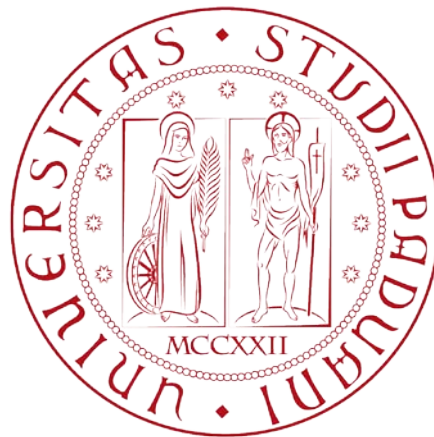


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di laurea magistrale in Ingegneria Elettrica



Analisi Sperimentale della radiazione elettromagnetica emessa da forni a microonde per uso domestico

Relatore: Prof. Fabrizio Dughiero

Correlatore: Ing. Fernando Bressan

Laureando
Marco Scapolo

Anno Accademico 2013/2014

Sommario

La tecnologia del riscaldamento a microonde è una tecnologia ormai consolidata e presente in maniera capillare sul territorio italiano; tuttavia, a differenza di altri elettrodomestici presenti nelle nostre case e non, la tecnologia a del riscaldamento a microonde è affetta da un diffuso grado d'incertezza dell'utilizzatore stesso a riguardo dell'effetto che può avere sul corpo umano.

In questa tesi è stata analizzata la radiazione elettromagnetica emessa da forni a microonde progettati per uso domestico, con attenzione primaria agli effetti che tale radiazione provoca nell'uomo.

Per far ciò, si è reso necessario sottoporre alcuni forni a ripetuti test specifici, individuando una metodologia di prova affidabile e rigorosa. I risultati, dopo un'analisi tramite software MatLab, hanno offerto delle mappe dettagliate della radiazione emessa. In tal maniera, si è potuto individuare le zone di maggiore emissione in maniera puntuale ed la radiazione stessa.

Lista dei simboli

H	Campo magnetico [A/m]
B	Induzione magnetica [Wb/m^2]
E	Campo elettrico [V/m]
D	Induzione elettrica [C/m^2]
J	Densità di corrente [A/m^2]
V	Tensione [V]
σ	Conducibilità elettrica [H/m]
μ	Permeabilità magnetica [H/m]
ϵ	Permittività dielettrica [F/m]
ϵ	Permittività dielettrica complessa [F/m]
P	Vettore di Poynting [W/m^2]
λ	Lunghezza d'onda [m]
f	Frequenza [Hz]
T	Temperatura [K]
ρ	Densità di carica [C]
α	Costante di attenuazione [$1/m$]
β	Costante di fase [$1/m$]
S	Densità di potenza [W/m^2]
C_i	Calore Specifico [$J/kg^\circ C$]

Indice

<u>Capitolo 1: Le basi teoriche.....</u>	<u>3</u>
1.1 Le equazioni generali delle onde.....	3
1.2 Caratterizzazione del campo in base alla sorgente.....	6
1.3 Propagazione delle onde.....	9
<u>Capitolo 2: L'esposizione umana ai campi elettromagnetici.....</u>	<u>12</u>
2.1 Meccanismi di accoppiamento tra i campi e il corpo.....	12
2.2 Effetti diretti dei campi elettromagnetici.....	14
<u>Capitolo 3: Il processo di riscaldamento mediante forno a microonde....</u>	<u>19</u>
3.1 Funzionamento generale di un forno.....	19
3.2 Processo di riscaldamento mediante microonde.....	21
<u>Capitolo 4: Procedura ed esecuzione delle misure.....</u>	<u>25</u>
4.1 Metodologia delle misure.....	25
4.1.1 Strumentazione di misura.....	25
4.2 Metodologia di esecuzione dei test.....	30
4.2.1 Definizione dei carichi.....	38
4.2.2 Scelta dei forni.....	40
<u>Capitolo 5: Test.....</u>	<u>47</u>
5.1 Forno 1, carico A.....	47
5.1.1 Forno 1, carico B.....	52
5.1.2 Forno 1, carico C.....	57
5.2.1 Forno 2, carico A.....	62
5.2.2 Forno 2, carico B.....	67

5.2.3 Forno 2, carico C.....	72
5.3.1 Forno 3, carico A.....	78
5.3.2 Forno 3, carico B.....	83
5.3.3 Forno 3, carico C.....	88
5.4 Forno 1, carico B (Senza Piatto).....	93
<u>Capitolo 6: Analisi dei risultati</u>	98
<u>Conclusioni</u>	102
<u>Ringraziamenti</u>	103
<u>Bibliografia</u>	104

Introduzione

Elettrosmog è un termine di nuovo conio, ma che oramai è entrato a far parte della lingua di tutti i giorni. Viviamo oramai immersi in campi elettromagnetici, prodotti da oggetti cui oggi non si può più fare a meno, come per esempio i telefoni cellulari o, per l'appunto, i forni a microonde. La motivazione di questa tesi è stata perciò un'analisi "sul campo" della radiazione emessa da forni a microonde domestici, nelle condizioni di utilizzo normale, testando prodotti di largo consumo. In particolare, si è voluto testare l'effetto della variazione dei carichi in relazione alle emissioni, in quanto in recenti studi [1] su tecnologie di cottura innovative (piani di cottura ad induzione), tali variazioni di carichi hanno avuto rilevanza fondamentale nel valore delle emissioni prodotte.

Dopo una doverosa introduzione sulle caratteristiche delle onde elettromagnetiche, è presente un'ampia sezione sulle norme generali e linee guida che i produttori di forni devono seguire, ed inoltre una panoramica sulle più recenti indagini eseguite a riguardo gli effetti causati da onde elettromagnetiche nel corpo umano. Nei capitoli successivi, dopo una breve spiegazione del funzionamento di un forno a microonde, sono state esposte le prove, la metodologia delle stesse ed infine i risultati.

Capitolo 1

Le basi teoriche

1.1 Equazioni generali delle onde

Le equazioni di Maxwell sono un sistema di quattro equazioni differenziali alle derivate parziali lineari e accoppiate, che descrivono l'interazione tra il campo elettrico e il campo magnetico. Esse esprimono l'evoluzione temporale e i vincoli a cui è soggetto il campo elettromagnetico in relazione alle distribuzioni di carica e corrente elettrica da cui è generato. In un mezzo uniforme (lineare, omogeneo ed isotropo) le equazioni di Maxwell in forma differenziale sono:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.4)$$

In virtù delle ipotesi fatte (mezzo lineare, omogeneo ed isotropo), l'induzione elettrica \mathbf{D} risulta essere direttamente proporzionale all'intensità di campo elettrico ($\mathbf{D}=\varepsilon\mathbf{E}$); l'induzione magnetica \mathbf{B} risulta essere direttamente proporzionale all'intensità di campo magnetico ($\mathbf{B}=\mu\mathbf{H}$). Le proprietà dielettriche quali la permittività, la permeabilità e la conducibilità sono le stesse in ogni punto del mezzo considerato, poiché, per ipotesi, il mezzo è omogeneo. L'isotropia del mezzo garantisce infine che la permittività e la permeabilità siano indipendenti dall'orientamento del campo elettromagnetico che investe il mezzo stesso.

Ricordando la relazione

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} \quad (1.5)$$

È possibile ricavare dalle equazioni di Maxwell le equazioni delle onde. Si suppone per ipotesi che nel dominio di studio non siano presenti densità di carica ($\rho=0$).

Applicando la relazione 1.5 alle 1.3 e 1.4 si ottengono:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1.6)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1.7)$$

Tali equazioni non sono indipendenti fra loro, e possono essere riscritte (considerando campi variabili nel tempo in modo periodico e sinusoidale) in tal modo

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma^2 \mathbf{E} \quad (1.8)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma^2 \mathbf{E} \quad (1.9)$$

Dove γ viene detta *costante di propagazione*

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} = \alpha + j\beta \quad (1.10)$$

Con ω velocità angolare dell'onda.

La grandezza *costante di propagazione* risulta essere un numero complesso. La sua parte reale (α) viene anche detta *costante di attenuazione*, e descrive come varia l'ampiezza dell'onda mentre attraversa un mezzo. La parte immaginaria (β) è nota come *costante di propagazione* e descrive la propagazione dell'onda.

Sia la parte reale che la parte immaginaria della *costante di propagazione* sono dipendenti dalle proprietà fisiche del mezzo in cui l'onda si propaga

$$\alpha = 2\pi f \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} - 1 \right]} \quad (1.11)$$

$$\beta = 2\pi f \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right]} \quad (1.12)$$

Si definisce poi *lunghezza d'onda* la distanza fra due massimi (o minimi) successivi di oscillazione del campo, elettrico o magnetico.

La lunghezza d'onda (simbolo λ) risulta essere inversamente proporzionale alla frequenza: ciò che le lega, infatti, è la costante di proporzionalità, detta *velocità di propagazione dell'onda*.

La *velocità di propagazione dell'onda* (simbolo U_p) si lega con la *costante di fase* (β):

$$U_p = \frac{2\pi f}{\beta} \quad (1.13)$$

Mentre la lunghezza d'onda (simbolo λ) si relaziona con la *costante di fase* secondo questa equazione:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (1.14)$$

Si definisce *impedenza intrinseca dell'onda* (η) la costante di proporzionalità fra il modulo del campo elettrico e il modulo del campo magnetico:

$$\eta = \frac{E}{H} = \frac{j\omega\mu}{\gamma} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} = |\eta| \angle \theta_\eta \quad (1.15)$$

Con:

$$|\eta| = \frac{\sqrt{\mu/\varepsilon}}{\left[1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2\right]^{1/4}} \quad (1.16)$$

$$\tan 2\theta_\eta = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \quad (1.17)$$

Si definisce Z_0 impedenza d'onda nel aria (o nel vuoto) data da:

$$Z_0 = \frac{E}{H} = \frac{\varepsilon_0}{\mu_0} = 377 \, \Omega \quad (1.18)$$

Avendo definito la *costante di propagazione* (γ) e l'*impedenza intrinseca* (η), è possibile scrivere la forma fasoriale del campo elettrico e del campo magnetico di un'onda elettromagnetica che si propaga lungo l'asse z :

$$\mathbf{E}_x(+z) = \mathbf{E}_{x0} e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \quad (1.19)$$

$$\mathbf{H}_y(+z) = \frac{1}{|\eta|} \mathbf{E}_{x0} e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} e^{-j\theta_\eta} \quad (1.20)$$

$$\mathbf{E}_x(-z) = \mathbf{E}_{x0} e^{\alpha z} e^{j\beta z} \quad (1.21)$$

$$\mathbf{H}_y(-z) = \frac{1}{|\eta|} \mathbf{E}_{x0} e^{\alpha z} e^{j\beta z} e^{j\theta_\eta} \quad (1.22)$$

\mathbf{E}_{x0} indica l'ampiezza dell'onda elettromagnetica alla quota $z=0$; $\mathbf{E}_x(z)$ e $\mathbf{H}_{xY}(z)$ descrivono il campo elettrico e il campo magnetico che si propagano lungo l'asse z oscillando rispettivamente lungo le direzioni x e y . $\mathbf{E}_x(-z)$, $\mathbf{H}_y(-z)$, $\mathbf{E}_x(+z)$ e $\mathbf{H}_y(+z)$ rappresentano invece le onde regressive e le onde progressive.

I valori $e^{-\alpha z}$ ed $e^{\alpha z}$ indicano la velocità con cui l'ampiezza dell'onda decade con la distanza percorsa in un mezzo.

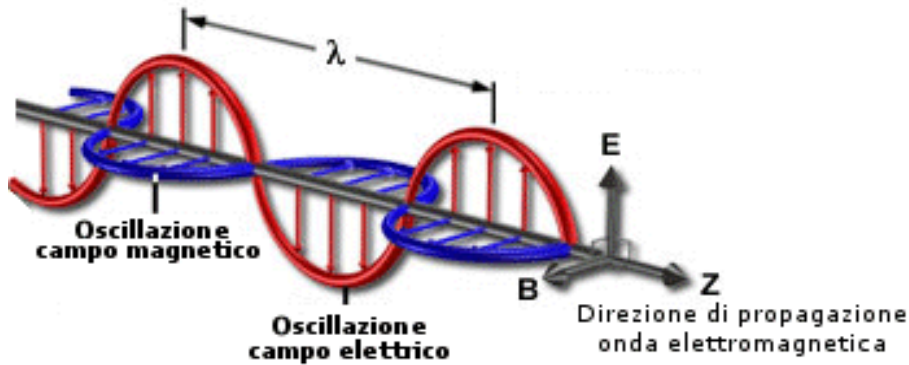


Fig.1.1 Propagazione di un'onda elettromagnetica

La densità di potenza istantanea nella direzione di propagazione dell'onda viene descritta, in funzione del tempo e dello spazio, dal vettore Poynting. Considerando un'onda piana con direzione di propagazione lungo l'asse z , il valor medio nel tempo di tale vettore indica la potenza elettromagnetica in funzione della posizione:

$$P_{avg}(z) = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{P}(z, t) dt \quad (1.23)$$

Dove \mathbf{P} risulta essere:

$$\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1.24)$$

1.2 Caratterizzazione del campo in base alla sorgente

In base alle equazioni precedentemente scritte, è possibile distinguere diverse zone man mano che ci allontaniamo dalla sorgente di campo. Per qualsiasi tipo di sorgente queste zone sono:

- Regione di campo vicino *reattivo*, nella quale le componenti reattive del campo elettromagnetico predominano su quelle radiative. Essa è localizzata nelle immediate vicinanze della sorgente. Questa zona si estende dalla superficie della sorgente fino ad una distanza di transizione dell'ordine della lunghezza d'onda (da $\lambda/2\pi$ a 3λ , in relazione alla lunghezza d'onda e alle dimensioni della sorgente); Nella zona di campo vicino reattivo i fenomeni di propagazione di potenza sono assai ridotti e di conseguenza le componenti reattive dell'energia elettromagnetica decadono molto rapidamente con la distanza R dalla sorgente assumendo significato solo in prossimità dell'emettitore.

In questa regione, in base alla tipologia della sorgente di campo, il rapporto E/H può variare.

Infatti, se la sorgente è di natura *capacitiva*, allora vale

$$\frac{E}{H} > 377 \Omega \quad (1.25)$$

E tale rapporto *aumenta* con l'avvicinarsi alla superficie della sorgente.

Se invece la sorgente è di natura *induttiva*:

$$\frac{E}{H} < 377 \Omega \quad (1.26)$$

E tale rapporto *diminuisce* con l'avvicinarsi alla superficie della sorgente.

- Regione di campo *radiativo*, che si estende dall'estremo della suddetta distanza di transizione fino a distanza infinita.

La zona di *campo radiativo* può essere suddivisa a sua volta in due ulteriori zone:

- zona di campo vicino *radiativo*, nella quale comincia a formarsi il fascio di radiazione. Viene anche detta zona di Fresnel. Tale regione, quando presente, inizia alla distanza di transizione e si esaurisce ad una distanza R_0 (distanza di Rayleigh) pari a λ o a $2D^2/\lambda$ (il maggiore dei due valori), dove D è la massima distanza misurabile tra due punti appartenenti alla sorgente. La struttura dei campi nella suddetta regione è più complessa rispetto a quella relativa alla regione di campo lontano: tuttavia le distribuzioni dell'intensità e della fase dei campi elettrico e magnetico variano in maniera pressoché proporzionale. Fatte queste precisazioni, per questa zona è possibile utilizzare con buona approssimazione i concetti di impedenza d'onda costante pari a Z_0 .
- Zona di campo *lontano*, detta zona di Fraunhofer, che si estende da una distanza dalla sorgente pari a λ o $2D^2/\lambda$ (il maggiore dei due valori) fino a distanza infinita

La zona di campo lontano è la regione di spazio dove avviene la tipica propagazione per onda piana uniforme. Il campo elettromagnetico è composto da distribuzioni uniformi delle intensità di campo elettrico e magnetico nello spazio, su piani che sono a 90° l'uno rispetto all'altro ed ortogonali rispetto alla direzione di propagazione dell'onda elettromagnetica. I campi elettrici e magnetici sono in fase, e le ampiezze sono legate da una relazione costante.

Il campo di radiazione, cui è associato il trasporto di energia a grande distanza, è l'elemento dominante della zona di campo lontano: in tale zona, le componenti del campo elettrico e magnetico diminuiscono con la distanza R dalla sorgente come $1/R$.

In tale zona di campo esiste una relazione definita tra i vettori campo elettrico, campo magnetico e densità di potenza trasportata dall'onda.

$$S = E H \quad [\text{W/m}^2] \quad (1.27)$$

$$S = \frac{E^2}{377} = 377 H^2 \quad [\text{W/m}^2] \quad (1.28)$$

Va evidenziato che per quanto riguarda la valutazione della densità di potenza è preferibile utilizzare la relazione di campo elettrico 1.28 in quanto la misura dell'intensità di campo elettrico risulta generalmente più affidabile sia con banchi selettivi che con sonde a larga banda rispetto alla misura dell'intensità di campo magnetico.

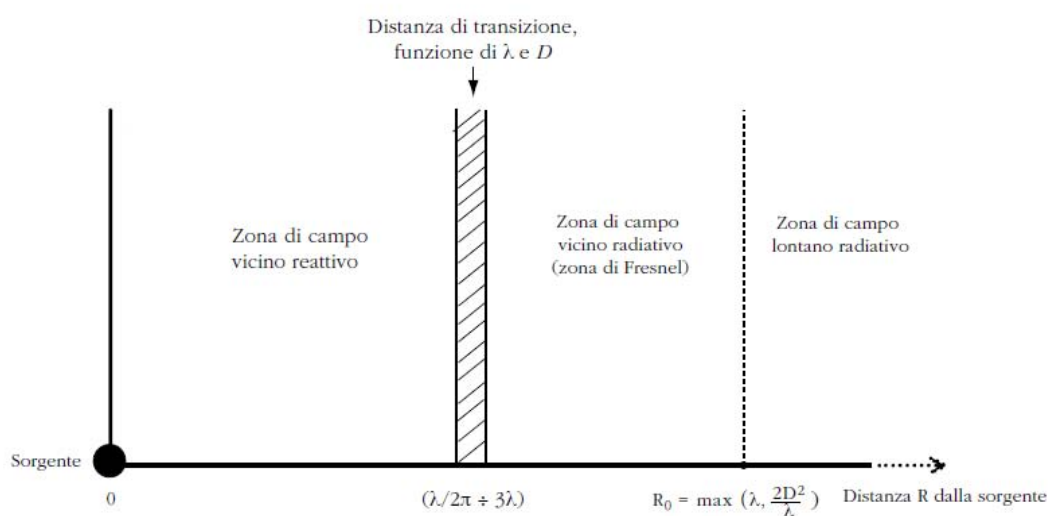


Fig. 1.2 Schematizzazione delle zone di campo elettromagnetico in funzione della distanza dalla sorgente

Densità di potenza (W/m ²)	Intensità di campo elettrico (V/m)	Intensità di campo magnetico (A/m)
0,1	6,14	0,016
1,0	19,42	0,052
10,0	61,40	0,163
50,0	137,30	0,364
100,0	194,16	0,515

Tab. 1.1 Esempi di relazioni tra parametri di campo lontano

	Campo vicino reattivo	Campo vicino radiativo	Campo lontano
Limite inferiore	0	$\lambda/2\pi + 3\lambda$	max. ($\lambda, 2D^2/\lambda$)
Limite superiore	$\lambda/2\pi + 3\lambda$	max. ($\lambda, 2D^2/\lambda$)	∞
Valutazione della densità di potenza	$S \approx E \cdot H$	$S = \frac{E^2}{Z_0} = Z_0 H^2$	$S = \frac{E^2}{Z_0} = Z_0 H^2$
E ed H ortogonali	no	si	si
$\frac{E}{H} = 377 \Omega$	no	si	si

Tab.1.2 Confronto tra le tre regioni di campo elettromagnetico prodotto da una sorgente

1.3 Propagazione delle onde

Propagazione nel vuoto

Nel vuoto la permittività dielettrica, la permeabilità magnetica e la conducibilità elettrica assumono i seguenti valori:

$$\epsilon_0 = 8.8419 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} \quad (1.24)$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} \quad (1.25)$$

$$\sigma_0 = 0 \text{ S/m} \quad (1.26)$$

Mentre la permittività e la permeabilità di tutti gli altri materiali sono:

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (1.27)$$

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (1.28)$$

Con ϵ_r e μ_r numeri adimensionali, relativi rispettivamente alla permittività e alla permeabilità. Nel vuoto, essi valgono ambo 1.

E' possibile ricavare l'impedenza intrinseca del vuoto da tali valori:

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi = 377\Omega \quad (1.29)$$

Mentre, per la velocità U_p :

$$U_p = \frac{2\pi f}{\beta} = \frac{2\pi f}{2\pi f \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (1.30)$$

Il valore trovato risulta essere proprio la velocità della luce (c) nel vuoto. La lunghezza d'onda allora sarà:

$$\lambda_0 = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{2\pi f \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{1}{f \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{c}{f} \quad (1.31)$$

Propagazione in materiali dielettrici senza perdite

Nei mezzi dielettrici senza perdite (fra i quali, si ricordano le materie plastiche, vetri ed altri materiali elettricamente non conduttori, come la porcellana) la corrente di conduzione risulta trascurabile rispetto alla corrente di spostamento. Ciò comporta che la conducibilità elettrica (σ) può essere assunto uguale a zero per questi materiali. Allora, per tali materiali, le *costanti* d'onda diventano:

$$\alpha = 0 \quad (1.32)$$

$$\beta = 2\pi f \sqrt{\mu_r \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0} = 2\pi f \sqrt{\mu \epsilon} \quad (1.33)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (1.34)$$

$$\theta_\eta = 0 \quad (1.35)$$

Mentre per quanto riguarda i valori di campo elettrico e magnetico di un'onda elettromagnetica che si propaga in un mezzo (assunta come direzione di propagazione l'asse z):

$$\mathbf{E}_x(+z) = E_{x0} e^{-j\beta z} \quad (1.36)$$

$$\mathbf{H}_y(+z) = \frac{1}{\eta} E_{x0} e^{-j\beta z} \quad (1.37)$$

Da tali equazioni, si evince che un'onda elettromagnetica che si propaga in un mezzo dielettrico senza perdite *non* si riduce in ampiezza.

Propagazione in mezzi dielettrici con perdite

I materiali dielettrici con perdite sono quei materiali con conducibilità elettrica non trascurabile, ma che tuttavia non rientrano nella famiglia dei buoni conduttori. Un'onda elettromagnetica che si propaga in tali materiali, si attenua esponenzialmente in ampiezza in funzione della profondità di penetrazione.

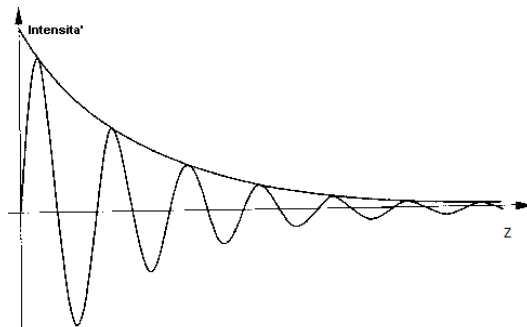


Fig. 1.3 Andamento di un'onda elettromagnetica che si propaga in un mezzo dielettrico con perdite

Le equazioni di propagazione rimangono invariate. Per quanto riguarda il valore della potenza:

$$P_{avg}(z) = P_{avg}(0)e^{-2\alpha z} \quad (1.38)$$

In questi materiali, all'aumentare della *costante di attenuazione* (α) aumenta anche la *rapidità* con cui l'onda elettromagnetica perde potenza all'interno del materiale nel quale si propaga.

Si definisce *spessore di penetrazione* (skin depth) la distanza alla quale l'ampiezza dell'onda risulta 0.368 (1/e) volte quella superficiale ($z=0$).

La potenza può allora essere riformulata in funzione dello spessore di penetrazione d_p :

$$P_{avg}(d_p) = P_{avg}(0)e^{-2\alpha d_p} = \frac{1}{2e} P_{avg}(0) \quad (1.39)$$

E con d_p :

$$d_p = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\pi f \sqrt{2\varepsilon\mu \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} - 1 \right]}} \quad (1.40)$$

Propagazione nei materiali buoni conduttori

I materiali definiti buoni conduttori, per esempio i metalli, sono caratterizzati da un'elevata conducibilità elettrica ($\sigma=\infty$). In virtù di ciò, le *costanti d'onda* diventano:

$$\alpha = \infty \quad (1.41)$$

$$\beta = \infty \quad (1.42)$$

E la *velocità d'onda* U_p :

$$U_p = 0 \quad (1.43)$$

Ciò indica che, all'interno di un materiale detto buon conduttore, le onde elettromagnetiche non si propagano. In realtà, il valore infinito di conducibilità elettrica non viene mai raggiunto, e le onde elettromagnetiche penetrano comunque all'interno di tali materiali; tuttavia i valori sono talmente piccoli da risultare trascurabili.

Capitolo 2

L'esposizione umana ai campi elettromagnetici

L'esposizione di una persona ai campi elettromagnetici è direttamente legata ai valori di alcune grandezze elettriche che si stabiliscono, per effetto di tali campi, all'interno del corpo umano: tali grandezze, dette grandezze interne, sono l'intensità del campo elettrico E , la densità di corrente indotta J e il tasso di assorbimento di energia elettromagnetica per unità di peso corporeo SAR , a cui è strettamente legata la sovratemperatura corporea.

2.1 Meccanismi di accoppiamento tra i campi e il corpo

I meccanismi di accoppiamento attraverso i quali i campi elettrici e magnetici variabili nel tempo interagiscono con la materia vivente sono principalmente tre.

Accoppiamento con i campi elettrici a bassa frequenza

L'accoppiamento di campi elettrici variabili nel tempo con il corpo umano dà luogo ad un flusso di cariche elettriche, alla polarizzazione di cariche legate (formazione di dipoli elettrici) e al ri-orientamento di dipoli elettrici già presenti nei tessuti.

L'importanza relativa di questi diversi effetti dipende dalle proprietà elettriche del corpo, cioè dalla conducibilità elettrica (che governa il flusso della corrente elettrica) e dalla permittività (che governa l'entità degli effetti di polarizzazione).

In base al tipo di tessuto corporeo, la conducibilità e la permittività elettriche variano.

Campi elettrici esterni al corpo inducono su questo una carica superficiale; quest'ultima dà luogo a correnti indotte nel corpo, la cui distribuzione dipende dalle condizioni di esposizione, dalle dimensioni e dalla forma del corpo e dalla sua posizione nel campo.

Accoppiamento con i campi magnetici a bassa frequenza

L'interazione fisica dei campi magnetici variabili nel tempo con il corpo umano dà luogo a campi elettrici indotti e alla circolazione di correnti elettriche. Tale interazione è influenzata da molteplici fattori, quali l'intensità di campo indotto, il raggio della spira, la velocità di variazione del campo, la conducibilità elettrica e il valore dell'induzione magnetica. Campi elettrici più intensi sono indotti dove le dimensioni di spira sono maggiori; L'intensità della corrente indotta, e il suo esatto percorso sono dati dalla conducibilità elettrica del tessuto corporeo in esame.

Assorbimento di energia elettromagnetica

L'esposizione a campi elettromagnetici di frequenza superiore a circa 100 kHz, può portare a significativi assorbimenti di energia, nonché ad aumenti di temperatura corporea.

L'esposizione ad un campo elettromagnetico uniforme, in generale, comporta perciò una deposizione di energia nel corpo umano, con distribuzione spaziale non uniforme.

Dal punto di vista dell'assorbimento di energia da parte del corpo umano, i campi elettrici possono essere suddivisi in quattro intervalli, classificati in funzione della frequenza f .

- Per frequenze comprese fra i 100 kHz e i 20 MHz, si possono riscontrare assorbimenti notevoli nelle zone di collo e gambe. L'assorbimento nel tronco è direttamente proporzionale alla frequenza;
- Per frequenze comprese fra i 20 MHz e i 300 MHz, l'assorbimento risulta esteso al corpo intero. Può essere maggiormente elevato se si considerano gli effetti di risonanza in singole parti del corpo (come per esempio il cranio);
- Per frequenze comprese fra i 300 MHz e unità di gigahertz, l'assorbimento risulta significativo, disuniforme ma locale
- Per frequenze superiori a circa 10 GHz, l'assorbimento risulta superficiale.

L'indice per valutare l'assorbimento è detto *SAR* (*Specific Absorption Rate*), cioè il *tasso di assorbimento specifico*

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} = c_i \frac{dT}{dt} = \frac{J^2}{\rho\sigma} \quad (2.1)$$

Nei tessuti, il SAR è proporzionale al quadrato dell'intensità del campo elettrico interno. Può essere normalizzato sulla massa del corpo intero (*SAR medio*) oppure localizzato su un piccolo volume di tessuto (*SAR localizzato*). È opportuno valutare il SAR poiché permette di avere una informazione più dettagliata sulla distribuzione spaziale dell'energia assorbita dall'organismo esposto, e quindi una stima dell'entità e della natura del potenziale danno nei suoi vari organi.

Il SAR medio e la distribuzione del SAR possono essere calcolati o stimati da misure di laboratorio. I valori del SAR dipendono dai seguenti fattori:

- Parametri caratterizzanti il campo incidente: frequenza, intensità, polarizzazione e polarizzazione relativa della sorgente e dell'oggetto (campo vicino e campo lontano);
- Caratteristiche del corpo esposto, cioè geometria interna ed esterna, nonché le proprietà dielettriche dei vari tessuti;
- Effetti di contatto ed effetti di riflessione da parte di altri oggetti vicini alla zona di esposizione;

I valori massimi di SAR vengono raggiunti (nel corpo intero) quando l'asse maggiore del corpo umano è parallelo al vettore campo elettrico. Il campo deve essere in condizione di onda piana (cioè di esposizione di campo lontano).

A frequenze superiori a circa 10 GHz, lo spessore di penetrazione dei campi nei tessuti è piccolo, ed il SAR non è una buona grandezza per valutare l'energia assorbita; si utilizza perciò la densità di energia incidente (espressa in W/m^2).

2.2 Effetti diretti dei campi elettromagnetici

Numerosi studi sono stati compiuti per effettuare test sugli effetti diretti dei campi elettromagnetici: nel ambito della riproduzione, due ampi studi su donne sottoposte a diatermia a microonde per alleviare il dolore delle contrazioni dell'utero durante il parto, non hanno prodotte evidenze di effetti negativi sul feto [2][3].

Risultati ambigui invece, sono stati riscontrati in sette studi, riguardanti l'esito di gravidanze di lavoratrici esposte per motivi professionali a radiazioni a microonde. Alcuni studi non hanno riscontrato problemi di aborti o malformazioni fetali (studio compiuto su lavoratrici addette alla saldatura della plastica e su fisioterapiste che lavoravano con apparati di diatermia ad onde corte) [4]; altri hanno evidenziato risultati diametralmente opposti [5][6]. Uno studio ha riguardato anche lavoratori uomini soggetti ad esposizione a microonde ed il rischio di sindrome di Down nei loro figli, senza trovare alcuna correlazione [7].

Gli studi sul rischio di cancro ed esposizione a microonde sono in generale pochi e carenti per quanto riguarda la valutazione delle esposizioni. Due studi su lavoratori addetti a radar nell'industria aeronautica e nelle forze armate degli Stati Uniti, non hanno riportato evidenze su aumenti di morbilità dei tessuti o di mortalità [8][9]. Risultati negativi sono stati esposti anche da uno studio eseguito su bambini cronicamente esposti a radiazioni prodotte da un trasmettitore a microonde posto nelle vicinanze delle loro abitazioni [10].

Studi più recenti, non hanno comunque riportato evidenze di aumento di rischio tumorale: tali studi sono stati compiuti su lavoratori ed militari esposti a campi a microonde [11]; anche l'utilizzo di telefonia mobile sembra non avere alcuna correlazione con il rischio tumorale, anche se è ancora troppo presto per valutare risultati definitivi [12].

Rispetto alla radiazione in onda continua, i campi a microonde pulsati sono generalmente, a parità di tasso medio di deposizione di energia nei tessuti, più efficaci nel produrre risposte biologiche, specialmente quando vi siano da superare soglie ben definite per provocare l'effetto [13]. Esistono fenomeni propri delle frequenze a microonde, come "l'effetto uditivo" [14]: alcune persone possono percepire campi modulati ad impulsi con frequenza compresa fra 200 MHz e 6,5 GHz. Tale effetto si esplica nei soggetti adatti in una sorta di ronzio o ticchettio. L'effetto uditivo delle microonde è stato attribuito ad un'interazione termoelastica nella corteccia uditiva del cervello. Per periodi di esposizione prolungati, tale effetto può risultare dannoso.

I dati sperimentali disponibili indicano che l'esposizione per circa 30 minuti dell'uomo a riposo a campi elettromagnetici che producano un SAR mediato sul corpo intero tra 1 e 4 W/kg dà luogo ad un aumento della temperatura corporea inferiore a 1 °C.

L'aumento della temperatura corporea è contrastato dal sistema di termoregolazione il quale interviene nello stesso modo sia a seguito di riscaldamento passivo (mediante diatermia) che di riscaldamento attivo (mediante esercizio fisico). Il sistema agisce con una costante di tempo che per l'uomo è di circa 6 minuti; quindi l'esposizione ad un campo elettromagnetico di elevata intensità comporta un aumento della temperatura corporea nei primi 6 minuti, dopo i quali

si rileva un periodo più o meno lungo, a seconda della potenza assorbita, nel quale la temperatura corporea viene stabilizzata ad un valore maggiore di quello fisiologico.

Esposizioni a campi più intensi, che producano valori di SAR superiori a 4 W/kg, possono andare al di là della capacità di termoregolazione del corpo e produrre riscaldamenti del corpo a livelli pericolosi.

Molti studi di laboratorio su roditori e primati hanno dimostrato la grande varietà dei danni ai tessuti conseguenti a riscaldamenti del corpo intero o di parti di esso che diano luogo ad aumenti di temperatura superiori a 1-2 °C. La sensibilità dei vari tipi di tessuto a danni di origine termica varia molto, ma la soglia per effetti irreversibili, anche nei tessuti più sensibili, è superiore a 4 W/kg in normali condizioni ambientali.

Questi dati costituiscono la base per limitare l'esposizione professionale a 0,4 W/kg, con particolare attenzione a riguardo l'uso di farmaci e/o alcool: tali sostanze possono limitare pesantemente la capacità del corpo di termoregolarsi.

Test epidemiologici su gruppi di volontari, hanno evidenziato che effetti biologici negativi possono essere causati da un sovratemperatura superiore ad 1 °C.

Ricapitolando, i test su cellule, su animali e su gruppi di volontari umani hanno mostrato evidenze per la maggior parte positive. Tuttavia, tali test vengono inficiati dalla mancanza di dati su popolazioni ampie e su effetti a lungo termine.

Limitazione all'esposizione professionale e a quella del pubblico

Occorre distinguere l'esposizione professionale e l'esposizione non professionale: la popolazione esposta per motivi professionali infatti è formata da adulti consapevoli dei potenziali rischi e delle opportune precauzioni da adottare.

L'esposizione non professionale invece, comprende individui di tutte le età e con diverso stato di salute. In molti casi, inoltre, viene a mancare la consapevolezza dell'esposizione a campi elettromagnetici e perciò, anche l'adozione di misure atte a limitare o minimizzare l'esposizione stessa. I limiti riguardanti l'esposizione non professionale perciò saranno maggiormente bassi rispetto all'esposizione professionale.

In base alla frequenza, le restrizioni di base per l'esposizione a campi elettromagnetici riguardano grandezze fisiche quali la densità di potenza e il rateo di assorbimento specifico (SAR). Tali restrizioni sono state create in base ad opportune verifiche strumentali, avendo considerato anche alcuni fattori di sicurezza quali le condizioni ambientali sfavorevoli (temperature elevate, ecc.) ed elevata sensibilità al calore.

Nell'intervallo compreso fra i 100 kHz e i 10 GHz, vengono fornite restrizioni di base sul SAR, per prevenire sbalzi termici nel corpo intero e riscaldamenti eccessivi di tessuti a livello locale. Gli effetti biologici e sanitari che sono stati accertati nell'intervallo di frequenza tra 10 MHz e pochi GHz possono essere interpretati come risposte ad un aumento della temperatura corporea di oltre 1°C. In condizioni ambientali normali, un simile aumento di temperatura è provocato da un'esposizione ad un SAR al corpo intero di circa 4 W/kg per circa 30 minuti.

Si è quindi scelto un SAR medio sul corpo intero di 0,4 W/kg, come limite in grado di fornire un'adeguata protezione per l'esposizione professionale. Per l'esposizione della popolazione si

introduce un ulteriore fattore di sicurezza pari a 5, che fornisce un limite di 0,08 W/kg per il SAR medio sul corpo intero

Caratteristiche dell'esposizione	Intervallo di frequenza	Densità di corrente per la testa ed il tronco (mA/m ²)(rms)	SAR mediato sul corpo intero (W/kg)	SAR localizzato (testa e tronco)	SAR localizzato (arti)
Esposizione professionale	fino a 1 Hz	40	-	-	-
	1-4 Hz	40/f	-	-	-
	4 Hz-1 kHz	10	-	-	-
	1-100 kHz	f/100	-	-	-
	100 kHz-10 MHz	f/100	0,4	10	20
	10 MHz-10 GHz	-	0,4	10	20
Esposizione del pubblico	fino a 1 Hz	8	-	-	-
	1-4 Hz	8/f	-	-	-
	4 Hz-1 kHz	2	-	-	-
	1-100 kHz	f/500	-	-	-
	100 kHz-10 MHz	f/500	0,08	2	4
	10 MHz-10 GHz	-	0,08	2	4

Tab. 2.1 Valori tipici del SAR in funzione della frequenza

Intervallo di frequenza	Intensità del campo elettrico (V/m)	Intensità del campo magnetico (A/m)	Induzione magnetica (μT)	Densità di potenza dell'onda piana equivalente S _{eq} (W/m ²)
fino a 1 Hz	-	1,63 x 10 ⁵	2 x 10 ⁵	-
1-8 Hz	20.000	1,63 x 10 ⁵ /f ²	2 x 10 ⁵ /f ²	-
8-25 Hz	20.000	2 x 10 ⁴ /f	2,5 x 10 ⁴ /f	-
0,025-0,82 kHz	500/f	20/f	25/f	-
0,82-65 kHz	610	24,4	30,7	-
0,065-1 MHz	610	1,6/f	2,0/f	-
1-10 MHz	610/f	1,6/f	2,0/f	-
10-400 MHz	61	0,16	0,2	10
400-2000 MHz	3f ^{1/2}	0,008f ^{1/2}	0,01f ^{1/2}	f/40
2-300 GHz	137	0,36	0,45	50

Tab.2.2 Limiti per l'esposizione professionale

Intervallo di frequenza	Intensità del campo elettrico (V/m)	Intensità del campo magnetico (A/m)	Induzione magnetica (μT)	Densità di potenza dell'onda piana equivalente S _{eq} (W/m ²)
fino a 1 Hz	-	3,2 x 10 ⁴	4 x 10 ⁴	-
1-8 Hz	10.000	3,2 x 10 ⁴ /f ²	4 x 10 ⁴ /f ²	-
8-25 Hz	10.000	4.000/f	5.000/f	-
0,025-0,8 kHz	250/f	4/f	5/f	-
0,8-3 kHz	250/f	5	6,25	-
3-150 kHz	87	5	6,25	-
0,15-1 MHz	87	0,73/f	0,92/f	-
1-10 MHz	87/f ^{1/2}	0,73/f	0,92/f	-
10-400 MHz	28	0,073	0,092	2
400-2000 MHz	1,375f ^{1/2}	0,0037f ^{1/2}	0,0046f ^{1/2}	f/200
2-300 GHz	61	0,16	0,20	10

Tab.2.3 Limiti per l'esposizione al pubblico

I livelli di riferimento risultano dipendenti dalla frequenza, in virtù del fatto che sia gli effetti biologici, sia l'accoppiamento campo-corpo lo sono. Per lo studio dei modelli per il campo magnetico, si è assunto che il corpo abbia una conducibilità omogenea ed isotropa. Sono stati previsti inoltre semplici circuiti circolari per stimare le correnti indotte nei diversi organi e nelle diverse regioni del corpo. La formulazione deriva dalla legge di induzione di Faraday:

$$J = \pi R f \sigma B \tag{2.2}$$

Dove R è il raggio della spira considerata per l'induzione della corrente.

Uno studio dettagliato del 1994 [15], basato su rigorosi modelli anatomici, indica valori massimi della densità di corrente che superano 2 A/m² nel caso di un campo di 100 μT a 50 Hz. Tuttavia, la distribuzione spaziale delle correnti e dei campi indotti risulta significativamente influenzata dalla presenza di cellule biologiche. Ciò comporta un distanziamento dei risultati effettivi rispetto alle analisi semplificate [15].

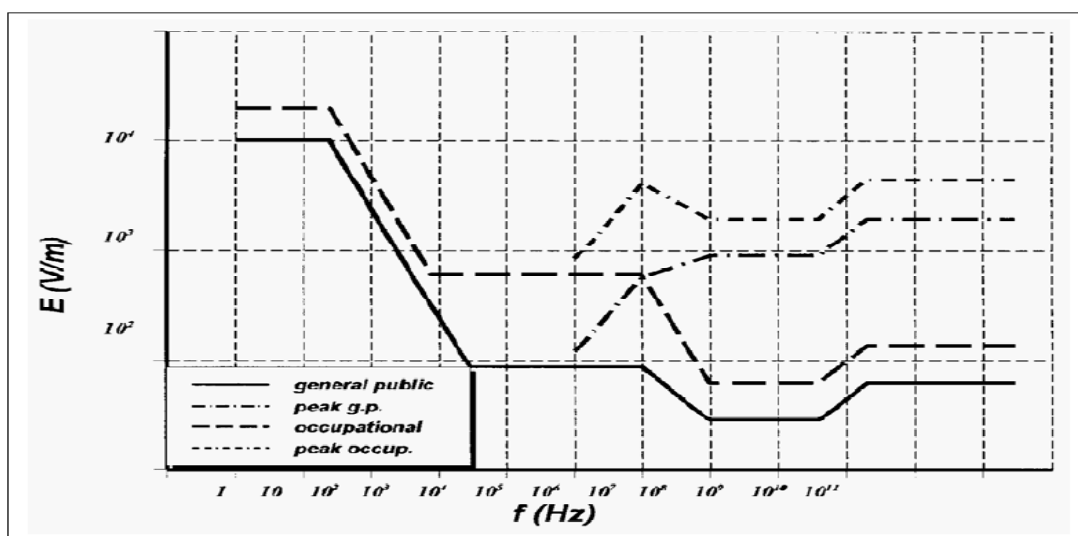


Fig. 2.1 Livelli di riferimento per l'esposizione a campi elettrici variabili nel tempo

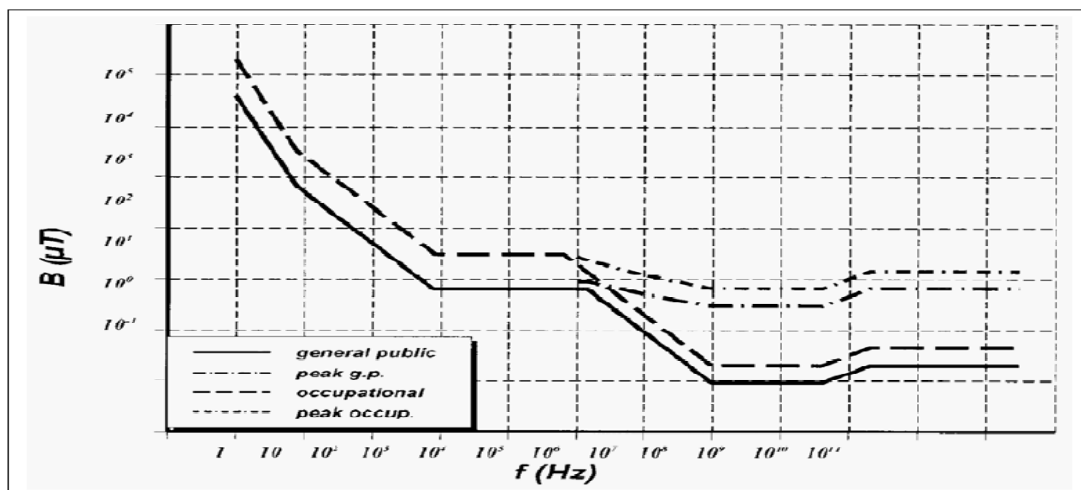


Fig. 2.2 Livelli di riferimento per l'esposizione a campi magnetici variabili nel tempo

I modelli riguardanti il campo elettrico risultano influenzati in base alla taglia, alla forma e alla posizione del corpo esposto al campo. Ciò comporta che la densità di carica superficiale può variare notevolmente, dando luogo a risultati molto diversi rispetto agli studi semplificati.

I livelli di riferimento per l'esposizione della popolazione sono stati ottenuti da quelli per l'esposizione professionale. In generale, tali fattori, accompagnano i limiti base su tutto l'intervallo di frequenza e il loro valore corrisponde a ben definite relazioni matematiche fra limiti di base e livelli di riferimento derivati.

Per quanto riguarda le frequenze comprese fra i 10 MHz e i 10 GHz, i livelli di riferimento per l'esposizione della popolazione a campi elettrici e magnetici sono inferiori di un fattore 2,2 rispetto a quelli stabiliti per l'esposizione professionale.

Tale fattore, risulta essere la radice quadrata di 5, numero che costituisce il fattore di sicurezza tra i limiti di base per l'esposizione professionale e quella per la popolazione. La radice quadrata viene introdotta per collegare le grandezze "intensità del campo" e "densità di potenza".

Capitolo 3

Il processo di riscaldamento mediante forno a microonde

3.1 Funzionamento generale di un forno

Il forno a microonde è, nella sua forma più semplice, un contenitore in metallo con delle aperture attraverso le quali l'energia elettromagnetica viene immessa all'interno di esso

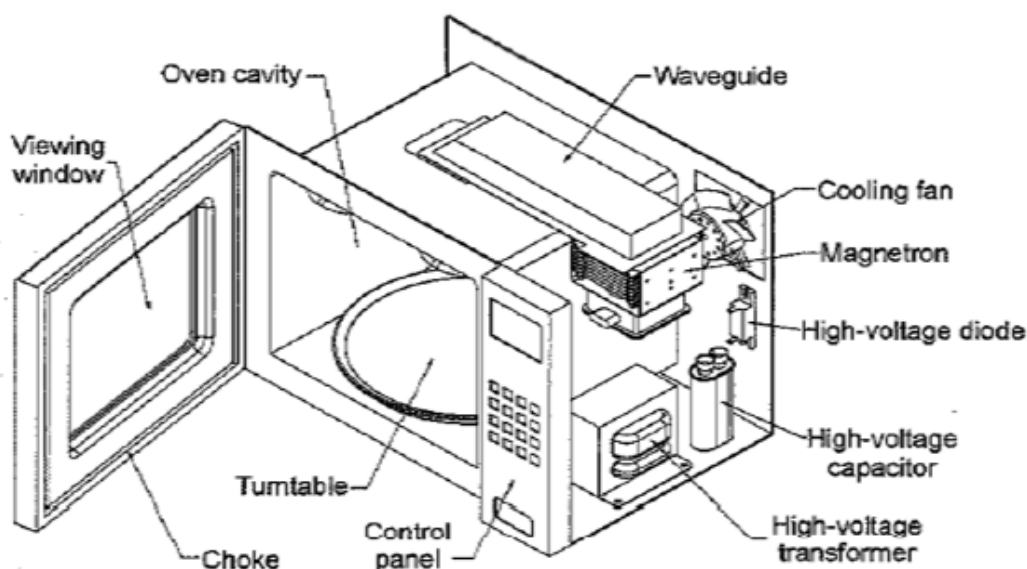


Fig. 3.1 I principali componenti di un forno a microonde

Le microonde vengono trasmesse all'interno della cavità mediante guide d'onda. Le guide d'onda sono principalmente condotti metallici cavi, di sezione rettangolare.

Le dimensioni delle guide d'onda sono dettate dalla frequenza di lavoro del sistema, nella maggior parte dei casi 2.45 GHz. Le guide d'onda vengono saldate oppure fissate alla cavità del forno in modo da prevenire la dispersione delle microonde all'esterno del sistema.

Generalmente esse trasmettono l'energia in cavità attraverso un unico foro, una serie di fessure, oppure una combinazione di entrambi. In funzione dell'utilizzo del forno, le guide d'onda possono trasmettere energia in cavità attraverso le pareti superiore, inferiore o laterali del forno.

La cavità del forno deve disporre di una porta in modo tale che il cibo possa essere introdotto all'interno del forno ed estratto una volta ultimato il processo di riscaldamento. La porta costituisce una delle parti più complesse del forno. Generalmente la porta possiede una finestra trasparente che permette di vedere all'interno e che contemporaneamente respinge il passaggio delle microonde verso l'esterno della cavità. Quando la porta è chiusa, le microonde che inevitabilmente fuoriescono dalla cavità, non devono superare i valori limite di sicurezza per la salute dell'uomo.

Ci sono due metodi principali per realizzare una porta con serratura che limita la fuoriuscita di microonde: sigillatura per contatto oppure blocco.

La sigillatura per contatto, come suggerito dal nome stesso, consiste nel contatto metallico tra la porta ed il forno. Per mantenere le microonde all'interno dell'apparecchiatura, è necessario estendere l'area di contatto tra la porta e i bordi della cavità. Quando il forno è pulito i livelli di fuoriuscita di microonde sono trascurabili, tuttavia le inevitabili dispersioni di cibo e grasso all'interno del forno durante il normale utilizzo, rappresentano una delle principali cause di degrado per la sigillatura della cavità.

La sigillatura con blocco prevede una fessura avente dimensione pari ad un quarto d'onda, in corrispondenza del perimetro della porta. La dimensione geometrica del blocco crea un percorso ad alta impedenza per le microonde che tentano di fuoriuscire. Quando le microonde si propagano verso la fessura di blocco, esse vengono semplicemente riflesse all'interno della cavità. La fessura di blocco viene generalmente coperta o riempita di materiale dielettrico al fine di prevenire contaminazione dagli alimenti. Le fessure di blocco, rispetto alla sigillatura per contatto, tollerano meglio le imprecisioni costruttive e gli scostamenti tra la porta e la cavità senza rilevare apprezzabili aumenti di dispersione delle microonde.

La sorgente di microonde che attualmente viene maggiormente utilizzata è il magnetron, un dispositivo cavo con il vuoto al suo interno. Il nucleo del magnetron è costituito da una cavità risonante dove una tensione DC viene convertita in microonde a 2.45 GHz. Le microonde vengono irradiate dall'antenna posta nella parte superiore del magnetron. L'antenna risiede all'interno della guida d'onda, la quale direziona le microonde in cavità.

Poiché all'interno della cavità risonante di un forno a microonde si generano campi stazionari, al fine di aumentare l'uniformità del riscaldamento si adottano tecniche che favoriscono la formazione di diverse distribuzioni di campo durante il processo. A tal proposito si utilizzano il piatto rotante ed agitatori di campo, detti *stirrers*.

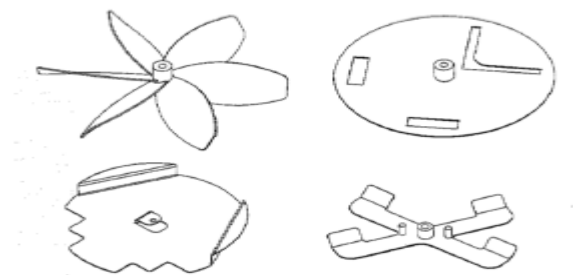


Fig. 3.2 Esempi di agitatori utilizzati nei forni

La tecnologia sopradescritta risulta essere la più diffusa in commercio, nonché attualmente l'unica. Sono in corso numerosi studi su una nuova tipologia di forni, non più dotati di magnetron per la generazione delle microonde, ma di generatori allo stato solido [16].

3.2 Processo di riscaldamento mediante microonde

Il principio di riscaldamento del carico prevede che quando un materiale dielettrico con perdite (categoria cui gli alimenti fanno parte) è soggetto a campo elettrico variabile, esso può sia immagazzinare energia (come un condensatore) sia convertire energia in calore come un resistore.

In base a tali caratteristiche, si identifica la *permittività relativa complessa*

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = |\varepsilon|e^{-j\delta} \quad (2.1)$$

La costante dielettrica relativa (ε') indica la capacità del materiale di immagazzinare energia elettrica. Il fattore di perdita dielettrica (ε'') indica invece la dissipazione di energia elettrica nel materiale.

La potenza elettromagnetica convertita in calore all'interno degli alimenti è perciò *direttamente* proporzionale al fattore di perdita dielettrica relativo.

Nella zona dello spettro elettromagnetico compresa fra 100 kHz e 100 GHz, i fattori dominanti nel determinare il valore di ε'' (specialmente negli alimenti) sono la conduzione elettrica e i meccanismi di polarizzazione.

-La polarizzazione elettronica comporta una deformazione elastica delle orbite elettroniche, in presenza di campo elettrico applicato. Di conseguenza, l'atomo si comporta come un dipolo orientato secondo il campo esterno, avendo momento proporzionale all'intensità del campo. La polarizzazione elastica aumenta allo stabilirsi del campo. Essa ha carattere oscillatorio, e la frequenza di tali oscillazioni è uguale alla frequenza propria dei legami elastici ($10^{14} - 10^{16}$ Hz).

-La polarizzazione ionica si presenta quando il legame molecolare, se non soggetto a campo, non dà luogo a configurazioni dipolari. In presenza di campo, in modo analogo alla situazione precedente, viene indotta la configurazione dipolare. Rispetto alla polarizzazione elettronica, la frequenza delle oscillazioni elastiche è di circa 10^{11} Hz.

-La polarizzazione dipolare (o per orientamento) si presenta nelle sostanze che, anche in assenza di campo esterno, presentano molecole in forma di dipoli. In assenza di campo, tali dipoli sono orientati in maniera casuale per effetto dell'agitazione termica, mentre sotto azione del campo, tendono a ruotare attorno al proprio asse ed ad orientarsi secondo campo. L'orientazione di tali molecole viene ostacolata dai movimenti di agitazione termica, perciò le condizioni di equilibrio molecole-dipolo non si dispongono uniformemente secondo il campo ma hanno solo una orientazione di preferenza.

Tale processo, che viene detto polarizzazione di rilassamento, ha un carattere aperiodico con costante di tempo dipendente dalla struttura del dielettrico e dalla temperatura.

La polarizzazione di volume si presenta in materiali non omogenei, con due o più componenti, uno dei quali contenenti macro-inclusioni conduttrici (per esempio, materiali umidi).

Sotto effetto del campo, gli ioni e gli elettroni liberi contenuti nelle inclusioni conduttrici si spostano all'interno di ciascuna inclusione, che assume un momento di bipolo. La disuniformità della struttura del materiale porta ad uno spostamento spaziale delle cariche all'interno

delle inclusioni, che si comportano in modo simile alle cariche legate. Come nella polarizzazione dipolare, anche in questo caso la presenza di moti di agitazione termica rende il processo di polarizzazione aperiodico.

Ogni meccanismo di polarizzazione varia in funzione della frequenza, ed è influenzato anche da temperatura, conducibilità elettrica e contenuto di umidità.

Alle frequenze delle microonde, i meccanismi dominanti che determinano le perdite di energia sono la conducibilità termica e l'oscillazione dipolare.

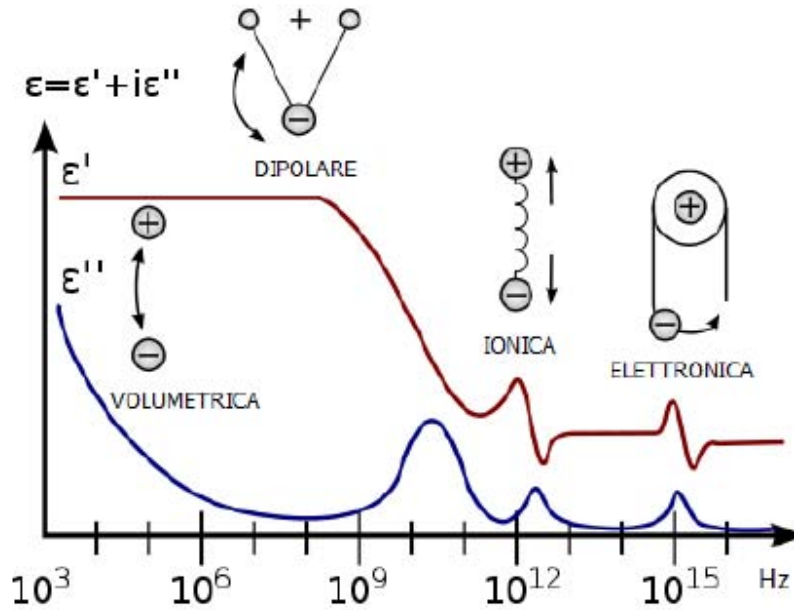


Fig. 3.3 Evoluzione delle componenti di ϵ in funzione della frequenza e della polarizzazione

Il valore del fattore di perdita dielettrico relativo (ϵ'') per alimenti ad alto contenuto d'acqua, considerato alle frequenze delle microonde, risulta essere composto dalla somma di due componenti:

$$\epsilon'' = \epsilon''_d + e''_\sigma = \epsilon''_d + \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0} \quad (2.2)$$

Dove il pedice d indica il contributo dato dall'oscillazione dipolare mentre σ indica il contributo fornito dalla conduzione elettrica.

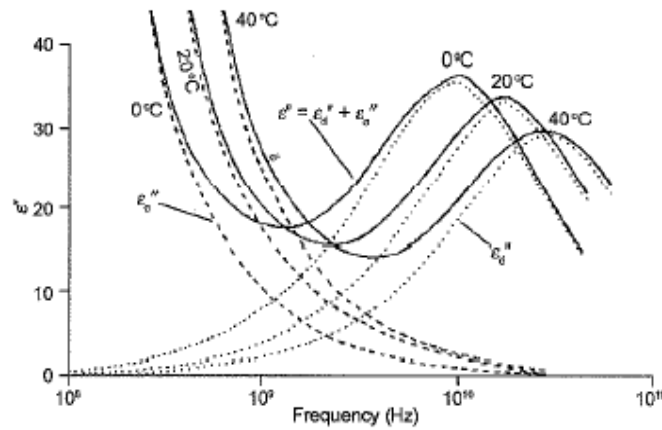


Fig. 3.4 Influenza della conducibilità elettrica e dell'oscillazione dipolare sul fattore di perdita dielettrico relativo

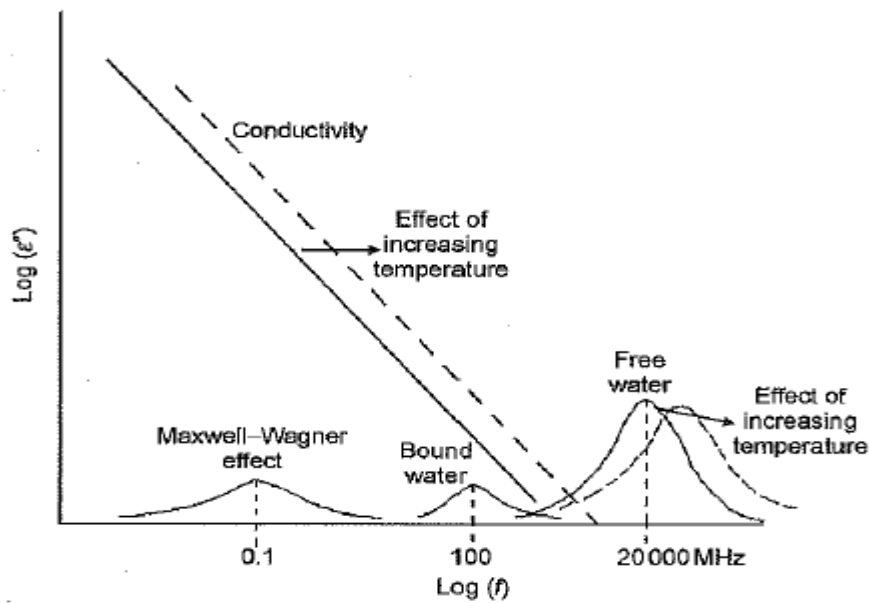


Fig. 3.5 Contributo dei meccanismi di polarizzazione sul fattore di perdita dielettrico relativo

Sia il fattore di perdita dielettrico relativo che la costante dielettrica relativa sono pesantemente influenzati dal contenuto di umidità, dal contenuto di sale, e dalla geometria dell'oggetto. La densità di potenza Q (W/m^3) che viene convertita in calore all'interno del carico in riscaldamento, risulta pari a:

$$Q = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2 \tag{2.3}$$

La densità di potenza viene influenzata anche dalla costante dielettrica relativa ϵ' : sebbene non sia presente nella formula, essa influenza la distribuzione del campo elettrico \mathbf{E} .

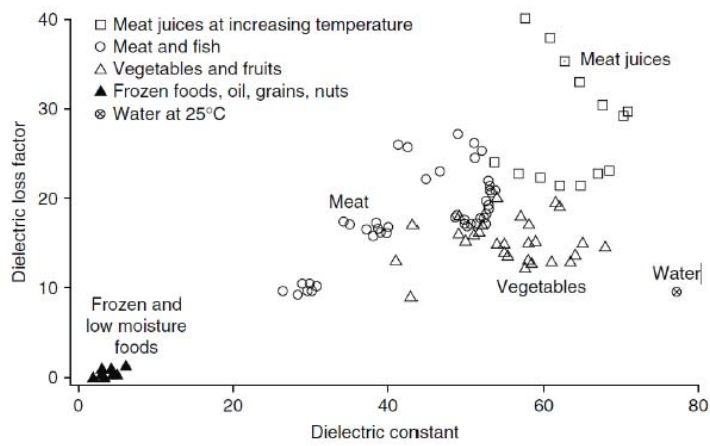


Fig. 3.6 Proprietà dielettriche delle categorie di alimenti più comuni

Capitolo 4

Procedura ed esecuzione delle misure

4.1 Metodologia delle misure

Per quanto visto dal capitolo 2, i limiti all'esposizione umana a campi elettromagnetici nella frequenza che interessa questa tesi, risultano chiari e ben definiti dalle linee guida ICNIRP (International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee).

La metodologia per testare gli apparecchi è ben esplicita da alcune norme CEI.

4.1.1 Strumentazione di misura

Secondo la norma CEI 211-7 [17], le misure vanno differenziate in due tipologie:

- Misure di esposizione, per valutare per le grandezze che caratterizzano il campo elettromagnetico cui l'organismo è esposto.
- Misure dosimetriche, per valutare l'energia assorbita dall'organismo umano esposto.

Per quanto riguarda le misure di esposizione nell'intervallo di frequenze 10 kHz – 300 GHz è necessario adottare varie tecniche e diversi strumenti di misura: la scelta del metodo e degli strumenti dipende dalla frequenza e dalle caratteristiche del campo (vicino o lontano).

Per frequenze sopra i 300 MHz, e per misure eseguite in campo lontano, usualmente la grandezza più significativa adottata come un indicatore dell'esposizione è spesso la densità di potenza. Tuttavia è difficile determinare direttamente questo parametro, eccetto nei casi di stazionarietà, di componente singola, di campi ad onda piana di polarizzazione nota. Infatti, non esistono strumenti che misurino direttamente la densità di potenza: essi generalmente misurano una o più componenti della intensità di campo elettrico, o di campo magnetico, o entrambe, e poi possono ricavare la densità di potenza tramite la relazione dell'onda piana (1.28).

In campo vicino e dove sono presenti interferenze, riflessioni o sorgenti multiple, la configurazione di campo può essere estremamente complessa e si devono misurare separatamente E ed H e calcolare la densità di potenza dell'onda piana equivalente.

A riguardo della strumentazione per la misura delle emissioni nel campo di frequenze di interesse, si suddividono in due categorie:

- misuratori diretti dei parametri del campo E o H ;
- misuratori della temperatura (per valutare la formulazione del SAR in relazione della sovratemperatura).

I componenti di base di uno strumento sono

- la sonda, costituita dal sensore e dal trasduttore e deve rispettare alcune condizioni, quali rispondere ad un solo parametro e non rispondere in modo significativo a componenti spurie; avere comportamento noto in funzione delle variazioni dei parametri ambientali; avere un'incertezza nota rispetto alla misura effettuata.
- i cavi di collegamento che trasferiscono il segnale dal trasduttore all'unità di lettura e elaborazione dei dati; essi non devono perturbare in modo significativo il campo presente sul sensore e non accoppiarsi all'energia proveniente dal campo.
- l'unità di lettura ed elaborazione.

Le misure di esposizione ai campi sono normalmente eseguite nel dominio della frequenza. In base alle caratteristiche del campo, le misure possono essere classificate in due categorie:

- A banda larga (*broadband*): tali misure vengono eseguite con l'impiego di strumenti che, entro un certo intervallo di frequenza, hanno una sensibilità pressoché indipendente dalla frequenza stessa e forniscono il valore globale del campo elettrico o magnetico nell'intervallo considerato. La larghezza di banda deve essere abbastanza ampia da consentire la misura di tutte le frequenze rilevanti;
- A banda stretta (*narrowband*): tali misure, dette anche selettive, vengono eseguite con l'impiego di strumenti che hanno la possibilità di essere sintonizzati su una frequenza selezionata e che forniscono l'intensità del campo corrispondentemente alla stessa. La banda di frequenze deve essere abbastanza stretta per consentire la misura accurata delle singole componenti alle diverse frequenze.

Ai fini di questa tesi, non viene analizzata la strumentazione a banda stretta.

Strumenti a banda larga

Questo tipo di strumentazione è costituito dai seguenti elementi fondamentali:

- Il sensore, che risponde o all'intensità del campo elettrico E (dipolo) o all'intensità del campo magnetico H (spira);
- Il trasduttore che trasforma la risposta del sensore in un segnale proporzionale a E (o a E^2) o ad H (o H^2) o alla temperatura;
- Il cavo dei collegamento;
- Il circuito di processamento e lettura, il quale dà la risposta o in termini di intensità di campo elettrico E (V/m) o d'intensità di campo magnetico H (A/m) o di densità di potenza S (W/m²).



Fig. 4.1 Esempio di strumentazione a banda larga

Caratteristiche dei sensori

Gli strumenti a banda larga possono misurare o una componente del campo o la somma di tutte le componenti. Nel primo caso è presente un singolo sensore che rivela soltanto una componente del campo e lo strumento è di tipo non isotropico.

Nel secondo caso un insieme di più sensori può essere utilizzato in una opportuna configurazione così da tenere conto delle componenti spaziali del campo e rendere la misura indipendente dalla polarizzazione e dalla direzione del campo incidente. Questi strumenti sono di tipo isotropico.

- **Sensori non isotropici:** Gli strumenti non isotropici danno informazioni sulla intensità del campo in funzione della direzione di orientamento del sensore. Nel caso di campi polarizzati linearmente è possibile ottenere il valore massimo del campo orientando il sensore in accordo con la direzione di polarizzazione. Nel caso di campi che non sono polarizzati linearmente, il valore indicato dallo strumento cambia nel tempo poiché varia la direzione del campo rispetto all'orientamento del sensore; tale valore è sempre inferiore al valore efficace del campo. Poiché l'interesse generale è quello di avere il valore del campo totale massimo presente in un punto, con gli strumenti non isotropici si deve effettuare la misura in tre direzioni ortogonali. Questa operazione può comportare errori per la non contemporaneità delle tre misure. Tali strumenti permettono però di misurare le singole componenti del campo e di determinarne la direzione.
- **Gli strumenti isotropici** hanno tre sensori disposti nelle tre direzioni ortogonali dello spazio, così da poter essere usati in una qualsiasi orientazione. Questi strumenti generalmente misurano nel punto in esame la risultante dell'intensità del campo (elettrico o magnetico) come radice quadrata della somma dei quadrati delle componenti del campo nelle tre direzioni x, y e z dello spazio, senza considerare le singole fasi delle stesse:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (4.1)$$

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} \quad (4.2)$$

Le sonde isotropiche di campo elettrico sono sostanzialmente costituite da tre schiere di elementi rivelatori, costituiti da termocoppie o da dipoli corti (centrati su diodi ad alta impedenza), sensibili all'intensità del campo elettrico, disposti su tre rami di supporto reciprocamente ortogonali.

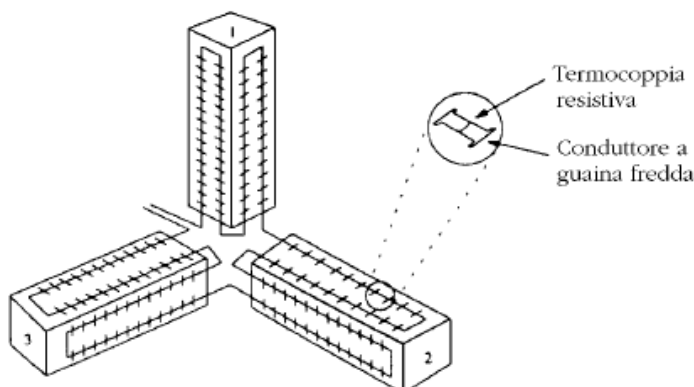


Fig. 4.2 Costruzione interna di una sonda isotropica

I tre rami forniscono all'uscita una tensione continua proporzionale al quadrato del campo elettrico, in valore efficace, ricevuto singolarmente da ogni schiera, se il sensore è di tipo mono assiale, ovvero tre tensioni distinte se di tipo triassiale.

Le tre tensioni confluiscono, infine, in un sommatore determinando come unica uscita, una tensione proporzionale al quadrato del modulo del campo, in valore efficace, presente nel volume di spazio occupato dalla sonda. La risoluzione spaziale della misura è determinata dal cubo che ha come lato la dimensione di ogni ramo ortogonale.

La linearità in frequenza della risposta su frazioni diverse della banda di funzionamento può essere ottimizzata attraverso le curve di tarature normalmente fornite a corredo dello strumento.

Le sonde isotropiche di campo magnetico sono basate sullo stesso principio di funzionamento, ma i tre rami sono costituiti da spire chiuse su diodi ad alta impedenza.

In base alle prescrizioni normative e alle disponibilità fisiche, è stato utilizzato un Narda PMM8053 insieme alla sonda per la misura di campo elettrico EP 330



Fig. 4.3 Lo strumento utilizzato per le misure Narda PMM 8053, con sonda EP-330

SONDA DI CAMPO ELETTRICO **EP-330**

Campo di frequenza	100 kHz - 3 GHz
Portata	0,3 - 300 V/m
Sovraccarico	> 600 V/m
Dinamica	> 60 dB
Risoluzione	0.01 V/m
Sensibilità	0.3 V/m
Errore assoluto @ 50 MHz e 20 V/m	± 0,8 dB
Piattezza (10 - 300 MHz)	± 0.5 dB
Piattezza (3 MHz - 3 GHz)	± 1.5 dB
Isotropicità	± 0.8 dB (Tipico ± 0.5 dB @ 930 e 1800 MHz)
Reiezione campo magnetico	> 20 dB
Errore in temperatura	20°C ÷ 60°C = ± 0.1 dB 0°C ÷ 20°C = - 0.05 dB/°C -20°C ÷ 0°C = - 0.15 dB/°C
Calibrazione	E ² PROM interna
Dimensioni	317 mm lunghezza, 58 mm diametro
Peso	100 g

Tab 4.1 Specifiche tecniche della sonda EP-330

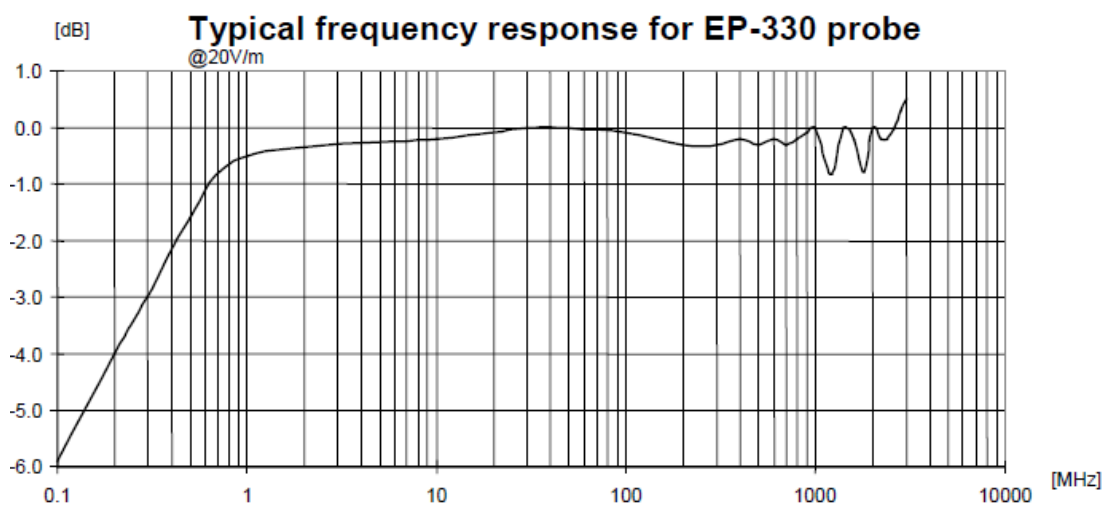


Fig. 4.4 Risposta in frequenza della sonda

Lo strumento è stato poi collegato tramite porta seriale RS-232 ad un personal computer, dotato dell'apposito programma per acquisire i dati.

4.2 Metodologia di esecuzione dei test

In base alla norma CEI 62233 [18], a riguardo la misura dell'intensità del campo elettrico:

5.1 Campi elettrici

È allo studio il metodo di misurazione.

Se gli apparecchi, con il loro trasformatore o circuito elettronico interno, funzionano solamente a tensioni inferiori a 1 000 V, si ritiene che siano conformi senza necessità di prova.

I metodi di misura specificati sono validi da 10 Hz a 400 kHz. Nella gamma di frequenza al di sopra di 400 kHz e al di sotto di 10 Hz, gli apparecchi che rientrano nel campo di applicazione della presente Norma sono considerati essere conformi senza prova, salvo menzione contraria specificata nella serie di norme IEC 60335.

Quindi, in base alla Norma CEI 60335 [19]:

32 Radiazione, tossicità e pericoli analoghi

Gli apparecchi non devono emettere radiazioni pericolose, né essere tossici o presentare pericoli simili in seguito al loro funzionamento in condizioni di uso normale.

La conformità si verifica per mezzo dei limiti o delle prove specificati nella Parte 2. Tuttavia, se la Parte 2 non specifica limiti né prove, l'apparecchio deve allora risultare conforme alla prescrizione senza essere sottoposto a prova.

In base alla parte 2 [18]:

A.103 Dispersione di microonde

Si alimenta il forno a microonde alla tensione nominale e lo si fa funzionare con il dispositivo di potenza a microonde sulla sua regolazione massima. La densità di flusso dell'energia della dispersione delle microonde si misura in ciascun punto a circa 50 mm dalla superficie esterna dell'apparecchio. Si deve utilizzare un carico adeguato. Lo strumento di misura viene spostato lungo la superficie esterna del forno e si misura la dispersione di microonde.

La dispersione di microonde non deve superare i 50 W/m².

Tale norma fa riferimento ad un carico ben definito [20]:

funzionamento normale

funzionamento dell'apparecchio con 1 000 g ± 50 g di acqua potabile a una temperatura iniziale pari a 20 °C ± 2 °C in un recipiente di vetro borosilicato cilindrico con spessore massimo di 3 mm e con diametro esterno di circa 190 mm. Il recipiente viene collocato al centro del ripiano.

Tale norma risulta in vigore anche per i microonde combinati.

Secondo invece la normativa CEI EN 60335-2-90 [21], riguardante i forni a microonde per uso collettivo:

La conformità per la dispersione di microonde si verifica con la prova seguente.

Un carico di 275 g ± 15 g di acqua potabile ad una temperatura di 20 °C ± 2 °C, posto in un recipiente di vetro borosilicato dalle pareti sottili e con un diametro interno di circa 85 mm, è collocato al centro del ripiano. L'apparecchio è alimentato alla tensione nominale e fatto funzionare con il dispositivo di comando di potenza delle microonde regolato sulla posizione massima.

La dispersione di microonde è determinata misurando la densità del flusso delle microonde per mezzo di uno strumento che raggiunge il 90% del suo stato di regime in 2 s o 3 s quando è sottoposto a un segnale di entrata a gradini. L'antenna dello strumento viene spostata sulla superficie esterna dell'apparecchio per localizzare la dispersione massima di microonde; si deve prestare particolare attenzione alla porta e alle guarnizioni.

La dispersione di microonde in qualsiasi punto a 50 mm o più dalla superficie esterna dell'apparecchio non deve superare 50 W/m².

In ambo le formulazioni, vengono dati i riferimenti a riguardo la distanza cui eseguire le prove (“da 50 mm o più dalla superficie esterna”) ma non un punti esatti in cui eseguire tali misure. In letteratura, è possibile ricavare informazioni sul posizionamento degli strumenti, anche se i risultati non sono univoci.

Infatti, in uno studio del 2001 [22], alcuni autori hanno scelto 15 punti nell'intorno del forno, andando perciò a considerare l'intera superficie della macchina da testare. Altri [23], hanno selezionato un maggior numero di punti, ma posizionati solamente nella parte frontale del forno.

In tale studi, non sono presenti riferimenti geometrici sul posizionamento esatto di tali punti di misura, né la metodologia di esecuzione dei test.

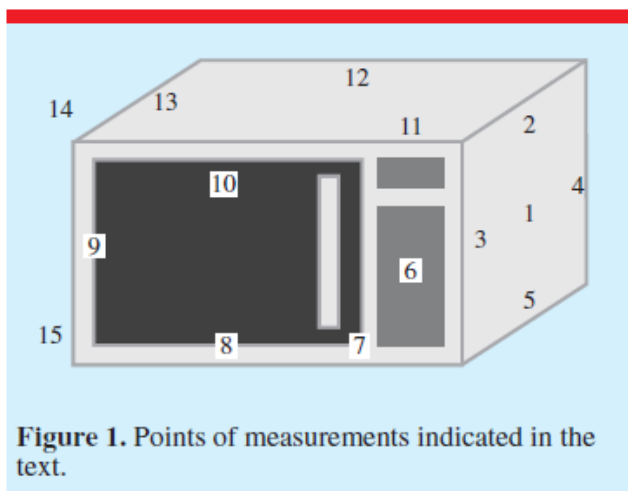


Fig. 4.5 Esempio di punti di misura

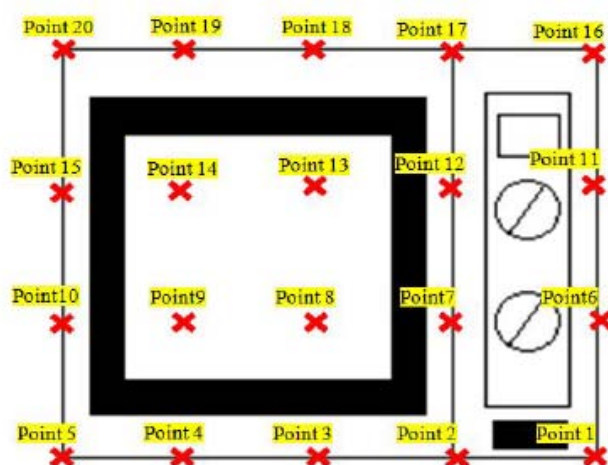


Fig. 4.6 Esempio alternativo di punti di misura

Ai fini di questa tesi, sono stati selezionati 25 punti intorno alla superficie frontale del forno, e tali punti sono stati scelti in base a criteri ripetibili:
 La superficie frontale di ogni forno è stata divisa idealmente in tre sezioni, sia verticalmente che orizzontalmente.

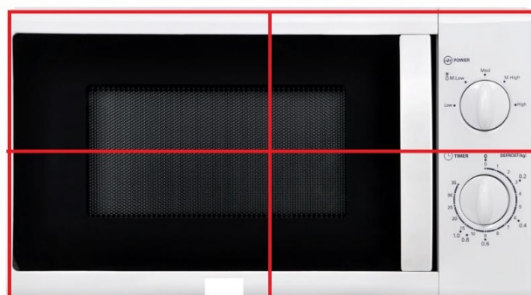


Fig. 4.7 Sezioni interne di misura del forno

In tal modo, dall'intersezione delle linee, sono stati individuati in maniera univoca 9 punti di misura, a ridosso dei bordi e del centro dei forni da testare.

Inoltre, sono state definite ulteriori sezioni di misura, poste nell'intorno del forno: sezione a sinistra, a destra, in basso e in alto. Tali zone, sono state individuate a 20 cm esatti dalla superficie di riferimento.

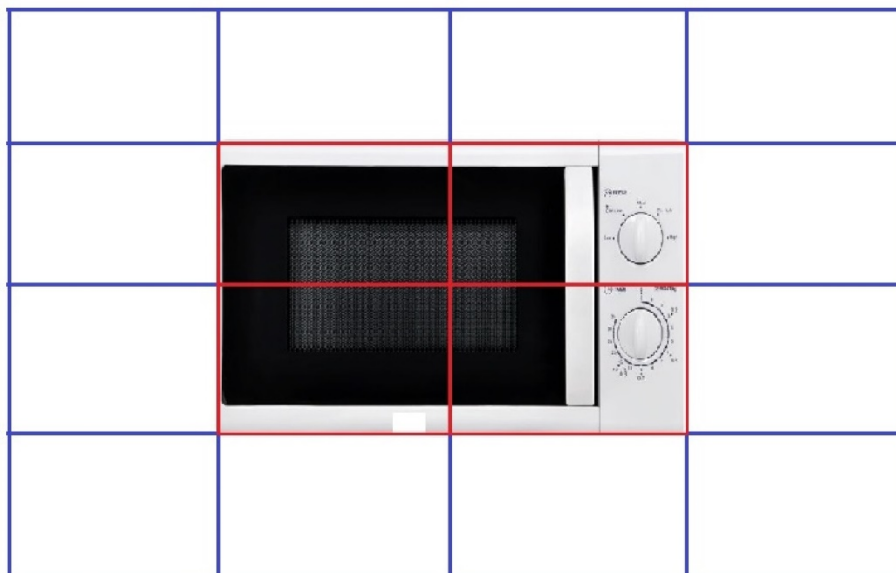


Fig 4.8 Sezioni interne ed esterne di misura del forno; individuazione dei 25 punti di misura

Quindi, un totale di 25 punti di misura, collocati geometricamente a ridosso del forno da testare e nell'intorno dello stesso. Tali punti sono tutti posizionati nella parte frontale. Questa scelta è stata preferita ad altre poichè l'utilizzatore medio della macchina opera in fronte ad essa e difficilmente dietro. Le sezioni di misura periferiche sono state scelte in modo da ovviare alla mancanza di misure laterali.

Definendo in maniera geometrica le sezioni, prendendo come riferimento l'immagine:

- Sezione AA: Parte alta, a 20 cm dalla superficie superiore del forno
- Sezione A: Bordo superiore
- Sezione C: Linea mediana
- Sezione B: Bordo inferiore
- Sezione BB: Parte bassa, a 20 cm dalla superficie inferiore del forno
-

Alla stessa maniera, prendendo come riferimento l'immagine

- Sezione SS: Parte posizionata all'estrema sinistra del forno, 20 cm dal bordo sinistro
- Sezione S: Parte posizionata sul bordo laterale sinistro
- Sezione C: Centro del forno
- Sezione D: Parte posizionata sul bordo laterale destro
- Sezione DD: Parte posizionata all'estrema destra del forno, 20 cm dal bordo destro.

La combinazione di queste 10 sezioni ha dato origine a 25 punti di misura.

Per poter trovare fisicamente tali punti di misura, e poter ripetere i test in maniera rigorosa, è stato necessario costruire un supporto alla strumentazione. L'idea di base prevedeva la costruzione di un sistema mobile, su due assi, sul quale poter fissare lo strumento di misura. In tal maniera, la posizione della sonda sarebbe rimasta fissa e non soggetta a singolarità dovute all'utilizzatore (per esempio, tremito delle mani, posizionamento dell'operatore non ottimale...). Inoltre, le prove si sarebbero potute ripetere mantenendo o riproponendo ad ogni singolo test, il setup desiderato.

L'idea si è poi concretizzata in tal maniera:

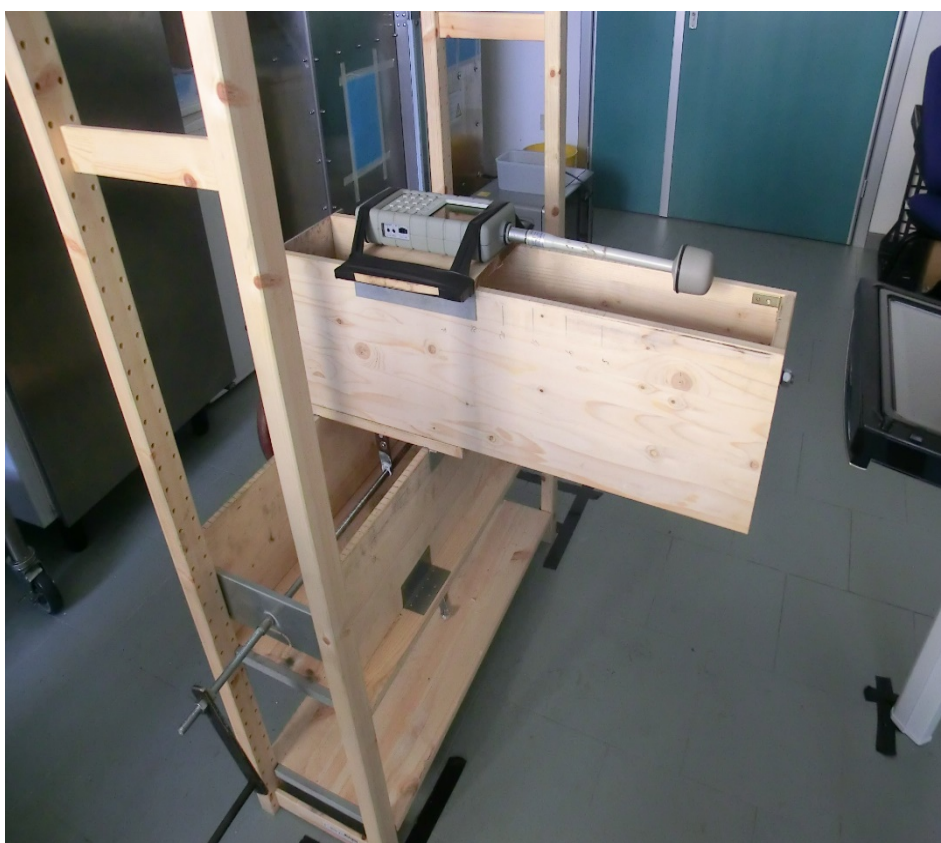


Fig. 4.9 Struttura utilizzata durante i processi di misura

L'asse mobile è costituito da un carrello in legno, dotato di guide di alluminio, che si muove su due supporti, atti a conferire il percorso e la stabilità al carrello. I due assi sono poi stati fissati esattamente a 90° fra loro.



Fig. 4.10 Particolare della struttura: incastro degli assi e carrello mobile

Per la movimentazione del carrello, si è utilizzato un sistema a doppio bullone, una vite senza fine M12 con passo di 1 mm, dei cuscinetti e delle maniglie. L'idea di movimentazione tramite motore DC è stata considerata e provata, ma si è ritenuto più performante e snella la movimentazione manuale. Infatti, due motori DC avrebbero reso il sistema pesante e difficoltoso da muovere lungo l'asse Z.

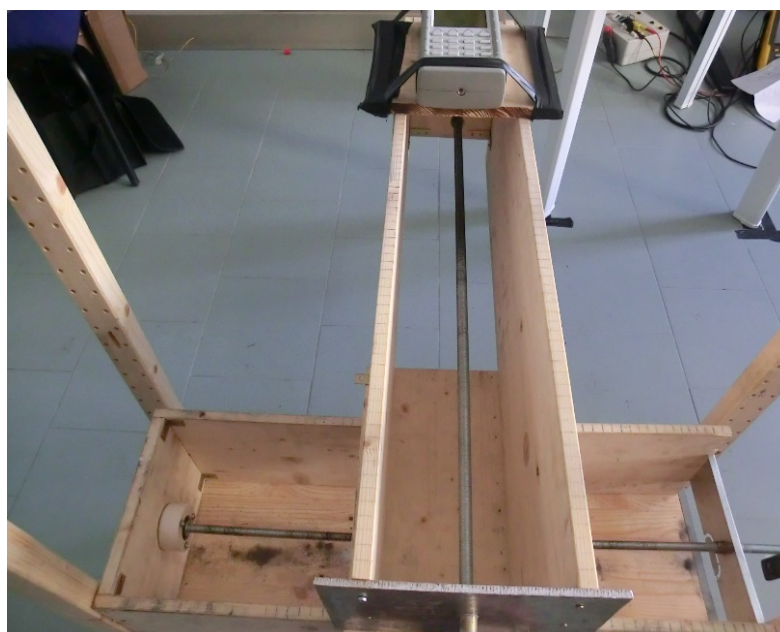


Fig. 4.10 Particolare della struttura: vite senza fine



Fig. 4.11 Particolare della struttura: Maniglie per la movimentazione

I 25 punti di misura perciò sono stati trovati in maniera esatta e ripetibile per ogni forno testato, adattando di volta in volta il setup della struttura lungo gli assi Y, Z e muovendo il misuratore lungo l'asse X di volta in volta, per raggiungere la distanza desiderata fra antenna e punto di misura del forno.



Fig. 4.12 Particolare della struttura: superficie divisa in zone di misura

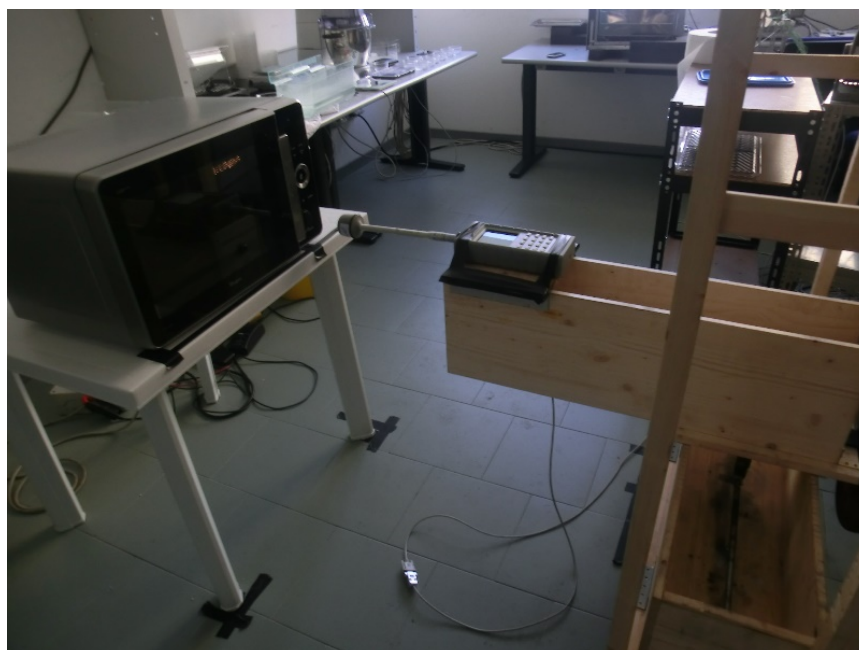
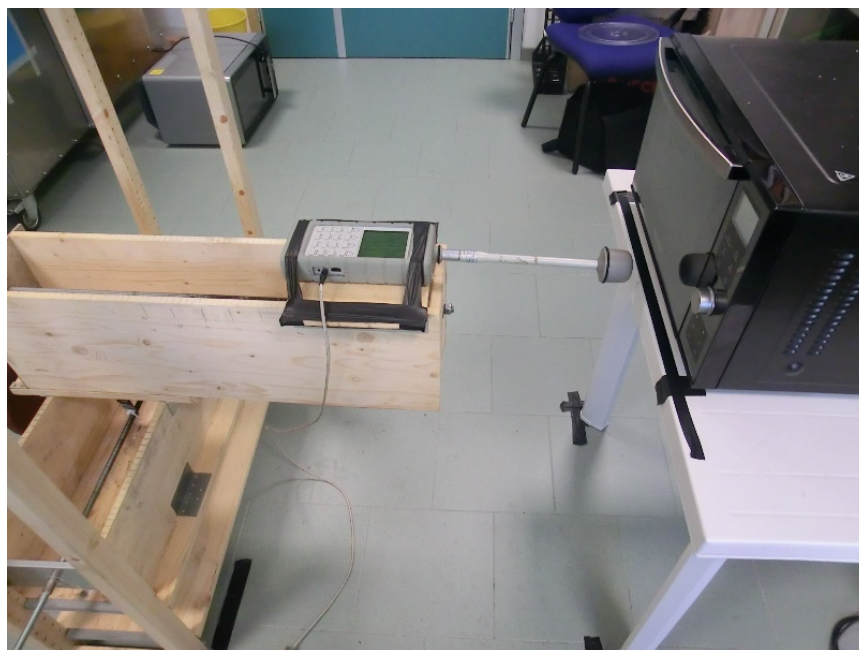


Fig. 4.13 Situazioni operative di misura

4.2.1 Definizione dei carichi

Dopo aver costruito la struttura, sono stati individuati i carichi da inserire nei forni durante i test. Secondo normativa, sono stati utilizzati carichi di circa 275 g di acqua e circa 1000 g di acqua, inseriti in contenitori normati. Inoltre, oltre ai test su tali carichi, sono stati effettuati test anche su carico diverso, inserito in contenitore non normato.

Carico A



Fig. 4.14 Carico A

Dimensioni:

Altezza: 125 mm

Diametro esterno: 90 mm

Capacità massima: 600 ml

Materiale: vetro borosilicato

Questo recipiente, conforme alla norma, è stato utilizzato per le prove riguardanti carico da $275\text{g} \pm 15\text{g}$.

Carico B

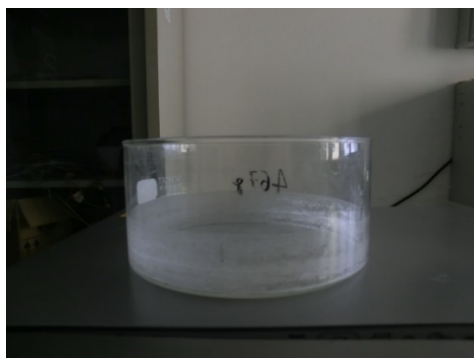


Fig. 4.15 Carico B

Dimensioni

Altezza: 90 mm
Diametro interno: 190mm
Capacità massima: 2000 ml
Materiale: Vetro Borosilicato

Questo recipiente, confacente alla norma, è stato utilizzato per le prove con carico di 1000 g \pm 50g.

Carico C



Fig. 4.16 Carico C

Dimensioni

Altezza: 75 mm
Diametro Esterno: 140 mm
Capacità massima: 900 ml
Materiale: Vetro Borosilicato

Questo recipiente non è normato ed è stato utilizzato con un carico equivalente di 350g \pm 10g.

4.2.2 Scelta dei forni

Dopo aver definito i punti di misura, e i carichi, sono stati scelti i forni.

Ai fini di questa tesi, sono stati testati tre forni, ognuno appartenente a segmenti di mercato differente.

Forno numero 1



Fig. 4.17 Forno 1

Forno molto economico, acquistabile nella grande distribuzione a circa 50 Euro.

- | | |
|--------------------------------|--------|
| - Potenza Microonde dichiarata | 700W |
| - Potenza Totale dichiarata | 1050W |
| - Volume interno dichiarato | 20 l |
| - Volume sfruttabile | 10 l |
| - Altezza | 258 mm |
| - Larghezza | 440 mm |
| - Profondità con porta chiusa | 326 mm |



Fig. 4.18 Particolare del forno 1: cavità

In base all'immagine precedente, è possibile notare la configurazione molto semplice di tale forno: guida d'onda semplice (non divisa) e piatto per la movimentazione del carico. Non è presente strumentazione elettronica atta ad azionare il forno secondo programmi prestabiliti.

Forno numero 2*Fig. 4.19 Forno 2*

Forno a microonde di fascia medio-alta; presente sul mercato al prezzo di 209 Euro circa.

- Potenza Microonde 1000W
- Potenza Grill 1000W
- Capacità interna 23 l
- Altezza 310 mm
- Larghezza 483 mm
- Profondità 396 mm

*Fig. 4.20 Particolare del forno 2: cavità*

Rispetto al forno 1 e al forno 3, questo prodotto utilizza una tecnologia leggermente differente: infatti, non è presente il piatto girevole atto a movimentare il carico (in modo da rendere quanto

più uniforme possibile il riscaldamento) ma, secondo la casa produttrice, una tecnologia proprietaria atta a compiere l'azione mediante l'utilizzo di un inverter.

Forno numero 3



Fig. 4.21 Forno 3

Forno a microonde di fascia alta, venduto come prodotto all-in-one per sostituire le metodologie di cottura classica; si trova in vendita a circa 300 Euro.

- Potenza Microonde dichiarata 1000W
- Potenza aria ventilata 1300W
- Potenza Grill 1000W
- Potenza Max dichiarata 2100W
- Capacità interna 30 l
- Altezza 333 mm
- Larghezza 548 mm
- Profondità 525 mm



Fig. 4.22 Particolare del forno 3: cavità

Così come per il forno 1, anche per questo forno le soluzioni sono tradizionali ma riportate alla fascia di prezzo. E' presente il piatto girevole per movimentare il carico, una ventola per muovere l'aria all'interno della cavità e la guida d'onda è divisa in due parti (visibili nell'immagine precedente in alto ed in basso, sulla sinistra). Inoltre, il forno è dotato di molti sensori atti a migliorare qualitativamente le performance di cottura.

4.3 Esecuzione dei test

Ogni forno è stato testato nei 25 punti di misura, quindi 25 prove con ogni carico, per un totale di 75 prove a forno. Inoltre, un forno è stato testato in condizioni di utilizzo non standard, al fine di avere un possibilità di confronto, portando il totale dei record a 250.

Le prove consistono in rilevazioni di intensità di campo elettrico (e quindi, anche di densità di potenza) in ogni punto di misura, con una distanza variabile (in funzione del tempo di record) compresa fra i 5 cm e i 30 cm. Tali distanze sono state individuate in base alla normativa ed in base all'esperienza: la distanza media di un utilizzatore di un forno a microonde per uso domestico è risultata essere solitamente nell'intorno dei 30 cm.

Lo strumento è stato posto per ogni prova sulla struttura di supporto, e il carrello mobile posto a 5 cm di distanza dal forno. Dopodichè, il forno è stato azionato e lo strumento mosso tramite carrellino mobile fino alla distanza di 30 cm dalla superficie di misura.

In base al passo della vite, tale distanza è stata ricoperta in circa 100 secondi. Inoltre, il passo di 1 mm ha reso possibile individuare l'esatto secondo (e quindi il valore di campo) in cui lo strumento veniva posto a 10, 15, 20, 25 cm dalla superficie.

Ogni record è stato poi graficato, tramite Microsoft Excel

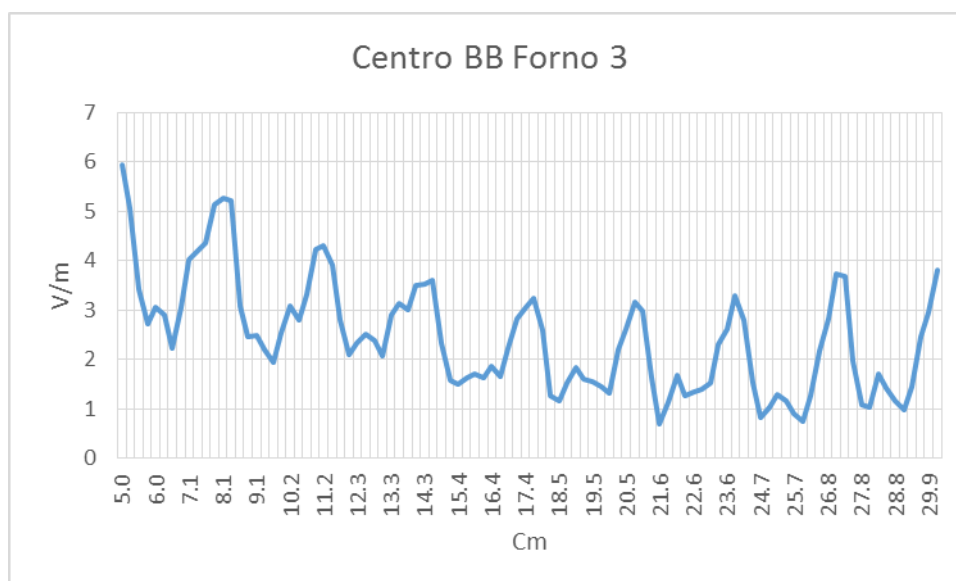


Fig. 4.23 Esempio di grafico di misura

Tuttavia, tale visualizzazione dei record offre una possibilità di analisi limitata. Ogni record è stato perciò poi sistemato in una tabella più ampia, atta a rendere maggiormente intuitiva l'elaborazione

SXSX	SX	C	DX	DXDX
0.95	1.95	3.13	3.43	1.29
2.32	1.99	3.18	3.47	1.73
1.9	1.99	3.4	3.76	1.59
1.74	1.95	3.3	3.97	1.53
1.65	1.96	3.25	4.24	1.3
1.41	1.98	3.11	4.12	1.18
1.33	1.98	2.94	3.53	1.03
1.51	2.08	3.02	3.01	0.84
1.69	2.11	3.19	2.72	0.88
1.67	2.15	3.34	2.47	1.17

Fig. 4.24 Esempio di record di misura (troncato)

Tale tabella racchiude 5 record ed è rappresentativa di una sezione orizzontale di misura (nel caso della figura, la sezione AA del forno 3). Perciò il grafico precedente può essere esteso a 5 sezioni di misura, e mostrare l'andamento nel tempo dell'intensità del campo elettrico.

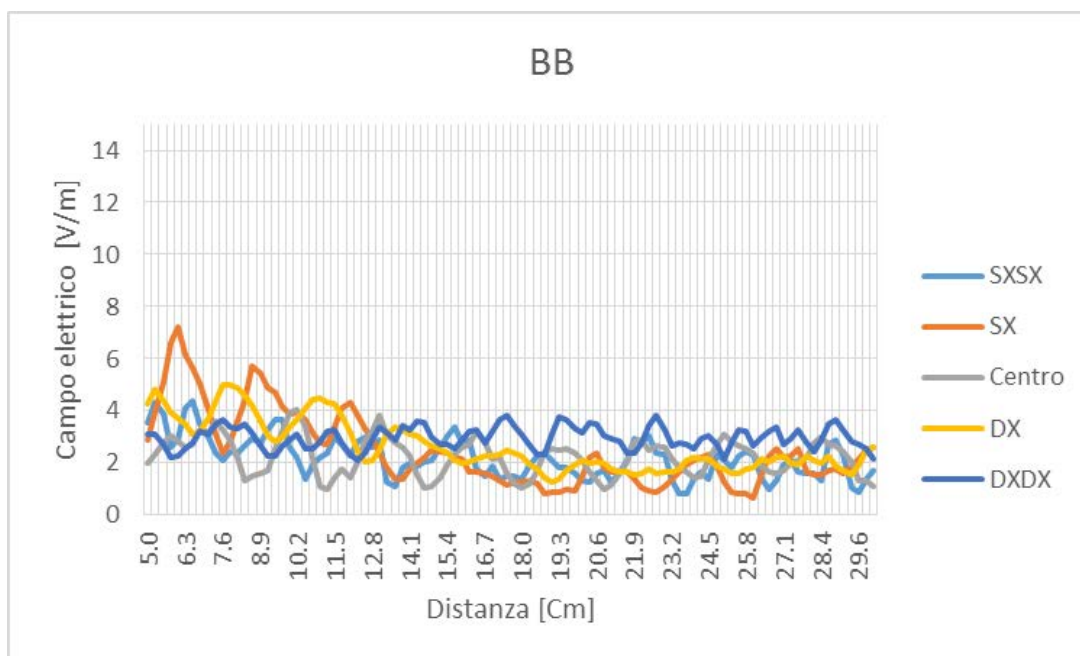


Fig. 4.25 Esempio di grafico d'intensità di campo elettrico, sezione BB forno 3

In asse X, sono presenti i secondi di misura; in asse Y i valori di intensità di campo elettrico.

Tale visualizzazione, pur se completa dal punto di vista informativo, risulta di difficile interpretazione spaziale. Perciò si è preferito utilizzare MatLab per graficare le distribuzioni spaziali dei record:

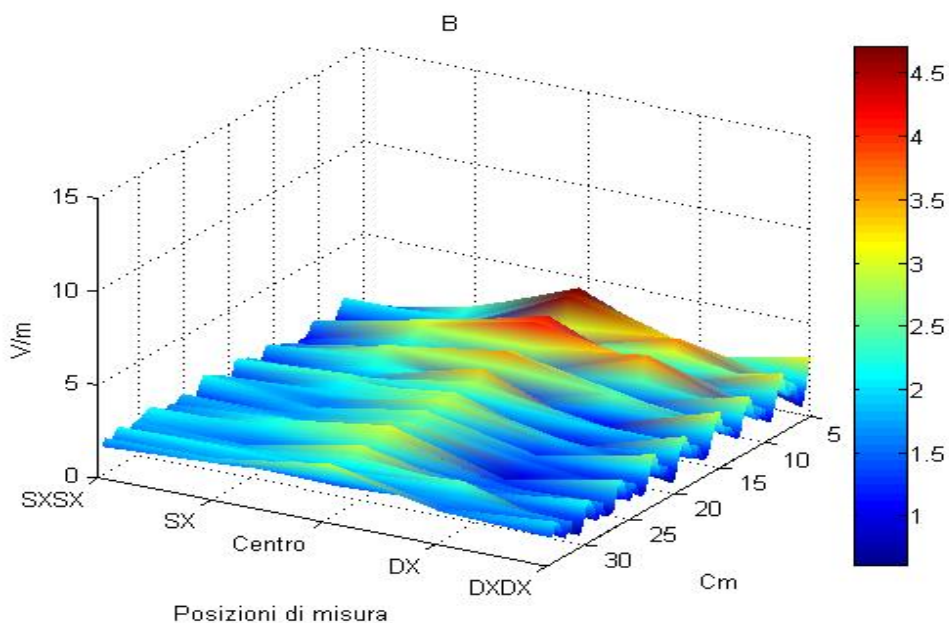


Fig 4.26 Distribuzione spaziale dell'intensità di campo elettrico

La figura precedente è ricavata dai medesimi dati che hanno prodotto la figura 4.25. Oltre che all'intensità di campo, si sono ricavati anche i valori di densità di potenza. Per ricavare tali informazioni, partendo dai valori di intensità di campo elettrico, si è utilizzata la relazione 1.28, come indicato secondo norma. Tali valori sono stati poi graficati in istogrammi. Le distribuzioni spaziali sono state rese ancora mediante l'utilizzo di MatLab.

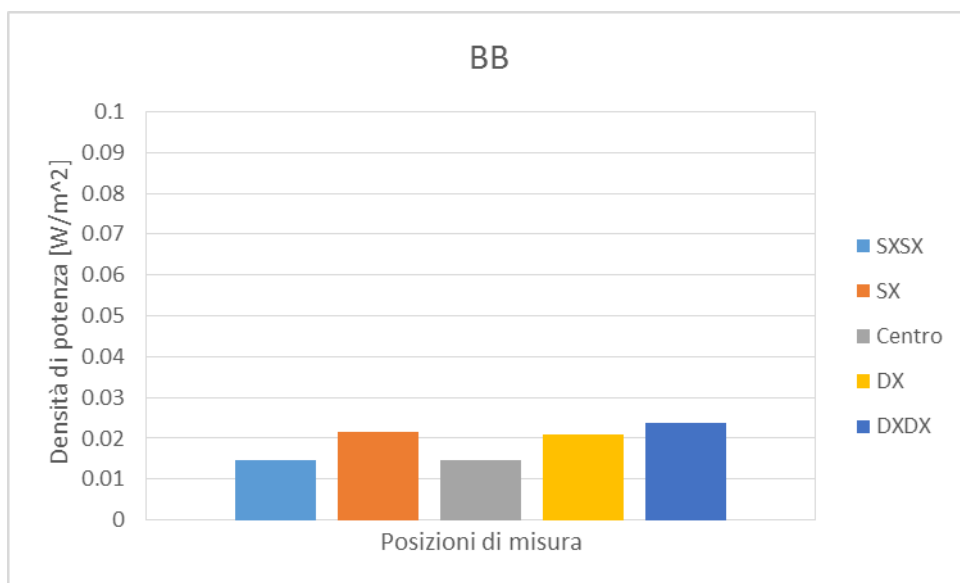


Fig. 4.27 Densità di potenza, sezione BB forno 3

Al fine di rendere maggiormente chiare le informazioni, sono state create delle schede di misura.

Forno 1	Carico A	Sezione BB
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

In questo scheda di misura esemplificativa, vengono indicati il forno testato, il carico e la sezione di misura. I quattro grafici rappresentano l'intensità di campo elettrico e la sua relativa disposizione spaziale; la densità di potenza e la relativa distribuzione spaziale.

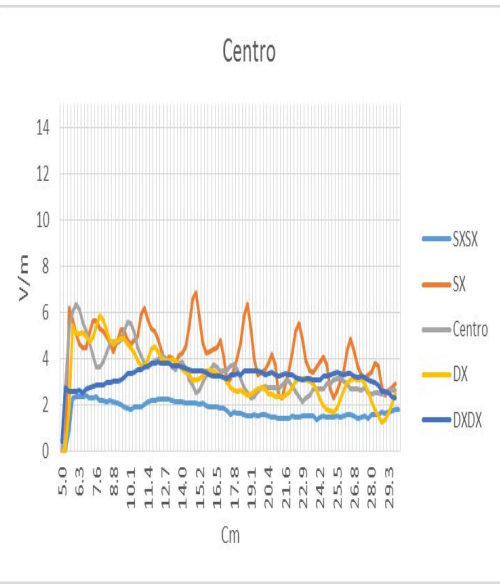
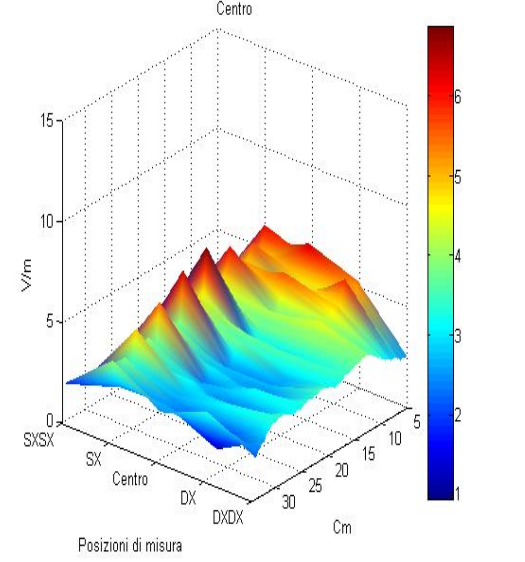
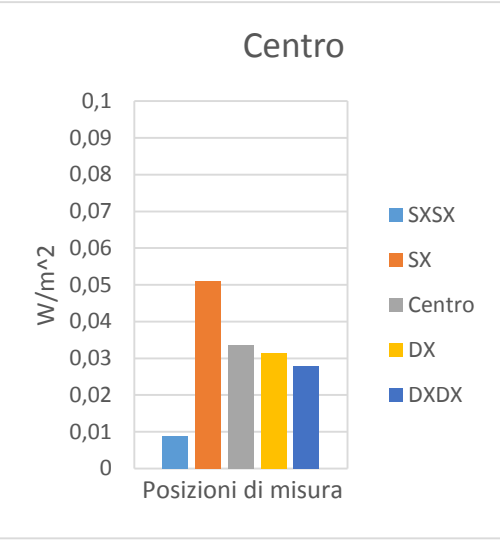
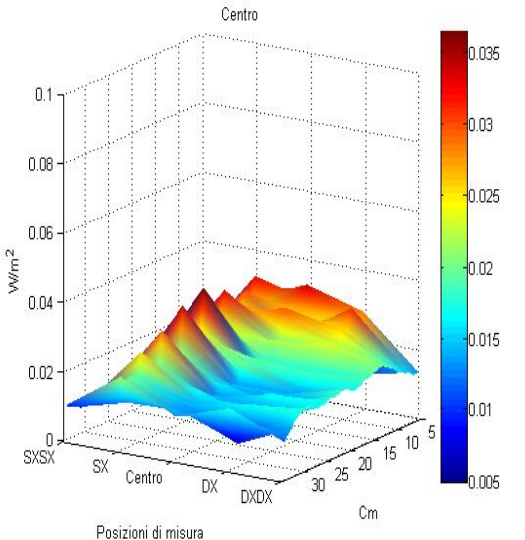
Capitolo 5

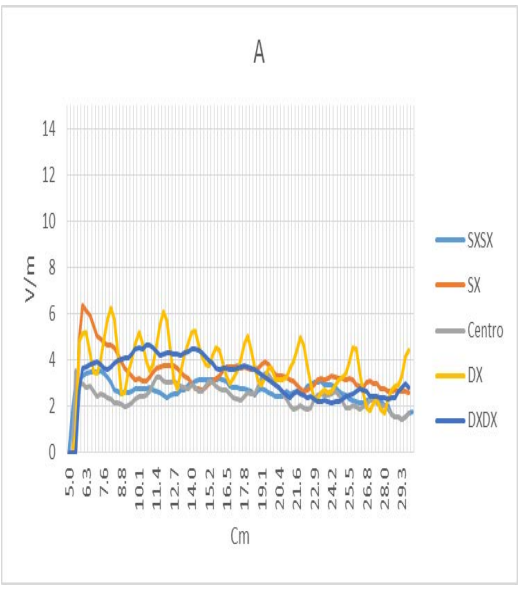
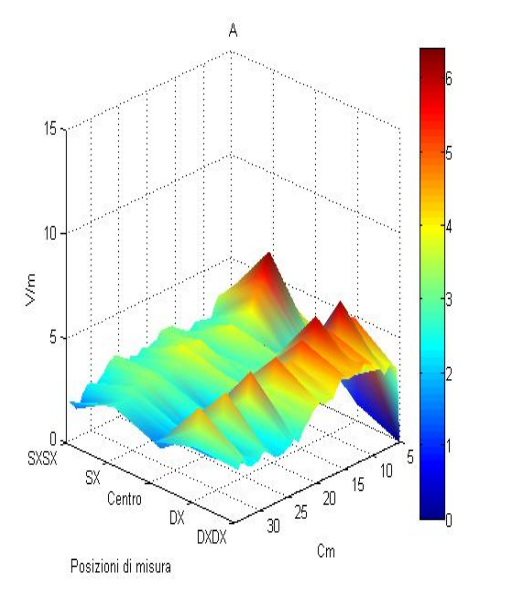
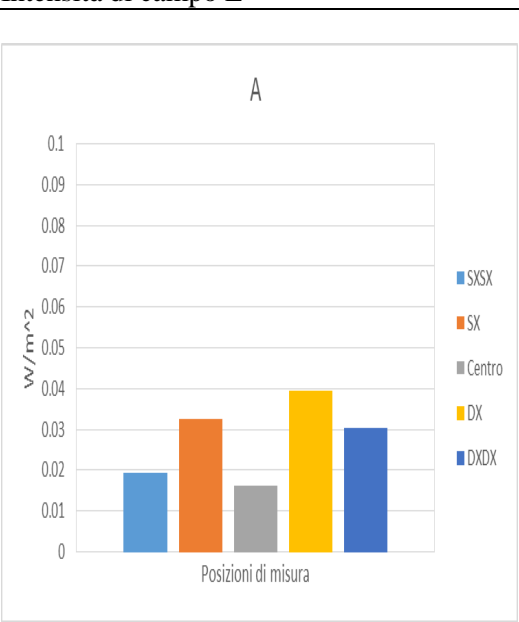
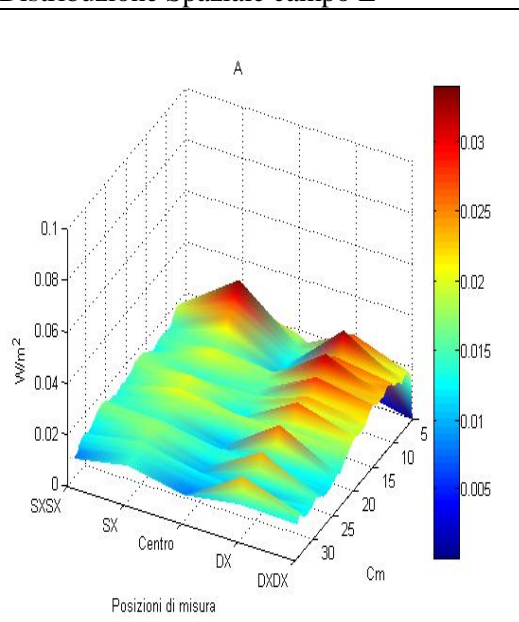
Test

5.1 Forno 1, carico A

Forno 1	Carico A	Sezione BB
<p style="text-align: center;">BB</p> <p style="text-align: center;">Cm</p>	<p style="text-align: center;">BB</p> <p style="text-align: center;">Posizioni di misura</p>	
<p style="text-align: center;">BB</p> <p style="text-align: center;">Posizioni di misura</p>	<p style="text-align: center;">BB</p> <p style="text-align: center;">Posizioni di misura</p>	
<p style="text-align: center;">Densità di potenza S</p>	<p style="text-align: center;">Distribuzione spaziale di S</p>	

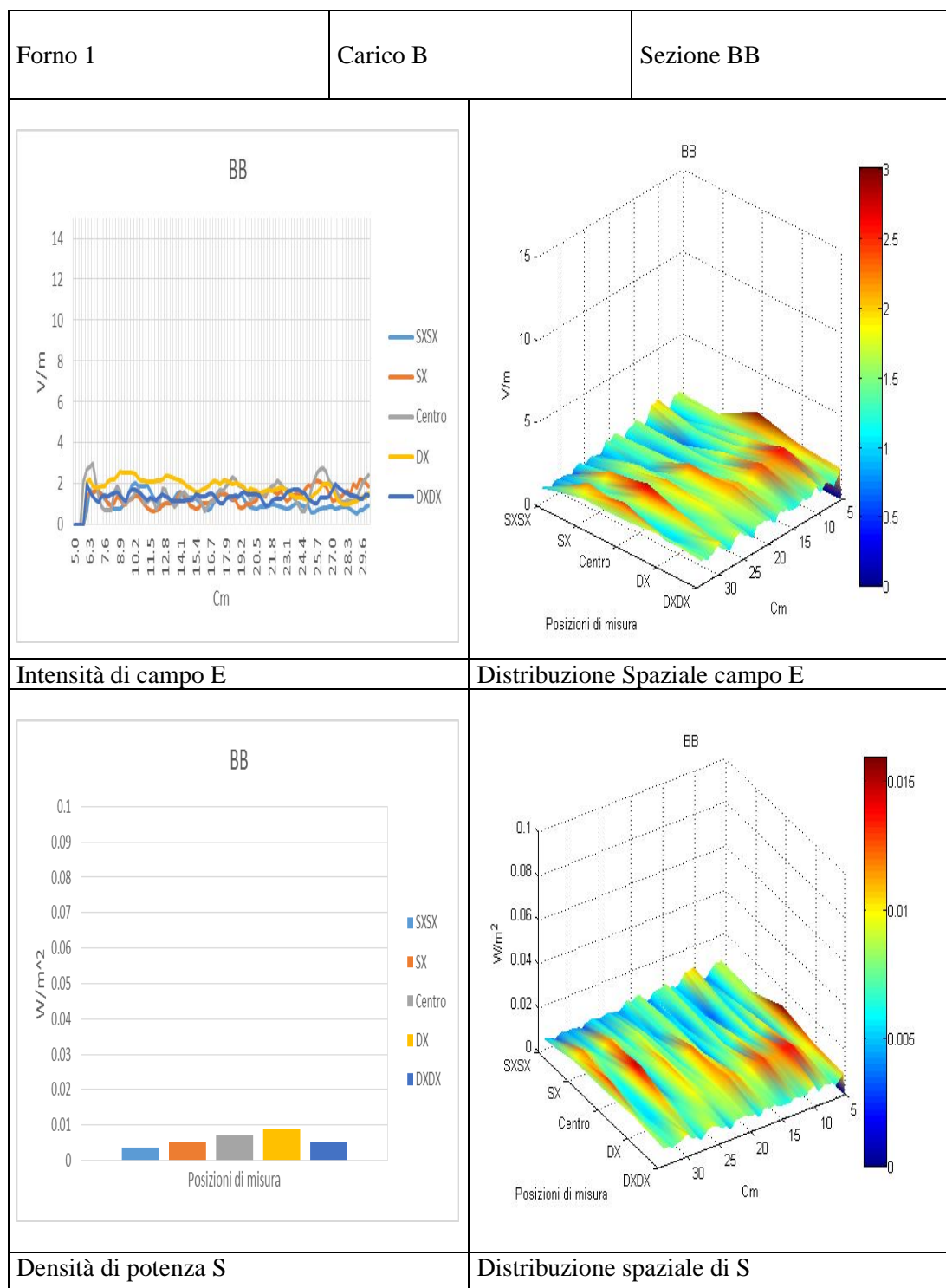
Forno 1	Carico A	Sezione B
<p style="text-align: center;">B</p>		<p style="text-align: center;">B</p>
<p style="text-align: center;">Intensità di campo E</p> <p style="text-align: center;">B</p>		<p style="text-align: center;">Distribuzione Spaziale campo E</p> <p style="text-align: center;">B</p>
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

Forno 1	Carico A	Sezione Centro
<p style="text-align: center;">Centro</p> 		<p style="text-align: center;">Centro</p> 
<p>Intensità di campo E</p>		<p>Distribuzione Spaziale campo E</p>
<p style="text-align: center;">Centro</p> 		<p style="text-align: center;">Centro</p> 
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

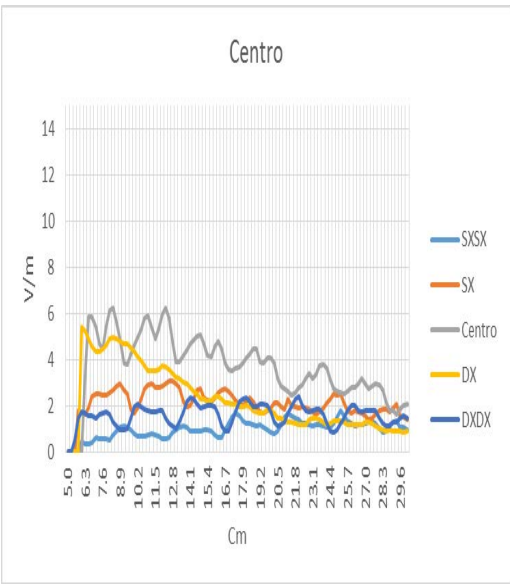
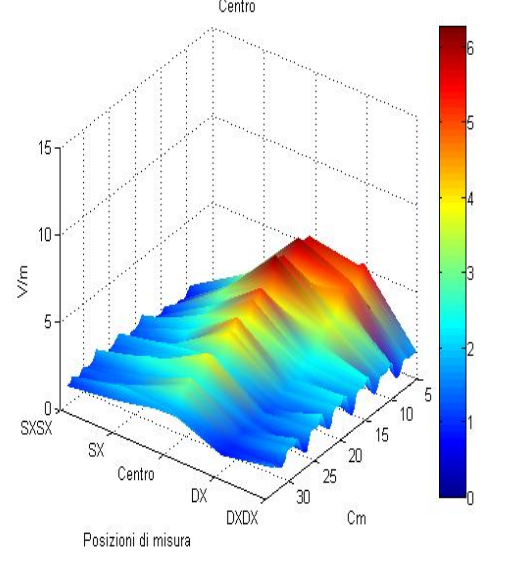
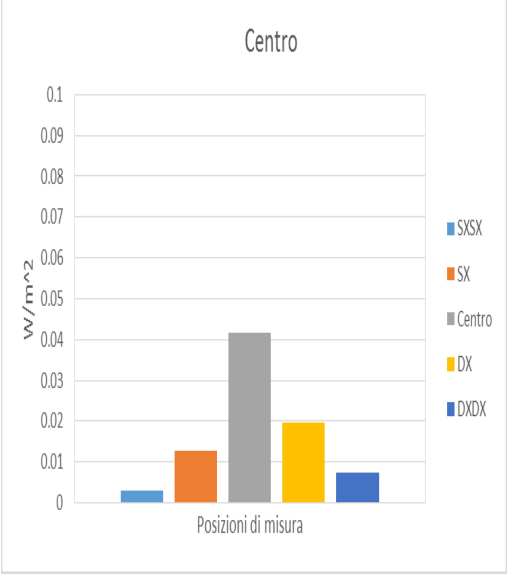
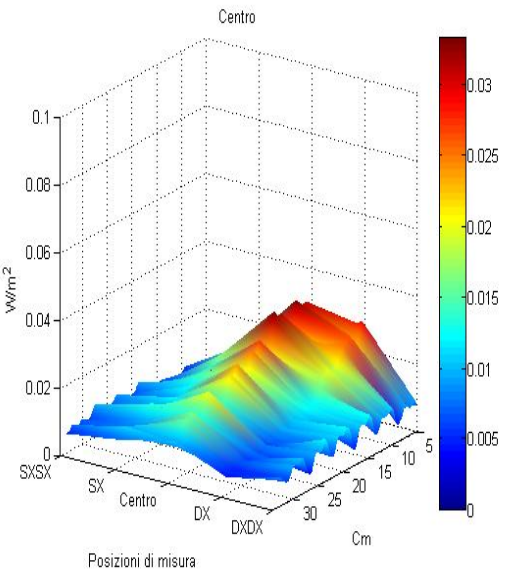
Forno 1	Carico A	Sezione A
<p style="text-align: center;">A</p> 	<p style="text-align: center;">A</p> 	
<p style="text-align: center;">A</p> 	<p style="text-align: center;">A</p> 	
<p>Densità di potenza S</p>	<p>Distribuzione spaziale di S</p>	

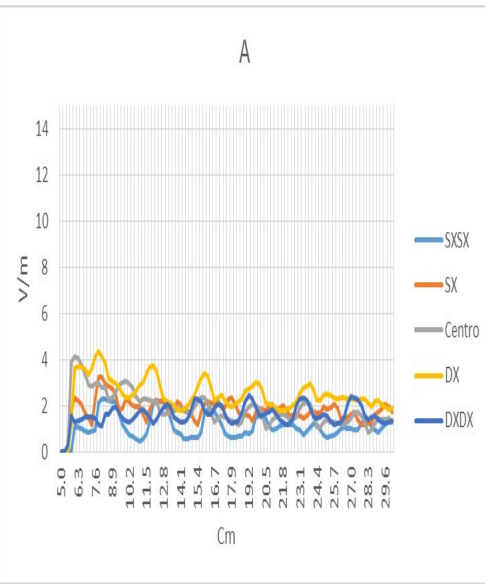
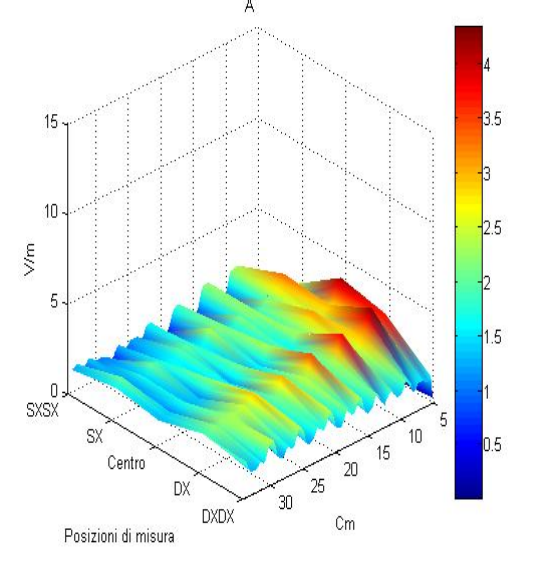
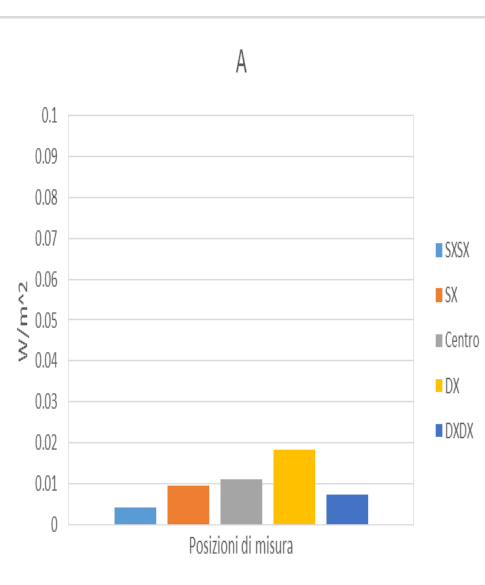
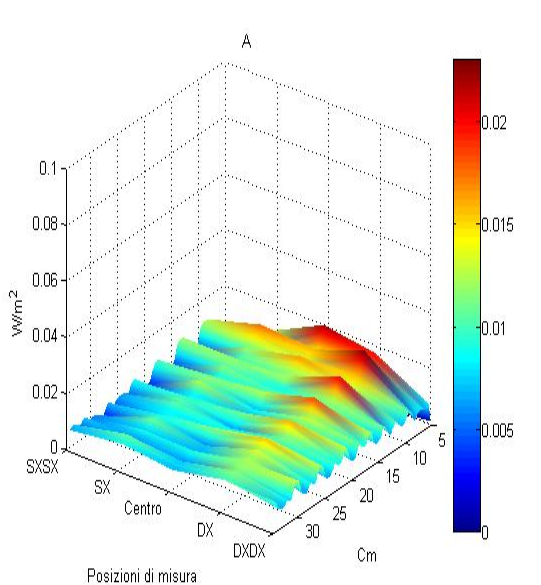
Forno 1	Carico A	Sezione AA
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

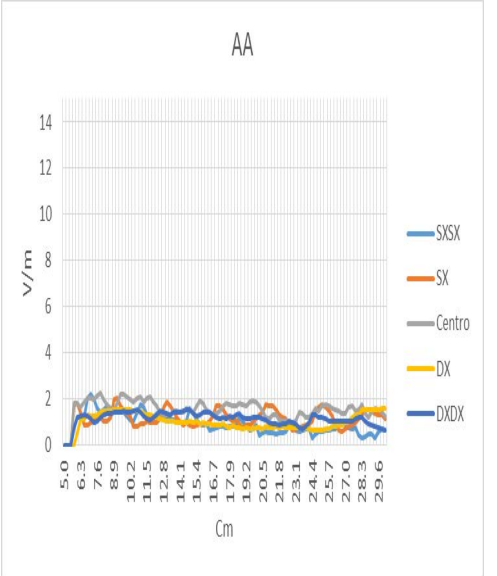
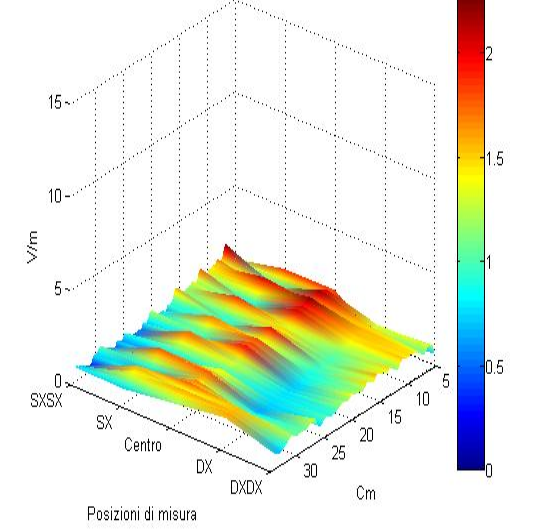
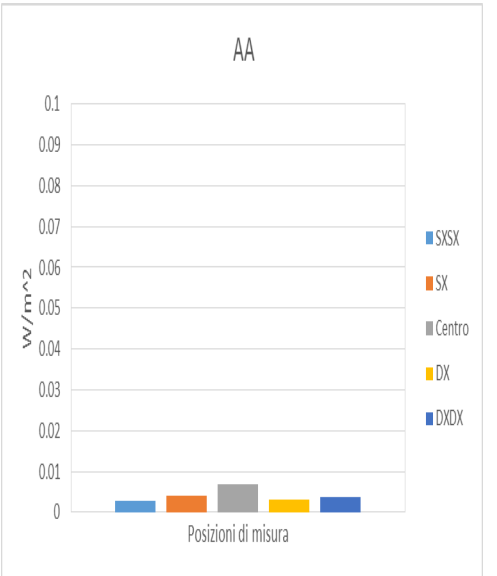
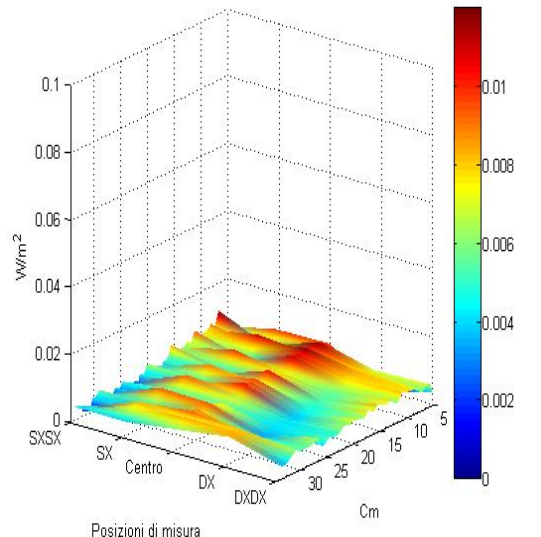
5.1.1 Forno 1, carico B



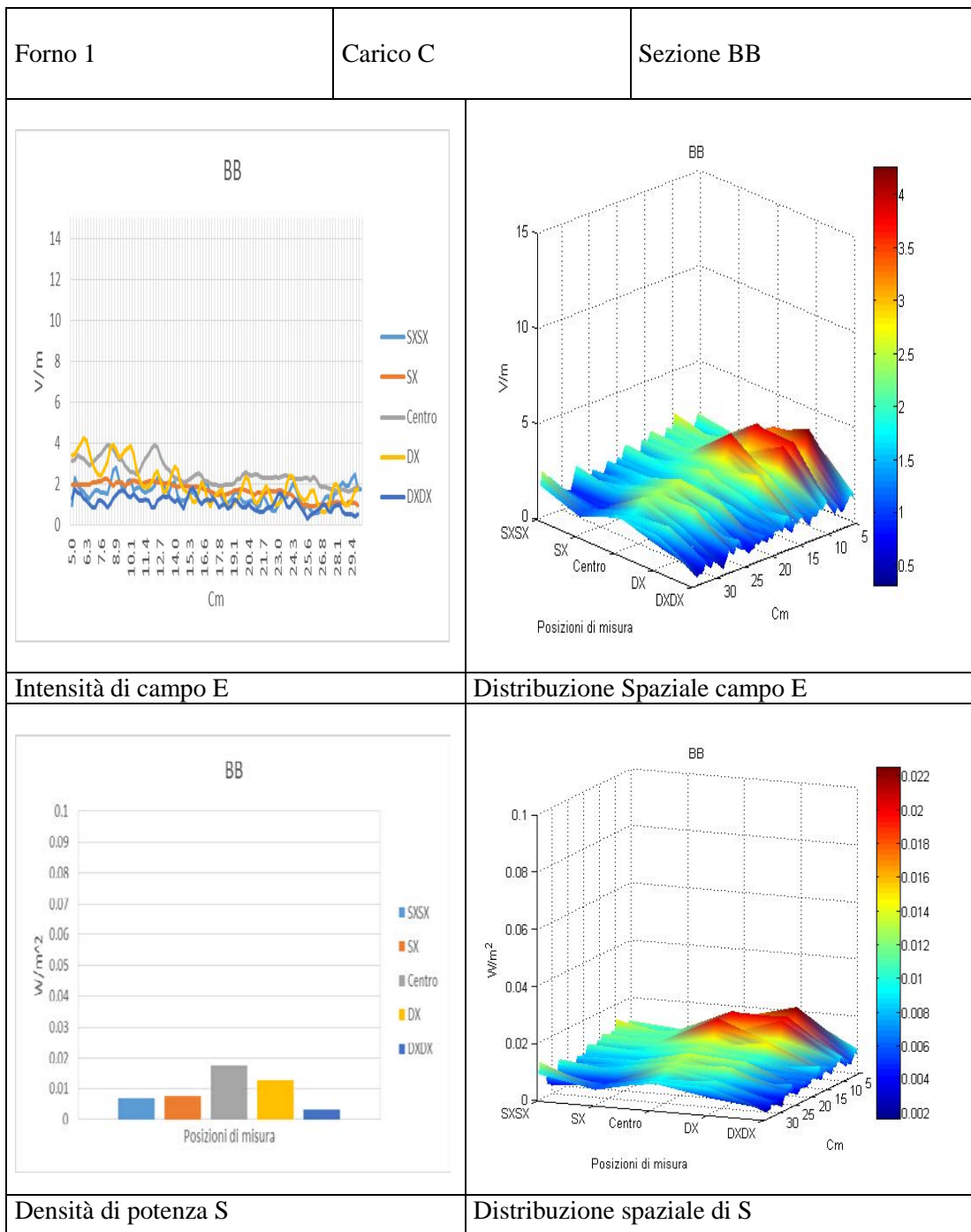
Forno 1	Carico B	Sezione B
<p style="text-align: center;">B</p> <p style="text-align: center;">V/m</p> <p style="text-align: center;">Cm</p>		<p style="text-align: center;">B</p> <p style="text-align: center;">V/m</p> <p style="text-align: center;">Posizioni di misura</p>
<p style="text-align: center;">B</p> <p style="text-align: center;">W/m²</p> <p style="text-align: center;">Posizioni di misura</p>		<p style="text-align: center;">B</p> <p style="text-align: center;">W/m²</p> <p style="text-align: center;">Posizioni di misura</p>
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

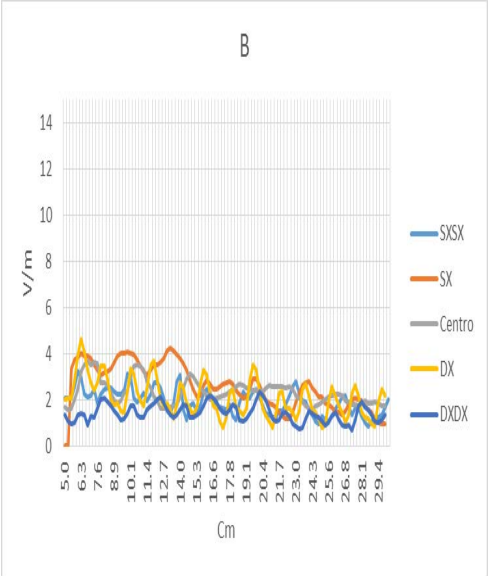
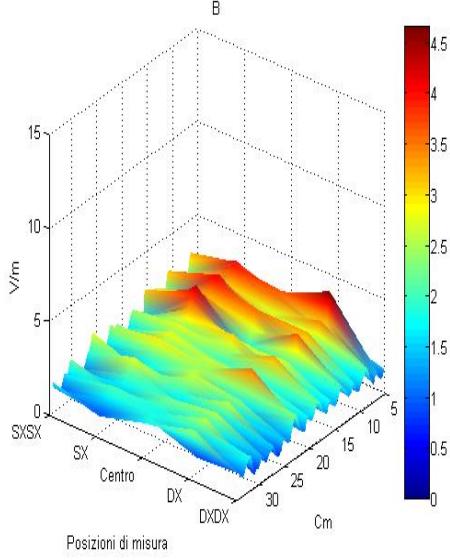
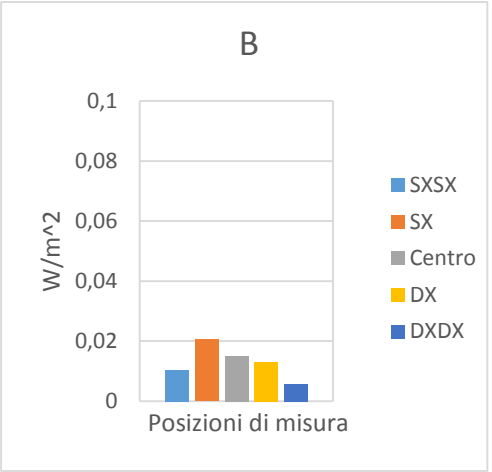
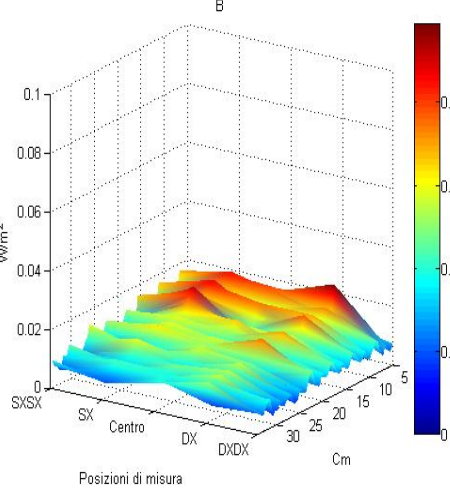
Forno 1	Carico B	Sezione Centro
<p style="text-align: center;">Centro</p> 		<p style="text-align: center;">Centro</p> 
<p style="text-align: center;">Centro</p> 		<p style="text-align: center;">Centro</p> 
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

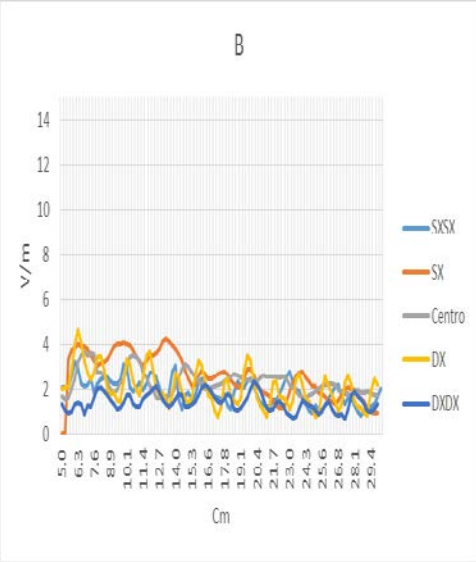
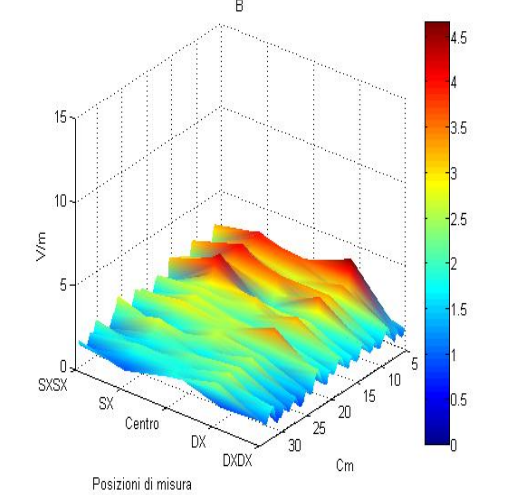
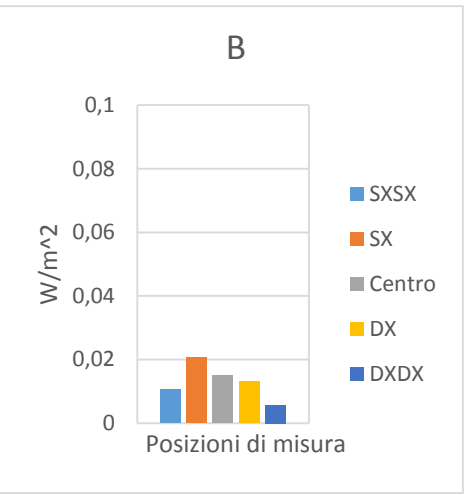
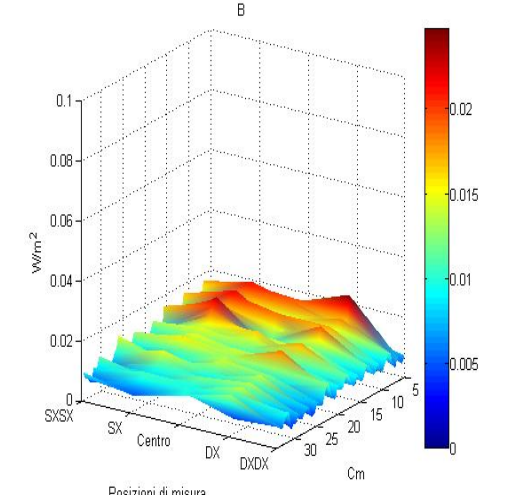
Forno 1	Carico B	Sezione A
<p style="text-align: center;">A</p> 		<p style="text-align: center;">A</p> 
<p>Intensità di campo E</p> <p style="text-align: center;">A</p> 		<p>Distribuzione Spaziale campo E</p> <p style="text-align: center;">A</p> 
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

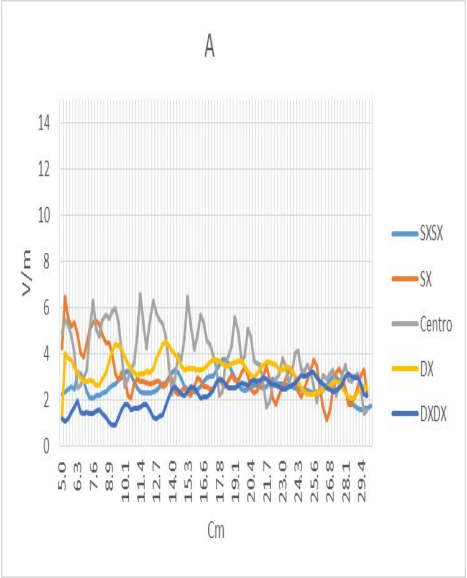
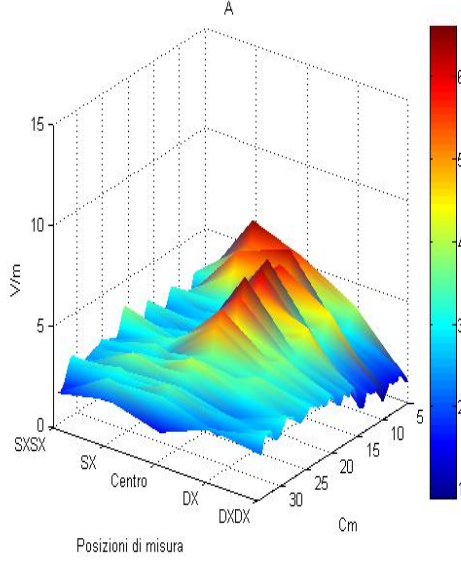
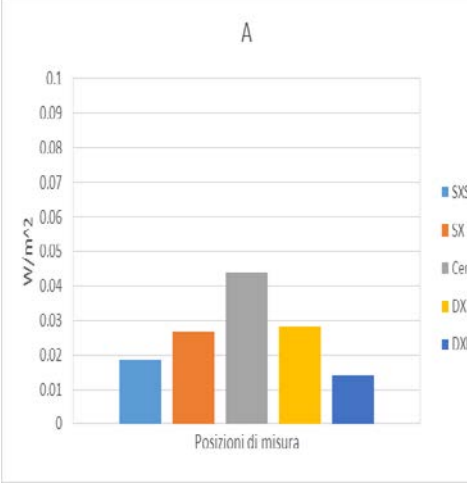
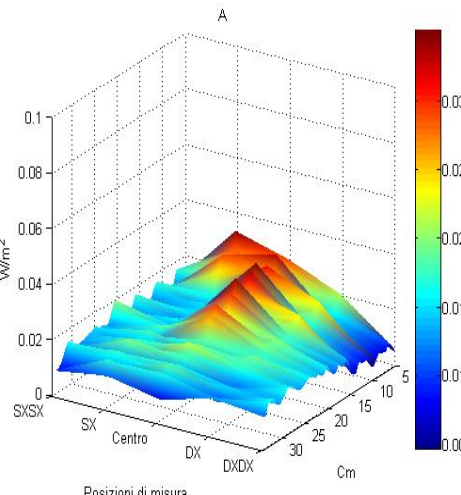
Forno 1	Carico B	Sezione AA
<p style="text-align: center;">AA</p> 		
<p style="text-align: center;">AA</p> 		<p style="text-align: center;">AA</p> 
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

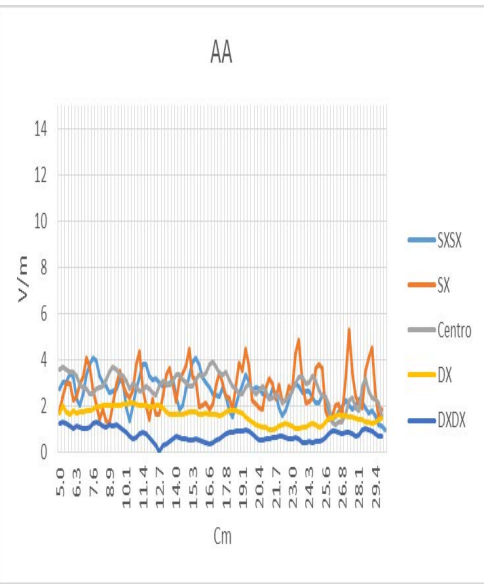
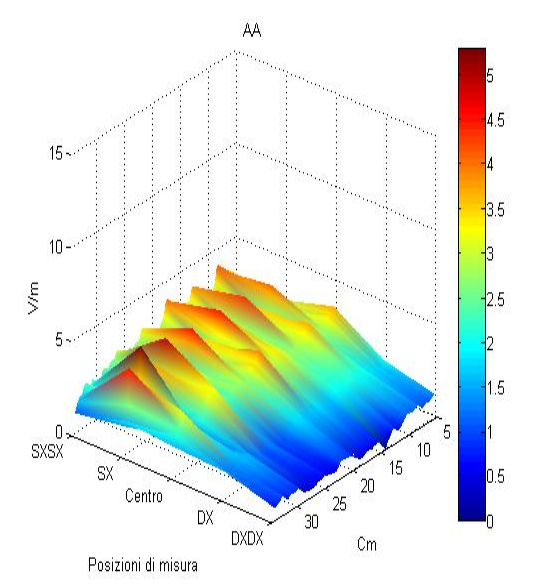
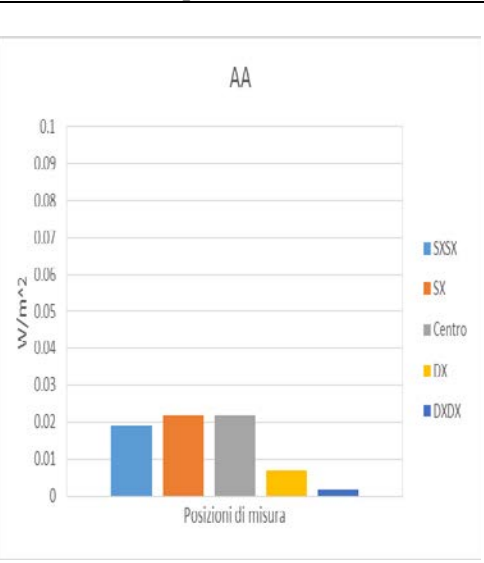
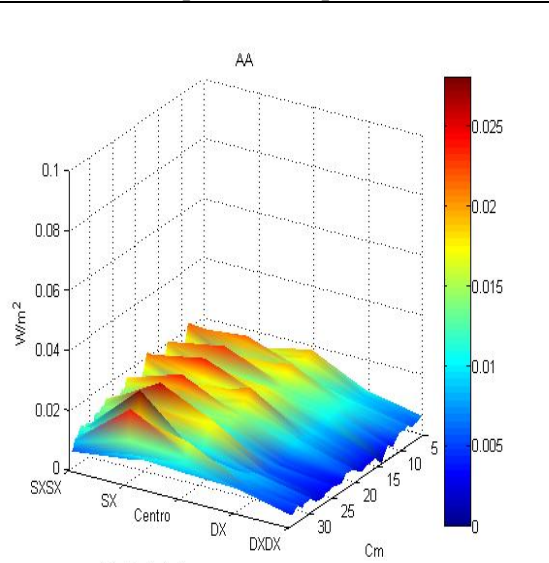
5.1.2 Forno 1, carico C



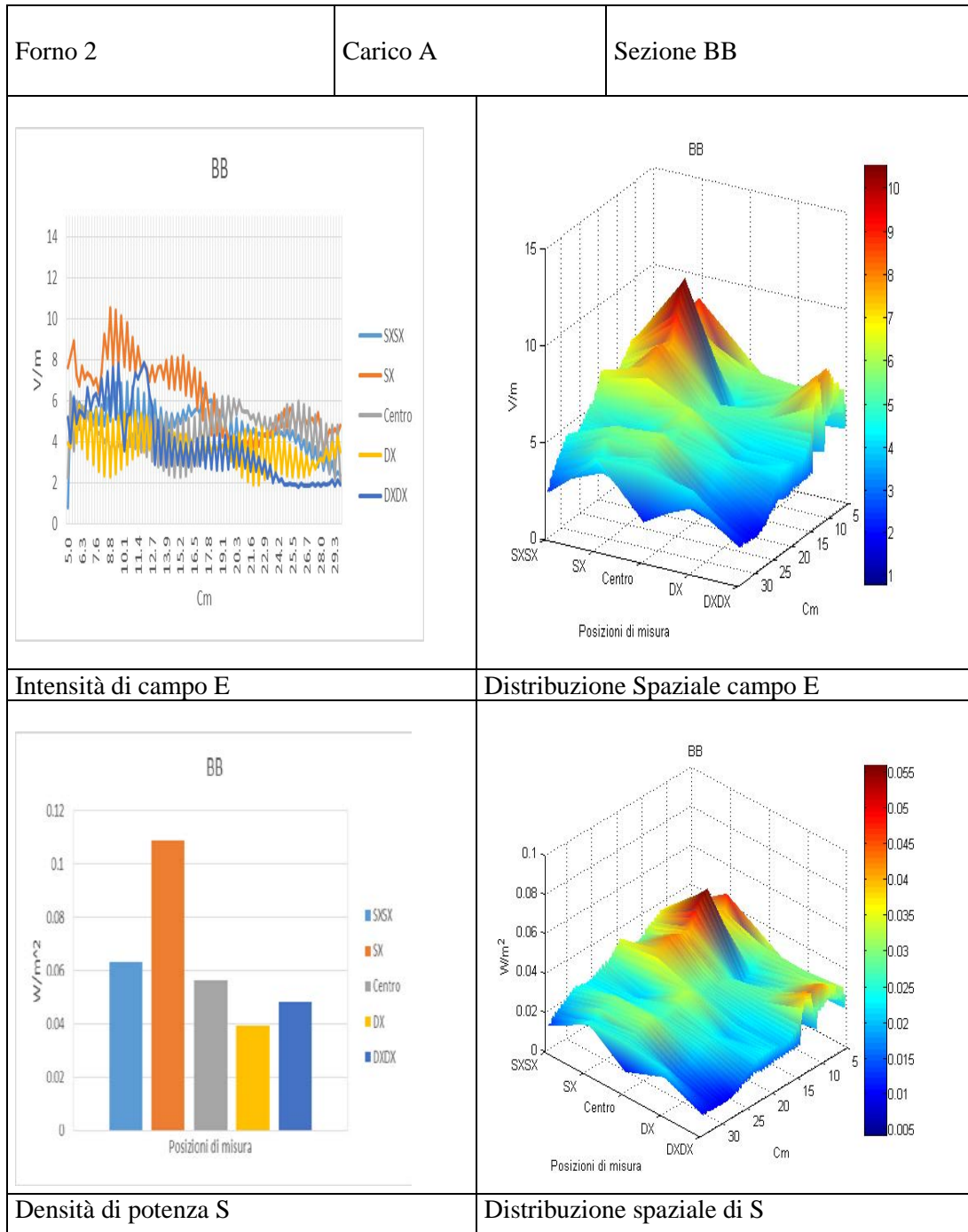
Forno 1	Carico C	Sezione B
<p style="text-align: center;">B</p> 	<p style="text-align: center;">B</p> 	
<p>Intensità di campo E</p> <p style="text-align: center;">B</p> 	<p>Distribuzione Spaziale campo E</p> <p style="text-align: center;">B</p> 	
<p>Densità di potenza S</p>	<p>Distribuzione spaziale di S</p>	

Forno 1	Carico C	Sezione Centro
 <p>B</p> <p>Y-axis: V/m (0 to 14) X-axis: Cm (5.0 to 29.4)</p> <p>Legend: SXSX (blue), SX (orange), Centro (grey), DX (yellow), DXDX (dark blue)</p>		 <p>B</p> <p>Y-axis: V/m (0 to 15) X-axis: Posizioni di misura (SXSX, SX, Centro, DX, DXDX) Z-axis: Cm (0 to 30)</p> <p>Color scale: 0 to 4.5</p>
 <p>B</p> <p>Y-axis: W/m² (0 to 0.1) X-axis: Posizioni di misura</p> <p>Legend: SXSX (blue), SX (orange), Centro (grey), DX (yellow), DXDX (dark blue)</p>		 <p>B</p> <p>Y-axis: W/m² (0 to 0.1) X-axis: Posizioni di misura (SXSX, SX, Centro, DX, DXDX) Z-axis: Cm (0 to 30)</p> <p>Color scale: 0 to 0.02</p>
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

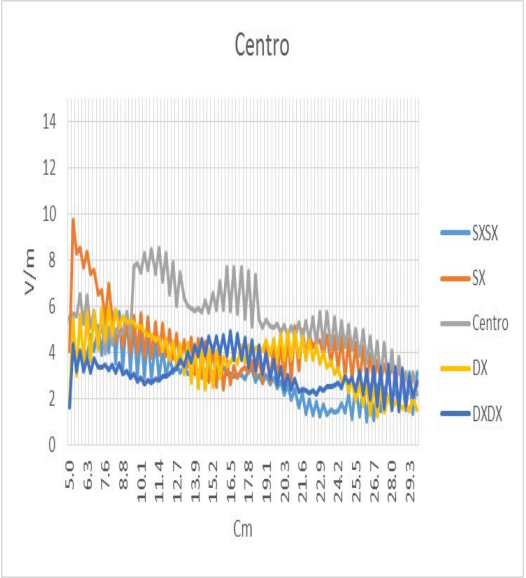
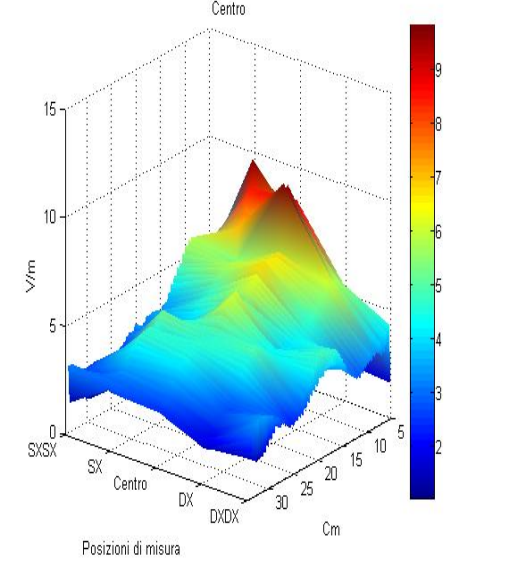
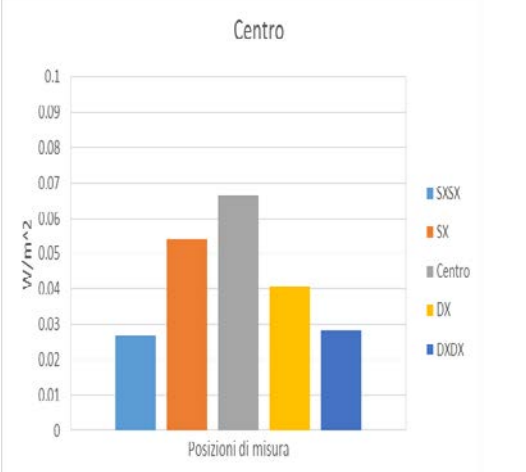
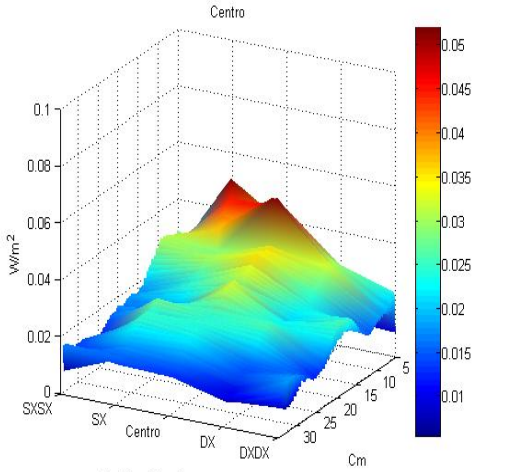
Forno 1	Carico C	Sezione A
<p style="text-align: center;">A</p> 		<p style="text-align: center;">A</p> 
<p style="text-align: center;">A</p> 		<p style="text-align: center;">A</p> 
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

Forno 1	Carico C	Sezione AA
<p style="text-align: center;">AA</p> 		<p style="text-align: center;">AA</p> 
<p style="text-align: center;">Intensità di campo E</p> <p style="text-align: center;">AA</p> 		<p style="text-align: center;">Distribuzione Spaziale campo E</p> <p style="text-align: center;">AA</p> 
<p style="text-align: center;">Densità di potenza S</p>		<p style="text-align: center;">Distribuzione spaziale di S</p>

5.2.1 Forno 2, carico A



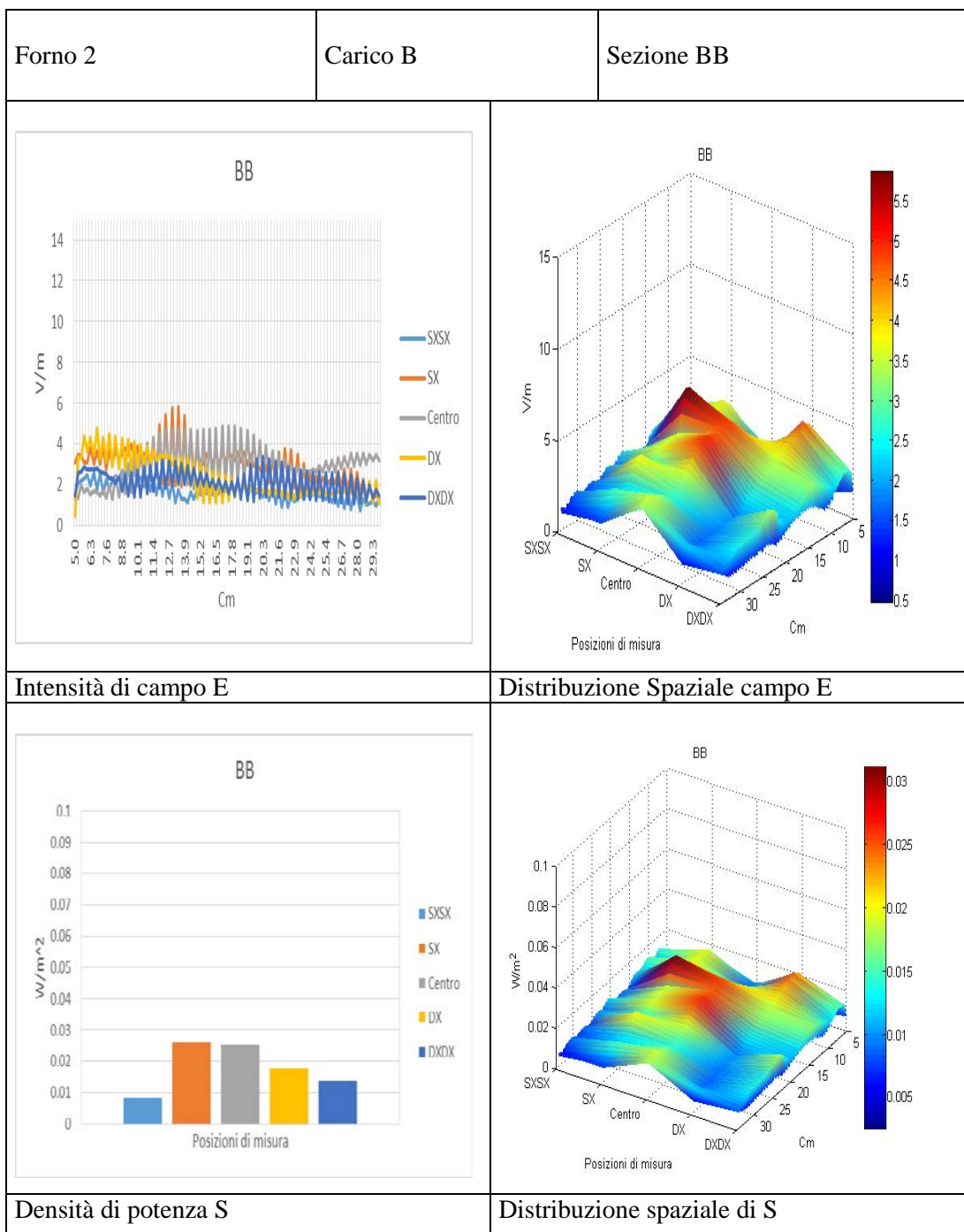
Forno 2	Carico A	Sezione B
<p style="text-align: center;">B</p>		<p style="text-align: center;">B</p>
<p style="text-align: center;">B</p>		<p style="text-align: center;">B</p>
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

Forno 2	Carico A	Sezione Centro
<p style="text-align: center;">Centro</p> 		<p style="text-align: center;">Centro</p> 
<p style="text-align: center;">Centro</p> 		<p style="text-align: center;">Centro</p> 
<p style="text-align: center;">Densità di potenza S</p>		<p style="text-align: center;">Distribuzione spaziale di S</p>

Forno 2	Carico A	Sezione A
<p style="text-align: center;">A</p>		<p style="text-align: center;">A</p>
<p style="text-align: center;">Intensità di campo E</p> <p style="text-align: center;">A</p>		<p style="text-align: center;">Distribuzione Spaziale campo E</p> <p style="text-align: center;">A</p>
<p style="text-align: center;">Densità di potenza S</p>		<p style="text-align: center;">Distribuzione spaziale di S</p>

Forno 2	Carico A	Sezione AA
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

5.2.2 Forno 2, carico B



Forno 2	Carico B	Sezione B
<p style="text-align: center;">B</p>		<p style="text-align: center;">B</p>
<p style="text-align: center;">B</p>		<p style="text-align: center;">B</p>
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

Forno 2	Carico B	Sezione Centro
<p style="text-align: center;">Centro</p>		<p style="text-align: center;">Centro</p>
<p style="text-align: center;">Centro</p>		<p style="text-align: center;">Centro</p>
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

Forno 2	Carico B	Sezione A
<p style="text-align: center;">A</p>		<p style="text-align: center;">A</p>
<p style="text-align: center;">A</p>		<p style="text-align: center;">A</p>
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

Forno 2	Carico B	Sezione AA
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

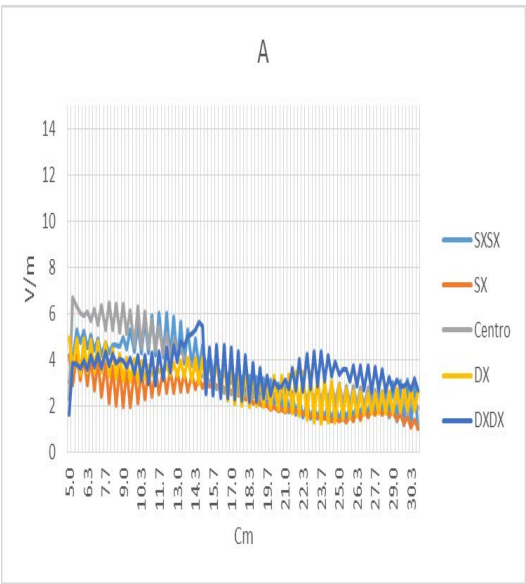
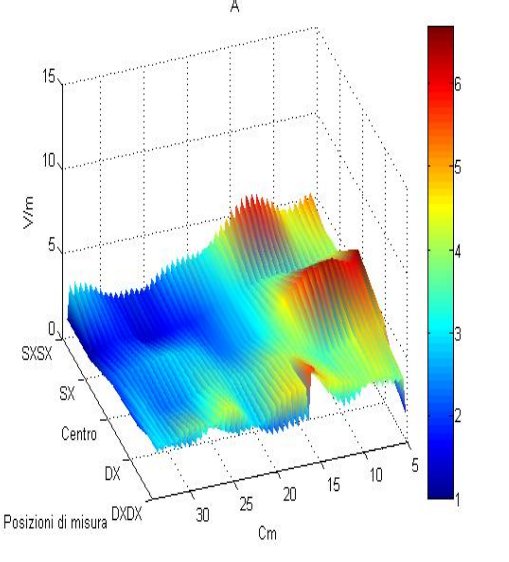
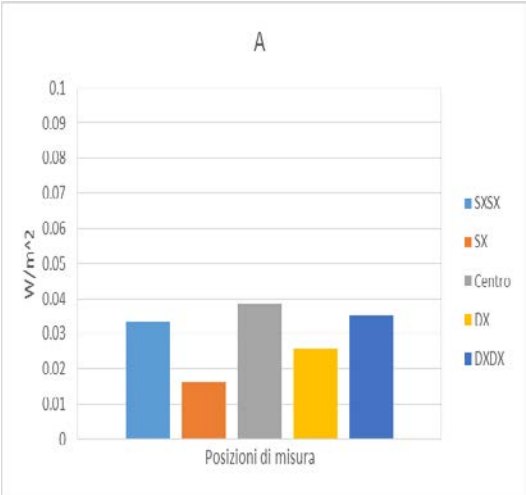
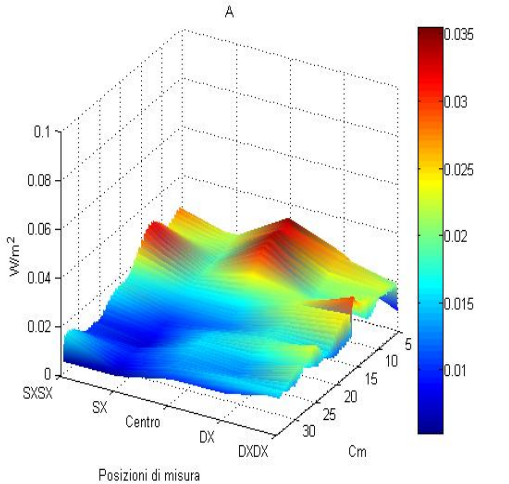
5.2.3 Forno 2, carico C

Forno 2	Carico C	Sezione BB
<p style="text-align: center;">BB</p>		<p style="text-align: center;">BB</p>
<p style="text-align: center;">BB</p>		<p style="text-align: center;">BB</p>
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

Forno 2	Carico C	Sezione B
<p style="text-align: center;">B</p>		
<p>Intensità di campo E</p>		<p>Distribuzione Spaziale campo E</p>
<p style="text-align: center;">B</p>		
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

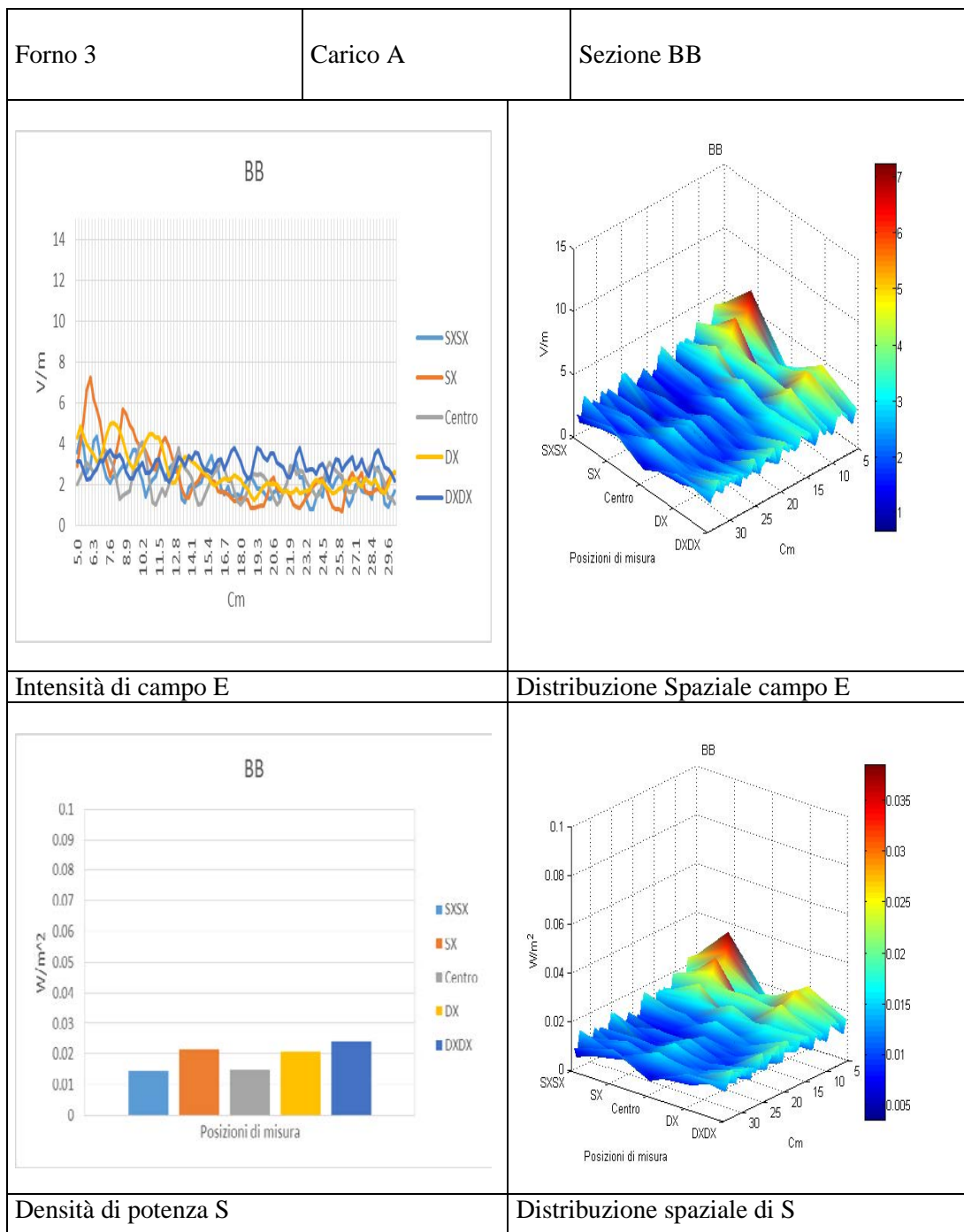
Forno 2	Carico C	Sezione B
<p style="text-align: center;">B</p>		<p style="text-align: center;">B</p>
<p>Intensità di campo E</p> <p style="text-align: center;">B</p>		<p>Distribuzione Spaziale campo E</p> <p style="text-align: center;">B</p>
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

Forno 2	Carico C	Sezione Centro
<p style="text-align: center;">Centro</p>		<p style="text-align: center;">Centro</p>
<p style="text-align: center;">Centro</p>		<p style="text-align: center;">Centro</p>
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

Forno 2	Carico C	Sezione A	
<p style="text-align: center;">A</p> 		<p style="text-align: center;">A</p> 	
<p>Intensità di campo E</p> <p style="text-align: center;">A</p> 		<p>Distribuzione Spaziale campo E</p> <p style="text-align: center;">A</p> 	
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>	

Forno 2	Carico C	Sezione AA
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

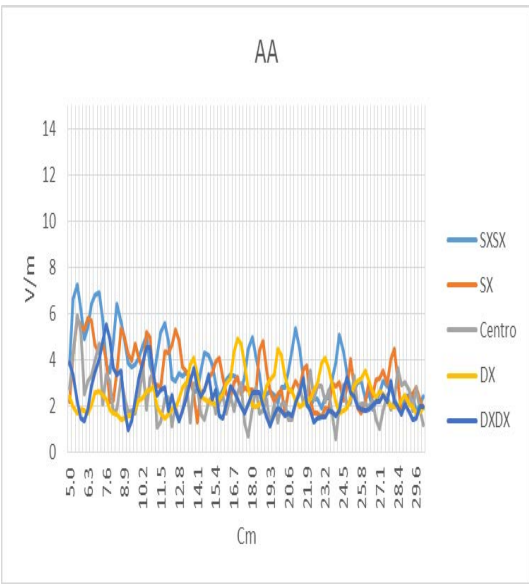
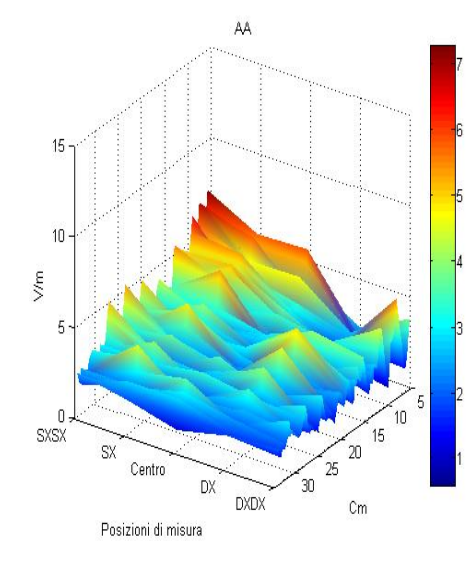
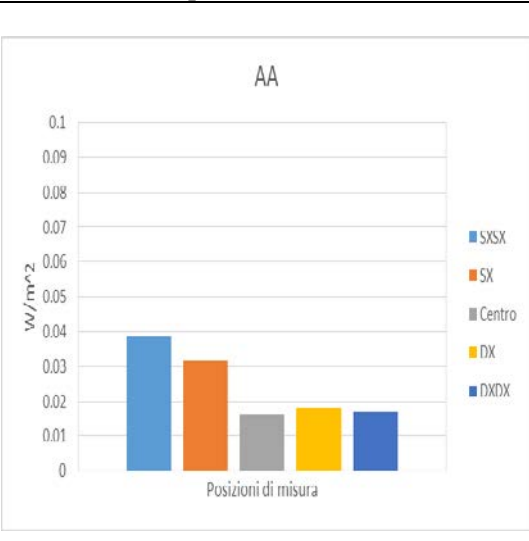
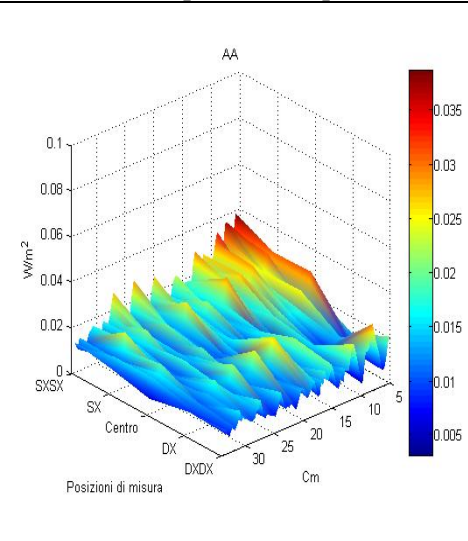
5.3.1 Forno 3, carico A



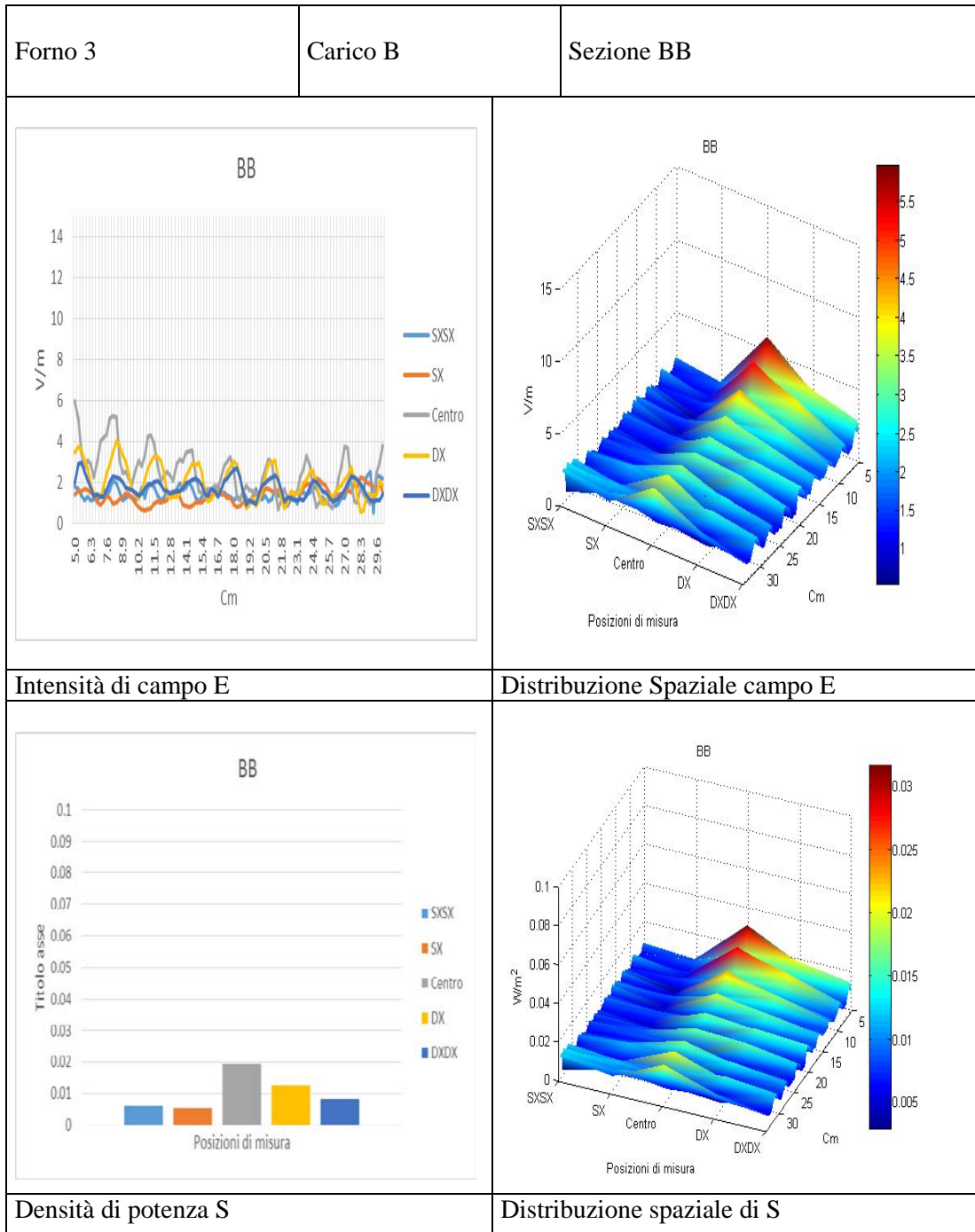
Forno 3	Carico A	Sezione B
<p style="text-align: center;">B</p>		<p style="text-align: center;">B</p>
<p>Intensità di campo E</p> <p style="text-align: center;">B</p>		<p>Distribuzione Spaziale campo E</p> <p style="text-align: center;">B</p>
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

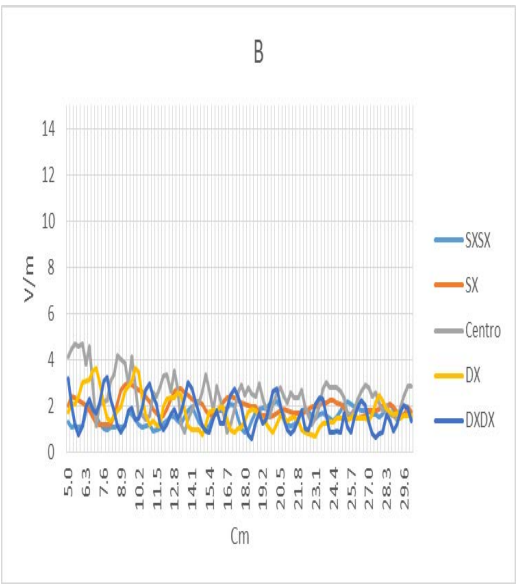
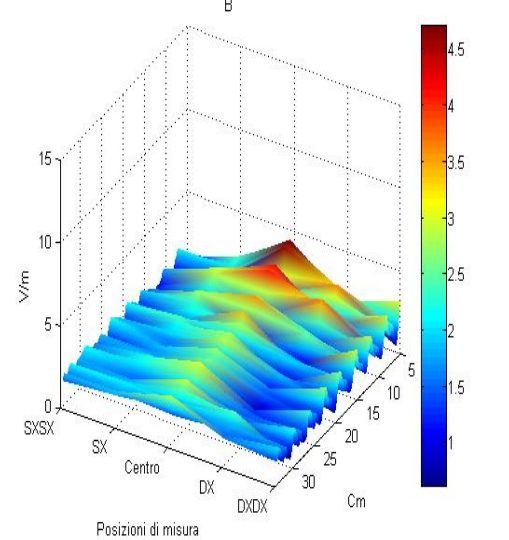
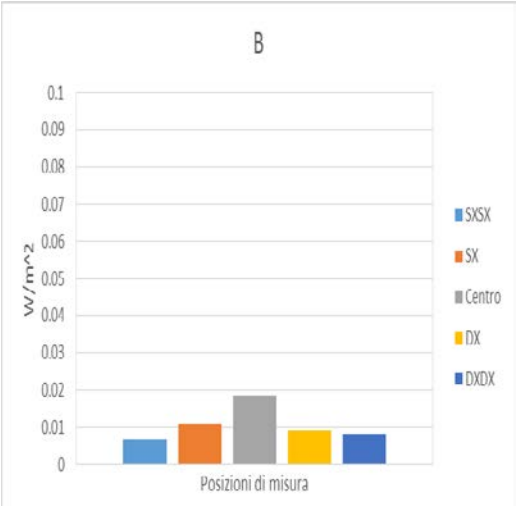
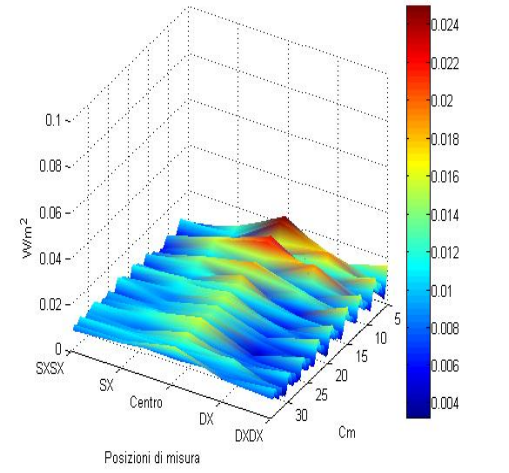
Forno 3	Carico A	Sezione Centro
<p style="text-align: center;">Centro</p>		<p style="text-align: center;">Centro</p>
<p style="text-align: center;">Centro</p>		<p style="text-align: center;">Centro</p>
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

Forno 3	Carico A	Sezione A
<p style="text-align: center;">A</p>		<p style="text-align: center;">A</p>
<p style="text-align: center;">Intensità di campo E</p> <p style="text-align: center;">A</p>		<p style="text-align: center;">Distribuzione Spaziale campo E</p> <p style="text-align: center;">A</p>
<p style="text-align: center;">Densità di potenza S</p>		<p style="text-align: center;">Distribuzione spaziale di S</p>

Forno 3	Carico A	Sezione AA
<p style="text-align: center;">AA</p> 		<p style="text-align: center;">AA</p> 
<p style="text-align: center;">AA</p> 		<p style="text-align: center;">AA</p> 
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

5.3.2 Forno 3, carico B



Forno 3	Carico B	Sezione B
<p style="text-align: center;">B</p> 		<p style="text-align: center;">B</p> 
<p>Intensità di campo E</p> <p style="text-align: center;">B</p> 		<p>Distribuzione Spaziale campo E</p> <p style="text-align: center;">B</p> 
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

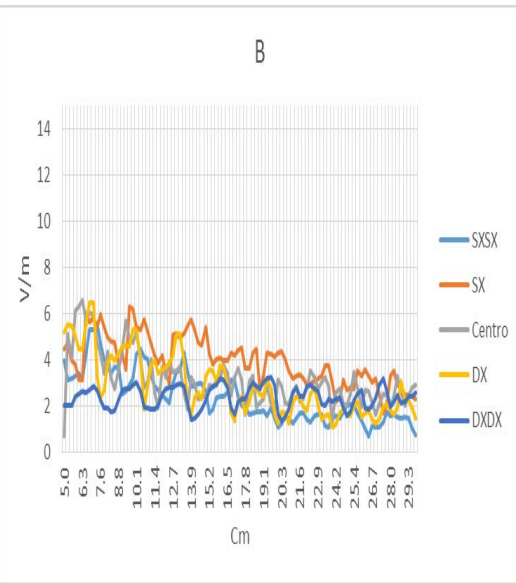
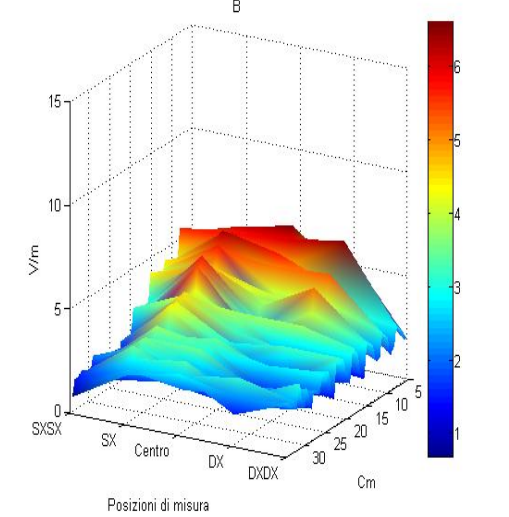
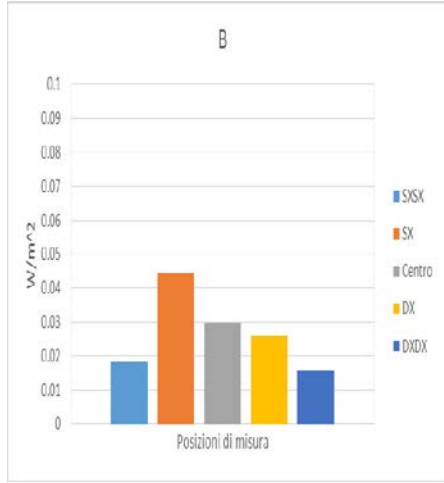
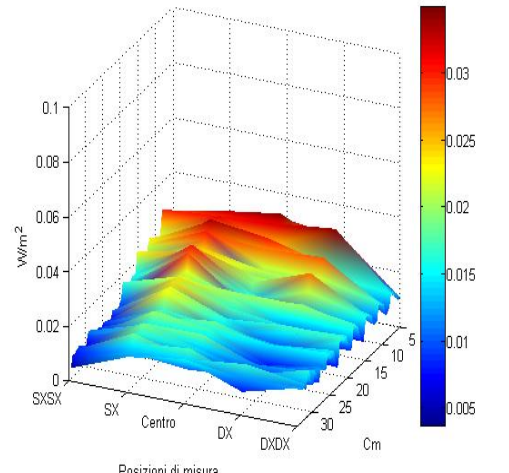
Forno 3	Carico B	Sezione Centro
<p style="text-align: center;">Centro</p> <p style="text-align: center;">V/m</p> <p style="text-align: center;">Cm</p>		<p style="text-align: center;">Centro</p> <p style="text-align: center;">V/m</p> <p style="text-align: center;">Posizioni di misura</p>
<p style="text-align: center;">Centro</p> <p style="text-align: center;">W/m²</p> <p style="text-align: center;">Posizioni di misura</p>		<p style="text-align: center;">Centro</p> <p style="text-align: center;">W/m²</p> <p style="text-align: center;">Posizioni di misura</p>
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

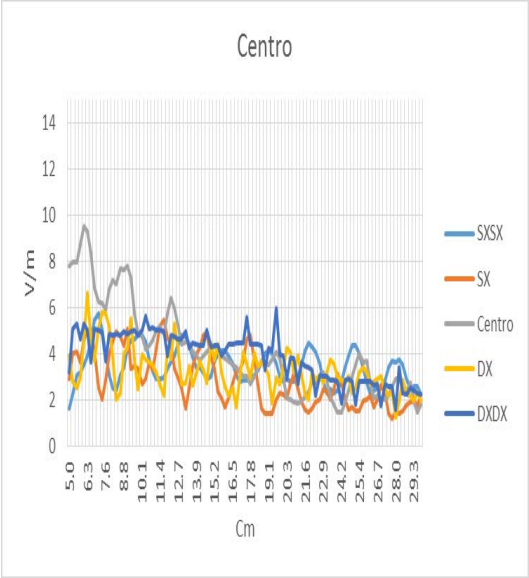
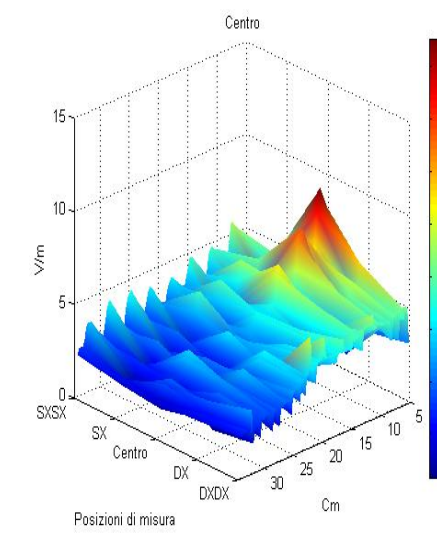
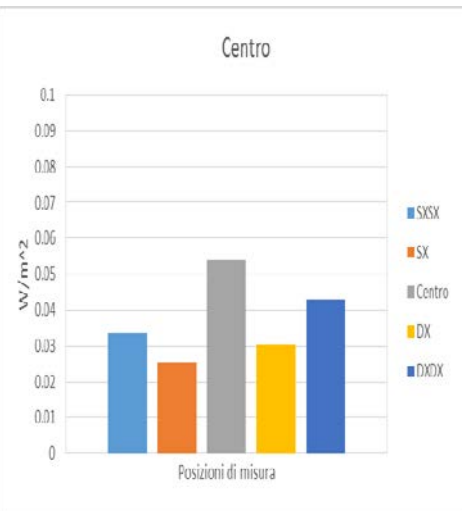
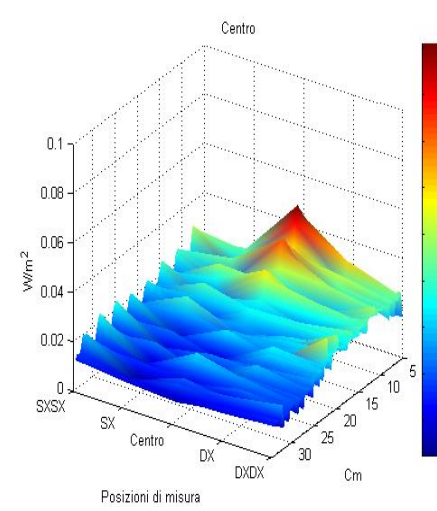
Forno 3	Carico B	Sezione A
<p style="text-align: center;">A</p>		<p style="text-align: center;">A</p>
<p style="text-align: center;">A</p>		<p style="text-align: center;">A</p>
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

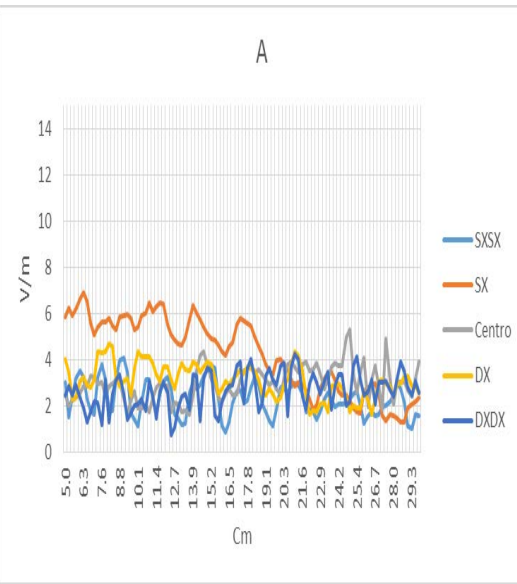
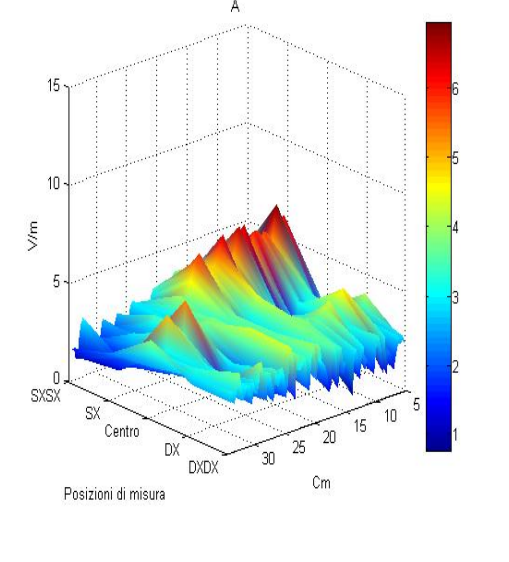
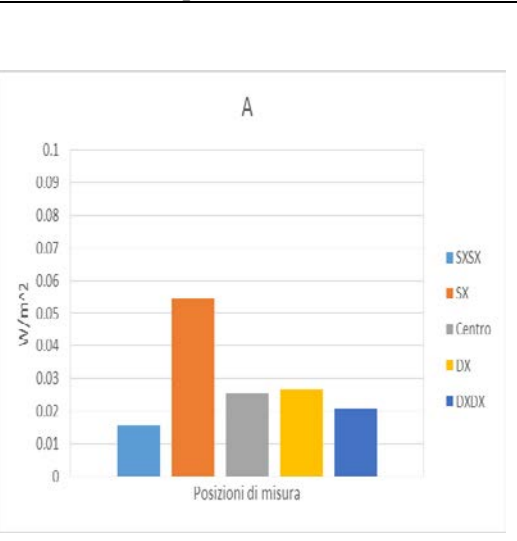
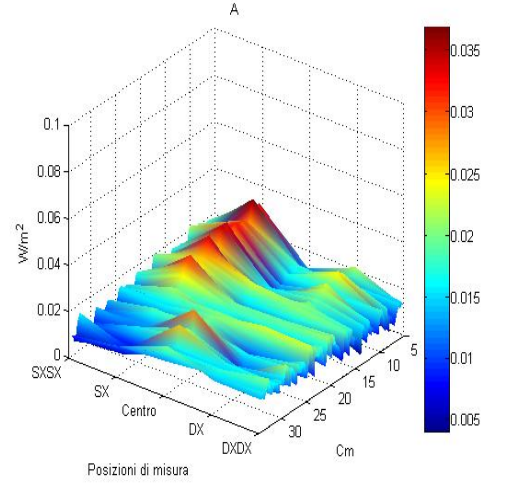
Forno 3	Carico B	Sezione AA
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

5.3.3 Forno 3, carico C

Forno 3	Carico C	Sezione BB
<p>Intensità di campo E</p>		<p>Distribuzione Spaziale campo E</p>
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

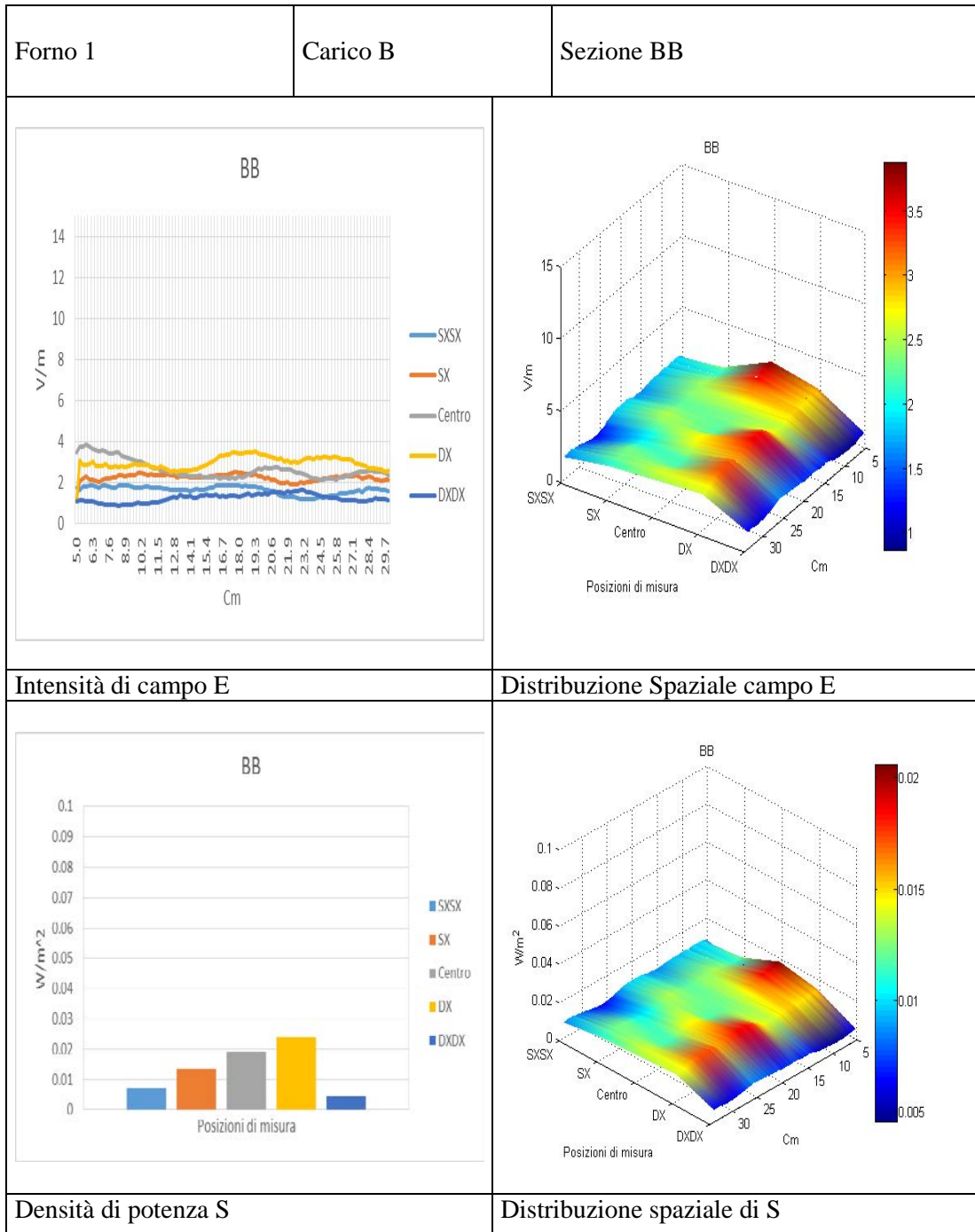
Forno 3	Carico C	Sezione B
<p style="text-align: center;">B</p> 		<p style="text-align: center;">B</p> 
<p>Intensità di campo E</p> <p style="text-align: center;">B</p> 		<p>Distribuzione Spaziale campo E</p> <p style="text-align: center;">B</p> 
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

Forno 3	Carico C	Sezione Centro	
<p style="text-align: center;">Centro</p> 		<p style="text-align: center;">Centro</p> 	
<p style="text-align: center;">Centro</p> 		<p style="text-align: center;">Centro</p> 	
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>	

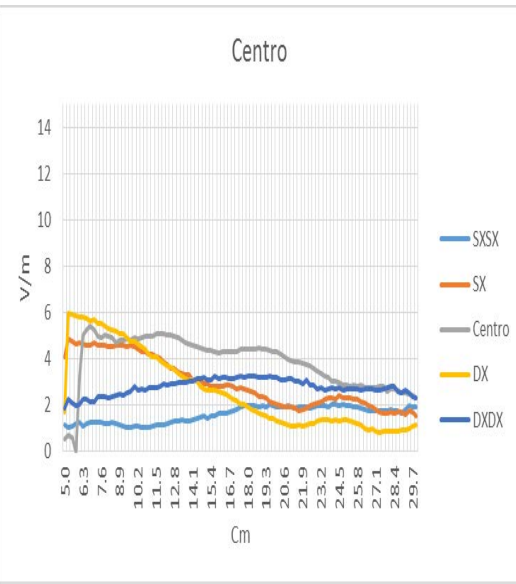
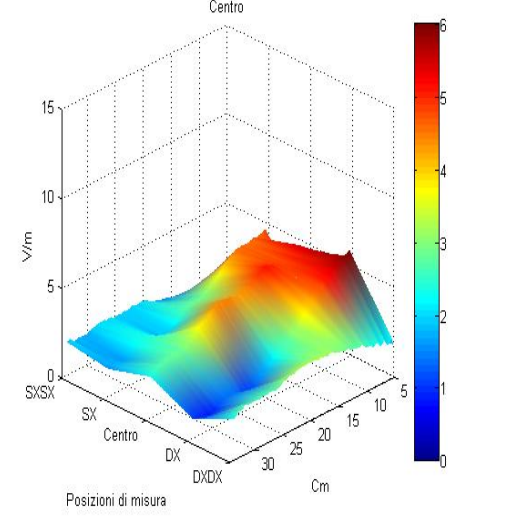
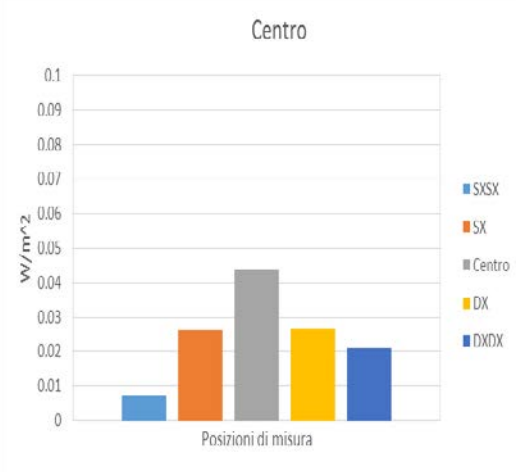
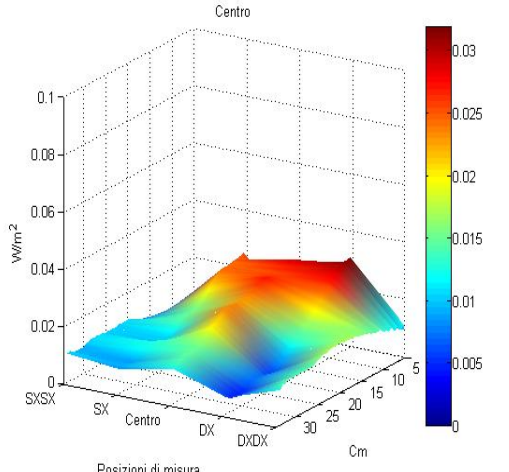
Forno 3	Carico C	Sezione A
<p style="text-align: center;">A</p>  <p style="text-align: center;">Cm</p>		<p style="text-align: center;">A</p>  <p style="text-align: center;">Posizioni di misura</p>
<p style="text-align: center;">Intensità di campo E</p> <p style="text-align: center;">A</p>  <p style="text-align: center;">Posizioni di misura</p>		<p style="text-align: center;">Distribuzione Spaziale campo E</p> <p style="text-align: center;">A</p>  <p style="text-align: center;">Posizioni di misura</p>
<p style="text-align: center;">Densità di potenza S</p>		<p style="text-align: center;">Distribuzione spaziale di S</p>

Forno 3	Carico C	Sezione AA	
<p>Intensità di campo E</p>		<p>Distribuzione Spaziale campo E</p>	
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>	

5.4 Forno 1, carico B (Senza Piatto)



Forno 1	Carico B	Sezione B
<p style="text-align: center;">B</p>		
<p style="text-align: center;">B</p>		<p style="text-align: center;">B</p>
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

Forno 1	Carico B	Sezione Centro
<p style="text-align: center;">Centro</p>  <p style="text-align: center;">Cm</p>		<p style="text-align: center;">Centro</p>  <p style="text-align: center;">Posizioni di misura</p>
<p style="text-align: center;">Centro</p>  <p style="text-align: center;">Posizioni di misura</p>		<p style="text-align: center;">Centro</p>  <p style="text-align: center;">Posizioni di misura</p>
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

Forno 1	Carico B	Sezione A
<p style="text-align: center;">A</p> <p style="text-align: center;">Cm</p>		<p style="text-align: center;">A</p> <p style="text-align: center;">Posizioni di misura</p>
<p style="text-align: center;">A</p> <p style="text-align: center;">Posizioni di misura</p>		<p style="text-align: center;">A</p> <p style="text-align: center;">Posizioni di misura</p>
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

Forno 1	Carico B	Sezione AA
<p style="text-align: center;">AA</p>		<p style="text-align: center;">AA</p>
<p style="text-align: center;">AA</p>		<p style="text-align: center;">AA</p>
<p>Densità di potenza S</p>		<p>Distribuzione spaziale di S</p>

Capitolo 6

Analisi dei risultati

Secondo i limiti normativi (50 W/m^2 per la densità di potenza), la radiazione elettromagnetica prodotta dai forni testati risulta essere ampiamente al di sotto al limite.

Inoltre, se si considerano limiti maggiormente severi, indicati in [12] (10 W/m^2 per quanto riguarda la densità di potenza, 60 V/m per l'intensità di campo elettrico), la radiazione elettromagnetica prodotta dai forni testati risulta ancora conforme.

In base ai test eseguiti, si è potuto notare che esiste una relazione fra carichi ed intensità delle emissioni: infatti, più il carico è piccolo, più la radiazione emessa dal forno risulta intensa. Questo fatto è comune per tutti i 3 i forni testati (anche se il forno 3 presenta delle leggere differenze):

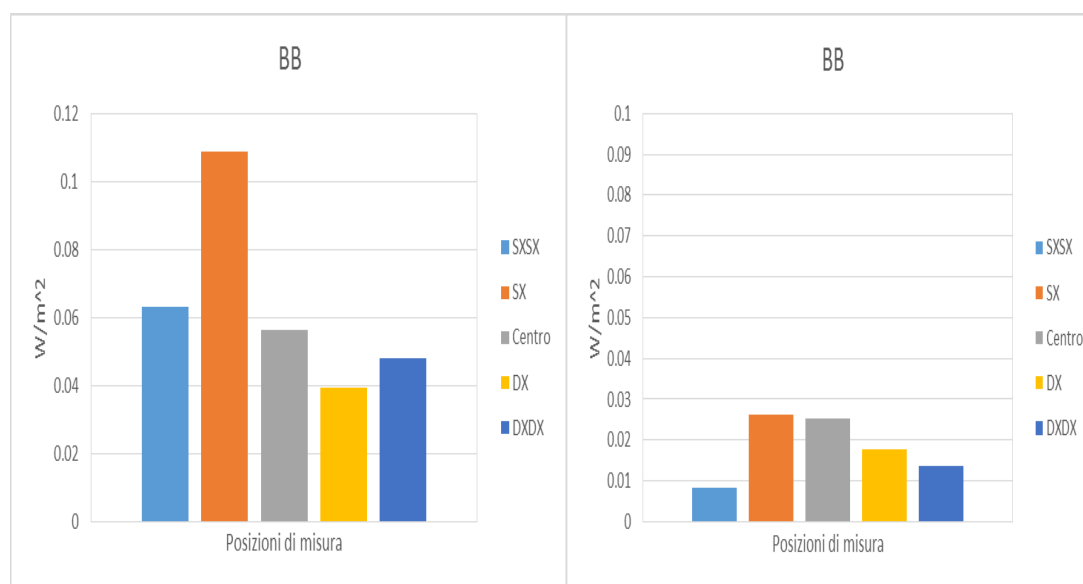


Fig. 6.1 Confronto fra densità di potenza ottenute con il forno 2, carico A e carico B

In figura sono presenti due istogrammi, atti a visualizzare la densità di potenza emessa dal forno 2 nella sezione di misura BB (quindi, a circa 20 dal bordo inferiore): il grafico di sinistra rappresenta i valori raggiunti con il carico A, il grafico di destra rappresenta i valori raggiunti con il carico B. Considerando la misura SX (quindi la misura di bordo sinistro), il forno 2 ha prodotto con il carico A, circa 0.115 W/m^2 ; mentre con il carico B, lo stesso forno ha prodotto $0,0025 \text{ W/m}^2$ circa. Il carico B risulta essere circa 1000g equivalenti di acqua, mentre il carico A risulta essere circa 275g equivalenti di acqua.

Il carico A risulta essere circa $\frac{1}{4}$ rispetto al carico B, mentre la radiazione prodotta con il carico A risulta essere circa 4 volte la radiazione prodotta con il carico B. Quindi è possibile affermare che esiste una relazione fra le dimensioni dei carichi e le emissioni prodotte dai forni.

E' possibile notare questo trend nella quasi totalità delle prove eseguite sul forno 1 e sul forno 2.

Il forno 3 invece non sembra essere soggetto a tale relazione. Infatti, in base ai risultati delle prove eseguite, tale forno produce una densità di potenza quasi sempre omogenea, anche variando i carichi.

Tali risultati sono imputabili al relativo poco riempimento (anche con carico massimo normato) della cavità in relazione agli altri forni testati.

Infatti, rispetto ai forni 1 e 2, la capacità interna sfruttabile del forno 3 risulta essere del 80% superiore a quella del forno 1, e del 50% circa rispetto al forno 2.

Considerando le distribuzioni spaziali dei dati, si è riscontrato per tutti e tre i forni una maggiore intensità delle emissioni prodotte nelle zone di misura SX e DX (e i loro intorno), nelle sezioni marginali dei forni misurati, cioè le sezioni AA, BB. Con l'avvicinarsi ai bordi dei forni (quindi sezioni A e B), i valori maggiori convergono verso la sezione di misura centrale. Nella sezione centrale si riscontrano generalmente i valori più alti d'intensità.

In base ai test eseguiti, il forno 2 è risultato il forno con maggiore intensità di emissioni. L'intensità di campo elettrico più alta rilevata, ottenuta inserendo il carico A nel forno, è stata rilevata nella sezione B del forno (quindi in corrispondenza del bordo inferiore), nel punto SX. Tali due coordinate individuano tale punto come lo spigolo inferiore sinistro del forno. I valori raggiunti in tale zona sono stati rilevati 11.49 V/m, corrispondenti a 0.35 W/m². In relazione ai limiti più cautelativi considerati per campo elettrico ed densità di potenza (60 V/m e 10 W/m²), tali valori rappresentano 19% circa e il 3,5% dei valori massimi sopra riportati. In base a tali risultati, non sono state eseguite misure relative ai valori di SAR, in quanto, con i valori massimi testati, si sono ricavati valori inferiori a frazioni dell'unità (0,0033 W/kg su massimo di 2-20 W/kg in base alla zona corporea considerata; il valore 0,0033 W/kg è stato ricavato utilizzando il valore massimo di campo 11.49 V/m, e considerando la densità e la conducibilità elettrica del tronco di un essere umano, rispettivamente 1025 kg/m³ e 0,3 S/m).

Le forme d'onda ottenute tramite i grafici delle prove sono esattamente ciò che la teoria prevede, nelle condizioni di onda piana e campo lontano. Il forno 2 presenta una forma d'onda differente rispetto ai forni 1 e 3, in quanto, per scelta dell'azienda produttrice, viene venduto senza il piatto girevole. L'effetto di tale scelta (e quindi di tecnologie differenti atte ad ottenere l'effetto del piatto girevole in sua assenza) è ben visibile nel grafico

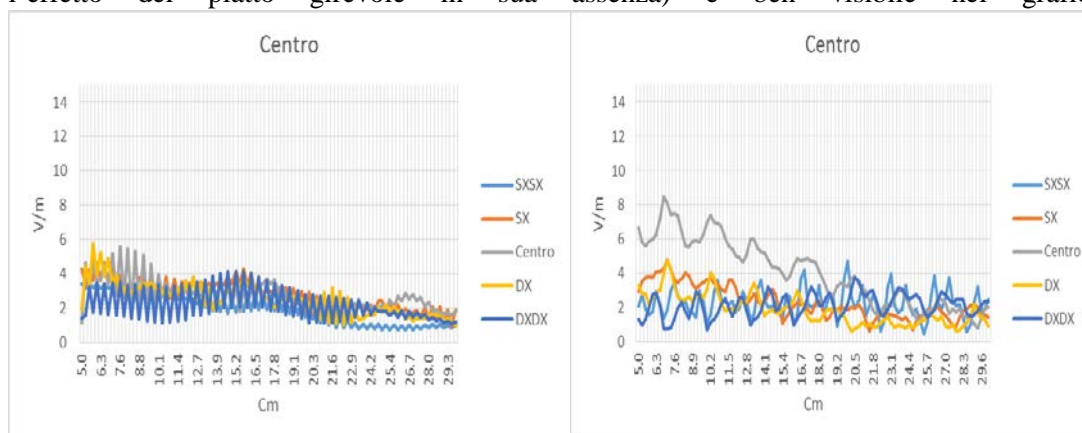


Fig. 6.2 Confronto fra forme d'onda prodotte dal forno 2 e dal forno 3

A sinistra, il forno 2 nella sezione di centro con carico B, a destra il forno 3 nelle medesime condizioni; nelle figure successive, le distribuzioni spaziali.

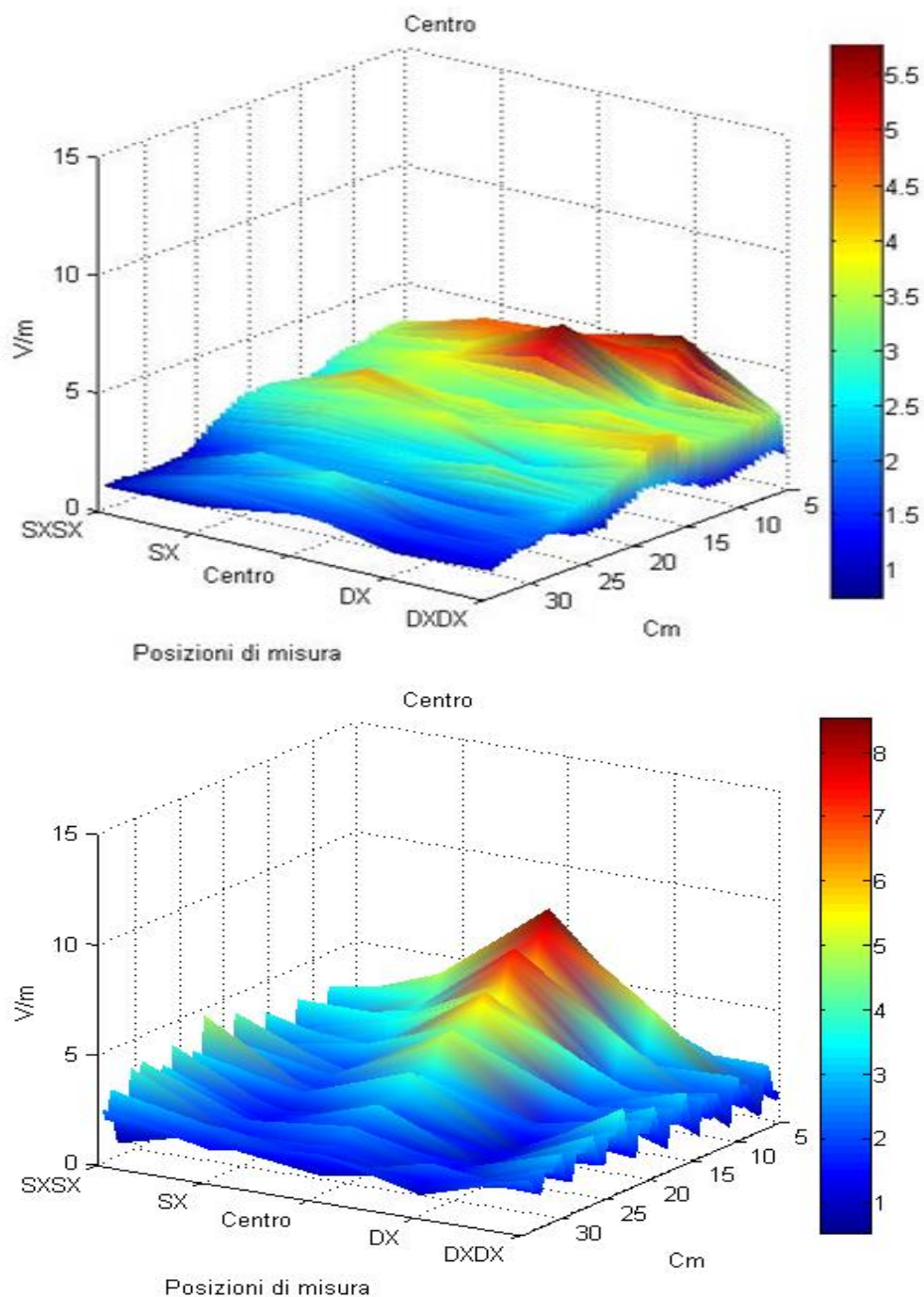


Fig. 6.3 Distribuzioni spaziali relative alla figura 6.2

Al fine di evidenziare meglio tale effetto, il forno 1 è stato testato con e senza piatto, utilizzando il carico normato B. Come è possibile notare nei record, la densità di potenza non cambia; ciò che cambia in maniera evidente è invece l'andamento del campo elettrico

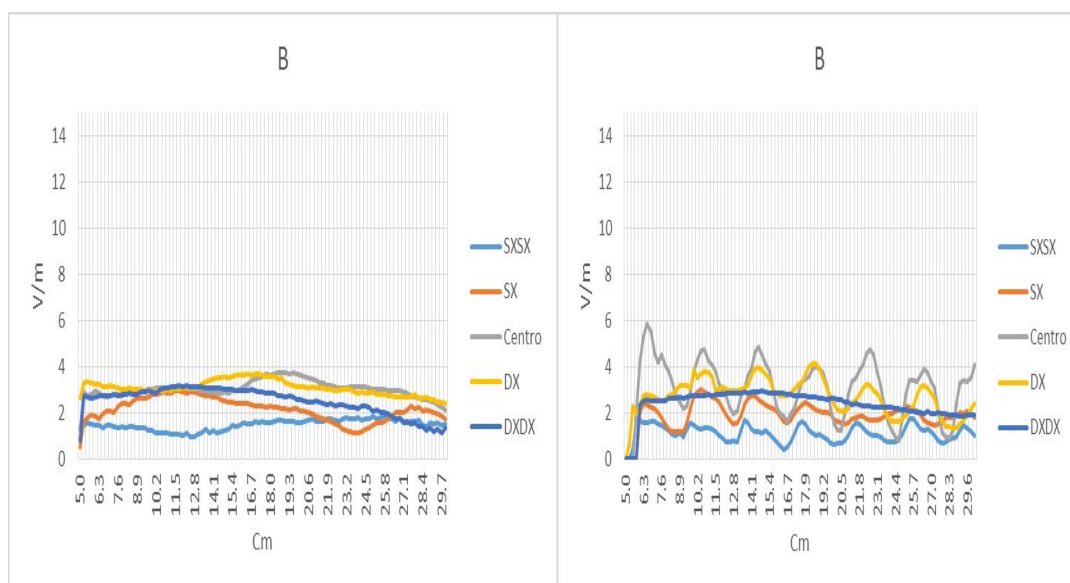


Fig. 6.4 Confronto fra forme d'onda prodotte dal forno 1, senza piatto girevole e con piatto girevole

A sinistra, forno 1, carico B, sezione di misura B senza piatto. A destra, forno 1, carico B, sezione di misura B, con piatto.

E' possibile notare che, senza piatto, i valori d'intensità di campo elettrico si attenuano linearmente in funzione della distanza di misura; il carattere sinusoidale dell'onda viene a mancare. In presenza di piatto girevole invece, quest'attenuazione mantiene il carattere sinusoidale. A livello di densità di potenza, tuttavia, il risultato è quasi identico:

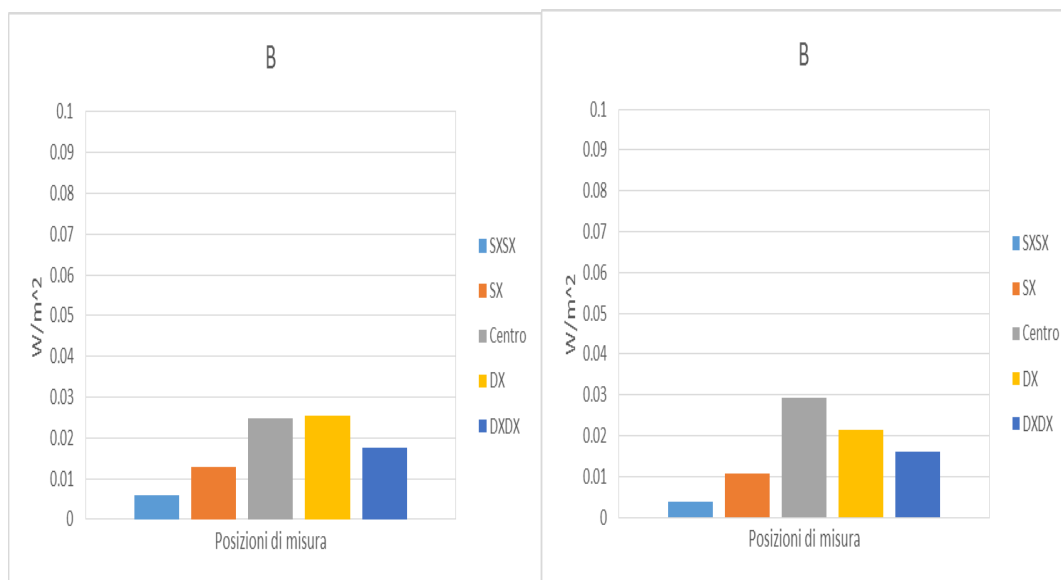


Fig. 6.5 Confronto fra densità di potenza prodotte dal forno 1, senza piatto girevole e con piatto girevole.

A sinistra, senza piatto, a destra con piatt

Conclusioni

Scopo di questa test è stato il test di forni a microonde per uso domestico, con attenzione alla radiazione elettromagnetica prodotta. Tale motivazione è derivata dallo scetticismo generale della società a riguardo l'argomento, nonché l'interesse scientifico nell'analisi della radiazione stessa, in virtù di precedenti studi analoghi su tecnologie diverse. I risultati ritrovati nei 250 test eseguiti sono stati incoraggianti.

I forni sono stati testati in condizione operative, cioè come se fossero utilizzati dall'operatore comune nella propria cucina di casa. Un effettiva variazione delle emissioni prodotte è stata riscontrata al variare dei carichi, tuttavia la radiazione prodotta da tutti e tre i forni testati è risultata ampiamente al di sotto dei limiti più cautelativi tenuti in considerazione. Ciò riflette l'ottimo stato dell'arte raggiunto nel campo della schermatura delle emissioni nei forni a microonde per uso domestico e quanto lo scetticismo generale intorno a questa tecnologia (ma soprattutto, riguardo ai danni che le microonde dovrebbero arrecare) abbia basi decisamente poco solide.

Inoltre, i forni testati appartengono a fasce di prezzo differenti: la cura dei progettisti nella schermatura dalle emissioni è risultata essere circa la stessa, valicando perciò le differenze di prezzo.

Un lavoro di misura ampio ed articolato come quello che è stato svolto, ha inoltre permesso di individuare, forno per forno, zone di maggiore emissione di campo rispetto ad altre. Tale lavoro, se eseguito dalle aziende produttrici, potrebbe portare un maggior numero di informazioni a riguardo l'emissione di radiazione elettromagnetica, e perciò, un miglioramento nell'abbattimento della stessa: ciò andrebbe a favore degli utilizzatori, che sarebbero messi in condizioni di utilizzo migliori di quelle (già ottime) odierne.

Ringraziamenti

Alla fine di questo lavoro di tesi, conclusione di un percorso universitario tanto affascinante quanto impegnativo, desidero innanzitutto, ringraziare la mia famiglia, per avermi incoraggiato nei momenti bui e festeggiato in quelli lieti: in particolare mamma Giusy e papà Giorgio (senza di lui, la struttura di misura non avrebbe preso vita), mio fratello Enrico, Raffaella e il piccolo Pietro. Alice, per donarmi i molti sorrisi da un po' di tempo a questa parte mi ritrovo sul viso, e per credere in me.

Inoltre, ringrazio l'Ing. Fernando Bressan, per il supporto ricevuto in questa tesi (e anche nella precedente!) e per avermi sopportato con le infinite domande che gli sottoponevo, a tutte le ore del giorno e della notte; L'Ing. PhD Marco Bullo e l'Ing. Nicola Lanza; il Professor Fabrizio Dughiero per avermi fatto conoscere questo interessante argomento di tesi; a tutte queste persone dico grazie.

Bibliografia

- [1] Bullo, M; Dughiero, F; Sieni, E; “Analysis of Strays EM Fields Generated by Induction Cooktops”. *IEEE Electromagnetic compatibility Magazine*, volume 2; 49-57, 2013;
- [2] Daels, “J.Microwave heating of the uterine wall during parturition”. *Obstet. Gynecol.*; 42:76–79; 1973.
- [3] Daels, “J. Microwave heating of the uterine wall during parturition.” *J. Microwave Power*; 11:166–167; 1976.
- [4] Källén, B.; Malmquist, G.; Moritz, U. “Delivery outcome among physiotherapists in Sweden: Is non-ionizing radiation a fetal hazard?” *Arch. Environ. Health*; 37:81–85; 1982.
- [5] Larsen, A. I.; Olsen, J.; Svane, O. “Gender-specific reproductive outcome and exposure to high-frequency electromagnetic radiation among physiotherapists”. *Scand. J. Work Environ. Health*; 17:324–329; 1991.
- [6] Oueellet-Hellstrom, R.; Stewart, W. F. “Miscarriages among female physical therapists, who report using radio- and microwave-frequency electromagnetic radiation.” *Am. J. Epidemiol.*; 138:775–786; 1993
- [7] Cohen, B. H.; Lillienfield, A. M.; Kramer, A. M.; Hyman, L. C. C. “Parental factors in Down’s syndrome: results of the second Baltimore case control study” *Population cytogenetics —studies in humans* Hook, E. B; Porter, I. H., eds. New York, Academic Press; 301–352; 1977.
- [8] Barron, C. I.; Baraff, A. “A. Medical considerations of exposure to microwaves (radar)”. *J. Am. Med. Assoc.*; 168:1194–1199; 1958.
- [9] Robinette, C. D.; Silverman, C.; Jablon, S. “Effects upon health of occupational exposure to microwave radiation (radar)”. *Am. J. Epidemiol.*; 112:39–53; 1980.

- [10] Selvin, S.; Schulman, J.; Merrill, D. W. “Distance and risk measures for the analysis of spatial data: a study of childhood cancers.” *Soc. Sci. Med.* 34:769–777; 1992
- [11] Beall, C.; Delzell, E.; Cole, P.; Brill, I. “Brain tumors among electronics industry Workers”. *Epidemiology*; 7:125–130; 1996.
- [12] Rothman, K. J.; Chou, C. K.; Morgan, R.; Balzano, Q.; Guy, A. W.; Funch, D. P.; Preston-Martin, S.; Mandel, J.; Steffens, R.; Carlo, G. “Assessment of cellular telephone and other radio frequency exposure for epidemiologic research”. *Epidemiology*; 7:291–298; 1996a.
- [13] International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee. “Guidelines on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz”. *Health Phys.*; 54:115–123; 1988.
- [14] Frey, A. M.; Messenger, R. “Human perception of illumination with pulsed ultra-high-frequency electromagnetic radiation”. *Science*; 181:356–358; 1973.
- [15] Xi, W.; Stuchly, M. A. “High spatial resolution analysis of electric currents induced in men by ELF magnetic fields”. *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*; 9:127–134; 1994.
- [16] Wieckowski, A; Korpas, P; Kryszicki, M; Dughiero, F; Bullo, M; Bressan, F; Farger, C; “Efficiency optimization for phase controlled multi-source microwave oven”. *International journal of applied electromagnetics and mechanics*, vol. 44, 235-241; 2014.

- [17] AA.VV. “Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell’intervallo di frequenza 10 kHz – 300 GHz, con riferimento all’esposizione umana”; *CEI 211-7*, Milano 2001.
- [18] AA.VV. “Metodi di misura per campi elettromagnetici degli apparecchi elettrici di uso domestico e similari con riferimento all’esposizione umana”; *CEI EN 62233*, pag. 12-13; Milano 2009.
- [19] AA.VV. “Sicurezza degli apparecchi elettrici d’uso domestico e similare – Sicurezza: Parte 1 Norme generali”; *CEI EN 60335-1*, Milano, maggio 2013.
- [20] AA.VV. “Sicurezza degli apparecchi elettrici d’uso domestico e similare – Parte 2 Norme particolari per forni a microonde, compresi forni a microonde combinati”, *CEI EN 60335-2-25*, Milano, maggio 2013.
- [21] AA.VV. “Sicurezza degli apparecchi elettrici d’uso domestico e similare – Parte 2 Norme particolari per forni a microonde per uso collettivo”, *CEI En 600335-2-90*, Milano, ottobre 2007.
- [22] W. Abdul Razzaq, R. Bushey, G. Winn, “Leakage of microwave ovens”, www.iopscience.iop.org, 2001.
- [23] Nooradzianie Muhammad Zin, Mohammad Zarar Mohamed Jenu, Farhana Ahmad Po’ad, “Measurements and Reduction of Microwave Oven Electromagnetic Leakage”, IEEE International RF and Microwave Conference, Serembram, Malasya, 12-14 Dicembre 2011.
- [24] Bressan, F; Bullo, M. Dughiero, F; “Lezioni di riscaldamento a microonde” *Corso di tecnologie e processi elettrotermici*, Gennaio 2013