



Ricerca di Sistema elettrico

Studio di sistemi di accumulo avanzato basati su magneti superconduttori

U. Besi Vetrella, G. Celentano, G. Messina, L. Morici

STUDIO DI SISTEMI DI ACCUMULO AVANZATO BASATI SU MAGNETI SUPERCONDUTTORI

U. Besi Vetrella, G. Celentano, G. Messina, L. Morici (ENEA)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Sistemi avanzati di accumulo dell'energia

Obiettivo: Studio di sistemi di accumulo avanzati basati su magneti superconduttori

Responsabile del Progetto: Mario Conte, ENEA



Si ringraziano per il prezioso apporto tecnico fornito: R. Viola, S. Rueca e M. Marchetti.

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
1.1 CENNI SUI MATERIALI SUPERCONDUTTIVI.....	5
1.2 GLI SMES	7
1.3 SMES E ACCORDO DI PROGRAMMA	9
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	10
2.1 DESCRIZIONE DEI MATERIALI UTILIZZATI.....	10
2.1.1 YBCO	10
2.1.2 Diboruro di Magnesio	11
2.2 APPARATO SPERIMENTALE E METODOLOGIA DI MISURA.....	12
2.2.1 Apparato sperimentale	12
2.2.2 Metodologia di misura.....	14
2.3 RISULTATI SPERIMENTALI	16
2.4 ELABORAZIONE DI UN PROGETTO DI MASSIMA DEL MAGNETE	22
3 CONCLUSIONI.....	24
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	26
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	27

Sommario

In questo report sono illustrate le attività riguardanti i sistemi di accumulo magnetici di energia elettrica basati su materiali superconduttori (SMES, Superconducting Magnetic Energy Storage), portate avanti presso i laboratori UTFUS COND dell'ENEA di Frascati.

Attualmente, l'utilizzo degli SMES è limitato dalla complessità e dai costi connessi al sistema criogenico che serve al mantenimento delle temperature dell'elio liquido, necessaria al funzionamento dei materiali finora utilizzati (NbTi, Nb₃Sn). Malgrado queste limitazioni, i potenziali vantaggi di questi dispositivi nei confronti degli altri sistemi proposti sono risultati evidenti e hanno giustificato le attività di ricerca e sviluppo portate avanti in vari laboratori: basti pensare, ad esempio, alla assenza di problemi di smaltimento e al numero virtualmente infinito di cicli che possono essere effettuati.

Un progetto che preveda lo studio e la realizzazione di un impianto di accumulo innovativo, svincolato dall'uso di materiali e tecnologie connesse alle usuali temperature di esercizio di questi dispositivi, sembra quindi a pieno titolo inseribile nell'ottica delle azioni di questo Programma.

Nella fase preliminare del progetto saranno presi in considerazione i superconduttori MgB₂ (diboruro di magnesio) e YBCO (lega ittrio bario rame ossigeno), due materiali ampiamente studiati per le loro temperature di transizione elevate (38 K e 92 K rispettivamente). Nonostante siano ancora oggetto di sperimentazione questi composti iniziano ad essere prodotti su scala industriale e ad essere disponibili sul mercato, con costi che sono funzione delle tecnologie realizzative e dei materiali di partenza utilizzati.

La caratterizzazione dei materiali è un passo fondamentale per determinare le prestazioni, le dimensioni ed il costo dello SMES. Pertanto, in questo primo anno di sviluppo del Progetto, è stata fatta una attenta valutazione delle caratteristiche dei materiali disponibili, portata avanti mediante una estesa campagna di misure di caratterizzazione, aventi lo scopo di stabilire la rispondenza dei materiali all'utilizzo preposto. Le caratterizzazioni hanno riguardato misure per la determinazione della corrente critica nelle varie condizioni di temperatura e campo magnetico. A questo scopo, un grosso sforzo è stato dedicato alla messa in opera dell'apparato sperimentale, costituito da un criostato equipaggiato con un magnete da 14 Tesla, da vari alimentatori di corrente di elevate prestazioni (correnti erogate dell'ordine dei 500 - 1000 Ampere) e dalla costruzione di opportune strutture porta-campione.

Unitamente al lavoro di caratterizzazione, è stata effettuata una valutazione sulla taglia di un dispositivo da proporre ai fini della eventuale realizzazione di un prototipo. Questi dispositivi sono stati sviluppati per utilizzi che vanno dall'immagazzinamento di poche decine di kJ (microSMES), fino strutture in grado immagazzinare vari GJ.

Un dispositivo SMES di taglia medio-piccola (0.5 – 1 MJ di energia immagazzinata) sembra essere quello in grado di dare sufficienti garanzie di funzionamento, realizzabilità e contenimento dei costi. Un progetto di massima della configurazione geometrica del magnete superconduttore ed una valutazione dei costi del sistema viene quindi esposto come prima indicazione di obiettivo da realizzare.

1 Introduzione

1.1 Cenni sui materiali superconduttivi.

La superconduttività è un fenomeno nel quale un materiale mostra due caratteristiche fondamentali: 1) presenta una resistenza non misurabile, praticamente nulla, al passaggio di corrente, 2) espelle i campi magnetici dal suo interno inducendo delle correnti superconduttive.

Esiste una temperatura al di sopra della quale questi due fenomeni scompaiono, questa temperatura è tipica per ogni materiale, ed è chiamata temperatura critica T_c .

Il fenomeno superconduttivo non va confuso con la naturale diminuzione della resistività al calare della temperatura, tipica in qualsiasi conduttore e legata alla diminuzione delle vibrazioni reticolari ed alla inevitabile presenza di difetti del reticolo cristallino.

Le vibrazioni reticolari (fononi), infatti, determinano una interruzione della periodicità del reticolo cristallino, e la loro diminuzione in funzione della temperatura si manifesta direttamente con un andamento decrescente della resistività del materiale con la temperatura stessa; i difetti reticolari determinano invece interruzioni permanenti della periodicità, e si manifestano come resistività residua e costante a bassissime temperature.

Il fenomeno superconduttivo nasce da un accoppiamento degli elettroni di conduzione che può avere luogo solo a basse temperature, e che è stato descritto dalla teoria quantistica dello stato solido BCS.

Per ogni superconduttore esiste un insieme di valori critici di: temperatura, T_c (temperatura critica), densità di corrente, J_c , (densità critica), e campo magnetico applicato, B_c , (campo critico) al di sopra dei quali scompaiono le caratteristiche superconduttive. Per ogni valore di temperatura $T < T_c$ è possibile definire una coppia di valori critici di corrente e di campo. L'insieme dei valori (T, J, B) costituisce una superficie (vedi Fig. 1) al di sotto della quale il materiale può essere utilizzato per esigenze specifiche.

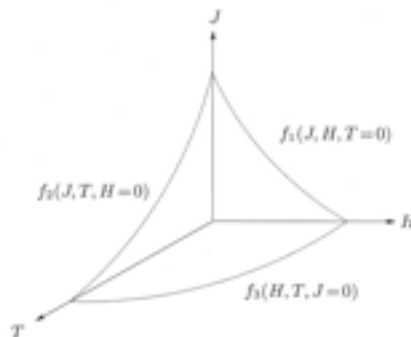


Figura 1. Raffigurazione della tipica superficie critica $(T - J - B)$ per un superconduttore.

I superconduttori usati nelle odierne applicazioni presentano campi critici molto alti, legati alla coesistenza di zone superconduttive e zone in cui il flusso magnetico è in grado di attraversare il materiale (flussoni). Questi flussoni risultano 'ancorati' a centri di difetto (centri di pinning), la cui capacità di legare il flusso determina l'intensità del campo critico. Ai fini di una comprensione soddisfacente di quanto verrà illustrato nel seguito le nozioni e le nomenclature date dovrebbero risultare sufficienti e, quindi, si tralascia ogni ulteriore accenno di teoria. Un testo dedicato di fisica dello stato solido può essere consultato per ulteriori approfondimenti [1, 2].

I superconduttori sono divisi in materiali a bassa temperatura critica (LTS, Low T_c Superconductor) e alta temperatura critica (HTS, High T_c Superconductor).

I materiali LTS lavorano a temperature confrontabili con quella dell'elio liquido, e sono i materiali le cui caratteristiche e applicazioni sono state studiate da più tempo ed hanno raggiunto un buon grado di sviluppo tecnologico.

In particolare, i composti NbTi (niobio titanio) e Nb₃Sn (niobio 3 stagno, tri-niobato di stagno) sono quelli che oggi vengono maggiormente usati per la costruzione di magneti ad elevate prestazioni: il loro utilizzo va

dalle comuni macchine per la risonanza magnetica per analisi medica (NMR) fino ai magneti dell'acceleratore di adroni LHC del CERN di Ginevra, citando anche, per grandezza e complessità del progetto, l'insieme dei magneti del reattore termonucleare del progetto ITER. Questi due materiali sono arrivati ad avere uno sviluppo tecnologico del prodotto molto elevato, e possono essere forniti da varie industrie in quantità rilevanti.

I composti HTS hanno temperature di transizione elevate, 92 K per l'YBCO e 100 K per il BSSCO 2212 (BSSCO: ossido di bismuto stronzio calcio e rame). Gli HTS sono dei materiali di tipo ceramico, con strutture cristalline complesse, in cui la superconduttività avviene creando delle deficienze di ossigeno su particolari piani reticolari. Per questo motivo essi mostrano generalmente un comportamento anisotropo, con valori dei parametri superconduttivi (T_c , J_c , B_c) che sono funzione della direzione di scorrimento della corrente.

I superconduttori, data la loro capacità di portare elevate correnti in regime stazionario senza dissipazione termica, sono la scelta tecnologicamente più avanzata e economicamente più conveniente, a parità di prestazioni del sistema, quando è necessario creare campi magnetici molto intensi.

Nella determinazione dei parametri di una qualsiasi struttura progettata per creare campi magnetici, come ad es. un solenoide o un tokamak, il dimensionamento dei cavi superconduttori e dell'intera struttura devono tener conto dell'intensità del campo a cui si vuole operare. Il valore di campo massimo pone un limite superiore alla densità di corrente superconduttiva disponibile in quanto il conduttore, almeno per una frazione del suo volume, è immerso nel campo creato, e deve essere dimensionato di conseguenza.

Gli andamenti riportati in Fig. 2 riguardano la densità di corrente in funzione del campo magnetico per vari composti misurati alla temperatura di 4.2 K [3], e consentono di avere una idea sul dimensionamento del superconduttore. Facendo uso delle curve di Fig. 2 si ricava, ad esempio, che i cavi LTS toroidali di ITER, dimensionati per dare origine ad un campo di 12 Tesla quando sono percorsi da una corrente di 68 kA, possono essere solo costruiti solo in Nb_3Sn , e che sono necessari almeno 100 mm^2 di superconduttore per soddisfare le indicazioni di progetto.

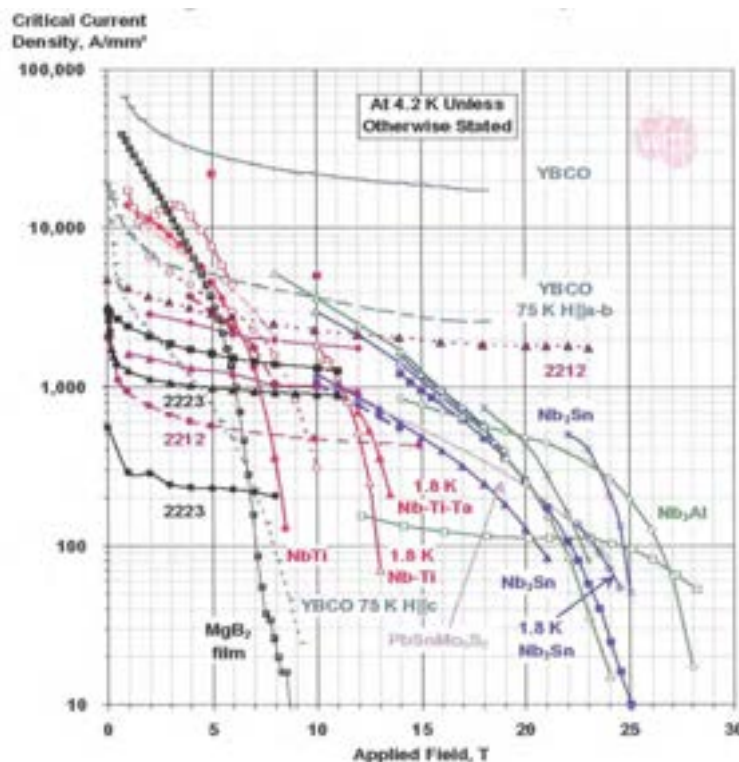


Figura 2. Andamento delle densità di corrente critica in funzione del campo magnetico per vari materiali.

In Fig. 2 sono evidenziate due caratteristiche che riguardano l'YBCO: 1) la differenza di prestazioni per le due orientazioni del campo magnetico rispetto agli assi cristallografici, riportata dalle curve a 77 K; 2) le elevate prestazioni dell'YBCO alla temperatura dell'elio liquido, chiaramente superiori a quelle di qualsiasi

altro materiale, proprietà questa che giustifica il fatto che questo composto sia stato scelto per la costruzione dei magneti per il futuro upgrade di ITER, il reattore DEMO [4].

1.2 Gli SMES

Gli SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage system) sono dispositivi di accumulo che consentono di utilizzare l'energia immagazzinata in un campo magnetico creato dal flusso di corrente secondo le formule

$$E = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} \frac{V}{\mu_0} B^2 \quad (1)$$

In queste equazioni L è l'induttanza del magnete, V il volume in cui è immagazzinato il campo B , μ_0 la permeabilità magnetica del vuoto.

Uno schema a blocchi di un sistema SMES è costituito da quattro sezioni: il magnete superconduttore, il sistema di condizionamento della potenza (PCS, Power Conditioning System), il sistema di refrigerazione e un sistema di protezione.

Peculiari di questo sistema sono: 1) il sistema di refrigerazione, che può essere costituito da un bagno di liquido refrigerante (ad es. He o N_2) oppure da un cryocooler a circuito chiuso, 2) il sistema di protezione del magnete (coil protection) da eventuali quench, cioè da transizioni improvvise del superconduttore allo stato normale, che provocherebbero un grande stress termico e meccanico del magnete dovuto alla istantanea dissipazione per effetto Joule della energia immagazzinata.

Una raffigurazione dello schema a blocchi di uno SMES con relativo cryocooler è riportato in Fig. 3.

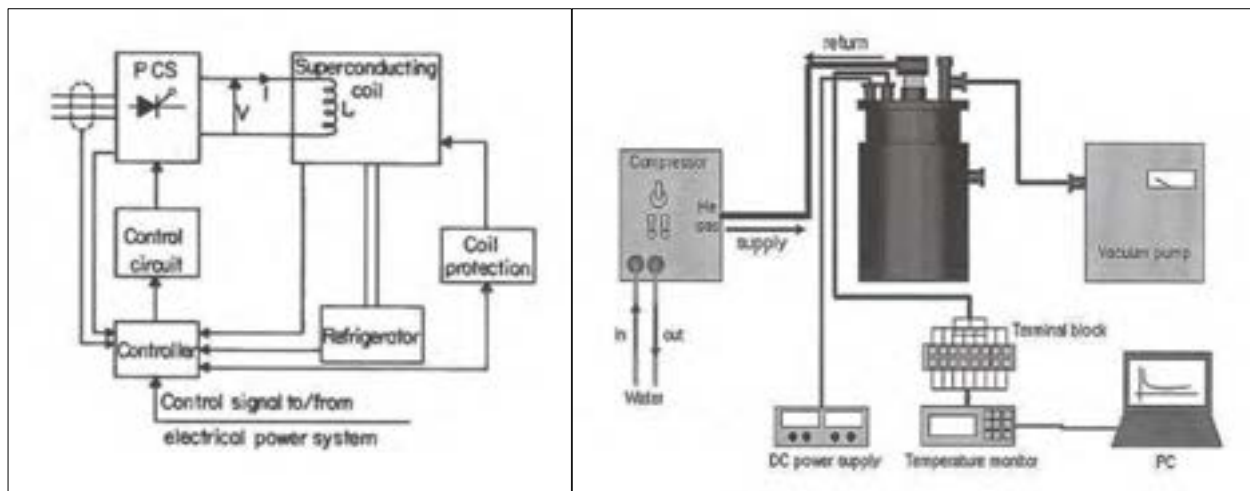


Figura 3. A sinistra: schema a blocchi di un sistema con SMES. A destra: particolare dello schema di impianto di raffreddamento mediante cryocooler.

La necessità di operare a temperature molto basse ha finora limitato l'utilizzo di questi sistemi, soprattutto a causa dei costi del sistema criogenico, tuttavia gli SMES presentano caratteristiche che ne rendono vantaggioso l'uso se confrontati con altri sistemi di accumulo, sulla base dei seguenti parametri [5]:

- tempo di risposta veloce. Essendo un sistema puramente elettrico, il tempo di risposta è tra i più rapidi tra i vari sistemi di accumulo, confrontabile solo con quello di un sistema a condensatori.
- Bassa necessità di manutenzione, in quanto il sistema non presenta parti in movimento o soggette a sollecitazioni. Anche per quel che riguarda gli impianti di refrigerazione a circuito chiuso, questi hanno raggiunto una grande affidabilità.
- Elevata efficienza di conversione, superiore al 90%, costante nel tempo in quanto il sistema non è soggetto a degrado.

- Basso impatto ambientale, a causa della costituzione dei suoi componenti (metalli a basso impatto ambientale) e per la assenza di parti soggette a usura e riciclo.
- Alta capacità di ricarica. Teoricamente, uno SMES può sopportare un numero infinito di cicli di carica e scarica.

Al fine di valutare i campi di applicazione degli SMES, in Fig. 4 sono riportati i tempi di scarica in funzione della potenza per la totalità dei sistemi di accumulo sviluppati fino ad ora [6].

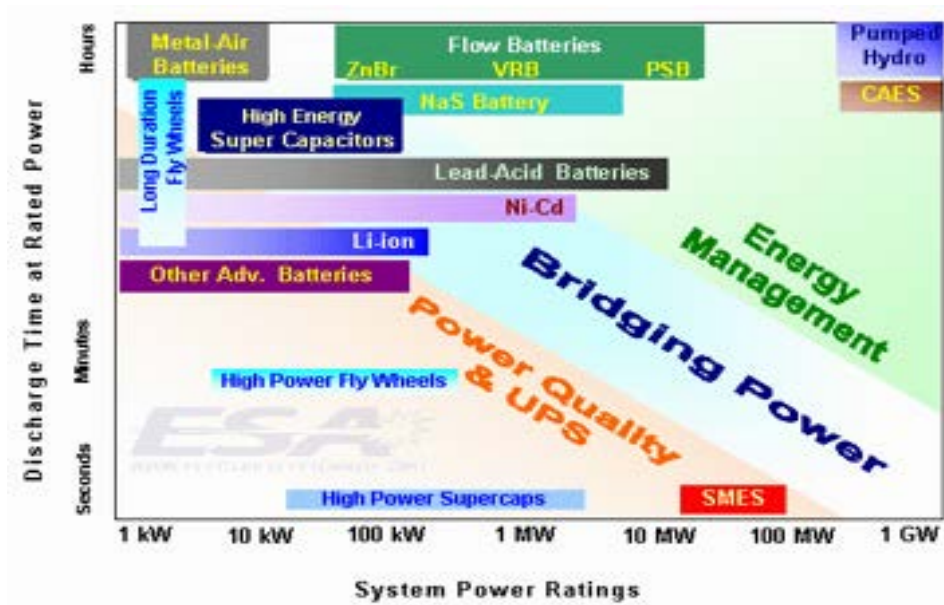


Figura 4. Comparazione del tempo di scarica in funzione del power rating per la maggior parte dei sistemi di accumulo conosciuti.

Gli SMES si configurano come sistemi da utilizzare per il controllo della stabilità dei sistemi di distribuzione e per il miglioramento della Power Quality, con un campo di applicabilità sovrapponibile a quello di altri dispositivi di accumulo elettrici, quali i supercapacitori per alta potenza, caratterizzati anche loro da elevato power rating ma limitata durata dell'erogazione della energia immagazzinata.

La Fig. 5 specifica ulteriormente il campo di applicazione degli SMES ed i disturbi di rete che possono essere compensati o annullati [7].

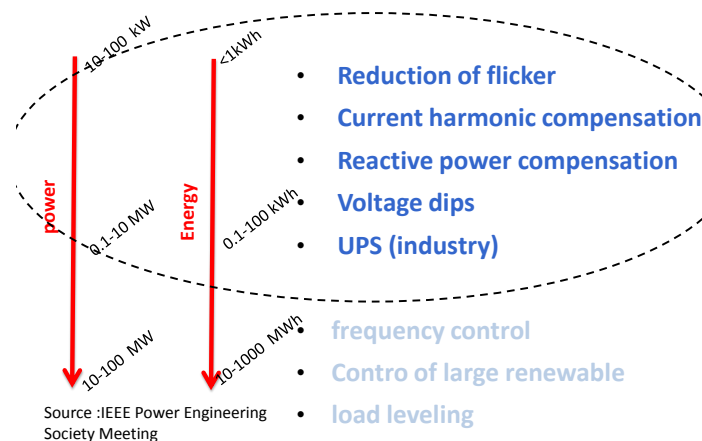


Figura 5. Sintesi del campo di applicabilità ottimale dei sistemi SMES

Le anomalie evidenziate in Fig. 5 sono la grande maggioranza delle anomalie connesse al sistema di distribuzione, e sono anche la causa primaria di costi aggiuntivi alla produzione industriale quantificabili in svariate centinaia di milioni di euro.

L'estensione del campo di applicabilità degli SMES è comunque oggetto di studio, soprattutto in Giappone, dove sono stati presentati progetti miranti a realizzare magneti capaci di immagazzinare enormi quantità di energia, dell'ordine della decina di GJoule, fino ad arrivare a formulare l'ipotesi di creare dei 'Campi SMES' in grado di alimentare numerose utenze abitative per lungo tempo [8].

1.3 SMES e Accordo di Programma

L'attuale tendenza nello sviluppo delle reti elettriche - che prevede un significativo aumento dei costi associati alla gestione delle fluttuazioni della domanda e dell'offerta di energia elettrica e dell'impegno economico prevedibile per adeguare le infrastrutture - accresce in maniera rilevante l'interesse per sistemi di accumulo di energia più flessibili in termini di adattabilità alle diverse funzioni richieste dalle reti elettriche e più accettabili da un punto di vista ambientale.

La finalità del Progetto ENEA **"Sistemi avanzati di accumulo di energia"** è quello di garantire costanti ed aggiornati filoni di ricerca fondamentale sulle tecnologie dell'accumulo di energia per le reti elettriche, da perseguire attraverso una costante attività di ricerca, che preveda la realizzazione e la verifica sperimentale di sistemi di accumulo elettrico innovativi.

In questa ottica, viste le caratteristiche e potenzialità, la attività sugli SMES si configura a pieno titolo come pienamente rispondente ai criteri ispiratori del progetto.

La attività sugli SMES prevede, nell'arco del triennio, di definire un progetto completo e di realizzare i moduli componenti il dispositivo tecnologicamente avanzato, in grado di operare a temperature superiori a quella dell'elio liquido, costruito facendo uso dei materiali superconduttori più recenti e più interessanti in prospettiva.

Lo MgB_2 e l' $YBCO$, i due composti proposti per lo sviluppo di questa attività, sono materiali relativamente recenti che, benché ancora ampiamente oggetto di ricerca da parte di molti gruppi, sono arrivati ad una fase di produzione industriale che consente di avere lunghezze significative di prodotto con caratteristiche costanti. La disponibilità di questi prodotti ha aperto la strada alla progettazione di magneti ed alla realizzazione di apparecchiature il cui funzionamento si basa su di essi.

La potenzialità per l' $YBCO$ di lavorare in azoto liquido rende questo superconduttore il soggetto primario per la progettazione di SMES con caratteristiche innovative, non più legati a costosi impianti di liquefazione dell'elio, abbattendo i costi di costruzione e manutenzione.

Un discorso a parte merita il MgB_2 . Questo materiale presenta sia una temperatura di transizione, 38 K, sia delle curve $J_c - B$ non confrontabili con l' $YBCO$, due caratteristiche queste che lo renderebbero, in confronto, non adatto allo scopo preposto. Tuttavia, lo MgB_2 è, tra i superconduttori, uno dei materiali più economici e di semplice realizzazione, e non necessita di impianti di liquefazione dell'elio o di cryocooler di elevate prestazioni, in quanto presenta buone caratteristiche a temperature dell'ordine dei 20 K, che possono essere raggiunte con un impianto di raffreddamento a circuito chiuso di costo contenuto. Tenendo in considerazione questi fattori, risulta che uno SMES prodotto facendo uso di MgB_2 sarebbe comunque una alternativa tecnologicamente valida ed economicamente attraente rispetto ai sistemi tradizionali costruiti con LTS. Da tenere in considerazione è anche il fatto che sono potenzialmente possibili interazioni positive tra ricerca e industria in quanto, caso raro, è una industria italiana, la Columbus (Gruppo ASG, Genova), la maggior produttrice di conduttori in MgB_2 presente sul mercato.

Per questo progetto, in prima approssimazione, si propone di realizzare un dispositivo di taglia medio-piccola, in grado di immagazzinare una quantità di energia dell'ordine delle centinaia di kJoule. Se realizzato, uno SMES di questa grandezza consentirebbe di avere un dispositivo non unicamente dimostrativo e dal costo contenuto, in grado di consentire studi 'sul campo' di questi sistemi.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Descrizione dei materiali utilizzati.

Le attività di questo primo anno di Programma sono incentrate sulla caratterizzazione dei materiali e sulla proposta di un progetto di massima di prototipo dimostrativo.

Come descritto e giustificato nel capitolo introduttivo, i materiali prescelti per la realizzazione del magnete sono l'YBCO e il MgB_2 .

2.1.1 YBCO

I nastri di YBCO di seconda generazione - 2G YBCO tapes – rappresentano la sintesi e l'evoluzione di un lungo lavoro di R&D, tuttora in corso, portato avanti da molti anni in vari laboratori, tra i quali anche quello dell'ENEA Frascati.

A causa della sua forte anisotropia, l'YBCO deve necessariamente essere depositato su substrati che ne determinino una precisa orientazione cristallina, orientando i piani cristallografici (a, b) lungo la direzione di scorrimento della corrente. In Fig. 6 sono illustrate la struttura cristallografica del materiale e la tipica configurazione del materiale depositato in laboratorio.

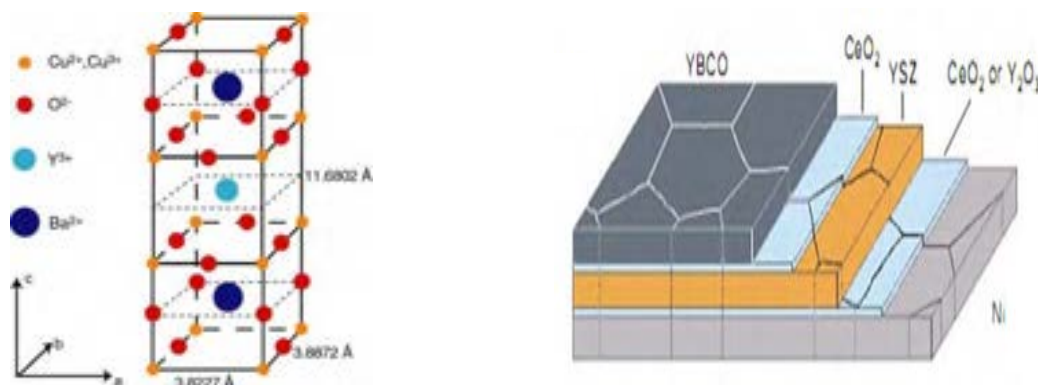


Figura 6. Struttura cristallina dell'YBCO (sx) e schema di nastro superconduttore (dx).

La Fig. 6 (sx) mostra i piani cristallografici (a, b). La conduzione avviene nel piano reticolare che contiene l'Ittrio, lungo celle vicine. Per ottenere un superconduttore con buone proprietà di trasporto, ogni singolo cristallo deve essere orientato come gli adiacenti; al fine di ottenere una crescita epitassiale che consenta continuità nell'estensione dei piani (a, b), si usa un substrato metallico, in genere Nichel, opportunamente testurizzato mediante laminazione. Una serie di layers di ossido, quali la Ceria, CeO_2 , e l'ossido di Ittrio, Y_2O_3 , sono interposti tra il substrato e il superconduttore per evitare interdiffusioni (ossidi di buffer).

La deposizione dell'YBCO può avvenire per metodo fisico (PLD, pulsed laser deposition), o per metodo chimico [9]. In ambedue i casi i campioni subiscono un trattamento termico ad alta temperatura, circa 800 C, per ottenere la cristallizzazione del materiale e la giusta stechiometria.

Lo spessore di materiale attivo non supera generalmente i 2 micron, il substrato metallico, oltre a indurre la necessaria epitassia, serve anche come shunt per la corrente che scorre nel superconduttore caso di transizione improvvisa.

I nastri di seconda generazione, pur mantenendo la impostazione sopra descritta, utilizzano tecnologie che consentono la deposizione in continua di lunghezze significative di svariate centinaia di metri, ed il materiale che si ottiene ha prestazioni elevate grazie alle tecnologie scelte ed alla ottimizzazione dei parametri [10]. In Fig. 7 è illustrato la sezione di un nastro 2G prodotto dalla ditta americana SuperPower.

La struttura del nastro è completata sui due lati dalla deposizione di Argento per l'ottimizzazione del contatto elettrico e di Rame, usato come elemento di stabilizzazione.

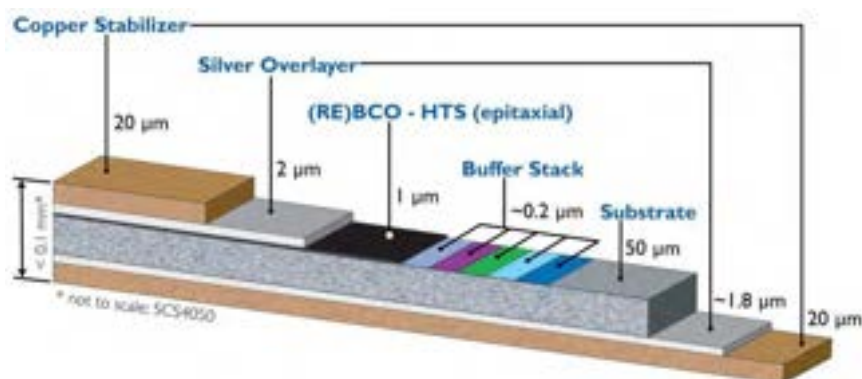


Figura 7. Schema di nastro di YBCO di seconda generazione prodotto industrialmente. La dicitura RE indica elementi del gruppo delle Terre Rare, che possono essere utilizzati.

I nastri prodotti dalle varie industrie presentano tutti, a vario grado, caratteristiche di media fragilità meccanica e termica, e necessitano quindi di attenzioni per la loro manipolazione. In particolare, non devono essere superati:

- raggi di curvatura inferiori ai 2.5 cm, in quanto provocano il danneggiamento meccanico permanente del conduttore;
- riscaldamenti a temperature superiori a 180 C per tempi maggiori di 60 secondi.

Per questo Progetto è stata eseguita una ricerca di mercato (Sett. 2012), allo scopo di individuare e contattare i produttori. Dalla ricerca è emerso che potevano essere acquistati i prodotti di quattro ditte, delle quali vengono riportati in Tabella I nominativi e caratteristiche del materiale prodotto.

Tabella I. Prospetto delle ditte fornitrici nastri di YBCO e relative proprietà

Ditta	Larghezza (mm)	Costo (\$/m)	Corrente critica max (A) [77 K, B = 0]
SuperPower (US)	4	50	120
American superconductor (US)	5 - (4 mm di sc + 0.5 mm di Cu laterale)	48	100
SUNAM (S. Korea)	5	20	160
SuperOx (Russia)	4	Test produzione	80

Da queste ditte sono state acquistate lunghezze sufficienti per eseguire le caratterizzazioni del materiale di base e per intraprendere, in futuro, la caratterizzazione meccanica e di processo della produzione di avvolgimenti. La ditta SuperOx ha fornito il nastro gratuitamente per fini di test della produzione.

Quasi alla fine del primo anno di attività (Ago. 2013) il laboratorio è stato contattato da altre ditte, una delle quali, la giapponese Fujikura, sembra in grado di produrre materiale di elevate prestazioni, ma estremamente costoso.

2.1.2 Diboruro di Magnesio

Come accennato, il MgB_2 rappresenta una alternativa valida all'uso dei materiali finora usati per gli SMES per via della sua T_c , 38 K, la più alta tra gli LTS, e della sua economicità.

Il diboruro di Magnesio prodotto in laboratorio viene generalmente depositato sotto forma di film, ottenuti per sputtering, per co-evaporazione, o per CVD da Diborano (B_2H_6). Non sono necessari particolari substrati in quanto il materiale, pur presentando anisotropie nella conduzione di corrente, non ha problemi di epitassia a causa della sua struttura cristallina semplice [11, 12].

A livello industriale il processo di produzione avviene mediante la tecnica Powder In Tube (PIT), in cui si ottiene il materiale attraverso la reazione termica in ambiente controllato di polveri formate dai singoli componenti [13].

Questo processo è quello oggi maggiormente usato per la produzione di MgB_2 a livello industriale, e

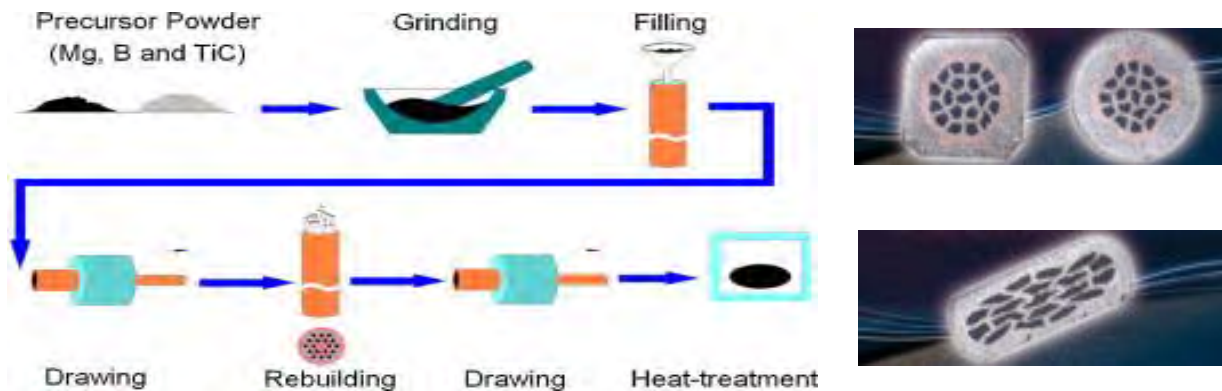


Figura 8. A sinistra: Fasi del processo di produzione del MgB_2 mediante PIT. A destra: differenti geometrie e layout di distribuzione dei filamenti di MgB_2 .

consente di ottenere un superconduttore di elevate prestazioni ad un costo relativamente ridotto.

In Fig. 8 è riportato il diagramma con le fasi di produzione mediante PIT e alcuni tipi di cavi ottenuti.

Come illustrato in figura, le polveri dei singoli composti vengono ridotte a dimensioni confrontabili e miscelate in modo da ottenere la giusta stechiometria del prodotto finito. A questa fase segue il processo di riempimento e trafilatura di tubi di piccola sezione che sono poi ri-assemblati per fornire il layout finale. Un trattamento termico finale ad elevata temperatura (850 – 900 C) assicura la formazione del prodotto.

Attualmente, per alcune produzioni si elimina il primo step di filling dei singoli componenti per creare direttamente il layout finale, e si introducono vari trattamenti termici intermedi durante la trafilatura.

I prodotti finali sono riportati in Fig. 8, la loro geometria e layout varia in funzione dell'utilizzo.

Le lunghezze di prodotto ottenibili sono chiaramente funzione sia delle dimensioni di partenza sia di quelle finali che si vogliono raggiungere. Attualmente, lunghezze di nastro di 1000 m sono facilmente ottenibili.

Il costo del materiale è basso, soprattutto se confrontato con i prezzi di mercato dell'YBCO, ed è di circa 5 Euro per metro lineare.

Campioni di MgB_2 di varia composizione sono stati forniti dalla ditta Columbus con la quale, anche grazie alle attività portate avanti nell'ambito di questo progetto, si sta avviando una attività di ricerca e sviluppo comuni.

La quantità di materiale inviato consente di eseguire solamente le misure di caratterizzazione, l'acquisto delle quantità necessarie alla realizzazione di avvolgimenti avverrà in seguito.

2.2 Apparato sperimentale e metodologia di misura

2.2.1 Apparato sperimentale

Per progettare il magnete superconduttore di uno SMES è necessario conoscere la temperatura di esercizio del dispositivo e le caratteristiche di trasporto del materiale nel campo creato dal magnete stesso.

La caratterizzazione dei materiali è un passo fondamentale per determinare le prestazioni, le dimensioni ed il costo del sistema, la determinazione delle caratteristiche dei materiali è, quindi, oggetto delle attività sperimentali previste in questo primo anno del Progetto.

Le misure in campo sono effettuate facendo uso di un criostato, equipaggiato con un solenoide superconduttivo costruito in NbTi, posizionato all'interno del criostato in quanto deve necessariamente operare in bagno di elio liquido.

Il magnete può sviluppare un campo massimo di poco superiore ai 14 Tesla quando percorso da una corrente di circa 110 A, ed è disegnato per avere una zona di alta uniformità all'interno della zona circolare

al centro del solenoide di dimensioni 60 mm x 60 mm. L'uniformità garantita dal costruttore in questa zona è di 1 parte su 10^4 .

Il diametro della zona circolare interna, *bore*, utile per ospitare campioni da misurare, è di 83 mm.

Il magnete presenta una alta induttanza, 9 Henry, ed è alimentato da uno speciale generatore di corrente in grado di alimentare carichi altamente induttivi.

L'andamento del campo magnetico al di fuori della zona di misura segue quello tipico dei campi creati da solenoidi di dimensioni finite, al di fuori del volume del solenoide decresce con il cubo della distanza dal centro del magnete; la grandezza del campo disperso è inferiore a 1 Gauss per una distanza di circa 1.5 metri dal criostato. Tale distanza non viene mai superata dagli operatori durante l'esecuzione delle misure.

Il criostato è generalmente usato per eseguire misure in immersione in bagno di elio, alla temperatura fissa di 4.2 K. Per questa metodologia, generalmente seguita per i materiali LTS, l'elio assicura anche una efficace protezione contro riscaldamenti dovuti al passaggio di correnti eccessive, questo grazie alla sua alta capacità termica.

Per poter misurare i campioni di YBCO alla temperatura di 77 K si fa uso di un apposito contro criostato, un inserto formato da un cilindro a doppia parete con vuoto nell'intercapedine come isolante termico, da inserire al centro del magnete. Il contro criostato consente di disaccoppiare il bagno di elio liquido, necessario al funzionamento del magnete, dall'ambiente di misura del campione. Dovendo essere posizionato all'interno del *bore*, l'uso del contro criostato riduce il diametro utile per ospitare il campione da 83 a 55 mm. In Fig. 9 sono illustrati il criostato ed il contro criostato utilizzati.



Figura 9. A sinistra: criostato equipaggiato con magnete da 14 T. A destra: contro criostato per misure in azoto liquido.

I campioni sono misurati fissandoli su appositi porta campioni, strutture costruite presso l'officina del laboratorio, aventi lo scopo di posizionare il campione al centro della zona di uniformità, ed equipaggiate con opportuni passanti di corrente, discendenti adatti ad essere attraversati da correnti elevate, nonché di sensori di temperatura per il controllo delle condizioni di misura.

È stata prestata grande attenzione alla fase di saldatura dei campioni. Questo passaggio è molto delicato in quanto la saldatura deve consentire il passaggio di correnti elevate, e nel contempo non deve danneggiare il campione. Per ogni materiale è stata elaborata una specifica procedura nella quale venivano usati materiali basso-fondenti (< 180 C) con riscaldamenti del nastro limitati a meno di 60 secondi.

Per la partecipazione a questo Progetto sono stati appositamente progettati e costruiti i porta campioni sia dell'YBCO che del MgB_2 .

Le misure del MgB_2 sono eseguite in bagno di elio, il porta campioni consente di montare nastri lunghi fino a 70 mm, di posizionare il campione secondo due direzioni ortogonali al campo B, e di far passare correnti superiori ai 1000 A. Correnti così elevate possono creare riscaldamenti anomali nella zona di contatto tra il discendente e la struttura su cui è saldato il nastro, tali riscaldamenti possono tradursi in evaporazioni

improvvisi di grandi quantità di elio, con conseguente mancanza di refrigerazione e *quench* del magnete; per ovviare a questa evenienza, un nastro di YBCO è stato saldato sul componente interno del connettore. Più complesso è il porta campioni per l'YBCO, mostrato in Fig. 10. Le misure per questo materiale sono eseguite in bagno di azoto liquido a 77 K riempiendo completamente il *bore* del contro-criostato. I barraggi del discendente sono tali da consentire il passaggio di correnti fino a circa 250 A. Il campione da montare non deve superare la lunghezza di 50 mm e può essere posizionato in modo tale effettuare misure in campo secondo due direzioni ortogonali tra loro, una parallela ed una perpendicolare al lato piatto del campione. Il porta campioni può essere sigillato al contro-criostato per ottenere una media tenuta da vuoto, in questo modo è possibile abbassare la temperatura del bagno di azoto utilizzando un impianto di pompaggio costituito da una semplice rotativa. I diagrammi di fase indicano che a 65 K la tensione di vapore dell'azoto liquido è di circa 100 mbar.



Figura 10. A sinistra: passante di corrente per i nastri di YBCO. A destra: particolare del porta campione.

Fanno parte dell'apparato sperimentale anche i seguenti strumenti:

- Alimentatori di corrente. Sono utilizzati due differenti alimentatori, in grado di fornire rispettivamente 550 A e >1000 A in DC.
- Sensori di temperatura, costituiti da termometri Cernox, con range di temperature da 300 K a 4 K, la cui caratteristica è di essere immuni dalla presenza di campi magnetici.
- Lettori di temperatura e nano voltmetri.
- Computer per la gestione automatizzata delle misure.

Le misure sul MgB_2 necessitano di essere integrate per poter conoscere il comportamento del superconduttore a temperature superiori ai 4.2 K. A tale scopo è previsto di utilizzare un apparato VSM (Vibrating Sample Magnetometer), nel quale si misurano le proprietà magnetiche del materiale [14]. Facendo uso di particolari fit è possibile ricavare un valore proporzionale alla corrente critica, che deve necessariamente essere normalizzato al valore della misura $I - V$ per fornire la grandezza cercata, e per questa ragione le misure del MgB_2 in bagno di elio risultano fondamentali.

Il VSM consente di variare le temperature da 4.2 a circa 30 K, ospita campioni di dimensioni ridotte – pochi millimetri di lunghezza – che non necessitano di alcuna saldatura. Si tralascia una descrizione particolareggiata di questo apparato di misura in questo report.

2.2.2 Metodologia di misura

La preparazione del criostato, passaggio propedeutico alle misure dei campioni, è necessaria ogni qualvolta il magnete da 14 Tesla si trovi a temperatura ambiente. Per poter freddare correttamente il solenoide è necessario creare vuoto spinto ($< 10^{-4}$ mbar) nella intercapedine esterna del criostato, operazione che dura almeno 24 ore, e successivamente immettere azoto liquido in una seconda intercapedine adiacente la

camera del magnete che dovrà essere riempita di elio liquido. L'azoto liquido, oltre a formare uno schermo termico durante le misure, nella fase di preparazione provoca un lento e costante abbassamento della temperatura del solenoide, tale da far raggiungere circa i 100 K dopo tre giorni. Solo in questa fase è possibile immettere elio liquido nella camera principale fino al raggiungimento della temperatura di 4.2 K e al successivo formarsi del bagno criogenico, il tempo di formazione del bagno e la copertura completa del magnete avvengono in circa 4 ore.

È necessario posizionare al centro del magnete il contro-criostato o il porta campioni per MgB_2 prima dell'inizio del raffreddamento, in quanto una loro immissione in elio liquido potrebbe comportare una evaporazione incontrollata.

Il porta campioni con i nastri di YBCO è inserito nel contro-criostato dopo che questo è posizionato nel magnete; per le misure a 77 K si immette semplicemente azoto liquido fino al riempimento completo del volume, le misure a 65 K sono fatte dopo aver sigillato il foro di immissione dell'azoto e pompato il sistema con una rotativa.

I nastri superconduttori sono saldati sul porta campioni avendo cura di non danneggiare meccanicamente o termicamente il materiale.

Questo particolare step è risultato particolarmente *time consuming*. Sono risultate necessarie numerose prove prima di poter mettere a punto il processo e, dato che il risultato di ogni prova era noto solo dopo che la misura era in fase di esecuzione, era necessario attendere tempi lunghi per permettere al porta campioni di portarsi a temperatura ambiente. Un esempio di misura affetta da danneggiamento del campione indotto da una saldatura eseguita non correttamente è mostrato in Fig. 11.

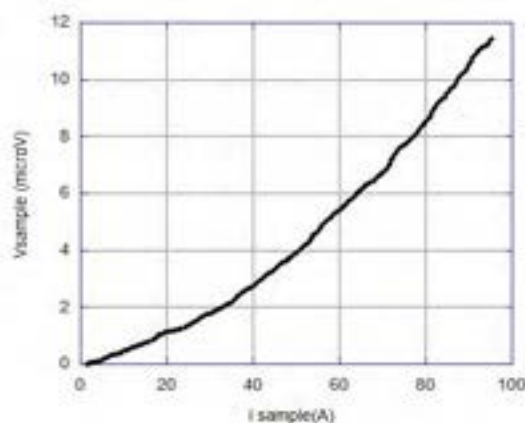


Figura 11. Esempio di misura su campione di YBCO con saldatura dei contatti non corretta.

La determinazione della corrente critica viene fatta monitorando la presenza di una caduta di tensione ai capi del conduttore, nel caso dei superconduttori il loro comportamento non lineare nei dintorni della transizione viene modellato supponendo un andamento del campo elettrico E in funzione della densità di corrente J tale da seguire la legge [15]

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (2)$$

Nella espressione J_c è la corrente critica che si manifesta al campo critico E_c , valore prefissato che costituisce il così detto criterio di transizione.

Per i materiali LTS si usa il criterio di avere un valore di $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$, per i materiali HTS questa soglia sale a $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ a causa di differenti meccanismi di trasporto. Il fattore n misura la pendenza della curva di potenza, ed è tanto più alto quanto più la transizione è netta, per $n=1$ si ottiene la legge di Ohm.

La misura della transizione viene fatta misurando per mezzo di un nanovoltmetro il voltaggio tra due fili saldati al centro dei nastri e separati da una distanza di 1 cm. Una volta posizionato il campione, si esegue la misura della corrente critica in campo nullo, quindi il campo viene aumentato e la misura viene ripetuta

per il nuovo valore, questi passaggi si ripetono fino al valore massimo del campo B, oppure fino ad ottenere valori di corrente troppo bassi, dell'ordine di alcuni Ampere.

2.3 Risultati sperimentali

Le misure criogeniche sui superconduttori sopra descritte, oltre a necessitare di strumentazione particolare a causa delle condizioni di misura – correnti e campi elevati, basse temperature - dipendono drasticamente dal liquido refrigerante.

La dipendenza dall'Elio liquido si manifesta sotto due aspetti: il costo del materiale e la sua disponibilità.

Il Centro Ricerche di Frascati è uno dei pochi centri al mondo a disporre di un circuito di recupero dell'Elio, in grado di convogliare l'evaporazione dai vari laboratori ad un impianto di liquefazione, e di consentire quindi un riutilizzo del materiale. L'efficienza di recupero è alta, dell'ordine del 70%.

In considerazione di questa potenzialità, per il Progetto sono stati spesi 14000 Euro per l'acquisto di circa 1500 litri di Elio liquido, avendo avuto fino ad ora un consumo quasi triplo.

Nel periodo marzo – giugno il liquefattore ha subito alcuni malfunzionamenti non prevedibili, che hanno bloccato a singhiozzo la produzione di elio liquido per periodi più o meno lunghi.

Questo fatto, unitamente al tempo di ripristino del criostato ed al naturale sovrapporsi di attività sperimentali di altri gruppi e colleghi, ha comportato un rallentamento della attività di caratterizzazione dei nastri di YBCO e di MgB_2 ; alla data del 30 settembre, sono state completate le misure sui nastri di YBCO e sono in fase di avvio quelle sul diboruro di magnesio.

Passando alla illustrazione dei risultati sperimentali, come prima cosa si riportano in Tabella II i valori di corrente critica misurati presso il Centro ENEA di Frascati, da confrontare quelli dichiarati dalle ditte.

Tabella II. Confronto tra i valori di corrente critica dichiarati e quelli misurati in laboratorio.

Ditta	Corr. critica misurata (A) [77 K, B = 0]	Corr. critica dichiarata (A) [77 K, B = 0]
SuperPower (US)	120	120
American superconductor (US)	116	100
SUNAM (S. Korea)	166	160

In Tabella II e nel report sono riportati i valori di corrente, misurati direttamente, e non, come sarebbe corretto, i valori della densità di corrente. Il motivo di questa scelta è nel fatto che le ditte generalmente non rendono noti i valori degli spessori depositati. Un rapido calcolo, in grado di dare una stima delle J_c in gioco, fornisce un valore di circa $2 \cdot 10^7$ A/mm² per il nastro American Superconductor. Simili valori elevati si hanno per gli altri conduttori.

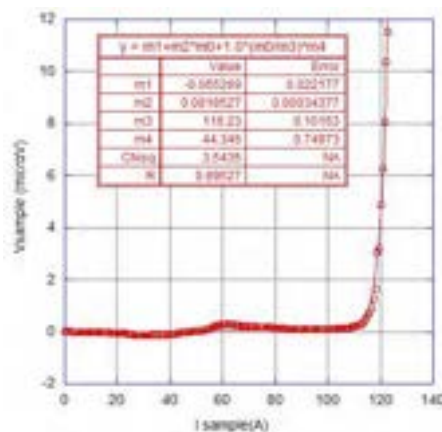


Figura 12. Curva sperimentale I—V e relativo fit per il campione AMSC a T=77K

I valori di corrente critica sono stati ricavati eseguendo i fit delle curve corrente – tensione secondo la legge di potenza esposta nel paragrafo precedente. In Fig. 12 si riporta una di queste curve, relativa al materiale American Superconductor (AMSC), unitamente ai parametri di fit.

L'equazione usata, riportata nell'inserito di Fig. 12, tiene conto sia della presenza di eventuali offset di voltaggio (parametro m_1 , espresso in μV), sia di un debole effetto resistivo dovuto a percorsi preferenziali che possono avvenire anche nel rame (parametro m_2 , espresso in $\mu\Omega$); il fattore moltiplicativo "1.0" indica che, per questo campione il criterio di transizione si ha per un voltaggio di 1 μV (distanza misurata dei contatti di 1 cm). I parametri m_3 (espresso in Ampere) ed m_4 indicano rispettivamente la corrente critica e l'esponente della equazione di fit.

Per i nastri SUNAM e AMSC le misure sono state ripetute usando differenti lunghezze di nastro, con il fine di controllare eventuali difetti di uniformità di produzione mediante la campionatura dei risultati per alcuni punti di misura, generalmente $B = 0$ e $B = 2$ Tesla alle due temperature. I risultati di questi test non hanno mostrato differenze di comportamento.

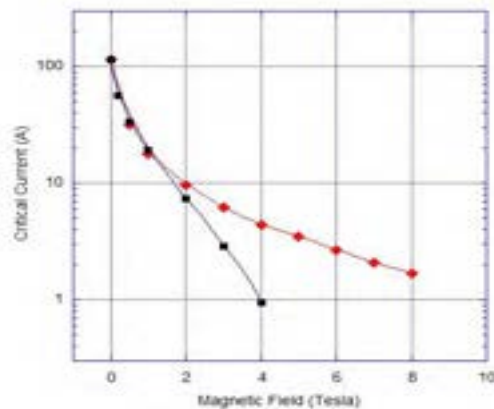


Figura 13. Andamento della corrente critica del campione AMSC misurato a $T = 77$ K per B perpendicolare (quadrati, blu) e B parallelo (rombi, rossi).

L'andamento della corrente critica in funzione della orientazione del campione rispetto al campo è mostrata in Fig. 13, sempre per il materiale AMSC.

Differenze di comportamento non sono accentuate se non per valori del campo superiori a circa 2 Tesla. Un comportamento simile si osserva anche per i campioni SuperPower e SUNAM.

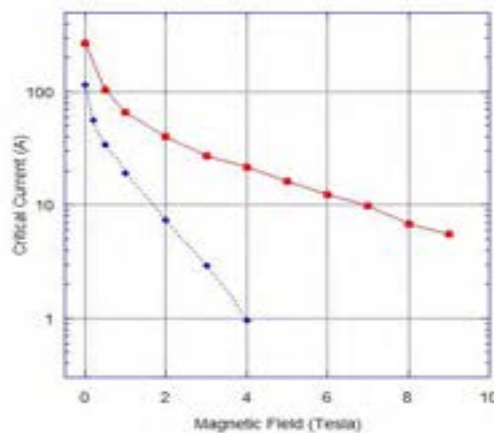


Figura 14. Curve della Corrente Critica del campione AMSC a 77 K (blue) ed a 65 K (rosso).

Un considerevole incremento della corrente si ha eseguendo le misure in azoto liquido a 65 K di temperatura, punto in cui le prestazioni del materiale aumentano di circa un fattore due rispetto alle curve a 77 K per $B = 0$, e aumentano la loro capacità di portare correnti maggiori ad alti campi. A titolo di esempio, sempre per il nastro AMSC, la Fig. 14 riporta gli andamenti della I_c in funzione di B presi alle due temperature.

Le Tabelle III e IV riassumono le prestazioni di materiali caratterizzati fino ad ora alle due temperature di 77 e 65 K. Non è stato possibile ricavare i valori della corrente critica per il nastro SuperPower a 65 K, i dati graficati mostrano un comportamento resistivo per ogni valore del campo B . Una probabile delaminazione ha avuto luogo nel passaggio dai 77 ai 65 K, danneggiando il nastro in modo irreversibile. Le misure saranno ripetute utilizzando nuove lunghezze.

Tabella III. Riassunto delle I_c misurate a $T = 77$ K per vari valori del campo magnetico perpendicolare.

	$B = 0.2$ T	$B = 0.5$ T	$B = 1$ T	$B = 2$ T	$B = 3$ T
AMSC	56.5	33.8	19.2	7.4	2.9
SuperPower	74	32.5	17.5	7.2	3.6
SUNAM	59.6	43.6	31.5	17.4	9.9
SuperOx	57	36.8	24.7	14.1	9.8

Tabella IV. Riassunto delle I_c misurate a $T = 65$ K per vari valori del campo magnetico perpendicolare. Il campione SuperOx è stato misurato a $T = 67$ K.

	$B = 0.5$ T	$B = 1$ T	$B = 2$ T	$B = 3$ T	$B = 4$ T	$B = 5$ T
AMSC	104.5	66	40.2	27.4	21.7	16.3
SuperPower	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
SUNAM	83	52.7	30.2	21	15	7
SuperOx	89.4	59.8	38	28.2	21.5	17.7

Contemporaneamente al lavoro di caratterizzazione, è stato compiuto uno sforzo non indifferente per poter ricavare un modello matematico per l'YBCO che consentisse di predire il comportamento dei materiali sulla base di loro proprietà intrinseche.

La elaborazione di equazioni in grado di descrivere il comportamento dei materiali in funzione dei parametri principali, temperatura, corrente e campo magnetico, è fondamentale poter predire il comportamento del superconduttore nelle condizioni di lavoro e per poter aggiustare tutti i vari parametri di un progetto.

In collaborazione con il Dott. Paolo Sabatino dell'Università di Salerno è stato elaborato un semplice modello matematico partendo dal modello generalizzato di Kim [16] sulla dipendenza della corrente critica in caso di *bulk pinning*, e apportando le opportune variazioni per tener conto delle caratteristiche dell'YBCO.

In Tabella V ed in Fig. 15 sono riportati i parametri di fit usati nelle equazione 3) e la corrispondenza delle curve ai risultati sperimentali per il campione AMSC alla temperatura di 77 K. L'equazione trovata è la seguente:

$$I_c(B_a) = I_{c0} / (e^{B_a/B_1} (1 + B_a/B_0)^\beta) \quad (3)$$

dove I_{c0} è il valore della corrente critica a campo nullo, B_0 , B_1 e β parametri dipendenti dal materiale.

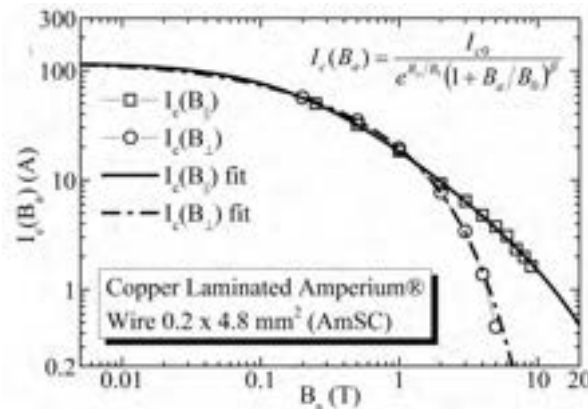


Figura 15. Fit numerico delle curve I_c vs. B a $T = 77$ K.

Un analogo studio sulla dipendenza del valore n dal campo magnetico [17], ha portato alla formulazione della seguente equazione:

$$n(B_a) = n_1 + (n_0 - n_1)/(1 + B_a/B_0)^\beta \quad (4)$$

Dove si assume che i parametri n_0 ed n_1 siano coincidenti con il valore dell'esponente n per campo nullo e per un campo $\gg$ di B_0 . I valori riassuntivi dei parametri di fit per la espressione 4) sono riportati in Tabella V, mentre l'andamento delle simulazione è in Fig. 16. Nel caso del fit del valore della potenza non è possibile prevedere l'andamento sperimentale di n per alti campi, ed anche i valori dei parametri non sono coincidenti con quelli delle curve I-V. Una possibile spiegazione è data dalla probabile insorgenza di percorsi di corrente addizionali per alti valori del campo, che variano la pendenza della curva I - V.

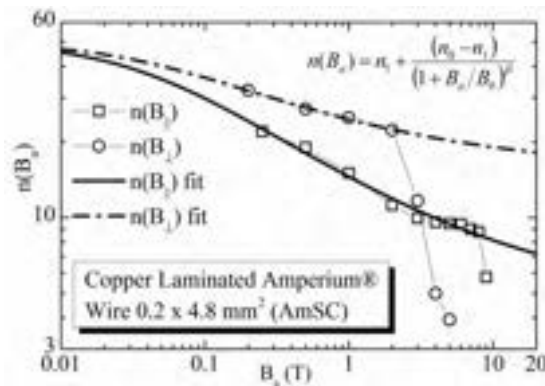


Figura 16. Fit numerico delle curve n vs. B a $T = 77$ K.

L'accordo tra i dati sperimentali e le curve di fit è buono per le curve I_c vs. B , mentre sono sicuramente necessari ulteriori sforzi per arrivare ad una buona comprensione dell'andamento delle curve n vs. B .

I passi successivi prevedono il miglioramento del fit n vs. B , l'estensione del modello ai nastri prodotti dalle alte ditte, lo studio dei parametri in funzione della temperatura, e, se possibile, l'inclusione di questa nell'equazione generale. Similmente a quanto avviene attualmente per i cavi LTS [18], si avrà così a disposizione un mezzo molto potente per la predizione delle caratteristiche, da utilizzare in codici di calcolo per la progettazione di dispositivi o di cavi.

Tabella V. Riassunto parametri di fit della eq. 3) e 4) per il nastro AMSC

	B par	B perp		B par	B perp
I_{c0}	117 A	117 A	n_0	50	50
B_0	179 mT	46 mT	n_1	4.7	15
B_1	21 T	1.4 T	B_0	39 mT	38 mT
β	0.96	0.34	β	0.47	0.4

Le attività sperimentali sugli SMES sono proseguite con lo studio delle tecniche di avvolgimento dei nastri di YBCO e delle problematiche connesse. Questo supplemento di attività non fa parte del programma di azioni previsto per il primo anno del Progetto, ma è stato avviato egualmente tenendo in considerazione alcuni fattori ed i probabili ritardi amministrativi e di finanziamento.

Da un punto di vista costruttivo, la configurazione di base del magnete prevede che questo sia formato da una serie di *pancake*, vale a dire da una serie di avvolgimenti su una unica spira, che ne costituiscono il modulo costruttivo. È possibile ‘assemblare’ i *pancake* per originare configurazioni di campo differenti: una serie di *pancake* impilati dà origine alla distribuzione di campo di un solenoide, mentre vari *pancake* possono essere uniti per dare luogo ad un tokamak toroidale. La costruzione a *pancake* modulari semplifica e rende più affidabile la costruzione del magnete in quanto ogni singolo elemento può essere costruito e testato singolarmente prima del montaggio.

Al fine di avere un unico percorso di corrente i vari *pancake* sono connessi in serie. Per avere un arrangiamento di facile realizzazione si usa la configurazione a doppio *pancake* (*double pancake coil*) in cui i due contatti sono situati sullo stesso lato, come illustrato in Fig. 17.

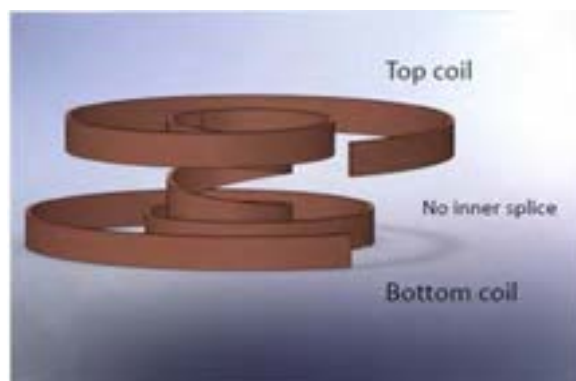


Figura 17. Schema di avvolgimento a doppio pancake.



Figura 18. Nastratrice usata per la produzione di avvolgimenti di YBCO.

È stata recuperata, grazie alla disponibilità di altri colleghi del Centro Ricerche di Frascati, una macchina avvolgitrice per nastri da laboratorio, in grado di produrre coil di piccole dimensioni. La macchina, resa di nuovo funzionante e adattata alle esigenze attuali, è mostrata in Fig. 18.

Una volta prodotti, gli avvolgimenti sono stati caratterizzati eseguendo misure $I - V$ in bagno di azoto liquido alla temperatura di 77 K. La stazione di misura allestita a questo scopo comprende l'utilizzo di un contenitore termicamente isolato per il bagno di azoto, entro il quale posizionare la bobina, e l'utilizzo della stessa strumentazione usata per la caratterizzazione dei nastri.

Il problema che si è deciso di affrontare in questa fase è quello della impregnazione del circuito.

Le bobine di superconduttore devono essere fissate nella loro forma facendo uso di resine, il materiale usato per l'impregnazione deve consentire all'avvolgimento di essere isolato elettricamente, rigido meccanicamente per poter essere misurato e successivamente montato nella struttura finale, ma nel contempo deve assicurare una buona conduzione del calore ed essere resistente ai cicli termici. Diversi laboratori su questo punto hanno riportato problemi di delaminazione dei nastri di YBCO e conseguente crollo delle prestazioni [19]. Per questo studio preliminare è stato utilizzato solo il nastro AMSC.

Le bobine sono state prodotte utilizzando una lunghezza di nastro di circa 1.5 metri per avvolgimento, e sono state impregnate facendo uso di particolari resine di laboratorio, Varnish e Stycast, comunemente usate per questi scopi. In considerazione della sensibilità del materiale, non è stato adottato alcun trattamento di *curing* dopo l'impregnazione.

In Tabella VI sono riportate le dimensioni ed il trattamento impregnante dei vari coil misurati.

Tabella VI. Riepilogo delle caratteristiche degli avvolgimenti.

Bobina	Dia. Int. (mm)	Dia. Est. (mm)	H (mm)	Resina	Esito misure V - I
B	40	43	11	Varnish	Neg
C	40	44.6	11	Stycast	Pos
D	40	44.6	11	Stycast diluito	pos

Una volta preparati, i campioni sono stati montati su un supporto di bakelite, contattati e misurati.

Il risultato per il campione C è mostrato in Fig. 19. Per questo campione il criterio di determinazione della corrente critica ($1 \mu\text{V}/\text{cm}$) era di $V = 144 \mu\text{V}$, in quanto le prese di tensione erano saldate alle estremità della bobina.

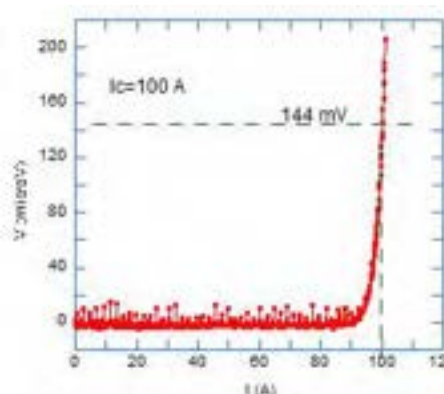


Figura 19. Curva corrente – tensione per l'avvolgimento C.

L'andamento della tensione mostra che l'intero processo di avvolgimento e impregnazione non ha danneggiato il campione. La corrente critica è più bassa di quella misurata sui nastri in quanto bisogna tener conto della presenza del campo magnetico creato dalla bobina.

Le prove di impregnazione hanno prodotto come risultato che l'uso della resina Varnish non è adatto per questo processo, mentre lo Stycast consente di avere buoni avvolgimenti. Il campione D è stato impregnato diluendo la resina con alcol etilico in proporzione 2:1, ciò ha reso più agevole la penetrazione del composto.

2.4 Elaborazione di un progetto di massima del magnete

Un progetto di massima di uno SMES prevede lo studio ed il dimensionamento dei vari elementi che costituiscono il sistema. In questa fase dello sviluppo del dispositivo, l'attenzione deve essere concentrata sullo sviluppo del magnete, elemento fondamentale dell'intera architettura.

La parte dello schema a blocchi – par. 1.2 - riguardante il sistema di condizionamento della potenza (PCS) è funzione della taglia del dispositivo e dell'utilizzo previsto. I costi del PCS non sono pertanto quantificabili al momento, ma sono comunque connessi al progetto ed all'utilizzo di componenti standard di comune reperimento sul mercato

Anche la progettazione del sistema di refrigerazione deve tener conto del dimensionamento e delle condizioni operative del magnete.

Per quel che riguarda il MgB_2 è possibile sopporre una temperatura di funzionamento dell'ordine dei 20 K, e quindi l'utilizzo di un cryocooler a circuito chiuso di elio per la refrigerazione. Il costo di un impianto simile è funzione della quantità di energia termica che la macchina è in grado di estrarre alla temperatura operativa, ed è quindi connesso al dimensionamento del superconduttore.

Per l' $YBCO$, le condizioni operative ottimali sarebbero di poter lavorare in bagno di azoto liquido, alla temperatura di 77 K o alle temperature più basse ottenibili abbassando la tensione di vapore dell'azoto, due soluzioni, queste, che avrebbero il pregio di svincolare il sistema dall'uso di elio. Anche in questo caso le condizioni di lavoro del superconduttore e le dimensioni del magnete risultano fondamentali ai fini della scelta. Un abbassamento della temperatura di lavoro a 50 K sarebbe positivo per quel che riguarda le prestazioni del materiale, ma comporterebbe, di nuovo, l'utilizzo di cryocoolers [20].

La progettazione del magnete è effettuata attraverso un processo di trial-and-error, in cui si simulano le prestazioni del dispositivo e si controlla che queste siano compatibili con le caratteristiche del materiale, il processo si ripete fino all'ottimizzazione. Unitamente alle prestazioni del magnete, in un secondo momento, non previsto per questo rapporto, bisognerà considerare anche le eventuali sollecitazioni a cui il materiale è sottoposto. Questo passo comporterà un ulteriore affinamento e servirà a definire il magnete nella sua intera struttura.

Le simulazioni delle prestazioni del magnete vengono eseguite facendo uso di software commerciali, quali COMSOL Multiphysics.

Per avere una stima della configurazione e della quantità di materiale necessario alla costruzione del magnete si parte dalla definizione delle caratteristiche del dispositivo, e cioè quantità di energia immagazzinata e potenza che deve essere disponibile al momento della sua entrata in funzione.

Qui di seguito si riporta un progetto di massima per magnete in MgB_2 [21, 22].

Richiesta: un dispositivo che possa immagazzinare 1 MJ ($1000 \text{ kW}\cdot\text{s} = 0.28 \text{ kWh}$), equipaggiato con una elettronica che consenta il passaggio di un max di 250 A.

L'induttanza del dispositivo è data da:

$$E = \frac{1}{2} L I^2 \rightarrow L = \frac{2E}{I^2} = \frac{2 \cdot 10^6}{250^2} = 32 \text{ H} \quad (5)$$

Con queste condizioni iniziali, è possibile procedere alla stima delle dimensioni del magnete. Supponendo un campo magnetico creato di 5 Tesla, supponendo di usare il materiale riportato da [23], dalla letteratura si ricava che un filamento di MgB_2 alla temperatura di 20 K è in grado di portare quasi 25 A/mm^2 ; per questioni di protezione dal *quench*, si fissa la densità di corrente a 20 A/mm^2 .

Tenendo conto delle dimensioni dei filamenti, si ha:

diametro filo: 2.1 mm --> Area filo: $A_\phi = \pi \times 1.05^2 = 3.8 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$

imponendo 250 A di corrente, considerando le caratteristiche del filo e indicando con N il numero di fili necessari a condurre 250 A:

$$N_{sc} = \frac{I}{J A_\phi} = \frac{250 \text{ A}}{3.8 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot 2 \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2} = 3.2 \Rightarrow 4 \quad (6)$$

Bisogna quindi lavorare con 4 fili in parallelo.

La stima che segue adotta l'approssimazione di un solenoide di altezza h pari al diametro medio, come riportato in Fig. 20. Le quantità che interverranno sono: spessore dell'avvolgimento s, lunghezza magnetica $L_m = \sqrt{2}h$, la sezione del superconduttore A_ϕ e la sezione del solenoide A, intesa come sezione geometrica riferita al diametro esterno del solenoide.

L'induttanza di questa configurazione è data dalla:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{L_m} \quad (7)$$

dove $N = \frac{h \cdot s}{A_\phi}$ è il numero complessivo di spire, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ e $A = \pi \left(\frac{h}{2} + \frac{s}{2} \right)^2$.

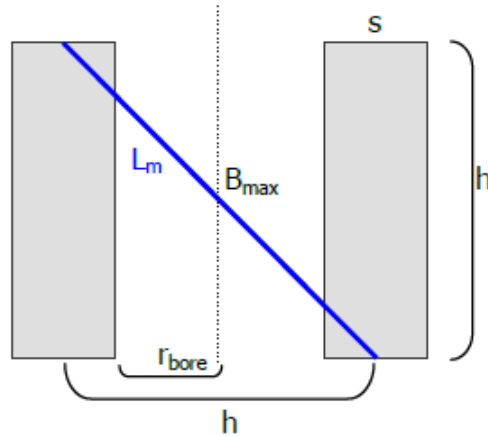


Figura 20. Schema di solenoide usato nella progettazione, con definizione della lunghezza magnetica L_m

Sostituendo:

$$L = \frac{\mu_0}{\sqrt{2}h} \left(\frac{h \cdot s}{A_\phi} \right)^2 \pi \left(\frac{h}{2} + \frac{s}{2} \right)^2 \quad (8)$$

è possibile ricavare lo spessore note le altre quantità risolvendo l'equazione:

$$s^4 + 2hs^3 + h^2s^2 - \frac{4\sqrt{2}A_\phi^2 L}{\pi\mu_0 h} = 0 \quad (9)$$

la soluzione è: $s = 6.75 \text{ cm}$ per $L = 32 \text{ H}$, $h = 50 \text{ cm}$, $A_\phi = 3.87 \text{ mm}^2$.

Il numero di spire sarà:

$$N = \frac{h \cdot s}{A_{\phi}} = 8720$$

tenendo conto che ogni spira è di 4 conduttori in parallelo, il numero complessivo di conduttori è:

$$N_{cond} = 8720 \cdot 4 = 34880$$

equivalenti a: $\pi h N_{cond} = 55 \text{ km}$. Supponendo un costo unitario di 4 Euro/metro; il costo del cavo necessario si aggira intorno a 210 kEuro.

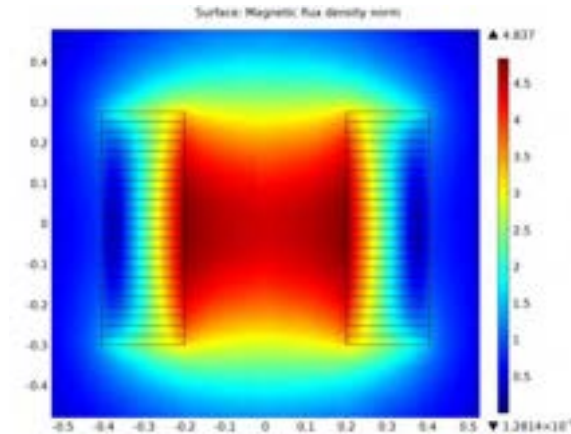


Figura 21. Risultati della simulazione ad elementi finiti per il magnete descritto nel testo.

La verifica che l'intensità del campo magnetico si aggiri effettivamente nei pressi del valore usato per queste stime viene fatto con simulazione agli elementi finiti, come illustrato in Fig. 21. Il campo massimo è di circa 4.8 Tesla, in accordo con le stime, il dimensionamento della sezione di superconduttore sembra corretto per immagazzinare l'energia richiesta e lavorare al di sotto della corrente critica.

Questo progetto di massima per un sistema da 1 MJ indica che è necessario costruire un magnete 50 cm x 50 cm con spessore totale dell'avvolgimento di 6.75 cm, con un utilizzo minimo di 55 km di filo di MgB_2 , con una spesa per il materiale di circa 200 kEuro.

A questa stima vanno aggiunti i costi dell'impianto di refrigerazione, della costruzione del magnete, del sistema di controllo, etc.

Un percorso di questo tipo sarà seguito per i materiali oggetto di questa ricerca, prendendo in considerazione i vari aspetti del sistema.

3 Conclusioni

Gli SMES si presentano come sistemi tecnologicamente avanzati, che mostrano molti vantaggi rispetto agli attuali dispositivi di accumulo, e sono giudicati particolarmente indicati per applicazioni riguardanti la *Power Quality*.

Le attività previste dal Progetto sullo "Studio di sistemi avanzati di accumulo avanzato basati su magneti superconduttori" mirano ad ottenere un prototipo di SMES di nuova generazione, svincolato dall'uso degli attuali, costosi sistemi di refrigerazione, come prodotto finale.

In considerazione della complessità del Progetto è stato creato un gruppo di lavoro dedicato, che raccoglie le professionalità ritenute necessarie allo svolgimento dello stesso.

Nell'ambito del Progetto, gli obiettivi proposti per questo primo anno:

- caratterizzazione di campioni di YBCO e MgB_2 ,
- Studio di massima di un prototipo dimostrativo,

sono stati quasi totalmente rispettati, potendo giustificare il ritardo nelle caratterizzazioni del MgB_2 in quanto dovuto a cause esterne.

Il lavoro svolto si è concretizzato non solo nella produzione dei risultati richiesti e illustrati in questo rapporto, ma anche nella acquisizione delle conoscenze specifiche e nella preparazione di tutta la strumentazione e minuteria meccanica necessaria.

- È stata eseguita una estesa campagna di caratterizzazione di nastri di YBCO forniti da varie ditte produttrici.
- È stato sviluppato un modello predittivo del comportamento del materiale.
- Si sta mettendo a punto una metodologia per sviluppare un progetto di SMES, in grado di fornire stime giudicate affidabili, e un progetto di massima, concreto anche se parziale, è stato prodotto.
- È stata avviata, in anticipo sul secondo anno di Progetto, la produzione e la caratterizzazione di avvolgimenti di piccole dimensioni

Per quel che riguarda le attività del secondo anno di Progetto, auspicando l'assenza di impedimenti e ritardi amministrativi da parte dei soggetti preposti, si propone di:

- Iniziare e completare le caratterizzazioni del MgB_2 previste per il primo anno;
- Continuare le attività di caratterizzazione e di modellizzazione dei materiali;
- Mettere a punto la fabbricazione di pancake doppi in scala ridotta e studiarne le caratteristiche e le problematiche realizzative;
- Fabbricare un prototipo di pancake di dimensioni confrontabili con quelli effettivamente previsti per i magneti superconduttori;
- Proseguire nella attività di progettazione, con riguardo allo studio di sistemi di condizionamento della potenza.

Questi obiettivi sono particolarmente ambiziosi, ma dovrebbero consentire di arrivare all'inizio dell'ultimo anno del Progetto avendo a disposizione le conoscenze necessarie alla progettazione e realizzazione di moduli componenti un sistema dimostrativo.

4 Riferimenti bibliografici

1. Kristian Fossheim, Asle Sudbo, "Superconductivity. Physics and Applications", John Wiley & Sons LTD, 2004.
2. Thiomias P. Sheahen, "Introduction to High Temperature Superconductivity", Kluwer Academic Publishers, 2002.
3. Luigi Muzzi, "AC Losses and Stability of Superconducting Cables for Nuclear Fusion Magnets", Ph. D. Thesis, Univ. Tor Vergata, Roma, 2002.
4. A. della Corte, A. Anemona, G. Celentano, S. Chiarelli, G. De Marzi, A. Di Zenobio, F. Fabbri, L. Morici, L. Muzzi, S. Turtù, "HTS Conductor Designs for Fusion Magnet Application", IEEE Trans. Mag. Technology, to be published.
5. W. Yuan, "Second Generation High-Temperature Superconducting Coils and Their Applications for Energy Storage", Springer Theses, Springer-Verlag London Limited, 2011.
6. Mohd Hasan Ali, Bin Wu, R. A Dougal, "An Overview of SMES Applications in Power and Energy Systems", IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 1, pp 38-46, 2010.
7. A. Morandi, DIE Dipartimento Ingegneria Elettrotecnica, Univ. Bologna, private communication.
8. S. Nomura, T. Shintomi, S. Akiba, T. Nitta, R. Shimada, S. Meguro, "Technical and Cost Evaluation on SMES for Electric Power Compensation", IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 20, pp. 1373-1378, 2010.
9. A. Angrisani, A. Augieri, L. Ciontea, G. Contini, I. Davoli, M. Di Giovannantonio, V. Galluzzi, A. Mancini, A. Rufoloni, T. Petrisor, A. Vannozzi, G. Celentano, " Structural and chemical evolution of propionate based metal-organic precursors for superconducting YBa₂Cu₃O_{7-δ} epitaxial film growth", Supercond. Sci. Tecno., vol. 24, 115008 (8 pp), 2011.
10. H. Song, P. Brownsey, J. Waterman, T. Fukushima, D. Hazelton, "2G HTS Coil Technology Development at SuperPower", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, pp. 510 – 516, 2013.
11. A. Mancini, V. Galluzzi, U. Besi Vetrella, V. Boffa, G. Celentano, L. Ciontea, U. Gambardella, G. Grassano, T. Petrisor, A. Rufoloni, S. Sprio, M. Vadrucchi, "Properties of MgB₂ films grown by means of different vapor phase techniques", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 13, pp. 3305-3308, 2003.
12. U. Besi Vetrella, G. Celentano, U. Gambardella, A. Mancini, A. Santoni, "Electronic structure of superconducting MgB₂ film", J. Phys.: Conf. Ser., vol. 43, pp. 301-304, 2006.
13. R. Penco, G. Grasso, "Recent Development of MgB₂-Based Large Scale Applications", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17, pp. 2291-2294, 2007.
14. A. Niazi, P. Poddar, A. K. Rastogi, "A Precision, Low-Cost Vibrating Sample Magnetometer", Current Scienze, vol. 79, pp. 99-109, 2000.
15. J. Rhyner, "Magnetic Properties and AC-Losses of Superconductors with Power Law Current-Voltage Characteristics", Physica C, vol. 212, pp. 292-300, 1993.
16. E. Pardo, M. Vojenciak, F. Gomory, J. Souc, "Low-Magnetic Field Dependence and Anisotropy of the Critical Current Density in Coated Conductors", Supercond. Sci. Technol., vol. 24, 065007 (10pp), 2011.
17. K. Berger, J. Leveque, D. Netter, B. Douine, A. Rezzoug, "Influence of Temperature and/or Field Dependences of the E – J Power Law on Trapped Magnetic Field in Bulk YBaCuO", IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol.17, pp. 3028-3031, 2007.
18. L. Bottura, "A Practical Fit for the Critical Surface of NbTi", IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol.10, pp. 1054-1057, 2000.
19. D. C. van der Laan, J. W. Ekin, C. C. Clickner, T. C. Stauffer, "Delamination Strength of YBCO Coated Conductors under Transverse Tensile Stress", Supercond. Sci. Technol., vol. 20, pp. 765-770, 2007.
20. K. Higashikaawa, T. Nakamura, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, T. Kiss, M. Inoue, "Conceptual Design of HTS Coil for SMES Using YBCO Coated Conductor", IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 17, pp. 1990-1993, 2007.
21. D. Bruce Montgomery, "Solenoid Magnet Design", Wiley – Interscience, 1970.
22. Martin N. Wilson, "Superconducting Magnets", Clarendon Press Oxford, 1983.
23. P. Lezza, C. Senatore, R. Flukiger, "Improved Critical Current Densities in B₄C Doped MgB₂ Based Wires", Supercond. Sci. Technol, vol 19, pp. 1030 – 1033, 2007.

5 Abbreviazioni ed acronimi

SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage
NbTi	Niobio Titanio
Nb ₃ Sn	Triniobato di Stagno, Niobio 3 Stagno
MgB ₂	Diboruro di magnesio
YBCO	Ittrio Bario Rame Ossigeno
LHC	Large Hadron Collider
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
LTS	Low Temperature Superconductor
HTS	High Temperature Superconductor
PCS	Power Conditioning System
2G	Second Generation (superconductor)
VSM	Vibrating Sample Magnetometer