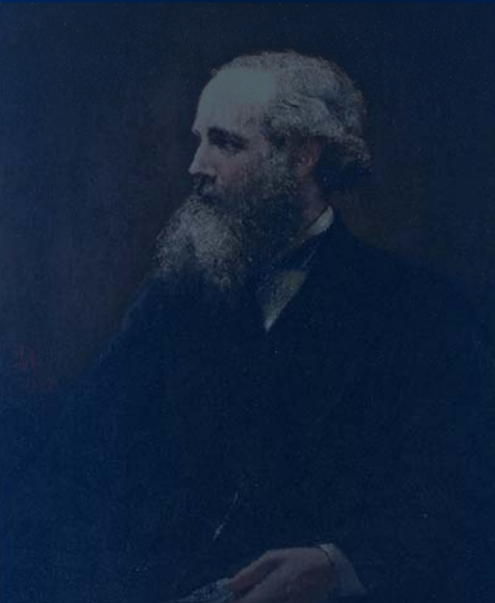


## Il Laboratorio di Campi Elettromagnetici

Paolo D'Atanasio e Alessandro Zambotti



## Il Laboratorio di Campi Elettromagnetici

Il **Laboratorio di Campi Elettromagnetici** del Centro di Ricerche ENEA della Casaccia nasce nel 1983 per il supporto alle qualifiche di **compatibilità elettromagnetica** su componenti elettromeccanici ed elettronici per impianti nucleari o impianti industriali siti in aree critiche.

In seguito, le attività si sono ampliate ai settori civile, militare e avionico a supporto di piccole e medie imprese e di istituti e dipartimenti universitari.

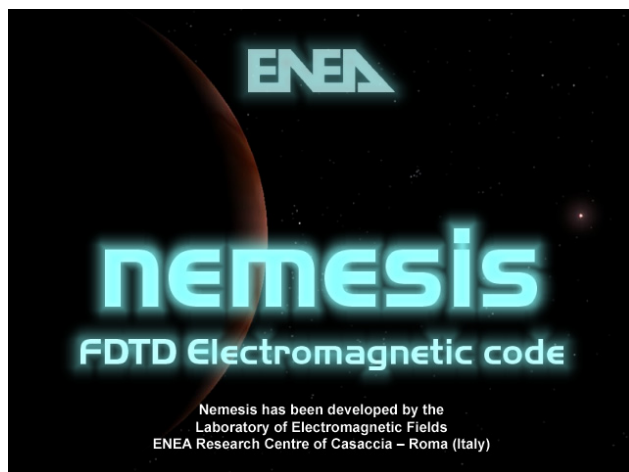


Dal 1990, il Laboratorio ha iniziato una attività di **modellazione numerica**

dei fenomeni fisici di propagazione e diffusione delle onde elettromagnetiche in ambienti complessi, nell'ambito della quale ha sviluppato codici numerici proprietari (codice ibrido FDTD/Kirchhoff **Nemesis**, reticolatori semiautomatici) sia su architetture sequenziali che su architetture parallele (cluster) e massivamente parallele.

Dal 2000, il Laboratorio si è dotato della **camera schermata semi-anecoica "Vecuvia"** per misure di compatibilità elettromagnetica secondo le normative civili e militari ad una distanza di 3 metri dalla sorgente di radiazione, nella gamma di frequenze comprese fra 10 kHz e 18 GHz.

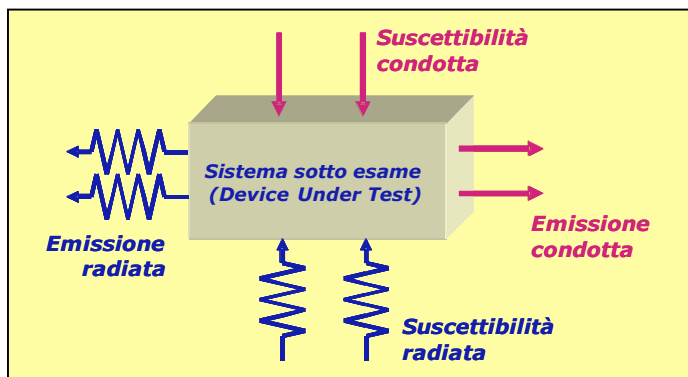
Nel 2004, il Laboratorio ha iniziato un'attività di studio incentrata sulla **modellazione numerica e caratterizzazione sperimentale di materiali innovativi per applicazioni elettromagnetiche** come, ad esempio, materiali schermanti, materiali assorbenti, materiali selettivi in frequenza, metamateriali.



Su mandato della Pubblica Amministrazione, il Laboratorio esegue **misure ambientali** per la rilevazione dei livelli di campo elettromagnetico a fini protezionistici (ad esempio, la campagna di misure su Radio Vaticana rilevate nel 2001 per conto del Ministero dell'Ambiente) e particolari misure non normate: caratterizzazione del potere schermante di dispositivi di abbattimento delle emissioni dei telefoni cellulari; misure di caratterizzazione elettrica ed elettromagnetica di apparati per la difesa personale per conto della Polizia di Stato.

Il Laboratorio esegue inoltre misure più generali sui campi elettromagnetici quali la **caratterizzazione di antenne e sensori**, la misura dei **diagrammi di radiazione**, la validazione di risultati generati da codici numerici di modellazione elettromagnetica.

## Misure di Compatibilità Elettromagnetica

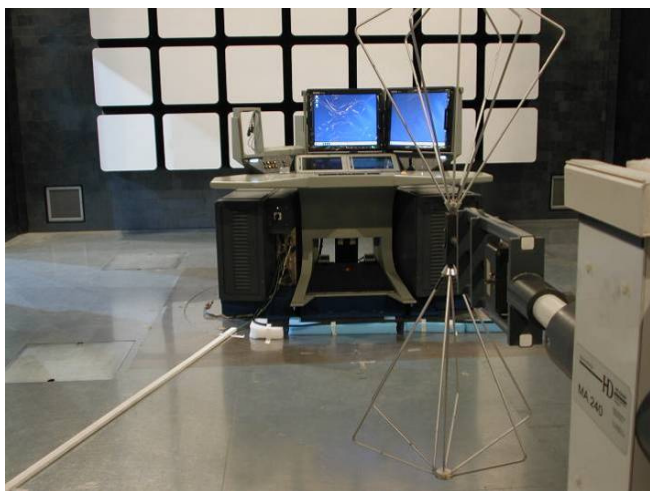


Su richiesta di committenti esterni, pubblici e privati, il Laboratorio di Campi Elettromagnetici esegue misure di **Compatibilità Elettromagnetica** su sistemi, apparati e dispositivi elettrici ed elettronici.

La strumentazione e gli impianti in dotazione consentono l'esecuzione di una variegata gamma di misure di **emissione radiata e condotta** e di **immunità radiata e condotta**, in conformità alle normative civili, militari ed avioniche, secondo il quadro riportato nella tabella seguente.

Descrizione delle prove	Normative di riferimento
Prove su apparati avionici	RTCA/DO-160C
Prove su apparati militari	MIL STD 461 rev. C/D/E/F MIL STD 462 e 462 rev. D
Prove di emissione radiata e condotta su apparecchi della tecnologia dell'informazione	EN 55022
Prove di emissione radiata e condotta su apparecchi per usi industriali, scientifici ed elettromedicali	EN 55011
Prove di immunità alla scarica elettrostatica ESD	EN 61000-4-2
Prove di immunità radiata	EN 61000-4-3
Prove di immunità ai transitori veloci (Burst)	EN 61000-4-4
Prove di immunità condotta	EN 61000-4-6

Il Laboratorio di Campi Elettromagnetici esegue misure di compatibilità elettromagnetica privilegiando in modo particolare gli aspetti di supporto e di consulenza ai committenti soprattutto nella fase di ingegnerizzazione del prodotto anche nell'ambito di attività non catalogabili come pure e semplici richieste di qualificazione.

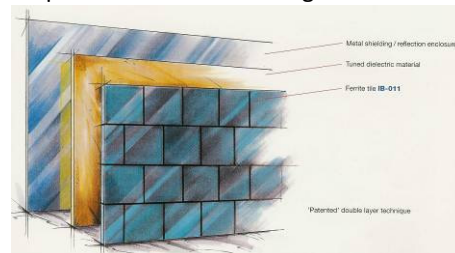


## La camera semi-anechoica VECUVIA



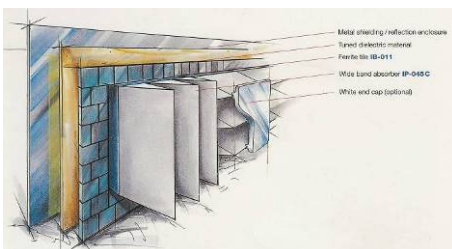
La camera semi-anechoica **VECUVIA** è il principale ambiente di misura del Laboratorio di Campi Elettromagnetici per l'esecuzione di misure di **compatibilità elettromagnetica** ad una distanza di 3 m dalle antenne. Essa ha dimensioni esterne pari a (9,00 x 6,00 x 5,60) m<sup>3</sup>.

La **cabina schermata** più esterna, con la funzione di isolare la camera dai campi di radiazione esterni e di evitare che i campi generati al suo interno possano propagarsi verso l'esterno, è stata realizzata in modo da garantire un'attenuazione superiore a 80 dB nella gamma di frequenze compresa fra 10 kHz e 100 kHz e superiore a 100 dB nella gamma compresa fra 100 kHz e 18 GHz.

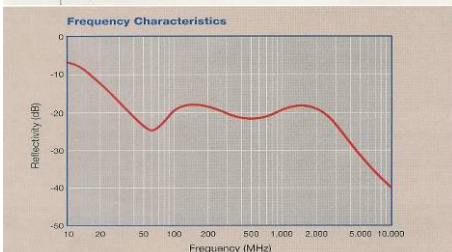
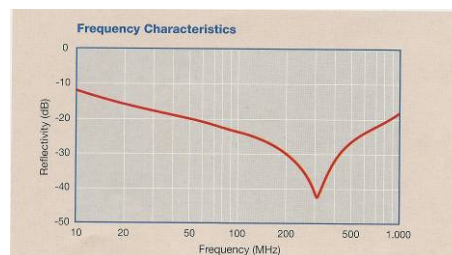


Le pareti laterali interne ed il soffitto sono interamente rivestiti con **mattonelle di ferrite TDK IB-011** di dimensioni (10 x 10 x 0,65) cm<sup>3</sup>, in grado di assorbire le radiazioni incidenti fino ad 1 GHz.

La banda operativa della camera semi-anechoica **VECUVIA** è stata estesa fino a 18 GHz tramite l'installazione di pannelli di **coni assorbitori** (realizzati in schiuma di polistirolo espanso ad alta densità e caricati con carbonio) **TDK IP-045C** sulle pareti laterali e sul soffitto.



Il rivestimento assorbente ha la funzione di attenuare fortemente i campi elettromagnetici generati all'interno della camera ed incidenti sulle pareti e di ridurre gli echi (da cui il termine **anechoico**), così da simulare il comportamento di uno spazio aperto (**Open Area Test Site**).



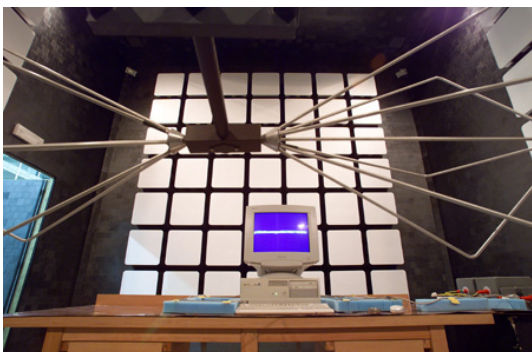
All'interno della camera semi-anechoica è installato un pavimento tecnico rialzato, rivestito di pannelli metallici che assolve la funzione di **piano riflettente le radiazioni (piano di massa)**.

Disponendo in modo opportuno sul piano di massa pannelli rivestiti da ferriti o pannelli di coni assorbenti, è possibile trasformare la camera semi-anechoica in modo da simulare (nelle prove di immunità ai campi radiati o in altre situazioni

sperimentali) una **camera completamente anechoica**.

A filo del piano di massa (ed in continuità elettrica con esso) è installata una **tavola rotante** del diametro di 2 m con una portata massima di 1000 kg, su cui vengono collocati gli apparati sottoposti a prova.

Le antenne possono essere posizionate su un **braccio meccanico** che consente l'elevazione in verticale da 1 m fino a 4 m e la rotazione di 90° intorno all'asse orizzontale (polarizzazione orizzontale e verticale delle antenne). Entrambi i dispositivi sono controllabili da remoto tramite



cavi a fibra ottica, evitando così ogni possibile interferenza con le misure.

Ruotando l'apparato collocato sulla tavola rotante e modificando contemporaneamente l'elevazione e la polarizzazione dell'antenna ricevente posta sul braccio meccanico, è possibile individuare le configurazioni a cui corrispondono i massimi livelli di emissione, così come richiesto da alcune importanti normative di compatibilità elettromagnetica (**EN 55022**, **EN 55011**).

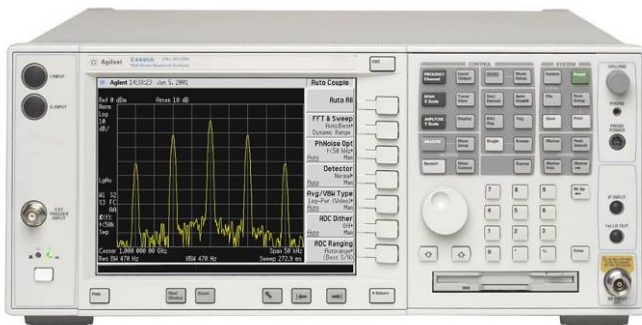


## Laboratory Equipment

The main instrument used in the Laboratory of Electromagnetic Fields to perform tests and measurements is the spectrum analyzer.

The Laboratory is equipped with three spectrum analyzers:

- the **Agilent E4440A spectrum analyzer**, operating between 3 Hz and 26 GHz, is used for radiated and conducted emission qualification tests and for study and research on new-generation telecommunication devices and systems (GSM, UMTS, WLAN, Bluetooth);
- the **EMI (ElectroMagnetic Interference) HP 8574A receiver** is an integrated system consisting of a spectrum analyzer, a quasi-peak adapter and a frequency pre-selector. It is suited for electromagnetic compatibility tests in the range 100 Hz ÷ 1.5 GHz. The whole equipment is controlled by a computer code for complete management of the emission tests (test setup, transducer database, acquisition and storage of experimental data);
- the **HP 8594E spectrum analyzer**, operating between 9 kHz and 2.9 GHz, is used as a selective meter in laboratory and for narrow-band measurements in open field.



Furthermore the Laboratory is endowed with several Radio Frequency instruments including:

- **power amplifiers** in the frequency range 10 kHz ÷ 1 GHz with a maximum power of 100 W;
- **signal generators** from 9 kHz up to 4 GHz;
- **isotropic sensors of electric field** from 10 kHz up to 3 GHz;
- **Helmholtz coil** to generate magnetic fields.
- **TEM cell** and **double TEM cell** to generate electric fields up to 200 MHz;
- **power meters**;
- several kinds of **antennas** (rod, biconic, log-periodic, horn) in the frequency range 10 kHz ÷ 18 GHz;
- several equipments and instruments for electromagnetic compatibility qualification tests, in compliance with different standards, such as **LISN**, **CDN**, **current clamps**, **transient generators**, and **electrostatic discharge generators**.



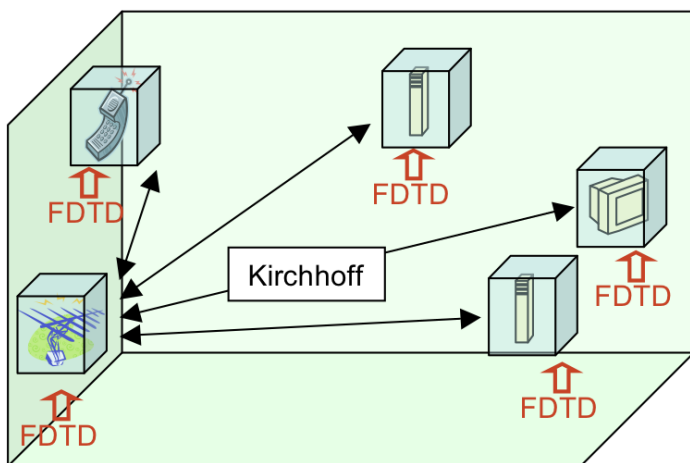
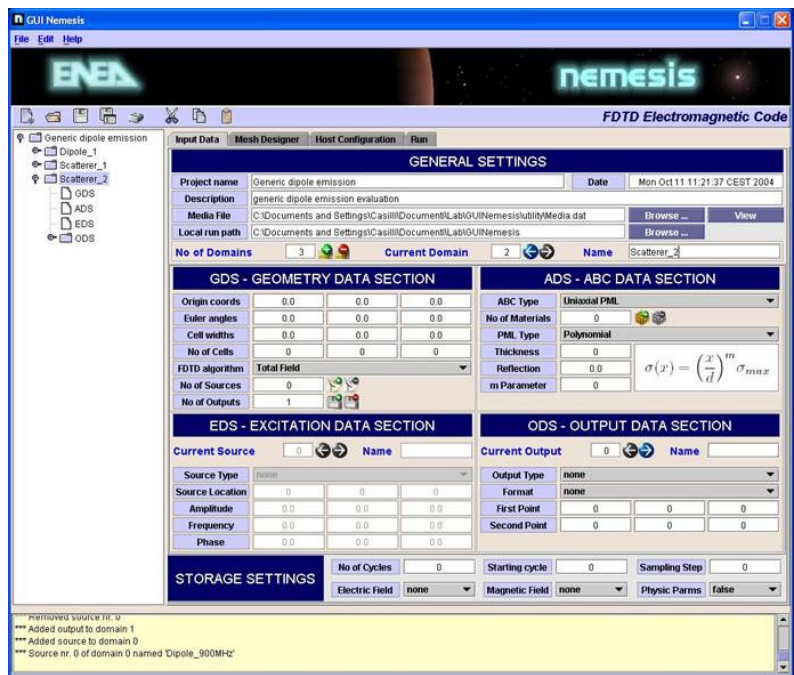
Moreover, the laboratory is equipped with a **LeCroy WaveMaster 8500 digital oscilloscope**, which is able to sample signals at a maximum speed of 20 GS/s up to 5 GHz. This instrument is used to characterize waveforms and pulses with high frequency content.

# Metodi numerici di modellazione dei campi elettromagnetici

**Nemesis** è un codice numerico di modellazione dei fenomeni di propagazione e diffusione dei campi elettromagnetici sviluppato dal Laboratorio di Campi Elettromagnetici dell'ENEA.

Le **equazioni differenziali di Maxwell** vengono discretizzate ed integrate utilizzando il metodo delle **differenze finite nel dominio del tempo (FDTD)**. Sui bordi del dominio di calcolo, si applicano le **condizioni di assorbimento del second'ordine di Mur** o le **condizioni di strato perfettamente adattato (Perfectly Matched Layer) di Bérenger**, in modo da simulare le condizioni di spazio aperto.

Nella simulazione di domini di grandi dimensioni (dell'ordine di **cento o mille lunghezze d'onda**), i vincoli sulle dimensioni minime delle celle del reticolo di calcolo ( $\lambda/10$ ) rendono praticamente impossibile l'utilizzo del metodo FDTD, a causa dell'enorme quantità di memoria richiesta dall' algoritmo (dell'ordine di **40·N<sup>3</sup> byte**, avendo indicato con N il numero di celle lungo una direzione degli assi coordinati del modello)

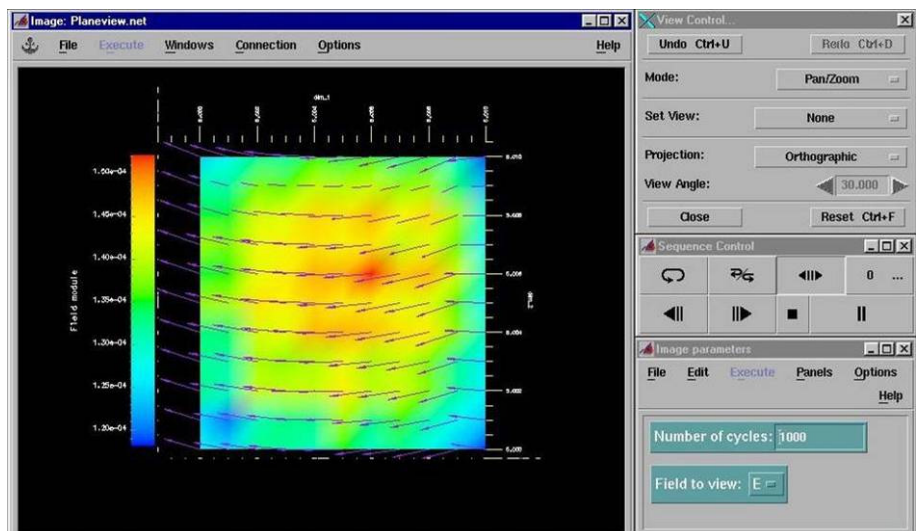


Per ovviare a questo tipo di problemi, conservando per quanto è possibile i vantaggi del metodo FDTD, è stato realizzato un codice modificato che implementa il calcolo dei campi elettromagnetici per mezzo di una **trasformazione "campo vicino - campo lontano" (integrale di Kirchhoff)**, ottenendo così un codice ibrido. La **tecnica ibrida FDTD/Kirchhoff** (nota anche come **"Multiple-Region FDTD" [MR/FDTD]**) sfrutta sostanzialmente il fatto che, nella modellazione elettromagnetica di domini spaziali di grandi dimensioni rispetto alla lunghezza d'onda, gran parte della propagazione delle onde elettromagnetiche avviene, generalmente, nello spazio vuoto. Risulta così possibile modellare grandi porzioni di spazio vuoto con un passo di

reticolo superiore a quanto richiesto dalle condizioni di stabilità numerica del metodo FDTD.

Utilizzando la **formula integrale di Kirchhoff**, si può infatti calcolare il valore della componente  $\psi$  del campo elettromagnetico in un punto qualsiasi del dominio al tempo  $t$ .

L'adozione della **tecnica ibrida FDTD/ Kirchhoff** consente un notevole guadagno in termini di memoria, consentendo così la modellazione di domini più ampi e complessi, al prezzo di un incremento dei tempi di calcolo.



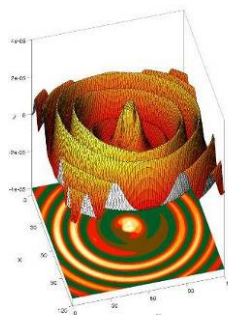
## Metodi numerici di modellazione dei campi elettromagnetici

Nelle immagini che seguono, viene mostrata un'antenna per telecomunicazioni GSM ed un grafico tridimensionale del campo elettrico emesso lungo la direzione z, calcolato per mezzo del codice ibrido **NEMESIS** (collaborazione con **TELECOM Italia Lab**).



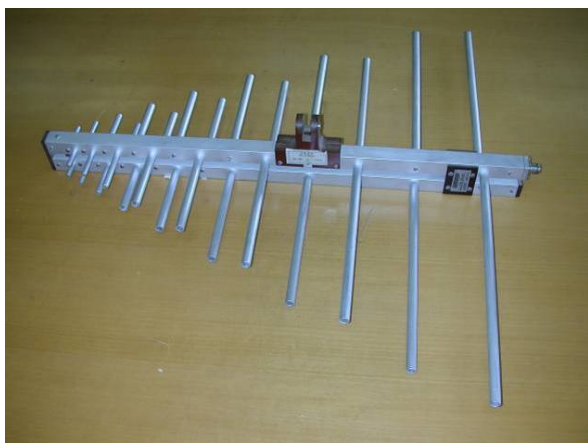
**Antenna GSM Jay-Beam 7276**  
(End-feed sleeve-dipole)

Frequenza di centobanda:  
**2 GHz**

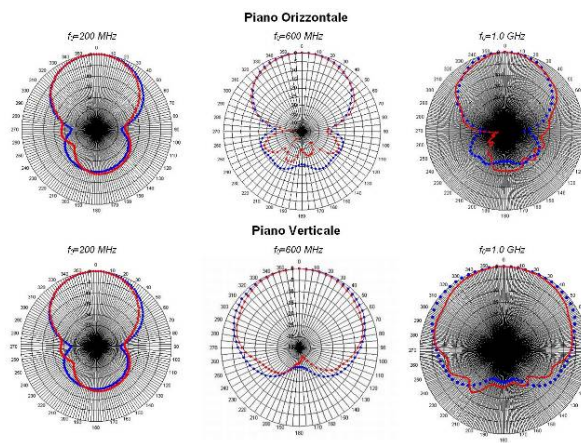


**Risultati numerici relativi al campo elettrico emesso dall'antenna**

Un altro esempio è dato dalla modellazione di un'antenna per misure di compatibilità elettromagnetica.



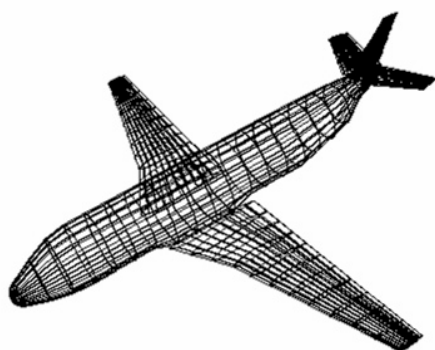
**Antenna Log-Periodic Dipole Array (LPDA)**  
con banda di frequenza compresa fra 200 MHz e 1 GHz



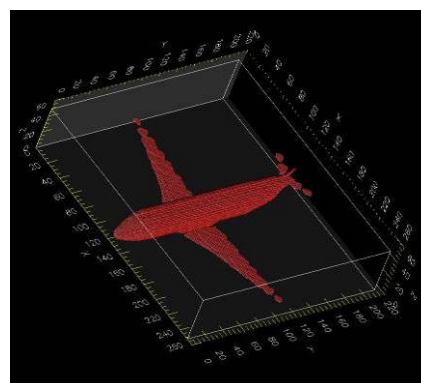
**Diagrammi di radiazioni dell'antenna LPDA a diverse frequenze**  
(● Risultati numerici – ■ Misure sperimentali)

I codici sviluppati dal Laboratorio di Campi Elettromagnetici sono stati parte integrante delle attività della **Linea di Ricerca 1 del Progetto MIUR – CNR/ENEA "Salvaguardia dell'uomo e dell'ambiente dalle emissioni elettromagnetiche"**, che prevedeva come obiettivo finale la realizzazione di un ambiente di sviluppo software integrato che consentisse l'utilizzo di algoritmi e codici diversi per la modellazione dei fenomeni elettromagnetici.

Nell'ambito del Progetto, il Laboratorio di Campi Elettromagnetici, oltre a perfezionare il codice ibrido FDTD/Kirchhoff **NEMESIS**, ha sviluppato un'interfaccia grafica (**Aphrodite**) per la gestione dei file di ingresso e di uscita e un prototipo di generatore automatico di reticoli FDTD a partire da modelli CAD (**Dxf2msh**).



**Modello CAD di un aeroplano**



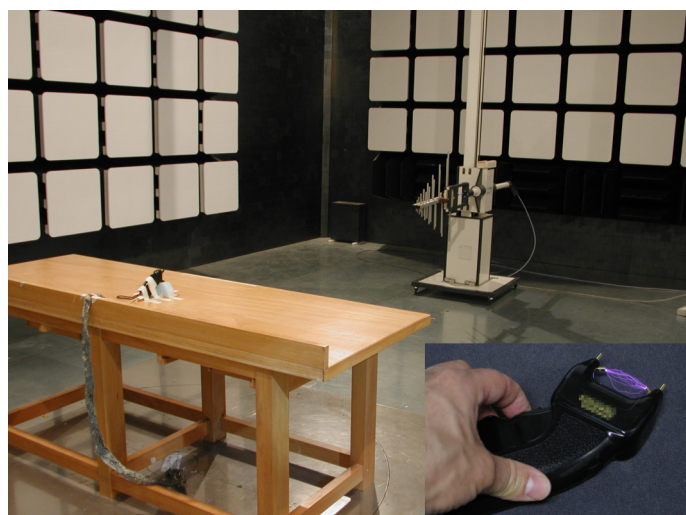
**Reticolo FDTD dell'aeroplano generato automaticamente**

## Misure ambientali e di caratterizzazione elettromagnetica

Su mandato della Pubblica Amministrazione (Ministero dell'Ambiente, Amministrazioni comunali) il Laboratorio di Campi Elettromagnetici ha svolto campagne di misura dei livelli di campo elettromagnetico nell'ambiente per verificare l'ottemperanza ai limiti massimi previsti dalla legislazione italiana.



In particolare, nella primavera del 2001 il Laboratorio di Campi Elettromagnetici ha svolto un'intensa campagna di misure nell'area circostante la Stazione della Radio Vaticana di Santa Maria di Galeria (Roma).



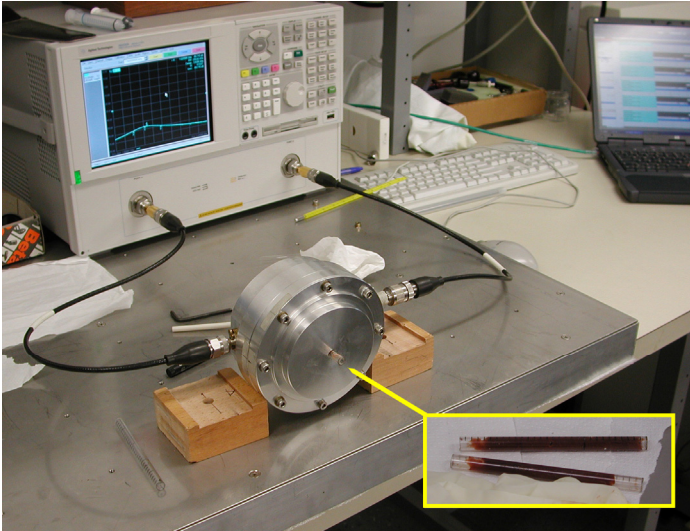
Nel 2005, su incarico dell'Amministrazione comunale, una analoga campagna di misure è stata svolta nel Comune di Anguillara Sabazia (Roma), per verificare i livelli di campo esistenti prima dell'installazione di antenne UMTS di telefonia mobile.

Il Laboratorio di Campi Elettromagnetici esegue inoltre misure di caratterizzazione elettromagnetica di dispositivi elettrici ed elettronici su incarico ed a supporto della Pubblica Amministrazione. Un esempio può essere la caratterizzazione elettromagnetica di un dispositivo a scarica elettrostatica per difesa personale ("storditore elettrico") eseguita per conto della Polizia di Stato.



## Sistemi elettromagnetici per applicazioni mediche

Il Laboratorio di Campi Elettromagnetici ha iniziato un'attività di ricerca nel campo dello studio e dello sviluppo di sistemi elettromagnetici per applicazioni mediche: **caratterizzazione elettromagnetica di tessuti biologici *ex vivo* ed *in vivo***; **rilevazione di tumori** della prostata, della vescica, del seno; **ricostruzione di immagini a microonde** per la rilevazione e localizzazione di tumori.



A titolo di esempio, nell'immagine a fianco viene riportato l'allestimento sperimentale per la misura della **costante dielettrica  $\epsilon$**  di fegato di manzo (contenuto nelle provette di quarzo) per mezzo di una cavità risonante cilindrica.

È attualmente in corso uno studio per lo sviluppo di sonde per la misura delle proprietà elettromagnetiche su tessuti *in vivo*, piuttosto che su tessuti escissi, per ottenere dati sperimentali più realistici da introdurre nei modelli teorici e nelle simulazioni numeriche.

Nell'ambito di accordi di collaborazione con la **II Facoltà di Medicina e Chirurgia** e con il **Dipartimento di Ingegneria Elettronica dell'Università "La Sapienza" di Roma**, il Laboratorio di Campi Elettromagnetici ha in corso uno studio di caratterizzazione elettronica ed elettro-

magnetica di un dispositivo per la rilevazione di tumori della prostata denominato **TRIMprob™**. Lo studio è finalizzato ad acquisire i dati sperimentali di caratterizzazione del dispositivo ed a verificarne i principi fisici di funzionamento e di interazione con i tessuti biologici.

Il Laboratorio è inoltre impegnato nella ricerca e nello studio di un **sistema a microonde per la ricostruzione di immagini**, finalizzato alla rilevazione ed alla localizzazione di tumori del seno.

