/differences.html>) le principali differenze tra le linee guida del 1998 e quelle del 2020.

Il primo *step* del percorso complessivo effettuato dall'ICNIRP per giungere a definire le limitazioni dell'esposizione a radiofrequenze per i lavoratori e per la popolazione generale ha comportato la raccolta e l'esame dell'insieme della letteratura scientifica pubblicata relativa agli effetti delle radiofrequenze sui sistemi biologici. Tra gli effetti individuati, sono stati considerati quelli che possono essere ritenuti pericolosi per la salute e per i quali è disponibile un solido supporto conoscitivo.

L'ICNIRP definisce "evidenze" gli effetti avversi sulla salute in relazione ai quali i dati disponibili **derivino da verifiche indipendenti, soddisfino requisiti di qualità e siano consistenti con l'insieme delle conoscenze scientifiche attuali**. Le evidenze possono tuttavia in alcuni casi essere intese in modo più elastico, ad esempio qualora ci si possa ragionevolmente attendere la comparsa di effetti avversi sulla salute sulla base di meccanismi biologici di interazione rilevanti.

**TABELLA 2. PRINCIPALI ANALOGIE E DIFFERENZE
TRA LINEE GUIDA ICNIRP 2020 E LINEE GUIDA ICNIRP 1998**

SPECIFICA	ICNIRP 1998	ICNIRP 2020
Intervallo di frequenze	1 Hz – 300 GHz (campi a bassa frequenza e campi a radiofrequenza)	100 kHz – 300 GHz (unicamente campi a radiofrequenza)
Campo di applicazione	Lavoratori e popolazione generale	Lavoratori e popolazione generale (per quest'ultima sono incluse anche le esposizioni per scopi cosmetici in assenza di controllo da parte di un professionista medico qualificato)
Effetti considerati	Tutti quelli riportati nella letteratura scientifica, ma razionale protezionistico e restrizioni all'esposizione solo per effetti avversi accertati (soglie identificate mediante sperimentazione biologica o modellizzazione dosimetrica)	Tutti quelli riportati nella letteratura scientifica, ma razionale protezionistico e restrizioni all'esposizione solo per effetti avversi accertati (soglie identificate mediante sperimentazione biologica o modellizzazione dosimetrica). Rispetto alle linee guida 1998 viene dato maggior rilievo ai risultati della letteratura termofisiologica e al loro ruolo, anche indiretto, nella determinazione delle restrizioni all'esposizione
Razionale protezionistico	Adeguatamente descritto, ma senza approfondita disamina della letteratura in ambito biologico e fisiologico	Dettagliatamente descritto, con estesa disamina della letteratura in ambito biologico e fisiologico

Prodotto del concepimento e lavoratrice gestante	Da valutare caso per caso e rimando alla legislazione e alle prassi nazionali	Ai fini protezionistici il feto è considerato membro della popolazione generale; per la lavoratrice gestante si applicano esplicitamente le restrizioni di base previste per la popolazione generale
Grandezze di base	SAR medio, SAR locale, SA (quest'ultima introdotta per la protezione da effetti acustici), densità di potenza	SAR medio, SAR locale, SA locale (non sono considerati gli effetti acustici, la grandezza SA viene impiegata per la protezione da effetti di riscaldamento per testa, tronco e arti in relazione a esposizioni < 6 minuti), densità di potenza assorbita, densità di energia assorbita
Media temporale	Su 6 minuti per il SAR medio e per il SAR locale, su 68/ $f^{1.05}$ minuti (con f espressa in GHz) per la densità di potenza	Su 30 minuti per il SAR medio, su 6 minuti per il SAR locale e la densità di potenza assorbita locale
Media spaziale	Su 10 g di tessuto contiguo per il SAR locale e su 10 g di tessuto per l'SA	Su 10 g di tessuto cubico per il SAR locale e l'SA locale
Media spaziale per esposizioni con assorbimento superficiale dell'energia (area superficiale di riferimento della cute)	20 cm ² di superficie esposta, 1 cm ² per esposizioni di picco	Area quadrata di 4 cm ² , area quadrata di 1 cm ² per frequenze > 30 GHz con esposizione focalizzata
Grandezze di riferimento	Intensità di campo elettrico, intensità di campo magnetico, densità di potenza dell'onda piana equivalente, corrente indotta negli arti, correnti da contatto	Intensità di campo elettrico incidente, intensità di campo magnetico incidente, densità di potenza incidente, densità di potenza incidente dell'onda piana equivalente, densità di energia incidente, densità di energia incidente dell'onda piana equivalente, corrente indotta negli arti
Intervalli di frequenza	In parte rimodulati nelle linee guida ICNIRP 2020 rispetto alle linee guida ICNIRP 1998	

Livelli di riferimento	Assenza di specifiche sulla condizione espositiva	Specifiche per condizioni espositive in campo vicino reattivo, campo vicino radiativo e campo lontano. Livelli di riferimento più elevati nell'intervallo 100 kHz – 30 MHz rispetto ai corrispondenti valori previsti nelle linee guida 1998. Per frequenze > 2 GHz l'intensità di campo elettrico incidente e l'intensità di campo magnetico incidente non figurano più tra le grandezze di riferimento
Correnti indotte negli arti	Stabiliti livelli di riferimento	Livelli di riferimento uguali a quelli individuati nelle linee guida 1998
Correnti da contatto	Stabiliti livelli di riferimento	Nessun livello di riferimento, ma unicamente indicazioni protezionistiche di ordine generale

La letteratura primariamente analizzata dall'ICNIRP include rassegne ad ampio spettro, quali quella dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO, bozza di documento tecnico del 2014), della *Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks* (SCENIHR, 2015) e della *Swedish Radiation Safety Authority* (in particolare report 2017), ma non è ovviamente limitata a queste. Per quanto riguarda eventuali effetti a livello del benessere generale, del sistema nervoso, della performance cognitiva, dell'occhio, del sistema acustico-vestibolare, del sistema endocrino, immunologico ed ematico, del sistema cardiovascolare e riproduttivo e per quanto concerne le malattie neurodegenerative e il cancro l'ICNIRP conclude (appendice B delle linee guida) per l'assenza di evidenze o per evidenze non comprovate. Unicamente per livelli di esposizione superiori a determinate soglie (ad esempio il valore di SAR a corpo intero di 4 W kg^{-1}) e per determinati effetti (di fatto quelli a livello neuroendocrino, cardiovascolare o sulla termoregolazione) l'ICNIRP considera le evidenze disponibili sufficientemente supportate. Infine, l'ICNIRP rileva che non vi è evidenza che l'esposizione a campi continui (ad esempio sinusoidali) o discontinui (ad esempio pulsati) si traduca in effetti biologici differenti e non opera pertanto alcuna distinzione teorica tra queste tipologie di esposizione.

Allo scopo di determinare le soglie di effetto l'evidenza scientifica presa in considerazione riguarda **tutte** le esposizioni a campi a radiofrequenza, comprese quelle

riferite come di “basso livello” e “non termiche”. In generale, la letteratura sugli effetti dei campi a radiofrequenza è relativa a livelli di esposizione sostanzialmente inferiori rispetto a quelli richiesti per produrre effetti avversi sulla salute, con poche pubblicazioni inerenti l'individuazione delle soglie per effetti avversi sulla base dei meccanismi d'azione biologici noti. L'ICNIRP ha ritenuto quindi utile ai fini della formulazione delle linee guida anche la letteratura relativa al rapporto tra la salute e gli effetti biologici primari, spesso più abbondante rispetto all'altra. Per ogni effetto avverso individuato l'ICNIRP identifica la “**soglia di effetto avverso per la salute**”, definita come il più basso livello espositivo noto in grado di indurre l'effetto. Se la soglia così determinata non si può chiaramente evincere dalla letteratura sugli effetti delle radiofrequenze, o qualora dati scientifici non riferiti alla letteratura inerente gli effetti sulla salute delle radiofrequenze indichino (in modo indiretto) che potrebbero essere pericolosi livelli di esposizione inferiori alle soglie ricavate dalla letteratura sulle radiofrequenze, l'ICNIRP fissa una “**soglia operativa di effetto avverso per la salute**”. L'esempio tipico riguarda la relazione tra un effetto primario dell'esposizione, quale il riscaldamento, e un effetto sulla salute, ad esempio il dolore, che può fornire un livello operativo per mezzo del quale derivare le restrizioni per raggiungere un livello appropriato di protezione.

Alla soglia di effetto avverso o alla soglia operativa si applicano, secondo l'impostazione che l'ICNIRP ha costantemente seguito nelle linee guida di protezione dai campi elettromagnetici, **fattori di riduzione**, ossia fattori numerici che permettono di “scalare” il valore soglia ricavato dalla letteratura e ottenere così la restrizione all'esposizione. I fattori di riduzione sono introdotti per tener conto di numerose variabili che possono comportare soglie effettive di effetto inferiori rispetto a quelle evinte dalla letteratura: variabilità biologica della popolazione (ad esempio età, sesso), variazioni nelle condizioni di base (quali la temperatura dei tessuti), variabilità dei fattori ambientali (ad esempio temperatura dell'aria, umidità, abbigliamento), incertezze dosimetriche, incertezze più generali attinenti all'ambito delle discipline afferenti all'area della tutela della salute.

Le restrizioni così ottenute sono definite “**restrizioni di base**” e sono riferite alle grandezze fisiche (**grandezze di base**) direttamente correlate agli effetti avversi sulla salute indotti dall'esposizione a radiofrequenze. Alcune di queste grandezze sono interne ai tessuti e la loro misurazione è spesso complessa, richiedendo l'esecuzione di particolari prove di laboratorio o l'applicazione metodi raffinati di dosimetria. Di conseguenza, a partire dalle restrizioni di base sono stati derivati valori (“**Livelli di riferimento**”) associati a grandezze (“**Grandezze di riferimento**”) più facilmente valutabili in quanto misurabili nell'ambiente, che sono correlati alle restrizioni di base e rappresentano pertanto un approccio pratico per assicurare il rispetto di queste ultime. Infatti, i livelli di riferimento sono stati sta-

biliti per assicurare un livello di protezione equivalente a quello delle restrizioni di base, essendo stati formulati in relazione al “caso peggiore”, ossia alle condizioni espositive nelle quali è massimo l'accoppiamento del campo a radiofrequenza con i tessuti e con il corpo nel suo insieme, che comportano quindi il massimo assorbimento di energia (eventualità che raramente si concretizza negli scenari reali di esposizione). Pertanto, nella gran maggioranza dei casi il rispetto dei livelli di riferimento si traduce in esposizioni sostanzialmente inferiori rispetto a quelle consentite dalle corrispondenti restrizioni di base.

Le restrizioni fissate dall'ICNIRP sono differenti a seconda che l'esposizione sia di **tipo occupazionale** o interessi la **popolazione generale**. Questa impostazione, da sempre presente nelle linee guida ICNIRP riguardanti la protezione dall'esposizione a campi elettromagnetici, è basata sulla considerazione che i lavoratori sono soggetti adulti, generalmente in buono stato di salute, esposti in condizioni controllate durante lo svolgimento di specifiche mansioni, destinatari di un'attività di informazione/formazione che li rende consapevoli dei potenziali rischi legati alle radiofrequenze e della necessità di mettere in atto o rispettare misure appropriate di mitigazione del rischio. All'opposto, la popolazione generale è composta da individui di tutte le età e con diverso stato di salute (si pensi ai bambini, agli anziani, ai soggetti affetti da patologie anche gravi), includendo quindi individui o gruppi di individui potenzialmente più vulnerabili, che possono non avere consapevolezza della loro esposizione a campi elettromagnetici e che in genere non sono adeguatamente informati per mitigare il rischio, o non hanno la possibilità e/o la capacità di farlo. Tali motivazioni indicano quindi l'esigenza di prevedere restrizioni più stringenti per la popolazione generale. In tale ottica, peraltro, **il feto viene esplicitamente considerato quale membro della popolazione generale**, a prescindere dallo scenario espositivo, ed è quindi soggetto alle restrizioni previste per la popolazione generale. È opportuno rilevare che nelle linee guida del 1998 quest'ultima specifica non era ancora presente.

L'ICNIRP sottolinea di aver adottato nella formulazione delle linee guida un **approccio conservativo per ogni step del percorso protezionistico**, soprattutto in merito alla scelta del tipo di effetto avverso, agli scenari espositivi presunti, all'applicazione dei fattori di riduzione e alla derivazione dei livelli di riferimento. Pertanto, il livello di protezione complessivo raggiunto risulta superiore rispetto a quello che si avrebbe considerando unicamente i fattori di riduzione, che spesso sono percepiti come i soli determinanti che assicurano un margine di sicurezza tra le soglie reali di effetto e le restrizioni effettivamente adottate. L'ICNIRP ritiene inoltre che non esistano evidenze adeguate per sostenere che misure di precauzione aggiuntive si traducano in un beneficio ulteriore per la salute della popolazione.

MECCANISMI D'AZIONE, GRANDEZZE CRITICHE E SOGLIE PER GLI EFFETTI AVVERSI SULLA SALUTE INDOTTI DALL'ESPOSIZIONE A CAMPI A RADIOFREQUENZA

Premessa

I campi a radiofrequenze generano, soprattutto attraverso la componente dell'onda rappresentata dal campo elettrico oscillante, campi elettrici interni ai tessuti, che sono definiti *campi elettrici indotti* (E_{ind}) e risultano del tutto equivalenti ai *campi elettrici interni* menzionati nelle linee guida ICNIRP del 2010. Il campo elettrico indotto nel corpo esercita una forza sia sulle molecole polari (principalmente le molecole dell'acqua) sia sulle particelle cariche libere in movimento, quali elettroni e ioni. In entrambi i casi, una parte dell'energia del campo è convertita in energia cinetica, forzando le molecole polari a ruotare e le particelle cariche a muoversi, generando così correnti. L'interazione con altre molecole polari e particelle cariche determina, se la frequenza di oscillazione del campo esterno e conseguentemente del campo elettrico indotto è sufficientemente elevata, la conversione dell'energia cinetica in calore.

Invece, se il campo elettrico indotto ha frequenza inferiore a circa 10 MHz ed è sufficientemente intenso può anche stimolare elettricamente i tessuti eccitabili. L'effetto della stimolazione nervosa varia in funzione della frequenza e viene tipicamente riferito come sensazione di formicolio per frequenze attorno a 100 kHz. All'aumentare della frequenza gli effetti di riscaldamento predominano e da 10 MHz in su l'effetto è classicamente descritto come "calore".

Se E_{ind} è molto intenso e di breve durata può esercitare forze elettriche sufficienti a causare la cosiddetta "rottura dielettrica" delle membrane biologiche, ossia la formazione di soluzioni di continuo nella loro struttura che possono (a seconda dei parametri di campo applicati) essere transitorie o portare alla rottura definitiva della membrana, analogamente a quanto accade nel caso dei campi elettromagnetici pulsati a bassa frequenza e nell'elettroporazione da corrente continua. L'alterazione della permeabilità delle membrane cellulari è stata osservata anche per esposizione a radiofrequenze in continuo a 18 GHz, ma l'effetto è stato dimostrato solo *in vitro* e richiede livelli di esposizione molto alti (circa 5 kW kg^{-1} per molti minuti), di gran lunga superiori a quelli richiesti per concretizzare rischi di natura termica.

In merito al riscaldamento indotto dall'esposizione a radiofrequenze l'ICNIRP osserva in via preliminare che i dati disponibili non individuano i livelli di esposizione richiesti per indurre danni. In particolare, per livelli di esposizione superiori alle restrizioni previste dalle linee guida del 1998 la ricerca risulta scarsa, sebbene in letteratura venga riportato che alcune esposizioni hanno occasional-

mente causato gravi effetti (su base termica). Le restrizioni adottate dalle linee guida 2020 sono finalizzate a limitare l'incremento della temperatura dei tessuti, piuttosto che i valori assoluti della temperatura, nonostante gli effetti sulla salute siano principalmente correlati a questi ultimi (oltre che ai tempi). Tale approccio è stato scelto in quanto limitare i valori assoluti della temperatura risulterebbe problematico, dato che essi dipendono da molti fattori, quali la temperatura ambiente, l'abbigliamento e l'attività lavorativa. Come rileva l'ICNIRP, ciò significa che se l'esposizione a radiofrequenze comporta un determinato aumento della temperatura dei tessuti, l'impatto sulla salute può essere negativo, positivo o neutro in funzione della temperatura iniziale del corpo. Le restrizioni all'esposizione sono quindi stabilite per evitare aumenti significativi della temperatura, dove il termine "significativo" va inteso sia alla luce dei rischi potenziali sia in riferimento alle variazioni fisiologiche della temperatura.

Oltre a focalizzare l'attenzione sulla limitazione dell'incremento termico, le linee guida distinguono tra **aumenti di temperatura all'equilibrio**, dove la temperatura aumenta lentamente, dando tempo al calore di dissiparsi su una massa di tessuto maggiore e in virtù dei processi di termoregolazione, e **incrementi rapidi della temperatura**, per i quali manca il tempo sufficiente a dissipare il calore e che possono quindi tradursi in picchi di riscaldamento localizzati. La temperatura profonda del corpo, che interessa tutti gli organi interni, varia in funzione di fattori quali sesso, età, ora del giorno, attività svolta, condizioni ambientali ed efficienza della termoregolazione. Ad esempio, la temperatura media del corpo è approssimativamente di 37 °C, ma varia nel periodo delle 24 h in funzione delle esigenze fisiologiche, con oscillazioni che possono raggiungere 1 °C. Se la temperatura aumenta oltre 1 °C (condizione detta ipertermia) possono verificarsi effetti avversi, mentre se supera i 40 °C vi è il rischio del colpo di calore, con conseguenze potenzialmente fatali. L'ICNIRP ha fatto riferimento ad un valore conservativo pari a 1 °C di aumento della temperatura come valore soglia operativo per effetti avversi sulla salute.

Esposizioni che comportano assorbimento dell'energia al corpo intero e/o localmente

Nell'intervallo 100 kHz – 6 GHz la grandezza di base principale, che ha rilevo dosimetrico, è rappresentata dal **rateo di assorbimento specifico** (*Specific Absorption Rate* – SAR), ossia dalla quantità di energia assorbita per unità di tempo e di massa del tessuto (in watt su kilogrammo, W kg⁻¹). Come riportato nell'appendice A delle linee guida ICNIRP 2020, il SAR può essere espresso mediante la formula: $SAR = \sigma|E|^2/\rho$, dove σ è la conducibilità del tessuto, E rappresenta il campo elettrico interno (valore *root mean square* - rms) e ρ è la densità del tessuto. L'aumento della temperatura è fortemente correlato al SAR. In condizioni

dove la perdita di calore dovuta a processi quali la conduzione non è significativa tale correlazione è espressa della seguente relazione: $SAR = C(dT/dt)$, dove C è la capacità termica specifica del tessuto, T la temperatura e t la durata dell'esposizione (in secondi). In relazione al fattore tempo, in condizioni semplificate vale la seguente relazione (tratta dall'appendice A delle linee guida ICNIRP 2020): $T(t) = T_0 + (T_\infty - T_0)(1 - e^{-t/\tau})$, dove $T(t)$ è la temperatura in funzione del tempo, T_0 e T_∞ sono rispettivamente la temperatura iniziale e la temperatura dello stato stazionario e τ è la costante di tempo. In questo caso la costante di tempo è pari al 63% del tempo necessario per passare dalla temperatura iniziale alla temperatura dello stato stazionario.

Nelle linee guida ICNIRP 2020 l'intervallo temporale utilizzato ai fini protezionistici ammonta all'80-90% del tempo necessario a raggiungere lo stato di equilibrio tra produzione e dispersione del calore a partire dalla temperatura iniziale, ed è pari a circa due volte la costante di tempo. Simulazioni numeriche dell'aumento della temperatura corporea per quanto riguarda un corpo nudo esposto a un'onda piana di 65 MHz e di 2 GHz evidenziano che sono necessari almeno 60 minuti per determinare l'aumento di 1 °C in presenza di valori di SAR compresi tra 6 e 8 W kg⁻¹. Il tempo dipende anche dal tasso di sudorazione, dato che una forte sudorazione incrementa il tempo complessivo di 40 - 100 minuti. La sudorazione, oltre a modificare la costante di tempo, influenza anche il valore di SAR richiesto per aumentare di 1 °C la temperatura corporea: individui con basso tasso di sudorazione quali gli anziani, che hanno peraltro anche una diminuita sensazione termica, richiedono un SAR di circa 4,5 W kg⁻¹, mentre per individui con tasso di sudorazione normale sono necessari 6 W kg⁻¹.

La modellizzazione evidenzia che nel caso dei bambini i valori di SAR raggiunti sono anche del 40% più elevati a parità di esposizione, per ragioni essenzialmente dimensionali; non sembrano invece avere rilievo significativo le differenze nelle proprietà elettriche nei tessuti tra l'età infantile e l'età adulta. Tuttavia, come sottolinea l'ICNIRP, il raggiungimento di tali ratei di energia assorbita richiede il mantenimento di posture fisse per tempi adeguati e, soprattutto, è ampiamente compensato dalla maggior termodispersione. Infatti, fino a qualche anno di età l'incremento della temperatura corporea media è anche il 35% inferiore rispetto all'adulto a parità di SAR medio a corpo intero, come evidenziato dall'impiego di modelli. Il rapporto tra la superficie corporea (approssimabile con la superficie cutanea) e il volume del corpo (quest'ultimo direttamente correlato alla massa corporea) è più elevato per gli individui di bassa statura (quali i bambini) o per gli individui con basso *Body Mass Index* (persone magre). Più è elevato il rapporto superficie/volume maggiore è la velocità di termodispersione dell'organismo. Di conseguenza, in questi casi per raggiungere lo stesso incremento di temperatura è richiesto un SAR medio a corpo intero più elevato.

Nell'insieme, la modellistica teorica recente e la generalizzazione dei dati della ricerca sperimentale su diverse specie animali indicano che esposizioni che si traducono in un valore di SAR medio a corpo intero di circa 6 W kg^{-1} , nell'intervallo 100 kHz – 6 GHz, per almeno 1 ora in condizioni termiche neutre ($28 \text{ }^\circ\text{C}$ per il corpo nudo a riposo) si traducono in un aumento di $1 \text{ }^\circ\text{C}$ della temperatura profonda negli individui adulti sani e nei bambini. Come detto, nel caso di individui con bassa sudorazione (quali gli anziani) il SAR richiesto è pari a circa $4,5 \text{ W kg}^{-1}$. Tuttavia, tenuto conto delle limitazioni e delle incertezze che caratterizzano i dati disponibili l'ICNIRP adotta ancora una volta un approccio conservativo e considera che un aumento della temperatura corporea profonda pari a $1 \text{ }^\circ\text{C}$ sia raggiunto per livelli di esposizione a radiofrequenze protratti per **30 minuti** che comportano un valore di SAR medio a corpo intero pari a 4 W kg^{-1} . La media temporale su 30 minuti tiene conto, conservativamente, del tempo necessario a raggiungere l'equilibrio termico e differisce dai 6 minuti previsti, invece, nelle linee guida ICNIRP del 1998. Ciò è dovuto all'affinamento delle conoscenze in ambito termofisiologico che la ricerca ha prodotto negli ultimi 20 anni e riflette più fedelmente l'attivazione di tutti i meccanismi termoregolatori dell'organismo, a partire dall'aumento del flusso ematico, considerando pertanto in modo più adeguato, ai fini dell'effettivo aumento della temperatura, le dinamiche fisiologiche che portano al raggiungimento della situazione di equilibrio tra produzione e dispersione del calore.

Quali puri termini di confronto, si consideri che l'attività metabolica di una persona adulta produce circa 1 W kg^{-1} a riposo, 2 W kg^{-1} stando in piedi e 12 W kg^{-1} durante la corsa.

Per quanto riguarda l'**aumento locale della temperatura**, i dati disponibili evidenziano che temperature inferiori a $42 \text{ }^\circ\text{C}$ per periodi di tempo prolungati non causano dolore o danno cellulare a livello della cute. Per esposizioni a 94 GHz è stata osservata una soglia del dolore attorno a $43 \text{ }^\circ\text{C}$. Inoltre, esiste una consolidata letteratura che colloca le soglie di danno termico ai tessuti nell'intervallo di temperatura $41 - 43 \text{ }^\circ\text{C}$, con probabilità di insorgenza e gravità che aumentano in funzione del tempo trascorso a questi valori di temperatura. L'ICNIRP considera le esposizioni a radiofrequenze che si traducono localmente in una temperatura di $41 \text{ }^\circ\text{C}$ o superiore come potenzialmente pericolose e prende in esame due tipologie di tessuti, ai quali, sulla base della loro temperatura in condizioni normotermiche, sono attribuite differenti soglie operative di effetto avverso: tessuti di "**tipo 1**" (tutti i tessuti di braccio, avambraccio, mano, coscia, gamba, piede, cornea, camera anteriore dell'occhio e iride, epidermide, derma, tessuto adiposo, muscolo e tessuto osseo) e tessuti di "**tipo 2**" (tutti i tessuti della testa, occhio, addome, schiena, torace e pelvi, con l'esclusione di quelli definiti come tessuti di tipo 1).

La normotermia per i tessuti di tipo 1 è tipicamente inferiore a 33 – 36 °C, mentre per i tessuti di tipo 2 è inferiore a 38,5 °C. Questi valori sono stati impiegati per definire le soglie operative per effetti avversi sulla salute indotti dal riscaldamento locale. Assumendo il valore di 41 °C come potenzialmente pericoloso le linee guida seguono anche in questo caso un approccio conservativo e identificano aumenti di temperatura pari rispettivamente a 5 e a 2 °C come soglie operative per effetti avversi sulla salute dovuti a esposizioni locali, rispettivamente per i tessuti di tipo 1 e di tipo 2. Dato che non sarebbe proponibile dal punto di vista pratico fissare restrizioni all'esposizione in funzione di tutti i tessuti prima menzionati, l'ICNIRP definisce due comparti, stabilendo due restrizioni separate: “**testa e tronco**”, regione comprendente testa, occhio, addome, schiena, torace e pelvi (e contenente tessuti sia di tipo 1 che di tipo 2), “**arti**”, regione che include braccio, avambraccio, mano, coscia, gamba e piede e che è formata solo da tessuti di tipo 1. Poiché gli arti non contengono tessuti di tipo 2 la soglia operativa per effetti avversi è in questo caso pari a 5 °C, quindi significativamente superiore ai 2 °C del comparto testa e tronco.

Nel contesto descritto le **gonadi maschili** (testicoli) non rientrano in nessuna delle due categorie, ma possono essere considerati un caso speciale. Infatti, cambiamenti di natura funzionale, ma gradualmente e reversibili, possono avere luogo, senza una soglia apparente, nell'ambito della normale variazione fisiologica della temperatura, anche in relazione a periodi di tempo prolungati. Ad esempio, la spermatogenesi si riduce in modo reversibile come risultato di un aumento di temperatura fino a 2 °C determinato dalle normali attività o da particolari posture (come sedersi rispetto allo stare in piedi). In tal modo è possibile che la soglia per effetti avversi sulla salute adottata per i tessuti di tipo 2 (aumento di 2 °C) possa determinare cambiamenti reversibili della funzione spermatica. Non vi sono però attualmente indicazioni che tali effetti siano sufficienti a comprometterla. Anche il feto rappresenta un caso particolare. Dato che il principale meccanismo termoregolatore del **feto** è lo scambio di calore con la madre attraverso il sangue del cordone ombelicale, la temperatura corporea fetale è fortemente controllata dalla temperatura materna ed è tipicamente di 0,5 °C superiore a quella della madre, anche se nelle fasi precoci della gravidanza non vi sono indicazioni precise sulla temperatura del prodotto del concepimento. Il rispetto della soglia di 2 °C di incremento termico assicura la protezione del feto, considerato che nell'animale non sono stati osservati effetti teratogeni per aumenti della temperatura profonda inferiori a 2 °C.

Per esposizioni circoscritte a singoli tessuti/distretti/regioni corporee, cioè localizzate, nell'intervallo 100 kHz – 6 GHz il SAR mediato su una massa cubica di 10 g di tessuto (SAR_{10g}) rappresenta la grandezza più appropriata da correlare all'aumento di temperatura una volta raggiunto l'equilibrio termico nell'ambito del

tessuto considerato. Infatti, anche in presenza di forti eterogeneità iniziali degli incrementi di temperatura all'interno del tessuto dovuti all'esposizione a radiofrequenze, la diffusione del calore distribuisce rapidamente l'energia termica su un volume di fatto molto più grande di quello occupato da una massa di 10 g. Mentre nelle linee guida del 1998 il riferimento a una massa di 10 g era inteso come 10 g di tessuto contiguo, nell'aggiornamento del 2020 si specifica che i 10 g devono essere considerati come massa tissutale di forma cubica. Questo affinamento tiene conto dell'evoluzione della modellizzazione nel settore del bioelettromagnetismo. Il tempo per raggiungere l'80-90% della temperatura d'equilibrio alle frequenze di 800 MHz e 1,9 GHz è pari a 12-16 minuti. L'ICNIRP ha pertanto deciso, in modo conservativo, di riferire le esposizioni locali fino alla frequenza di 6 GHz ad una media temporale di **6 minuti**. Come si evince all'appendice A delle linee guida, su masse di tessuto di 10 g gli incrementi di temperatura per unità di massa e di SAR (definiti *fattori di riscaldamento*) sono 0,11- 0,16 °C kg W⁻¹ per l'occhio, circa 0,1 °C kg W⁻¹ per il cervello, circa 0,25 °C kg W⁻¹ nel caso della cute e 0,1 °C kg W⁻¹ per il feto (alla 13°, 18° e 26° settimana di gravidanza, ma al massimo 0,02 °C kg W⁻¹ nelle prime fasi della gravidanza). Per superare la soglia operativa per effetti avversi sulla salute in relazione alla testa e al tronco è pertanto necessario un valore di SAR_{10g} di almeno **20 W kg⁻¹**, mantenuto per un intervallo temporale sufficiente a raggiungere la temperatura d'equilibrio. Il corrispondente valore per gli arti è pari a **40 W kg⁻¹**.

Esposizioni che comportano l'assorbimento superficiale dell'energia

Per campi con frequenza **superiore a 6 GHz** il riscaldamento interessa prevalentemente la cute, in quanto l'assorbimento dell'energia è più superficiale, così come evidenziato in tabella 3.

TABELLA 3. PROFONDITÀ DI PENETRAZIONE A LIVELLO DELLA CUTE UMANA PER FREQUENZE DI CAMPO ELETTROMAGNETICO COMPRESSE TRA 6 E 300 GHz (ADATTATA DA TABLE 10 DELLE LINEE GUIDA ICNIRP 2020)

FREQUENZA (GHz)	PERMETTIVITÀ RELATIVA	CONDUCIBILITÀ (S m ⁻¹)	PROFONDITÀ DI PENETRAZIONE (mm)
6	36	4	8,1
10	33	7,9	3,9
30	18	27	0,92
60	10	40	0,49
100	7,3	46	0,35
300	5,0	55	0,23

A titolo di esempio, alle frequenze di 6 e 300 GHz l'86% della potenza viene assorbita rispettivamente entro 8 mm e 1 mm dalla superficie cutanea. Rispetto al calore profondo, il calore superficiale viene rimosso più facilmente, in quanto l'energia termica viene trasferita all'ambiente in modo più rapido. Tuttavia, la ricerca ha evidenziato che le frequenze superiori a 300 GHz (radiazione infrarossa) possono incrementare la temperatura corporea profonda di oltre 1 °C. Questo accade perché la radiazione infrarossa riscalda il derma e l'estesa rete vascolare dermica può trasportare il calore in profondità nei tessuti. Per tale ragione l'ICNIRP osserva che appare appropriato proteggere i tessuti dall'aumento della temperatura profonda anche per esposizioni comprese tra 6 GHz e 300 GHz, sebbene non sia disponibile attività di ricerca nel merito. L'ICNIRP individua conservativamente il valore di 4 W kg^{-1} come soglia operativa per effetti avversi dovuti all'aumento della temperatura profonda in relazione all'intervallo 6 – 300 GHz. Infatti, l'esposizione a radiazione infrarossa con densità di potenza incidente pari a 1260 W m^{-2} su un lato del corpo si traduce in un aumento pari a 1 °C della temperatura profonda. Se tale esposizione viene riferita ad un adulto di 70 kg con una superficie cutanea esposta pari a 1 m^2 e senza riflettanza della cute ciò comporta un'esposizione a corpo intero pari a circa 18 W kg^{-1} , quindi molto superiore al valore di 4 W kg^{-1} . L'assorbimento prevalentemente superficiale dell'energia nell'intervallo 6 – 300 GHz rende il SAR una grandezza poco o per nulla idonea ad essere impiegata per finalità dosimetriche. In questo intervallo assume invece importanza la quantità di energia che viene assorbita dalla cute nell'unità di tempo e di superficie, ossia la **densità di potenza assorbita** (S_{ab} , misurata in watt su metro quadrato, W m^{-2}), che si correla bene con l'incremento superficiale della temperatura e che le linee guida ICNIRP 2020 individuano pertanto come grandezza di base. Va rilevato che tra 6 e 10 GHz vi è anche un assorbimento significativo di energia nel tessuto sottocutaneo, tuttavia l'incremento massimo di temperatura si registra in prossimità della superficie della cute. Modellizzazioni recenti suggeriscono che per le frequenze tra 6 e 30 GHz l'esposizione riferita ad un'area quadrata con superficie pari ai 4 cm^2 fornisce una buona stima dell'aumento massimo locale della temperatura. Peraltro, il riferimento a un'area superficiale quadrata di 4 cm^2 si armonizza con l'analogo riferimento a un volume cubico di tessuto di 10 g (le cui facce hanno superficie poco superiore a 4 cm^2) per quanto riguarda il SAR locale relativo alle esposizioni fino alla frequenza di 6 GHz. Per frequenze superiori a 30 GHz viene introdotta una specifica aggiuntiva, che tiene conto della possibilità che la cute sia esposta a fasci di irradiazione con piccolo diametro (focalizzati), per i quali le restrizioni adottate non sono più riferite a una superficie quadrata di 4 cm^2 , bensì ad una superficie quadrata di 1 cm^2 . Anche se il valore dell'area superficiale di riferimento potrebbe essere gradualmente ridotto passando tra 6 e 300 GHz, l'ICNIRP rileva che per scopi pratici di protezione tra 6 e 300 GHz può essere mantenuto il

valore di 4 cm^2 , affiancato però dal riferimento aggiuntivo pari a 1 cm^2 , allo scopo di garantire che le soglie operative per effetti avversi non siano superate a livello di piccole regioni di spazio nel caso di esposizioni che coinvolgono fasci focali tra 30 e 300 GHz. Dato che 6 minuti rappresentano un intervallo temporale appropriato per mediare l'esposizione e che è necessaria una densità di potenza assorbita di circa 200 W m^{-2} per determinare, a seguito dell'esposizione a frequenze comprese tra 6 e 300 GHz, un incremento di temperatura superficiale pari a $5 \text{ }^\circ\text{C}$ per i tessuti di tipo 1, l'ICNIRP riconosce in questo caso come soglia operativa un valore di densità di potenza assorbita pari a 200 W m^{-1} , mediato su **6 minuti** e su **4 cm^2** . Per le frequenze **superiori a 30 GHz** e per **esposizioni focali** la soglia operativa viene raddoppiata, ossia 400 W m^{-1} , mediata questa volta sulla superficie di **1 cm^2** . L'incremento della soglia tiene conto della più rapida dissipazione del calore che si ha nel caso dell'esposizione localizzata di un'area superficiale più piccola.

Per quanto riguarda la gestione dell'esposizione superficiale a radiofrequenze le differenze tra le nuove e le vecchie linee guida ICNIRP sono abbastanza rilevanti. Le linee guida ICNIRP del 1998 consideravano infatti l'intervallo dell'assorbimento superficiale a partire da 10 GHz. In realtà le frequenze di transizione per quanto riguarda l'interazione campo-tessuti non sono mai nette (valori singoli), ma sempre abbastanza gradualmente (intervalli) e la scelta di 6 GHz operata nelle nuove linee guida viene fatta sulla base di ulteriori affinamenti legati ai progressi delle conoscenze relative all'interazione tra campo e tessuti corporei e anche per ragioni più pratico-operative. Inoltre, nelle vecchie linee guida la grandezza rilevante veniva individuata nella quantità di energia che semplicemente **incide** sulla cute per unità di superficie e di tempo, ossia nella **densità di potenza elettromagnetica dell'onda piana equivalente** (che rappresentava anche la grandezza di riferimento per frequenze superiori a 10 GHz), non nella quantità di energia assorbita dalla cute per unità di superficie e di tempo (**densità di potenza assorbita**), che a ben vedere costituisce la vera grandezza di significato protezionistico. L'ICNIRP ha infatti valutato nell'ambito del percorso che ha condotto alle attuali linee guida che la densità di potenza incidente non soddisfi appieno i requisiti per essere una grandezza di base, anche in considerazione del fatto che una quota variabile dell'energia incidente sulla cute (fino al 50%) viene riflessa. Le vecchie restrizioni di base erano pari rispettivamente a 50 W m^{-2} per i lavoratori e a 10 W m^{-2} per la popolazione generale (diverse da quelle delle nuove linee guida, riportate in tabella 4), mediate però su ogni area pari a 20 cm^2 di superficie cutanea esposta (e non su 4 cm^2 , come nelle nuove linee guida) e su un periodo di tempo pari a $68/f^{1.05}$ minuti. Si prevedeva inoltre che la densità di potenza massima incidente sulla cute e sulla cornea non potesse superare di oltre 20 volte i valori stabiliti rispettivamente per i lavoratori e per la popolazione generale, ma in questo caso con valore mediato su 1 cm^2 (area superficiale che nelle nuove linee guida costituisce invece il riferimento per esposizioni focalizzate con frequenza superiore a 30 GHz).

Esposizioni di breve durata

Per alcune tipologie di esposizione si può verificare un rapido aumento della temperatura, in grado di determinare *hot spot*, ossia distribuzioni eterogenee della temperatura nella massa del tessuto, con eventuali picchi potenzialmente pericolosi. Gli *hot spot* possono essere rilevanti in caso di esposizione a radiofrequenze impulsive (sotto forma di singoli impulsi, gruppi di impulsi o sottogruppi di impulsi all'interno di un treno di impulsi) e si formano perché il calore non ha tempo sufficiente per dissiparsi nel tessuto. Questo effetto è più pronunciato all'aumentare della frequenza, a causa della minore profondità di penetrazione, ed è importante in riferimento a elevate esposizioni di breve durata. La grandezza di base più appropriata è data in questo caso dall'**Assorbimento Specifico** dell'energia (*Specific Absorption* – SA, misurato in joule su chilogrammo, $J\ kg^{-1}$) per ogni 10 g di massa cubica del tessuto ed assume rilievo nell'intervallo **400 MHz – 6 GHz** per esposizioni **inferiori a 6 minuti**. Le restrizioni all'esposizione sono stabilite in relazione a questa grandezza e i valori individuati tengono conto dei tempi di esposizione. Per le frequenze inferiori a 400 MHz non è prevista nessuna nuova grandezza di base e nessuna restrizione per esposizioni su brevi intervalli di tempo. Infatti, al di sotto di 400 MHz i *pattern* di distribuzione dell'energia legati alla grande profondità di penetrazione del campo sono tali per cui il rispetto delle restrizioni per il SAR locale mediate su 6 minuti è sufficiente a evitare aumenti di temperatura oltre le soglie operative di effetto avverso, a prescindere dalla tipologia di esposizione.

La grandezza SA compariva anche nelle linee guida ICNIRP del 1998, ma veniva impiegata unicamente per limitare l'esposizione localizzata a livello della testa a radiofrequenze impulsive, allo scopo di prevenire effetti di tipo acustico nell'intervallo 0,3 – 10 GHz. L'effetto acustico è di natura puramente sensoriale e consiste nella percezione di uno stimolo acustico (in genere un *click* o un piccolo schiocco) quando la regione del capo è esposta a radiofrequenze impulsive con frequenza tra 0,3 a 10 GHz (tipicamente impulsi radar) ed è dovuto alla rapida espansione termoelastica dei fluidi dell'orecchio interno, che a sua volta stimola i recettori cocleari. Allo scopo di prevenire l'effetto, le linee guida del 1998 stabilivano per l'esposizione localizzata della testa una restrizione all'SA pari a $10\ mJ\ kg^{-1}$ per i lavoratori e a $2\ mJ\ kg^{-1}$ per la popolazione generale, mediati su 10 g di tessuto. Nelle nuove linee guida l'ICNIRP non ha più ritenuto utile fissare restrizioni in merito, considerando gli effetti acustici di natura puramente sensoriale ed evidentemente ritenendoli non pericolosi non solo per la salute ma anche per la sicurezza, e la grandezza SA viene così impiegata come grandezza di base per limitare l'assorbimento locale dell'energia da parte di tutti i tessuti della testa, del tronco e degli arti in relazione a tempi di esposizione brevi (inferiori a 6 minuti) nell'intervallo 400 MHz – 6 GHz.

Per campi con frequenza **superiore a 6 GHz** viene introdotta dall'ICNIRP una nuova grandezza di base per limitare *hot spot* superficiali a livello di testa, tronco e arti a seguito di brevi esposizioni, ossia la densità di **energia assorbita** (U_{ab} , misurata in joule su metro quadrato, $J m^{-2}$). Quest'ultima corrisponde alla quantità totale di energia assorbita dalla cute per unità di superficie e per tempi complessivi di esposizione inferiori a 6 minuti e va riferita ad un'area quadrata di $4 cm^2$, ma per l'intervallo di frequenze 30 – 300 GHz viene introdotto il riferimento aggiuntivo su aree quadrate pari a $1 cm^2$, in modo da tener conto dell'esposizione a fasci focalizzati di radiofrequenze.

RESTRIZIONI DI BASE

Le considerazioni relative ai meccanismi d'azione, alle soglie di effetto avverso e alle grandezze critiche (discusse in precedenza) consentono all'ICNIRP di stabilire i valori delle restrizioni di base, riportati nel seguito per quanto riguarda le linee generali e dettagliati nelle tabelle 4, 5 e 6, queste ultime adattate a partire da quelle presenti nel testo delle linee guida ICNIRP 2020.

- **SAR a corpo intero (100 kHz – 6 GHz)**. Alla soglia per effetti avversi sulla salute pari a $4 W kg^{-1}$ mediati su un periodo di 30 minuti l'ICNIRP applica un fattore di riduzione pari a 10 per ottenere la restrizione di base per i lavoratori. Quest'ultima è pertanto pari a $0,4 W kg^{-1}$, corrispondente ad un aumento medio della temperatura corporea di $0,1 ^\circ C$. L'ICNIRP rileva che SAR più elevati mantenuti per periodi di tempo inferiori non influenzano in modo apprezzabile la temperatura corporea, anche perché devono essere contemporaneamente rispettate le restrizioni per il SAR locale. Per la popolazione generale il fattore di riduzione adottato è pari a 50 e, conseguentemente, la restrizione al valore del SAR a corpo intero diventa $0,08 W/kg^{-1}$ (sempre mediata su **30 minuti**). Il prospetto completo delle restrizioni è riportato in tabella 4. Come messo in rilievo nel testo delle linee guida, **l'incertezza scientifica relativa sia alla dosimetria che agli effetti avversi per la salute dell'esposizione a corpo intero a radiofrequenze si è sostanzialmente ridotta dal tempo delle precedenti linee guida ICNIRP (1998) e potrebbe giustificare l'adozione di fattori di riduzione meno conservativi. Tuttavia l'ICNIRP ha deciso di mantenere ugualmente quelli precedenti, valutando che i benefici complessivi di tale scelta superino quelli legati all'adozione di restrizioni meno conservative.**
- **SAR locale (100 kHz – 6 GHz)**. Alla soglia operativa per effetti avversi pari a $20 W kg^{-1}$ viene applicato un fattore di riduzione 2 per ricavare la restrizione relativa ai lavoratori per il tronco e la testa, che risulta quindi essere pari

a **10 W kg⁻¹** mediati su un intervallo di **6 minuti**, ed un fattore di riduzione 10 per la popolazione generale, con una restrizione per il tronco e la testa di **2 W kg⁻¹**, mediati sempre su un intervallo di **6 minuti**. Per quanto riguarda gli arti, anche in questo caso vengono applicati fattori di riduzione pari rispettivamente a 2 e a 10 alla soglia operativa per effetti avversi di 40 W kg⁻¹, portando a una restrizione di base di **20 W kg⁻¹** per i lavoratori e di **4 W kg⁻¹** per la popolazione generale, sempre mediati su un intervallo di tempo di **6 minuti**. Anche per il SAR locale il prospetto completo delle restrizioni è riportato in tabella 4. L'ICNIRP rileva che **i fattori di riduzione per le esposizioni locali sono inferiori a quelli adottati per l'esposizione a corpo intero, dato che la relativa soglia per effetti avversi è meno dipendente dalle condizioni ambientali e dai processi termoregolatori controllati centralmente e considerato che i pertinenti effetti sulla salute sono meno gravi dal punto di vista medico.**

- **S_{ab} locale (6 – 300 GHz).** Alla soglia operativa di 200 W m⁻² mediata su **6 minuti** e su una superficie quadrata di **4 cm²** si applicano i fattori di riduzione pari a 2 e a 10, allo scopo di ottenere, rispettivamente, le restrizioni per i lavoratori e per la popolazione generale, pari pertanto a **100** e a **20 W m⁻²**. Per tener conto dell'esposizione a fasci focalizzati di radiofrequenze, nell'intervallo **30 – 300 GHz la densità di potenza assorbita mediata su un'area quadrata di 1 cm² non deve superare il doppio delle restrizioni di base mediate su 4 cm²** previste rispettivamente per i lavoratori e per la popolazione generale (prospetto completo in tabella 4).
- **SA locale (400 MHz – 6 GHz).** Alle soglie operative sono stati applicati fattori di riduzione rispettivamente di 2 e 10 per ottenere le restrizioni di base relative ai lavoratori e alla popolazione generale. Il prospetto completo delle restrizioni è riportato in tabella 5.
- **U_{ab} locale (6 – 300 GHz).** Alle soglie operative sono stati applicati anche in questo caso fattori di riduzione pari rispettivamente a 2 e a 10 per ottenere le restrizioni di base relative ai lavoratori e alla popolazione generale. Il prospetto completo delle restrizioni è riportato in tabella 5.
- Alle restrizioni precedentemente indicate l'ICNIRP aggiunge **restrizioni di base sul campo elettrico indotto** per valori di picco spaziale nell'intervallo 100 kHz – 10 MHz, che sono numericamente le stesse di quelle riportate nelle linee guida del 2010, in quel caso però intese in riferimento alla stimolazione elettrica dei tessuti eccitabili. Il prospetto completo di tali restrizioni è riportato in tabella 6.

TABELLA 4. RESTRIZIONI DI BASE PER L'ESPOSIZIONE A CAMPI ELETTROMAGNETICI CON FREQUENZA COMPRESA TRA 100 kHz E 300 GHz, MEDIATE TEMPORALMENTE SU INTERVALLI MAGGIORI O UGUALI A 6 MINUTI*
(ADATTATA DA TABLE 2 DELLE LINEE GUIDA ICNIRP 2020)

SCENARIO ESPOSITIVO	INTERVALLO DI FREQUENZA	SAR MEDIO A CORPO INTERO (W kg ⁻¹)	SAR LOCALE PER LA TESTA E IL TRONCO (W kg ⁻¹)	SAR LOCALE PER GLI ARTI (W kg ⁻¹)	S _{ab} LOCALE (W m ⁻²)
Lavoratori	100 kHz - 6 GHz	0,4	10	20	Non applicabile
	> 6 - 300 GHz	0,4	Non applicabile	Non applicabile	100
Popolazione generale	100 kHz - 6 GHz	0,08	2	4	Non applicabile
	> 6 - 300 GHz	0,08	Non applicabile	Non applicabile	20

*Note

- Il SAR medio a corpo intero deve essere mediato su un intervallo temporale di 30 minuti.
- Il SAR locale e la S_{ab} locale devono essere mediati su un intervallo temporale di 6 minuti.
- Il SAR locale deve essere mediato su una massa di tessuto cubica pari a 10 g.
- La S_{ab} locale deve essere mediata su un'area quadrata pari a 4 cm² di superficie corporea. Per frequenze superiori a 30 GHz viene imposto un ulteriore vincolo, ossia che l'esposizione mediata su un'area superficiale del corpo pari a 1 cm² viene limitata a **2 volte** la restrizione mediata su 4 cm².

TABELLA 5. RESTRIZIONI DI BASE PER L'ESPOSIZIONE A CAMPI ELETTROMAGNETICI CON FREQUENZA COMPRESA TRA 100 KHz E 300 GHz, INTEGRATE TEMPORALMENTE SU INTERVALLI COMPRESI TRA 0 E 6 MINUTI*
(ADATTATA DA TABLE 3 DELLE LINEE GUIDA ICNIRP 2020)

SCENARIO ESPOSITIVO	INTERVALLO DI FREQUENZA	SA LOCALE PER LA TESTA E IL TRONCO (k) kg ⁻¹	SA LOCALE PER GLI ARTI (k) kg ⁻¹	U _{ab} LOCALE (kJ m ⁻²)
Lavoratori	100 kHz - 400 MHz	Non applicabile	Non applicabile	Non applicabile
	> 400 MHz - 6 GHz	3,6[0,05+0,95(t/360) ^{0,5}]	7,2[0,025+0,975(t/360) ^{0,5}]	Non applicabile
	> 6 - 300 GHz	Non applicabile	Non applicabile	36[0,05+0,95(t/360) ^{0,5}]
Popolazione generale	100 kHz - 400 MHz	Non applicabile	Non applicabile	Non applicabile
	> 400 MHz - 6 GHz	0,72[0,05+0,95(t/360) ^{0,5}]	1,44[0,025+0,975(t/360) ^{0,5}]	Non applicabile
	> 6 - 300 GHz	Non applicabile	Non applicabile	7,2[0,05+0,95(t/360) ^{0,5}]

*Note

- t è il tempo in secondi e le restrizioni devono essere rispettate per tutti i valori di t compresi tra 0 e 360 secondi, a prescindere dalle caratteristiche temporali dell'esposizione.
- L'SA locale deve essere mediato su una massa cubica di 10 g.
- L'U_{ab} locale deve essere mediata su un'area quadrata pari a 4 cm² di superficie corporea. Per frequenze superiori a 30 GHz viene imposto un ulteriore vincolo, ossia che l'esposizione mediata su un'area quadrata superficiale del corpo pari a 1 cm² viene limitata a 72[0,025+0,975(t/360)^{0,5}] per l'esposizione dei lavoratori e a 14,4[0,025+0,975(t/360)^{0,5}] per l'esposizione della popolazione generale.
- L'esposizione a ogni impulso, gruppo di impulsi o sottogruppo di impulsi in un treno, così come la sommazione delle esposizioni (incluse quelle a campi elettromagnetici non pulsati), distribuita in t secondi, non deve superare questi livelli.

TABELLA 6. RESTRIZIONI DI BASE PER L'ESPOSIZIONE AI CAMPI ELETTROMAGNETICI CON FREQUENZA COMPRESA TRA 100 KHz E 10 MHz PER VALORI DI PICCO SPAZIALE* (ADATTATA DA TABLE 4 DELLE LINEE GUIDA ICNIRP 2020).

GLI STESSI VALORI SONO RIPORTATI NELLE LINEE GUIDA ICNIRP 2010 (PER LA COMPONENTE DEGLI EFFETTI LEGATI ALL'INDUZIONE DI CORRENTE), CON ESTREMO INFERIORE DELL'INTERVALLO DI FREQUENZE PARI PERÒ A 3 KHz.

SCENARIO ESPOSITIVO	CAMPO ELETTRICO (E_{ind} , IN $V m^{-1}$)
Lavoratori	$2,70 \times 10^{-4} f$
Popolazione generale	$1,35 \times 10^{-4} f$

*Note

- f è la frequenza in Hz.
- I valori delle restrizioni si riferiscono a qualunque regione del corpo e devono essere mediati come valori *rms* su cubi di 2 mm di lato di tessuto contiguo (come specificato nelle linee guida ICNIRP 2010).

Come in precedenza rilevato, nelle linee guida ICNIRP 2020 viene affermato in modo esplicito che il feto è considerato ai fini protezionistici membro della popolazione generale. Ad esso si applicano pertanto le corrispondenti restrizioni di base previste per la popolazione generale. Parimenti, la donna in gravidanza viene considerata come membro della popolazione generale. Questo approccio è anch'esso cautelativo, dato che non vi sono evidenze relative a effetti avversi sul prodotto del concepimento per esposizioni a livelli di radiofrequenze che rispettino le restrizioni previste per i lavoratori. Tuttavia, l'ICNIRP segnala i risultati di una recente modellizzazione, nella quale scenari di esposizione della madre che determinano valori di SAR pari alle restrizioni di base previste per i lavoratori, sia a corpo intero che localmente, possono comportare esposizioni al feto che superano le restrizioni di base per la popolazione generale.

LIVELLI DI RIFERIMENTO

L'interazione tra i tessuti corporei e il campo elettromagnetico a radiofrequenza si traduce in *pattern* anche complessi di assorbimento dell'energia, in funzione anzitutto della frequenza, ma anche di fattori quali l'orientamento del corpo e delle sue parti rispetto ai vettori del campo, la forma d'onda etc. Ad esempio, la “**frequenza di risonanza**” con il corpo, in corrispondenza della quale si registra il massimo valore di SAR a corpo intero, si ha quando la metà della lunghezza d'onda nello spazio libero è prossima all'altezza dell'individuo. In funzione dell'orientamento, l'accoppiamento massimo si verifica nel caso di un'onda piana incidente verticalmente polarizzata, ossia con il vettore campo elettrico parallelo all'asse maggiore del corpo, mentre per tutte le altre polarizzazioni l'accoppiamento corpo-campo è minore ed il SAR risultante può essere anche alcuni ordini di grandezza infe-

riore. Il rispetto dei livelli di riferimento, individuati sulla base dei dati derivati da studi computazionali e da misure e correlati alle restrizioni di base, assicura, come argomentato in precedenza, il rispetto delle restrizioni di base anche nelle condizioni di massimo accoppiamento corpo-campo.

Le linee guida ICNIRP 1998 riconoscevano quali grandezze di riferimento per le radiofrequenze le seguenti: *intensità di campo elettrico, intensità di campo magnetico, densità di potenza elettromagnetica dell'onda piana equivalente e corrente indotta negli arti*. A queste erano associati i rispettivi livelli di riferimento. La densità di potenza elettromagnetica poteva essere assunta quale unica grandezza di riferimento per le condizioni di esposizione in campo lontano fino alla frequenza di 10 GHz, mentre per frequenze superiori e fino a 300 GHz rappresentava sia la grandezza di base sia la grandezza di riferimento.

L'aggiornamento 2020 delle linee guida ICNIRP 1998 ha introdotto per quanto riguarda le grandezze e i valori di riferimento modifiche di una certa rilevanza, ad iniziare da una rimodulazione degli intervalli spettrali considerati. A differenza delle precedenti linee guida, le grandezze intensità del campo elettrico e intensità del campo magnetico sono date unicamente fino alla frequenza di 2 GHz sia per esposizioni a corpo intero (mediate su 30 minuti) che per esposizioni locali (mediate su 6 minuti), mentre per frequenze superiori a 2 GHz si considera quale unica grandezza di riferimento la **densità di potenza incidente**, sempre per esposizioni sia a corpo intero sia locali. Anche in questo caso le modifiche tengono conto del progresso delle conoscenze in campo dosimetrico. Inoltre, per esposizioni locali su brevi intervalli (inferiori a 6 minuti) l'unica grandezza di riferimento riconosciuta, applicabile per tutte le frequenze superiori a 400 MHz, è la **densità di energia incidente**.

Nell'intervallo 100 kHz – 30 MHz i valori dei livelli di riferimento relativi all'intensità di campo elettrico e all'intensità di campo magnetico sono superiori rispetto a quelli previsti dalle linee guida del 1998, in quanto i progressi in campo dosimetrico hanno messo in evidenza che sono richiesti livelli di campo più elevati per raggiungere le restrizioni di base, aspetto che è stato pertanto recepito nelle linee guida 2020.

Le tabelle delle linee guida ICNIRP 2020 relative ai livelli di riferimento (che in questo contributo sono riportate con adattamenti e numerate 7, 8, 9, 10 e 11) forniscono infine, ed è forse una delle principali novità rispetto alle linee guida del 1998, specifiche in nota per esposizioni in condizioni di campo lontano, campo vicino radiativo e campo vicino reattivo, aspetto discusso anche nell'appendice A delle linee guida. Tipicamente, la zona di **campo lontano** inizia a distanza dalla sorgente **maggiore di $2D^2/\lambda$** , la zona di **campo vicino radiativo** si trova a distanze **comprese tra $\lambda/2\pi$ e $2D^2/\lambda$** , mentre la zona di **campo vicino reattivo** si estende fino a distanze dalla sorgente minori di **$\lambda/2\pi$** , dove D rappresenta la dimensione

maggiore della sorgente (in m) e λ la lunghezza d'onda. In termini del tutto generali è opportuno ricordare che in condizioni di campo lontano il campo elettromagnetico a radiofrequenza può essere assimilato all'onda piana equivalente, per valutare l'esposizione alla quale è sufficiente la sola misura della densità di potenza elettromagnetica (o, in alternativa, del solo campo elettrico o del solo campo magnetico). Nella condizione di campo vicino radiativo è sovente necessaria la misura sia del campo elettrico sia del campo magnetico, mentre in campo vicino reattivo le stime radiometriche (misura dei livelli di campo nell'ambiente) devono spesso essere rimpiazzate dalla dosimetria allo scopo di verificare il rispetto delle restrizioni di base.

Le grandezze di riferimento individuate dalle linee guida ICNIRP 2020 sono:

- **Intensità di campo elettrico incidente** (E_{inc}).
- **Intensità di campo magnetico incidente** (H_{inc}).
- **Densità di potenza incidente** (S_{inc}).
- **Densità di energia incidente** (U_{inc}).
- **Corrente indotta negli arti** (I). Quando il corpo è elettricamente collegato a terra ed è esposto a frequenze vicine a quelle di risonanza del corpo stesso è importante tener conto anche delle correnti che fluiscono negli arti. Queste ultime, per esposizioni nell'intervallo di frequenza **10 – 110 MHz**, possono determinare incrementi significativi del SAR locale a livello di parti del corpo quali caviglie e polsi, a causa della struttura anatomica di questi distretti. Il flusso di corrente proviene infatti da parti anatomiche a sezione maggiore e a più elevata conduttività (soprattutto muscolo) e attraversa distretti a sezione e conduttività minori (soprattutto osso), caratterizzati quindi da maggior resistenza e comportanti una maggior dissipazione di calore. Il SAR locale negli arti è fortemente correlato alla corrente che fluisce in essi: $SAR = \sigma E^2 / \rho = J^2 / \sigma \rho = I^2 / \sigma \rho A^2$, dove E rappresenta il campo elettrico interno (valore *rms*), σ è la conducibilità del tessuto, ρ è la densità del tessuto, J indica la densità di corrente indotta, I è la corrente e A corrisponde all'area della sezione effettiva (in m²). L'ICNIRP ritiene pertanto necessario, analogamente a quanto fatto nelle linee guida del 1998, limitare la corrente che fluisce attraverso gli arti ed i livelli di riferimento individuati dalle linee guida ICNIRP 2020 sono riportati in tabella 11. I valori sono gli stessi di quelli stabiliti nelle linee guida del 1998 (incluso il riferimento alla media temporale di 6 minuti), essendo state apportate solo alcune modifiche alle specifiche in nota.

TABELLA 7. LIVELLI DI RIFERIMENTO PER L'ESPOSIZIONE, MEDIATI TEMPORALMENTE SU UN INTERVALLO DI 30 MINUTI E A CORPO INTERO, AI CAMPI ELETTRROMAGNETICI CON FREQUENZA COMPRESA TRA 100 KHz E 300 GHz (VALORI RMS IMPERTURBATI)* (ADATTATA DA TABLE 5 DELLE LINEE GUIDA ICNIRP 2020).

SCENARIO ESPOSITIVO	INTERVALLO DI FREQUENZA	INTENSITÀ DI CAMPO ELETTRICO INCIDENTE, E_{inc} ($V m^{-1}$)	INTENSITÀ DI CAMPO MAGNETICO INCIDENTE, H_{inc} ($A m^{-1}$)	DENSITÀ DI POTENZA INCIDENTE, S_{inc} ($W m^2$)
Lavoratori	0,1 – 30 MHz	$660/f_M^{0,7}$	$4,9/f_M$	Non applicabile
	> 30 – 400 MHz	61	0,16	10
	> 400 – 2000 MHz	$3f_M^{0,5}$	$0,008f_M^{0,5}$	$f_M/40$
	> 2 – 300 GHz	Non applicabile	Non applicabile	50
Popolazione generale	0,1 – 30 MHz	$300/f_M^{0,7}$	$2,2/f_M$	Non applicabile
	> 30 – 400 MHz	27,7	0,073	2
	> 400 – 2000 MHz	$1,375f_M^{0,5}$	$0,0037f_M^{0,5}$	$f_M/200$
	> 2 – 300 GHz	Non applicabile	Non applicabile	10

*Note

- f_M è la frequenza in MHz.
- S_{inc} , E_{inc} e H_{inc} devono essere mediati su un intervallo temporale di 30 minuti e su tutto il corpo. Le medie spaziali e temporali per ogni E_{inc} e H_{inc} devono essere effettuate mediando sui valori quadrati rilevanti (equazione 8 dell'appendice A per i dettagli).
- Per frequenze comprese tra 100 kHz e 30 MHz il rispetto delle restrizioni di base è dimostrato se sia E_{inc} che H_{inc} non superano i livelli di riferimento sopra riportati, a prescindere dalle distinzioni tra zone in campo lontano e zone in campo vicino.
- Per frequenze superiori a 30 MHz e fino a 2 GHz: a) in zona di campo lontano il rispetto delle restrizioni di base è dimostrato se o S_{inc} , E_{inc} oppure H_{inc} non superano i livelli di riferimento sopra riportati (solo uno è richiesto); S_{inc} può essere sostituita da S_{eq} ; b) all'interno della zona di campo vicino radiativo il rispetto delle restrizioni di base è dimostrato se o S_{inc} oppure sia E_{inc} che H_{inc} non superano i livelli di riferimento sopra riportati; c) in zona di campo vicino reattivo il rispetto delle restrizioni di base è dimostrato se sia E_{inc} che H_{inc} non superano i livelli di riferimento sopra riportati. In questo caso S_{inc} non può essere utilizzata per dimostrare il rispetto delle restrizioni di base e queste ultime devono pertanto valutate valutate direttamente.
- Per frequenze superiori a 2 GHz e fino a 300 GHz: a) in zona di campo lontano il rispetto delle restrizioni di base è dimostrato se S_{inc} non supera i livelli di riferimento sopra riportati; S_{inc} può essere sostituita da S_{eq} ; b) all'interno della zona di campo vicino radiativo il rispetto delle restrizioni di base è dimostrato se S_{inc} non supera i livelli di riferimento sopra riportati; c) in zona di campo vicino reattivo i livelli di riferimento non possono essere utilizzati per determinare il rispetto delle restrizioni di base e queste ultime devono pertanto essere valutate direttamente.

TABELLA 8. LIVELLI DI RIFERIMENTO PER L'ESPOSIZIONE LOCALE, MEDIATI TEMPORALMENTE SU UN INTERVALLO DI 6 MINUTI, A CAMPI ELETTROMAGNETICI CON FREQUENZA COMPRESA TRA 100 kHz E 300 GHz (VALORI RMS IMPERTURBATI)* (ADATTATA DA TABLE 6 DELLE LINEE GUIDA ICNIRP 2020).

SCENARIO ESPOSITIVO	INTERVALLO DI FREQUENZA	INTENSITÀ DI CAMPO ELETTRICO INCIDENTE, E_{inc} ($V m^{-1}$)	INTENSITÀ DI CAMPO MAGNETICO INCIDENTE, H_{inc} ($A m^{-1}$)	DENSITÀ DI POTENZA INCIDENTE, S_{inc} ($W m^2$)
Lavoratori	0,1 – 30 MHz	$1504/f_M^{0,7}$	$10,8/f_M$	Non applicabile
	> 30 - 400 MHz	139	0,36	50
	> 400 – 2000 MHz	$10,58 f_M^{0,43}$	$0,0274 f_M^{0,43}$	$0,29 f_M^{0,86}$
	> 2 – 6 GHz	Non applicabile	Non applicabile	200
	> 6 – < 300 GHz	Non applicabile	Non applicabile	$275/f_G^{0,177}$
	300 GHz	Non applicabile	Non applicabile	100
Popolazione generale	0,1 – 30 MHz	$671/f_M^{0,7}$	$4,9/f_M$	Non applicabile
	> 30 - 400 MHz	62	0,163	10
	> 400 – 2000 MHz	$4,72 f_M^{0,43}$	$0,0123 f_M^{0,43}$	$0,058 f_M^{0,86}$
	> 2 – 6 GHz	Non applicabile	Non applicabile	40
	> 6 – < 300 GHz	Non applicabile	Non applicabile	$55/f_G^{0,177}$
	300 GHz	Non applicabile	Non applicabile	20

*Note

- f_M è la frequenza in MHz, f_G è la frequenza in GHz.
- S_{inc} , E_{inc} e H_{inc} devono essere mediati su un intervallo temporale di 6 minuti e, dove è specificata la media spaziale nelle note 6 e 7, sullo spazio corporeo rilevante previsto. La media spaziale e temporale per ogni E_{inc} e H_{inc} deve essere effettuata mediando sui valori quadrati rilevanti (equazione 8 nell'appendice A per i dettagli).
- Per frequenze comprese tra 100 kHz e 30 MHz il rispetto delle restrizioni di base è dimostrato se sia il picco spaziale di E_{inc} che il picco spaziale di H_{inc} non superano i livelli di riferimento sopra riportati, a prescindere dalle distinzioni tra zone in campo lontano e zone in campo vicino.
- Per frequenze superiori a 30 MHz e fino a 6 GHz: a) in zona di campo lontano il rispetto delle restrizioni di base è dimostrato se il picco spaziale di S_{inc} , E_{inc} oppure H_{inc} sull'intero spazio corporeo previsto non supera i livelli di riferimento sopra riportati (solo uno è richiesto); S_{inc} può essere sostituita da S_{eq} ; b) all'interno della zona di campo vicino radiativo il rispetto delle restrizioni di base è dimostrato se o il picco spaziale di S_{inc} oppure sia i picchi spaziali di E_{inc} che di H_{inc} sull'intero spazio corporeo previsto non superano i livelli di riferimento sopra riportati; c) in zona di campo vicino reattivo il rispetto delle restrizioni di base è dimostrato se sia E_{inc} che H_{inc} non superano i livelli di riferimento sopra riportati; S_{inc} non può essere utilizzata per dimostrare il rispetto delle restrizioni di base; per frequenze superiori a 2 GHz i livelli di riferimento non possono essere utilizzati per determinare il rispetto delle restrizioni di base e queste ultime devono pertanto essere valutate direttamente.

-
- Per frequenze superiori a 6 GHz e fino a 300 GHz: a) in zona di campo lontano il rispetto delle restrizioni di base è dimostrato se S_{inc} , mediata su un'area quadrata pari a 4 cm^2 di superficie corporea prevista, non supera i livelli di riferimento sopra riportati; S_{inc} può essere sostituita da S_{eq} ; b) in zona di campo vicino radiativo il rispetto delle restrizioni di base è dimostrato se S_{inc} , mediata su un'area quadrata pari a 4 cm^2 di superficie corporea prevista, non supera i livelli di riferimento sopra riportati; c) in zona di campo vicino reattivo i livelli di riferimento non possono essere utilizzati per determinare il rispetto delle restrizioni di base e queste ultime devono pertanto essere valutate direttamente.
 - Per frequenze superiori a 30 GHz e fino a 300 GHz l'esposizione mediata un'area quadrata pari a 1 cm^2 di superficie corporea prevista non deve eccedere il **doppio** delle restrizioni previste per una superficie di 4 cm^2 .

TABELLA 9. LIVELLI DI RIFERIMENTO PER L'ESPOSIZIONE LOCALE, INTEGRATI TEMPORALMENTE SU INTERVALLI COMPRESI TRA 0 E 6 MINUTI, AI CAMPI ELETTROMAGNETICI CON FREQUENZA COMPRESA TRA 100 KHz E 300 GHz (VALORI RMS IMPERTURBATI)* (ADATTATA DA TABLE 7 DELLE LINEE GUIDA ICNIRP 2020).

SCENARIO ESPOSITIVO	INTERVALLO DI FREQUENZA	DENSITÀ DI ENERGIA INCIDENTE, U_{inc} (kJ m ⁻²)
Lavoratori	100 kHz - 400 MHz	Non applicabile
	> 400 MHz - 2 GHz	$0,29f_M^{0,86} \times 0,36[0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
	> 2 - 6 GHz	$200 \times 0,36[0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
	> 6 - < 300 GHz	$275/f_G^{0,177} \times 0,36[0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
	300 GHz	$100 \times 0,36[0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
Popolazione generale	100 kHz - 400 MHz	Non applicabile
	> 400 MHz - 2 GHz	$0,058f_M^{0,86} \times 0,36[0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
	> 2 - 6 GHz	$40 \times 0,36[0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
	> 6 - < 300 GHz	$55/f_G^{0,177} \times 0,36[0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
	300 GHz	$20 \times 0,36[0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$

*Note

- f_M è la frequenza in MHz, f_G è la frequenza in GHz; t è l'intervallo temporale in secondi, tale che l'esposizione ad ogni impulso, gruppo di impulsi o sottogruppi di impulsi in un treno, così come la somministrazione delle esposizioni (incluse quelle a campi non pulsati), distribuita su t secondi, non superi questi livelli di riferimento.
- U_{inc} deve essere calcolata sul tempo t e, dove la media spaziale viene specificata nelle note 5-7, sullo spazio corporeo rilevante previsto.
- Per l'intervallo di frequenza compreso tra 100 kHz e 400 MHz non sono necessarie restrizioni specifiche riferite a periodi temporali compresi tra 0 e 6 minuti e pertanto non sono stati fissati livelli di riferimento.
- Per frequenze superiori a 400 MHz e fino a 6 GHz: a) in zona di campo lontano sull'intero spazio corporeo previsto il rispetto delle restrizioni di base è dimostrato se il picco spaziale di U_{inc} non supera i livelli di riferimento sopra riportati; U_{inc} può essere sostituita da U_{eq} ; b) all'interno della zona di campo vicino radiativo il rispetto delle restrizioni di base è dimostrato se il picco spaziale di U_{inc} non supera, sull'intero spazio corporeo previsto, i livelli di riferimento sopra riportati; c) in zona di campo vicino reattivo i livelli di riferimento non possono essere utilizzati per determinare il rispetto delle restrizioni di base e queste ultime devono pertanto essere valutate direttamente.
- Per frequenze superiori a 6 GHz e fino a 300 GHz: a) in zona di campo lontano o all'interno della zona di campo vicino radiativo il rispetto delle restrizioni di base è dimostrato se U_{inc} mediata su un'area quadrata pari a 4 cm² di superficie corporea prevista, non supera i livelli di riferimento sopra riportati; b) in zona di campo vicino reattivo i livelli di riferimento non possono essere utilizzati per determinare il rispetto delle restrizioni di base e queste ultime devono pertanto essere valutate direttamente.
- Per frequenze superiori a 30 GHz e fino a 300 GHz l'esposizione mediata su un'area quadrata pari a 1 cm² di superficie corporea prevista non deve eccedere il valore di $275/f_G^{0,177} \times 0,72[0,025+0,975(t/360)^{0,5}]$ kJ m⁻² per i **lavoratori** e di $55/f_G^{0,177} \times 0,72[0,025+0,975(t/360)^{0,5}]$ kJ m⁻² per la **popolazione generale**.

**TABELLA 10. LIVELLI DI RIFERIMENTO PER L'ESPOSIZIONE LOCALE AI CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI CON FREQUENZA COMPRESA TRA 100 KHz E 10 MHz (VALORI RMS IMPERTURBATI), RIFERITI AI VALORI DI PICCO* (ADATTATA DA TABLE 8 DELLE LINEE GUIDA ICNIRP 2020).
GLI STESSI VALORI SONO RIPORTATI NELLE LINEE GUIDA ICNIRP 2010 (PER LA COMPONENTE DEGLI EFFETTI LEGATA ALL'INDUZIONE DI CORRENTE), CON ESTREMO INFERIORE DELL'INTERVALLO DI FREQUENZE PARI PERÒ A 3 KHz**

SCENARIO ESPOSITIVO	INTENSITÀ DI CAMPO ELETTRICO INCIDENTE, E_{inc} ($V m^{-1}$)	INTENSITÀ DI CAMPO MAGNETICO INCIDENTE, H_{inc} ($A m^{-1}$)
Lavoratori	170	80
Popolazione generale	83	21

*Note

- A prescindere dalla distinzione tra zona di campo lontano e zona di campo vicino il rispetto delle restrizioni di base è dimostrato se sia il picco spaziale di E_{inc} che il picco spaziale di H_{inc} non superano, sull'intero spazio corporeo previsto, i livelli di riferimento sopra riportati.

TABELLA 11. LIVELLI DI RIFERIMENTO PER LA CORRENTE INDOTTA NEGLI ARTI, MEDIATI TEMPORALMENTE SU UN INTERVALLO DI 6 MINUTI, ALLE FREQUENZE COMPRESSE TRA 100 KHz E 110 MHz* (ADATTATA DA TABLE 9 DELLE LINEE GUIDA ICNIRP 2020).

SCENARIO ESPOSITIVO	CORRENTE ELETTRICA, I (mA)
Lavoratori	100
Popolazione generale	45

*Note

- I valori dell'intensità di corrente devono essere determinati mediando sui valori quadrati rilevanti (equazione 8 dell'appendice A per i dettagli).
- L'intensità di corrente negli arti deve essere valutata separatamente per ogni arto.
- I livelli di riferimento per la corrente negli arti non sono dati per alcun altro intervallo di frequenze.
- I livelli di riferimento per la corrente negli arti sono richiesti unicamente nei casi in cui il corpo non è elettricamente isolato da un piano di terra.

ESPOSIZIONE SIMULTANEA A CAMPI DI FREQUENZA DIVERSA (FREQUENZE MULTIPLE)

L'ICNIRP prende in considerazione le situazioni espositive caratterizzate dalla presenza simultanea di campi a radiofrequenza con frequenze differenti, emessi da sorgenti diverse, come peraltro nelle precedenti linee guida del 1998, e fornisce formule per verificare il rispetto delle restrizioni di base e dei valori di riferimento in relazione a durate dell'esposizione rispettivamente superiori o inferiori a 6 minuti. In generale, queste formule sono sommatorie, riferite a specifici intervalli di frequenza, di rapporti tra valori calcolati e/o misurati di grandezze di base e/o valori di riferimento e rispettive restrizioni di base e/o livelli di riferimento. Il rispetto complessivo delle restrizioni di base e/o dei livelli di riferimento stabiliti si ha se il risultato è ≤ 1 . Rispetto alle linee guida del 1998 vi è stato anche in questo caso un aggiornamento e un affinamento delle specifiche.

CORRENTI DA CONTATTO

Hanno luogo quando una persona tocca un oggetto conduttore immerso in un campo elettrico o in un campo magnetico nell'intervallo di frequenza **100 kHz – 110 MHz**. Il contatto determina flusso di corrente tra l'oggetto e il corpo. Correnti da contatto di intensità elevata sono in grado di causare, in funzione della frequenza, stimolazione nervosa o dolore, ma potenzialmente anche danno ai tessuti. L'effetto è di natura indiretta, in quanto mediato dal contatto con un corpo conduttore. Il fenomeno può essere di particolare rilievo nello spazio in prossimità di trasmettitori a radiofrequenza di grandi dimensioni, quali **antenne di potenza utilizzate per telecomunicazioni** che operano **sotto i 30 MHz** o nella banda **87,5 – 108 MHz**, per i quali esistono sporadiche segnalazioni di infortuni comportanti dolore o anche ustioni. Le correnti da contatto fluiscono attraverso l'area di contatto tra il corpo e l'oggetto e, a parità di corrente, aree di contatto piccole si traducono in effetti più marcati, dato che la densità di corrente più elevata può comportare valori di SAR locale più alti. Come rilevato dall'ICNIRP, non esistono molti studi sulla relazione tra correnti da contatto ed effetti sulla salute. Nell'adulto, sensazioni dolorose ma reversibili si hanno con correnti indotte medie di **46 mA** nell'intervallo 100 kHz – 10 MHz. In questo intervallo le soglie sono risultate dipendenti dalla frequenza e sono sostanzialmente più elevate quando l'oggetto conduttore viene afferrato piuttosto che toccato. Il valore di 46 mA rappresenta una media tra i valori riscontrati nei soggetti in studio. Pertanto, anche in considerazione della variabilità presente nella popolazione l'ICNIRP ritiene che la soglia più bassa individuabile sia approssimativamente **20 mA**. La modellizzazione suggerisce però che i bambini abbiano soglie inferiori, con il valore più basso atteso nell'ordine dei **10 mA**. La frequenza più elevata di campo in grado di porre

un rischio per correnti da contatto non è nota, anche se forti riduzioni nella percezione della corrente sono state riscontrate passando da circa 1 MHz a 28 MHz; l'ICNIRP fissa l'estremo superiore di interesse a 110 MHz.

L'entità delle correnti da contatto e i potenziali effetti sono in ogni caso poco prevedibili, a causa di fattori comportamentali (ad esempio afferrare un oggetto conduttore o toccarlo soltanto), di condizioni ambientali (quali forma e dimensione dell'oggetto conduttore) e delle caratteristiche dei tessuti attraversati dalla corrente (conducibilità, densità e capacità termica). Alla luce di queste considerazioni l'ICNIRP non ritiene più di proporre restrizioni alle correnti da contatto, che invece stabiliva nelle linee guida del 1998, ma si limita a fornire indicazioni di protezione per i lavoratori che operano con campi a radiofrequenza ad alta potenza nel settore delle radiotrasmissioni. Per **“campi a radiofrequenza ad alta potenza”** l'ICNIRP intende, per le finalità connesse alla protezione dalle correnti da contatto, valori di campo elettrico in prossimità della **sorgente superiori a 100 V m^{-1}** nell'intervallo 100 kHz – 100 MHz. Le raccomandazioni ICNIRP per i lavoratori consistono di fatto in una formazione specifica finalizzata a evitare il contatto con oggetti conduttori e a rendere i lavoratori consapevoli di un effetto “sorpresa”, ossia della possibilità di un contatto accidentale con un conduttore caricato dal campo che si traduce in una scossa dolorosa avvertita nel punto di contatto e che può comportare rischi per la sicurezza, ad esempio infortuni dovuti alla momentanea disattenzione causata dalla percezione dolorosa della corrente. Qualora il contatto con conduttori immersi in un campo a radiofrequenza sia inevitabile si suggerisce che oggetti conduttori di grandi dimensioni siano collegati a terra e che i lavoratori che entrano in contatto con essi siano isolati (uso di guanti isolanti efficaci per le radiofrequenze).

MITIGAZIONE DEL RISCHIO PER I LAVORATORI ESPOSTI

Nonostante la conservatività delle restrizioni di base per l'esposizione a campi a radiofrequenza, l'ICNIRP ha ritenuto comunque di formulare qualche ulteriore considerazione sul rischio per i lavoratori esposti. Nelle linee guida si sottolinea infatti la possibilità che la temperatura corporea possa localmente o nel suo insieme risultare più elevata rispetto alle normali oscillazioni fisiologiche a causa di fattori ambientali non legati all'esposizione a campi a radiofrequenza o di condizioni patologiche che possono compromettere la termoregolazione. L'ICNIRP suggerisce di conseguenza cautela per gli scenari nei quali il lavoratore è esposto ad altre fonti di calore rispetto a quelle legate a sorgenti a radiofrequenze. Per le situazioni per le quali è importante l'esposizione superficiale, la sensazione di *discomfort* termico locale o di dolore possono essere indicatori importanti di danno termico potenziale ai tessuti ed è fondamentale che il lavoratore sia consapevole che l'esposizione a radiofrequenze può contribuire in alcune condizioni al pro-

prio carico termico, specialmente in ambienti termici severi caldi e qualora la dissipazione del calore sia ostacolata (ad esempio da indumenti o altri dispositivi protettivi).

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La prima considerazione che emerge dalla disamina condotta in questa sede delle nuove linee guida ICNIRP 2020 è che, nonostante siano trascorsi quasi 22 anni dall'emanazione delle precedenti linee guida, l'impianto complessivo è rimasto invariato e nel caso del SAR, ossia della principale grandezza protezionistica, anche i valori numerici delle restrizioni non sono cambiati. Questo da un lato sottolinea la solidità del razionale protezionistico ICNIRP e dall'altro evidenzia che nel corso di due decenni i dati di letteratura scientifica che si sono progressivamente accumulati in merito ai meccanismi d'interazione e agli effetti potenzialmente pericolosi per i tessuti e per l'organismo nel suo insieme hanno sostanzialmente confermato quanto noto in precedenza.

È poi importante ribadire, come ricordato peraltro dalla stessa ICNIRP, che l'approccio di tipo conservativo non riguarda solo i fattori di riduzione applicati alle soglie di effetto biologico potenzialmente avverso per ottenere le restrizioni di base, ma investe tutto il percorso protezionistico, rendendo le restrizioni da base, differenziate per lavoratori e popolazione generale, fortemente cautelative. Di fatto era così anche nelle linee guida del 1998, ma nella nuova versione l'intero percorso è molto meglio argomentato e ha potuto avvalersi delle conoscenze acquisite nel corso di due decenni dalla ricerca nel campo della sperimentazione animale, della termofisiologia e della dosimetria. Questo aspetto è di particolare importanza, ad esempio, per quelle situazioni espositive di natura occupazionale, prefigurabili soprattutto in ambito industriale o nel settore delle telecomunicazioni, che possono comportare superamenti contenuti dei Valori Limite di Esposizione relativi alle radiofrequenze previsti dal Capo IV del Titolo VIII del D.lgs. 81/2008 (VLE, corrispondenti concettualmente alle restrizioni di base ICNIRP), superamenti che non è possibile abbattere avvalendosi delle misure tecnico-organizzative ad oggi disponibili e che possono pertanto indurre il datore di lavoro a chiedere la deroga, ai sensi dell'art. 212, Capo IV del Titolo VIII del D.lgs. 81/2008. In queste situazioni vige comunque l'obbligo per il datore di lavoro di tutelare i lavoratori esposti da effetti nocivi per la salute e pericolosi per la sicurezza, obbligo il cui rispetto è agevolato alla luce di un riferimento scientifico aggiornato quale quello rappresentato dalle linee guida ICNIRP 2020, anche se queste ultime non sono (o non sono ancora state) incorporate in un riferimento normativo cogente, ossia nell'adeguamento al progresso tecnico della direttiva 2013/35/UE e, a cascata, del Capo IV del Titolo VIII del D.lgs. 81/2008.

Come anticipato nella descrizione del razionale protezionistico, l'aggiornamento delle linee guida del 1998 è ispirato anche alla necessità di tenere nel dovuto conto l'introduzione di nuove tecnologie che utilizzano campi a radiofrequenze, a partire dallo standard di comunicazione 5G. In tale ottica, le modifiche apportate ai criteri di protezione dalle esposizioni nel caso di assorbimenti superficiali dell'energia hanno considerato in prospettiva l'implementazione del sistema 5G, che si avvarrà di frequenze progressivamente più elevate, fino a qualche decina di GHz. Parallelamente, la grande attenzione posta all'assorbimento locale dell'energia, superficiale e non, ha avuto tra i riferimenti prioritari le modalità operative del sistema 5G, che consistono nella ricerca "attiva" dell'utente da parte delle stazioni radio base, con l'impiego di fasci direzionali e la possibilità di esposizioni focalizzate dei tessuti, soprattutto superficiali. I profili espositivi della popolazione in relazione all'operatività del sistema 5G sono peraltro più difficoltosi da valutare rispetto agli standard di comunicazione precedenti (fino al 4G) e Organismi tecnici preposti a livello nazionale e internazionale si sono attivati per l'elaborazione di standard di misura e di procedure per la verifica del rispetto dei valori limite. Tale aspetto assume particolare rilevanza per Paesi come il nostro nel caso dell'esposizione della popolazione, in quanto i limiti di esposizione (articolati come noto anche in valori di attenzione e obiettivi di qualità) sono significativamente inferiori rispetto a quelli internazionalmente riconosciuti e a quelli vigenti in altri Paesi, che si basano sulle indicazioni ICNIRP.

L'introduzione di nuove grandezze di base (*densità di potenza assorbita e densità di energia assorbita*), così come l'estensione della grandezza *assorbimento specifico locale* (nelle precedenti linee guida circoscritta, come detto, al ruolo di nicchia di protezione dagli effetti acustici) alle finalità di protezione connesse alla generalità delle esposizioni di breve durata per testa, tronco e arti, potrà richiedere in alcune situazioni espositive una valutazione più completa e potenzialmente più complessa. D'altra parte, le ulteriori specifiche relative ai valori di riferimento per quanto riguarda le condizioni espositive in campo lontano, campo vicino radiativo e campo vicino reattivo, che concorrono anch'esse all'obiettivo finale di verificare il rispetto delle restrizioni all'esposizione, possono agevolare alcuni percorsi valutativi. In termini operativi tutto questo richiederà però anche l'emanazione di ulteriori norme o documenti guida da parte degli Organismi tecnici preposti (tra i quali gli Organismi armonizzati).

Va comunque detto che la maggior parte delle situazioni espositive in ambito occupazionale, anche relative a sorgenti cosiddette "non giustificate", non dovrebbe presentare ulteriori criticità rispetto al passato ai fini della valutazione della *compliance* con le linee guida (in questi casi anzi il rispetto delle indicazioni delle linee guida del 1998 comporta di fatto anche il rispetto delle indicazioni contenute nelle nuove linee guida). Per tutte le situazioni nelle quali è invece molto concreta

la possibilità di un significativo superamento delle restrizioni per il SAR medio e locale o, ancor più, dove sono prevedibili esposizioni di picco di elevata intensità sarà doveroso, rispetto a prima, tener conto delle nuove specifiche (anche se non ancora recepite nell'impianto legislativo) ed eventualmente attendere l'emaneazione di indicazioni tecniche da parte di Organismi preposti.

RIFERIMENTI

- [1] International Commission on Non Ionizing Radiation Protection. ICNIRP guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Phys* 2020; 118(5): 483-524. DOI: 10.1097/HP.0000000000001210
- [2] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1Hz – 100 kHz). *Health Phys* 2010; 99(6): 818-836. DOI: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86
- [3] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys* 1998; 74(4): 494-522.
- [4] Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR). Opinion on potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF). 2015. https://ec.europa.eu/health/sites/health/files/scientific_committees/emerging/docs/scenih_r_o_041.pdf
- [5] Swedish Radiation Safety Authority. Recent research on EMF and health risk. Twelfth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, 2017. <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/contentassets/f34de8333acd4ac2b22a9b072d9b33f9/201809-recent-research-on-emf-and-health-risk>
- [6] World Health Organization. Radiofrequency fields; Public Consultation Document, released October 2014. Geneva: WHO; 2014.
- [7] Direttiva 2013/35/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 26 giugno 2013. Disposizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici) (ventesima direttiva particolare ai sensi dell'articolo 16, paragrafo 1, della direttiva 89/391/CEE) e che abroga la direttiva 2004/40/CE. G.U. Unione Europea n. L 179/1 del 29 giugno 2013.