VI CONVEGNO NAZIONALE

Il controllo degli agenti fisici: ambiente, territorio e nuove tecnologie

6, 7, 8 giugno 2016

Dipartimento di Scienze e Innovazione Tecnologica
Università del Piemonte Orientale
viale Teresa Michel 11
Alessandria

Influenza del metodo di calcolo nella determinazione dell'indice di picco ponderato per esposizione a campi elettromagnetici

Andreuccetti D.[1], Contessa G.M.[2], Falsaperla R.[3], Lodato R. [3], Lopresto V. [2], Merla C. [2], Pinto R. [2], Zoppetti N. [1]

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

(2) ENEA Centro Ricerche Casaccia – Via Anguillarese, 301 – 00123 Roma

(3) INAIL – Via Fontana Candida, 1 – 00040 Monte Porzio Catone (Roma)

OBIETTIVI

- Presentare il **metodo del picco ponderato** (**WPM**) ed illustrarne alcuni **esempi di utilizzo** per la valutazione dell'esposizione a CEM provocata da sorgenti **in ambito occupazionale**, con riferimento ai risultati di **campagne di misura** eseguite dagli autori, individualmente o nell'ambito di progetti di ricerca comuni.
- Discutere alcune **criticità del metodo**, legate alle modalità con cui si procede alla sua applicazione, sulla base di **esempi di segnali costruiti *ad hoc***.

Il metodo del picco ponderato

Origine e diffusione

Statement ICNIRP 2003 *(forme d'onda complesse fino a 100 kHz)*	**Proposto con l'obiettivo di correggere il metodo standard (o "metodo della somma spettrale") nel caso di segnali periodici** $\sum_i \frac{B_{rms}(f_i)}{B_L(f_i)} \leq 1$
Linee guida ICNIRP 2010 *(effetti di stimolazione fino a 10 MHz)*	**Adottato come approccio di elezione per la valutazione di qualsiasi forma d'onda non sinusoidale. Precisati valori e tolleranze dei termini di ampiezza e fase delle funzioni di trasferimento**
Direttiva Europea 2013/35/UE *(esposizioni occupazionali a CEM)*	**Incorpora le linee guida ICNIRP 2010 e con esse il WPM: "In the case of non-sinusoidal fields, exposure evaluation … shall be based on the weighted peak method (filtering in time domain) … but other scientifically proven and validated exposure evaluation procedures can be applied, provided that they lead to approximately equivalent and comparable results"**
Linee guida ICNIRP 2014 *(movimento in un campo magnetostatico o esposizione ad un campo magnetico variabile con frequenza fino ad 1 Hz)*	**Adotta il metodo limitatamente agli aspetti connessi alla prevenzione degli effetti di stimolazione nel sistema nervoso centrale (fosfeni) e periferico**

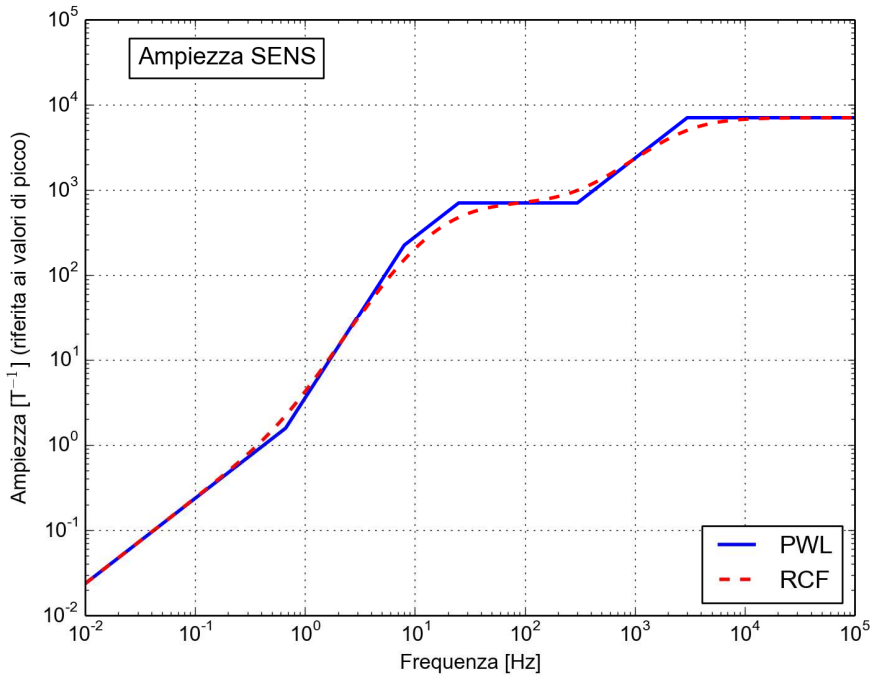
Il metodo del picco ponderato

Limiti sensoriali per l'induzione magnetica

$$\mathrm{WPI} = Max\left[WP(t)\right] = Max\sqrt{WP_x^2(t)+WP_y^2(t)+WP_z^2(t)} \le 1$$

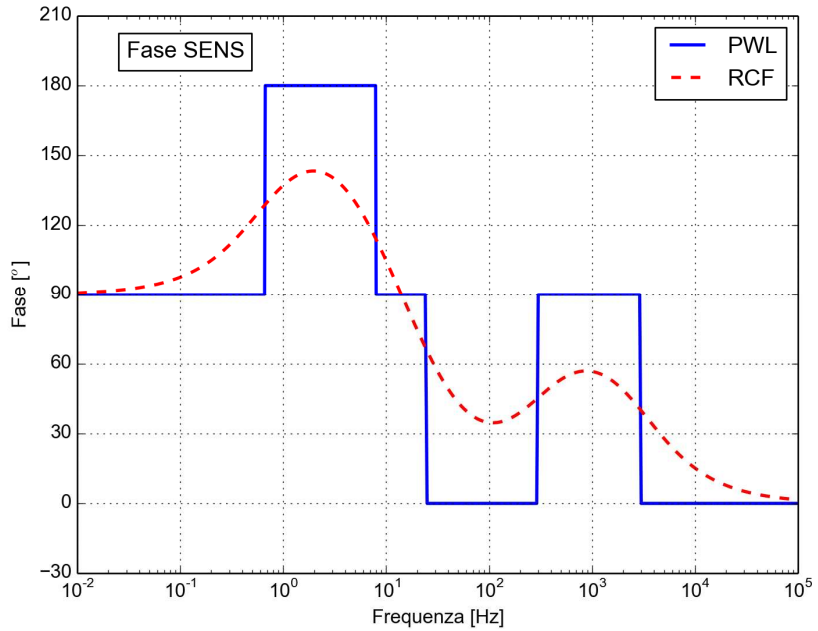
$$WP_{x,y,z}(t) = \sum_i \frac{B_{x,y,z}(f_i)}{B_L(f_i)\sqrt{2}}\cos\left[2\pi f_i t + \theta_{x,y,z}(f_i) + \varphi(f_i)\right]$$

Intervallo di frequenze [Hz]	ICNIRP-2014 Uncontrolled Reference Levels + 2013/35/EU Low Action Levels			
	Valore limite [T rms]	Funzione peso Frequency Domain / PiceWise Linear		Funzione peso Frequency Domain / RC Function
		Ampiezza [T^{-1} pk]	Fase [°]	Guadagno complesso [T^{-1} pk]
$0 < f < \frac{2}{3}$	$\frac{0.3}{f}$	$\frac{5\sqrt{2}f}{3} \pm 3dB$	$+90 \pm 90$	$5000\sqrt{2}\,\frac{jf\left(\frac{2}{3}+jf\right)(300+jf)}{(8+jf)(25+jf)(3000+jf)}$
$\frac{2}{3} \le f < 8$	$\frac{0.2}{f^2}$	$\frac{5\sqrt{2}f^2}{2} \pm 3dB$	$+180 \pm 90$	
$8 \le f < 25$	$\frac{0.025}{f}$	$20\sqrt{2}f \pm 3dB$	$+90 \pm 90$	
$25 \le f < 300$	0.001	$500\sqrt{2} \pm 3dB$	0 ± 90	
$300 \le f < 3000$	$\frac{0.3}{f}$	$\frac{5\sqrt{2}f}{3} \pm 3dB$	$+90 \pm 90$	
$3000 \le f < 10M$	0.0001	$5000\sqrt{2} \pm 3dB$	0 ± 90	



Il metodo del picco ponderato

(limiti sensoriali per l'induzione magnetica)



Funzioni peso PWL e RCF, ampiezza e fase

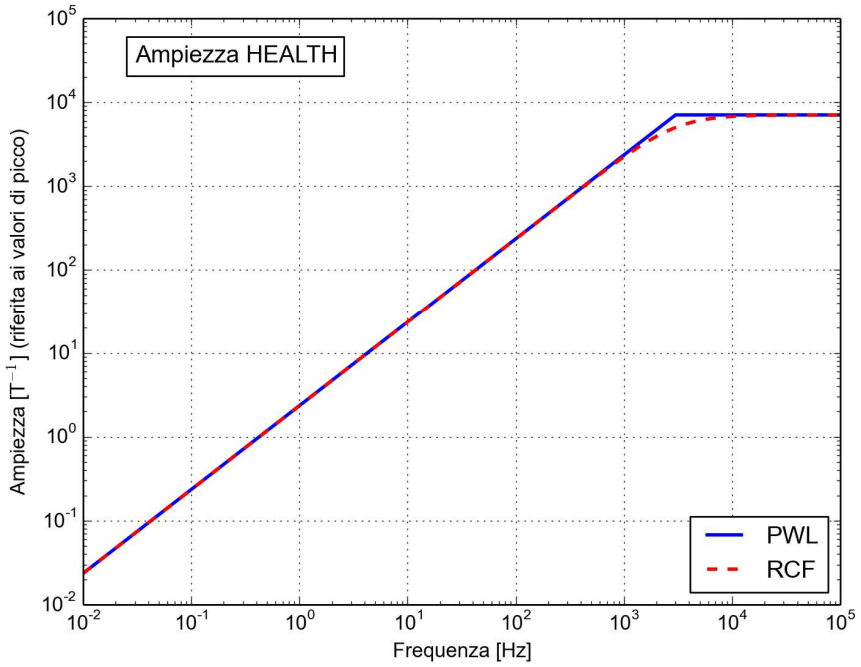
Il metodo del picco ponderato

Limiti sanitari per l'induzione magnetica

$$\mathrm{WPI} = Max\left[WP(t)\right] = Max\sqrt{WP_x^2(t) + WP_y^2(t) + WP_z^2(t)} \leq 1$$

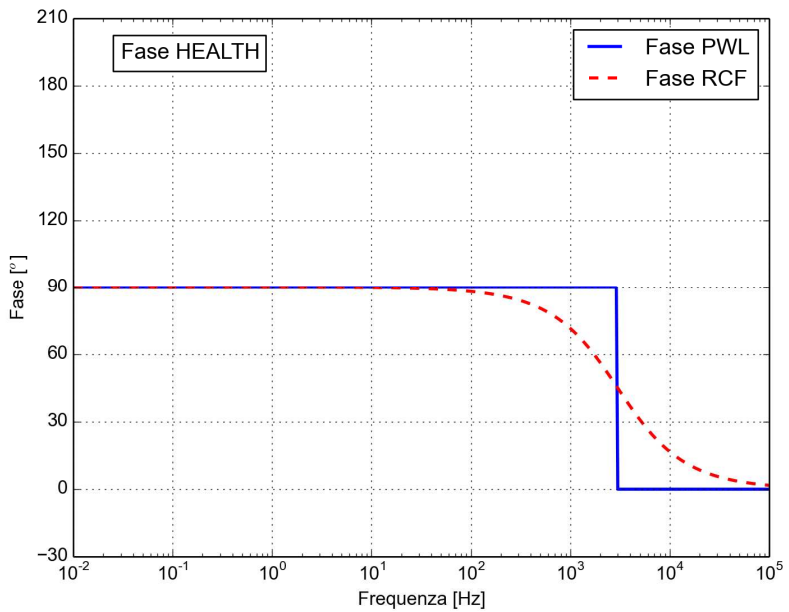
$$WP_{x,y,z}(t) = \sum_i \frac{B_{x,y,z}(f_i)}{B_L(f_i)\sqrt{2}} \cos\left[2\pi f_i t + \theta_{x,y,z}(f_i) + \varphi(f_i)\right]$$

Intervallo di frequenze [Hz]	ICNIRP-2014 Controlled Reference Levels + 2013/35/EU High Action Levels			
	Valore limite [T rms]	Funzione peso Frequency Domain / PiceWise Linear		Funzione peso Frequency Domain / RC Function
		Ampiezza [T^{-1} pk]	Fase [°]	Guadagno complesso [T^{-1} pk]
$0 < f < 3000$	$\frac{0.3}{f}$	$\frac{5\sqrt{2}f}{3} \pm 3dB$	$+90 \pm 90$	$\frac{5000\sqrt{2}jf}{3000 + jf}$
$3000 \leq f < 10M$	0.0001	$5000\sqrt{2} \pm 3dB$	0 ± 90	



Il metodo del picco ponderato

(limiti sanitari per l'induzione magnetica)



Funzioni peso PWL e RCF, ampiezza e fase

Il metodo del picco ponderato: FD, hardware, TD

$$\mathrm{WPI} = Max\left[WP(t)\right] = Max\sqrt{WP_x^2(t)+WP_y^2(t)+WP_z^2(t)} \le 1$$

(1)

$$WP_{x,y,z}(t) = \sum_i \frac{B_{x,y,z}(f_i)}{B_L(f_i)\sqrt{2}}\cos\left[2\pi f_i t + \theta_{x,y,z}(f_i) + \varphi(f_i)\right]$$

Software FD (PWL o RCF)

Campionamento

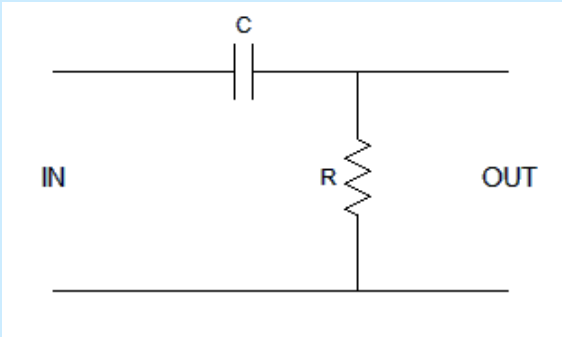
↓

DFT

↓

Espressione (1) (con funzione peso PWL o RCF)

Hardware (RCF)

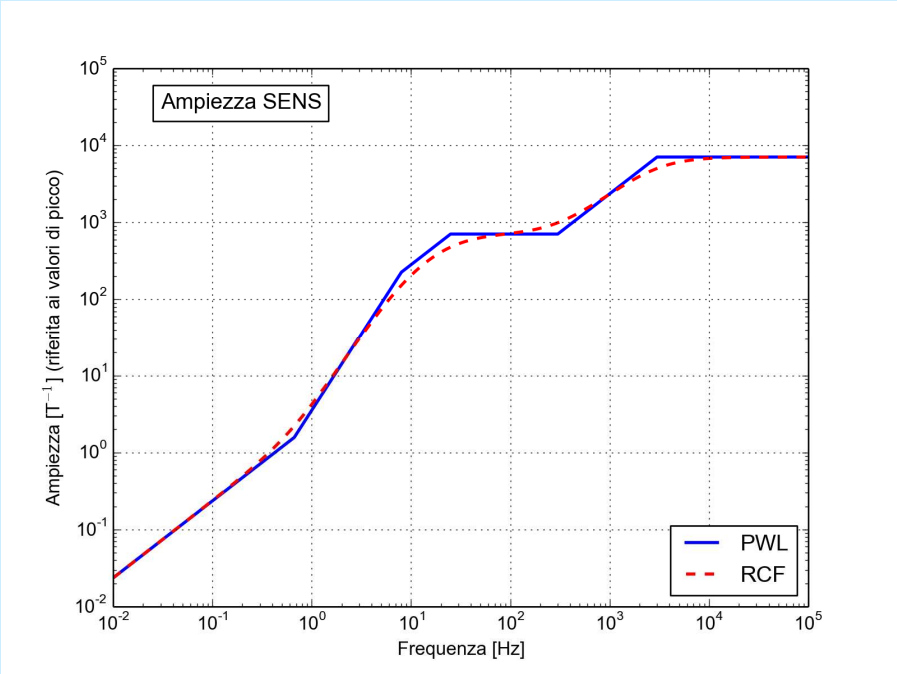


Catena di filtri RC analogici del primo ordine

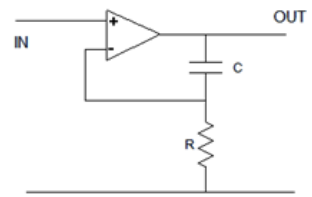
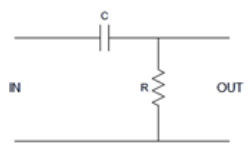
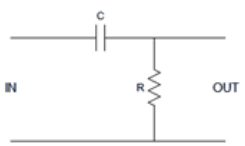
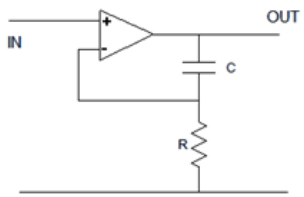
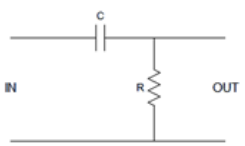
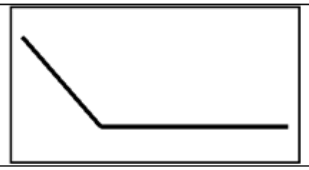
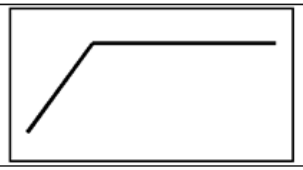
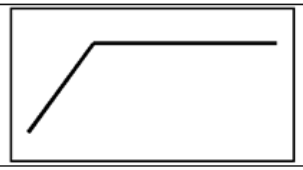
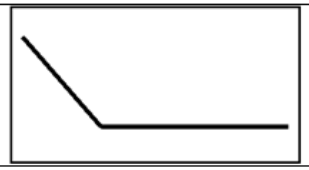
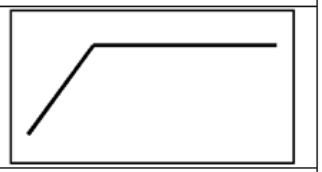
Software TD (RCF)

Filtri numerici per simulare la catena analogica

Filtri IIR (*Infinite Impulse Response*) - metodo "pole-zero matching"



Il metodo del picco ponderato in hardware

					
					
$\frac{1}{0.0001\sqrt{2}T}$	$\frac{f_1 + jf}{jf}$	$\frac{jf}{f_2 + jf}$	$\frac{jf}{f_3 + jf}$	$\frac{f_4 + jf}{jf}$	$\frac{jf}{f_5 + jf}$
	LEF @ $f_1 = 0.667Hz$	HPF @ $f_2 = 8Hz$	HPF @ $f_3 = 25Hz$	LEF @ $f_4 = 300Hz$	HPF @ $f_5 = 3kHz$

Approccio FD (PWL)

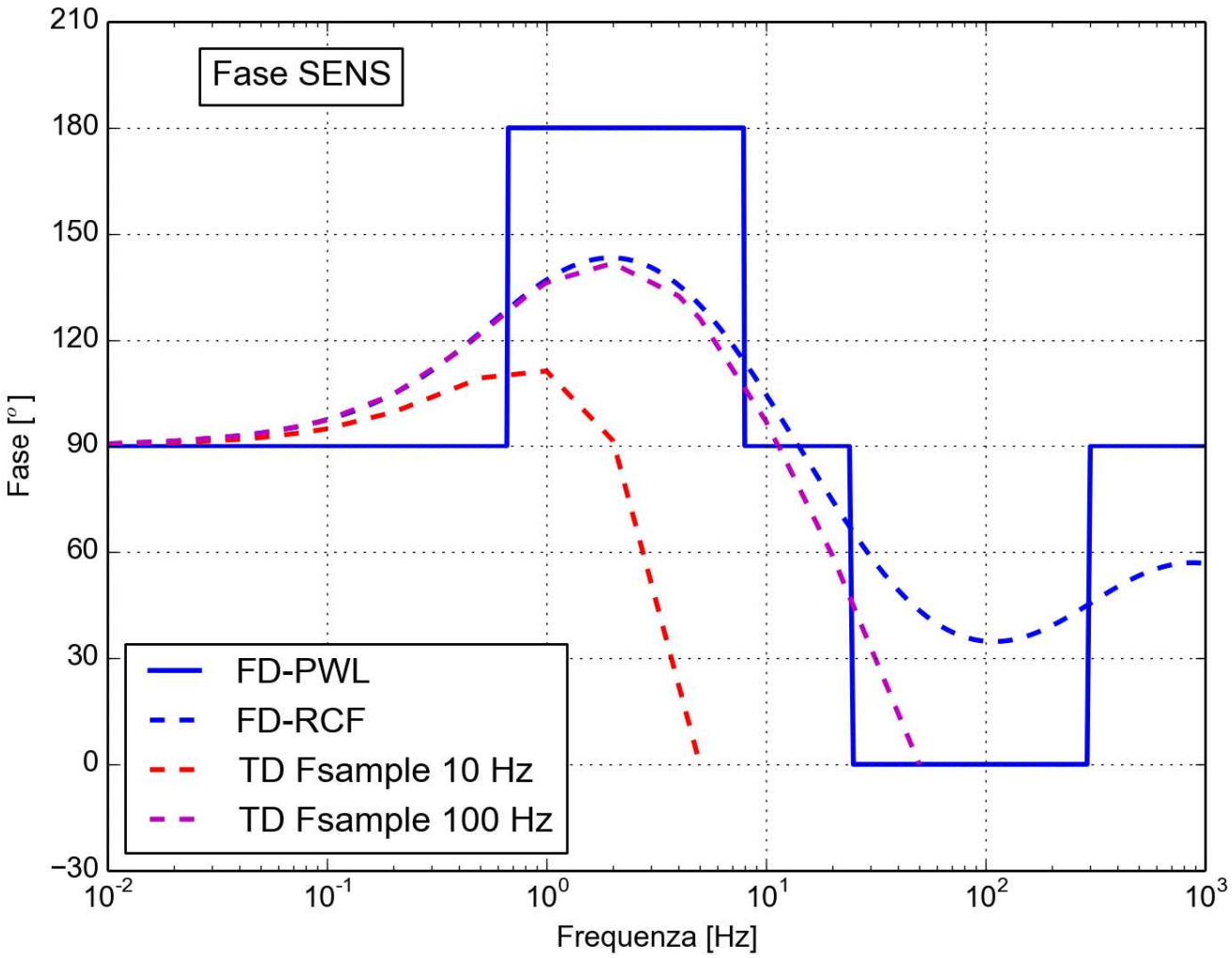
- **La funzione-peso è esattamente conforme agli standard.**
- **Il calcolo necessita solo della DFT, un algoritmo ben noto, disponibile anche nei più comuni pacchetti software di analisi matematica.**
- **Principale difficoltà: lo spettro fornito dalla DFT applicata ad un segnale campionato di durata complessiva *To* presenta solo componenti a frequenze *n/To* con *n* intero: si tratta cioè dello spettro di una funzione resa forzosamente periodica con periodo pari al tempo di osservazione *To*.**

Approccio TD

- **Indicato come "more convenient" nelle linee guida ICNIRP-2010 e come approccio di riferimento nella Direttiva 2013/35/UE.**
- **Può essere applicato in tempo reale, elaborando i campioni via via che vengono forniti dalla catena di misura e acquisizione.**
- **È esente dai problemi conseguenti alla periodicità forzata imposta dalla DFT.**
- **C'è la necessità di smaltire l'eventuale artefatto iniziale (che si presenta se i primi campioni osservati hanno valore non-nullo).**
- Esiste un rischio di instabilità intrinseca (che si può manifestare se la frequenza di campionamento è molto elevata e il tempo di osservazione molto lungo).
- **Il termine di fase si annulla alla frequenza di Nyquist → esigenza di ricampionamento.**

Poiché le due modalità non forniscono sempre gli stessi risultati, emerge l'esigenza di indagare i possibili motivi alla base delle discrepanze individuate.

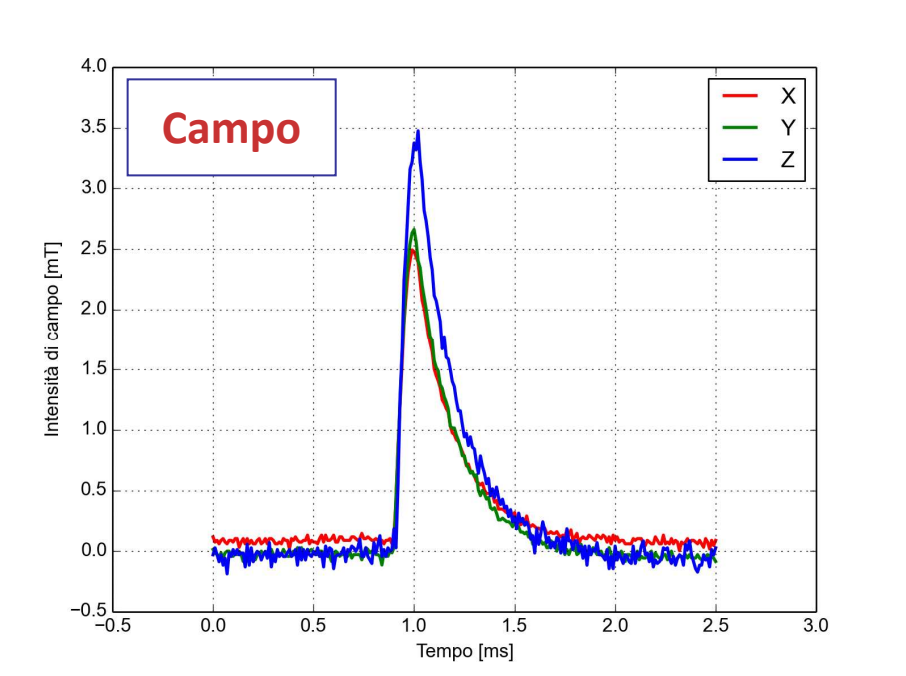
Vincolo sulla fase nell'approccio TD

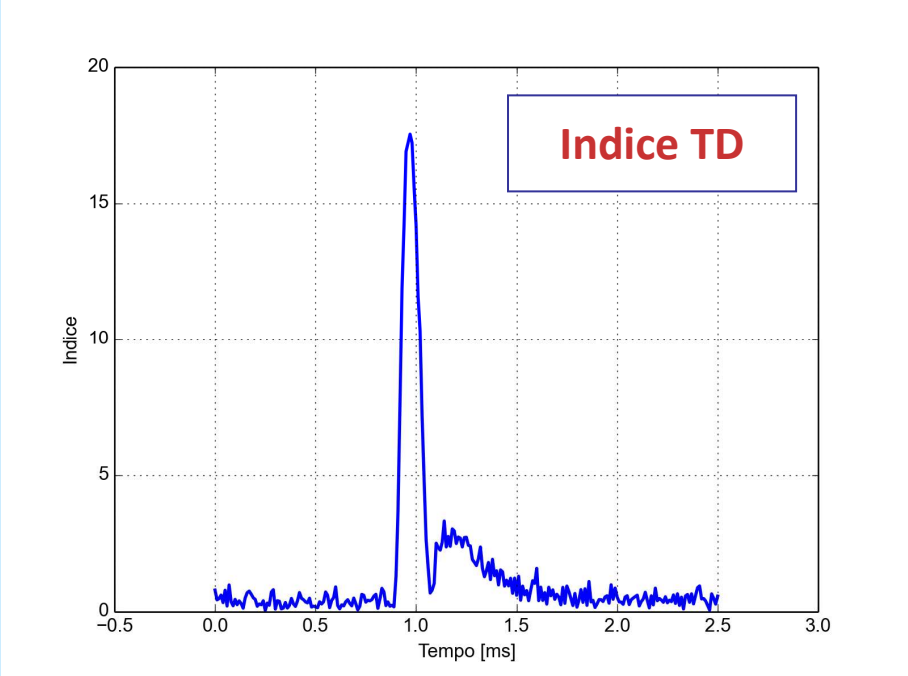


Esempi applicativi basati su "dati reali" (campagne di misura)

Dati da misure reali

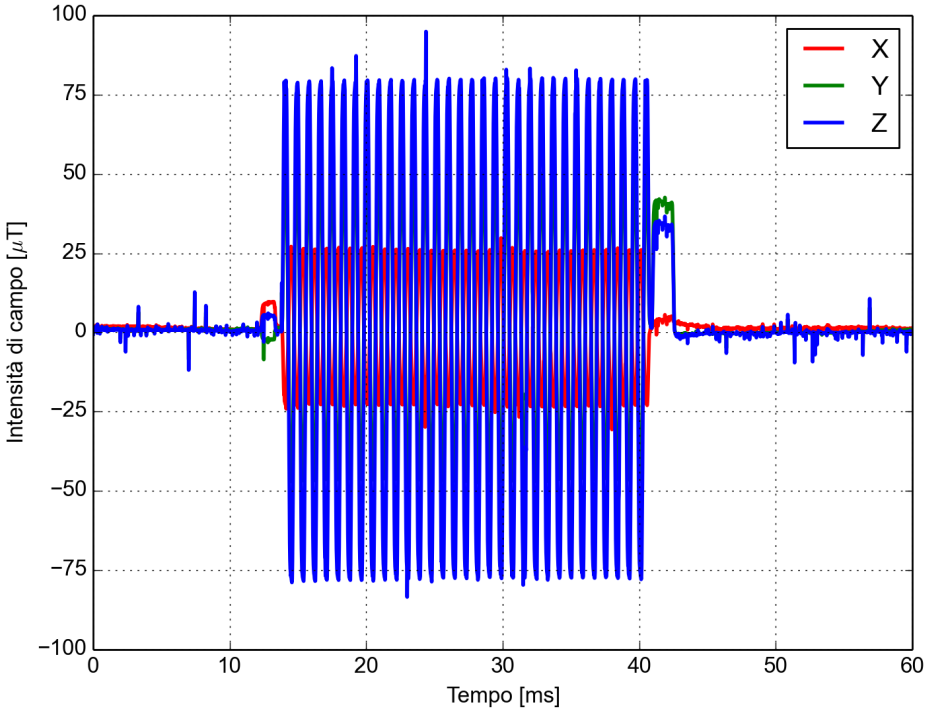
Campo magnetico da stimolazione magnetica transcranica





Ambito o sorgente	Note	WPI-FD-PWL	WPI-FD-RCF	WPI-TD
Stimolazione magnetica transcranica con stimolatore Magstim 200	Misura a 32 cm da un applicatore HP 9784-00 con potenza 100%	15.5	17.3	17.5

Esempi da misure in ambito RM



Dati da misure reali

Campo di gradiente di un tomografo per *imaging* a RM da 1.5T

Ambito o sorgente	Note	WPI-FD-PWL	WPI-FD-RCF	WPI-TD
Campo di gradiente in RM – tomografo Philips Achieva Nova 1.5T (Ospedale Fatebenefratelli Roma)	Misura acquisita presso la bocca del *bore*, utilizzando un segmento di sequenza EPI Assiale con 21 fette di 0.5 mm	0.310	0.326	0.327

Codice		Campagna	Indice WP (EU-2013/35+ICNIRP-2014) SENS-WP (Effetti sensoriali)			
			FD-PWL	FD-RCF	TD	Scarto TD-PWL
ANES1	ANES1	OPBG Palidoro 1.5T	0.095	0.117	0.118	24.2%
ANES2	ANES2	OPBG Palidoro 1.5T	0.153	0.185	0.186	21.6%
ANES3	ANES3	OPBG Palidoro 1.5T	1.622	2.076	2.115	30.4%
WALK1	WALK1	OPBG Palidoro 1.5T	0.063	0.073	0.076	20.6%
WALK2	WALK2	OPBG Palidoro 1.5T	0.046	0.043	0.056	21.7%
WALK3	WALK3	OPBG Palidoro 1.5T	0.070	0.080	0.081	15.7%
WALK4	WALK4	OPBG Palidoro 1.5T	0.076	0.087	0.090	18.4%
WALK5	WALK5	OPBG Palidoro 1.5T	0.142	0.143	0.161	13.4%
RA01	RA01	OPBG Gianicolo 3T	0.509	0.482	0.564	10.8%
RA02	RA02	OPBG Gianicolo 3T	0.466	0.579	0.591	26.8%
RA03	RA03	OPBG Gianicolo 3T	0.596	0.673	0.726	21.8%
RA04	RA04	OPBG Gianicolo 3T	0.109	0.146	0.148	35.8%
RA06	RA06	OPBG Gianicolo 3T	0.102	0.153	0.153	50.0%
RA07	RA07	OPBG Gianicolo 3T	0.046	0.041	0.051	10.9%
RA08	RA08	OPBG Gianicolo 3T	0.041	0.046	0.048	17.1%
RA09	RA09	OPBG Gianicolo 3T	0.297	0.365	0.371	24.9%
RA10	RA10	OPBG Gianicolo 3T	0.280	0.283	0.306	9.3%
RA11	RA11	OPBG Gianicolo 3T	0.377	0.440	0.448	18.8%
RA12	RA12	OPBG Gianicolo 3T	0.685	0.779	0.818	19.4%

Dati da misure reali

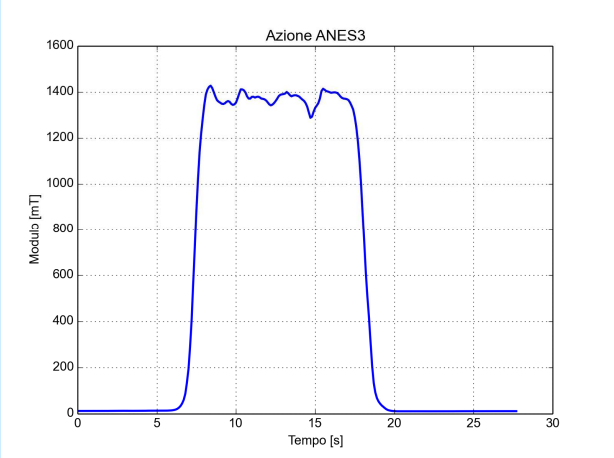
Induzione magnetica percepita in caso di movimento nel campo statico di tomografi per imaging a RM a 1.5T e 3T

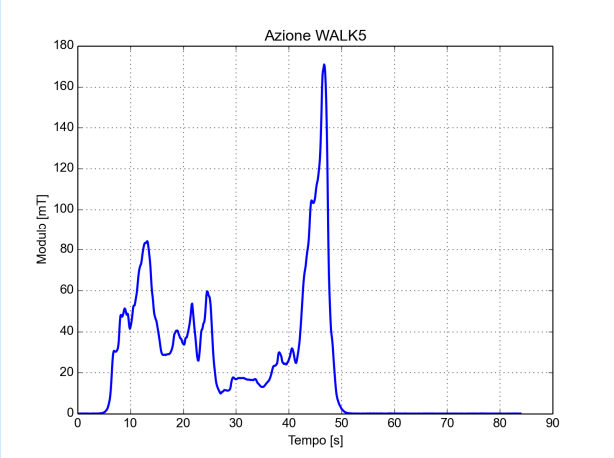
Codice		Campagna	Indice WP (EU-2013/35+ICNIRP-2014) SENS-WP (Effetti sensoriali)			
			FD-PWL	FD-RCF	TD	Scarto TD-PWL
A1_A_TD_1	A1_1	Imago7 Calambrone 7T	3.595	4.875	4.876	35.6%
A1_A_TD_2	A1_2	Imago7 Calambrone 7T	5.430	5.487	5.903	8.7%
A1_A_TD_3	A1_3	Imago7 Calambrone 7T	3.632	3.541	3.770	3.8%
A1_A_TD_INAIL	A1_6	Imago7 Calambrone 7T	7.212	7.197	7.664	6.3%
A1_B_TD_1	A1_4	Imago7 Calambrone 7T	2.520	2.369	2.572	2.1%
A1_B_TD_2	A1_5	Imago7 Calambrone 7T	2.548	2.838	3.015	18.3%
A2_A_FD_U	A2_6	Imago7 Calambrone 7T	1.580	1.566	1.746	10.5%
A2_A_TD_1	A2_1	Imago7 Calambrone 7T	3.050	2.769	3.009	-1.3%
A2_A_TD_2	A2_2	Imago7 Calambrone 7T	5.255	4.691	5.077	-3.4%
A2_A_TD_3	A2_3	Imago7 Calambrone 7T	3.202	3.559	3.704	15.7%
A2_A_TD_3RIP	A2_3_1	Imago7 Calambrone 7T	1.090	1.444	1.449	32.9%
A2_B_TD_1	A2_4	Imago7 Calambrone 7T	1.468	1.833	1.833	24.9%
A2_B_TD_2	A2_5	Imago7 Calambrone 7T	1.527	1.537	1.666	9.1%
B1_B_FD_U	B1_4	Imago7 Calambrone 7T	1.208	1.137	1.316	8.9%
B1_B_FS_U	B1_5	Imago7 Calambrone 7T	1.845	1.937	1.946	5.5%
B1_B_TD_1	B1_1	Imago7 Calambrone 7T	3.440	3.083	3.449	0.3%
B1_B_TD_2	B1_2	Imago7 Calambrone 7T	1.897	1.907	1.979	4.3%
B1_B_TS_U	B1_3	Imago7 Calambrone 7T	2.192	1.850	2.159	-1.5%
B2_B_FD_U	B2_3	Imago7 Calambrone 7T	12.192	11.670	12.622	3.5%
B2_B_TD_1	B2_1	Imago7 Calambrone 7T	9.709	8.957	9.956	2.5%
B2_B_TD_2	B2_2	Imago7 Calambrone 7T	12.455	12.096	13.058	4.8%

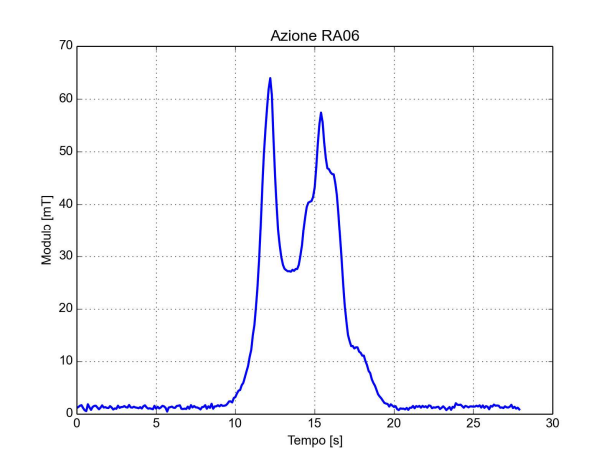
Dati da misure reali

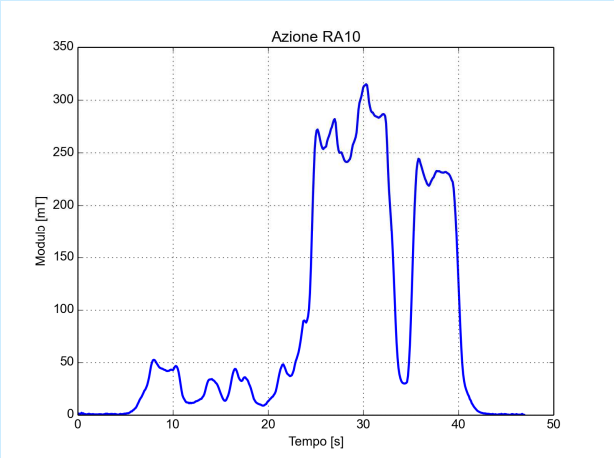
Induzione magnetica percepita in caso di movimento nel campo statico di un tomografo per imaging a RM a 7T

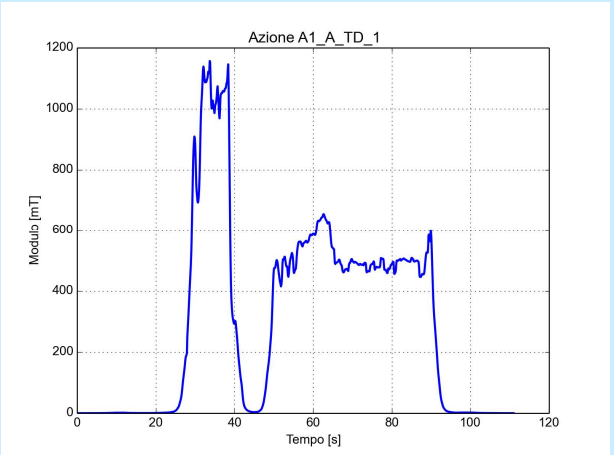
Esempi di andamento del modulo dell'induzione magnetica percepita in caso di movimento nel campo statico di un tomografo per imaging a RM

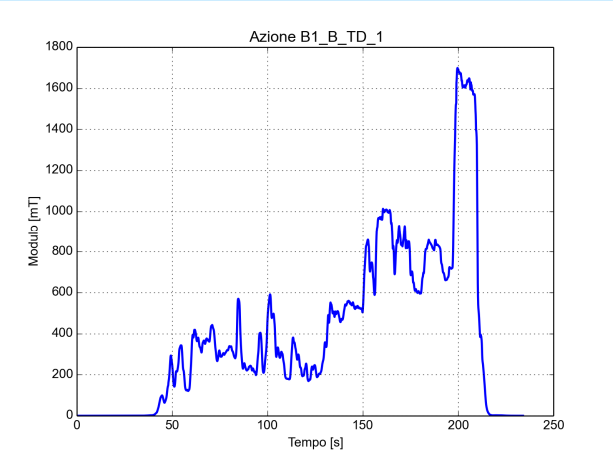








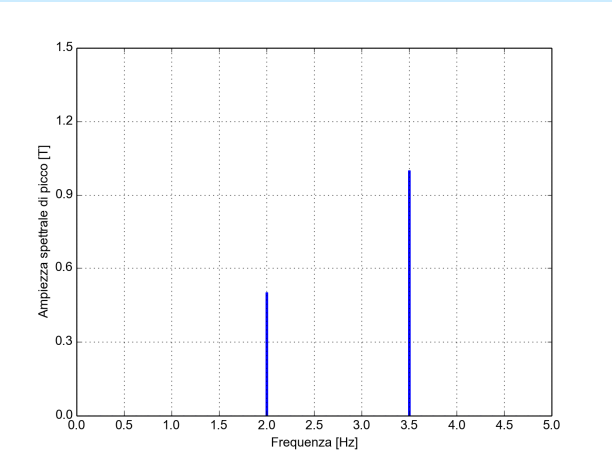


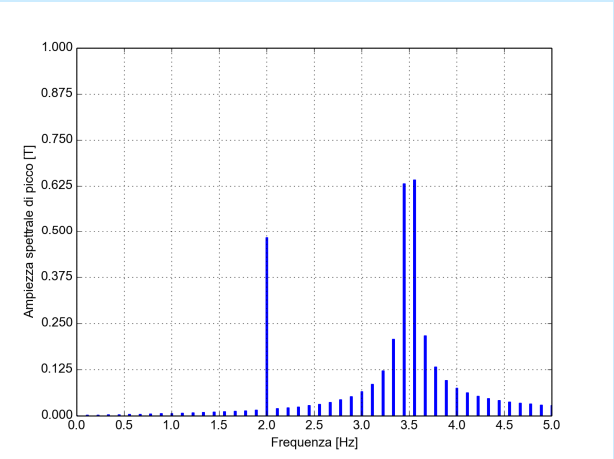


Esempi basati su "segnali *ad hoc*"

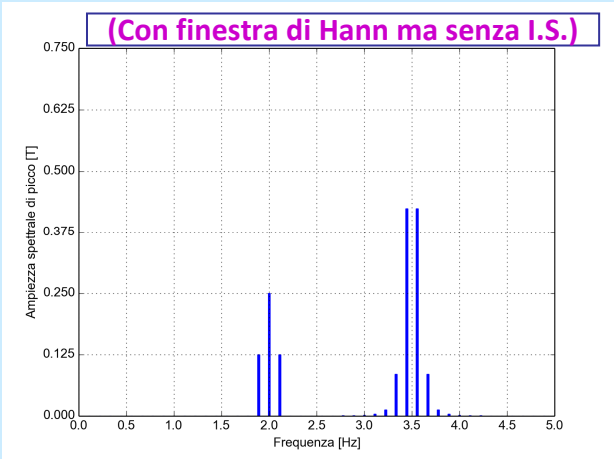
Segnali *ad hoc* – Esempio 1 – Segnale periodico

Segnale	Note	WPI-FD-PWL	WPI-FD-RCF	WPI-TD
Somma di due sinusoidi in quadratura, una a 2 Hz – 0.5 T, l'altra a 3.5 Hz – 1 T **Periodo 2"**	Tempo di osservazione 8 s (no *spectral leakage*)	50.2	47.0	47.2
	Tempo di osservazione 9 s - senza interpolazione spettrale	639	561	47.2
	Tempo di osservazione 9 s - con Hann + interpolazione spettrale	50.4	47.2	N/A

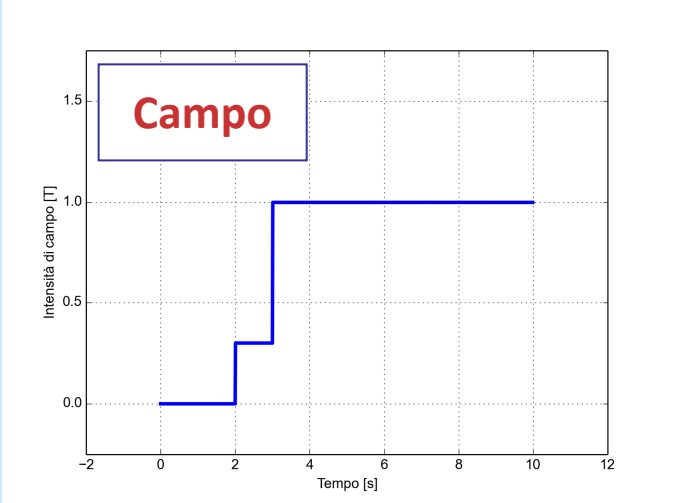


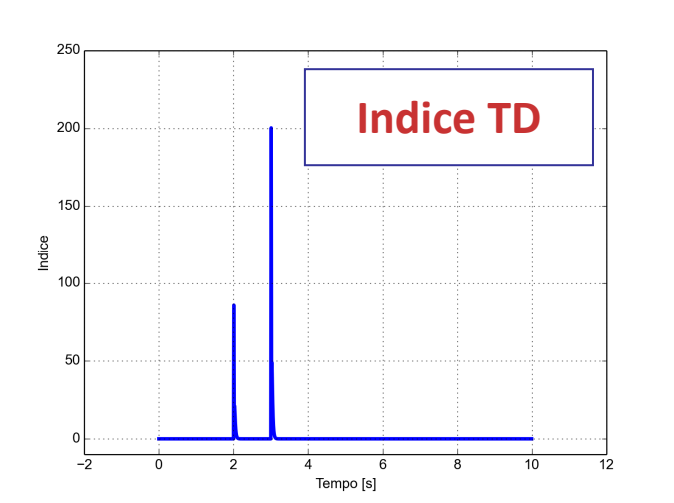


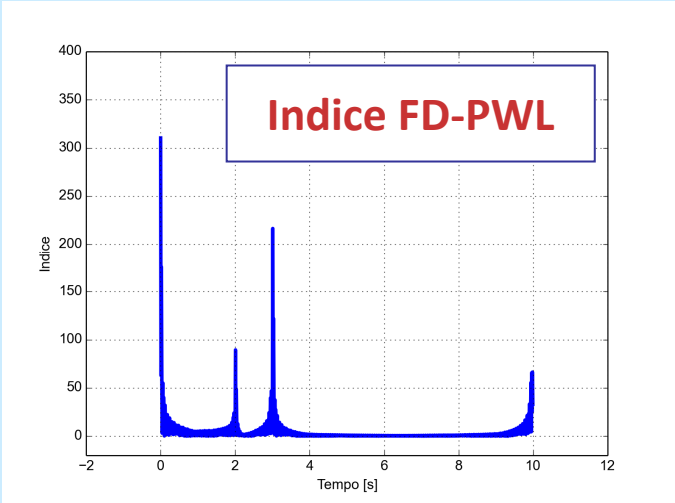
(Con finestra di Hann ma senza I.S.)

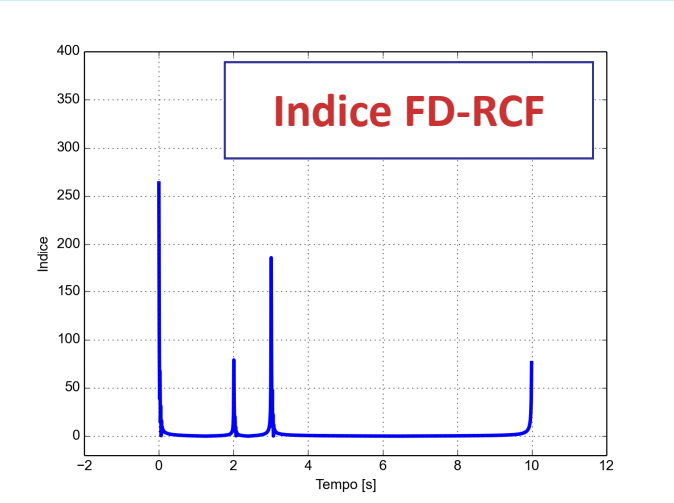


Segnale	Note	WPI-FD-PWL	WPI-FD-RCF	WPI-TD
Gradino doppio, un primo step di 0.3 T ed un secondo step di 0.7 T	Il segnale è inizialmente nullo, poi resta indefinitamente a 1 T	310 Tra 1” e 9”: 217	264 Tra 1” e 9”: 185	200







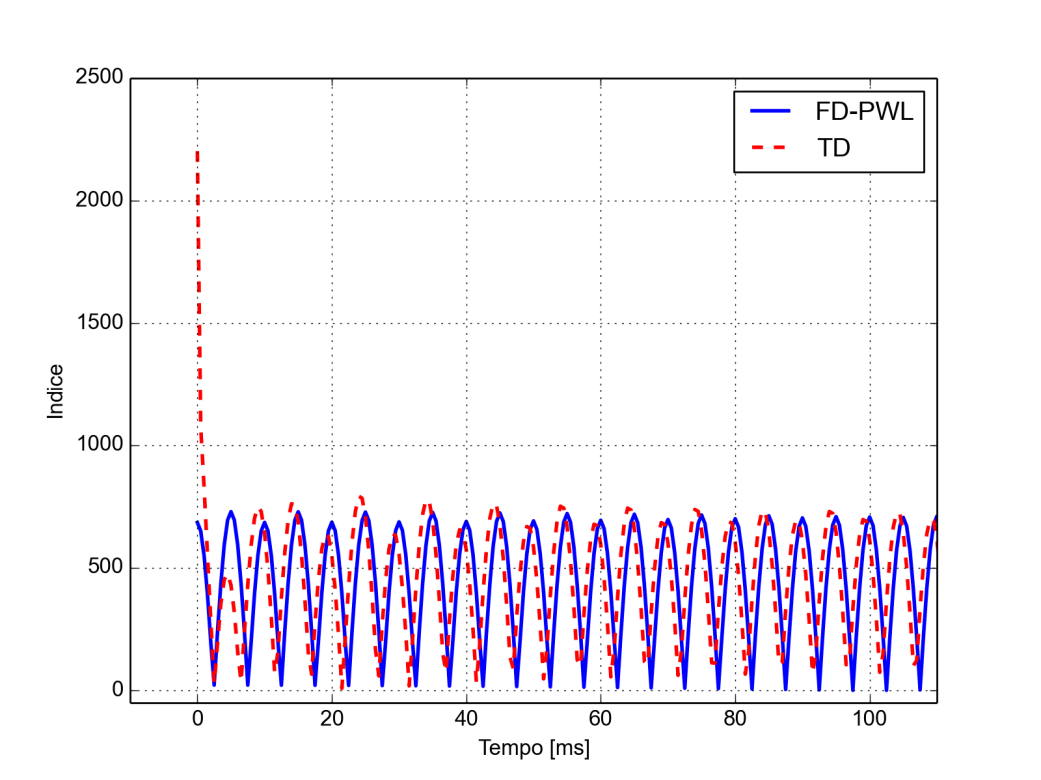


Segnali *ad hoc*

Esempio 2

Segnale a doppio gradino

Criticità dell’approccio FD dovuta alla periodicità imposta dalla DFT



Segnali *ad hoc*

Esempio 3

Criticità dell'approccio TD a causa dell'artefatto iniziale

Segnale	Note	WPI-FD-PWL	WPI-FD-RCF	WPI-TD
Somma di due cosinusoidi di ampiezza unitaria, in fase tra di loro, una a 2.5 Hz e l'altra a 100 Hz	Tempo di osservazione 4 s (no *spectral leakage*)	729	742	Iniziale: 2203 A regime: 734

Concludendo… (?)

Osservazioni conclusive

- In alcune situazioni, i risultati forniti dalla modalità FD-RCF e TD risultano ben allineati; la differenza tra questi e il risultato FD-PWL (da prendere come riferimento, perché collegato alla alla funzione-peso "esatta") è da attribuire alle discrepanze tra le rispettive funzioni-peso.
- La differenza è difficile da prevedere a priori, perché dipende da come si distribuisce lo spettro del segnale in relazione alle frequenze dove le funzioni-peso stesse cambiano di pendenza; essa è comunque compatibile con la tolleranza ammessa dall'ICNIRP.
- In altri casi, le differenze osservate tra i risultati devono essere attribuite a cause diverse, da ricercarsi presumibilmente tra le criticità intrinseche delle metodiche considerate. Alcune di queste criticità sono state brevemente esaminate attraverso esempi basati su segnali costruiti *ad hoc*, ma non si può escludere che ne entrino in gioco altre non ancora individuate.
- Il problema principale è che l'effetto delle discrepanze dipende dalla forma d'onda in gioco, per cui la perdita di accuratezza non è prevedibile a priori.
- In particolare, per le misure di movimento nel campo magnetostatico di un tomografo a risonanza magnetica, dove le forme d'onda coinvolte presentano una notevole complessità (essendo originate dai movimenti naturali del soggetto esposto), allo stato attuale è risultato pressoché impossibile stabilire con certezza quali siano le effettive criticità alla base delle discrepanze tra i valori degli indici WPI calcolati secondo le diverse modalità.

Quale approccio usare?

- **Se la forma d'onda in esame è costituita da un fenomeno a evento singolo di durata limitata ed è possibile campionare un intervallo di silenzio di durata sufficiente (dello stesso ordine di grandezza di quella dell'evento stesso) prima e dopo l'evento, allora ci sono le condizioni per cui l'approccio FD e l'approccio TD forniscano risultati corretti e coerenti tra loro (fatte salve le discrepanze provenienti dallo scarto tra le funzioni-peso).**
- **Se si ha a che fare con una forma d'onda periodica, occorre fare attenzione alla possibile comparsa dello *spectral leakage*: se non ci sono le condizioni per evitare o correggere questo fenomeno, è preferibile fare uso dell'approccio TD.**
- **Nel caso in cui il segnale venga osservato a partire da un istante in cui il suo valore è molto diverso da zero, nell'applicare l'approccio TD occorre prestare attenzione al problema dell'artefatto iniziale: se non fosse possibile scartare un sufficiente intervallo iniziale, potrebbe essere consigliabile passare ad un approccio FD. Se però il segnale osservato termina con un valore significativamente diverso dal valore iniziale, l'approccio FD andrà incontro ad un errore potenzialmente ragguardevole a causa della periodicità imposta dalla DFT.**

Sviluppi futuri

- **Approfondire l'esame delle criticità e perfezionare le metodiche per porvi, se possibile, rimedio.**
- **Sviluppare strategie per valutare l'incertezza da associare alla determinazione dell'indice.**
- **Indagare sulle differenze tra i valori dell'indice WPI determinato per via software e quelli forniti dalla strumentazione analogica dedicata.**

Grazie per l'attenzione

Gli autori ringraziano, per l'accoglienza e la preziosa collaborazione, il personale delle strutture sanitarie dove si sono svolte le campagne di misura da cui hanno avuto origine i dati utilizzati in questo lavoro.