

VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELL'ESPOSIZIONE DEI LAVORATORI AI CAMPI ELETTROMAGNETICI GENERATI DAGLI IMPIANTI RADAR PRESENTI SULLE MOTOVEDETTE DELLA CAPITANERIA DI PORTO

**Giancarlo Burriesci (1), Moreno Comelli (2), Nicola Zoppetti (2),
Simona D'Agostino (3), Marco Valentini (1)**

- (1) INAIL - Dipartimento Medicina Epidemiologia Igiene del Lavoro e Ambientale, via Fontana Candida 1, 00078 Monte Porzio Catone (RM)
(2) Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara" del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IFAC), via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino (FI)
(3) DIET - Dipartimento di Ingegneria dell'informazione, elettronica e telecomunicazioni, Sapienza Università di Roma

INTRODUZIONE

Il presente lavoro è frutto di una campagna di misura mirata alla valutazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici (CEM), generati dall'apparecchiatura radar, presente a bordo dell'imbarcazione G.C. B120 in uso alla Capitaneria di Porto di Roma. I radar (Radio Detection and Ranging) sono strumenti utilizzati per la localizzazione di oggetti che si trovano anche a distanze elevate, lavorano nel range di frequenza delle microonde, generalmente in banda X, e il loro funzionamento si basa sull'emissione di un treno di impulsi di breve durata. Tra un impulso ed il successivo il sistema trasmittente/ricevente è in grado di mettersi in ascolto di eventuali echi di ritorno. La localizzazione degli oggetti, chiamati tecnicamente "bersaglio", avviene mediante l'irraggiamento direzionale di elevata energia elettromagnetica e attraverso l'osservazione degli echi di ritorno, che ne forniscono la distanza e la posizione rispetto ad una determinata direzione. In particolare, per questo progetto sono stati esaminati i CEM generati dall'apparato radar Furuno DRS4D-NXT, installato su battello, che emette in banda X. La complessità dei segnali emessi ha richiesto l'impiego di apparecchiature molto sofisticate con valutazioni a banda stretta. Altrettanto complesso è stato altresì il protocollo delle misure seguito, che ha dovuto tener conto di diversi parametri. Per tale motivo, la procedura descritta in questo lavoro vuole poter essere da esempio pratico per gli addetti del settore.

NORMATIVA DI RIFERIMENTO

In generale le disposizioni specifiche per la protezione dei lavoratori dall'esposizione ai CEM sono state introdotte nel Capo IV del Titolo VIII del D. Lgs. 81/2008 che fissa i Valori Limiti di Esposizione (VLE) ed i Valori di Azione (VA). Quest'ultimi sono valori operativi espressi in termini delle grandezze fisiche (campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico) misurabili nello scenario espositivo e stabiliti al fine di semplificare il processo di dimostrazione della conformità ai pertinenti VLE. I VLE sono determinati sulla base di considerazioni biofisiche e biologiche, non misurabili nell'ambiente espositivo, stabiliti per la protezione degli effetti acuti scientificamente accertati, ovvero effetti termici e di stimolazione elettrica del tessuto nervoso o muscolare. Di conseguenza, la conformità ai VLE, la cui determinazione diretta, soprattutto nel caso dei campi variabili nel tempo, richiederebbe complesse valutazioni mediante software dedicati, è garantita dal rispetto dei pertinenti VA.

Gli allegati II e III del D. Lgs. 81/2008 riportano tutti i VA per l'esposizione a campi elettrici da 1 Hz a 10 MHz e da 100 kHz a 300 GHz, ma per le finalità di questo lavoro vengono riportati in Tabella 1 solo i VA utilizzati per la valutazione dell'emissioni CEM prodotte dal radar indagato:

Tabella 1 – VA per i campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici ambientali a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz Effetti Termici
- Tabella B1 dell'Allegato XXXVI – D.Lgs.81/08 s.m.i.-

Intervallo di frequenza	VA (E) per l'intensità del campo elettrico [V/m] (RMS)	VA (B) per l'induzione magnetica [μ T] (RMS)	VA (S) per la densità di potenza [W/m ²]
100 kHz \leq f < 1 MHz	$6,1 \times 10^2$	$2,0 \times 10^6 /f$	—
1 \leq f < 10 MHz	$6,1 \times 10^8 /f$	$2,0 \times 10^6 /f$	—
10 \leq f < 400 MHz	61	0,2	—
400 MHz \leq f < 2 GHz	$3 \times 10^{-3} f^{5/2}$	$1,0 \times 10^{-5} f^{5/2}$	—
2 \leq f < 6 GHz	$1,4 \times 10^2$	$4,5 \times 10^{-1}$	—
6 \leq f \leq 300 GHz	$1,4 \times 10^2$	$4,5 \times 10^{-1}$	50

Nota -1: f è la frequenza espressa in Hertz (Hz)

Nota -2: i $[VA(E)]^2$ e $[VA(B)]^2$ devono essere mediati per ogni periodo di sei minuti. Nel caso di segnali impulsivi a radiofrequenza, la densità di potenza di picco (vale a dire mediata sulla durata dell'impulso) non deve superare di 1.000 volte il valore di VA (S) tabellato. Per campi a frequenze multiple l'analisi è basata sulla sommatoria dei contributi, descritta nelle norme tecniche di riferimento e negli strumenti tecnici e specialistici per la riduzione dei livelli di rischio di cui all'articolo 28, comma 3 -ter.

L'emissione del radar esaminato è di tipo impulsivo in Banda X a frequenza di circa 9,4 GHz. Pertanto, la valutazione dei campi deve comprendere sia il calcolo del campo elettrico medio (V_{medio}) che il calcolo del campo elettrico

di picco (V_{picco}), i cui valori di azione, sulla base della nota 2 alla Tabella 1, sono rispettivamente pari a:

- $VA_{\text{medio}} = 140 \text{ V/m}$
- $VA_{\text{picco}} = 4480 \text{ V/m}$

MATERIALI E METODI

Apparato da valutare:

- Radar Furuno DRS4D-NXT (9,41 GHz \pm 30MHz) i cui dati tecnici di targa si riportano in Figura 1.

Figura 1 – Datasheet radar Furuno DRS4D-NXT

SPECIFICATIONS OF													
Model	DRS4D-NXT												
ANTENNA													
Type	ø610 mm Radome (24")												
Beam Width													
Horizontal	3.9° typical (-3dB) Adjustable between 2° and 3.9° (effective with RezBoost control)												
Vertical	25°												
Antenna Rotation Speed	24*/36/48 rpm <small>* In dual range mode, speed is limited to 24 rpm</small>												
RF TRANSCEIVER													
Frequency	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Ch #</th> <th>PON (MHz)</th> <th>QON (MHz)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>9380</td> <td>9400</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>9400</td> <td>9420</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>9420</td> <td>9440</td> </tr> </tbody> </table>	Ch #	PON (MHz)	QON (MHz)	1	9380	9400	2	9400	9420	3	9420	9440
Ch #	PON (MHz)	QON (MHz)											
1	9380	9400											
2	9400	9420											
3	9420	9440											
Pulse length & PRR	PON: 0.08 µs to 1.2 µs / 1100 Hz QON: 5 µs to 18 µs / 1100 Hz												
Peak Output Power	Solid-state, 25 W												
Range Scales	0.0625 to 36* nm <small>* In dual range mode, range is limited to 12 nm</small>												

Strumenti utilizzati per la valutazione dell'esposizione:

- Analizzatore di spettro Rohde & Schwarz mod. FSL 18 (9 kHz - 18 GHz);
- Antenna Horn double ridged guide EMCO mod. 3115 (1 GHz - 18 GHz).

Per la scelta dell'analizzatore di spettro si è dovuto tener conto dei parametri specifici e in particolare modo della Resolution Bandwidth (RBW).

Una ottimale RBW consente sia di valutare la larghezza temporale dell'impulso radar, sia di determinarne la potenza di emissione di picco. Infatti, misurando nella modalità generalmente indicata come *pulse spectrum* e scegliendo una RBW sufficientemente piccola, si ha una misura accurata della durata dell'impulso. Invece, avendo a disposizione una RBW piuttosto grande, si ottiene una precisa misura della potenza di picco emessa dal radar. La valutazione è stata effettuata mediante la catena strumentale in banda stretta costituita dall'analizzatore di spettro accoppiato tramite cavo coassiale all'antenna. Quest'ultima è stata posizionata sul castello di poppa a distanza tale che risulta verificata la condizione di campo lontano. La grandezza fisica oggetto di valutazione è stata, quindi, l'intensità del campo elettrico E (valore RMS, e valore di picco nel caso dei segnali radar).

Per questo tipo di misura, i valori di potenza, espressi in dBm e valutati tramite l'analizzatore di spettro, per poter essere confrontati con i rispettivi limiti di azione, devono essere convertiti mediante la seguente equazione in valori di campo elettrico (V/m):

$$VA \left(\frac{V}{m} \right) = 10^{\frac{E_{picco}(dBm) + AF + AC - 13}{20}}$$

dove AF e AC sono i valori in dB relativi al fattore antenna (Tabella 2) e attenuazione del cavo (Figura 2) che nel caso specifico valgono rispettivamente 38,8 e 7,3 mentre 13 è un coefficiente di conversione.

Alle misure è associato un errore non minore del 10%, assegnato sulla base di valutazioni di ripetibilità del segnale misurato.

Figura 2 - Attenuazione del cavo coassiale.



**Tabella 2 - Fattore Antenna Horn double ridged guide EMCO mod.
3115°**

FREQUENCY (MHz)	ANTENNA FACTOR (dB)	GAIN NUMERIC	GAIN dBi
1000	25.3	3.10	4.9
1500	26.6	5.18	7.1
2000	29.2	5.06	7.0
2500	30.0	6.57	8.2
3000	31.6	6.55	8.2
3500	32.8	6.76	8.3
4000	33.6	7.35	8.7
4500	33.8	8.88	9.5
5000	35.1	8.13	9.1
5500	36.0	7.99	9.0
6000	36.5	8.48	9.3
6500	35.8	11.69	10.7
7000	37.6	8.96	9.5
7500	36.8	12.36	10.9
8000	36.0	16.91	12.3
8500	37.3	14.15	11.5
9000	38.4	12.32	10.9
9500	40.8	7.90	9.0
10000	38.8	13.87	11.4
10500	39.4	13.32	11.2
11000	40.2	12.16	10.8
11500	40.1	13.59	11.3
12000	39.9	15.50	11.9
12500	40.3	15.34	11.9
13000	40.8	14.79	11.7
13500	40.5	17.09	12.3
14000	41.4	14.94	11.7
14500	42.0	13.95	11.4
15000	41.6	16.37	12.1
15500	42.2	15.23	11.8
16000	42.0	16.99	12.3
16500	43.5	12.79	11.1
17000	42.2	18.32	12.6
17500	44.4	11.70	10.7
18000	45.6	9.39	9.7

RISULTATI DELLE MISURE

Per la caratterizzazione dell'emissione del radar è stata individuata la posizione che meglio intercetta il fascio di radiazione in modo che la misura rappresenti il caso peggiore (worst case) e dunque restituiscia un valore cautelativo.

Nel dettaglio il radar, che emette a frequenza pari a $9,41 \text{ GHz} \pm 30 \text{ MHz}$, è stato impostato, durante le misure, nel range pari a 12 miglia nautiche e con velocità di rotazione dell'antenna pari a 24 rpm (rotazioni per minuto). L'antenna della catena di misura è stata posizionata (Figura 3) in prossimità della plancia ad un'altezza di 1,8 m e ad una distanza di 2,5 m che, anche se

difficilmente occupabile da una persona, intercetta meglio il fascio emesso dal radar (worst case).

Figura 3 Battello G.C. B120



I risultati delle misure sono riportati nella Tabella 3, le Figure 4 e 5 mostrano la misura della potenza di picco e la potenza media in modalità Channel Power. In quest'ultima modalità si misura direttamente il valore RMS del campo prodotto dal radar nel punto di misura tenendo conto della rotazione dell'antenna e del duty cycle. Infatti, con un RBW sufficientemente piccola da riuscire a discriminare le componenti in frequenza del segnale, viene calcolata la potenza del segnale all'interno della banda di frequenza (Integration Bandwidth) valutandola in modo tale da contenere almeno tre o quattro lobi secondari a destra e sinistra di quello principale della scansione (Figura 5).

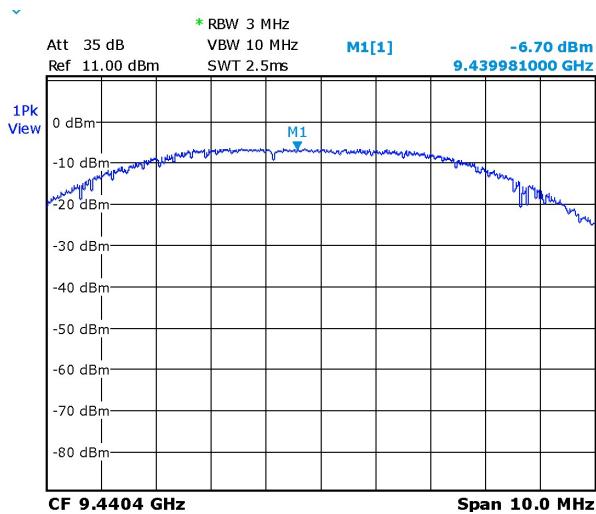
Per quanto riguarda la misura della potenza di picco, l'altezza dell'inviluppo cresce all'aumentare della RBW, ma questo effetto dura fintanto che non si arrivi a superare la larghezza del lobo principale. Una volta raggiunta tale condizione e settata una RBW che inglobi anche i due lobi secondari,

l'ampiezza del picco del segnale è pari a circa il 95% dell'energia emessa dalla sorgente. In questo caso, per ottenere una misura accurata della potenza di picco occorre aver cura di prolungare, in modalità MaxHold o in modalità Media, le misure per un tempo di scansione sufficientemente lungo affinché ciascun punto video sia illuminato almeno una volta dal fascio rotante del radar.

Tabella 3 - Valori di esposizione a campo elettromagnetico emesso dal radar Foruno DRS4D-NXT

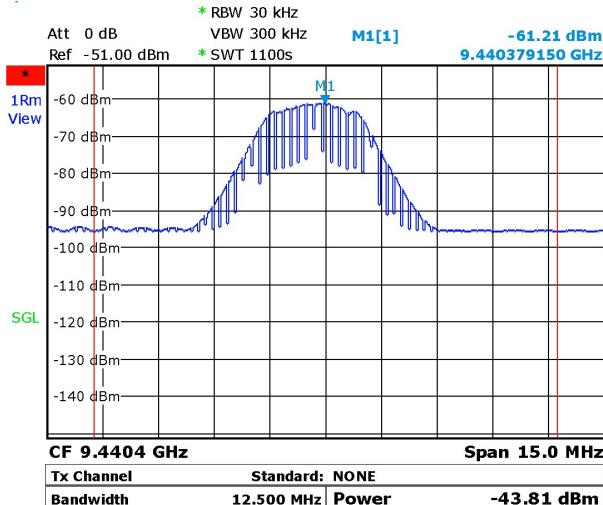
Misure di Campo Elettrico effettuate con strumentazione in banda stretta. Analizzatore Rohde & Schwarz FSL18						
Punto di misura	VA _{medio} (dBm)	VA _{medio} (V/m)	VA _{medio} (V/m) D. Lgs. 81/2008	VA _{picco} (dBm)	VA _{picco} (V/m)	VA _{picco} (V/m) D. Lgs. 81/2008
Plancia	-43,81	0,29	140	-6,70	20,9	4480

Figura 4 - Misura della Potenza di Picco



$$VA \text{ picco} \left(\frac{V}{m} \right) = 10^{\frac{-6.70 + 38.8 + 7,3 - 13}{20}} \cong 20,9 \left(\frac{V}{m} \right)$$

Figura 5 – Potenza Media. Modalità Channel Power



$$VA \text{ medio} \left(\frac{V}{m} \right) = 10^{\frac{-43,81+38,8+7,3-1}{20}} \cong 0,29 \left(\frac{V}{m} \right)$$

CONCLUSIONI

I rilievi effettuati nell'imbarcazione G.C. B120 per valutare l'emissione del radar Furuno DRS4D-NXT hanno evidenziato valori di campo elettromagnetico inferiori ai valori di azione previsti nel Capo IV del Titolo VIII del D. Lgs. 81/08 per l'esposizione professionale, sia considerando il campo elettrico di picco che il campo medio.

Purtuttavia, considerando che gli apparati radar sono sempre più diffusi, con caratteristiche tecniche diverse tra loro, e installati anche in imbarcazioni di piccole dimensioni, tale valutazione si può considerare solo un primo passo nello studio di tali emissioni. Infatti, questi apparati emettono segnali complessi che necessitano per la loro corretta valutazione di strumenti sofisticati e personale altamente qualificato. Benché lo scopo di questo lavoro mirasse alla valutazione dell'esposizione dei lavoratori, l'installazione di radar anche su imbarcazioni piccole, può sottoporre a una sovraesposizione anche individui della popolazione che utilizzino il mezzo di trasporto. Attualmente, alcune case costruttrici stanno immettendo sul mercato strumenti di piccole dimensioni con sonde opportunamente progettate per valutare queste tipologie

di segnale. Per tali motivi la valutazione di queste tipologie di sorgenti richiede studi mirati per validare l'efficacia di questi strumenti e l'eventuale esposizione di personale non addetto all'utilizzo dell'imbarcazione (popolazione).

Riferimenti bibliografici

- [1] ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) (1998). “Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (Up to 300 GHz)”. Health Physics, Vol. 74, N. 4.
- [2] CEI 211-7/B (2016-05) Appendice B: Misura e valutazione del campo elettromagnetico emesso dagli impianti radar di potenza
- [3] DECRETO LEGISLATIVO 9 aprile 2008, n.81: Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n.123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. Gazz. Uff. della Repub. Ital. N.101, 30-4-2008, Suppl. Ordin. N.108. aggiornato con D.Lgs. 159/2016, 2008
- [4] M. Bini, A. Ignesti, C. Riminesi: “Misure sul Radar Meteorologico di Gattatico (Reggio Emilia)” Technical, Scientific and Research reports Vol. 2 – n. 65-6 (2010), CNRIFAC TR-06-1/009;
- [5] D. Andreuccetti, M. Bini, A. Ignesti, R. Olmi, R. Vanni: “Sorveglianza Fisica di installazioni Radar” Report N. EP/AO-I13 giugno 1988 CNR-IROE