

# Sorgenti in ambito professionale: fornelli ad induzione e ricarica wireless – Interferenza in dispositivi elettronici cardiaci impiantabili

T. Campi<sup>1</sup>, G. Calcagnini<sup>2</sup>, F. Censi<sup>2</sup>, E. Mattei<sup>2</sup>, C. Vivarelli<sup>2,3</sup>, E. Mattei<sup>2</sup>, W. Boumerdassi<sup>1</sup>, M. Rotellini<sup>1</sup>, G. Tatangelo<sup>1</sup>, **M. Feliziani<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Università dell'Aquila, L'Aquila, Dipartim. di Ingegneria Industriale e dell'Informazione ed Economia

<sup>2</sup> Istituto Superiore di Sanità, Dipart. di malattie cardiovascolari, endocrino-metaboliche e invecchiamento

<sup>3</sup> Università di Roma Tor Vergata, Dipart. di Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica

Contatti: [mauro.feliziani@univaq.it](mailto:mauro.feliziani@univaq.it)

# Sommario

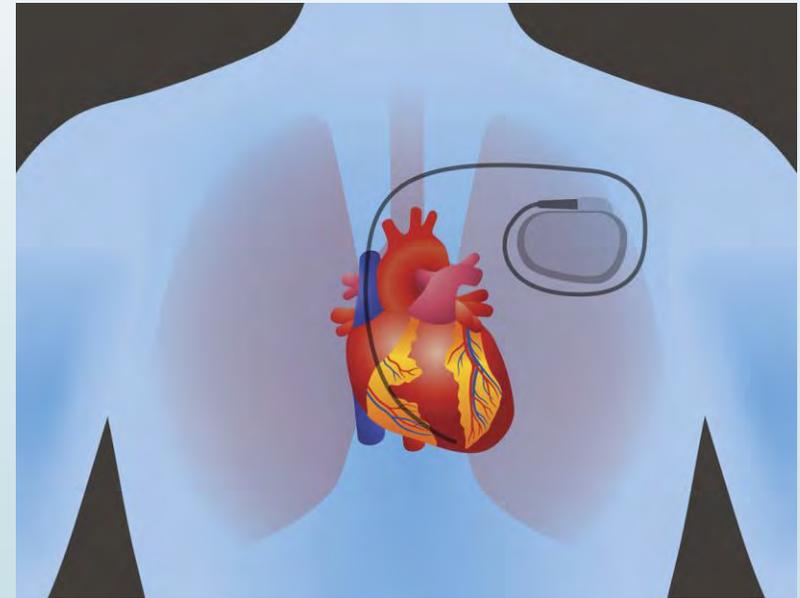
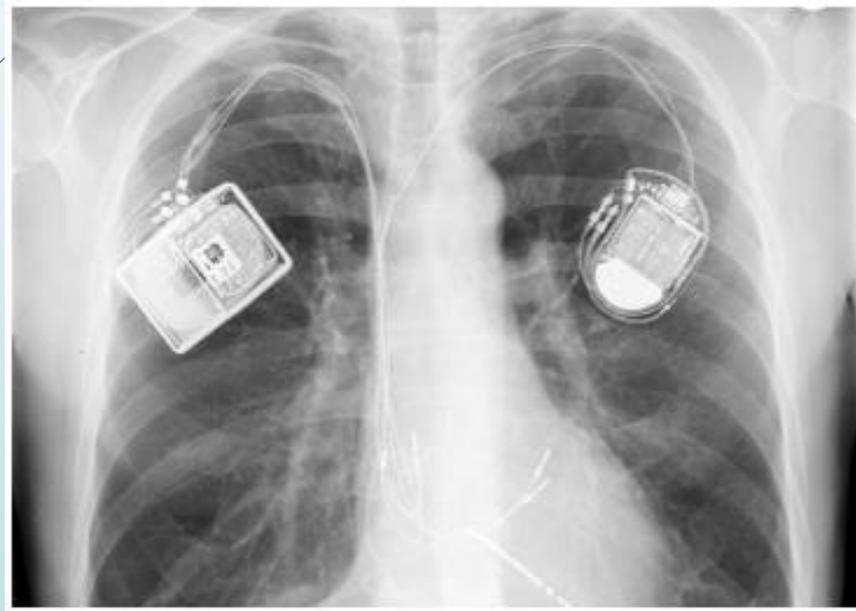
- Introduzione
- Dispositivi elettronici cardiaci impiantabili (CIED)
- Modello matematico
  - Calcolo della tensione indotta sulla spira formata dall'elettrocattetero di un CIED
- Applicazioni
  - Piani cottura ad induzione
  - Sistemi di ricarica wireless per dispositivi elettronici di consumo
- Conclusioni

## Introduzione

- Il crescente uso dei dispositivi elettronici cardiaci impiantabili per pazienti cardiopatici aumenta il rischio di interferenza elettromagnetica (EMI) che può causare malfunzionamenti o danni al dispositivo
- L'uso di campi elettromagnetici a frequenza intermedia (IF), tipicamente compresa tra 1 kHz e 10 MHz, da parte di tecnologie emergenti come il Wireless Power Transfer (WPT) è in rapido aumento.
- L'impatto delle sorgenti IF sui CIED è ancora poco esplorato e quindi necessita di studi approfonditi.

## Introduzione - 2

- L'EMI può causare malfunzionamenti, danni o riscaldamento del dispositivo CIED, oppure causare un aumento locale della densità di corrente elettrica indotta nel corpo umano.



Dispositivi CIED con elettrocateteri

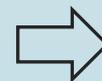
## Norma ISO 14117

- La norma specifica le metodologie di prova per la valutazione della compatibilità elettromagnetica (EMC) dei CIED che forniscono una o più terapie per la bradicardia, tachicardia e risincronizzazione cardiaca in combinazione con sistemi di elettrocatereteri transvenosi.
- La norma specifica i limiti prestazionali di questi dispositivi, che sono soggetti a interazioni con gli emettitori EM nelle due seguenti gamme:

$$0 \text{ Hz} \leq f < 385 \text{ MHz}; \quad 385 \text{ MHz} \leq f \leq 3 \text{ 000 MHz}$$

- La conformità alle linee guida ICNIRP non garantisce necessariamente la compatibilità EM dei CIED. In alcuni casi, i livelli di immunità EM richiesti per i CIED sono inferiori a quelli dei limiti ICNIRP.

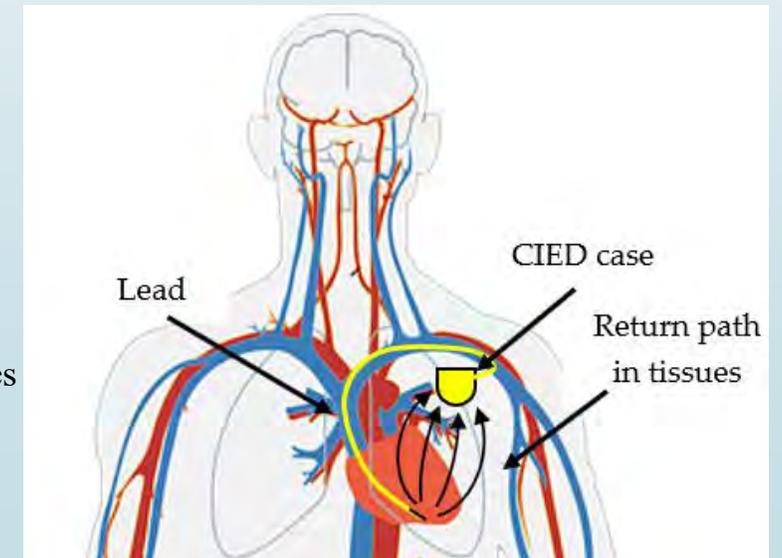
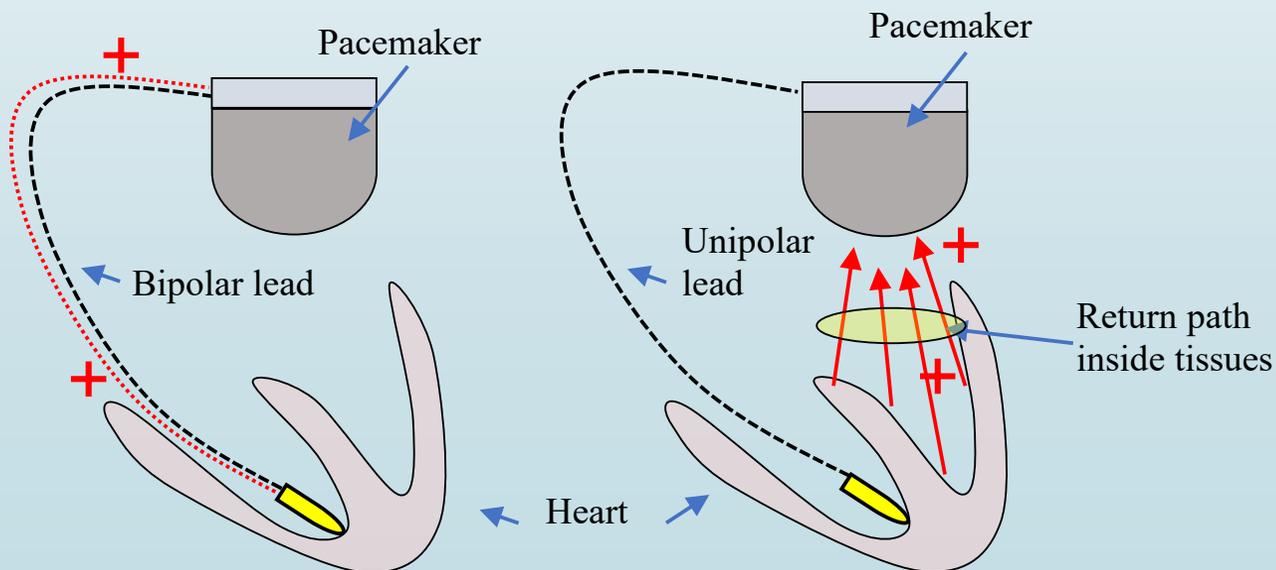
- Il limite più stringente per sorgenti IF è la tensione picco-picco  $V_{pp}$  alla porta d'ingresso del CIED



$16,6 \text{ Hz} \leq f \leq 1 \text{ kHz}$	2 mV
$1 \text{ kHz} \leq f \leq 3 \text{ kHz}$	$2 \text{ mV} \times (f / 1 \text{ kHz})^2$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 150 \text{ kHz}$	$6 \text{ mV} \times (f / 1 \text{ kHz})$

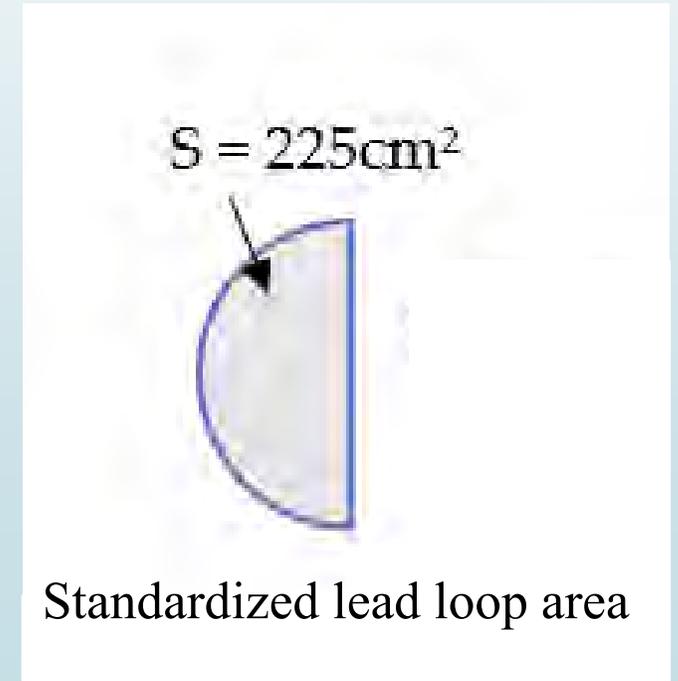
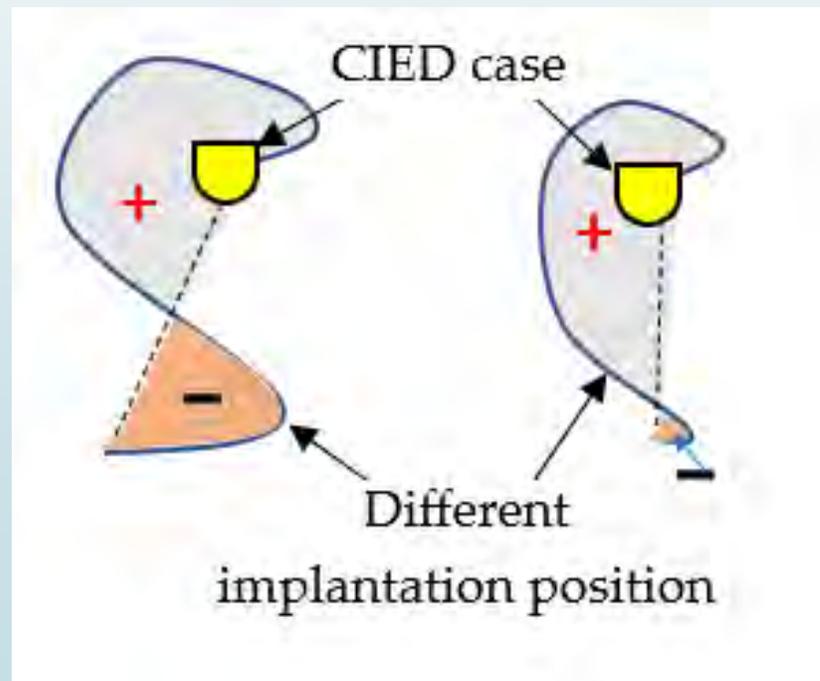
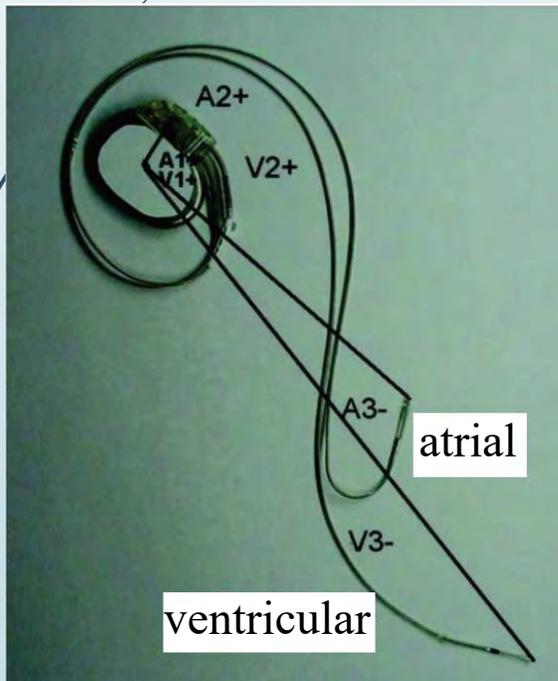
## CIED con Elettrocatteteri

- Gli elettrocatteteri possono essere unipolari o bipolari. In modalità unipolare il pacemaker (PM) ha il catodo sulla punta dell'elettrocatteteri, situato all'interno del cuore, mentre l'anodo è l'involucro metallico del PM.
- Il percorso di ritorno della corrente all'interno del corpo umano non è chiaramente definito, tuttavia si presume che sia una linea retta immaginaria tra la punta dell'elettrodo (anello) e l'involucro metallico del CIED.



## Lead loop area

- La norma ISO 14117 individua una condizione di caso peggiore da adottare nei test e nelle simulazioni, con l'elettrocattetero che forma un anello chiuso (*lead loop*) di area  $S = 225 \text{ cm}^2$ . Assumendo una configurazione planare e semicircolare per la superficie  $S$ , il raggio  $r$  di questa area semicircolare è  $r = (2S / \pi)^{1/2} = 11.96 \text{ cm}$



## Modello matematico

- È stata sviluppata una procedura numerica basata sugli elementi finiti per risolvere equazioni di campo magnetico quasi-stazionario.
- Il potenziale vettore magnetico  $\mathbf{A}$  ed il potenziale elettrico  $V$  possono essere ottenuti dalla soluzione combinata della legge di Ampere in forma differenziale e dall'equazione di continuità della densità di corrente in termini di potenziali  $\mathbf{A}$  e  $V$ :

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) + \sigma (j\omega \mathbf{A} + \nabla V) - \mathbf{J}_s = 0$$

$$\nabla \cdot (\sigma (j\omega \mathbf{A} + \nabla V) - \mathbf{J}_s) = 0$$

## Modello matematico (continuazione)

- Dopo la soluzione agli elementi finiti, l'induzione magnetica  $\mathbf{B}$  si ottiene da:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

- La tensione indotta a vuoto  $V$  sulla spira formata dall'elettrocattetero si ottiene dalla legge di Faraday

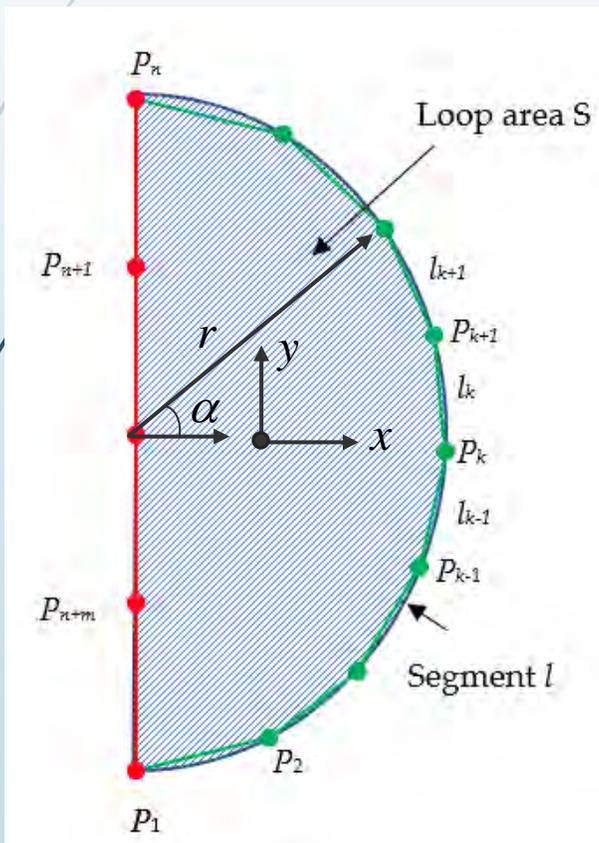
$$V = -j\omega\phi$$

- $\phi$  è il flusso magnetico prodotto dalla sorgente magnetica IF che si concatena con la spira dell'elettrocattetero di area  $S$  e di contorno  $l$  data da

$$\phi = \oint_l \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}$$

# Metodo di calcolo

Discretizzazione del contorno della spira dell'elettrocaterete



Coordinate del  $k$ -simo punto sul contorno di  $S$

$$\begin{cases} x_k = r \cos(\alpha_k) \\ y_k = r \sin(\alpha_k) \\ z_k = z_0 \end{cases}$$

Componenti cartesiane della tangente nel  $k$ -simo punto

$$\begin{cases} t_{x,k} = -\sin(\alpha_k) \\ t_{y,k} = \cos(\alpha_k) \\ t_{z,k} = 0 \end{cases}$$

Flusso concatenato

$$\phi \approx \sum_{k=1}^{n+m} A_{tk} l_k$$

$$l_k = \sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2 + (z_{k+1} - z_k)^2}$$

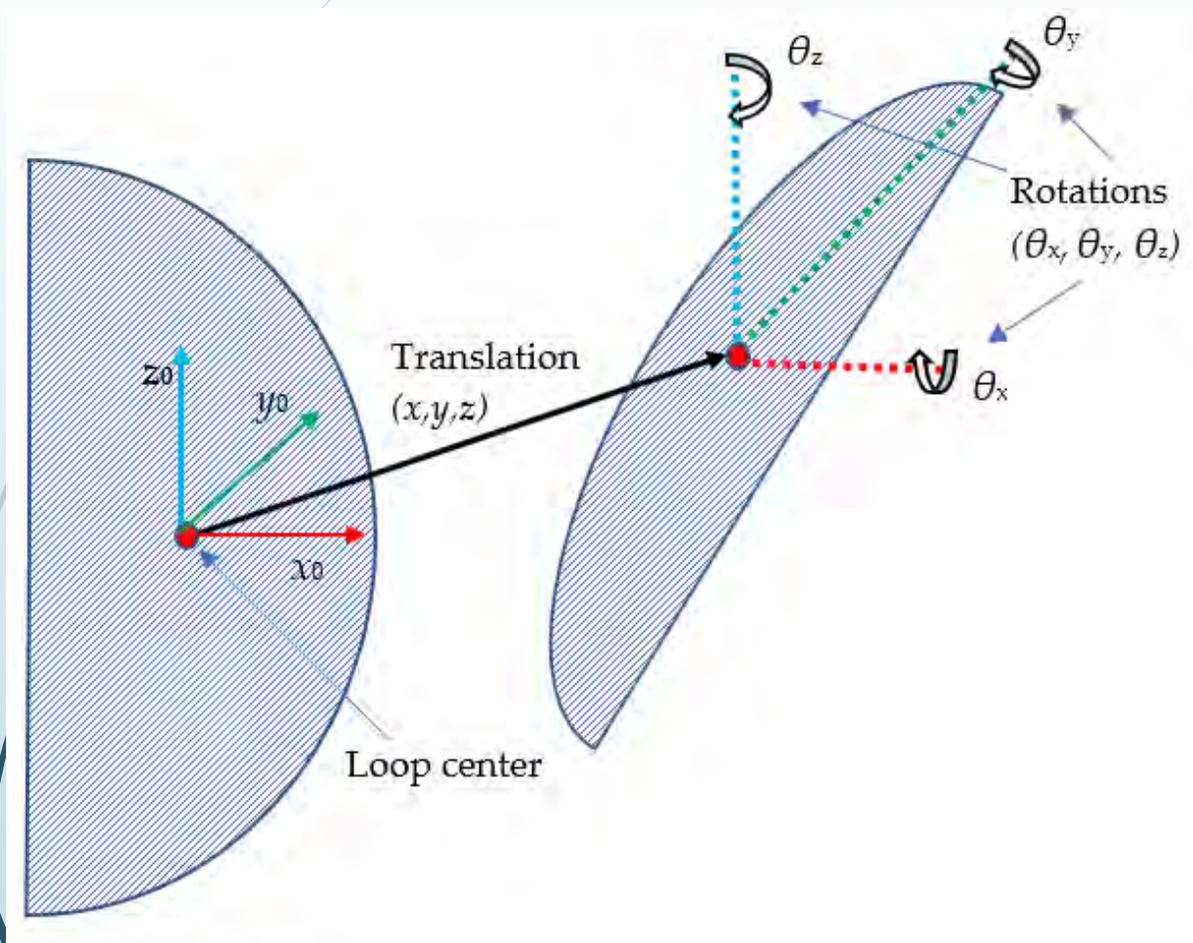
$$A_{tk} = \frac{1}{2} (\mathbf{A}_k \cdot \mathbf{t}_k + \mathbf{A}_{k+1} \cdot \mathbf{t}_{k+1})$$

$\mathbf{A}_k$  calcolato con una simulazione MQS

Tensione indotta sulla spira

$$V = -j\omega\phi$$

# Algoritmo di roto-traslazione



$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}$$

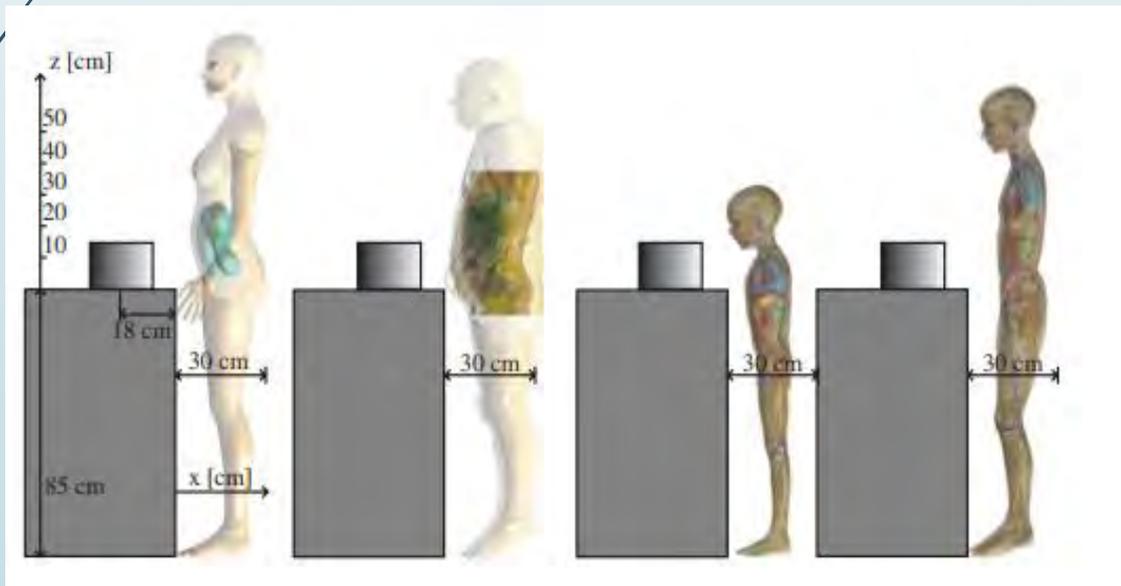
← **Vettore di traslazione**

**Matrice di rotazione**

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix}$$

## Applicazione 1: Piani cottura ad induzione

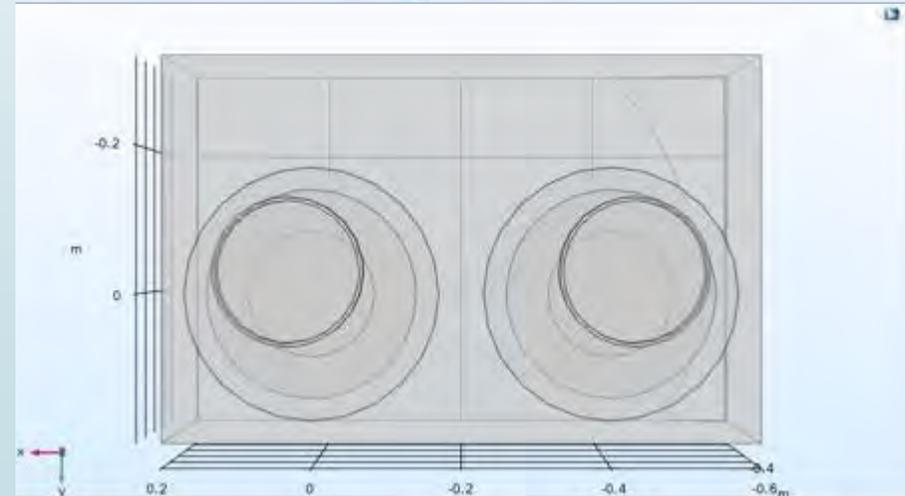
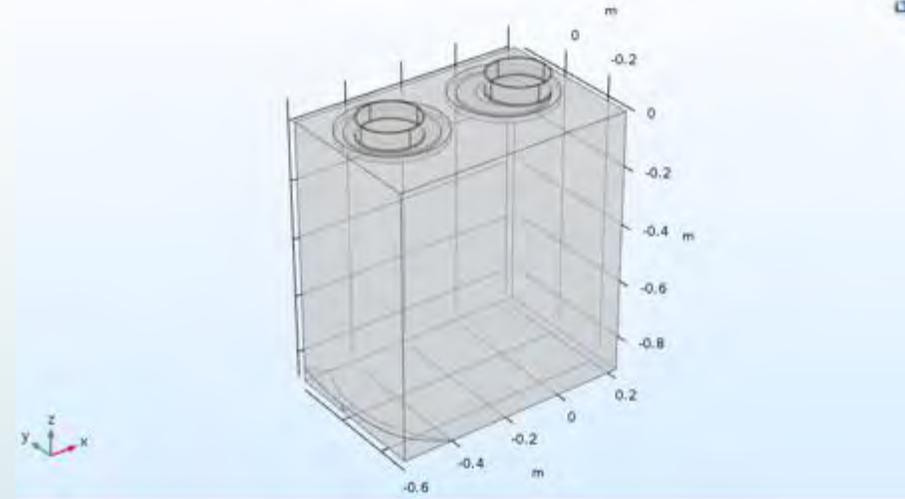
- Si sono analizzati numerosi scenari variando la distanza, l'inclinazione e l'altezza della potenziale vittima, cioè il portatore di CIED, rispetto ai fornelli.
- Una pentola di piccole dimensioni è il caso peggiore per i piani cottura a induzione per quanto riguarda l'emissione di campo magnetico nell'ambiente



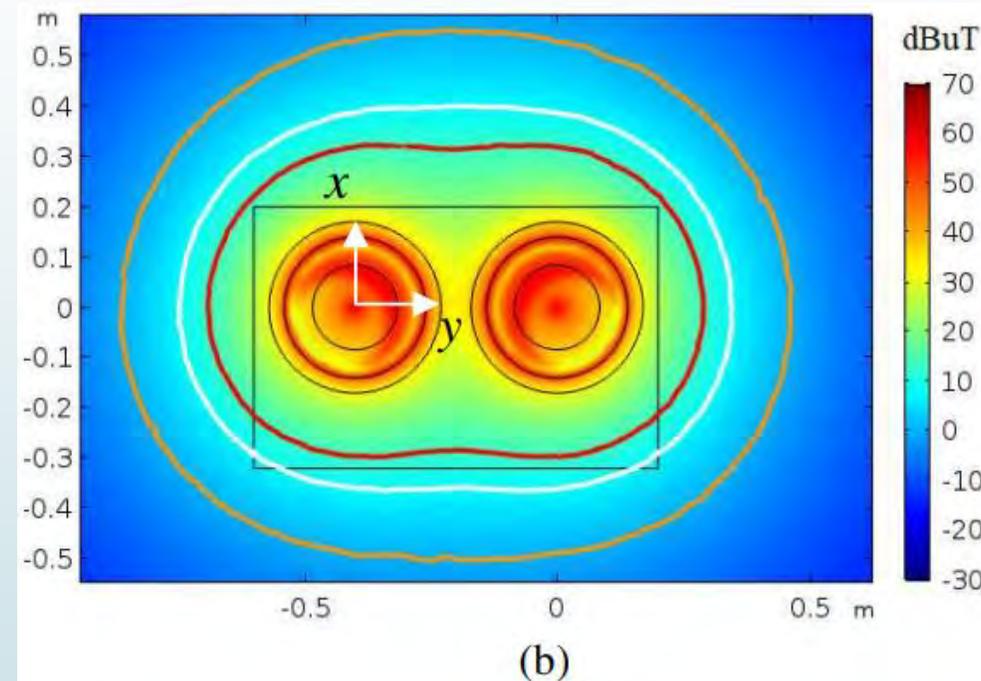
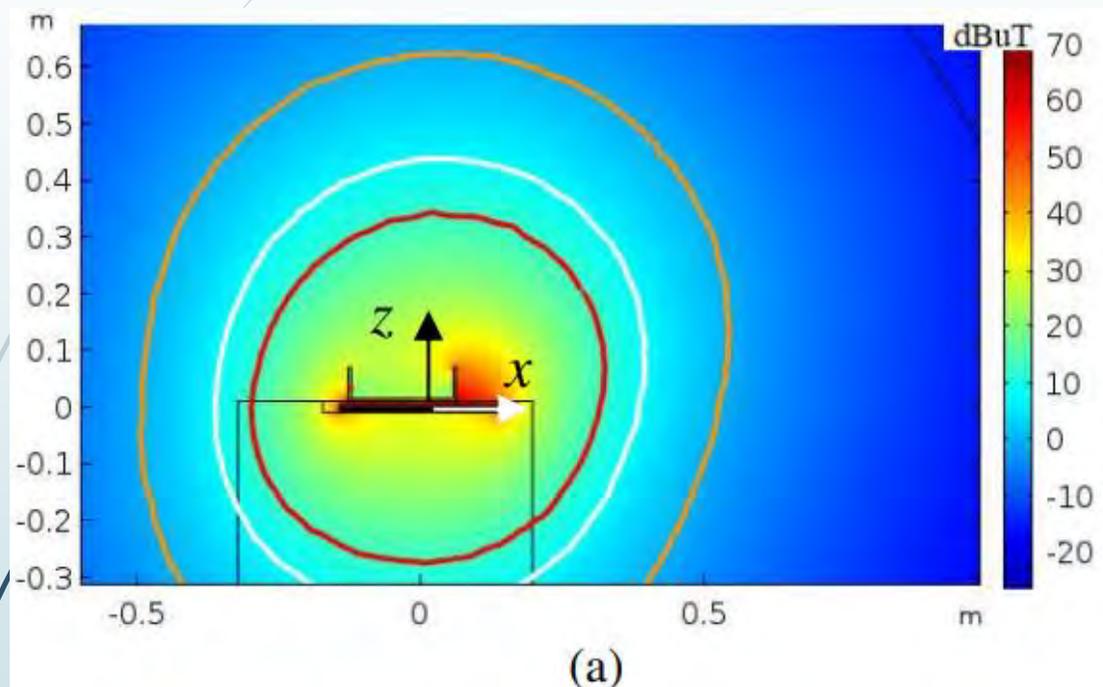
Analisi EMF

## Caso peggiore per piani cottura ad induzione

- 2 fornelli ad induzione
- bobina circolare di raggio  $R = 14$  cm
- diametro del filo  $d = 5.6$  mm
- numero di spire  $N = 25$
- frequenza  $f = 24$  kHz
- massima potenza ( $I = 17$  A)
- 2 pentole cilindriche di raggio  $r = 10$  cm e altezza  $h = 6$  cm
- I fornelli sono posti sopra una lastra di vetro (5 mm di spessore) e un disco di ferrite (3 mm di spessore)
- Le pentole non sono centrate sui fornelli



# Applicazione 1: Calcolo dell'induzione magnetica



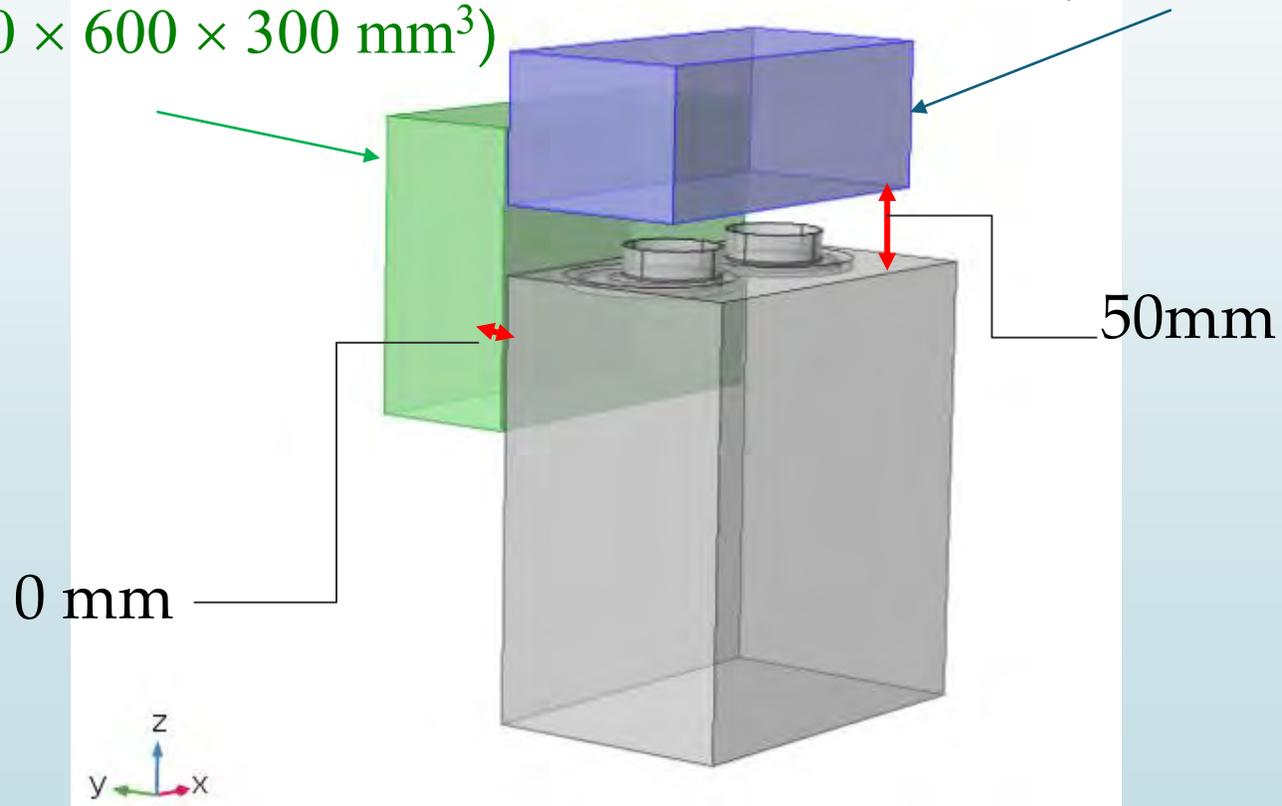
Induzione magnetica in  $\text{dB}\mu\text{T}$ . Vista laterale (a), vista dall'alto (b)

— 6.25  $\mu\text{T}$ ;      — 14.7  $\mu\text{T}$  (derivati dall'ISO 14117);      — 27  $\mu\text{T}$

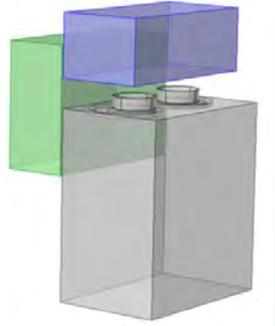
# Calcolo della tensione indotta

Regione 1 di fronte ai fornelli  
( $v_{x1} \times v_{y1} \times v_{z1} = 800 \times 600 \times 300 \text{ mm}^3$ )

Regione 2 sopra i fornelli  
( $v_{x2} \times v_{y2} \times v_{z2} = 400 \times 400 \times 200 \text{ mm}^3$ )

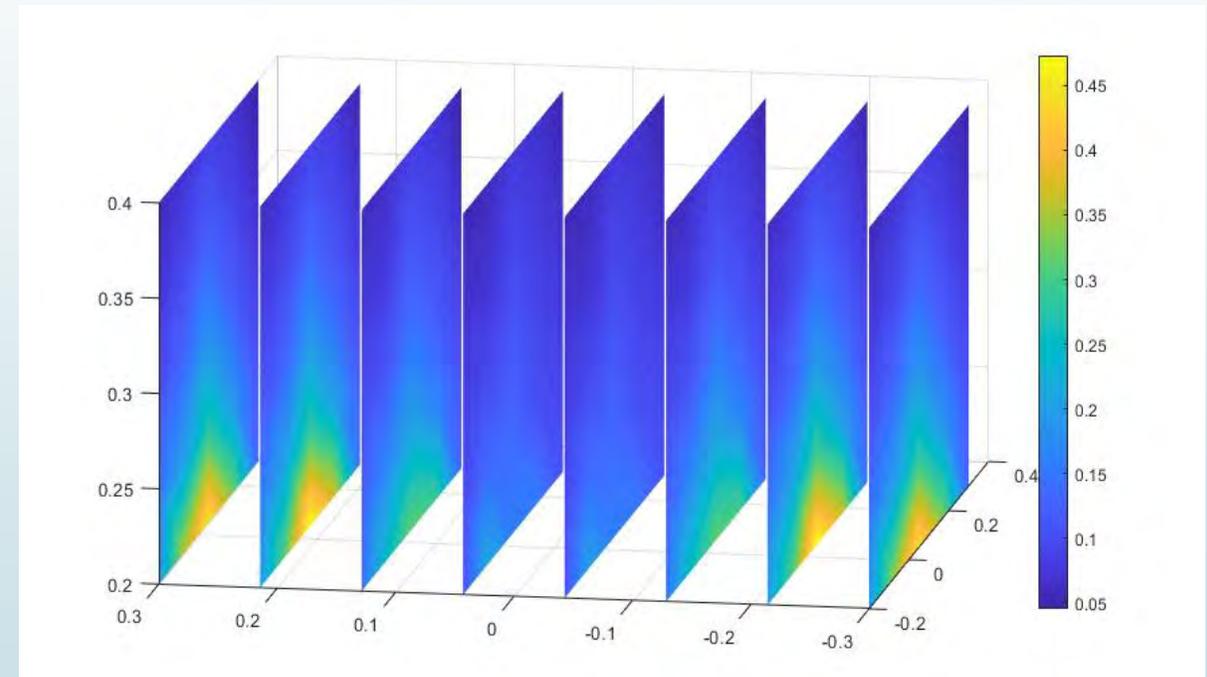
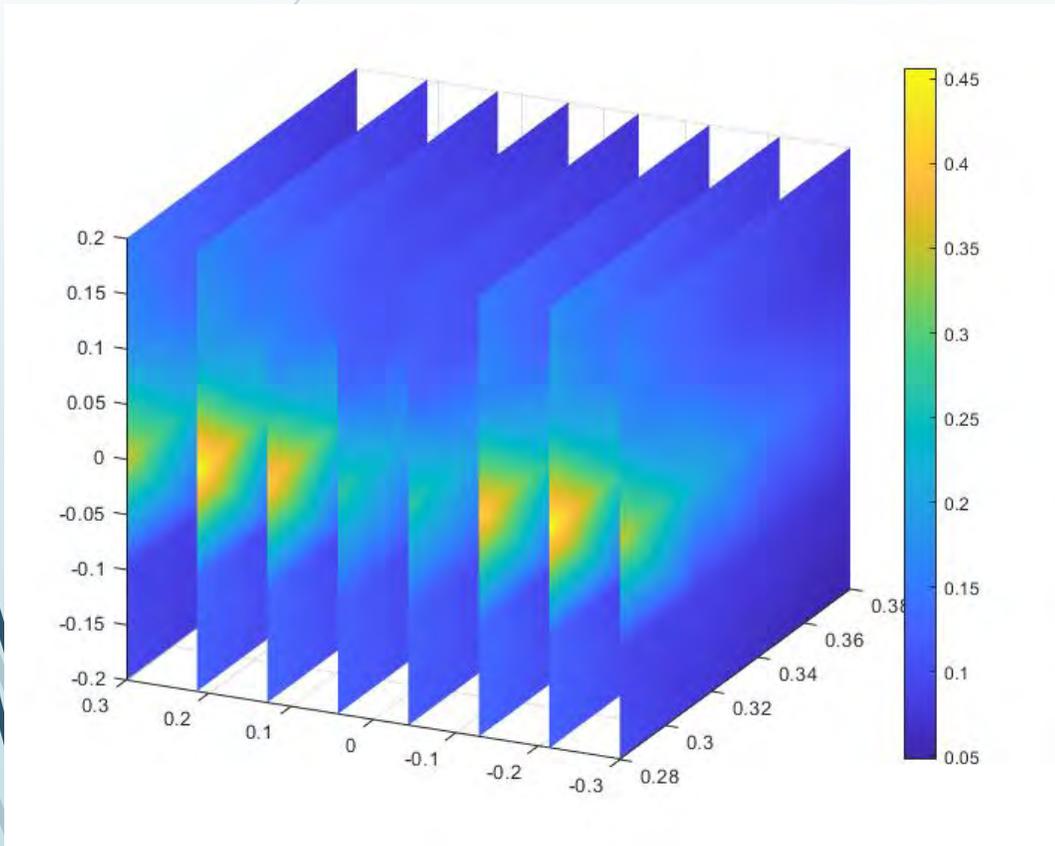


# Risultati di tensione indotta



Region 1:  $V_{pp\ max} = 427\ mV$

Region 2:  $V_{pp\ max} = 444\ mV$

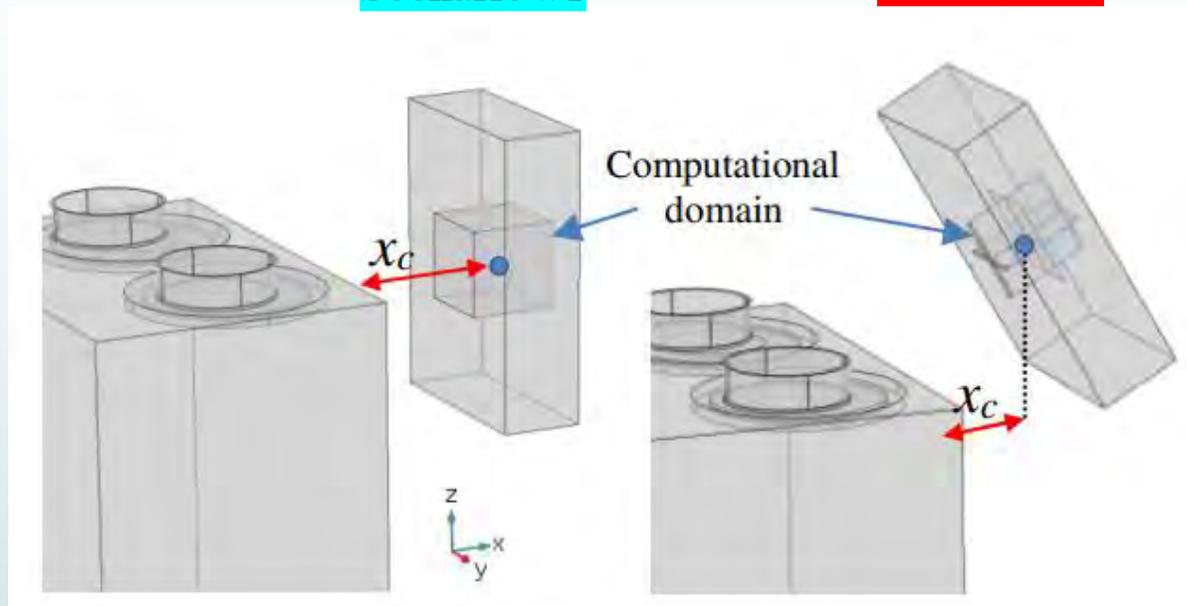


ISO 14117 limit: 144 mV

# Tensione indotta in uno scenario reale

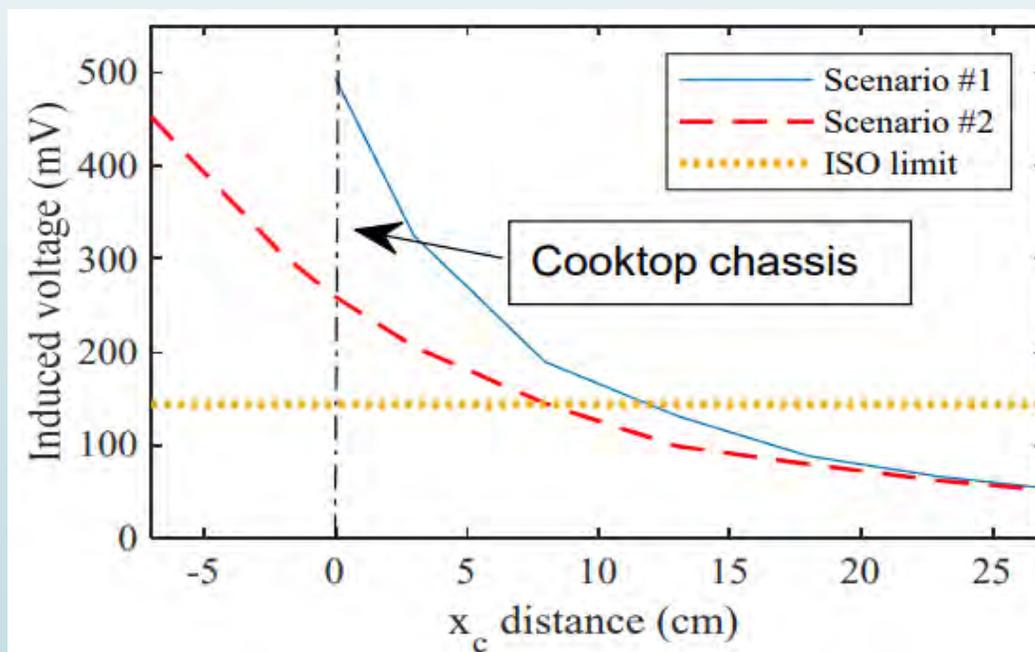
Scenario #1

Scenario #2



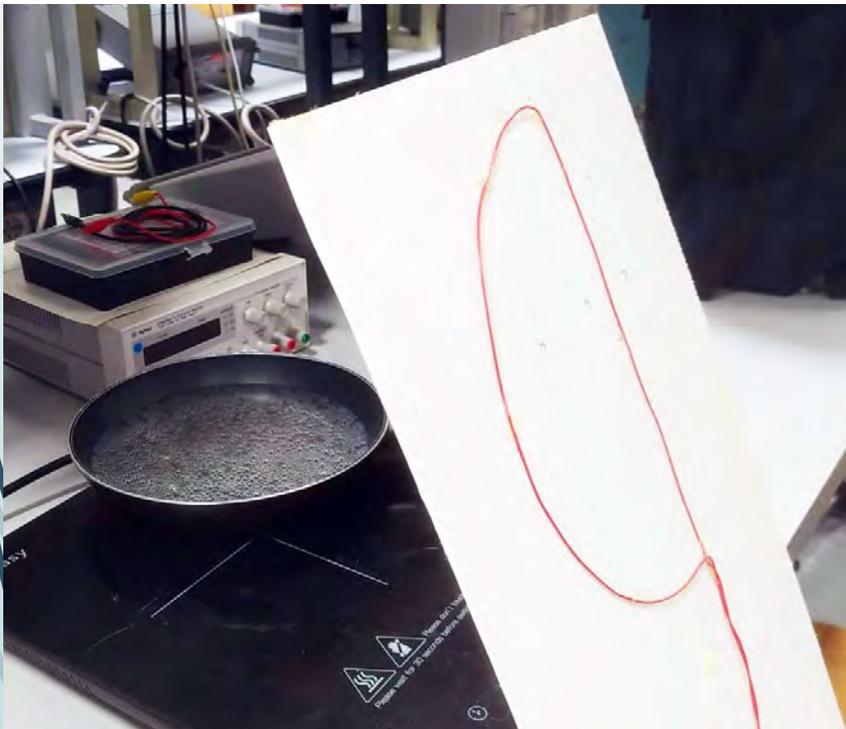
- I due scenari per il calcolo della tensione indotta sono con angolo di inclinazione di  $0^\circ$  (Scenario #1) e  $30^\circ$  (Scenario #2) rispetto all'asse verticale

- Si supera il limite ISO  $V_{pp} = 144 \text{ mV}$ .
- Per lo scenario n. 1 quando la distanza dal bruciatore è inferiore a  $x_c = 12 \text{ cm}$ .
- Per lo scenario n. 2 meno quando la distanza dal bruciatore è di  $x_c = 7 \text{ cm}$

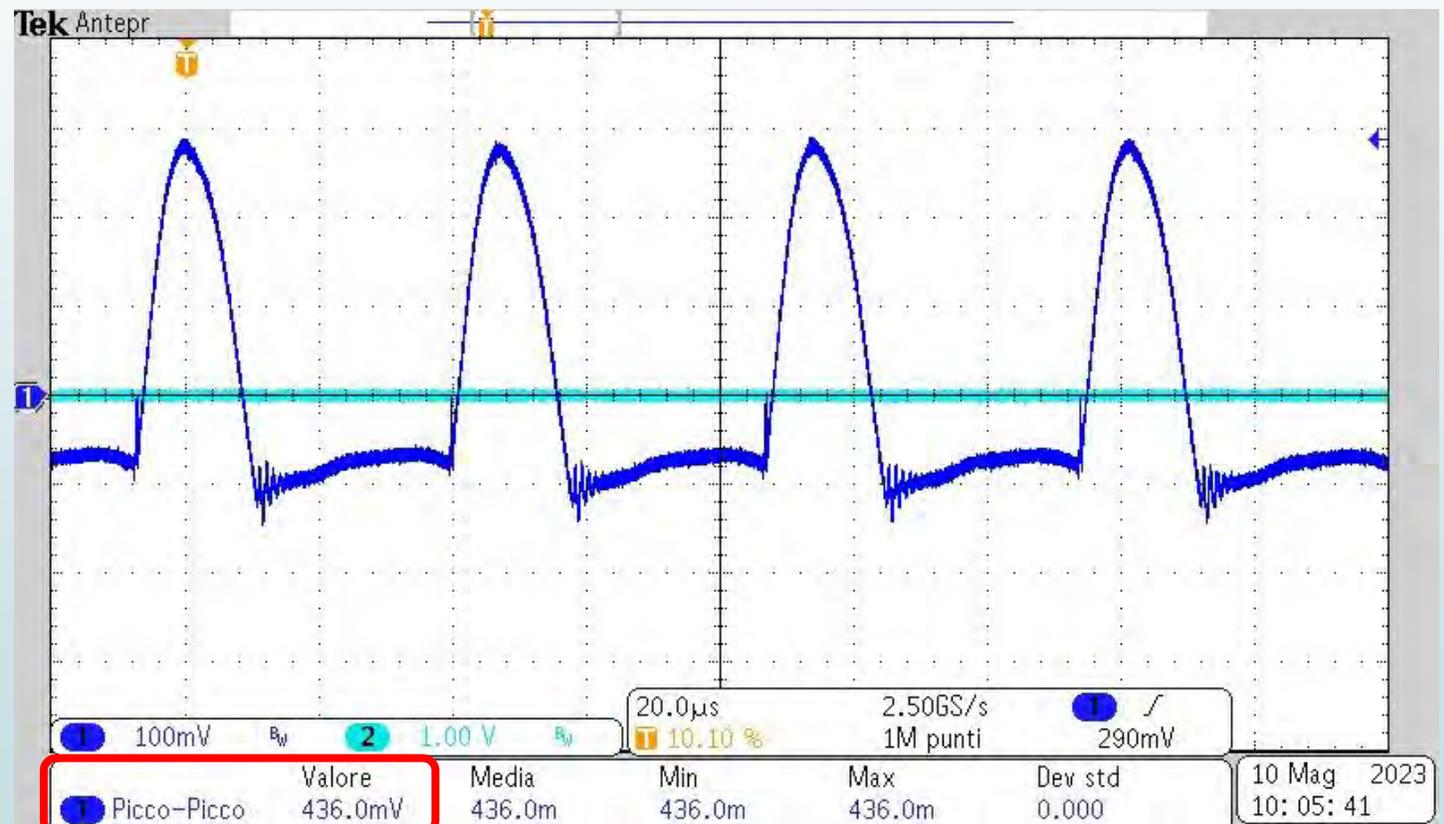


# Misura della tensione indotta

- Setup misure = setup simulazione
- Loop semicircolare con superficie  $S = 225\text{cm}^2$



## Andamento nel tempo della tensione indotta nel lead



$$V_{\text{ind}} = 436\text{mV}$$

## Sistemi WPT per dispositivi elettronici di consumo



- I sistemi WPT adottati nei sistemi commerciali per la ricarica delle batterie dell'elettronica di consumo (smartphone, tablet, ecc.) si basano sulla tecnologia induttiva risonante
- *Qi* è lo standard più diffuso per i sistemi WPT di bassa e media potenza
- Gamma di potenza: 5-120 W
- Gamma di frequenza 80-300 kHz

# Sistema *Qi* del Wireless Power Consortium (WPC)

- *Qi* definisce:
  - Parameteri elettrici e geometrici della bobina
  - Circuiti elettronici e massima corrente



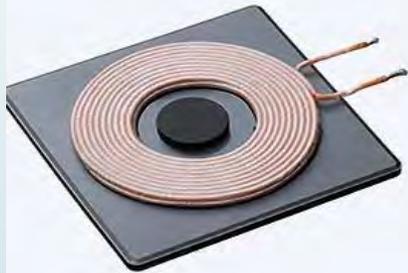
Sorgente di campo magnetico



Specifica WPC	A1-single coil
<b>Maker</b>	TDK
<b>Inductance [<math>\mu\text{H}</math>]</b>	24
<b>Maximum DC resistance [<math>\Omega</math>]</b>	0,1
<b>Diameter [mm]</b>	43
<b>Height [mm]</b>	5,6
<b>Magnet size [mm]</b>	12,5 × 2
<b>Number of turns</b>	20
<b>Weight [g]</b>	96,388

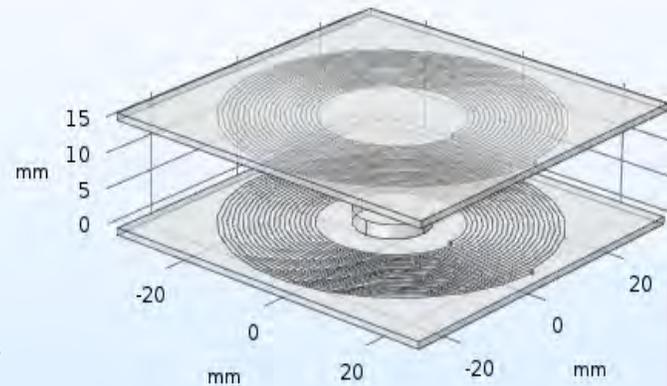
# Modello per il calcolo del campo magnetico

## Configurazione del sistema

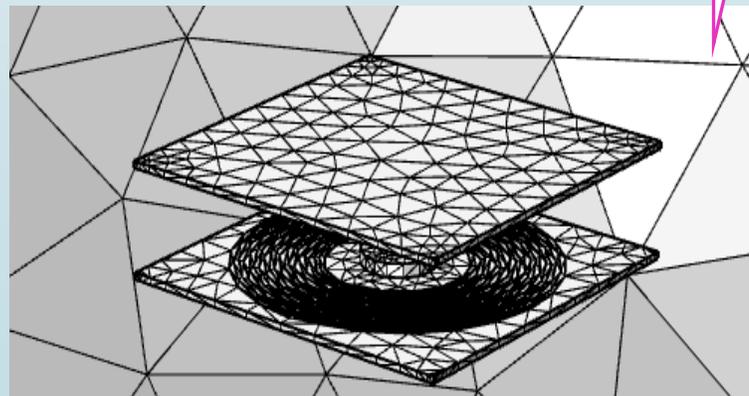


- *Qi* standard system
- 5W output power
- Coil diameter: 43mm
- RMS coils current: 2A

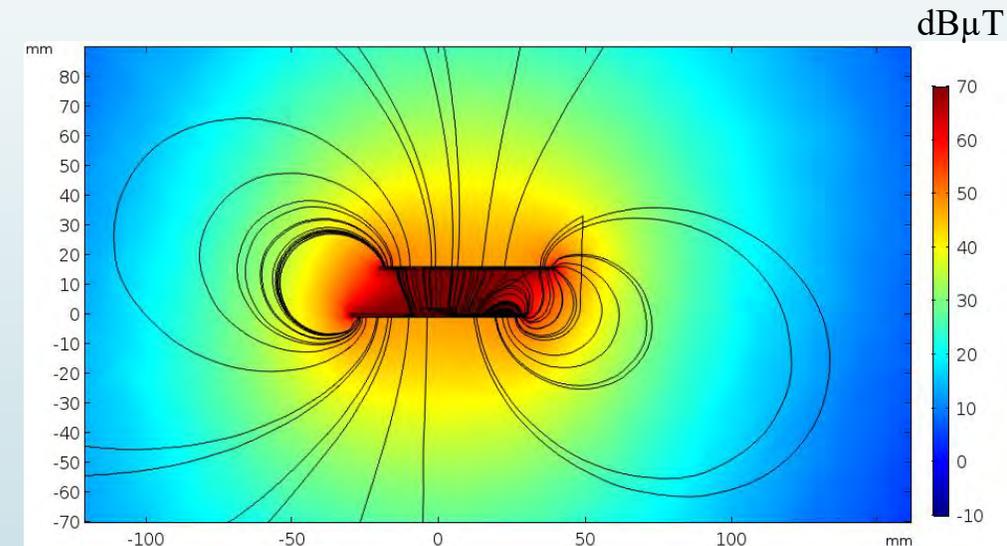
## Simulazione numerica 3D



## Discretizzazione



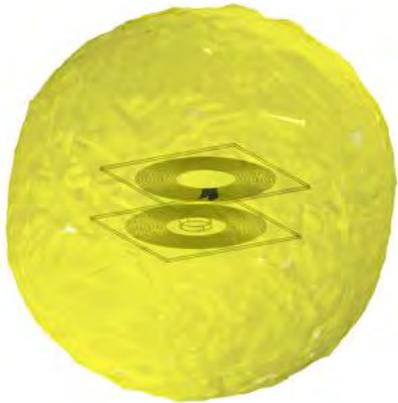
## Calcolo del campo magnetico



# Risultati di induzione magnetica

Volumi di rispetto

**27  $\mu\text{T}$**



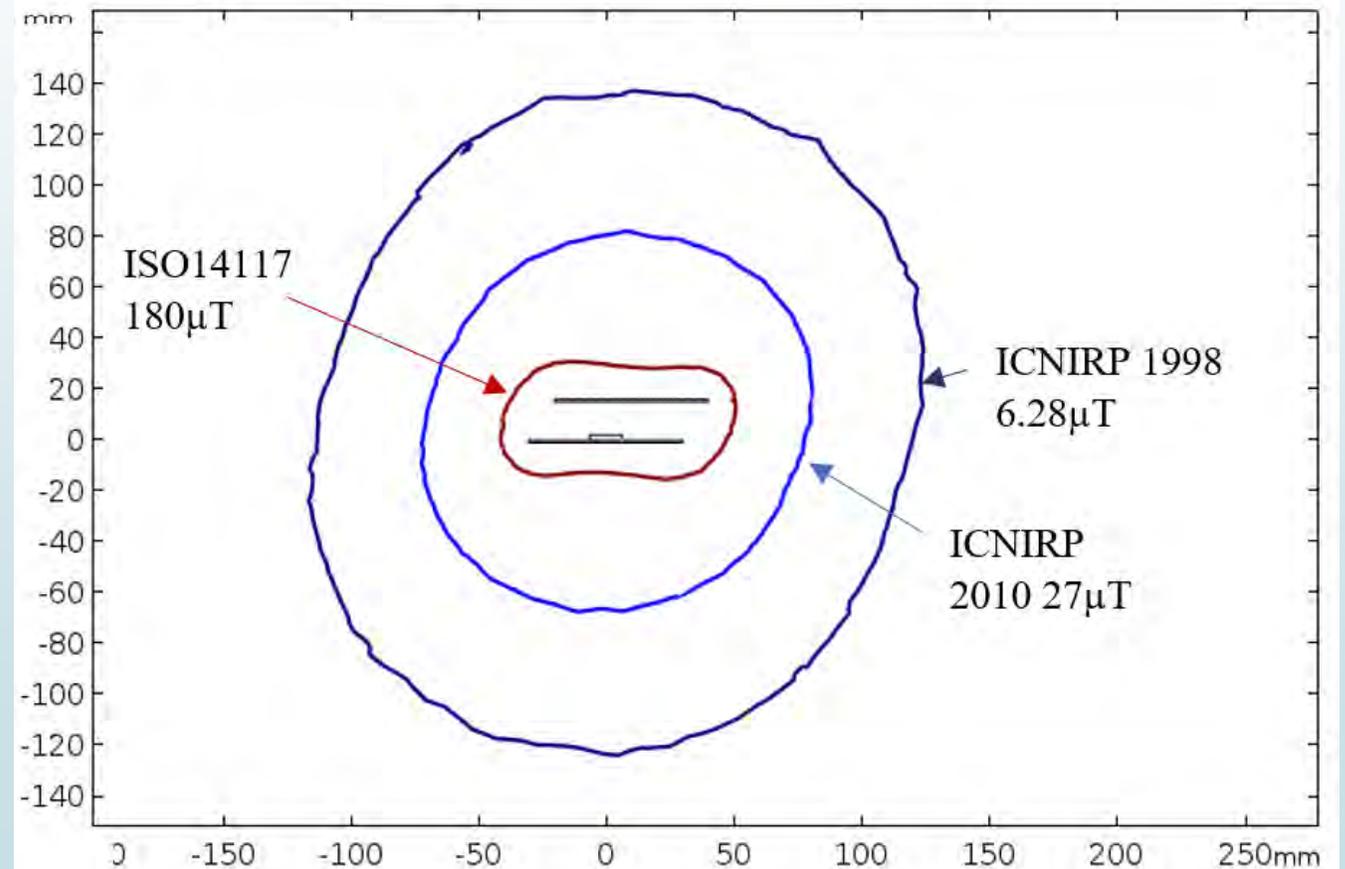
ICNIRP 2010

**6.25  $\mu\text{T}$**



ICNIRP 1998

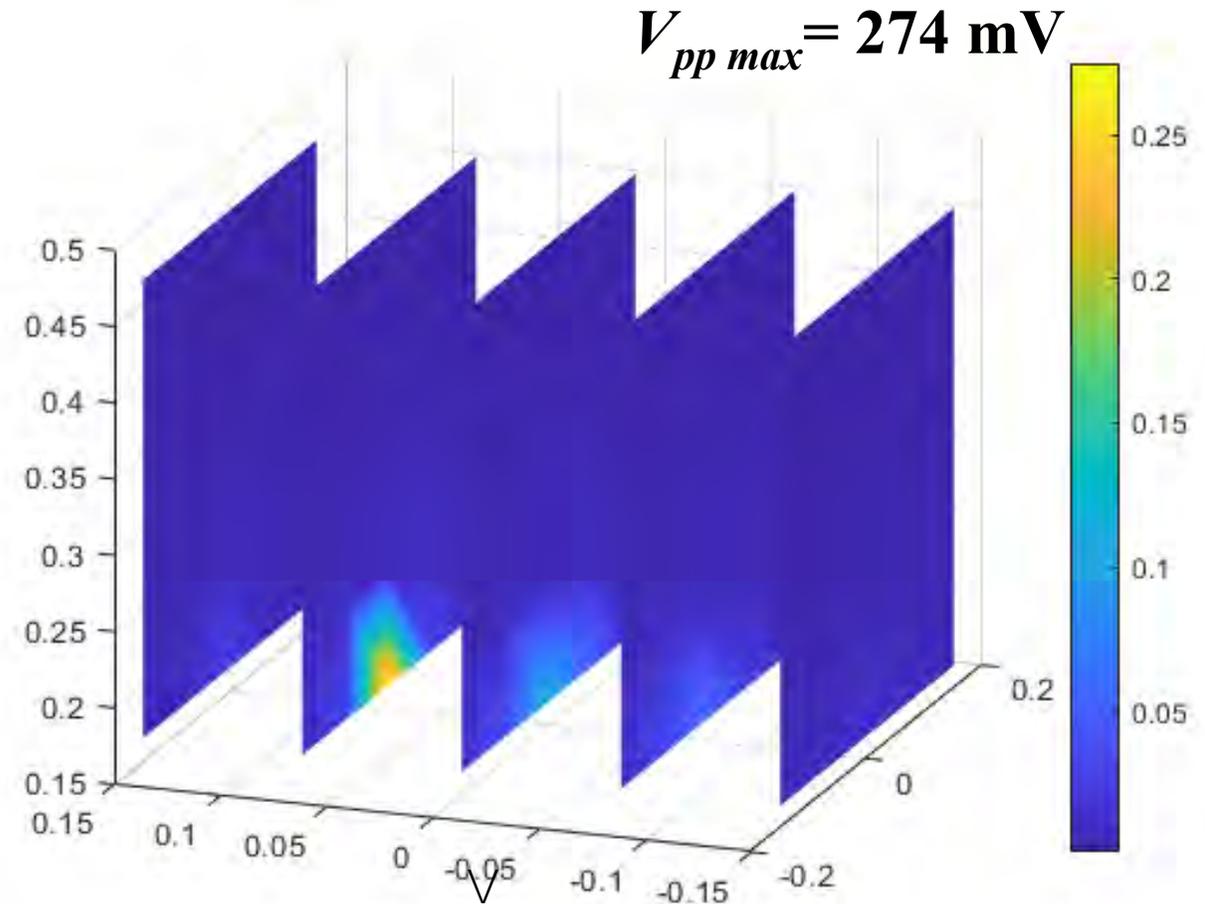
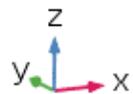
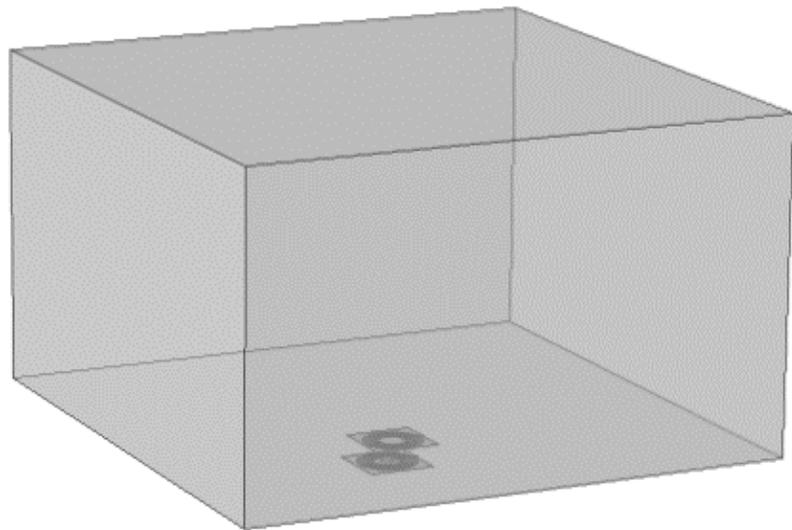
Isoline



# Risultati di tensione indotta

Dominio di calcolo

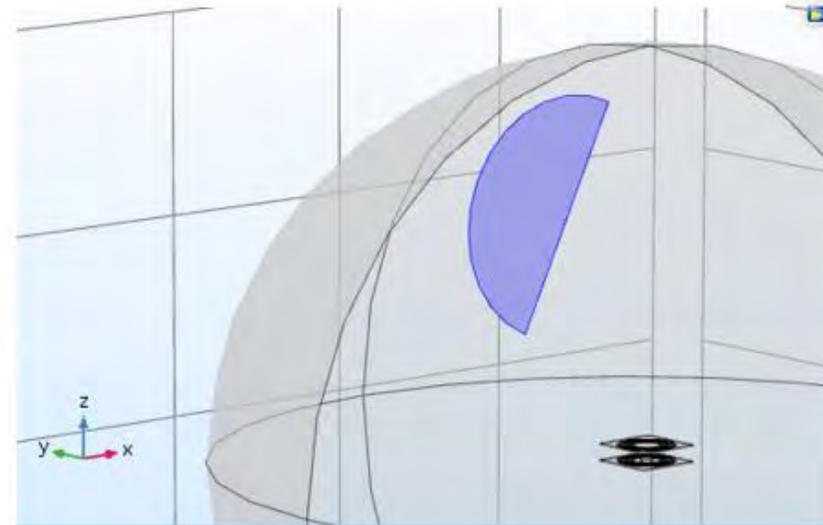
$$(v_{x1} \times v_{y1} \times v_{z1} = 400 \times 400 \times 200 \text{ mm}^3)$$



ISO 14117 limit:  $V_{pp} = 600 \text{ mV}$

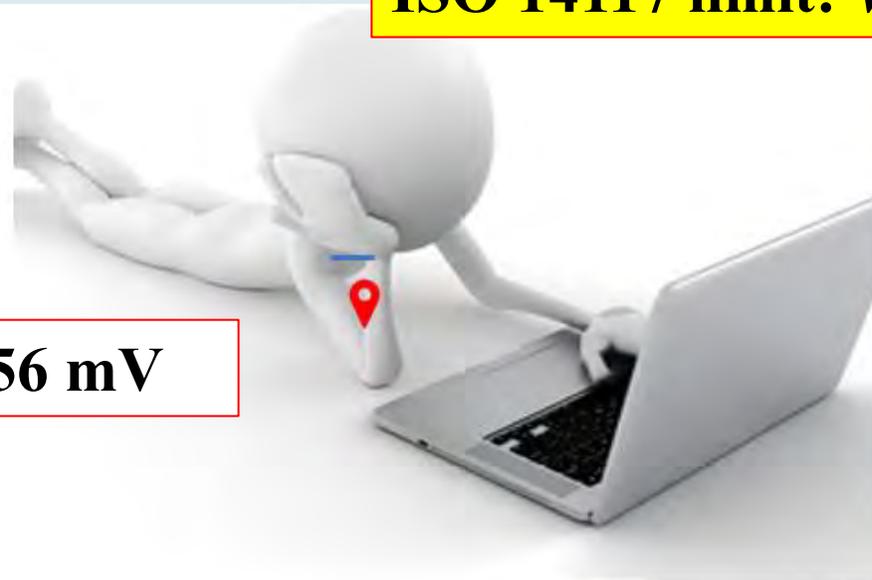
# Tensione indotta in uno scenario reale

$$V_{pp\ max} = 23.36\ mV$$



ISO 14117 limit:  $V_{pp} = 600\ mV$

$$V_{pp\ max} = 256\ mV$$



## Conclusioni

- È stata condotta un'indagine per valutare l'EMI nei CIED prodotti da sorgenti IF come piani cottura a induzione e sistemi WPT per l'elettronica di consumo
- In accordo con lo standard ISO 14117, l'interferenza prodotta da sorgenti IF è associata principalmente dalla tensione indotta sulla spira formata dall'elettrocattetero unipolare di un CIED.
- La conformità alle linee guida ICNIRP non garantisce anche la conformità alla norma ISO 14117.
- I risultati ottenuti sono preliminari. Tuttavia, possiamo osservare che i pazienti con CIED non hanno alcun rischio EMI per sorgenti IF per l'esposizione del corpo umano al campo magnetico. Al contrario, la tensione indotta supera ampiamente il limite ISO 14117 nei CIED con elettrocatteteri unipolari. Non sembrano esserci rischi per sistemi WPT.



## Wireless Power Transfer for E-Mobility

Fundamentals and Design Guidelines  
for Wireless Charging of Electric  
Vehicles

1st Edition - November 1, 2023

- Authors: Mauro Feliziani, Tommaso Campi, Silvano Cruciani, Francesca Maradei
- Paperback ISBN: 9780323995238