



MINISTERO DELL'ISTRUZIONE, DELL'UNIVERSITA' E DELLA RICERCA

Programmi di ricerca cofinanziati - Modello E Relazione scientifica conclusiva sui risultati di ricerca ottenuti - ANNO 2007 prot. 2007AW2K4Y

1. Area Scientifico Disciplinare principale	09: Ingegneria industriale e dell'informazione
2. Coordinatore Scientifico del programma di ricerca	CHIAMPI Mario
- Università	Politecnico di TORINO
- Facoltà	Facoltà di INGEGNERIA
- Dipartimento/Istituto	Dip. INGEGNERIA ELETTRICA
3. Titolo del programma di ricerca	Mitigazione di campi magnetici prodotti da MRI: soluzioni schermanti con elementi superconduttori e tradizionali
4. Settore principale del Programma di Ricerca:	ING-IND/31
5. Costo originale del Programma:	506.000 €
6. Quota Cofinanziamento MIUR:	196.000 €
7. Quota Cofinanziamento Ateneo:	84.172 €
8. Finanziamento totale:	280.172 €
9. Durata:	24 mesi

10. Obiettivo della ricerca eseguita

Gli obiettivi del progetto si sono indirizzati essenzialmente sia all'adeguamento di sistemi MRI già esistenti in termini di esposizione a campi elettromagnetici, sia a fornire risposte alle esigenze di innovazione di questa tecnica diagnostica integrando le prescrizioni normative. In particolare, l'obiettivo cruciale, alla cui soluzione il progetto è stato finalizzato, è stato quello di studiare, progettare e realizzare soluzioni schermanti innovative, allo scopo di garantire livelli di induzione magnetica in ambiente MRI al di sotto dei limiti prescritti dalla Direttiva CE, in tutte le possibili condizioni operative.

Il raggiungimento di tale obiettivo, ha reso necessario l'utilizzo di materiali superconduttori nel progetto di schermo, date le loro caratteristiche uniche di mitigazione passiva di elevati campi magnetici. E' nata quindi l'esigenza di creare un'intera filiera ad alta tecnologia, dalla produzione dei materiali al loro assemblaggio finale, passando necessariamente attraverso fasi di simulazione, caratterizzazione e controllo qualità. Le problematiche da affrontare hanno dunque imposto un approccio fortemente interdisciplinare, con competenze ingegneristiche, fisiche, chimiche, matematiche e mediche, ampiamente garantite dalla collaborazione tra le Unità coinvolte.

Per rispondere alle esigenze sopra menzionate, il progetto si è posto obiettivi parziali che possono essere così riassunti:

- messa a punto di un protocollo di misura capace di rilevare una distribuzione spaziale e spazio-temporale del campo magnetico ed elettromagnetico;
 - elaborazione e messa a punto di un codice di calcolo versatile ed efficace per la ricostruzione del campo magnetico ed elettromagnetico e per la simulazione delle proprietà di schermatura magnetica di strutture complesse, composte di materiali superconduttori, all'occorrenza anche in congiunzione a materiali ferromagnetici tradizionali;
 - definizione di un protocollo di produzione di manufatti superconduttori di forma anche complessa, ottenuti mediante processo innovativo, e di giunzioni tra le parti costituenti con proprietà di contenimento del flusso magnetico;
 - definizione di un protocollo di caratterizzazione elettromagnetica delle proprietà fondamentali dei materiali, delle proprietà dei vari manufatti prodotti (per il controllo di qualità del processo di produzione) e delle proprietà schermanti di prototipi (per la validazione di qualsiasi modello che aspiri a descrivere successivamente le prestazioni di dispositivi in scala reale);
 - messa a punto di un sistema criogenico adatto al raffreddamento di prototipi di dimensioni sufficienti alle attività di modellizzazione di sistemi reali, in vista di applicazioni in scala reale ai sistemi MRI.
 - realizzazione di un archetipo di schermo passivo superconduttore e ibrido (ferromagnete/superconduttore)
- In conclusione dunque obiettivo globale del progetto, punto di conversione degli obiettivi intermedi sopra elencati, è stato l'elaborazione di criteri generali per la definizione di sistemi schermanti innovativi, basati sull'utilizzo di materiali superconduttori e che possano essere indifferentemente applicati sia agli apparecchi MRI già in opera, sia alla progettazione di macchine di nuova concezione.

11. Descrizione della Ricerca eseguita e dei risultati ottenuti

Sulla base dei Work packages delineati in fase di presentazione della domanda, i risultati si possono così riassumere:

WP0 - ISTRUTTORIA PRELIMINARE

Oltre agli aspetti organizzativi, è stato predisposto un sito web (www.m3s3t.polito.it/index.html) dedicato al progetto ed è stato creato un database che raccoglie la letteratura specifica del settore (suddivisa nei temi fisici, sperimentali, modellistici e normativi).

WP1 - ASPETTI NORMATIVI E RISCHIO DI ESPOSIZIONE

L'attività si è basata su misure di campo, svolte presso l'azienda sanitaria ospedaliera Santa Croce e Carle di Cuneo su una MRI da 1.5 T, suddivise nelle tre tipologie:

1) mappatura del campo magnetico statico all'interno del locale MRI e nel corridoio adiacente in assenza di campo alternato.

2) misura delle componenti alternate in "bassa" e "media" frequenza.

3) misura di campo elettromagnetico a radiofrequenza sia all'interno che all'esterno del locale MRI.

I rilievi di campo statico, condotti a partire dalla "bocca" della macchina, su una griglia a maglie quadrate sino ad una distanza di 3 m lungo l'asse della macchina e

da 1 m a 2 m lateralmente, hanno fornito valori di induzione contenuti entro la gamma 0.1 mT - 860 mT.

Campo alterato a bassa frequenza: è stato misurato l'andamento temporale delle tre componenti ortogonali di induzione magnetica mediante una sonda isotropa 3D. La sonda è stata posta sul lettino, in corrispondenza della posizione della testa del paziente adottando due punti di riferimento: in corrispondenza della bocca del tomografo e a 1.35 m da essa. Si sono considerate le sequenze: Spin Echo, Turbo Spin Echo, Echo-Planar e Fast gradient Echo, analizzando il contenuto armonico dei segnali e calcolando l'indice di esposizione secondo le indicazioni dell'International Commission on non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Le sequenze prese in esame sono identificate dal tempo di rilassamento TR, dal tempo di eco TE e dal "flip angle" (angolo di rotazione che subisce il vettore di magnetizzazione totale rispetto alla direzione di magnetizzazione definita dalle bobine di campo statico). La valutazione dei risultati di queste misure, in dettaglio nel modello C dell'Unità INRIM, è stata effettuata secondo le modalità indicate nella norma europea EN50499 introducendo un indice di esposizione T1 (calcolato a partire dal valore di picco dell'andamento pesato di induzione magnetica), che assicura la conformità ai livelli di riferimento se inferiore all'unità. Seguendo le attuali indicazioni, la funzione peso complessa è stata implementata mediante un filtro numerico del primo ordine. L'analisi è stata poi ripetuta valutando l'indice di esposizione T2, del tutto analogo a T1, ma calcolato adottando i nuovi livelli di riferimento proposti dall'ICNIRP ed elaborando uno specifico andamento della funzione peso. In Fig.1 sono riportati gli andamenti dei livelli di riferimento attualmente in vigore in funzione della frequenza (curva a) e quelli proposti (curva c). Il grafico presenta anche gli andamenti dell'induzione che si otterrebbero pesando una sinusoidale a frequenza crescente di ampiezza costante pari a 30.7 μT (curva b) per i livelli attualmente in vigore e a 100 μT per quelli proposti (curva d).

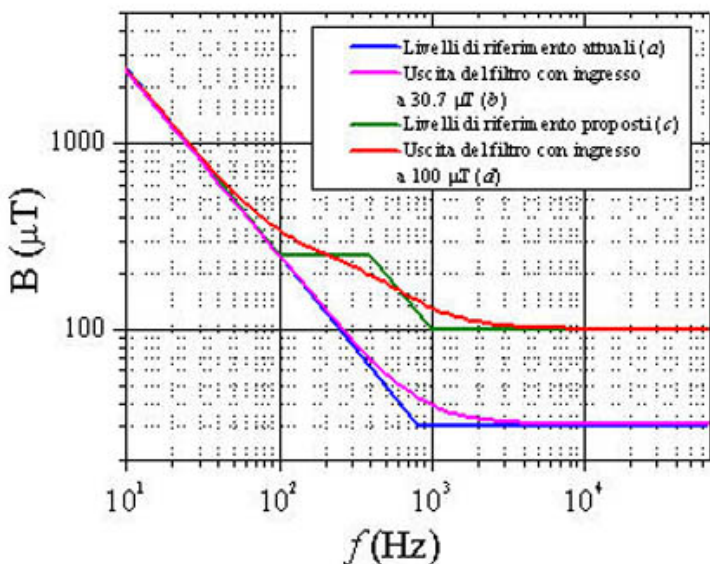


Figura 1 - Filtri di riferimento attuali e proposti e risposta dei filtri

Nelle misure in prossimità della bocca della macchina, l'indice T1 è risultato fortemente dipendente dal tipo di sequenza applicata e compreso tra 4.4 (Spin Echo) e 48 (Echo Planar). Nel caso dei nuovi livelli di riferimento, l'indice T2 decresce ma si mantiene comunque superiore all'unità. ($T_2=1.5$ Spin Echo, e $T_2=20$ Echo Planar). Una sostanziale riduzione si riscontra allontanandosi dalla bocca: a una distanza di 1.3 m i valori dell'indice di esposizione sono sempre inferiori a 0.1. La presenza, nella catena di condizionamento del segnale del misuratore, di un filtro passa-alto del secondo ordine con frequenza di taglio di 1 Hz introduce evidenti distorsioni per forme d'onda trapezoidali e impulsive. Poiché tale effetto non influenza sensibilmente la valutazione dell'indice di esposizione, non è stata apportata alcuna correzione alle forme d'onda acquisite.

I rilievi di campo elettromagnetico a radiofrequenza sono stati condotti esternamente alla macchina ad una distanza dalla "bocca" di 1.5 m tale da evitare l'effetto missile. Nelle misure a larga banda, i valori di densità di potenza sono risultati sempre trascurabili ($\approx 1 \text{ W/m}^2$) come quelli di campo elettrico e magnetico. Le misure in banda stretta hanno registrato, componenti armoniche fino a circa 700 MHz, tutte di ampiezza trascurabile ai fini della valutazione dell'esposizione.

WP2 - MODELLI MATEMATICO-NUMERICI

L'attività modellistica si è articolata in due filoni relativi alla soluzione delle equazioni di Maxwell e allo sviluppo di modelli costitutivi.

Per il calcolo della distribuzione del campo elettromagnetico si è fatto uso del metodo degli elementi al contorno (BEM), che, limitando la discretizzazione alle sole superfici degli oggetti, consente lo studio di domini aperti. Il metodo può essere accoppiato al metodo degli elementi finiti (metodi ibridi FEM/BEM), sia per trattare componenti con caratteristiche costitutive non lineari, sia per introdurre oggetti elaborati con la tecnica delle "lastre sottili", particolarmente vantaggiosa in problemi di schermatura. La formulazione del modello BEM, in regime permanente, è sviluppata in una forma generale, includendo sia le equazioni di Maxwell nel dominio della frequenza sia le condizioni di interfaccia sulle superfici di separazione tra diversi volumi. Tramite l'identità di Green vettoriale, il problema è ricondotto a due equazioni integrali relative ai campi elettrico (EFIE) e magnetico (MFIE), in cui le incognite vettoriali sono i campi stessi. La forma della funzione di Green consente di trattare separatamente i problemi stazionari/quasistazionari (magnete superconduttore e bobine di gradiente) e quelli di propagazione (eccitazioni a radiofrequenza). Le sorgenti di campo previste sono distribuzioni di densità di corrente, distribuzioni di densità di carica e onde piane con polarizzazione lineare. Nel metodo BEM, i volumi delle sorgenti sono suddivisi in esaedri e le superfici di separazione tra diverse componenti sono discretizzate in triangoli, su cui le componenti normali e tangenziali dei campi elettrico e magnetico sono assunte costanti. Il relativo codice di calcolo comprende anche programmi di post-elaborazione per la valutazione di grandezze integrali e locali (induzione magnetica, densità di corrente, tasso di assorbimento specifico, ecc.). Una serie di confronti con soluzioni analitiche e risultati forniti da altri metodi numerici ha permesso di definire in modo ottimale le soluzioni e i parametri suscettibili di influenzare le prestazioni computazionali.

Un punto originale è la possibilità di valutare le correnti indotte in un corpo mobile in un campo stazionario non uniforme. Nell'ipotesi che le correnti indotte nell'oggetto non perturbino i campi magnetici di sorgente, questo fenomeno è descritto da un'equazione di campo elettrico analoga a quella dei problemi quasistazionari, dove il termine forzante è la derivata temporale della componente tangenziale dell'induzione magnetica sulla superficie dell'oggetto stesso. L'analisi è effettuata in regime transiente con una procedura step-by-step, sostituendo le derivate temporali dell'induzione magnetica con i rapporti incrementali. Il procedimento comprende il calcolo preliminare dell'induzione magnetica sulla superficie del corpo in ogni posizione, il calcolo dei rapporti incrementali dell'induzione magnetica e la soluzione dell'equazione del campo elettrico con una tecnica BEM. L'uso di un riferimento solidale con l'oggetto soggetto a moti roto-traslatori rigidi, lasciando inalterata la matrice BEM durante l'intero processo, migliora sensibilmente l'efficienza di calcolo. La procedura è applicata allo studio degli effetti prodotti su soggetti che si muovono all'interno o in prossimità di sistemi MRI di forma tubolare e di tipo aperto. I risultati ottenuti, in termini di ampiezza e di forma d'onda delle densità di corrente indotte, sono attualmente oggetto di analisi, in relazione anche all'assenza di una normativa specifica che individui in modo chiaro i limiti di esposizione per questa casistica.

In un primo modello dei materiali superconduttori, supposti in stato Meissner, si è attribuito ad essi una permeabilità magnetica relativa significativamente minore dell'unità ($< 1/10000$). Tale approccio, non nuovo in letteratura, consente, in calcoli di prima approssimazione, di simulare l'effetto di barriera invalicabile, prodotto da elementi superconduttori inseriti in una regione sede di campo magnetico. Il confronto tra calcoli e misure effettuato su una pastiglia di MgB_2 è buono con il provino a 20 K, mentre a 30 K si riscontra qualche discordanza.

Un modello alternativo più sofisticato è basato su una procedura ibrida FEM/BEM che include la tecnica delle "lastre sottili". In tale approccio il metodo BEM analizza i fenomeni "macroscopici" nel dominio aperto comprendente le sorgenti di campo e l'ambiente circostante, mentre gli schermi, interpretati come elementi di superficie, sono trattati con un modello FEM bidimensionale. Le discontinuità prodotte dai fenomeni all'interno dello schermo sono descritte da condizioni di interfaccia tra le due facce della lastra, dedotte dalla soluzione analitica di un problema di campo 1D nello spessore dello schermo. In pratica, i fenomeni che si

producono nello spessore della lastra sono considerati indipendenti da quelli che si verificano nelle direzioni trasversali, avendo luogo su scale spaziali diverse. Nel caso di lastre superconduttrici, partendo dalla solenoidalità dell'induzione magnetica e introducendo la seconda equazione del modello di London si ottengono le seguenti condizioni di interfaccia, che legano le componenti tangenziale e normale del campo magnetico sulle due facce (a) e (b) di una lastra superconduttrice di spessore d :

$$\begin{cases} H_n^{(b)} + H_n^{(a)} = -\frac{\lambda}{tgh\left(\frac{d}{2\lambda}\right)} div_S \left(\mathbf{H}_t^{(b)} - \mathbf{H}_t^{(a)} \right) \\ H_n^{(b)} - H_n^{(a)} = -\lambda tgh\left(\frac{d}{2\lambda}\right) div_S \left(\mathbf{H}_t^{(b)} + \mathbf{H}_t^{(a)} \right) \end{cases}$$

Il modello proposto presenta i limiti di applicabilità propri del modello di London, rigoroso solo se il materiale è in uno stato perfettamente diamagnetico (stato Meissner). Nei superconduttori del II tipo (MgB2), che già a bassi campi transiscono in stato misto, le previsioni possono rivelarsi meno precise. Tuttavia, i risultati forniti da questo modello nel caso di una pastiglia di MgB2 sono in ottimo accordo con le misure (Fig.2), migliorando lievemente l'accuratezza ottenuta adottando una permeabilità magnetica relativa inferiore all'unità, per una temperatura del provino di 20K. Un altro limite di entrambi i modelli si riscontra nello studio di elementi anulari e tubolari, nei quali, utilizzando questo approccio, non si riesce a riprodurre l'effetto di espulsione del campo magnetico dal volume di aria racchiuso all'interno dell'elemento, che si verifica quando il campo magnetico è applicato in condizioni di "zero field cooling". Tale limite non pregiudica lo studio di schermi superconduttori a connessione lineare semplice.

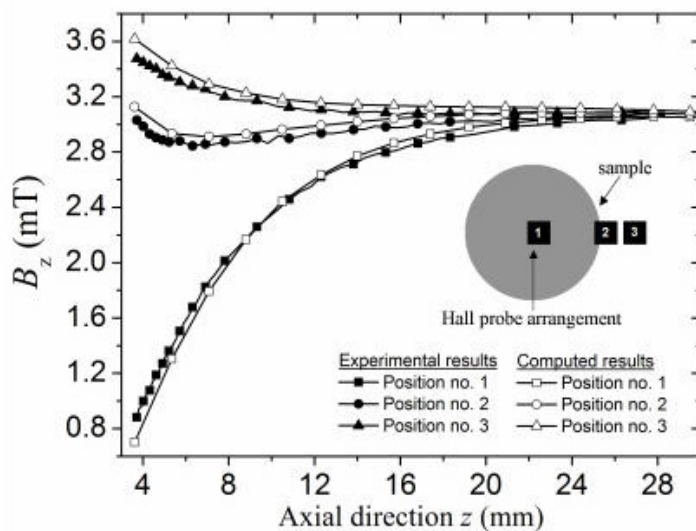


Figura 2 – Confronto tra le componenti assiali dell'induzione magnetica calcolate mediante il modello alle lastre sottili e misurate da tre sonda distribuite radialmente lungo un diametro del campione discoidale (diametro 20.30 mm, spessore 3.44 mm) al variare dalla distanza tra il campione e l'elemento sensibile della sonda (campo magnetico applicato esternamente pari a 3.26 mT).

WP3 - REALIZZAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DELLE COMPONENTI DELL'ARCHETIPO

a) Sintesi degli elementi di schermo

Sono stati sintetizzati bulk di MgB2 con differenti gradi di purezza e densità testando sia processi tradizionali che processi alternativi. Le forme realizzate sono state cilindriche, esagonali e, su richiesta del progetto, cilindriche cave.

Per la sintesi del materiale si sono seguiti inizialmente due metodi: a) la sintesi di MgB2 sinterizzato partendo da miscele di componenti primari (Mg e B), b) la sinterizzazione diretta di polveri di MgB2. Il primo metodo, che ha fornito campioni con buone caratteristiche superconduttive ($T_c=36K$), anche se con proprietà meccaniche limitate, offre la possibilità di ottimizzare il processo di crescita mediante variazioni sulla stechiometria dei precursori. Il secondo metodo, più veloce ed economico, offre migliori proprietà meccaniche nei prodotti ma non la stessa scalabilità e rende necessario l'applicazione di una pressione durante la fase di sintesi. Con entrambi i metodi sono stati cresciuti campioni a geometria cilindrica con diametro almeno 10 volte superiore all'altezza. Per far ciò si sono progettati e realizzati contenitori in acciaio inconel in grado di sopportare le condizioni di sintesi dell'MgB2 (temperature dell'ordine del migliaio di gradi Celsius e pressioni di circa 6-8 bar).

E' stato quindi studiato un metodo di crescita che sfrutta un irraggiamento a microonde per fornire l'energia necessaria alla reazione. Con tale metodo si può ottenere un riscaldamento globale dell'intero sistema in un tempo dell'ordine dei secondi. Nel caso dei precursori del composto MgB2 questo processo viene sostenuto mediante l'uso di determinati "facilitatori" che, con il loro riscaldamento, sono in grado di modificare la costante dielettrica del sistema di partenza favorendo l'assorbimento delle microonde. Si sono considerate due modalità di irraggiamento a microonde: volume irraggiato in maniera diffusa con potenze dell'ordine dei 600-900 W e con periodi di applicazione pulsati (sistema multimodale) e focalizzazione delle microonde in una zona definita dello spazio (mediante guida d'onda - sistema monomodale) con potenze nell'ordine dei 1.5-2 kW. Un flusso di Ar durante l'intero processo ha prevenuto l'ossidazione del Mg. I risultati ottenuti sono stati molto incoraggianti (vedi WP4) sebbene le proprietà meccaniche dei materiali non rispondano ancora perfettamente alle specifiche richieste per la creazione degli elementi dello schermo. La densità del materiale è infatti ancora bassa a causa dell'impossibilità di applicare una pressione isostatica al sistema durante il processo di sintesi. Tuttavia con questa procedura di crescita la durata del processo di sintesi si riduce a circa 15 min, diminuendo pesantemente il tempo necessario per raggiungere la temperatura di sinterizzazione rispetto ai metodi tradizionali. Ciò porta ad ottenere una dimensione dei grani minore e di conseguenza migliori proprietà meccaniche e una miglior uniformità del prodotto che lo rende senza dubbio più interessante dal punto di vista applicativo.

Sfruttando i diversi metodi di sintesi sono state inoltre operate una serie di sostituzioni stechiometriche mediante l'uso di elementi ferromagnetici (Fe, Co) o di composti strutturali quali fullerene o SiC. L'analisi è tuttora in corso.

b) Analisi strutturale

L'analisi strutturale mediante diffrazione di raggi X ha certificato la presenza della fase principale di MgB2 con annesse impurezze relative a fasi di MgO e Mg non reagito (primo metodo di crescita). L'analisi Rietveld ha evidenziato una fase riconducibile alla MgB12.5 già riscontrata in letteratura. Nei campioni drogati è stata

osservata la variazione dell'occupanza dei siti del boro, oltre alla creazione di composti di intercalazione, a seguito delle sostituzioni cationiche con Co, W, Si e C.

c) Progettazione e messa in opera di strumentazione specifica

La caratterizzazione delle proprietà schermanti dei campioni superconduttori ha richiesto la progettazione, fabbricazione e taratura di un discendente criogenico atto alle misure di mitigazione magnetica in 3D. Il discendente è stato progettato per l'inserimento in una camera criostatica (anch'essa progettata ad hoc) abbinata a criorefrigeratore operante nell'intervallo 10-300 K, già in dotazione. Il discendente (Fig.3) consta di un dispositivo porta-sonde Hall movimentabile mediante un attuatore lineare avente risoluzione spaziale di 1 micron e range della corsa di 100 mm. Il dispositivo può alloggiare più sonde di Hall in configurazioni planari variabili in conformità alla geometria del campione da analizzare (Fig.4). Tali array planari di sonde Hall consentono la misura della distribuzione spaziale del campo magnetico a valori prestabiliti della coordinata verticale (Fig.5) con conseguente ricostruzione delle proprietà schermanti del materiale in esame (ulteriori dettagli sono riportati sul modello C dell'Unità Polito DIFIS). Il sistema di misura è corredato da due magneti: un Cryogen free magnet (per campi fino a 5T) e un elettromagnete tradizionale (per campi fino a 40 mT).



Figura 3 - Discendente con dispositivo per il montaggio delle sonde di Hall. Il supporto delle sonde viene movimentato mediante un attuatore lineare avente una risoluzione di 1 μm e una corsa di 100 mm.

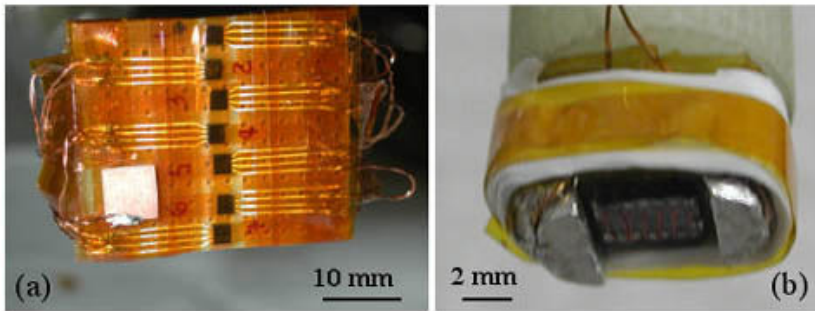


Figura 4 – Array lineari di sonde Hall per la misura di gradienti lineari di mitigazione del campo magnetico su differenti scale spaziali: (a) array per scansioni su lunghezza di 27 mm, (b) array miniaturizzato per scansioni su lunghezza di 3.5 mm.

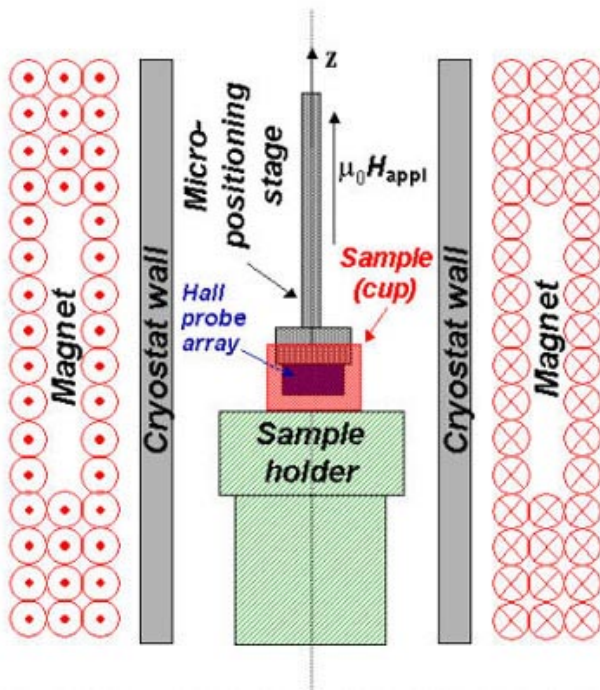


Figura 5 – Schema del set up sperimentale (non in scala) per misure di mitigazione magnetica in campioni a forma di tazza (archetipo): un array miniaturizzato di sonde Hall è montato sulla superficie inferiore del dispositivo porta sonde movimentabile con risoluzione micrometrica lungo l'asse z (direzione assiale). Il campione è posizionato sul secondo stadio del criorefrigeratore a circuito chiuso, al centro del magnete.

d) Caratterizzazione di componenti schermanti a geometria semplificata

I campioni di MgB2 sono stati caratterizzati preliminarmente mediante misure di trasporto elettrico determinando la temperatura di transizione (valori compresi tra 34 e 37.5 K) e valutando il "parametro n" necessario per la determinazione della equazione costitutiva del materiale ($E = E_c (J/J_c)^n$).

Si sono quindi effettuate misure delle proprietà di mitigazione magnetica su campioni superconduttori con geometria cilindrica, quali componenti base per la realizzazione dell'archetipo di schermo. La Fig.6 presenta una distribuzione tipo di induzione magnetica, B, rilevata da un array lineare di sonde Hall disposte in configurazione lineare lungo un diametro di un campione discoidale di diametro 20 mm in funzione del campo magnetico applicato esternamente alla temperatura di 20 K (temperatura ottimale per un apparato MRI con magneti dc in MgB2). In corrispondenza al centro del campione ed a una distanza di 2.5 mm dalla superficie dello stesso, si è rilevato un campo B inferiore di oltre un fattore 3 al campo magnetico applicato (verificato per campi magnetici applicati fino a 1.5 T).

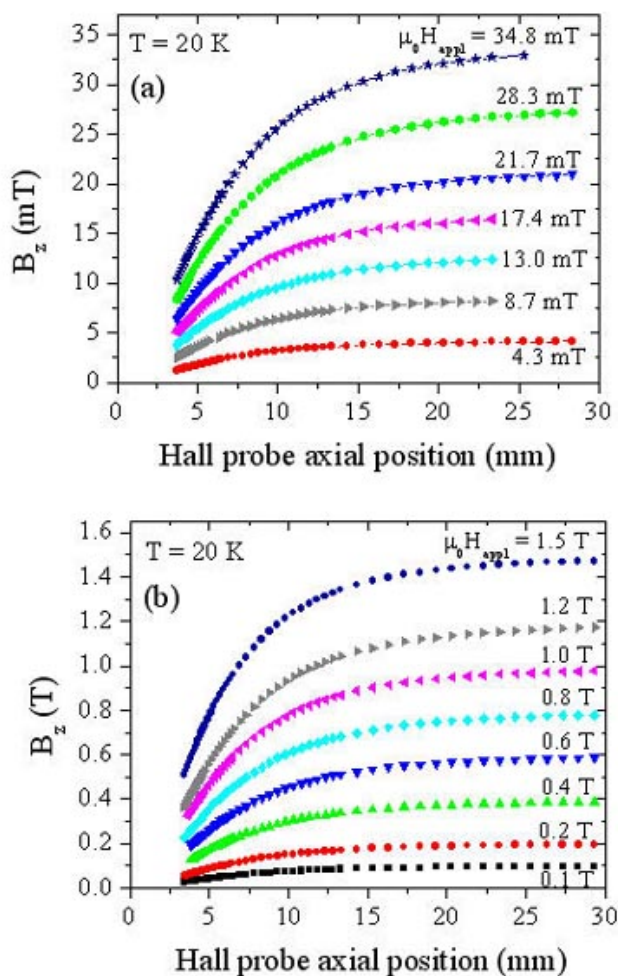


Figura 6 – Componente assiale dell'induzione magnetica misurata da una sonda posta in corrispondenza del centro di un campione discoidale (diametro 20.30 mm, spessore 3.44 mm) al variare della distanza tra il campione e l'elemento sensibile della sonda e per vari campi magnetici applicati esternamente (a) nell'intervallo $\mu_0 H_{\text{appl}} = 0.0043 - 0.0348$ T e (b) nell'intervallo $\mu_0 H_{\text{appl}} = 0.1 - 1.5$ T. Temperatura di lavoro: 20 K.

I valori della densità di corrente critica (J_c) determinati dall'analisi delle distribuzioni del campo B con modelli a stato critico indicano che il materiale cresciuto nell'ambito del progetto ha caratteristiche comparabili ai migliori composti MgB2 bulk presenti sul mercato ($J_c > 1E10$ A/m² a $T = 20$ K e in campo magnetico applicato di 1T). Da tali valori di J_c , tramite modelli di stato critico, si è poi calcolato il campo B atteso all'interno di campioni a simmetria cilindrica. Per esempio un campione tubolari (lunghezza 10 cm, raggio esterno 1.55 cm, raggio interno 1.45 cm) risulta in grado di schermare un campo applicato di circa 1.4 T a $T = 25$ K e di circa 0.85 T a 30 K. Tale valore (leggermente sovrastimato per aver trascurato la dipendenza di J_c dal campo magnetico interno nel superconduttore) conferma che i campioni di MgB2 in esame sono candidati ottimali per la realizzazione di schermi.

Come dettagliato nel WP2, si è rilevato un ottimo accordo tra i dati sperimentali raccolti a campi magnetici applicati dell'ordine del campo critico inferiore e quelli calcolati tramite i modelli di calcolo sviluppati nel corso del progetto. L'estensione di tali modelli per l'analisi delle proprietà di mitigazione del materiale a campi più elevati e per altre geometrie è tuttora in corso.

WP4 - PROGETTAZIONE, REALIZZAZIONE E UTILIZZO DELL'ARCHETIPO

Sulla base dei risultati precedenti, l'attività si è focalizzata sulla caratterizzazione delle proprietà schermanti di campioni a geometrie più complesse ("tazze" - Fig. 7), cresciuti con tecnica a microonde, che permettono uno studio preliminare delle problematiche che si riscontrano in un sistema MRI.

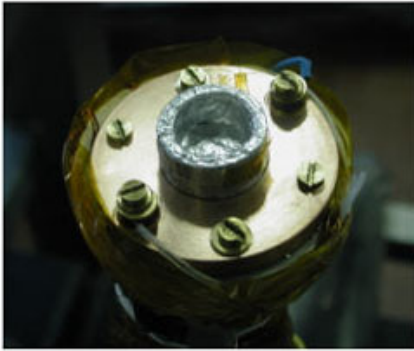


Figura 7 – Immagine di una componente schermante geometrizzata a tazza
(diametro esterno 21 mm, diametro interno 15 mm, profondità 7.5 mm)

a) Messa in opera di un sistema criogenico di potenza

La realizzazione delle misure di schermatura su geometrie proprie dell'archetipo ha reso necessario l'acquisto e la messa in opera di un criogeneratore di potenza (Cryomech PT415 Cryogenic Refrigerator), in grado di operare nell'intervallo 4.2-300 K e di garantire una potenza refrigerante di 1.35 W a 4.2 K. Si è proceduto alla progettazione e alla realizzazione di una camera criostatica per misure in gas di scambio in modo tale da assicurare l'uniformità della temperatura sulle componenti in misura durante la sua caratterizzazione (Fig. 8). Nella camera criostatica è possibile alloggiare più sonde di Hall in configurazioni variabili in conformità alla geometria del campione da analizzare.

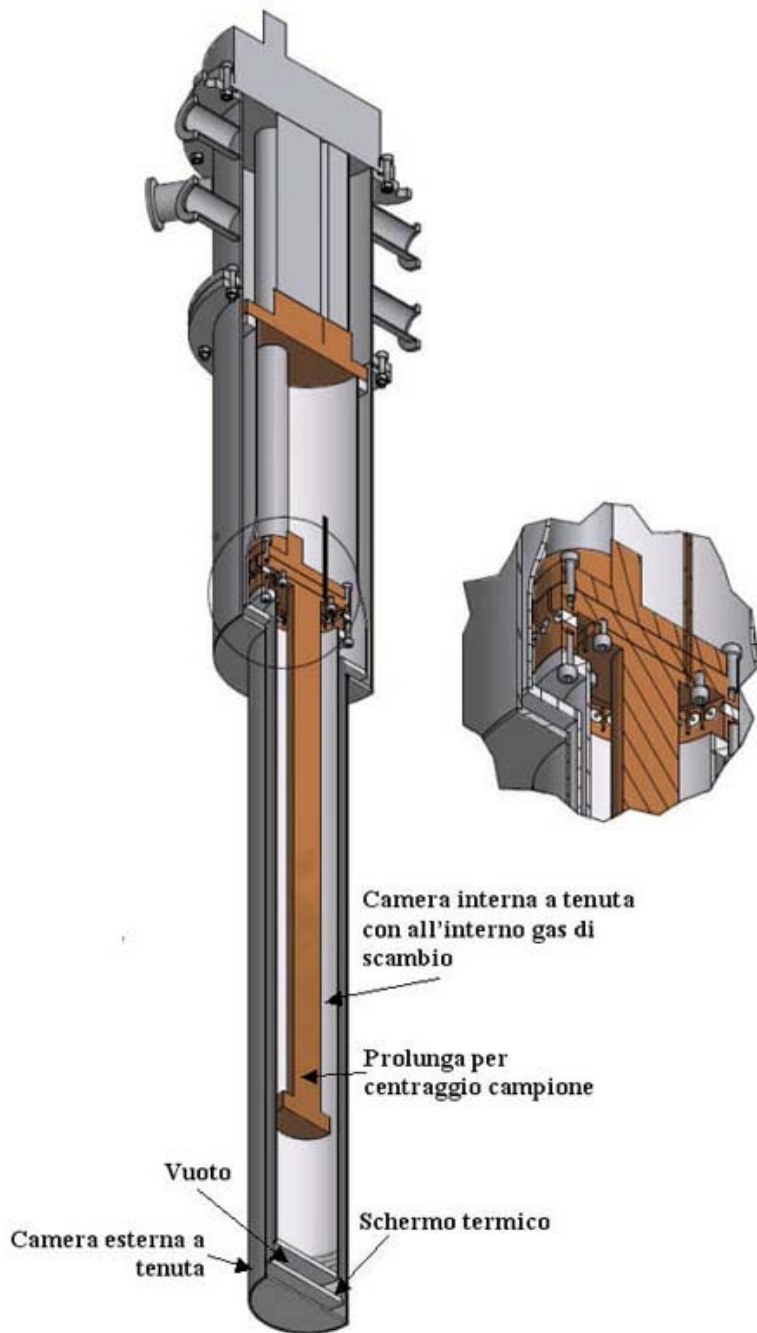


Figura 8 – Spaccato della camera di misura del criogeneratore di potenza: il campione viene posizionato sulla superficie inferiore di un prolunga ancorata termicamente al secondo stadio del criorefrigeratore. La lunghezza della prolunga è stabilita in modo che il campione sia posizionato nel centro del magnete. E' presente una camera criostatica interna a tenuta al fine di poter caratterizzare i campioni in gas di scambio garantendone l'uniformità di temperatura. La pressione del gas può essere regolata dall'esterno. Il sistema lavora capovolto in quanto raffreddato mediante un criorefrigeratore pulse-tube (con minimizzazione delle vibrazioni). A lato un ingrandimento della zona in cui la prolunga viene ancorata termicamente sul secondo stadio del criogeneratore.

b) Misure di mitigazione con schermo superconduttore

La Fig. 9 presenta l'andamento del campo di induzione magnetica misurato a 20 K in campioni a forma di "tazza" con rapporto profondità:diametro-interno di 1:2 in funzione del campo magnetico applicato esternamente. In questo caso si ottiene una mitigazione di oltre un fattore 50 per campi magnetici applicati fino a 0.3 T, valore suscettibile di ulteriore aumento all'aumentare della profondità della tazza. L'andamento dell'induzione magnetica in funzione della distanza dal fondo interno della tazza (Fig. 10) evidenzia l'estensione spaziale dell'effetto di mitigazione anche in zone esterne alla tazza stessa.

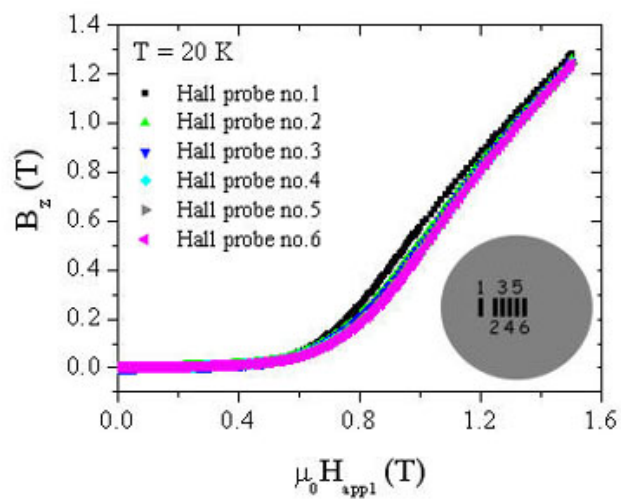


Figura 9 - Componente assiale dell'induzione magnetica misurata da un array di sonde miniaturizzato posto all'interno della tazza mostrata in Fig. 7, a 1.7 mm dal suo fondo in funzione del campo magnetico applicato esternamente. La disposizione delle sonde rispetto al fondo della tazza è riportata in inserto.

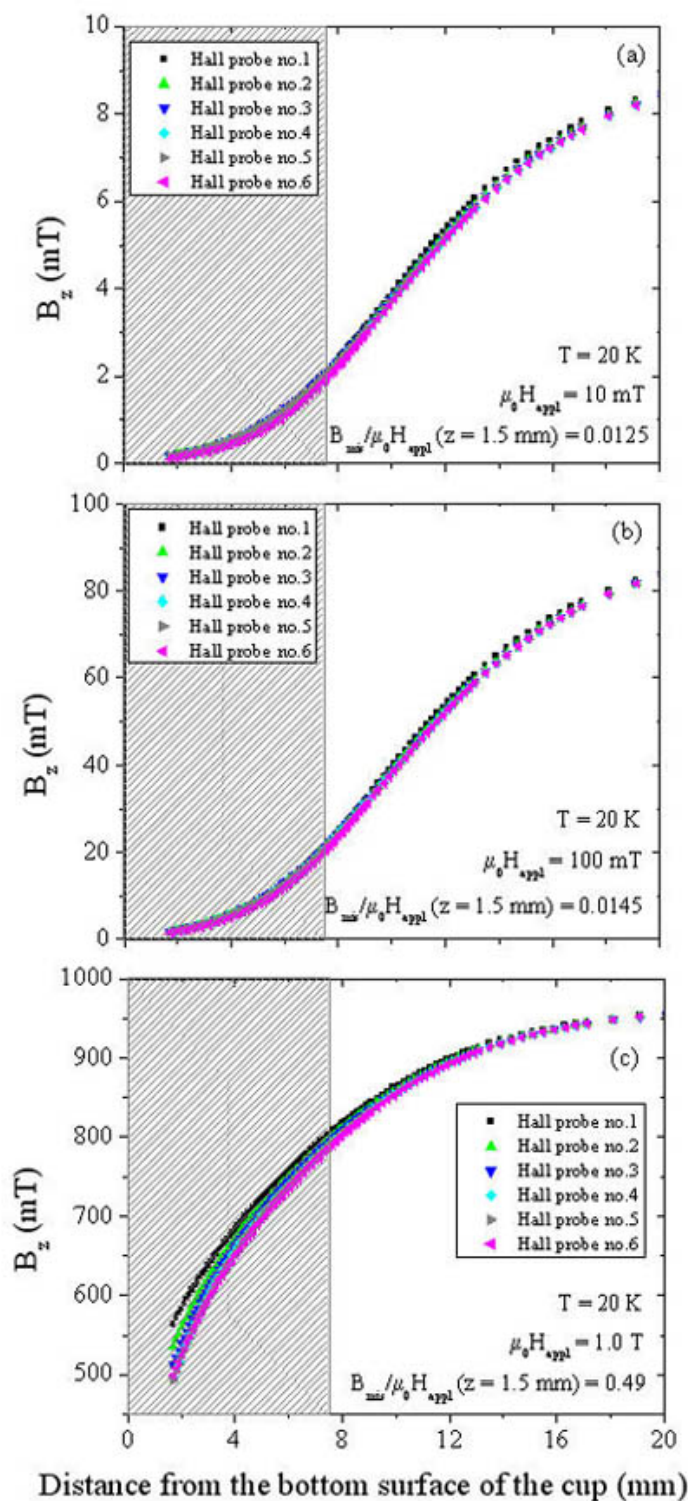


Figura 10 - Componente assiale dell'induzione magnetica misurata da un array di sonde miniaturizzato (centrato sull'asse del sistema) al variare della distanza dal fondo interno della tazza mostrata in Fig. 9 e a tre differenti campi magnetici applicati. La zona ombreggiata indica le posizioni per cui l'array di sonde si trova all'interno della tazza (per lo schema di misura si faccia riferimento alla Fig. 5). La disposizione delle sonde rispetto al fondo della tazza è riportata in inserto di Fig. 9

c) Misure di mitigazione con schermo ibrido

Le misure sono state ripetute sul sistema ibrido ferromagnete-superconduttore composto della suddetta tazza in materiale superconduttore disposta coassialmente all'interno di una tazza di ferro ARMCO (Fig. 11). Questa soluzione porta ad un notevole aumento del fattore di mitigazione ad alti campi (più che raddoppiato a campi applicati pari a 1 Tesla (Fig. 12)). L'effetto è confermato dallo studio dell'andamento dell'induzione magnetica in funzione della distanza dal fondo interno del sistema di tazze (Fig. 13). Anche in questo caso si evidenzia l'estensione spaziale dell'effetto di mitigazione anche in zone esterne al sistema schermante.

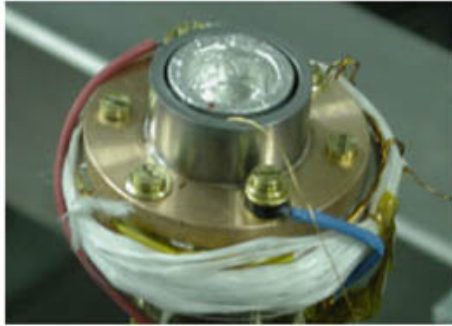


Figura 11 – Immagine di una componente schermante ibrida ferromagnete-superconduttore composta dalla tazza in materiale superconduttore di cui alla Fig. 7 disposta coassialmente all'interno di una tazza di ferro ARMCO.

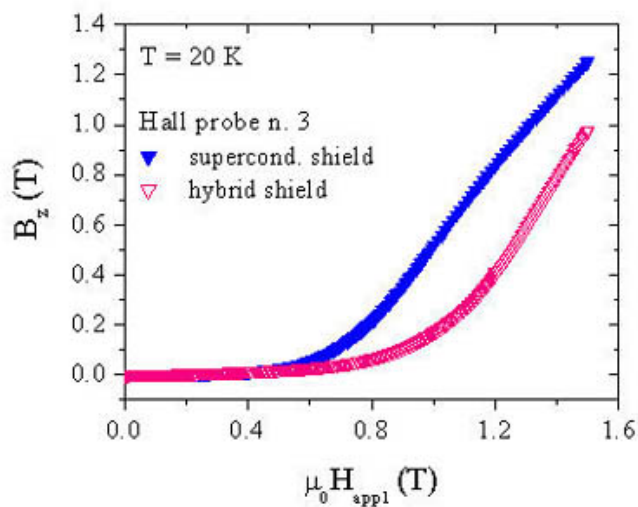


Figura 12 – Confronto tra le componenti assiali dell'induzione magnetica misurate dalla sonda n. 3 dell'array miniaturizzato in funzione del campo magnetico applicato esternamente nelle due configurazioni di schermo: schermo superconduttore geometrizzato a tazza (vedi Fig. 7) e schermo ibrido a doppia tazza superconduttore ferromagnete (Fig. 11). In entrambi i casi l'array di sonde era posizionato ad una distanza di 1.7 mm dal fondo della tazza di materiale superconduttore. La disposizione delle sonde rispetto al fondo della tazza di materiale superconduttore è riportata nell'inserto di Fig. 9.

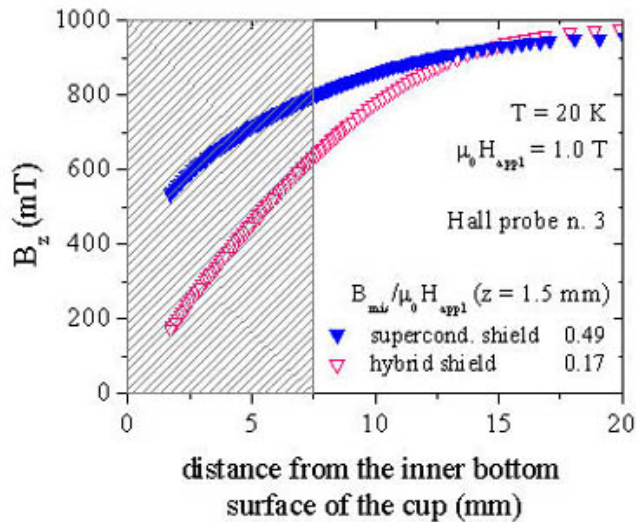


Figura 13 - Confronto tra le componenti assiali dell'induzione magnetica misurate dalla sonda n. 3 dell'array miniaturizzato al variare della distanza dal fondo interno della tazza di materiale superconduttore nelle due configurazioni di schermo: schermo superconduttore geometrizzato a tazza (vedi Fig. 7) e schermo ibrido a doppia tazza superconduttore ferromagnete (Fig. 11).

Il campo magnetico applicato esternamente era pari a 1.0 T

La zona ombreggiata indica le posizioni per cui l'array di sonde si trova all'interno della tazza (per lo schema di misura si faccia riferimento alla Fig. 5). La disposizione delle sonde rispetto al fondo della tazza è riportata nell'inserito di Fig.9

d) Giunzioni tra superconduttori massivi

Al fine di realizzare componenti dello schermo con forme più complesse sono state studiate tecniche di giunzione tra elementi massivi di MgB₂, analizzando soluzioni che minimizzino influenze negative sulle proprietà schermanti, creando processi di saldatura "per via chimica" o attraverso processi termici alternativi successivi. Uno dei processi chimici utilizzati e successivamente scalati per produrre direttamente il prototipo è stato quello di colare in appositi stampi una miscela di polveri di MgB₂ e resine epossidiche. Il metodo, pur avendo superato i test meccanici, è ancora in fase di analisi per quanto concerne i parametri superconduttivi e magnetici.

WP5 - PROGETTAZIONE DI SCHERMATURE PER AMBIENTE MRI

L'interesse si è orientato allo studio di tre aspetti legati all'uso di schermi in MgB₂: a) la perturbazione introdotta all'uniformità del campo statico all'interno della MRI, b) gli effetti sull'area circostante la MRI. c) la possibile interazione con schermi ferromagnetici. Nello studio si sono considerati due tomografi con bobine superconduttrici, uno tubolare, ad asse orizzontale di tipo cilindrico ed uno di tipo aperto ad asse verticale. L'analisi è sviluppata assumendo MgB₂ in stato Meissner ed attribuendo ad esso una permeabilità relativa notevolmente inferiore all'unità, il che consente l'uso di software commerciali FEM.

I risultati hanno evidenziato come tutte le soluzioni schermanti perturbino l'uniformità del campo magnetico statico all'interno del dispositivo in modo tanto più pronunciato quanto maggiore è l'effetto schermante. Per tale motivo lo studio si è indirizzato verso interventi di mitigazione localizzati nelle zone dove opera il personale medico. Lo studio ha evidenziato inoltre che i livelli di campo statico in prossimità della MRI sono tali da portare a saturazione elementi ferromagnetici, di spessore fino a diversi millimetri, compromettendone le capacità schermanti, anche se essi vengono abbinati a schermi superconduttori. Migliori risultati, riportati in Fig. 14, si ottengono impiegando elementi ferromagnetici con funzione di concentratori di flusso magnetico in combinazione con schermi superconduttori.

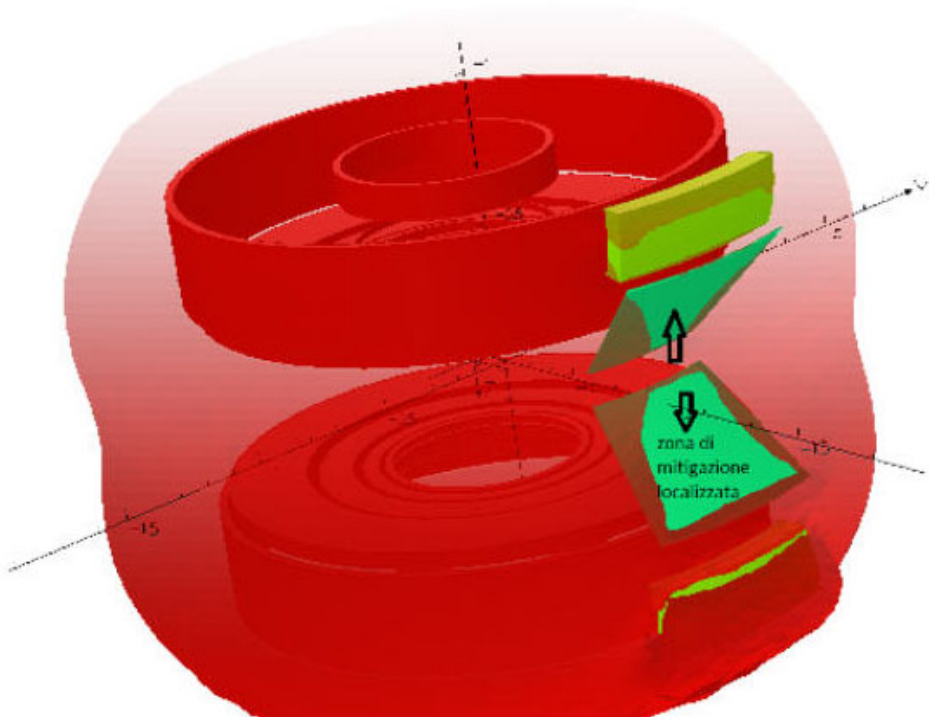


Figura 14 - Effetto di mitigazione localizzato prodotto da un doppio schermo superconduttore (sheet inclinati) con concentratori ferromagnetici applicato ad un MRI aperto.

WP6 - DISSEMINAZIONE DEI RISULTATI

Tutti i risultati ottenuti sono stati o saranno oggetto di relazione a congresso, sia in ambito nazionale che internazionale. I risultati sono stati altresì oggetto di articoli pubblicati, in fase di pubblicazione o sottomessi su riviste a diffusione internazionale (vedi punto 14). Parte dei risultati è inoltre disponibile sul sito web del progetto.

12. Problemi riscontrati nel corso della ricerca

Non si sono riscontrati particolari problemi che abbiano pregiudicato lo svolgimento del Progetto

13. Risorse umane complessivamente ed effettivamente impegnate (da consuntivo)

	(mesi uomo)
TOTALE	204
da personale universitario	104
altro personale	12
Personale a contratto a carico del PRIN 2007	88

14. Modalità di svolgimento (dati complessivi)

Partecipazioni a convegni:

	Già svolti (numero)	Da svolgere (numero)	Descrizione
in Italia	5	0	<ul style="list-style-type: none"> - International Workshop on Nanoscience and Engineering in Superconductivity: Hybrid and Josephson Structures, Anacapri, 3-6/06/2009 (2 partecipazioni) - Giornate Italo Francesi di Chimica, Genova, 26-27/04/2010 - 9th Soft Magnetic Materials Conference, Torino, 6-9/09/2009 - IRMMW-THz 2010 Conference", Roma, 5-10/09/2010 - 15° Conferenza Nazionale di Superconduttività SATT 15, Alghero 13-15/09/2010
all'estero	8	3	<ul style="list-style-type: none"> - IEEE International Magnetic Conference - INTERMAG 2009, Sacramento (USA) 4-8/05/2009 (2 partecipazioni) - 13th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Barcellona, Spagna, 8-10/09/2009 - 9th European Conference on Applied Conference - EUCAS'09, Dresden (Germany), 13-17/09/2009 (3)

			partecipazioni) - Sixth International Conference in School Format on Vortex Matter in Nanostructured Superconductors (VORTEX VI), Rhodes (Greece), 17-24/09/2009 - International Conference on Superconductivity and Magnetism, Antalya (Turkey), 25-30/04/2010 - Applied Superconductivity Conference - ASC 2010, Washington (USA), 1-6/08/2010 - 17th International Conference on Ion Beam Modification of Materials - IBMM 2010, Montreal (Canada), 22-27/08/2010 - 17th Symposium IMEKO TC4, Kosice (Slovakia), 8-10/09/2010 - IEEE International Magnetic Conference - INTERMAG 2011, Taipei(Taiwan) 25-29/04/2011 - Compumag 2011 Conference, Sidney (Australia), 12-15/07/2011 - 20th Soft Magnetic Materials Conference 2011 - SMM 2011, Kos (Greece) 18-22/09/2011
TOTALE	13	3	

Per ogni campo di testo max 8.000 caratteri spazi inclusi

Articoli pertinenti pubblicati:

	Numero	Descrizione
su riviste italiane con referee	0	
su riviste straniere con referee	16	<p><i>O. Bottauscio, M. Chiampi, L. Zilberti</i> Boundary Element Approaches for the Evaluation of Human Exposure to Low Frequency Electromagnetic Fields <i>IEEE Transactions on Magnetics</i>, 45 (2009) 1674</p> <p><i>G. Crotti, D. Giordano</i> Analysis of critical situations in the evaluation of human exposure to magnetic fields, with complex waveforms <i>Radiation protection dosimetry</i>, 137 (2009) 227</p> <p><i>G. Ghigo, R. Gerbaldo, L. Gozzelino, F. Laviano, G. Lopardo, E. Monticone, C. Portesi, and E. Mezzetti</i> Local thermal bistability in MgB2 microwave coplanar resonators: Opposite jumpwise response to weak-link switching and to vortex avalanches <i>Appl. Phys. Lett.</i> 94 (2009) 052505.</p> <p><i>L. Gozzelino, B. Minetti, G. A. Ummarino, R. Gerbaldo, G. Ghigo, F. Laviano, G. Lopardo, G. Giunchi, E. Perini and E. Mezzetti</i> Intraband scattering rate and electronic diffusivity study in MgB2 bulk samples <i>Supercond. Sci. Technol.</i> 22 (2009) 065007.</p> <p><i>M. M. Rahman Khan, S. Cagliero, A. Agostino, M. Beagum, C. Plapcianu and M. Truccato</i> Control of the oxygen doping in Bi-2212 whiskers by means of their synthesis process, <i>Supercond. Sci. Technol.</i> 22 (2009) 085011</p> <p><i>M. De La Pierre, S. Cagliero, A. Agostino, G. C. Gazzadi and M. Truccato</i> Size-dependent resistivity in a micro-processed YBa2Cu3O7-δ superconducting whisker <i>Supercond. Sci. Technol.</i> 22 (2009) 045011</p> <p><i>L. Gozzelino, R. Gerbaldo, G. Ghigo, F. Laviano, G. Lopardo, G. A. Ummarino, G. Giunchi, E. Perini, E. Bassani, A. Agostino and B. Minetti</i> Effects of Annealing and Nanoparticle Doping on Electrical Properties of MgB2 Bulks <i>IEEE Trans. Appl. Supercond.</i> 19 (2009) 3524.</p> <p><i>G. Ghigo, R. Gerbaldo, L. Gozzelino, F. Laviano, and E. Mezzetti</i> Switching response of MgB2 thin-film microwave resonators due to local nonlinear Joule heating <i>Phys. Rev. B</i> 82 (2010) 054520.</p> <p><i>L. Mino, D. Gianolio, G. Agostini, A. Piovano, M. Truccato, A. Agostino, S. Cagliero, G. Martinez-Criado, S. Codato, C. Lamberti</i> Structural Characterization of Multi-Quantum Wells in Electroabsorption-Modulated Lasers by using Synchrotron Radiation Micrometer-Beams <i>Advanced Materials</i> 22 (2010) 2050</p> <p><i>O. Bottauscio, M. Chiampi, L. Zilberti</i> A Boundary Element Approach to relate surface fields with the Specific Absorption Rate (SAR) induced in 3-D human phantoms <i>In stampa su Engineering Analysis with Boundary Elements Journal (doi:10.1016/j.enganabound)</i></p> <p><i>L. Gozzelino, B. Minetti, R. Gerbaldo, G. Ghigo, F. Laviano, G. Lopardo, C. Plapcianu, A. Agostino, S. Cagliero, M. Truccato, L. Zilberti, E. Mezzetti</i> Magnetic characterization of MgB2 bulk superconductor for magnetic field mitigation solutions <i>In stampa su Journal of Superconductivity and Novel Magnetism (DOI 10.1007/s10948-010-0993-4)</i></p> <p><i>L. Gozzelino, B. Minetti, R. Gerbaldo, G. Ghigo, F. Laviano, A. Agostino and E. Mezzetti</i> Local magnetic investigations of MgB2 bulk samples for magnetic shielding applications <i>In stampa su IEEE Trans. Appl. Supercond.</i></p> <p><i>G. Aldica, S. Cagliero, A. Agostino, C. Lamberti, M. Truccato</i> 17 keV-photon induced damage of Bi-2212 whiskers by synchrotron μ-beam exposure <i>In stampa su Supercond. Sci. Technol., Supercond. Sci. Technol.</i></p> <p><i>L. Zilberti, O. Bottauscio, M. Chiampi</i> On the accuracy of SAR reconstruction in human phantoms from surface field values <i>Inviato a IEEE Transactions on Magnetics (in corso di revisione)</i></p>

		<p><i>M. Chiampi, L. Zilberti</i> <i>Induction of Electric Field in Human Bodies Moving Near MRI: an Efficient BEM Computational Procedure</i> <i>Inviato a IEEE Transactions on Biomedical Engineering (in corso di revisione)</i></p> <p><i>C. Plapcianu, A. Agostino, P. Badica, G.V. Aldica, E. Bonometti, G. Ieluzzi, S. Popa, M. Truccato, S. Cagliero, Y. Sakka, O. Vasylykiv</i> <i>Synthesis by Microwave Technique of MgB2 Superconductor Doped with Fullerene</i> <i>Inviato a Scripta Materialia (in corso di revisione)</i></p>
su altre riviste italiane	0	
su altre riviste straniere	1	<p><i>L. Mino, D. Gianolio, G. Agostini, A. Piovano, M. Truccato, A. Agostino, S. Cagliero, G. Martinez-Criado, S. Codato, C. Lamberti</i> <i>Multi quantum well electroabsorption-modulated laser characterized by hard X-ray microprobe</i> <i>ESRF report 2010</i></p>
comunicazioni a convegni/congressi internazionali	7	<p><i>D. Giordano, M. Borsero, G. Crotti, M. Zucca</i> <i>Analysis of magnetic and electromagnetic field emissions produced by a MRI device</i> <i>Proc. 17th Symposium Imeko TC4, Kosice, Slovakia, 8-10 Sept. 2010, vol. CD volume, pp. 86/1-5, ISBN/ISSN: 978-80-553-0424-3</i></p> <p><i>L. Gozzelino, R. Gerbaldo, G. Ghigo, F. Laviano, G. Lopardo, E. Mezzetti, G. A. Ummarino, G. Giunchi, E. Perini, L. Saglietti, E. Bassani and B. Minetti</i> <i>Influence of nanoparticle doping on electronic properties of MgB2 bulk samples</i> <i>Inst. Phys. Conf. Series vol. 234 (2010) 012014</i></p> <p><i>M. Zucca, M. Chiampi, L. Gozzelino, L. Zilberti</i> <i>Local magnetic shielding of MRI devices by superconductive materials</i> <i>Inviato a congresso InterMag 2011, Taipei (Taiwan), April 2011</i></p> <p><i>M. Chiampi, L. Gozzelino, A. Manzin, L. Zilberti</i> <i>Thin-shell formulation applied to superconducting shields for magnetic field mitigation</i> <i>Inviato a congresso InterMag 2011, Taipei (Taiwan), April 2011</i></p> <p><i>O. Bottauscio, M. Chiampi, L. Zilberti</i> <i>Boundary Element solution of electromagnetic and bioheat equations for the simulation of SAR and temperature increase in biological tissues</i> <i>Inviato a congresso Compumag 2011, Sydney (Australia), July 2011</i></p> <p><i>M. Borsero, G. Crotti, D. Giordano, M. Zucca</i> <i>Misura di campi elettromagnetici generati da dispositivi MRI e valutazione dell'esposizione umana</i> <i>Inviato al VII° Congresso "Metrologia & Qualità" (Torino 13-15 Aprile 2011)</i></p> <p><i>L. Gozzelino, B. Minetti, R. Gerbaldo, G. Ghigo, F. Laviano, A. Agostino, E. Bonometti, G. Ieluzzi, M. Chiampi, A. Manzin, L. Zilberti, and Enrica Mezzetti</i> <i>Magnetic shielding properties of MgB2 bulk samples of different geometries</i> <i>Inviato al congresso Magnet 2011, Torino, Febbraio 2011</i></p>
comunicazioni a convegni/congressi nazionali	4	<p><i>G. Crotti, D. Giordano</i> <i>Analisi di situazioni critiche nella valutazione dell'esposizione a campi magnetici con forme d'onda complesse</i> <i>Atti del quarto convegno nazionale "Controllo ambientale degli agenti fisici: nuove prospettive e problematiche emergenti", Vercelli, CD volume, 24-27 marzo 2009, ISBN: 978-88-7479-111-8</i></p> <p><i>M.M. Rahman Khan, A. Agostino, S. Cagliero, C. Plapcianu, M. Truccato, "Structural and electronic behavior study with annealing temperature for BSCCO whiskers synthesis", 2nd School and Workshop on X-Ray Micro and Nanoprobes - XMNP 2009, Palinuro (SA), 14-22 Giugno 2009</i></p> <p><i>A. Agostino, S. Cagliero, M.M. Rahman Khan, C. Plapcianu, M. Truccato M.M. Rahman Khan</i> <i>Al chemical doping effects on superconducting YBCO whiskers for THz applications</i> <i>XXIII Congresso nazionale della Società Chimica Italiana -SCI, Sorrento (NA), 5-10 Luglio 2009</i></p> <p><i>M. Truccato, A. Agostino, S. Cagliero, H. Motzkau, A. Rydh and V. Krasnov</i> <i>"A FIB-assisted technique for the fabrication of Intrinsic Josephson Junctions arrays "</i> <i>15° Conferenza Nazionale di Superconduttività - SATT 15, Alghero, 13-15 Settembre 2010</i></p>
rapporti interni	3	<p><i>M.M. Rahman Khan, A. Agostino, S. Cagliero, M. Truccato</i> <i>Al2O3 doping influence on crystal growth, structure and superconducting properties of Y(Ca)Ba2Cu3 whiskers</i></p> <p><i>S. Cagliero</i> <i>Oxygen doping in Bi-2212 whiskers</i> <i>2nd Workshop on Superconducting Materials, Dip. Chimica Generale e Chimica Organica, Università di Torino, 12-06-2009</i></p> <p><i>C. Plapcianu, A. Agostino</i> <i>MgB2 synthesis by the Microwave unconventional technique</i> <i>2nd Workshop on Superconducting Materials, Dip. Chimica Generale e Chimica Organica, Università di Torino, 12-06-2009</i></p>
brevetti depositati	0	
TOTALE	31	

Per ogni campo di testo max 8.000 caratteri spazi inclusi

Data 22/12/2010 13:30

Firma

Si autorizza alla elaborazione e diffusione delle informazioni riguardanti i programmi di ricerca presentati ai sensi del D. Lgs. n. 196/2003 del 30.6.2003 sulla "Tutela dei dati personali". La copia debitamente firmata deve essere depositata presso l'Ufficio competente dell'Ateneo.