

LNf-70/19  
15 Maggio 1970

G. Pasotti e G. Sacerdoti : INFORMAZIONI TECNICO-ECONOMI  
CHE SUI SUPERCONDUTTORI E SUI CONDUTTORI PER MAGNE  
TI AD ALTO CAMPO (Appendice alla nota LNf-70/5). -

Nota interna: n. 475  
15 Maggio 1970

G. Pasotti e G. Sacerdoti: INFORMAZIONI TECNICO-ECONOMICHE SUI SUPERCONDUTTORI E SUI CONDUTTORI PER MAGNETI AD ALTO CAMPO (Appendice alla nota LNF-70/5). -

La valutazione della convenienza di usare, per la costruzione di magneti, un tipo di conduttore rispetto ad un altro, può essere fatta sulla base del costo per unità di corrente e di lunghezza di conduttore (Amper x metro). Tale costo è formato dalle spese di impianto (costo del magnete) e dalle spese di esercizio (energia elettrica, liquefazione dei gas per gli impianti a basse temperature, ecc.) estese a tutto il periodo di funzionamento dell'impianto (nel ns. caso abbiamo considerato un periodo di 10 anni con funzionamento per 8000 ore/anno).

Nel presente lavoro vengono presi in considerazione 4 casi:

- 1) conduttore di rame funzionante a temperatura ambiente;
- 2) conduttore di rame funzionante a temperatura di 20°K (idrogeno liquido);
- 3) conduttore di alluminio funzionante a temperatura di 20°K (idrogeno liquido);
- 4) superconduttore a 4,2°K (elio liquido).

Per il caso 1) il costo di impianto viene valutato considerando 5000 L/kg il prezzo delle bobine poste in opera, ed il costo di esercizio è rappresentato dal costo dell'energia elettrica dissipata dal conduttore (valutata sulla base di 8 L/Kwh). In tabella I sono riportati i costi per 5 diverse densità di corrente.

Per il caso 2) il costo di impianto è stato considerato in prima approssimazione uguale a quello precedente, anche se è necessario usa

Tab. I : Cu a temperatura ambiente

Densità di corrente (A/mm <sup>2</sup> )	$\delta$	1	3	10	30	100
Costo bobina (£/A.m)	C	45	15	4,5	1,5	0,5
Costo esercizio per 10 anni	E	12	36	120	360	1200
Costo totale (£/A.m. 10 anni)	T	57	51	124,5	361,5	1200,5

re rame più raffinato<sup>(x)</sup>, poichè il costo del rame grezzo è piccolo rispetto al costo della bobina finita. In questo caso il costo di esercizio è rappresentato quasi esclusivamente dalle spese di riliquificazione dell'idrogeno che la bobina fa evaporare a causa della pur ridotta dissipazione Joule. Anche in questo caso (v. tab. II) i costi sono riportati per 5 di-

Tab. II : Cu a temperatura di 20°K

$\delta$ (A/mm <sup>2</sup> ) $B$ (T <sub>s</sub> )	1	3	10	30	100
0	45 <u>29</u> 74	15 <u>87</u> 102	4,5 <u>290</u> 295	1,5 <u>870</u> 872	0,5 <u>2900</u> 2900
5	45 <u>58</u> 103	15 <u>174</u> 189	4,5 <u>580</u> 585	1,5 <u>1740</u> 1742	0,5 <u>5800</u> 5800
10	45 <u>76</u> 121	15 <u>230</u> 245	4,5 <u>760</u> 765	1,5 <u>2300</u> 2302	0,5 <u>7600</u> 7600
15	45 <u>150</u> 195	15 <u>450</u> 465	4,5 <u>1500</u> 1505	1,5 <u>4500</u> 4502	0,5 <u>15000</u> 15000

Ogni casella

C - costo bobina (£/A.m)  
E - costo esercizio per 10 anni  
T - costo totale (£/A.m. 10 anni)

verse densità di corrente; a causa però della forte magnetoresistenza del rame<sup>(1, 2)</sup> la dissipazione cresce rapidamente col campo magnetico per cui sono riportati i costi per 4 diversi campi.

Per il caso 3) si è tenuto conto che una bobina in alluminio ha un costo di impianto assai simile a quella di una bobina di rame con uguali prestazioni e si è pertanto considerato lo stesso costo di impianto

(x) - E' stato considerato di usare un rame con rapporto di resistività  $\rho_{\text{residua}}$  tra temperatura amb. e 20°K pari a 130 in assenza di campo magn.

dei 2 casi precedenti. Il costo di esercizio anche in questo caso è costituito quasi esclusivamente dal costo di liquefazione dell'idrogeno ed è funzione del campo magnetico; per l'alluminio però la magnetoresistenza<sup>(3)</sup> tra 50 ed 100 KG non varia molto ed è stata considerata costante. In tab. III sono riportati i costi per 5 densità di corrente e 2 campi magnetici<sup>(x)</sup>.

Tab. III: Al a temperatura di 20°K

$\frac{\delta(A)}{B(Te)}$	1	3	10	30	100
0	45 6.5 <u>51.5</u>	15 19.5 <u>34.5</u>	4.5 65 <u>69.5</u>	1.5 195 <u>196.5</u>	0.5 650 <u>650</u>
5÷10	45 21.5 <u>66.5</u>	15 64.5 <u>79.5</u>	4.5 215 <u>219.5</u>	1.5 645 <u>647</u>	0.5 2150 <u>2150</u>

Per il caso 4) occorre precisare che per grossi impianti (consumo  $\approx$  100 lt/ora di elio liquido) funzionanti a circuito chiuso (per cui l'elio non si perde nè si miscela con altri gas evitando così costose depurazioni) il costo di liquefazione è assai basso (qualche decina di L/lt)<sup>(4)</sup> ed è piccolo rispetto al costo di impianto.

Tutti i materiali superconduttori sono in grado di sopportare correnti sempre minori più è elevato il campo cui sono sottoposti per cui il costo in Am è fortemente influenzato dal campo che il magnete può produrre. Inoltre uno spezzone corto di materiale superconduttore è in grado di sopportare una corrente assai superiore di quella sopportata dallo stesso materiale quando sia avvolto in grosse bobine, per cui il costo viene influenzato anche da questo fenomeno.

In tabella IV sono riportati i costi sia del filo in spezzoni corti che avvolto in bobine. Le densità di corrente media delle bobine superconduttrici sono assai elevate: in magneti di piccole e medie dimensioni si può giungere a 100-200 A/mm<sup>2</sup> (nelle grandi costruzioni il problema di avere alte densità di corrente è meno pressante).

In fig. 1 è riportato il grafico del costo di impianto di alcuni fili corti superconduttori in funzione del campo magnetico; dall'involuppo di minor costo (rappresentata sul grafico da grossi punti) è ricavata la

(x) - E' stato considerato di usare un alluminio con rapporto di resistività residua pari a 1000. Tale rapporto, che dipende dalla purezza del metallo, è più alto che per il rame poichè l'alluminio è più facilmente depurabile del rame.

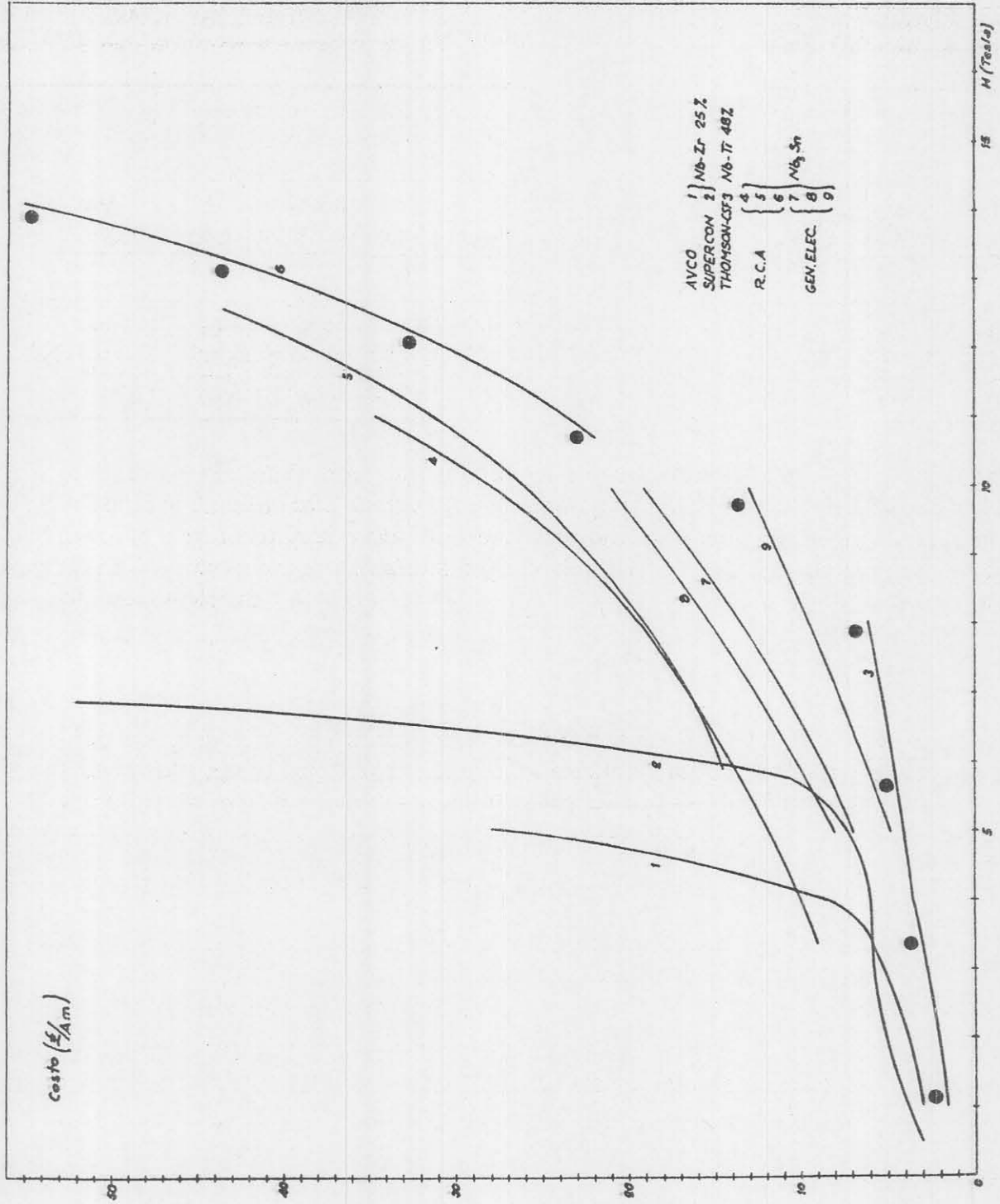


FIG. 1

prima parte della tabella IV.

Tab. IV : Superconduttore a 4,2 °K  
(Nb-Ti e Nb<sub>3</sub>Sn a seconda dei campi.)

$B(T_0)$	Costo filo S.C. (£/Am)
2	2
4	3,5
6	4,6
8	6
10	13
12	31
14	54

Per fili corti

$B(T_0)$	Costo filo S.C. (£/Am)
4	11
8	18
12	60

Per magneti di  
medie dimensioni

In tabella V sono raccolte le assunzioni fatte e precedentemente riportate.

Tab. V - ASSUNZIONI

- 1) Funzionamento: 8'000 ore/anno
  - 2) Energia elettrica: 8 £/kWh
  - 3) Bobine rame (funzion. a temper. ambiente e B.T.)<sup>\*</sup>  
poste in opera 5'000 £/kg
  - 4) Non sono stati considerati i costi dei dewar e relativi accessori per gli impianti a B.T. nè il consumo di gas liquefatti dovuti ai dewars, ai cavi di adduzione della corrente ed al raffreddamento iniziale delle bobine.
  - 5) Costo H<sub>2</sub> liquido prodotto da un liquefattore da 180 kW (a temperatura ambiente); comprensivo di: ammortamento impianto, manutenzione, interessi ed energia elettrica: 3'000 £/kWh a B.T. corrispondenti a 24 £/qt
- <sup>\*</sup> Per grosse partite, il prezzo in opera del rame commerciale e quello più raffinato per impieghi a B.T. è ritenuto uguale. È stato pure ritenuto che il costo di una bobina di Al sia uguale a quello di una di Cu di uguali prestazioni.

6.

Dai dati riportati appare evidente la convenienza dei superconduttori sull'alluminio a  $20^{\circ}\text{K}$  e di questo rispetto al rame (sia a  $20^{\circ}\text{K}$  che a temperatura ambiente).

BIBLIOGRAFIA. -

- (1) - R. F. Post and C. E. Taylor, Report UCRL-5630-T
- (2) - Encyclopedia of Physics, Ed. S. Flügge (Springer, Berlin, 1956), vol. XIX.
- (3) - V. Arp, Proc. of 1968 Summer Study in Superconducting Devices and Accelerators, BNL-50155 (C 55).
- (4) - H. J. Verbeek, Conf. on Low Temperatures and Electrical Power, London (1969).