



## DESCRIZIONE TECNICA

La possibilità di accumulare significative quantità di energia sotto forma di campo elettromagnetico all'interno di un avvolgimento diventa una soluzione energeticamente favorevole grazie all'impiego di cavi superconduttivi. L'assenza di resistenza elettrica di quest'ultimi consente di realizzare avvolgimenti in grado di mantenere l'energia immagazzinata al loro interno con perdite trascurabili. In tali dispositivi, chiamati per brevità SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage), l'energia immagazzinabile risulta proporzionale al quadrato dell'intensità del campo magnetico e al volume occupato da quest'ultimo. Varie sono le geometrie possibili per gli avvolgimenti. Per confinare in modo ottimale il campo elettromagnetico, risulta vantaggiosa la soluzione a magnete toroidale per la quale il volume occupato dal campo è sostanzialmente delimitato al volume compreso all'interno degli avvolgimenti stessi.

Nel corso degli anni '90, alcune aziende hanno avviato la commercializzazione di sistemi SMES basati su superconduttori tradizionali (leghe del niobio, denominati LTS, Low Tc Superconductor) raffreddati in bagno di elio liquido. Tali dispositivi furono progettati con la funzione di operare come gruppi di continuità UPS (Uninterruptible Power Supply), con il vantaggio di poter erogare una notevole potenza istantanea anche se per una durata di tempo piuttosto limitata.

Per il diffondersi dell'applicazione risulta fondamentale il poter disporre di un sistema facilmente utilizzabile, in grado di sopportare un numero di cicli elevatissimo e che richieda una limitata manutenzione. I recenti sviluppi relativi ai superconduttori ad alta temperatura (i cosiddetti HTS, High Tc Superconductor), potendo operare ad una temperatura superiore a quella dell'elio liquido, rappresentano il materiale di base ideale per la realizzazione di SMES che soddisfino tutte le caratteristiche richieste dai potenziali utilizzatori.

L'avvolgimento superconduttivo, posto all'interno di una camera a tenuta stagna e in vuoto, si comporta a tutti gli effetti come un'induttanza che può essere caricata e scaricata un numero idealmente infinito di volte senza comprometterne le caratteristiche. La velocità di carica e scarica, ossia la potenza che lo SMES può erogare o assorbire dalla rete rispettivamente, viene controllata attraverso una opportuna elettronica di potenza, ma è anche un parametro che interviene già in fase di progettazione del sistema magnetico stesso, in quanto può essere grandemente influenzato da fattori geometrici sia della bobina che del cavo superconduttivo selezionato. Proprio le potenze di carica e scarica, largamente più modulabili che per altri sistemi di accumulo, e la durata di vita virtualmente infinita dello SMES ne fanno un componente che ha sicuramente un ruolo fondamentale nel panorama delle differenti tecnologie di accumulo di energia.

## STATO DI AVANZAMENTO

### Internazionale

La tecnologia SMES è implementata in prodotti industriali da parte di aziende con sede negli Stati Uniti e in Giappone (AMSC, Bruker e Chubu Electric Power Company). Ulteriori installazioni a livello pre-commerciale sono presenti in Europa. I sistemi SMES finora realizzati utilizzano avvolgimenti costruiti con superconduttori tradizionali LTS raffreddati mediante elio liquido. Sono attualmente impiegati per la protezione di processi industriali critici. Di particolare rilievo sono le installazioni Giapponesi utilizzate, all'interno degli stabilimenti Sharp nell'area di Nagoya, per la produzione di sistemi a semiconduttore in grado di fornire una potenza di 10 MW. A livello internazionale sono in corso una serie di programmi di ricerca e prototipazione della tecnologia SMES basata sui superconduttori HTS. I programmi principali sono quello statunitense, che coinvolge le aziende ABB e Superpower, e quello giapponese, che coinvolge numerose aziende sotto l'egida dell'organizzazione NEDO.

### Nazionale

A livello nazionale sono numerose le iniziative legate allo sviluppo e implementazione di SMES. Un progetto finalizzato alla realizzazione di uno SMES in elio liquido con superconduttori tradizionali è stato realizzato da un consorzio di aziende italiane guidato da Ansaldo Energia e installato presso il Sincrotrone di Trieste. Il dispositivo è in grado di erogare una potenza in uscita di 1 MW ed è stato utilizzato per garantire un'adeguata protezione della fornitura di energia elettrica al sito scientifico. Vi sono ulteriori iniziative che hanno portato alla prototipazione di micro-SMES realizzati con superconduttori di moderna generazione (HTS) da un consorzio guidato da Ansaldo CRIS. Attualmente ENEA è impegnata attivamente nel perseguire lo sviluppo di tali dispositivi, così come le principali aziende nazionali interessate alla superconduttività e all'energy storage (ASG Superconductors, Columbus Superconductors e EEI). Recentemente è stata intrapresa una nuova iniziativa, con la partecipazione di partner industriali e istituti di ricerca, che ha come obiettivo la costruzione di un prototipo di SMES della taglia di 50-100 kW utilizzando per la prima volta il superconduttore MgB2 raffreddato a secco.

## ■ TRL (TECHNOLOGY READINESS LEVEL)

La fattibilità della tecnologia SMES per l'accumulo di energia è stata ampiamente dimostrata a livello pratico. La maturità tecnologica di tali dispositivi è pienamente compiuta. La tecnologia SMES finora implementata in prodotti industriali prevede l'utilizzo di superconduttori tradizionale (LTS) in combinazione con raffreddamento all'elio liquido. Tale metodo è confrontabile con quello della risonanza magnetica medicale, l'applicazione principale della superconduttività ad oggi. Entrambe le tecnologie sono pienamente affermate, ma si stanno muovendo verso soluzioni cryogen-free, ossia in assenza di liquidi criogenici, grazie alla progressivo sviluppo di superconduttori di moderna generazione (HTS) in grado di operare a temperature maggiori e compatibili con un raffreddamento cryogen-free. Il livello di maturità tecnologica dei sistemi SMES cryogen-free è classificabile tra il 5 e il 6 (prototipi di scala significativa installati e funzionanti). I sistemi criogenici necessari all'operatività in condizioni cryogenic-free sono sistemi prodotti industrialmente e con provata affidabilità da svariate aziende internazionali. L'elettronica di potenza necessaria al suo controllo e interfacciamento con l'esterno non risulta significativamente diversa da quella già sviluppata per altri dispositivi di accumulo, ed è disponibile presso svariate aziende presenti sul territorio nazionale.

## ■ RELAZIONE CON LE FONTI ENERGETICHE

Lo SMES, essendo un sistema di accumulo di energia in grado di accumulare e/o rilasciare l'energia in modo estremamente rapido, può essere integrato con qualunque fonte di energia, in particolare rinnovabile, allo scopo di renderla maggiormente fruibile. Le caratteristiche tecniche dei sistemi SMES sono complementari rispetto a quelle degli altri sistemi di accumulo. Sono caratterizzati da una minore capacità di stoccaggio dell'energia ma sono in grado di erogare/assorbire notevoli potenze in tempi estremamente rapidi. Una ulteriore caratteristica è la possibilità di compiere un numero di cicli di carica e scarica praticamente illimitato. Lo SMES è quindi particolarmente adatto per l'utilizzo all'interno di sistemi ibridi (Energy Intensive + Power Intensive) economicamente vantaggiosi ed estremamente prestanti. Il costo e le dimensioni dei sistemi energy intensive (ad esempio batterie) sono strettamente legati alla potenza che questi debbono erogare. Se il sistema deve erogare una potenza elevata, anche per un tempo molto ristretto, il suo dimensionamento deve essere effettuato sul picco di potenza altrimenti la richiesta non può essere soddisfatta. La combinazione di un sistema energy intensive con uno SMES, che è un sistema power intensive, consente di soddisfare il temporaneo surplus di potenza senza eccessivi sovradimensionamenti del primo.

I principali contributi della tecnologia SMES (anche all'interno di sistemi ibridi) allo sfruttamento delle risorse rinnovabili sono:

- maggiore penetrazione della generazione distribuita. Lo SMES è un tecnologia in grado di controllare affidabilmente i flussi di potenza anche in presenza di fluttuazioni estremamente rapide e di notevole entità. Rappresenta quindi uno strumento congeniale per l'integrazione affidabile delle risorse distribuite non programmabili nella rete elettrica (eolico, fotovoltaico, energie marine, ecc.)
- stabilizzazione di micro-grid o impianti off-grid. Sono diffusi sistemi elettrici di dimensioni significative (microgrid, isole, miniere, ecc.) che non sono interconnessi ad un sistema elettrico esteso. Tali sistemi integrano al loro interno risorse rinnovabili. Una riserva di potenza rapidamente disponibile è necessaria per un esercizio affidabile. Ulteriori applicazioni dei sistemi SMES riguardano il miglioramento della Power quality e il livellamento dei carichi impulsivi. L'ottimizzazione di flussi di potenza nella rete elettrica accresce la sua efficienza contribuendo alla riduzione del consumo energetico complessivo.

Si evidenzia che lo SMES è utilizzabile molto vantaggiosamente in combinazione con la tecnologia dell'idrogeno. Oltre alla sinergia di tipo elettrico (sistema di accumulo ibrido) vi è la possibilità di trarre notevole vantaggio dal punto di vista del raffreddamento se l'idrogeno è stoccato in forma liquida. La temperatura dell'idrogeno liquido è 20 K e tale temperatura è compatibile con l'esercizio di tutti i superconduttori HTS di interesse tecnico.

## ■ VERSATILITÀ (CAPACITÀ DI IMPATTARE SU PIÙ SETTORI)

La tecnologia SMES può trovare naturale applicazione in settori differenti da quello specificatamente energetico. Può essere ugualmente impiegata in supporto a processi industriali (applicazioni di tipo power quality e/o livellamento di carichi impulsivi quali, ad esempio, laminatoi, estrusori, presse), ma anche in ambito Difesa, a supporto di attrezzature richiedenti un impulso di potenza istantanea significativo. Lo sviluppo di magneti superconduttivi cryogenic-free consente applicazioni in tutta una serie di dispositivi innovativi ad alte prestazioni ed efficienza, come ad esempio magneti per la separazione magnetica, motori e generatori ad elevata efficienza, limitatori di corrente superconduttivi.

## IMPATTO E SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE

La tecnologia SMES è da considerarsi una delle più pulite tecnologie di accumulo di energia. Essendo immagazzinata sotto forma di campo elettromagnetico nel vuoto non comporta nessun tipo di degrado del sistema di accumulo col tempo. I materiali utilizzati per la realizzazione di ciascun componente del sistema SMES complessivo non presentano alcuna problematica di sicurezza (esplosione/incendio), tossicità, degradazione e smaltimento.

### Emissioni CO<sub>2</sub>/MWh

La produzione di uno SMES non prevede tecnologie che sviluppino CO<sub>2</sub> così come il criogeneratore. L'unica fonte di produzione di CO<sub>2</sub> è nella produzione delle leghe metalliche che lo costituiscono.

### Emissioni CO<sub>2</sub>/MWh evitate

Durante la fase di funzionamento non verrà prodotta CO<sub>2</sub> così come nessun'altro inquinante essendo il processo puramente elettromagnetico e il criogeneratore a ciclo chiuso.

## EFFICIENZA, TEMPO DI VITA E RENDIMENTO PREVISTI

L'efficienza complessiva dello SMES durante un ciclo completo di carica e scarica (round trip efficiency) è molto elevata (>97%). Ciò è dovuto al fatto che l'energia è direttamente immagazzinata in forma elettrica (dal punto di vista elettrico lo SMES è schematizzabile come un induttore). Le uniche perdite avvengono nei convertitori elettronici necessari per gestire lo scambio di potenza tra lo SMES e la rete. Occorre però considerare che per mantenere in esercizio lo SMES è necessario raffreddarlo costantemente. La potenza degli apparati di raffreddamento è notevolmente inferiore rispetto alla potenza in ingresso o in uscita dallo SMES (indicativamente < 1 %), per cui non ne penalizza in modo importante il rendimento. In fase di stand-by è necessario assicurare sempre la circolazione della corrente nell'induttore attraverso una componente esterna a stato solido nella quale si verifica comunque una dissipazione di potenza. Tale dissipazione è modesta, tuttavia se la fase di stand-by si protrae a lungo il suo impatto sull'energia complessivamente accumulata nello SMES può essere apprezzabile. Lo SMES non è dunque un sistema adatto per la tipologia di accumulo in cui sia prevista una fase di stand-by di lunga durata.

Durante l'esercizio dello SMES non esistono fenomeni di degradazione intrinseca (i fenomeni coinvolti sono esclusivamente elettromagnetici). Non esiste quindi un limite nel numero di cicli di carica e scarica che il sistema può sostenere. Non esistono inoltre fenomeni di invecchiamento di tipo termico (come negli apparati elettrici convenzionali) poiché il sistema opera permanentemente a temperatura costante. L'unica causa che determina l'invecchiamento del sistema sono le sollecitazioni meccaniche di origine elettromagnetica. Dato un esercizio ciclico si ha un invecchiamento di tipo a fatica. Con un opportuno dimensionamento meccanico e una opportuna manutenzione degli apparati di raffreddamento (in particolare dei compressori delle macchine frigorifere) la durata di vita può comunque raggiungere tempi molto lunghi (diversi decenni).

## PAYBACK TECNOLOGICO, DI INVESTIMENTO E DI OPERATION AND MAINTENANCE PREVISTO

Il payback della tecnologia SMES dipende in modo significativo dall'impiego specifico che se ne prevede. Nel caso di utilizzo dello SMES con funzionalità di miglioramento della power quality, ove si verifica un costante transito di energia attraverso il dispositivo nelle due direzioni (carica/scarica), il payback dipende dal dimensionamento del dispositivo. Per un sistema con capacità di immagazzinamento di 10 MJ, quindi di taglia medio/piccola, il payback previsto si raggiunge nell'arco di 2/3 anni di utilizzo. I costi di manutenzione sono trascurabili in quanto vertono solo sulla regolare assistenza al compressore che garantisce il raffreddamento del sistema da effettuare ogni 2 anni.

Il payback dello SMES impiegato in configurazione UPS è di più difficile valutazione in quanto dipendente in modo più critico dallo scopo di impiego. Tipicamente per processi industriali critici, come nella produzione della carta, la fornitura di potenza istantanea dello SMES garantisce la continuità produttiva, e raggiunge quindi un livello di payback valutabile in funzione del numero di interventi che è chiamato a compiere nell'arco della sua vita, che può essere comunque molto lunga (> 10 anni), vista l'assenza di componenti deperibili.

Non sono necessari interventi particolari per lo sviluppo di infrastrutture in quanto il sistema è direttamente compatibile in termini di peso e ingombro con l'ambiente tipico di una sottostazione elettrica o di un sito industriale, specialmente per una configurazione di SMES toroidale.

## PRINCIPALI OSTACOLI ALLO SVILUPPO

Esistono competenze e professionalità ben radicate in Italia e nel mondo nello sviluppo e nella manutenzione di magneti superconduttori. I principali ostacoli allo sviluppo della tecnologia SMES cryogen-free sono il costo e la disponibilità dei superconduttori HTS. Nel breve termine è comunque possibile adoperare il superconduttore MgB<sub>2</sub>, già disponibile a livello industriale e a costi competitivi. L'Italia è leader nella sua produzione. La disponibilità industriale, attesa nel medio termine, di ulteriori materiali HTS (YBCO coated conductors), caratterizzati da maggiori prestazioni, consentirà di accrescere ulteriormente la competitività degli SMES.

Un altro ostacolo allo sviluppo della tecnologia è legato alla necessità di utilizzare elio liquido per il raffreddamento del magnete. Il ciclo termodinamico per la liquefazione dell'elio ha un rendimento di 1,5% e questo incide sull'efficienza globale dell'impianto. L'elio è un gas sempre più raro e costoso ed è indispensabile in prospettiva prevedere un suo utilizzo ridotto.

Ad oggi sono disponibili nuovi materiali superconduttori che consentono di avere prestazioni eccellenti a temperature molto più alte: 20K per MgB<sub>2</sub> e 77K per YBCO. L'efficienza del raffreddamento aumenta allora di un fattore 5 per magneti costruiti con fili realizzati in MgB<sub>2</sub> e di un fattore 18 per quelli costruiti in YBCO.

Mentre la tecnologia del MgB<sub>2</sub> è matura e consente la preparazione di fili lunghi a sufficienza a costo moderato per la costruzione di grandi magneti, quella dell'YBCO non lo consente ancora.

Inoltre, a parità di energia immagazzinata, la riduzione dei volumi e quindi del costo di impianto e di energia spesa per il suo costante raffreddamento passa per l'aumento del campo magnetico di esercizio del magnete e, quindi, per l'aumento delle prestazioni del filo superconduttore ad alti campi e temperature.

## POTENZIALITÀ DI ESPORTAZIONE DELLA TECNOLOGIA

Rispetto agli altri paesi europei, l'Italia parte da una situazione di vantaggio. Si ritiene che in una fase di avvio della commercializzazione, le prime installazioni possano avvenire sul territorio nazionale, per diffondersi poi rapidamente su scala globale. La capacità di integrare il sistema all'interno di uno o più container modulari consentirà una facile trasportabilità del dispositivo. In aree industrialmente evolute e con presenza di fonti rinnovabili di energia se ne ipotizza una rapida diffusione, come nell'Estremo Oriente (Cina, Corea del Sud), oltre che in molti paesi emergenti.

Come si è evidenziato l'Italia è leader nella produzione di fili in MgB<sub>2</sub>.

Attualmente ci sono nel mondo circa 105 sistemi MRI medicali, la metà dei quali raffreddati in elio liquido e del costo di circa 106 \$, gli altri a basso campo e risoluzione. Nei prossimi dieci anni dovranno per deficit di elio essere sostituiti con sistemi cryogen-free. Il costo del magnete rappresenta circa un terzo dello strumento.

Se i magneti venissero prodotti in Italia il valore complessivo sarebbe di circa 30 G\$.

E in futuro? Gli Stati Uniti hanno circa 35 MRI per milione di abitanti. La popolazione mondiale è cresciuta oggi a 7.4 miliardi.

## POSSIBILI RICADUTE PER IL SISTEMA INDUSTRIALE, DEI TRASPORTI, RESIDENZIALE E NEL TERZIARIO

La tecnologia SMES trova immediato impiego in applicazioni industriali, sia come UPS sia per la fornitura di elevata potenza istantanea a processi produttivi di tipo impulsivo. In ambito residenziale, la tecnologia SMES potrebbe avere utilizzo nella gestione dell'energia di piccole aree residenziali, soprattutto se dotate di generazione da fonti rinnovabili. Lo SMES consentirebbe di bilanciare in modo ottimale l'utilizzo dell'energia, favorendo il risparmio energetico. Nell'ambito dei trasporti, vi sono già esempi prototipali di applicazione in velivoli e in ambito navale, sia per scopi civili che per finalità strategiche.

La disponibilità di grandi SMES accoppiati termicamente a serbatoi di idrogeno alimentati da fonti discontinue di energia rinnovabile costituiranno in futuro la soluzione di una rete energetica globale a basso impatto ambientale che interesserà tutti i settori coinvolti nell'uso dell'energia.

## MAGGIORI ATTORI ITALIANI COINVOLTI

### Utilizzo della tecnologia

Lo sviluppo della tecnologia SMES coinvolge:

- Industria elettrica manifatturiera
- Società di servizio energetico
- Società coinvolte nella componentistica accessoria (sistemi di raffreddamento, sistemi da vuoto, sistemi elettronici per l'interfacciamento SMES/rete).

La disponibilità di sistemi SMES per il controllo della power quality e per la gestione dei carichi critici è inoltre di notevole interesse per vari settori industriali quali quello metallurgico, o per tutte le applicazioni in cui la continuità del servizio secondo standard elevatissimi sia un requisito indispensabile (ad esempio, data center).

### Sviluppo della tecnologia

Lo sviluppo della tecnologia SMES richiede attività di tipo trasversale che coinvolgono alcuni dei maggiori enti di ricerca nazionali (CNR, INFN, ENEA) e Università in sinergia con le principali aziende in superconduttività (ASG Superconductors, Columbus Superconductors).

## ECCELLENZE IN TERRITORIO NAZIONALE

Sul territorio nazionale è possibile individuare tutte le competenze necessarie al pieno sviluppo della tecnologia SMES basata su superconduttori HTS, sino alla sua commercializzazione. Lo sviluppo di materiali superconduttori HTS è portata avanti in ambito CNR e ENEA, dove si concentrano le maggiori competenze. I materiali trattati sono sia l'MgB2 che i superconduttori 2G a base di YBCO sia, a livello esplorativo, i nuovi materiali a base di Ferro. A livello industriale, Columbus Superconductors è l'azienda italiana che attualmente produce conduttori HTS e che collabora da anni con entrambi gli enti di ricerca. Per quanto riguarda lo sviluppo dei magneti superconduttivi, INFN e ENEA hanno competenze e attività in corso miranti all'ottimizzazione di magneti superconduttivi che impiegano anche materiali HTS. ASG Superconductors è l'azienda italiana che rappresenta il market leader nel settore e che più naturalmente rappresenta il player industriale per tali componenti. Per quanto riguarda lo studio/ottimizzazione del sistema SMES, l'Università di Bologna e RSE sono gli attori che maggiormente dedicano tempo e risorse su queste tematiche. Partners industriali che completano il quadro delle competenze sono le aziende dell'elettronica di potenza, come OCEM, EEI, Elettronica Santerno, per citarne solo alcune, e quelle per lo sviluppo di sistemi di raffreddamento e da vuoto come, ad esempio, Criotec e Rial.

## BEST PRACTICES

Per i sistemi SMES basati su superconduttori tradizionali a bassa temperatura critica le installazioni più evolute sono quelle sviluppate dalla utility elettrica Chubu Electric Power Company in Giappone. Tali sistemi hanno consentito di risolvere il ricorrente problema delle brevi interruzioni di potenza negli stabilimenti Sharp per la produzione di semiconduttori dell'area di Nagoya. Nonostante la loro breve durata (< 1 s) tali interruzioni provocavano puntualmente l'arresto della produzione con notevoli impatti a livello economico. Il problema è stato risolto mediante l'installazione, nel 2006 e nel 2010, di due sistemi SMES in grado di erogare una potenza di 5 MW e 10 MW rispettivamente. I due SMES sono tuttora in esercizio e durante questi anni sono intervenuti più di 40 volte. Si noti che il raggiungimento della potenza richiesta, sebbene possibile, è notevolmente complesso e costoso se si utilizzano altre tecnologie di accumulo (e.g. batterie).

Attualmente sono in fase di prototipazione sistemi SMES basati sull'utilizzo combinato di superconduttori di moderna generazione (HTS) e tecnologie di raffreddamento cryogen free. Un prototipo da 100 kW è stato recentemente completato e testato con successo in Cina. L'avvento della tecnologia cryogen free consentirà di ridurre drasticamente i costi legati all'utilizzo dell'elio liquido e contribuirà ad accrescere la competitività dei sistemi SMES.

## BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

- [1] 1. Morandi A 2015 Energy storage (SMES and flywheels) Applied Superconductivity: Handbook on Devices and Applications ed P Seidel (Weinheim: Wiley) p 660–74
- [2] L. Ren et al., “Development of a Movable HTS SMES System,” in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 4, pp. 1-9, Aug. 2015.
- [3] Shigeo Nagaya, Naoki Hirano, Toshio Katagiri, Tsutomu Tamada, Koji Shikimachi, Yu Iwatani, Fusao Saito, Yusuke Ishii, The state of the art of the development of SMES for bridging instantaneous voltage dips in Japan, Cryogenics, Volume 52, Issue 12, December 2012, Pages 708-712
- [4] Ottonello L et al 2006 The largest italian SMES IEEE Trans. Appl. Supercond. 16 602–7
- [5] Boenig H J and Hauer J F 1985 Commissioning tests of the Bonneville power administration 30 MJ superconducting  
[6] magnetic energy storage unit IEEE Trans. Power Appar. Syst. 104 302–12
- [7] Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, Yulong Ding, Progress in electrical energy storage system: A critical review, Progress in Natural Science, Volume 19, Issue 3, 10 March 2009, Pages 291-312
- [8] Antonio Morandi, Babak Gholizad and Massimo Fabbri, Design and performance of a 1 MW-5 s high temperature superconductor magnetic energy storage system, 2015, Superconductor Science and Technology, Volume 29, Number 1
- [9] MISE progetto DRYSMES4GRID: dimostratore SMES (con cavi di MgB2) per stabilizzare la rete di distribuzione energia elettrica su territorio nazionale. Partecipanti: Columbus superconductors S.p.a., ICAS S.c.r.l., UniBo, RSE S.p.a., CNR-Spin. Stato: approvato in attesa di finanziamento
- [10] Siri A S, Vignolo M (2010) “A process for producing optionally doped elemental boron” EP Patent 2,199,258”
- [11] Bovone G, Matera D, Bernini C, Magi E and Vignolo M (2015) “Manufacturing process influence on superconducting properties of MgB2 wires prepared using laboratory made boron” Superconductor Science and Technology, 28 (6), 065006.
- [12] Vignolo, Maurizio; Romano, Gennaro; Martinelli, Alberto; Bernini, Cristina; Siri, Antonio S. A Novel Process to Produce Amorphous Nanosized Boron Useful for MgB2 Synthesis on IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY 22(4)
- [13] Vignolo, Maurizio; Bovone, Gianmarco; Matera, Davide; Nardelli, Davide; Bernini, Cristina; Siri, Antonio Sergio “Nano-sized boron synthesis process towards the large scale production “ on CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL 256 (2014)
- [14] E. Petrillo, M. Ariante, V. Cavaliere, M. Cioffi, U. Gambardella, M. Mariani, G. Masullo, A. Matrone, S. Pace, R. Quarantiello, M. Sannino, E. Sorrentino, “Conduction cooled MgB2 magnet for SMES application”, CryoPrague 2006 - 21st International Cryogenic Engineering Conference/9th Cryogenics Conference (ICEC21), Prague, Czech Republic, July 17-21, 2006.