

In un superconduttore ideale di tipo II sono quindi presenti (nello stato misto) fenomeni dissipativi che, creando un aumento di temperatura del materiale, limitano la corrente critica. Se però il materiale considerato non è ideale, ma contiene disomogeneità, difetti puntuali o di linea (come dislocazioni ottenibili con deformazioni plastiche), inclusioni di fasi diverse, queste possono attrarre e tenere ancorati i flussoidi. Il motivo per cui i vortici tendono a rimanere attaccati a questi difetti è il fatto che in quella posizione minimizzano l'energia libera di Gibbs del sistema. Tale fenomeno di ancoraggio prende il nome di **pinning** e le imperfezioni che lo determinano sono dette **centri di pinning**. La forza di tale ancoraggio consente di distinguere i materiali **soft**, dove essa è di modesta entità da quelli **hard**, dove invece essa è notevole. Il pinning dipende fortemente dai trattamenti termici e meccanici subiti da un materiale e consente di elevarne la densità di corrente critica fino a valori molto elevati, compatibili con le applicazioni pratiche. Questo aumento della densità di corrente critica è dovuto al fatto che se la forza di ancoraggio è superiore alla forza di Lorentz i flussoidi non possono muoversi e la conduzione di corrente può avvenire senza perdite. Quando però la densità di corrente di trasporto diventa tale da rendere la forza di Lorentz superiore a quella di pinning, i flussoidi cominciano a muoversi tutti contemporaneamente in direzione della forza di Lorentz in un movimento collettivo, chiamato **flux - flow**, che innesca nuovamente fenomeni dissipativi e determina la comparsa di tensione non nulla ai capi del provino. Il distacco dei flussoidi dai loro centri di pinning può essere anche dovuto all'agitazione termica che fornisce loro di tanto in tanto l'energia sufficiente per saltare da un centro di pinning a un altro. Questo movimento locale e non collettivo prende il nome di **flux - creep**.

Esiste un terzo tipo di moto dei flussoidi, generato da disturbi di natura meccanica, termica, o elettrica, che determina lo spostamento collettivo, ma non continuo, dei flussoidi che "saltano" rapidamente verso una localizzazione diversa da quella iniziale. Questo moto, tipico dei superconduttori hard e denominato **flux-jump**, rilascia una notevole quantità di calore, e deve essere evitato nelle applicazioni tecniche, poiché può causare la transizione del materiale allo stato normale. L'esistenza del fenomeno di pinning è fondamentale nei meccanismi di perdita che si verificano nei materiali superconduttori di utilizzo pratico, che sono tutti del II tipo. Dal punto di vista macroscopico è infatti possibile osservare che campioni reali di superconduttori del II tipo presentano una certa irreversibilità delle curve di magnetizzazione (vedi Fig.15), a differenza del comportamento reversibile mostrato per superconduttori ideali nella fig. 8. Questo comportamento è detto isteretico ed è caratterizzato dalla dipendenza della magnetizzazione del provino dalla sua storia magnetica.

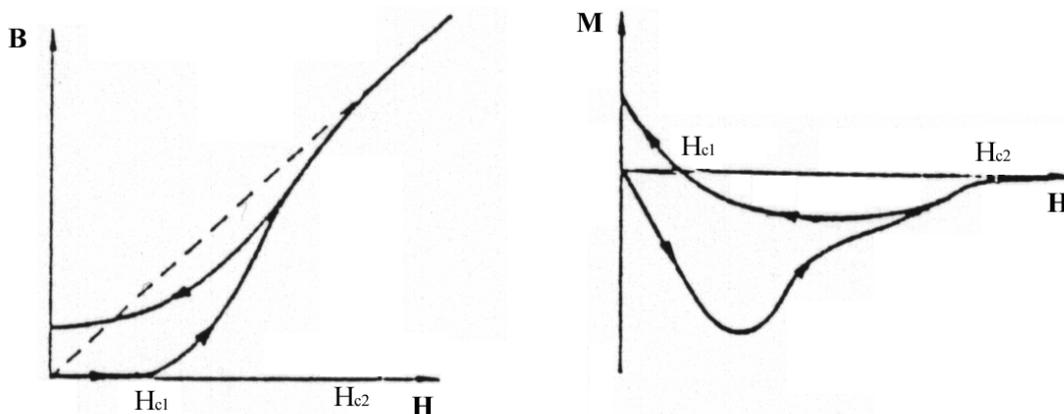


Fig. 15 Andamento dell'induzione magnetica e della magnetizzazione in funzione del campo magnetico in superconduttori reali del II tipo. Si può osservare la irreversibilità della magnetizzazione

Se un campione viene sottoposto a variazioni sinusoidali del campo magnetico applicato (come avviene nelle applicazioni in corrente alternata) l'andamento della magnetizzazione presenta un ciclo di isteresi (mostrato in Fig. 16). L'area di tale ciclo rappresenta l'energia dissipata nel ciclo per unità di volume. La potenza associata a questo tipo di dissipazione che si verifica in alternata è molto superiore a quella che si dissipa per via del trasporto di corrente da parte di elettroni normali descritto a proposito del modello a due fluidi. Osservando il ciclo di isteresi riportato in Fig. 16, si può notare il suo sviluppo con asse sul secondo e quarto quadrante, contrariamente al caso dei materiali ferromagnetici, dove il ciclo di isteresi si sviluppa con asse sul I e III quadrante.

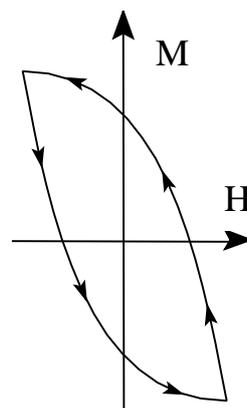


Fig. 16 Ciclo di isteresi magnetica per un materiale superconduttore reale del II tipo

Dal punto di vista microscopico l'irreversibilità della magnetizzazione e le conseguenti perdite sono attribuibili al fenomeno di pinning. I nuclei normali, essendo ancorati ai centri di pinning, non possono muoversi liberamente. Partendo quindi da un valore nullo ed aumentando gradualmente l'intensità del campo magnetico applicato al materiale, in corrispondenza di  $H_{c1}$  non si verifica una penetrazione netta ed immediata del flusso, perché i primi nuclei che si formano sulla superficie del campione non riescono a spostarsi rapidamente verso il centro. Analogamente, riducendo l'intensità del campo magnetico applicato a partire da valori superiori ad  $H_{c2}$ , il flusso può rimanere intrappolato permanentemente all'interno del campione, poiché i flussoidi restano ancorati ai propri centri di pinning. Questo fenomeno è stato recentemente utilizzato, con superconduttori ad alta temperatura critica, per la creazione di magneti permanenti mediante materiali superconduttori. Tali magneti possono intrappolare campi elevatissimi (fino a 10T), anche se per ora si presentano sotto forma di pastiglie di piccole dimensioni che possono creare campi in regioni di spazio piuttosto limitate.

## 10. I SUPERCONDUTTORI AD ALTA TEMPERATURA CRITICA (HTSC)

Il tentativo di trovare materiali superconduttori con temperature critiche più elevate per consentirne un utilizzo in ambienti meno difficili da raffreddare è sempre stato uno dei principali settori di ricerca nel campo della superconduttività. I superconduttori presenti in natura sotto forma di elementi, mostrati nella tavola periodica in Fig. 17 sono caratterizzati da temperature critiche sempre inferiori a 10 K. I primi risultati nella ricerca di materiali con  $T_c$  superiori furono ottenuti con leghe di niobio (come il niobio-titanio) e composti intermetallici del niobio (generalmente del tipo  $Nb_3X$ , con X metallo non di transizione). Il composto intermetallico attualmente più utilizzato è certamente il  $Nb_3Sn$  che ha una temperatura critica a campo nullo di 18.3 K. Nel 1973 venne scoperta la superconduttività in un materiale contenente ossigeno ( $LiTi_2O_4$ ) con  $T_c$  pari a 13.7 K e nel 1975 venne sintetizzato il  $BaPb_{1-x}Bi_xO_3$  con  $T_c$  pari a 13 K. Al 1986 si fa comunque risalire la scoperta più importante nella ricerca di nuovi materiali ad alta temperatura critica: Muller e Bednorz, in seguito a numerosi studi sulle strutture dei materiali ceramici, sintetizzarono il composto  $Ba_xLa_{5-x}Cu_5O_{5(3-y)}$  e studiandone le proprietà per  $x=1$  e  $x=0.75$  (con  $0 < y < 1$ ) scoprirono che i materiali del sistema Ba-La-Cu-O mostravano superconduttività fino a 30K. In seguito furono sintetizzati i composti a base di ittrio  $YBa_2Cu_3O_x$  (con  $6.5 < x < 7$ ), detti YBCO, con  $T_c$  di 93 K, bismuto (Bi-Sr-Ca-Cu-O) e tallio (Tl-Ba-Ca-Cu-O), tutti di tipo II e con temperature critiche fino a 125K. Questi ossidi vengono chiamati **superconduttori ceramici**, poiché le loro caratteristiche fisico - chimiche, le proprietà meccaniche e i processi di lavorazione sono simili a quelle dei materiali ceramici. È molto singolare che materiali appartenenti alla famiglia dei materiali ceramici, che generalmente sono utilizzati come isolanti per le loro caratteristiche di scarsa conducibilità, presentino caratteristiche superconduttive.



Refrigerante	Elio liquido	Azoto liquido
Temperatura	4.2 K	77 K
Costo al litro	15000 £	400 £
Calore di evaporazione	2.6 KJ/l	160 KJ/l
Liquido evaporante per ogni watt dissipato nel bagno	1.4 l/h	23 ml/h
$P_{300K}$ del criorefrigeratore per ogni watt dissipato nel liquido	400 W	12 W
Criogenia complicata	si	no

*Tab. 1 Confronto fra i due refrigeranti più utilizzati nelle applicazioni tecniche della superconduttività: elio e azoto*

I maggiori problemi tecnici dei superconduttori ceramici sono le loro scarse caratteristiche meccaniche (sia per la bassa resistenza a trazione sia per le notevoli difficoltà di lavorazione), la densità di corrente non molto elevata, la complicazione dei sistemi di sintesi del materiale che rende il processo di fabbricazione particolarmente costoso. Per questo motivo in alcune applicazioni elettriche di potenza (per esempio i magneti superconduttori) i superconduttori metallici vengono ancora preferiti a quelli ceramici.

## 11. LE APPLICAZIONI TECNICHE DELLA SUPERCONDUTTIVITÀ

Le applicazioni industriali della superconduttività sono numerose e potenzialmente rivoluzionarie. I settori in cui l'utilizzo di questa tecnologia risulta efficace sono disparati; tra questi si possono citare l'elettrotecnica, l'elettronica, i trasporti, la medicina e le telecomunicazioni. La caratteristica più attraente di questi materiali da un punto di vista tecnologico è certamente l'annullamento della resistenza al di sotto della temperatura critica. In realtà questi materiali conducono senza perdite solo in corrente continua; nel caso di correnti variabili le apparecchiature di raffreddamento devono contrastare le perdite elettriche non trascurabili dovute all'isteresi magnetica, le dissipazioni dovute alle correnti indotte nelle parti metalliche e le dissipazioni di tipo termico legate all'impossibilità di isolare in modo perfetto i materiali. In genere le perdite complessive anche in corrente alternata sono inferiori a quelle che si hanno nel rame dei sistemi convenzionali, e le considerazioni sull'opportunità di utilizzare superconduttori o rame diventano di natura più economica che tecnica.

L'utilizzo dei superconduttori ad alta temperatura critica dovrebbe semplificare molto le parti criogeniche delle apparecchiature e quindi agevolare la diffusione dei sistemi che utilizzano superconduttori. Il costo dei superconduttori ceramici è però attualmente assai più elevato di quello dei superconduttori a bassa temperatura critica, e una delle sfide tecnologiche più attuali consiste proprio nel rendere più economica la realizzazione dei dispositivi costruiti con HTSC. Illustriamo di seguito le principali applicazioni di interesse ingegneristico della superconduttività.

## 12. LINEE SUPERCONDUTTIVE

Fin dalla scoperta della superconduttività si immaginò che essa sarebbe stata utile per il trasporto senza perdite di energia elettrica. Tale trasporto avviene ora prevalentemente tramite le linee aeree realizzate in rame. Tuttavia vicino agli agglomerati urbani diviene sempre più difficoltoso ricorrere a linee aeree per la minore disponibilità di aree idonee all'installazione e per ragioni di impatto ambientale che spingono all'adozione di sistemi di trasmissione con linee in cavo interrato ad alta tensione. La trasmissione con cavi interrati presenta costi maggiori, rispetto alle linee aeree, a causa delle tecniche di isolamento e delle modalità di posa. In questo tipo di applicazioni si inserisce la ricerca sui cavi superconduttori a bassa ed alta temperatura critica per la trasmissione dell'energia elettrica. Il principale vantaggio di questi cavi è la loro compattezza, frutto della elevata potenza specifica rispetto a quella dei cavi convenzionali. D'altra parte, il risparmio dovuto alle ridottissime perdite per effetto Joule viene parzialmente compensato dal dispendio di energia necessario per il loro raffreddamento. La trasmissione di energia elettrica avviene sia in corrente continua sia in corrente alternata, con netta prevalenza di quest'ultima soluzione. In corrente alternata, oltre alle perdite presenti nei superconduttori, occorre far fronte alle perdite localizzate in altre parti del cavo: quelle dovute a correnti parassite e quelle dielettriche. Nonostante gli innegabili vantaggi della trasmissione in corrente continua, le potenziali applicazioni per questo tipo di cavi sembrano essere inferiori rispetto a quelle dei cavi in alternata, proprio perché la trasmissione e la distribuzione dell'energia elettrica avvengono prevalentemente in corrente alternata.

Il funzionamento di una linea superconduttiva in corrente continua richiede quindi stazioni terminali di conversione AC/DC e stazioni di pompaggio/refrigerazione per il cavo. Il rendimento di tale linea è determinato dall'efficienza di conversione delle stazioni terminali e globalmente le perdite sono stimate tra il 2 e il 3% (contro il 5-8% delle linee aeree). La soglia di competitività economica per questa soluzione rispetto ad un sistema convenzionale in cavo interrato si raggiunge per potenze di 2-10 GW e distanze dell'ordine di 500 - 1000 Km. Un caso in cui tale soglia di convenienza economica si abbassa riguarda i cavi di collegamento sottomarini, già realizzati in corrente continua, dove non occorrono investimenti iniziali per le stazioni di conversione AC/DC in quanto esse sono già esistenti.

Per quanto riguarda le applicazioni in corrente alternata, la situazione più interessante riguarda i tratti urbani degli elettrodotti di elevata potenza. In questo caso, per le motivazioni viste in precedenza, gli elettrodotti sono stati già realizzati in cavo, quindi nell'installazione del cavo superconduttore viene molto ridotto il costo di posa della linea interrata. Indipendentemente dal tipo di alimentazione adottata, tutti i progetti di cavi superconduttori prevedono comunque due parti fondamentali: il sistema conduttore e l'isolamento termico. Se si utilizzassero superconduttori metallici, a bassa temperatura critica, viste le basse temperature di funzionamento, (4K, temperatura dell'elio liquido), si renderebbe necessario un doppio isolamento termico, realizzato mediante uno schermo termico tenuto alla temperatura dell'azoto liquido (77K), immediatamente esterno al cavo vero e proprio (mantenuto a 4K), e da un isolamento termico multistrato tra la zona a 77K e l'ambiente. Il costo elevato di questa soluzione ha portato ad abbandonare ogni progetto per l'utilizzo di superconduttori a bassa temperatura critica in cavi di trasporto dell'energia a lunghe distanze. Questa scelta sarebbe vantaggiosa economicamente se fossero richieste potenze estremamente alte (vari GW) non compatibili con le attuali esigenze dei sistemi elettrici di potenza. I cavi realizzati con superconduttori a bassa temperatura sono invece ancora i più utilizzati per la realizzazione dei magneti superconduttori, dove il funzionamento in corrente continua rende meno complesso e costoso l'apparato criogenico. Indipendentemente dal tipo di superconduttore utilizzato, le configurazioni possibili per i cavi superconduttori sono tre:

1. **Sistema rigido a tubazione:** sia il conduttore che l'involucro termico sono rigidi. Il cavo è costituito da tre coppie concentriche di conduttori che formano il sistema trifase e sono contenute all'interno di un unico involucro termico. Il refrigerante utilizzato compie la duplice funzione di re-

frigerante ed isolante elettrico. I problemi di questo tipo di sistema sono la limitata lunghezza degli spezzoni di cavo (20 m), l'elevato numero di giunti, e i problemi di contrazione termica del conduttore e della guaina metallica esterna durante il raffreddamento.

2. **Sistema semiflessibile:** l'involuppo termico è costituito da tubi rigidi collegati con giunti che compensano la contrazione termica. Il sistema conduttore è flessibile, è composto o da conduttori tubolari corrugati o da conduttori cavi costituiti da fili avvolti elicoidalmente su un supporto. Il sistema conduttore può essere fabbricato in spezzoni di 200-500m e posato separatamente dall'involuppo termico.
3. **Sistema completamente flessibile:** sia il sistema conduttore sia l'involuppo termico sono completamente flessibili. L'involuppo termico è realizzato in tubi corrugati, mentre il sistema conduttore è uguale al caso del sistema semiflessibile. Questi cavi possono essere realizzati in spezzoni di lunghezza compresa tra 300 e 1000 m. Questo sistema consente una notevole riduzione del numero di giunti e non necessita dei sistemi di compensazione delle contrazioni termiche; è pertanto quello attualmente preferito nei progetti.

### 13. SMES (Superconducting Magnet Energy Storage system)

I sistemi di accumulo di energia magnetica superconduttivi sono basati concettualmente sulla seguente proprietà dei circuiti elettrici chiusi costituiti da materiali superconduttori: il campo magnetico concatenato con il circuito non può cambiare finché la resistenza del circuito rimane nulla. Si consideri ad esempio un anello di materiale superconduttore: se il campo magnetico concatenato con l'anello viene modificato, si inducono nel circuito chiuso delle correnti che, per la legge di Lenz, tendono ad opporsi alla sua variazione (vedi Fig. 19). Normalmente queste correnti decadono esponenzialmente nel tempo con una costante di tempo pari al rapporto tra l'induttanza e la resistenza del circuito considerato. In questo caso, invece, essendo nulla la resistenza, le correnti mantengono indefinitamente il loro valore iniziale mantenendo costante il campo magnetico concatenato con l'anello. Si ottiene così un circuito percorso indefinitamente da corrente nonostante l'assenza di un generatore.

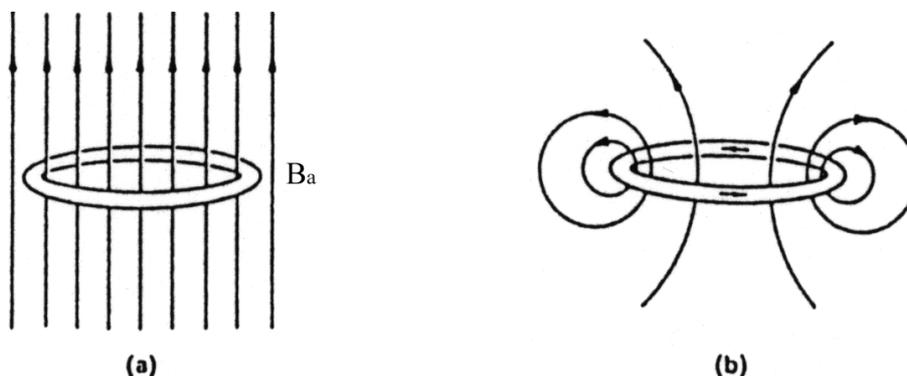


Fig. 19 Visualizzazione delle correnti persistenti che sorgono dopo l'annullamento del campo esterno in un anello chiuso.

Se al posto di un anello si considera un solenoide (vedi Fig.20) e si fa circolare in esso una corrente continua si crea un campo magnetico che si conserva anche distaccando il solenoide dal generatore e chiudendolo in corto circuito. In questo modo è possibile accumulare energia sotto forma di energia associata al campo magnetico. Il magnete superconduttore viene poi collegato alla rete in modo tale da poter fornire l'energia accumulata quando necessario. Questi dispositivi sono in competizione, come sistemi di accumulo dell'energia, con gli accumulatori elettrochimici e meccanici.

Gli accumulatori elettrochimici sono le batterie, caratterizzate da una durata dipendente dal tipo considerato, ma generalmente medio - bassa; esse funzionano con cicli di carica e scarica che ne li-

mitano l'utilizzo ad ambiti particolari. Lo stoccaggio meccanico sfrutta due metodi diversi: l'accumulo inerziale (volani) e l'accumulo con sistemi di pompaggio (aria e acqua).

Il vantaggio principale degli SMES rispetto ai sistemi in competizione è la efficienza pari a circa il 95%, molto superiore a quella tipica dei sistemi di pompaggio (circa il 70%). Lo scopo principale di questi dispositivi nei sistemi di produzione e distribuzione dell'energia elettrica è l'ottimizzazione dell'impiego di tale energia che si ottiene immagazzinando in modo efficiente quella prodotta in eccesso per poi restituirla quando la domanda eccede la capacità produttiva.

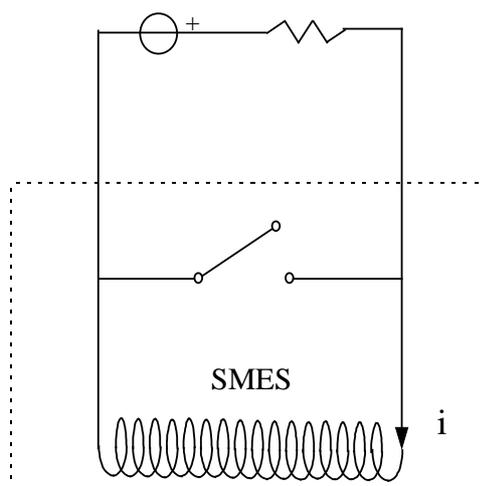


Fig. 20 Solenoide superconduttore per l'accumulo di energia magnetica.

I problemi che sorgono con SMES di grandi dimensioni (energie accumulate superiori a 1GWh e potenze di 1GW) sono le notevolissime pressioni elettromagnetiche in gioco, per cui gli enormi avvolgimenti superconduttivi (del diametro di centinaia di metri) devono essere ancorati entro rocce sotterranee molto resistenti (fig. 21). Un altro grave problema sono i campi magnetici dispersi all'esterno dell'impianto, che impongono la sua localizzazione in aree deserte o il ricorso ad avvolgimenti di controllo che schermano il campo magnetico. Per questi motivi negli ultimi anni la ricerca è stata incentrata maggiormente su dispositivi di piccola taglia (MicroSMES), utili soprattutto per assicurare la continuità dell'alimentazione elettrica in presenza di microinterruzioni di corrente della rete dovute a guasti di vario tipo. Alcuni processi produttivi sono infatti estremamente sensibili alle fluttuazioni di tensione e ad interruzioni anche brevissime dell'alimentazione: la caratteristica più interessante di questi dispositivi è la loro notevole rapidità di intervento, che consente di seguire l'andamento del carico in modo eccellente.

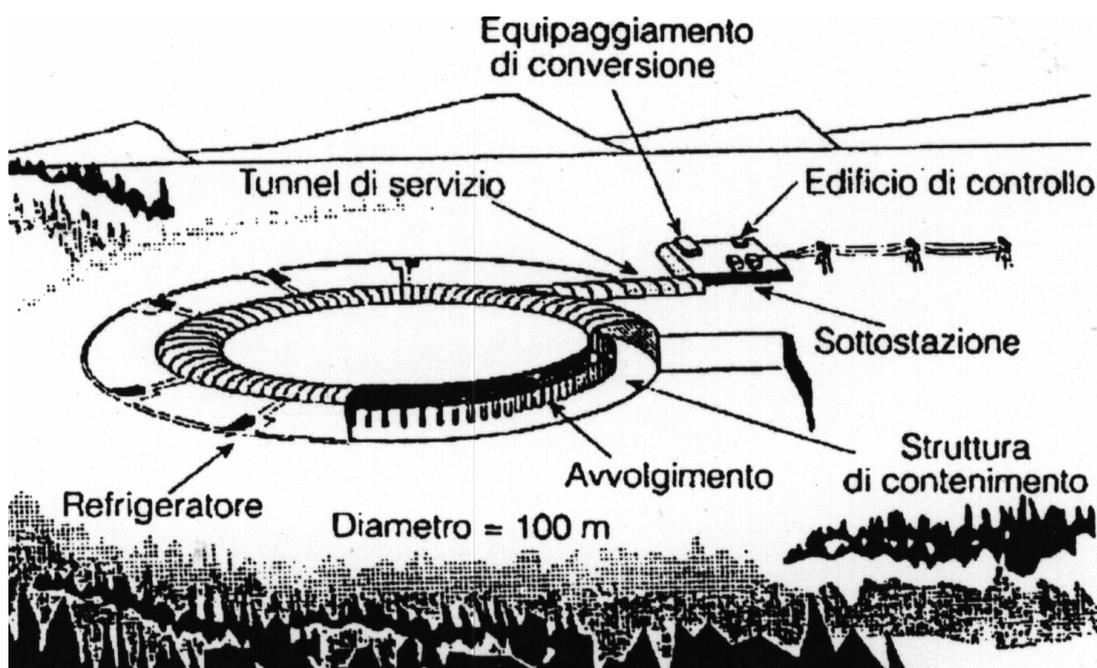


Fig. 21 Illustrazione dell'impatto ambientale di uno SMES di grandi dimensioni.