

Norme CENELEC relative all'esposizione umana ai campi magnetici generati da saldatrici ad arco: una ricognizione critica basata su interventi in situazioni reali

Nicola Zoppetti (1), Daniele Andreuccetti (1), Andrea Bogi (2), Iole Pinto (2)

(1) CNR-IFAC, via Madonna del Piano 10 - 50019 Sesto Fiorentino (FI)

(2) Azienda U.S.L. 7 di Siena-Laboratorio Agenti Fisici, Strada di Ruffolo 4 - 53100 Siena

Testo pubblicato negli Atti del XXXV Congresso Nazionale di Radioprotezione AIRP svoltosi a Venezia dal 17 al 19 ottobre 2012.

Indice

Introduzione	3
I metodi definiti nella norma EN50444.....	4
Metodi per la determinazione degli indici di esposizione al campo magnetico a partire da misure in punti fissi	4
Modellazione del circuito di saldatura.....	5
Procedura per il calcolo della distanza di rispetto	6
Determinazione di $i_n(t)$	7
Determinazione di IE_{max}	7
Determinazione della funzione di distribuzione spaziale $f(d)$	7
Procedura per la determinazione degli indici riferiti alle grandezze dosimetriche.....	9
Applicazione delle procedure descritte ai risultati della campagna di misura	9
Le forme d'onda misurate	10
Le distanze di rispetto	12
Calcolo degli indici di esposizione riferiti a grandezze radiometriche e dosimetriche per il lavoratore addetto alla saldatura	13
Conclusioni	16
Bibliografia.....	17

Introduzione

Il CENELEC è l'organo ufficiale di standardizzazione elettrotecnica in ambito europeo; le sue norme, per quanto attiene alla valutazione dell'esposizione umana ai campi elettromagnetici (CEM), hanno un rilevante valore giuridico, essendo esplicitamente citate nella Direttiva Europea 2004/40, a sua volta ripresa testualmente dal D.Lgs. 9 aprile 2008, n. 81 "Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro". Questo, al capo IV, art.209, comma 1, prescrive infatti che "la valutazione, la misurazione e il calcolo devono essere effettuati in conformità alle norme europee standardizzate del Comitato europeo di normalizzazione elettrotecnica (CENELEC)".

Il settore dell'esposizione ai CEM provocata dalle apparecchiature per la saldatura ad arco appare in questo senso particolarmente fortunato, potendo disporre di un contesto normativo abbastanza completo, costituito da una specifica norma di base (EN50444, [1]) ed una norma di prodotto (EN50445, [2]), pubblicate entrambe nel 2008.

Tuttavia, l'applicazione di tali normative non è priva di problemi. Esse infatti, se da una parte contengono utili indicazioni relative alla standardizzazione dello scenario espositivo e della procedura di misura, dall'altra propongono in alcuni casi delle metriche di valutazione dell'esposizione che, oltre a presentare aspetti intrinsecamente controversi, appaiono come una arbitraria estensione delle linee guida ICNIRP [3][4][5].

Una procedura di valutazione relativa al campo magnetico generato da apparati per la saldatura che non rappresenti un mero adempimento burocratico dovrebbe mirare a (1) indicare chiaramente se i livelli di riferimento relativi al campo magnetico sono superati ed eventualmente a quali distanze dalla sorgente; (2) qualora i livelli di riferimento siano superati e non sia possibile ridurre l'esposizione, calcolare mediante tecniche dosimetriche se siano o meno rispettate le restrizioni di base per le grandezze dosimetriche.

La norma EN50445 e ancor più la norma EN50444 propongono procedure che affrontano singolarmente i vari aspetti della valutazione dell'esposizione, ma non forniscono un quadro organico in cui si considerino tutti gli elementi in gioco. Ad esempio, si definiscono i metodi per valutare l'effetto di forme d'onda complesse facendo riferimento a misure effettuate in punti fissi. Separatamente si danno indicazioni su possibili modelli, più o meno semplificati, che permettono di determinare la distribuzione spaziale del campo, senza però illustrare come i risultati da essi forniti possano essere messi in relazione con quelli che tengono conto delle particolari forme d'onda incontrate. Infine, anche per quanto riguarda gli aspetti dosimetrici, pur essendo definita in [1] una configurazione di cavi di riferimento, nelle norme non si approfondisce il suo possibile utilizzo, ma si rimanda a tal fine alla letteratura scientifica.

In questo lavoro, a partire da una rapida descrizione dei principali metodi descritti nelle norme tecniche, si definisce una possibile procedura per la determinazione degli indici di esposizione e delle distanze di rispetto riferiti alle grandezze radiometriche e degli indici di esposizione riferiti alle grandezze dosimetriche. La procedura sarà poi applicata ai dati raccolti durante una recente

campagna di misura organizzata nell'ambito di un progetto congiunto tra ASL7 e CNR-IFAC per lo sviluppo della sezione relativa ai campi elettromagnetici del PAF, il Portale Agenti Fisici (www.portaleagentifisici.org).

I metodi definiti nella norma EN50444

Tra le due norme CENELEC citate, è sicuramente la norma di base EN50444 ad essere più ricca di indicazioni concrete, mentre la norma di prodotto EN50445 fornisce per lo più indicazioni di carattere generale; per tale motivo, nel seguito, considereremo prevalentemente la prima.

In questo lavoro ci riferiremo alle indicazioni che la norma propone al fine di prevenire gli effetti di stimolazione e trascureremo quelli riferiti agli effetti termici, che generalmente sono di secondaria importanza per questo tipo di sorgenti.

Ci concentreremo poi sul caso di forme d'onda impulsive o comunque non sinusoidali, che è quello effettivamente riscontrato durante la campagna di misure di cui si darà conto nel seguito.

Metodi per la determinazione degli indici di esposizione al campo magnetico a partire da misure in punti fissi

In presenza di forme d'onda complesse, le linee guida ICNIRP prevedono che si possa operare sia nel dominio della frequenza, sia nel dominio del tempo. Il metodo di base (standard o STD nel seguito) opera nel dominio della frequenza e non tiene conto delle fasi delle componenti spettrali, generando in alcuni casi (per esempio in presenza di rumore) risultati palesemente ipercautelativi.

Sono tuttavia definiti anche metodi che tengono conto delle fasi, mediante i quali si ottengono risultati più ragionevoli. Questi metodi (denominati WP – dall'inglese weighted-peak – nel seguito) possono essere applicati sia nel dominio della frequenza, sia nel dominio del tempo, a seconda della convenienza.

Una presentazione più dettagliata dei metodi definiti dalle linee guida ICNIRP per campi con forma d'onda complessa è riportata in [5]; da essa si deducono le espressioni degli indici di esposizione riportate in seguito. In questo caso si considera un generico campo di induzione magnetica polarizzato linearmente lungo il versore $\hat{i}_p$, espresso matematicamente mediante la (1), dove f_0 è la risoluzione spettrale, B_f è l'ampiezza della generica componente spettrale a frequenza f e θ_f la relativa fase:

$$\vec{B}(t) = \hat{i}_p \cdot \sum_{f=f_0}^{n \cdot f_0} [B_f \cos(2\pi f t + \theta_f)] \quad (1)$$

L'indice I_{STD} espresso dalla (2) non tiene conto delle fasi del campo e consiste nella somma lineare dei rapporti tra l'ampiezza B_f di ciascuna componente spettrale ed il limite ICNIRP alla stessa frequenza $B_{L,f}$, moltiplicato per il termine $\sqrt{2}$ per riportarlo da valore efficace a valore i picco:

$$I_{STD} = \sum_f \frac{B_f}{\sqrt{2} \cdot B_{L,f}} \quad (2)$$

L'indice WP, che nella (3) è espresso nel dominio della frequenza, tiene conto delle fasi θ_f delle componenti spettrali ed introduce inoltre dei termini di fase aggiuntivi ϕ_f per la cui spiegazione si rimanda nuovamente a [5]:

$$I_{WP} = \max_t \left\{ \left| \sum_f \frac{B_f}{\sqrt{2} B_{L,f}} \cos(2\pi ft + \theta_f + \phi_f) \right| \right\} \quad (3)$$

La norma EN50444, pur riferendosi alle espressioni degli indici ICNIRP riportate sopra, aggiunge l'importante prescrizione di escludere dalle sommatorie tutte le componenti spettrali con ampiezza inferiore al 3% della fondamentale. Questa prescrizione introduce una soglia per certi versi arbitraria ed appare sensata solo per mitigare l'ipercautelatività dell'indice I_{STD} , specie in presenza di segnali rumorosi. Invece, l'esclusione dei contributi meno intensi dall'espressione dell'indice I_{WP} che tiene conto delle fasi, appare in contrasto con il principio di base della metodologia, che proprio per mezzo delle fasi punta a minimizzare l'effetto del rumore [5].

Modellazione del circuito di saldatura

Per tenere conto della distribuzione spaziale dell'induzione magnetica si è fatto riferimento a due modelli che la norma EN50444 indica come utilizzabili sia per la valutazione del rispetto dei livelli di riferimento, sia per la verifica per via dosimetrica delle restrizioni di base.

Il modello più semplice è quello che si riferisce ad un filo infinitamente lungo percorso da corrente e quindi alla legge di Biot-Savart. La norma introduce un fattore moltiplicativo (Geometry Factor, GF nel seguito) per tenere conto delle possibili curvature del cavo: GF è pari a 1.25 nel caso si utilizzi il modello per la verifica dei livelli di riferimento e 1.8 nel caso lo si utilizzi per valutazioni dosimetriche.

Il secondo modello che utilizzeremo in questo lavoro è quello descritto in figura 1, estratta dalla norma EN50444, sul quale torneremo nel seguito.

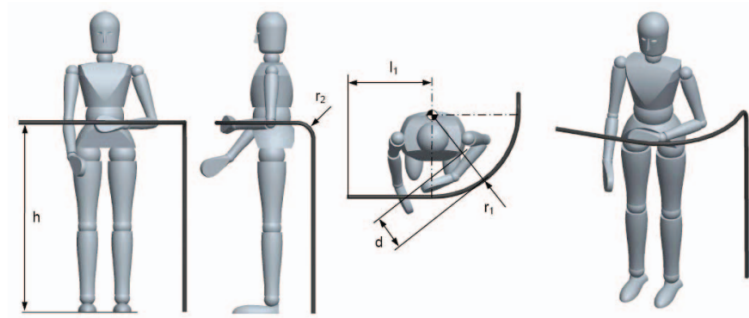


Figura 1. Modellazione del circuito di saldatura secondo la norma EN50444.

Procedura per il calcolo della distanza di rispetto

Ci sono due aspetti fondamentali da considerare quando si prendono in considerazione sorgenti di campo magnetico come le saldatrici: (1) la forma d'onda del campo magnetico, in relazione al fatto che i livelli di riferimento definiti dalla normativa variano con la frequenza; (2) la distribuzione spaziale del campo.

Questi due aspetti possono essere separati grazie alle particolari caratteristiche dell'induzione magnetica a bassa frequenza $B(t, Q)$ prodotta in un generico punto Q da un circuito percorso da corrente. Si può scrivere:

$$\begin{aligned}\vec{B}(t, Q) &= \frac{I(t)}{I_0} \cdot \vec{B}_n(Q) = i_n(t) \cdot \frac{I_{\max}}{I_0} \cdot \vec{B}_n(Q) \\ \text{con } I_0 &= 1 \text{ A e } i_n(t) = \frac{I(t)}{I_{\max}}\end{aligned}\tag{4}$$

Nella espressione (4), $B_n(Q)$ è l'induzione magnetica – che nel seguito chiameremo “normalizzata” – generata nel punto Q quando il circuito-sorgente è percorso da una corrente continua $I_0 = 1$ A. Si tratta di un termine vettoriale la cui direzione individua la polarizzazione del campo, che in questo caso è sempre lineare qualsiasi sia l'andamento temporale della corrente. Il termine $I(t)$ rappresenta invece la corrente sul circuito stesso ed in particolare $I_{\max}$ è il suo massimo. Di conseguenza $i_n(t)$ è la forma d'onda (fdo nel seguito) adimensionale della corrente con massimo normalizzato a 1.0; è questa forma d'onda che nel seguito prenderemo in esame per l'analisi della variazione temporale del campo.

Tornando alle saldatrici, si ha che il termine $I_{\max} i_n(t)$ dipende fondamentalmente dalla tecnologia di saldatura impiegata, mentre il termine $B_n(Q)$ dipende da come sono disposti i cavi del circuito di saldatura e dalle particolari caratteristiche del generatore utilizzato (se ci si trova nelle sue immediate vicinanze).

Fatte queste premesse, è possibile descrivere una procedura per il calcolo della “distanza di rispetto”, definita come la distanza dalla sorgente oltre la quale un particolare limite normativo risulta rispettato.

1. Si determina la funzione $f(d) = |B_n(Q - P_0)|$ dove $d = |Q - P_0|$; si tratta della funzione che descrive come il modulo dell'induzione magnetica normalizzata varia con la distanza d del punto di calcolo Q da un punto di riferimento P_0 sulla sorgente, modellata con uno dei metodi descritti nella norma EN50444 e supposta percorsa, lo ricordiamo, da una corrente unitaria. La $f(d)$ si ricava facendo muovere il punto Q su una direttrice di riferimento.
2. Si applicano alla fdo $i_n(t)$ le tecniche nel dominio nel tempo o nel dominio della frequenza, descritte nelle norme EN50444 o EN50445, con le quali ricavare un indice di esposizione variabile nel tempo $IE(t)$ che tenga conto dei limiti fissati per l'induzione magnetica; il valore massimo $IE_{\max}$ di tale indice deve risultare inferiore ad 1 affinché la normativa risulti rispettata. Quando tali metodi sono applicati ad una fdo adimensionale come $i_n(t)$ che ha un massimo normalizzato ad 1.0, i risultati non sono significativi dal punto di vista dell'esposizione al campo magnetico: lo saranno solo dopo la combinazione con la parte che

tiene conto della distribuzione spaziale dell'induzione magnetica e cioè dopo il passaggio successivo.

3. Fissata la corrente di picco $I_{\max}$, la distanza di rispetto d_R è determinata imponendo che:

$$f(d_R) \cdot \frac{I_{\max}}{I_0} \cdot IE_{\max} = 1.0 \quad (5)$$

Più in generale l'indice di esposizione che si raggiunge alla generica distanza d dalla sorgente è dato dal prodotto $(I_{\max}/I_0)f(d) IE_{\max}$.

Nel seguito del lavoro si prende in considerazione il campo generato dai cavi del circuito di saldatura piuttosto che quello disperso dal generatore. Ciò non costituisce una perdita di generalità fintantoché sia possibile supporre che la polarizzazione del campo rimanga lineare e che sia possibile separare come descritto sopra il termine di dipendenza temporale da quello che tiene conto della distribuzione spaziale dell'induzione magnetica. Eventualmente la dipendenza dallo spazio potrà seguire leggi diverse da quelle valide per i cavi ma la procedura rimarrà comunque valida.

Determinazione di $i_n(t)$

Come si è detto, $IE_{\max}$ è il valore che si ottiene applicando l'algoritmo per la determinazione dell'indice di esposizione (I_{STD} o I_{WP}) alla fdo $i_n(t)$. La via più diretta per determinare $i_n(t)$, è quella che comporta l'utilizzo di strumentazione adeguata alla misura della corrente nel dominio del tempo. Ciò permette anche di mettere in relazione il valore di picco della corrente misurata con quello visualizzato sul display di cui sono spesso equipaggiati gli apparati di saldatura. È da notare che la stessa norma EN50444 indica chiaramente come il processo di valutazione dell'esposizione possa partire da misure di corrente. In mancanza di ciò è comunque possibile ricavare la forma d'onda a partire da misure di induzione magnetica nel dominio del tempo, sfruttando l'espressione (4). Infatti, dopo aver verificato che la polarizzazione del campo sia effettivamente lineare, è sufficiente scegliere una delle componenti cartesiane del campo (ad esempio la più intensa) e normalizzarne ad 1.0 la forma d'onda.

Determinazione di $IE_{\max}$

Nota la fdo $i_n(t)$, per determinare $IE_{\max}$ si applicano le tecniche presentate nel paragrafo precedente e discusse più in dettaglio in [5]. In questo contesto applicheremo agli esempi solo l'indice weighted-peak (cfr. eq.(3)), sia per motivi di spazio, sia perché l'applicazione del metodo standard (eq.(2)) porta ad individuare distanze di rispetto irragionevolmente grandi.

Determinazione della funzione di distribuzione spaziale $f(d)$

Per quanto riguarda la funzione $f(d)$ che tiene conto della distribuzione spaziale del campo, oltre alla legge di Biot-Savart che si riferisce al caso del filo rettilineo ed indefinito (alla quale viene applicato, come si è detto, un opportuno Geometry Factor GF), si considera anche il modello

rappresentato in figura 1. Essendo il circuito tridimensionale e non presentando particolari simmetrie, è necessario scegliere alcune direttrici di riferimento lungo le quali procedere per determinare la $f(d)$; tali direttrici sono rappresentate in figura 2.

In figura 3 sono riportati gli andamenti delle $f(d)$ ricavate utilizzando il modello del circuito di saldatura a filo rettilineo indefinito e tre diversi valori di GF; la distanza dal cavo è misurata procedendo ortogonalmente ad esso in linea retta. Inoltre, si riportano le $f(d)$ ricavate con il modello tratto dalla norma EN50444, lungo direttrici interne ed esterne di figura 2. Le $f(d)$ relative al modello tridimensionale sono ricavate mediante involuppo dei profili che si ottengono lungo le direttrici considerate. Come si può notare, un valore di GF pari a 1.25 applicato al modello Biot-Savart è in grado di sovrastimare il profilo relativo alle sole direttrici 'esterne' mentre un valore pari a 1.8 sovrastima anche quello ricavato lungo le direttrici interne.

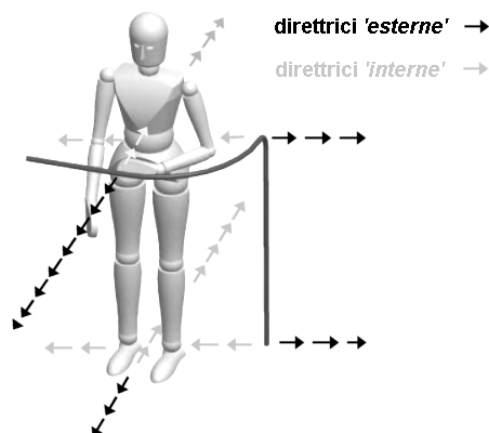


Figura 2. Direttrici per il calcolo di $f(d)$.

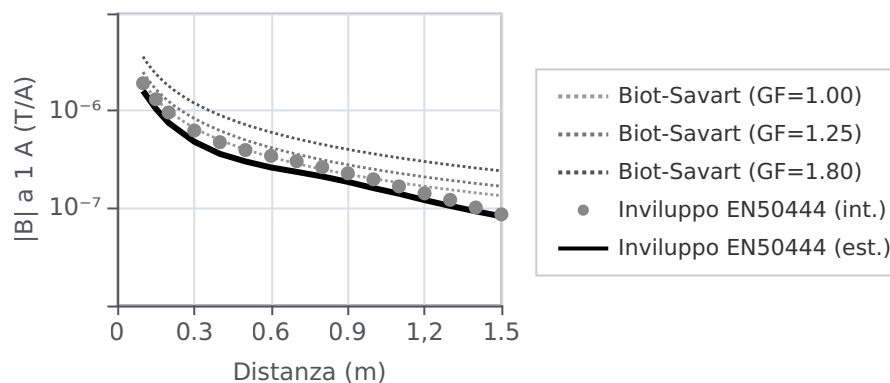


Figura 3. Confronto tra $f(d)$.

Procedura per la determinazione degli indici riferiti alle grandezze dosimetriche

A bassa frequenza le grandezze dosimetriche di base indotte all'interno di un organismo biologico esposto ad un campo impresso avente le caratteristiche descritte all'inizio del paragrafo precedente, possono essere espresse in modo simile alla (4). La (6) descrive la densità di corrente indotta in un generico punto Q interno all'organismo del soggetto esposto. In questa espressione, il termine $J_{n,f_0}(Q)$ rappresenta la densità di corrente di picco indotta quando nel circuito sorgente scorre una corrente sinusoidale a frequenza f_0 con ampiezza di picco pari a 1 A¹. La densità di corrente è quindi proporzionale in ogni istante alla derivata temporale della $i_n(t)$ e ciò è dovuto al fatto che l'accoppiamento tra campo magnetico a bassa frequenza e organismo è regolato dalla legge di Faraday (si trascura qui la variazione delle caratteristiche dielettriche dei tessuti con le frequenza).

$$\begin{aligned}\vec{J}(t, Q) &= \frac{dI(t)}{dt} \cdot \frac{1}{2\pi f_0} \cdot \frac{\vec{J}_{n,f_0}(Q)}{I_0} \\ &= \frac{I_{\max}}{I_0} \cdot \frac{di_n(t)}{dt} \cdot \frac{1}{2\pi f_0} \cdot \vec{J}_{n,f_0}(Q) \\ &\text{con } I_0 = 1 \text{ A}\end{aligned}\tag{6}$$

La densità di corrente indotta è la grandezza dosimetrica di riferimento per le linee guida ICNIRP del 1998. Un'espressione analoga può essere scritta anche per il campo elettrico in-situ, che è la grandezza presa invece in considerazione dalle linee guida ICNIRP del 2010.

Per ottenere degli indici di esposizione che tengano conto sia della geometria del problema, sia delle forme d'onda considerate, si deve quindi calcolare il termine $J_{n,f_0}(Q)$ (che dipende anche dalle caratteristiche fisiche del soggetto esposto). Inoltre è necessario elaborare la $i_n(t)$ ed in particolare effettuarne la derivata ed applicarvi gli algoritmi di pesatura che tengono conto dell'andamento in frequenza delle pertinenti restrizioni di base. Una descrizione più dettagliata di una procedura simile (sebbene riferita a campi omogenei con polarizzazione non lineare) e delle relative approssimazioni è riportata in [6].

Applicazione delle procedure descritte ai risultati della campagna di misura

Le misure sono state eseguite presso la sede operativa della ditta DBi FAU S.r.l. presso Asciano (SI) ed hanno interessato cinque diversi apparati per la saldatura ad arco, indicati nel seguito con le sigle S1,...,S5. Come si può notare in tabella 1, le saldatrici S1 ed S3 erano dello stesso modello; anche se utilizzate per lavorazioni diverse (la S1 era parte di un apparato in cui gli

1. $J_{n,f_0}(Q)$ è un vettore che non dipende esplicitamente dalla forma d'onda considerata. Il riferimento alla frequenza f_0 è però necessario perché la distribuzione delle grandezze di base all'interno dell'organismo esposto dipende dalle caratteristiche dielettriche dei tessuti, che sono note in funzione della frequenza. La frequenza f_0 è quindi quella per cui si determina la conducibilità dei tessuti e viene scelta con criteri che dipendono dalla forma d'onda di interesse [6].

elettrodi sono sostenuti da un braccio robotizzato, mentre la S2 era utilizzata in una postazione di saldatura tradizionale), esse sono risultate produrre forme d'onda molto simili. Per tale motivo nel seguito si distingue tra quattro tipologie di apparati che danno luogo ad altrettante tipologie di forme d'onda.

Tabella 1. Apparati interessati dalla campagna di misure.

Siglia Apparato	Modello	Lavorazione
S1	Kempo Weld 5500W (KEMPPI)	Ferro – robotizzata
S2	Kempo Weld 4200 (KEMPPI)	Ferro
S3	Kempo Weld 5500W (KEMPPI)	Ferro
S4	Sinvert 302 (SINCOSALD)	Acciaio
S5	Kempo Weld 4000 (KEMPPI)	Alluminio

La catena di misura utilizzata, descritta in dettaglio in [6], si basa sull'uso della sonda Narda ELT400 in modalità 'Field Strength', cioè con risposta piatta in frequenza; essa comprende inoltre una scheda di acquisizione in grado di campionare simultaneamente e memorizzare su file le tre uscite analogiche dell'ELT 400, che risultano istantaneamente proporzionali alle componenti cartesiane dell'induzione magnetica.

Le forme d'onda misurate

Per ciascun apparato sono state eseguite misure in più punti, sia presso testa, tronco e arti dell'operatore addetto alla saldatura, sia in prossimità di uno dei cavi, sia presso il generatore. Nelle figure da 4a 7 sono riportati i risultati misurati in quattro punti (uno per modello di saldatrice), dove il grafico delle componenti è relativo a tutto l'intervallo di misura (5 s a 200 kS/s), mentre quello del modulo è un ingrandimento vicino al massimo misurato. È da notare che le intensità dei campi misurati non sono direttamente confrontabili, perché relative a forme d'onda diverse e a diverse distanze dagli apparati. Le misure sono state effettuate avendo cura che l'operatore iniziasse a saldare dopo l'avvio della misura, in modo che fosse acquisito anche il campo corrispondente all'innesco dell'arco. Come si può osservare dalle figure, il massimo del campo si è sempre verificato proprio durante l'innesco; la stessa cosa vale per gli indici di tipo WP (espressione (3)). È da notare che gli esempi riportati nell'Annex B della norma EN50444 si riferiscono sempre a fdo periodiche e non considerano in alcun modo l'evento dell'innesco, che è invece risultato significativo in tutti i casi qui affrontati.

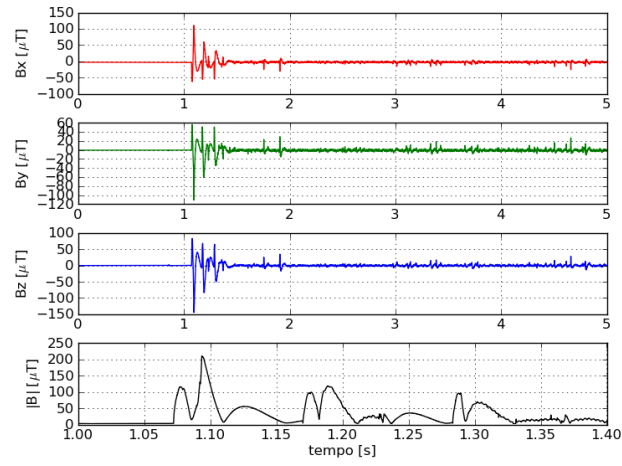


Figura 4. Fdo S1-S3 (misura presso finestrella di ispezione).

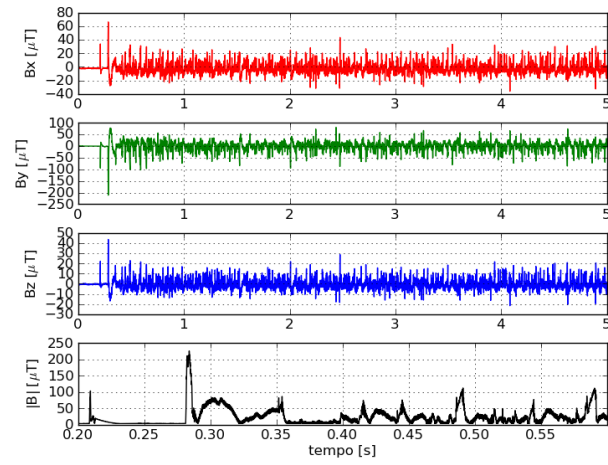


Figura 5. Fdo S2 (misura a 20 cm dal cavo).

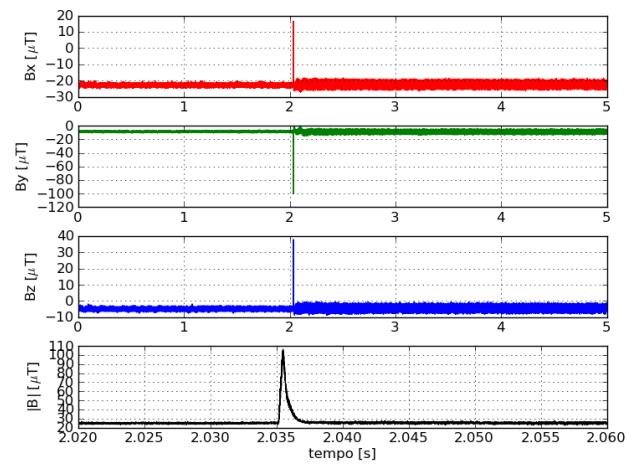


Figura 6. Fdo S4 (misura a 20 cm dal cavo).

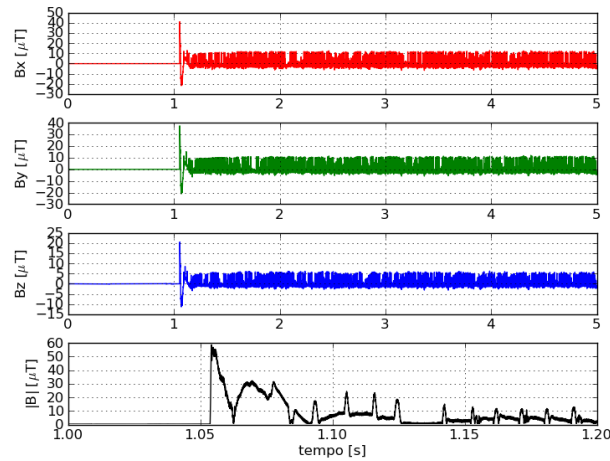


Figura 7. Fdo S5 (misura a 1 m dal generatore).

Tabella 2. Indici IE_{max} per le forme d'onda normalizzate.

Saldatrice	comp.	crest factor	IE_{max}			
1998 lav	2010 lav	1998 pop	2010 pop			
S1-S3	X	14.4	3232.2	779.2	16097.9	3389.0
S2	Y	5.1	13413.6	2536.3	66593.9	9458.6
S4	Z	7.5	11763.1	2701.5	58514.7	10684.2
S5	X	9.3	9684.9	1539.4	48231.9	6239.4

Le distanze di rispetto

In tabella 2 sono riportati gli indici di esposizione riferiti alle forme d'onda normalizzate e ai livelli di riferimento per lavoratori (lav) e popolazione (pop), sia per le linee guida ICNIRP del 1998, sia per quelle del 2010. In tabella viene inoltre identificata la componente cartesiana dell'induzione magnetica scelta per la determinazione della forma d'onda normalizzata ed il fattore di cresta per la fdo normalizzata stessa. È da notare che il criterio per la scelta della forma d'onda (tra tutte quelle relative allo stesso apparato) per la quale si calcola l'indice IE_{max} consiste principalmente nella ricerca del miglior rapporto segnale rumore.

Ricorrendo all'espressione (5) ed utilizzando gli indici IE_{max} di tabella 2 e le $f(d)$ rappresentate in figura 3, è possibile determinare le distanze di rispetto in funzione della corrente di picco circolante nel circuito di saldatura. Tali distanze sono riportate (per la sola saldatrice S2, assunta di qui in avanti come caso-tipo) in tabella 3 e tabella 4, considerando rispettivamente il modello di cavo a filo rettilineo ed indefinito con $GF=1.25$ e quello rappresentato in figura 2.

Tabella 3. Distanze di rispetto in metri per S2 (Biot-Savart, GF=1.25).

I_{max} (A)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1998 lavoratori	0.35	0.7	1.05	1.35	1.7	2.05	2.35	2.7	3.05	3.4
1998 popolazione	1.7	3.35	5	6.7	8.35	10	11.7	13.35	15	16.65
2010 lavoratori	0.1	0.15	0.2	0.3	0.35	0.4	0.45	0.55	0.6	0.65
2010 popolazione	0.25	0.5	0.75	0.95	1.2	1.45	1.7	1.9	2.15	2.4

Tabella 4. Distanze di rispetto in metri per S2 (cavo come da norma EN50444, direttrici esterne).

I_{max} (A)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1998 lavoratori	0.3	0.65	0.95	1.15	1.25	1.35	1.45	1.5	1.6	1.65
1998 popolazione	1.25	1.65	1.9	2.25	2.5	2.75	2.95	3.15	3.3	3.45
2010 lavoratori	0.1	0.1	0.15	0.25	0.3	0.35	0.4	0.5	0.55	0.65
2010 popolazione	0.2	0.45	0.7	0.9	1.05	1.15	1.25	1.3	1.4	1.45

Calcolo degli indici di esposizione riferiti a grandezze radiometriche e dosimetriche per il lavoratore addetto alla saldatura

Le indicazioni sulle distanze di rispetto contenute nel precedente paragrafo possono essere considerate significative per la valutazione dell'esposizione dei lavoratori che stazionano intorno alla postazione di saldatura o di altre persone eventualmente presenti nell'ambiente di lavoro; esse tuttavia non forniscono informazioni sufficienti per la valutazione del rischio dell'addetto alla saldatura. Come si può notare dalla figura 8, alcune parti del corpo sono a pochi centimetri dal cavo e quindi entro le distanze riportate nelle precedenti tabelle anche per correnti relativamente basse.

Nel seguito del lavoro si mira pertanto a caratterizzare in modo più preciso l'esposizione del lavoratore addetto alla saldatura ed in particolare si mira agli obiettivi elencati nel seguito.

1. Valutare gli indici di esposizione occupazionali per l'induzione magnetica a cui sono soggette le differenti parti del corpo del lavoratore, differenziando in particolare la testa dal resto del corpo.
2. Valutare gli indici di esposizione per i lavoratori riferiti alle grandezze dosimetriche di base: densità di corrente indotta (linee guida ICNIRP del 1998) e campo elettrico in-situ (ICNIRP 2010).

Inoltre, ci si è chiesti quanto i risultati di cui sopra fossero sensibili alle modifiche rispetto al modello di circuito di saldatura proposto dalla norma EN50444. Pertanto i calcoli sono stati ripetuti sia con il modello proposto dalla norma, caratterizzato da una distanza d tra tronco e cavo pari a 20 cm (figura 9), sia con un modello leggermente modificato, in cui si è ridotto la

distanza d a 5 cm e si è portato il tratto verticale in avanti, allineandolo con la gamba del modello di organismo (figura 10). Per fare ciò, è stato necessario eliminare il piccolo arco (con raggio r_2) che nel modello completo unisce il tratto verticale e quello orizzontale.

Il modello di organismo utilizzato ha risoluzione relativamente bassa (celle cubiche con lato pari a 5 mm) ed inoltre non è articolato in una postura realistica che avrebbe dovuto comprendere l'articolazione delle braccia a impugnare l'elettrodo-applicatore e la posizione leggermente china: questi elementi potranno essere presi in considerazione in eventuali approfondimenti.



Figura 8. Operatore addetto alla saldatura.

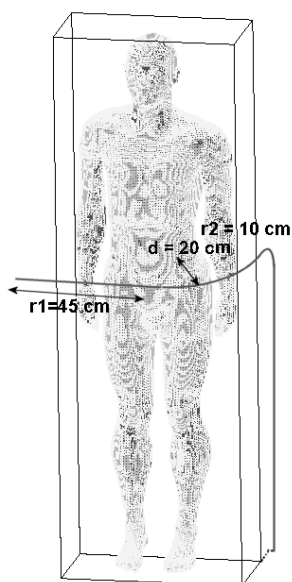


Figura 9. Modello cavo $d=20\text{cm}$.

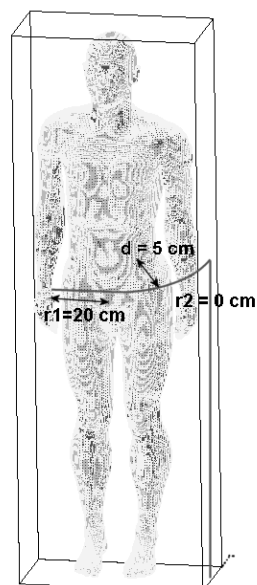


Figura 10. Modello cavo $d=5\text{cm}$.

Nelle tabelle 5 e 6 sono riportati gli indici di esposizione relativi ai livelli di riferimento per l'induzione magnetica definiti nelle linee guida ICNIRP del 1998 e del 2010 per i lavoratori. In particolare in tabella 5 ci si riferisce al modello rappresentato in figura 9 ($d=20\text{cm}$) mentre in tabella 6 a quello di figura 10 ($d=5\text{cm}$).

Tabella 5. Indici di esposizione riferiti all'induzione magnetica per S2, cavo $d=20\text{ cm}$ (colonne: corrente di picco $I_{\max}$ in A).

Indice	Tessuti	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1998 lav.	Testa	0.33	0.66	0.99	1.32	1.65	1.98	2.31	2.64	2.97	3.30
	Altri distretti	2.00	4.01	6.01	8.02	10.02	12.03	14.03	16.04	18.04	20.05
2010 lav.	Testa	0.06	0.12	0.19	0.25	0.31	0.37	0.44	0.50	0.56	0.62
	Altri distretti	0.38	0.76	1.14	1.52	1.90	2.27	2.65	3.03	3.41	3.79

Essendo il cavo più vicino al corpo, gli indici di tabella 6 per i distretti diversi dalla testa sono più alti di quelli riportati in tabella 5.

Tabella 6. Indici di esposizione riferiti all'induzione magnetica per S2, cavo $d=5\text{ cm}$ (colonne: corrente di picco $I_{\max}$ in A).

Indice	Tessuti	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1998 lav.	Testa	0.17	0.35	0.52	0.69	0.86	1.04	1.21	1.38	1.55	1.73
	Altri distretti	6.82	13.64	20.46	27.28	34.10	40.92	47.74	54.56	61.38	68.20
2010 lav.	Testa	0.03	0.07	0.10	0.13	0.16	0.20	0.23	0.26	0.29	0.33
	Altri distretti	1.29	2.58	3.87	5.16	6.45	7.74	9.03	10.32	11.61	12.89

Tuttavia, l'esposizione della testa risulta più bassa a parità di corrente quando il cavo è più vicino alla gamba. Ciò può essere imputato al fatto che il tratto orizzontale del modello di cavo con $d=5\text{cm}$ è più corto e al fatto che il tratto verticale incide meno proprio perché la testa è più vicina al suo prolungamento (il campo generato da un segmento percorso da corrente in un punto che giace sul suo prolungamento è nullo).

Infine, nelle tabelle 7 e 8 sono riportati i risultati delle indagini dosimetriche riferite ai due modelli di cavo considerati. L'indice WPJ (relativo alla densità di corrente indotta e quindi alle linee guida ICNIRP del 1998) è significativo nei soli tessuti del sistema nervoso centrale (SNC) e viene superato solo per intensità di corrente relativamente alte. L'indice WPE, che si riferisce al campo elettrico in-situ ed alle linee guida del 2010, invece è differenziato per i tessuti del sistema nervoso centrale della sola testa e per tutti gli altri tessuti della testa e del corpo (SNP). In questo caso, come si può osservare nelle tabelle, mentre gli indici WPE sono sempre inferiori all'unità nei tessuti della testa, negli altri tessuti possono avvenire dei superamenti; questi si manifestano a correnti più basse quando il cavo è più vicino (cfr. 400 A, tabella 8 vs. 600 A, tabella 7).

Tabella 7. Indici di esposizione riferiti alle grandezze dosimetriche per S2, cavo $d=20\text{ cm}$ (colonne: corrente di picco I_{max} in A).

Indice	Tessuti	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
WPJ	SNC testa + midollo spinale	0.17	0.33	0.50	0.67	0.84	1.00	1.17	1.34	1.50	1.67
WPE SNC	SNC testa	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.11
WPE SNP	Altri tessuti testa e corpo	0.18	0.37	0.55	0.73	0.91	1.10	1.28	1.46	1.65	1.83

Tabella 8. Indici di esposizione riferiti alle grandezze dosimetriche per S2, cavo $d=5\text{ cm}$ (colonne: corrente di picco I_{max} in A).

Indice	Tessuti	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
WPJ	SNC testa + midollo spinale	0.12	0.25	0.37	0.49	0.62	0.74	0.86	0.99	1.11	1.23
WPE SNC	SNC testa	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05
WPE SNP	Altri tessuti testa e corpo	0.33	0.66	0.99	1.32	1.65	1.98	2.31	2.64	2.97	3.30

Conclusioni

Quella che inizialmente doveva essere una revisione critica delle norme tecniche, ha assunto in corso d'opera una connotazione più concreta, mirando a fornire indicazioni utili ad una valutazione del rischio relativa all'esposizione ai campi magnetici generati dalle saldatrici ad

arco. Ciò è stato sicuramente ispirato anche dal contesto in cui il lavoro è stato svolto, vale a dire lo sviluppo del PAF che nasce proprio come risorsa mirata (e legalmente riconosciuta) a tale fine. Sono infatti state proposte – ed applicate ad esempi concreti – delle procedure che permettono di affrontare nella sua complessità il problema della valutazione dell'esposizione umana nella situazione in questione.

Bibliografia

- [1] CENELEC EN 50444. Norma di base per la valutazione dell'esposizione umana ai campi elettromagnetici prodotti dalle apparecchiature per la saldatura ad arco e processi affini. Prima edizione, maggio 2008.
- [2] CENELEC EN 50445. Norma per famiglia di prodotti per dimostrare la conformità delle apparecchiature per la saldatura a resistenza, saldatura ad arco e processi affini ai limiti di base relativi all'esposizione umana ai campi elettromagnetici (0 Hz – 300 GHz). Prima edizione, maggio 2008.
- [3] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, Vol. 74, N. 4, pp. 494–522, April 1998.
- [4] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Physics*, Vol. 99, N. 6, pp. 818–836, December 2010.
- [5] N. Zoppietti, D. Andreuccetti, A. Bogi e I. Pinto. Impatto dell'evoluzione normativa sulla valutazione del rischio da esposizione occupazionale a campi magnetici fino a 100 kHz in ambito industriale e sanitario. Atti (su supporto elettronico) del quinto convegno nazionale “Controllo degli agenti fisici: ambiente, salute e qualità della vita”, Novara, 6-8 giugno 2012.
- [6] N. Zoppietti, D. Andreuccetti, C.V. Bellieni, A. Bogi and I. Pinto. Evaluation and characterization of fetal exposures to low frequency magnetic fields generated by laptop computers. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 107 (2011), pp. 456–463; doi: 10.1016/j.pbiomolbio.2011.10.003.