

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-60/59 (15. 12. 60)

A. Massarotti, G. Sacerdoti: ELEMENTI DI PROGETTO DI UN PROTO-SINCROTRONE DA 12 GeV.

Laboratori Nazionali di Frascati del C.N.E.N.  
Servizio Documentazione

Nota interna: n° 63  
15 Dicembre 1960

ELEMENTI DI PROGETTO DI UN PROTOSINCROTRONE  
DA 12 GEV (G. Sacerdoti)

pag. 1

Calcolo del campo magnetico nelle ferriti della  
cavità risonante (G. Sacerdoti)

pag. A.1

Dimensionamento di massima di una cavità risonante  
e calcolo delle perdite (G. Sacerdoti)

pag. A.6

Progetto di massima dell'impianto RF  
(A. Massarotti)

pag. A.10

Tabelle - Bibliografia - Disegni

Nota interna: n° 63  
15 Dicembre 1960.

G. Sacerdoti

ELEMENTI DI PROGETTO DI UN PROTOSINCROTRONE DA 12 Gev

1 Osservazioni preliminari

In questa relazione si raccolgono gli elementi di progetto per un protosincrotrone da 12 Gev.

Qualora un laboratorio decida di costruire un P.S. di questa energia, quale strumento nella ricerca di fisica fondamentale, dovrà puntare ad avere intensità di fascio nettamente superiore alle intensità dei P.S. esistenti che sono già funzionanti o in procinto di funzionare in numero non trascurabile. Questo che asseriamo è tanto più vero quando si pensa che una macchina entra in funzione a distanza di 4 o 5 anni dal momento in cui si decide di costruirla e se si tiene conto che, in concorrenza con i P.S., sono in corso di studio, e saranno certamente proposte e costruite, macchine di tipo F.F.A.G. che dovrebbero permettere intensità molto elevate (Mura, Oak Ridge ecc).

La via più naturale per aumentare l'intensità del fascio dei P.S. senza aumentare smisuratamente le dimensioni del traferro del magnete, è quella di aumentare il numero di cicli al secondo. Se si fa l'ipotesi, sufficientemente attendibile in base ai risultati ottenuti da altre macchine, di ottenere  $10^{12}$  protoni per

impulso, con una frequenza di 30 impulsi al secondo, si può ottenere un fascio con corrente media di circa 4+5  $\mu$ A (potenza del fascio circa 60 KW), circa 100 volte maggiore dell'intensità del P.S. del C.E.R.N.

Anche a Saclay e al Mura (USA) hanno cominciato a pensare a progetti di P.S. con diverse decine di cicli di ripetizione al secondo e di energia simile a questa.

Nel caso si decidesse la costruzione di una macchina di questo tipo in Italia, potremmo forse sviluppare e discutere il progetto in collaborazione con i fisici francesi di Saclay

Nella tab. I e II sono riportati i dati relativi ad altri P.S. esistenti, in costruzione o in progetto nel mondo.

## 2 Scelta dei parametri

I parametri che assumiamo come punto di partenza per un progetto di massima hanno come unico requisito di essere parametri 'possibili' e di non costringere a soluzioni tecniche troppo spinte. Nella scelta dei parametri ci sono state di fondamentale aiuto le relazioni di cui alle bibliografie 1, 2, 3, 4. Il progetto che verrà sviluppato serve unicamente ad una stima finanziaria di massima della costruzione. Potrebbero venire il sospetto che scegliendo meglio i parametri e principalmente il raggio, le stime di costo subissero variazioni sensibili. Ciò invece non è, perchè mentre alcuni costi (magnete ed edificio) aumentano con l'aumentare del raggio, altri (alimentazione e radio frequenza) diminuiscono, e pur esistendo un raggio che rende minimo il costo (che, come è logi-

co dipende dal costo locale delle singole voci del preventivo) possiamo dire che, anche se assumiamo un raggio che si scosta parecchio da questo, le variazioni di prezzo non sono molto sensibili.

In base a quanto abbiamo detto fissiamo i seguenti dati di partenza:

- a) Energia massima particella = 12 Gev.
- b) Corrente del fascio =  $4,8 \cdot 10^{-6}$  A.
- c) Energia di iniezione = 100 Mev con Linac
- d) Tipo di foccheggiamento: forte con 50 coppie di settori contigui aventi alternativamente  $n = \pm 196$ .
- e) Raggio dell'orbita media = 40 m.
- f) Rapporto tra la lunghezza delle sezioni diritte e la lunghezza di una coppia di settori  $k = 0,7$ .
- g) Dimensioni totali della gap: cm. 8 x 20.
- h) Induzione massima nel tempo sull'orbita media = 10.000 gs.
- i) Numero di impulsi al secondo = 30.
- l) Tipo di eccitazione: alternata con polarizzazione completa.
- m) Circuito di eccitazione: per la parte in c.a. il circuito è serie-risonante (un banco di condensatori ogni bobina del magnete); per la parte in c.c. vi è una dinamo protetta da induttori <sup>di</sup> blocco (in numero di 5, con condensatore di rifasamento).
- n) Numero armonica cavità a R.F. :  $50^{\text{a}} = (1)$

Nei P.S., come è noto, è necessaria una forte modulazione della frequenza del dispositivo di accelerazione.

---

(1) E' stato assunto  $N = 50$  = numero sezioni diritte per mantenere la stessa fase per l'eccitazione delle cavità risonanti: il problema di mantenere la differenza di fase costante durante la modulazione di frequenza creerebbe dei problemi di non facile soluzione.

Questa modulazione è, nella comune tecnica, ottenuta mediante la polarizzazione di ferriti sistemate contro le cavità risonanti. Per evitare perdite troppo elevate nei sistemi a R.F., dato anche l'elevato ciclo di ripetizione del P.S. e data l'alta tensione che devono fornire queste cavità, è necessario limitare le perdite nelle ferriti e per questo bisogna avere 2 avvertenze:

- 1) non usare frequenze troppo alte;
- 2) progettare cavità nelle quali il campo magnetico  $\sqrt{R.F.}$ , che investe le ferriti, sia inferiore a qualche decina di gauss: cavità di questo tipo devono contenere grandi quantità di ferriti (v. appendici I e II) od essere necessariamente ingombrati. Questa considerazione spiega i valori assunti in  $f$  ed  $n$ .

La scelta di  $n$  è stata fatta allo scopo di avere tolleranze di lavorazione del magnete e di allineamento dei blocchi abbastanza larghe e di avere un valore ragionevole per l'energia di transizione (bibliografie 2 e 3).

La scelta dell'energia di iniezione è la risultante di un compromesso tra il costo dell'iniettore e il costo di un sistema a R.F., che dipende dall'ampiezza di modulazione

### 3 Dati di massima del progetto.

In questo paragrafo riportiamo i seguenti dati:

- a) dati relativi al fascio;
- b) caratteristiche di massima del magnete;
- c) dati relativi all'alimentazione (banco di condensatori, bobine di blocco, perdite ohmiche del circuito, gruppi di alimentazione);

- d) dati relativi alla R.F. (1) (tipo di modulazione, pesi di ferriti, potenza alimentatori, (ecc.);
- e) iniettore;
- f) accessori;
- g) dati relativi agli edifici.

a) Dati relativi al fascio.

Si ricavano facilmente i seguenti dati:

- Numero di particelle per impulso =  $10^{12}$
- Numero di oscillazioni di betatrone per giro  $\nu = 4,7$
- Energia di transizione = 4,2 Gev
- Guadagno massimo di energia per giro = 1,5 Mev
- Potenza assorbita dal fascio = 60 kW
- $\beta = \frac{v}{c}$  iniezione = 0,428
- Frequenza rivoluzione all'iniezione = 0,3 Mcicli/sec
- " " " " finale = 0,707 Mcicli/sec
- Numero di giri di rivoluzione dei protoni durante un ciclo di accelerazione  $\approx 8.000$

b) Caratteristiche di massima del magnete.

- Induzione massima nel traferro  $\approx 15.000$  gs
- " " media all'iniezione  $B_i = 376$  gs
- Tipo di lamierino: spessore mm. 0,3; cifra di perdita 1,15 W/kg
- Sezione ferro (v. dis. 1)
- Lunghezza di una coppia di settori = 5 m.
- Lunghezza di una sezione diritta = 3,5 m

---

(1) Un'indagine preliminare sul sistema a R.F. è stata fatta in appendice (I e II). Il dr. Massarotti ha approfondito l'indagine fino ad ottenere un vero e proprio dimensionamento delle cavità risonanti, dell'alimentatore di potenza delle cavità ed uno schema a blocchi dell'impianto.

- Numero di spire bobine a corrente continua = 4 (sez. di conduttore  $14 \times 2,2 \text{ cm}^2$ )
- Numero di spire bobine a corrente alternata = 10 (1) (sez. di un conduttore  $14 \times 0,85 \text{ cm}^2$ )
- Perdite nel rame del circuito a c.c.  $\approx 1.500 \text{ kW}$ .
- Perdite nel rame del circuito a c.a. compreso correnti parassite  $\approx 1000 \text{ kW}$ .
- Perdite nel ferro per c.a. =  $500 \text{ kW}$ .
- Peso rame  $\approx 130 \text{ tonn}$ .
- " ferro  $\approx 1400 \text{ tonn}$ .
- " di una coppia di settori  $\approx 36 \text{ tonn}$ .
- " totale magneti  $\approx 1800 \text{ tonn}$ .

#### c) Dati relativi all'alimentazione

L'alimentazione, che come abbiamo detto è a corrente alternata a 30 periodi al secondo, polarizzata, variabile tra un massimo corrispondente a 10000 gs. ed un valore corrispondente ad un campo minimo compreso tra 270 e 376 gs (2), è ottenuta secondo lo sche

- (1) Il numero di spire in corrente alternata è bene che non scenda sotto a 10 per ragioni di perdite per correnti parassite.
- (2) Il campo minimo ha notevole influenza:
- Sulla durata dell'iniezione e quindi sull'intensità di particelle iniettate poichè la durata è tanto più lunga quanto minore è la derivata del campo magnetico rispetto al tempo, all'iniezione, cioè quanto minore è  $B_{\text{iniziazione}} - B_{\text{minimo}} / B_{\text{iniziazione}}$ .
  - Sul dimensionamento della R.F. poichè con  $\left(\frac{dB}{dt}\right)_{\text{iniz.}} = 0$  si ha che il campo magnetico nelle ferriti e quindi le perdite, diventano più basse. Quindi converrebbe mantenere  $B_{\text{iniziale}} = B_{\text{minimo}}$ ; d'altra parte il porre  $B_{\text{iniz.}} = B_{\text{min.}}$  può portare a disomogeneità azimutali nel campo magnetico. Nei calcoli che seguiranno in appendice I mostriamo l'influenza sulle ferriti del grado di polarizzazione del magnete.



ma di fig. 2.

Come si vede dallo schema, in serie all'avvolgimento a corrente alternata di ogni coppia di settori vi è un condensatore di rifasamento che rende quasi serie risonante il circuito stesso.

Sul circuito a corrente continua, in serie all'avvolgimento di ogni 10 coppie di settori, vi è un circuito risonante di blocco. Gli induttori del circuito, in numero di 5, sono i 5 avvolgimenti di un'unica grossa bobina che si trova al centro della costruzione. La ragione per cui dal punto di vista del circuito gli induttori di blocco sono 5, è per evitare troppe alte tensioni indotte. Sempre per questa ragione l'avvolgimento a corrente continua è costituito da sole 4 spire contro alle 10 spire del circuito a corrente alternata.

Queste induttanze, dal punto di vista costruttivo, sono raccolte in una unica bobina per ragioni economiche.

Nel magnete, il circuito a corrente alternata è vicina al polo per rendere minore il flusso disperso in alternata, che influisce notevolmente sulle spese dell'induttore di blocco e dei condensatori.

Con i criteri esposti, si sono ricavati i seguenti dati:

- Energia magnetica massima nel magnete = 3,5 M5
- Corrente continua massima = 10.000 A.
- Corrente efficace alternata = 2850 A
- Tensione efficace ai capi dell'avvolgimento in c.a. di una coppia di settori = 1200 V
- Tensione indotta sull'avvolgimento a c.c. di ogni coppia di settori = 480 V
- Tensione ai capi di 10 coppie di settori in c.c. = 4800 V
- Induttanza dell'intero magnete (circuito a c.a.) = 220 mH

- Induttanza degli induttori di blocco (tenuto conto che sono su un'unica bobina) = 110 mH (circa 3 volte l'induttanza del magnete).
- Energia complessiva del banco di condensatori in serie al circuito a c.a.  $\approx$  900 kJ
- Energia totale dei banchi di condensatori dei circuiti di blocco sul circuito a c.c. =  $5 \cdot 60.000 = 300$  kJ
- Potenza generatore c.a. (1) = 2.000 kW
- " " c.c. (1) = 3.000 kW
- Tensione generatore c.a. = 1000 V.
- " " c.c. = 300 V.

d) Dati relativi alla R.F.

Per il progetto del sistema a R.F. ci siamo rifatti ai calcoli sviluppati dal Mura. Nel report indicato, suggeriscono 2 soluzioni per la modulazione a R.F.

Il primo metodo consiste in una modulazione a base di ferriti, mentre nel secondo la modulazione viene effettuata con condensatore rotante e le ferriti servono per la modulazione fine.

Noi ci rifacciamo alla prima soluzione su cui l'esperienza passata ha avuto risultati positivi.

Data l'incertezza nella scelta di  $B_{\text{minimo}}$ , il sistema a R.F. potrebbe variare in maniera sensibile, e le maggiori variazioni si hanno per es. sul peso delle ferriti che possono passare da 250 kg. nel caso di  $B_{\text{iniez.}} = B_{\text{min.}}$  a 1000 kg. nel caso di  $B_{\text{iniez.}} - B_{\text{min.}} = 100$  gs.

Qualora si dovesse per necessità magnetiche, polarizzare meno il magnete ( $B_{\text{iniez.}} - B_{\text{min.}} > 100$  gs),

---

(1) Si sono semplicemente raddoppiate le perdite del magnete.

potrebbe essere necessario, per rendere meno gravosa la modulazione, per le perdite a cui da luogo, o aumentare l'energia di iniezione (per es. portandola a 200 MeV) od aumentare il numero di cavità risonanti o fare 2 sistemi di cavità risonanti: ciascun sistema modulato metà dell'altro (per es. un sistema che arriva fino a 600 MeV ed uno che arriva da 600 MeV a 12 GeV). Queste soluzioni hanno delle ripercussioni economiche notevoli spostando di un paio di miliardi il costo dell'impresa.

Si sono fissati o calcolati i seguenti dati:

- Numero cavità = 40
- Tensione massima di ogni cavità = 77000 V
- Tensione massima per giro = 3.100.000 V.
- Rapporto tra gli eV per giro della particella e la tensione massima per giro = 1/2.
- Frequenza iniziale R.F.  $\cong$  15 Mcicli/sec.
- Frequenza finale R.F.  $\cong$  35 Mcicli/sec.
- Lunghezza di una cavità = 1,3 + 0,6 m.
- Potenza massima alimentatore finale cavità = 30 kW
- Tipo ferrite: IV E Philips.
- Peso ferrite per cavità = 500 + 1000 kg.
- Peso totale ferrite = 20 + 40 tonn.
- Raggio esterno cavità = 60 + 100 cm.
- Diametro interno cavità = 15 cm.
- Corrente per polarizzazione massima ferriti = 20+30000 Asp.
- Potenza totale del sistema a R.F. (senza potenza di polarizzazione) = 1600 kW

e) Iniettore.

E' stata assunta come energia di iniezione 100 MeV per ridurre la modulazione di frequenza: per ottenere questa energia è necessario avere un preacceleratore di tipo elettrostatico in serie ad un acceleratore lineare. Ormai la costruzione è quasi standard e si può acquistare ogni pezzo dall'industria.

Poichè le caratteristiche ottiche  $\frac{\Delta p}{\Delta r}$ ,  $\Delta \alpha$  e  $\Delta r$  richieste al fascio iniettato dipendono dal dB/dt che non è fissato: in questa sede non ci dilungheremo nel discutere questo punto.

#### f) Accessori.

Ricordiamo per completezza che per il funzionamento della macchina vi sono accessori importanti per il costo o la delicatezza del progetto:

- la camera a vuoto che potrà essere fatta di massima come quella dell'E.S. Italiano o con una camicia di acciaio inossidabile attorno ai poli.

Il vuoto è ottenuto con pompe rotative e a diffusione di tipo commerciale.

Gli scambiatori di calore o pompe di circolazione (per l'acqua di raffreddamento).

La sala controllo.

La cabina elettrica (10.000 kW).

#### g) Dati relativi agli edifici.

Per gli edifici abbiamo previsto il minimo necessario e precisamente: il tunnel entro cui va sistemato il magnete, vari capannoni per la messa a punto delle varie parti, gli edifici per ospitare il macchinario ausiliario e le schermature.

#### 4 Stima delle spese.

Sulla base dei dati di § 3 si è ricavata la tabella III che riassume il preventivo di spese per la costruzione del P.S.

La cifra totale ricavata nel ns. preventivo è sensibilmente inferiore (16 miliardi contro 27) alla cifra riportata dal Mura (v. Bibliografia).

Le ragioni di questa differenza sono seguenti:

- l'energia è di 12 Gev invece di 15;
- gli edifici previsti per la nostra macchina sono nettamente inferiori a quelli del Mura; inoltre il costo delle opere in muratura in Italia è molto inferiore che in America;
- l'iniettore da noi previsto è di energia inferiore a quello del Mura (100 MeV contro 200).
- il costo del magnete e delle induttanze di blocco, per esperienza personale, risulta inferiore a quello indicato dal Mura.

Le voci in cui si può dividere la spesa sono:

	<u>TAB. III</u>	miliardi di L.(2)
A) Galleria anulare (1) ( $K = \frac{R_p}{R_E} = \frac{1}{2,05}$ )		1
B) Edifici (1) ( $K = 2/3$ ) + schermature		1, 1
C) Magnete ( 1200 al kg.)		2,2
D) Iniettore (vedi relaz. VS-44)		1,4
E) Condensatori (compreso quelli per i blocchi risonanti) e induttori di blocco/333 (3.L.16) <sup>0,6</sup> in M/irc./		2,1
F) Gruppi convertitori con regolazione		0,4
G) Cavità a R.F. compreso ferriti (1) ( $K=5/3$ poichè la potenza è maggiore e perchè è comprensivo della ferrite e del sistema di modulazione) e alimentatori per R.F.		2,7
H) Camera e impianto di vuoto, sala comandi cabina elettrica, impianti ausiliari		0,9

- 
- (1) Queste voci sono state dedotte da quelle corrispondenti dell'E.S. da 10 GeV (Ingg. Amman e Puglisi) secondo i rapporti indicati con K.
- (2) Costo A) e B)  $\ll$  Mura; costo C e D)  $<$  Mura; costo E), F),  $=$  Mura; G  $>$  Mura.

I)	Strumentazione, modelli, misura, accessori vari, montaggio ecc.	1,8
L)	Spese personale (200 persone per 5 anni (3) )	3
		<hr/>
	Spesa complessiva	L. <u><u>16,6 miliardi</u></u>

---

(3) - 1 anno di studio, 3 anni di costruzione, 1 anno di messa a punto.

## APPENDICE I

### CALCOLO DEL CAMPO MAGNETICO NELLE FERRITI DELLA CAVITA' RISONANTE. (1)

1) Formula della frequenza di rivoluzione delle particelle in funzione del campo magnetico.

Abbiamo:

$$\frac{m v^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} R} = e B v \quad (1)$$

e quindi con semplici passaggi:

$$v = \frac{B R}{\sqrt{\frac{m^2}{e^2} + \frac{R^2 + B^2}{c^2}}} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot B}{\sqrt{71 \cdot 10^{-4} + B^2}} \quad (2)$$

La frequenza di rotazione delle particelle è:

$$f = \frac{v}{2 \pi R(1+k)} = \frac{0,7 \cdot 10^6 \cdot B}{\sqrt{71 \cdot 10^{-4} + B^2}} \quad (3)$$

$\tau$  ( periodo di rivoluzione) è :

$$\tau = \frac{1}{f} = \frac{2 \pi R (1+k)}{v} = \frac{\sqrt{71 \cdot 10^{-4} + B^2}}{0,7 \cdot 10^6 \cdot B} \quad (4)$$

---

(1) I simboli usati sono quelli della comune pratica.

I valori numerici adottati sono quelli del P.S. descritto nel testo.

la pulsazione di rivoluzione è:

$$\omega = 2 \pi f = \frac{v}{R (1+k)} = \frac{4,4 \cdot 10^6 \cdot B}{\sqrt{71 \cdot 10^{-4} + B^2}} \quad (5)$$

la pulsazione della cavità risonante (N = numero armonica):

$$\omega_c = N \omega = N \frac{v}{R (1+k)} = \frac{0,22 \cdot 10^9 \cdot B}{\sqrt{71 \cdot 10^{-4} + B^2}} \quad (6)$$

#### CALCOLO DELLA TENSIONE DELLE CAVITÀ RISONANTI .

La tensione da dare alle cavità risonanti dipende dalla variazione di energia per giro che compete alla particella in relazione alla variazione del campo magnetico per giro.

La variazione di energia della particella per giro è data da:

$$\Delta E = \frac{d}{dB} \frac{m c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot B' \tau \quad (7)$$

La tensione che compete ad una cavità è data da: N = numero cavità

$$V = \frac{2}{e N} \Delta E \quad (8)$$

La (7) si può scrivere:

$$\Delta E = \frac{d}{d v^2} \frac{m c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \frac{d v^2}{d B} B' \tau \quad (9)$$



che, con semplici passaggi diventa:

$$= \frac{m^3 R^2 B^1 2 \sqrt{1+k}}{e^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{3/2} \left(\frac{m^2}{e^2} + \frac{R^2 B^2}{c^2}\right)^{3/2}} \quad (10)$$

ricordando che è:

$$\frac{v^2}{c^2} = \frac{B^2 R^2}{c^2 \left(\frac{R^2 B^2}{c^2} + \frac{m^2}{e^2}\right)} \quad (11)$$

si ottiene:

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{\frac{m^2}{e^2}}{\frac{R^2 B^2}{c^2} + \frac{m^2}{e^2}} \quad (12)$$

sostituendo la 12 nella 10 e semplificando si ha:

$$\Delta E = e R^2 B^1 2 \sqrt{1+k} \quad (13)$$

da cui si ottiene (per  $\psi_s = 30^\circ$ )

$$V = \frac{2}{n^0} R^2 B^1 2 \sqrt{1+k} = 850 B^1 \quad (14)$$

CALCOLO DELLA PERMEABILITA' DELLA FERRITE IN FUNZIONE  
DEL CAMPO MAGNETICO, CIOE' DELLA FREQUENZA.

E' nota la formula:

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(L_1 + L_2) C}} \quad (15)$$

ove  $L_1$  = induttanza dovuta al circuito in aria della cavità

$L_2$  = " " alle ferriti " "

possiamo inoltre

$$L_2 = \frac{\mu_r}{\mu_{rf}} L_f \quad (16)$$

ove  $f$  indica i parametri alla fine del ciclo, la (15)

diventa:

$$L_1 + \frac{\mu_r}{\mu_{rf}} L_f = \frac{1}{2 \pi f^2 C} \quad (17)$$

dalle precedenti formule abbiamo ottenuto  $f$  che sostituiamo nella formula presente, da cui si ottiene:

$$\mu_r = \frac{\mu_{fr}}{L_f} \left[ \frac{(1+k)^2 \left( \frac{m^2}{e^2} + \frac{R^2 B^2}{c^2} \right)}{C N^2 B^2} - L_1 \right] \quad (18)$$

da cui:

$$\mu_r = \frac{a + b B^2}{B^2}$$

ove gli  $a$  e  $b$  si determinano con i valori di  $\mu$  che la ferrite assume ai valori del campo d'iniezione e del campo massimo.

#### CALCOLO DEL CAMPO MAGNETICO NELLA FERRITE IN FUNZIONE DEL CAMPO MAGNETICO NEL TRAFERRO.

La corrente massima che circola nella cavità risonante è data da:

$$I_M = \omega_c V C = \frac{11 \cdot B B^1}{(71 \cdot 10^{-4} + B^2)^{1/2}} \quad (19)$$

Il campo magnetico nella ferrite è data da:

$$B_f = \frac{l I_M}{l} \quad (20)$$

ove  $l$  = lunghezza del circuito magnetico nella ferrite  
e possiamo mettere  $l = 1,5$  m.

la formula (20) diventa la seguente:

$$B_f = \frac{1,256 \cdot 10^6}{1,5} \frac{a + b B^2}{B^2} \frac{11 B B^1}{\sqrt{71 \cdot 10^{-4} + B^2}} \quad (21)$$

Se noi sostituiamo a  $B$  e  $B^1$  successivamente  
le seguenti espressioni, troviamo per  $B_f = f(t)$   
i grafici di cui alle fig. 3 e 4.

- 1)  $B = -0,4814 \cos t + 0,5186$   
 $B^1 = 0,4814 \cdot 188 \cdot \text{sen } 188 t$
- 2)  $B = -0,49 \cos 188 t + 0,51$   
 $B^1 = 0,49 \cdot 188 \cdot \text{sen } 188 t$

## APPENDICE II

### DIMENSIONAMENTO DI MASSIMA DI UNA CAVITÀ RISONANTE E CALCOLO DELLE PERDITE. (1)

Dimensioni della gap.

Per 77 kV assumiamo una distanza di 3 cm tra le armature del  
Dovrà essere condensatore della cavità.

$$C = \frac{S \epsilon_0}{d} \quad \text{da cui si ha :} \quad (1)$$

$r =$  raggio armatura condensatore cavità = 25 cm.

Poniamo il tubo di adduzione della corrente  
del diametro di 15 cm. ed il diametro esterno della ca-  
vità = 60 cm.

Affinchè risuoni a 35 MC/sec si deve avere

$$L = 0,35 \mu F$$
$$L = \mu_0 l \frac{1}{2 \pi} \lg. \frac{R_2}{R_1} \quad \text{da cui si ottiene} \quad (2)$$

$$l = 1,3 \text{ m.}$$

Si ottiene dai dati generali che l'induttanza  
massima della ferrite risulta:

$$L = 1,56 \cdot 10^{-6} \text{ f} \quad \text{da cui abbiamo}$$

$$\text{per } \mu_r = 150 \left\{ \begin{array}{l} \text{spessore ferrite} = 2 \text{ cm.} \\ \text{lunghezza} \quad \quad = 75 \text{ cm.} \end{array} \right. \quad \text{per } 79 \left\{ \begin{array}{l} s = 4 \text{ cm.} \\ l = 75 \text{ cm.} \end{array} \right.$$

peso anello ferrite  $\approx$  130 kg. per  $\mu_r = 150$  e  
260 kg. per  $\mu_r = 79$

---

(1) Nell'appendice III questi calcoli sono stati completa-  
ti e migliorati dal dr. Massarotti. In tale appendice  
si trova pure lo schema a blocchi per l'alimentazione.  
Nel testo precedente si sono ritenuti validi i calcoli  
fatti nell'appendice III. Nell'appendice III inoltre è  
stato fatto il calcolo della cavità fissando Biniez.  
 $B_{\min.} = 100$  gs. mentre nei calcoli di questa appendice  
si è assunto Biniez. -  $B_{\min.} = \overset{0}{\approx} 172$  gs.

Per il calcolo delle perdite istantanee totali si è usato la formula

$$W = W_f + W_r = 10^5 \left( \frac{B_f \cdot 10^4}{20} \right)^{1,6} \cdot V_f + \frac{I_M^2}{2}$$

$$\cdot \sqrt{S \mu \omega c} \quad 1 \left( \frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2} \right) \quad \text{dove:} \quad (3)$$

$V_f$  = volume ferrite

$l$  = lunghezza + raggio della cavità.

$P_1$  = perimetro tubo interno cavità.

$P_2$  = " " esterno "

gli altri simboli sono già stati usati in precedenza.

Sostituendo i dati precedentemente trovati abbiamo:

$$W = 10^5 \left( \frac{B_f \cdot 10^4}{20} \right)^{1,6} \cdot V_f + \frac{(11 \cdot B \cdot B')^2}{(71 \cdot 10^4 + B^2) \cdot 2}$$

$$\cdot \sqrt{\frac{10^6 \cdot 1,256 \cdot 10^6 \cdot 0,22 \cdot 10^9 \cdot B}{55(71 \cdot 10^4 + B^2)^{1/2}}} \cdot 1,5 \left( \frac{1}{0,47} + \frac{1}{1,8} \right)$$

Con questa formula sono stati ricavati i grafici corrispondenti alle curve di fig. 5 e 6.

Vediamo subito che nei casi in cui si ha polarizzazione minima, sia le perdite massime istantanee sia le perdite medie portano a valori possibili. A valori, invece, di polarizzazione, per cui il campo minimo sia di 200 gs. sotto al valore d'iniezione, probabilmente conviene pensare a sistemare due sistemi di cavità risonanti, ciascuno di 40 unità, in cui l'ampiezza di modulazione di frequenza di ciascuno sia metà del complessivo. In tale sistema le perdite istantanee massime saranno mag

giori ma più piccola risulterà la potenza media. La potenza dissipata dovrà in ogni modo rimanere però nettamente superiore alla potenza che la cavità cede al fascio (2,5 kW medi durante il periodo di accensione della cavità) per rendere sufficientemente indipendente l'eccitazione dal carico del fascio stesso. Si potrebbero ad esempio fissare i seguenti valori :

I° sistema cavità:

$$B_{\text{iniziale}} = 376 \text{ gs.}$$

$$B_{\text{finale}} = 680 \text{ gs.}$$

$$E_{\text{iniziale}} = 100 \text{ MeV.}$$

$$E_{\text{finale}} = 300 \text{ MeV.}$$

$$\text{frequenza iniziale} = 15 \text{ Mc/sec.}$$

$$\text{" finale} = 23 \text{ Mc/sec.}$$

II° sistema cavità:

$$B_{\text{iniziale}} = 680 \text{ gs.}$$

$$B_{\text{finale}} = 10.000 \text{ gs.}$$

$$E_{\text{iniziale}} = 300 \text{ MeV}$$

$$E_{\text{finale}} = 12 \text{ GeV}$$

$$\text{frequenza iniziale} = 23 \text{ Mc/sec.}$$

$$\text{" finale} = 35 \text{ "}$$

In fig. 7 abbiamo ripetuto le curve che ci danno il campo magnetico nelle ferriti ed in fig. 8 una curva della potenza ivi dissipata.

La situazione, dal punto di vista della regolazione di frequenza, migliora rispetto ai casi di un solo sistema, inoltre dovrebbe diminuire la potenza per comandare la ferrite che è elevata (parecchie decine di kW).

Possiamo fissare le dimensioni di massima della

cavità come indicata in fig. 9.

$$L = \frac{10^{12}}{60} \cdot \frac{1}{f^2 (2\pi)^2} \left\{ \begin{array}{l} f = 15 \text{ Mc/sec.} \quad L \approx 1,91 \cdot 10^{-6} \text{ H} \\ f = 23 \quad \quad \quad L \approx 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ H} \\ f = 35 \quad \quad \quad L \approx 0,35 \cdot 10^{-6} \text{ H} \end{array} \right.$$

da cui si ottiene che l'induttanza del circuito di ferrite deve arrivare ai seguenti valori massimi:

$$\begin{array}{ll} \text{per la I}^{\wedge} \text{ cavità} & 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ H} \\ \text{" " II}^{\wedge} \text{ " " } & 0,45 \cdot 10^{-6} \text{ H} \end{array}$$

il peso delle ferriti si riduce:

$$\begin{array}{ll} \text{per la I}^{\wedge} \text{ cavità} & \left\{ \begin{array}{l} = 79 \text{ P} \approx 185 \text{ kg.} \\ = 150 \text{ P} \approx 92 \text{ kg.} \end{array} \right. \\ \text{" " II}^{\wedge} \text{ " " } & \left\{ \begin{array}{l} = 79 \text{ P} \approx 75 \text{ kg.} \\ = 150 \text{ P} \approx 38 \text{ kg.} \end{array} \right. \end{array}$$

Un'altra maniera per poter diminuire le perdite è diminuire il  $\mu_{\max}$  della cavità aumentando il peso delle ferriti, come probabilmente hanno fatto al Mura e come ha fatto il dr. Massarotti nell'appendice III.

### APPENDICE III

#### PROGETTO DI MASSIMA PER L'IMPIANTO R.F. (4,5,6,16, 17, 18, 19, 20.

Per un impianto di questo tipo la maggiore difficoltà è rappresentata dai risuonatori a cavità, che a causa della elevata ripetizione della macchina (30 Hz) devono essere in grado di fornire un elevato picco di tensione al gap. ( $\sim 80$  kV), ed avere una banda di frequenze di lavoro estremamente ampia ( $\sim 14+35$  MHz). Per questo motivo abbiamo essenzialmente affrontato il problema del dimensionamento elettrico di una cavità che abbia ragionevoli caratteristiche, ovviamente ottimizzabili in sede di progetto definitivo, per il quale, vogliamo sottolineare, sono soprattutto indispensabili accurate misure di laboratorio che diano un insieme completo di caratteristiche delle ferriti più adatte allo scopo.

Il generatore pilota e tutta la catena di amplificazione sono stati esaminati come schema a blocchi che comprende circuiti convenzionali e pertanto possibili. Di questa seconda parte la maggiore difficoltà consiste nella scelta delle valvole per il dimensionamento degli amplificatori finali, ma si tratta di una scelta, non di esaminare se la cosa è ragionevolmente possibile o impossibile.

Resta comunque il fatto che un tale impianto è estremamente impegnativo rispetto agli impianti dei protosincrotroni a bassa ripetizione e degli elettrosincrotroni.

#### La cavità

Il criterio che ci ha guidati nel dimensionare la cavità, una volta fissati i parametri che definiscono



la macchina, è stato quello di rendere minime le perdite. Prima di entrare nel dettaglio del progetto, vogliamo accennare alla scelta di alcuni dei parametri che più direttamente sono legati al calcolo della cavità stessa. Per quanto riguarda il campo magnetico è stato scelto il bias di 5138 gauss e il corrispondente componente alternato di 4862 gauss per permettere un lavaggio di 100 gauss al di sotto del campo di iniezione che è di 376 gauss. La scelta della 50<sup>a</sup> armonica è determinata da un compromesso per ottenere un buon termine di smorzamento per le oscillazioni di sincrotrone e volumi delle cavità, e quindi della ferrite, ridotti. Va tenuto inoltre presente che una tale scelta risulta comoda anche dal punto di vista della disposizione delle cavità, che, occupando 40 delle 50 sezioni dritte libere, lavorano con tensioni in fase una rispetto all'altra. Nel diagramma n. 10 è riportata la frequenza della R.F. in funzione del tempo dall'istante d'iniezione e la tensione al gap di ogni cavità, con fase di stabilità di 30°, sempre in funzione del tempo.

Si è fissata in 60 pf. la capacità al gap che deve tener conto anche delle capacità distribuite. Si può dire che questo valore è un limite inferiore per la capacità, perchè l'energia immazzinata sia tale da non risentire in maniera eccessiva del fatto che una parte ne viene ceduta ai protoni. E' bene notare comunque che è utile prevedere con buona approssimazione il carico e il componente reattivo introdotto dal beam perchè 10<sup>12</sup> particelle hanno un effetto tutt'altro che trascurabile.

Nel calcolo dell'induttanza il problema va posto nel senso di rendere minime le perdite nella ferrite. Detto  $B_{rf}$  il componente magnetico a R.F. nella ferrite, si può assumere in prima approssimazione che le perdite

nella ferrite vanno <sup>con</sup>  $B_{rf}^{1,6}$  e linearmente con il volume della ferrite. D'altra parte  $B_{rf}$  varia linearmente al variare della sezione della ferrite e quindi, una volta fissata la lunghezza del circuito magnetico, linearmente con il volume. Risulta quindi chiaro che si hanno perdite tanto minori quanto maggiore è il volume della ferrite e minore è  $B_{rf}$ ; questo naturalmente per ogni frequenza presa in considerazione. E' stato trascurato il fatto che le perdite nella ferrite sono anche funzione della frequenza perchè ciò significava scegliere un ben preciso tipo di ferrite e si è preferito assumere il valore di 0,1 Watt/cc. per  $B_{rf} = 20$  gauss costante nel campo di frequenza considerato. Il tipo di cavità scelto è quello quadrato e ciò sia per ragioni di accoppiamento con lo stadio finale, sia per comodità di eccitazione delle ferriti per ottenere la modulazione.

Detti :

$f$  = frequenza di lavoro

$L$  e  $C$  rispettivamente induttanza e capacità della cavità

$r_{min.}$  e  $r_{max}$  raggio minimo e massimo della stessa

$\mu_r$  permeabilità della ferrite

$h$  e  $s$  rispettivamente altezza e spessore della ferrite

essendo le solite le altre notazioni si ha dalle:

$$4 \pi^2 f^2 = \frac{1}{LC} \quad e \quad L = \frac{\mu h}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

$$L_{14,6} = 1,96 \cdot 10^6 \text{ Henry} \quad L_{35} = 3,42 \cdot 10^7 \text{ Henry}$$

$$\mu_{r14,6} = 40$$

$$\mu_{r35} = 4$$

$$r_{min.} = 7,5 \text{ cm}$$

$$r_{max} = 50 \text{ cm.}$$

$$s = 13,9 \text{ cm.}$$

per cui la cavità può essere schematizzata come in fig. a

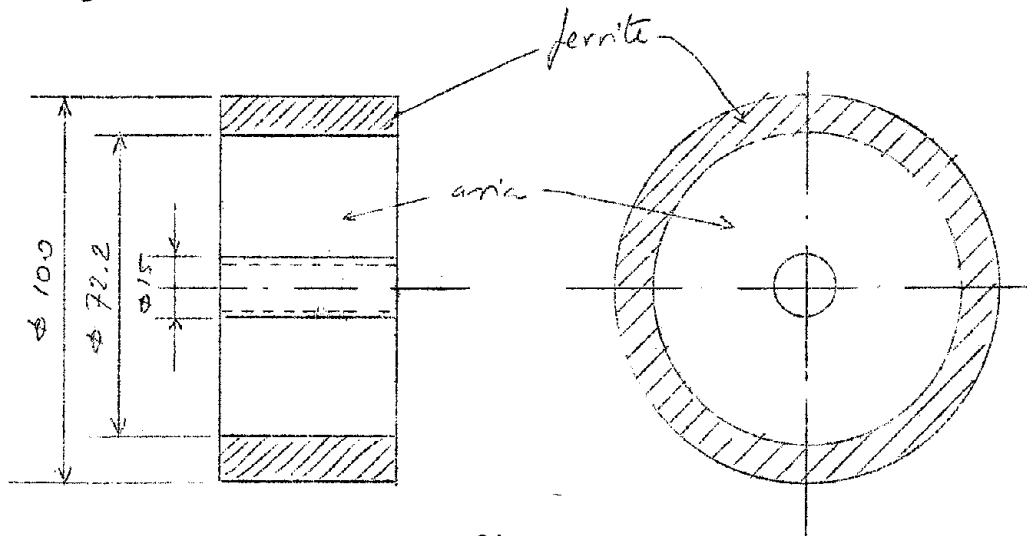


fig. a

Inoltre assumendo uguale a 4 il peso specifico della ferrite si ha che il peso della ferrite è 1000 kg.

Sono stati poi ricavati in funzione del tempo i valori di  $L_{ferrite}$  (induttanza della zona riempita dalla ferrite) di  $B_{rf}$  di  $W_{ferrite}$  (potenza dissipata nella ferrite) e di  $W_{totale}$  che riportiamo qui sotto.

t (msec)	$L_{ferrite}$ (H)	$B_{rf}$ (gauss)	$W_{ferrite}$ (Kw)	$W_{totale}$ (Kw)
1,083	1,775	18,7	20,2	20,22
2	0,787	21,8	26,3	26,48
3	0,399	21,6	25,5	26,35
4	0,256	19,2	21,8	23,47
5	0,203	19,2	21,8	24,5
7	0,194	21,5	25,5	29,7
8,33	0,188	23	28,8	33,45
9	0,185	21,6	25,5	30,15
13	0,162	13	12,9	15,9
16,66	0,157	-	-	-

Nel diagramma n. 10 sono riportate le curve di  $L_{ferrite}$  e di  $W_{totale}$  in funzione del tempo.

Vogliamo mettere in risalto, anche se ciò è ovvio, che il primo picco sulla curva che dà l'andamento della potenza totale è dovuto al fatto che quasi tutto il campo magnetico a R.F. è addensato nella ferrite, mentre il secondo è causato dall'aumento della tensione al gap, con una distribuzione di campo più uniforme su tutta la sezione della cavità. Questo ci permette già di vedere che il trasformatore d'accoppiamento dello stadio finale con la cavità dovrà interessare anche una parte dell'induttanza caricata con la ferrite perchè il carico riportato sia tale da permettere il trasferimento di potenza voluto.

E' quindi possibile concludere, alla luce di questa prima sommaria indagine, che una cavità di questo tipo è ragionevolmente realizzabile.

#### Lo schema o blocchi della catena amplificatrice.

In fig. b è riportato lo schema a blocchi di una possibile alimentazione delle 40 cavità che necessitano alla macchina in esame.

E' possibile fare solo una stima largamente approssimativa delle potenze necessarie a un impianto di questo tipo perchè un più approfondito esame richiede un progetto relativamente dettagliato.

L'impianto costituito da un oscillatore pilota modulato in frequenza mediante una ferrite. Esso è seguito da un amplificatore-separatore che avrà 40 uscite in parallelo, ognuna delle quali piloterà un amplificatore distribuito di bassa potenza, che, dopo uno stadio invertitore, piloterà a sua volta un amplificatore distribuito in push-pull, che infine piloterà lo stadio

finale di tetrodi in push-pull. La potenza di picco dell'impianto facente capo ad ogni singola cavità dovrà essere dell'ordine di 50 Kw. e quindi la potenza di picco totale sarà di  $\approx 2000$  Kw. e la potenza media di  $\approx 700$  Kw. Non è stata presa in considerazione la potenza necessaria all'accordo automatico che, del resto, dovrebbe risultare dell'ordine di qualche decina di Kw. per cavità.

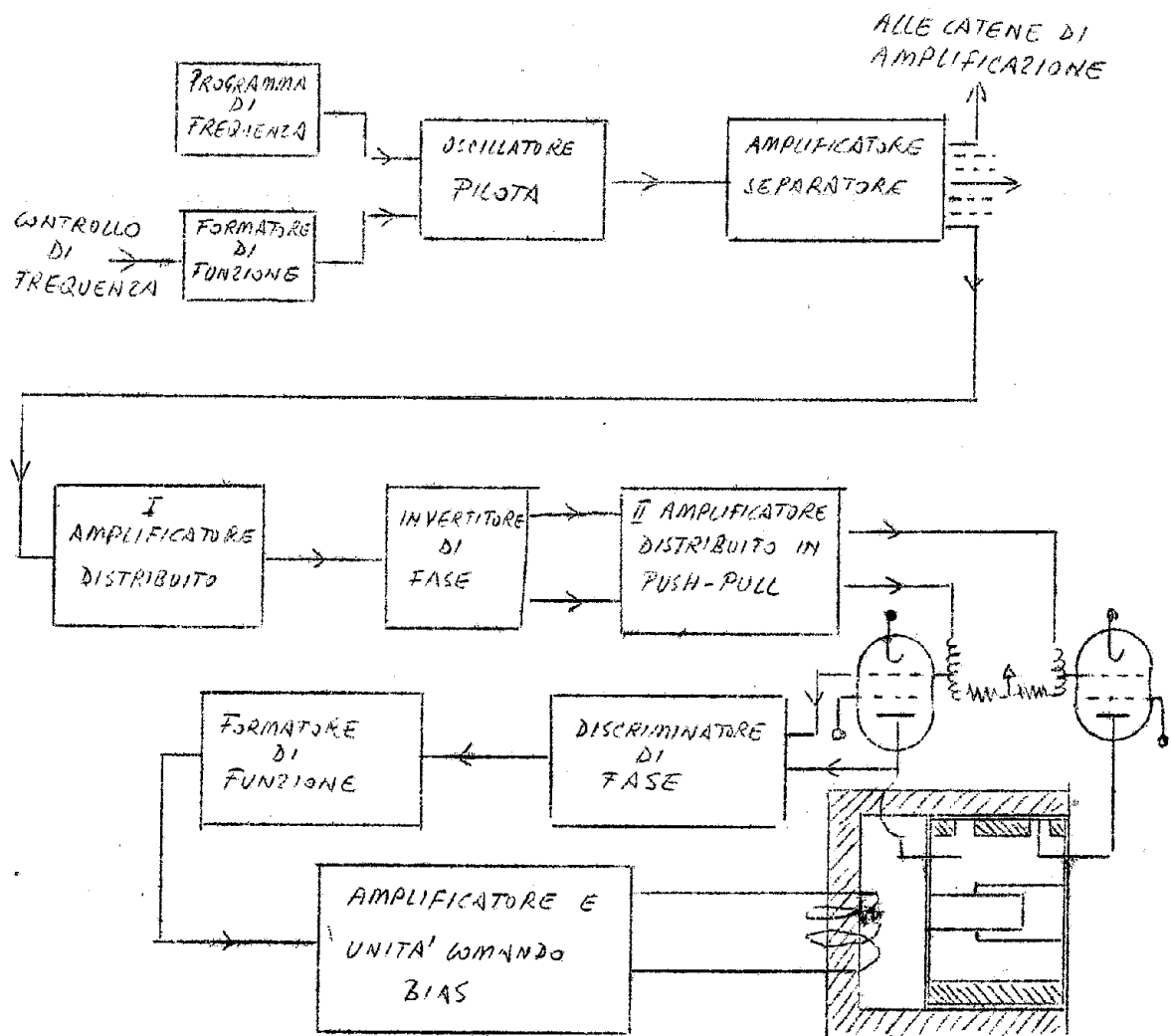


fig. b

Vogliamo notare che abbiamo schematizzato con tetrodi le valvole finali perchè ciò è consigliabile per evitare di dover pilotare triodi con griglia a massa, cosa inevitabile a queste frequenze, con conseguente richiesta di potenza notevolmente maggiore e inoltre per avere la minima capacità placca-massa cosa questa molto utile per realizzare un accoppiamento finale-cavità con buona efficienza. Inoltre abbiamo indicato il circuito di eccitazione di griglia con la maglia di chiusura d'un filtro m-derivato: questo perchè è consigliabile un tale tipo di linea per gli amplificatori distribuiti, per avere la risposta più piatta possibile per quanto riguarda la fase.

Sottolineamo e ripetiamo infine che, per quanto riguarda questa seconda parte, non abbiamo esaminato in dettaglio nessun circuito, ma ci siamo limitati a fare una ragionevole stima di potenza in base alla potenza richiesta per l'eccitazione delle cavità.

### Costi.

I costi dell'impianto possono così riassumersi in milioni di lire:

Cavità	£. 10 x 40	£. 400,-
Comando accordo automatico	" 15 x 40	" 600,-
Amplificatori I, II e finale	" 40 x 40	" 1.600,-
Pilota modulatori e controlli centrali	" 100	" 100,-
		<hr/>
Totale		Milioni di £.2.700,-
		=====

TABELLA I

Australian National University, Canberra (Australia)				
PS	4,8 m	10,6 GeV		in costruzione
CERN, Geneva				
PSag	70 m	28 GeV		costruito
Center of Nuclear Studies, Saclay (Francia)				
PS	8,4 m	3 GeV		costruito
Joint Nuclear Research Institute, Dubna (URSS)				
PS	28 m	10 GeV		costruito
Res. Inst. of Electro-physical Instruments, Leningrad (URSS)				
PSag	167 m	50 GeV		in costruzione
Thermotechnical Institute, Mosca (URSS)				
PSag	40 m	7 GeV		in costruzione
Rutherford High Energy Laboratory, Harwell (United Kingdom)				
PS	18,8 m	7 GeV		in costruzione
Argonne Nat. Lab., Lemont (USA)				
PS	71 ft	12,5 GeV		in costruzione
Brookhaven Nat. Lab., Upton (USA)				
PS	30 ft	3 GeV		costruito
PSag	280 ft	30 GeV		in costruzione
University of California, Berkeley (USA)				
PS	50 ft	6,2 GeV		costruito
Midwest Universities Res. Assoc., Madison (USA)				
PS	600 ft	15 GeV		in studio
Oak Ridge Nat. Lab., Tennessee (USA)				
PSag	142 ft	12 GeV		in studio
Princeton University, Princeton (USA)				
PS	30 ft	3 GeV		in costruzione
Mura (USA)				
PS	50 m	15 GeV		in studio

Dati relativi all'iniezione ed alla R.F.

energia di iniezione	$E \leq 10$ MeV	$10 < E \leq 50$	$E > 50$ MeV
Numero di PS	6	6	3 (100 MeV) (200 MeV) (850 MeV)

durata in giri dell'iniezione	$n = 1$	$n > 1$
Numero di PS (Mancano i dati di 4 PS)	2	9 fino ad un max di 300 giri; dando opportuna forma al campo magnetico nel tempo

numero di impulsi al secondo	$n \leq 1$	$n > 1$
Numero di PS	12	3 (a Saclay pensano di fare 30 + 60 periodi al sec.) Uno di questi due è FFAG e quindi di funzionamento continuo)

ampiezza di modulazione RF	$> 15 \%$	$< 15 \%$
Numero di PS	12	2

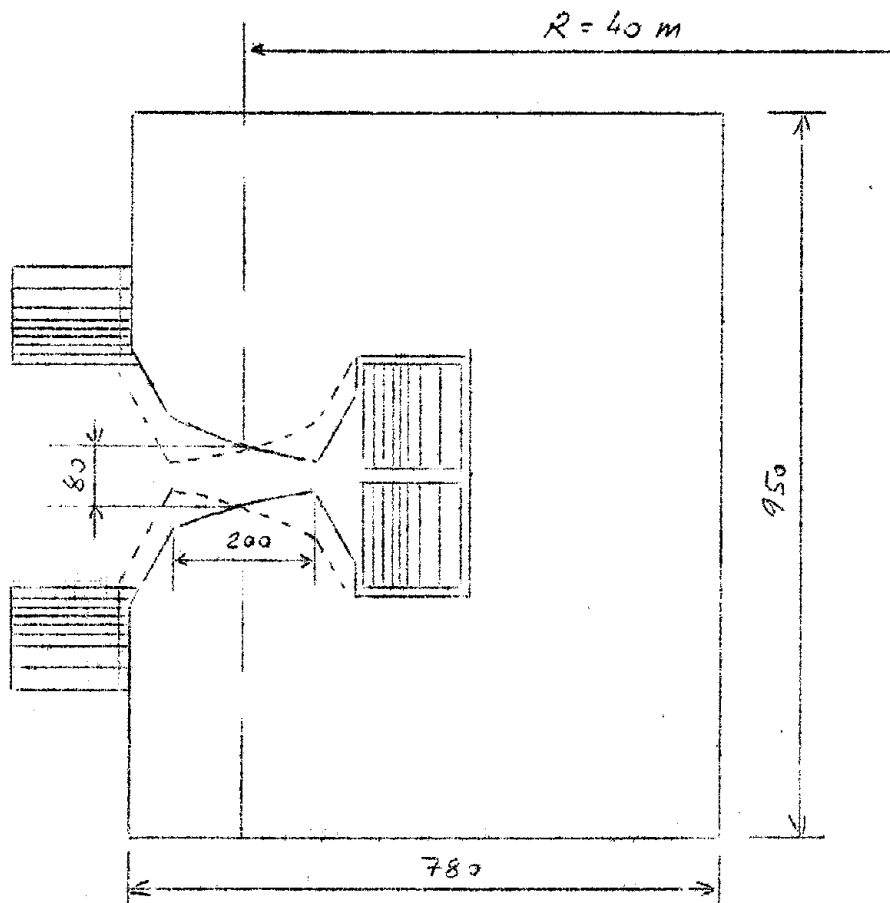
armoniche RF	$1 + 10$	$10 + 100$	$> 100$
Numero di PS	9	5	1



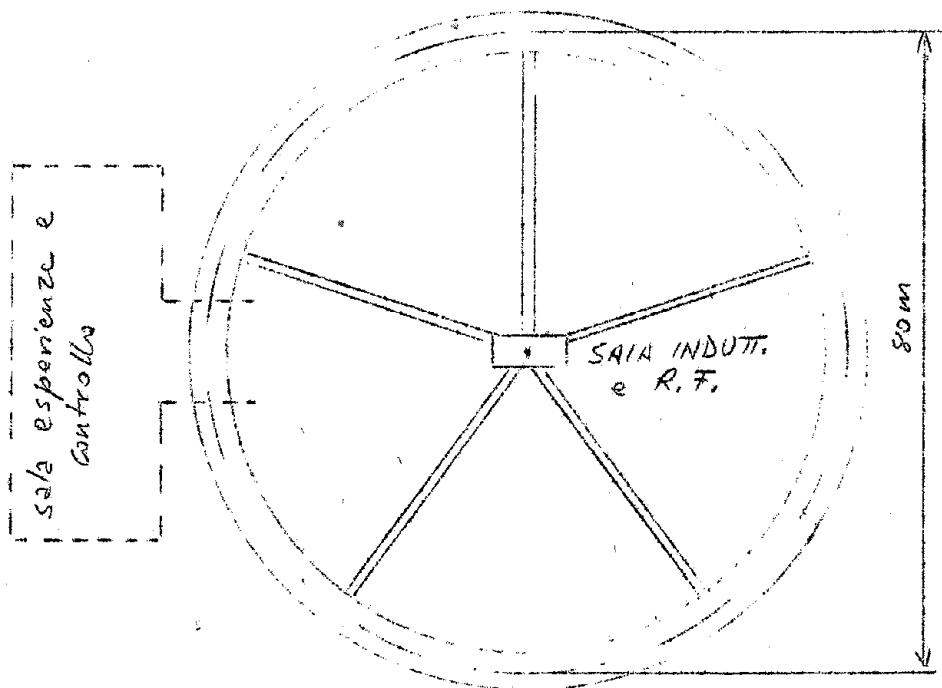
## BIBLIOGRAFIA

- (1) Howard F.T.: CYCLOTRONS AND HIGH-ENERGY ACCELERATORS 1958 (Oak Ridge Nat. Lab., report ORNL 2644, novembre 1958).
- (2) Heyret G., Parain J.: CARACTERISTIQUES DE LA MAILLE F/2 O F/2 D/2 O D/2 (C.E.A., section d'optique corpusculaire, report INT 58, agosto 1960).
- (3) Neyret G., Parain J.: AVANT-PROJET D'UN SYNCHROTRON A PROTONS A GRADIENT ALTERNE DE 15 GeV A CYCLAGE RAPIDE. CHOIX PRELIMINAIRE DE MACHINES (C.E.A., Section d'optique corpusculaire; report INT 59, agosto 1960).
- (4) MURA - A HIGH REPETITION-RATE 15 BeV ALTERNATING GRADIENT SYNCHROTRON - June 1959.
- (5) Princeton - FERRITE RING TESTS - INTERNAL REPORT - J. Kirchgessner - May 20, 1959.
- (6) Ferroxcube - Philips - Edito a cura della divisione componenti e materiali industriali.
- (7) Groupe de L'orbite (Note CEA n° 40).
- (8) Abragam A. et al. (Note CEA n° 41).
- (9) Courant E.D., Snyder H.S. (Ann.Physics, 3, 1, 1958).
- (10) Adams J.B., Hine M.G.N.H. (Report CERN-PS/JBA-MGNH/22, 1954).
- (11) Regenstreif E. (Report CERN 58 - 6a, 1958).
- (12) Green G.K., Courant E.D. (Handbuch der Physik, XLIV, 1959).
- (13) Neyret G. et al. (Note CEA n° 313, 1960).
- (14) Winningstad C.N.: THE RF SYSTEM OF THE BEVATRON (Report Radiation Lab. Berkeley UCRL-2593, 1954).
- (15) Particle Accelerator Division: SUMMARY REPORT (Report Nat. Lab. ANL-5956. 1959).

- (16) Technical Specifications for the Proton Synchrotron Radio Frequency Acceleration Units - CERN - PS/760.
- (17) D.A. Barge, J.L. Kirchgessner, F.J. Loeffler and G.K.C'Neill. - R.F. Accelerating System - Internal Report - Princeton - Pennsylvania Accelerator Project. 21/5/1957.
- (18) Lewis and Wells - Millimicrosecond Pulse Techniques - Pergamon Press - 1959.
- (19) Valley and Wallman - Vacuum tube Amplifiers - Mc Graw - Hill - 1948.
- (20) M. Puglisi - I.F. Quercia - Electron loading on-a radio frequency accelerating cavity of a 1 GeV synchrotron - INFN - Sezione Acceleratore, Relazione RF13 - 10/6/1957.



SEZIONE DEL MAGNETE



PIANTA EDIFICI

FIG. 1

CONDENSATORE PER ADATTARE IL CIRCUITO  
ALLA TENSIONE DEL GENERATORE

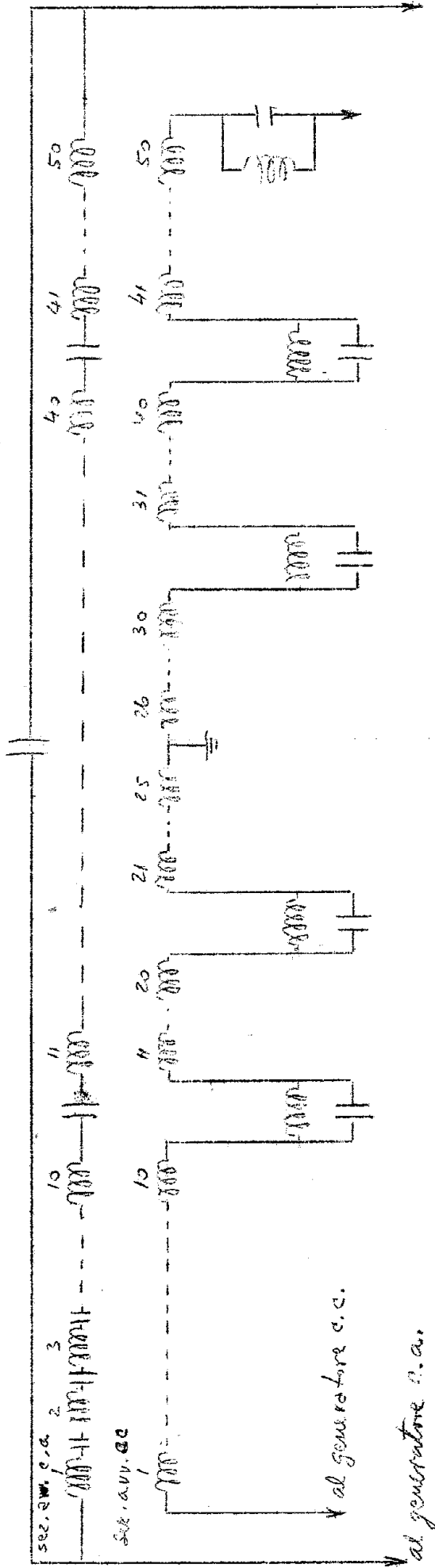
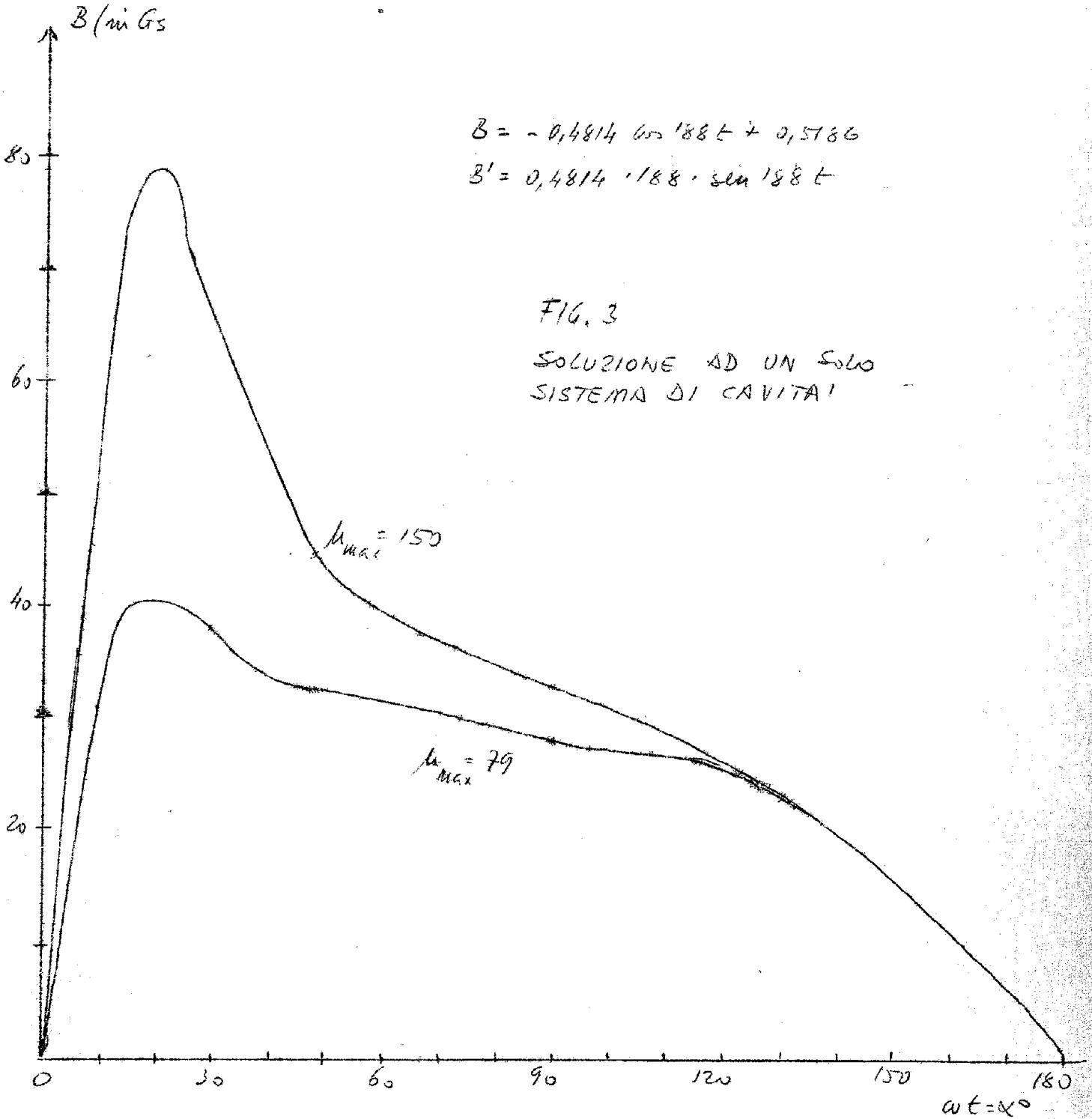
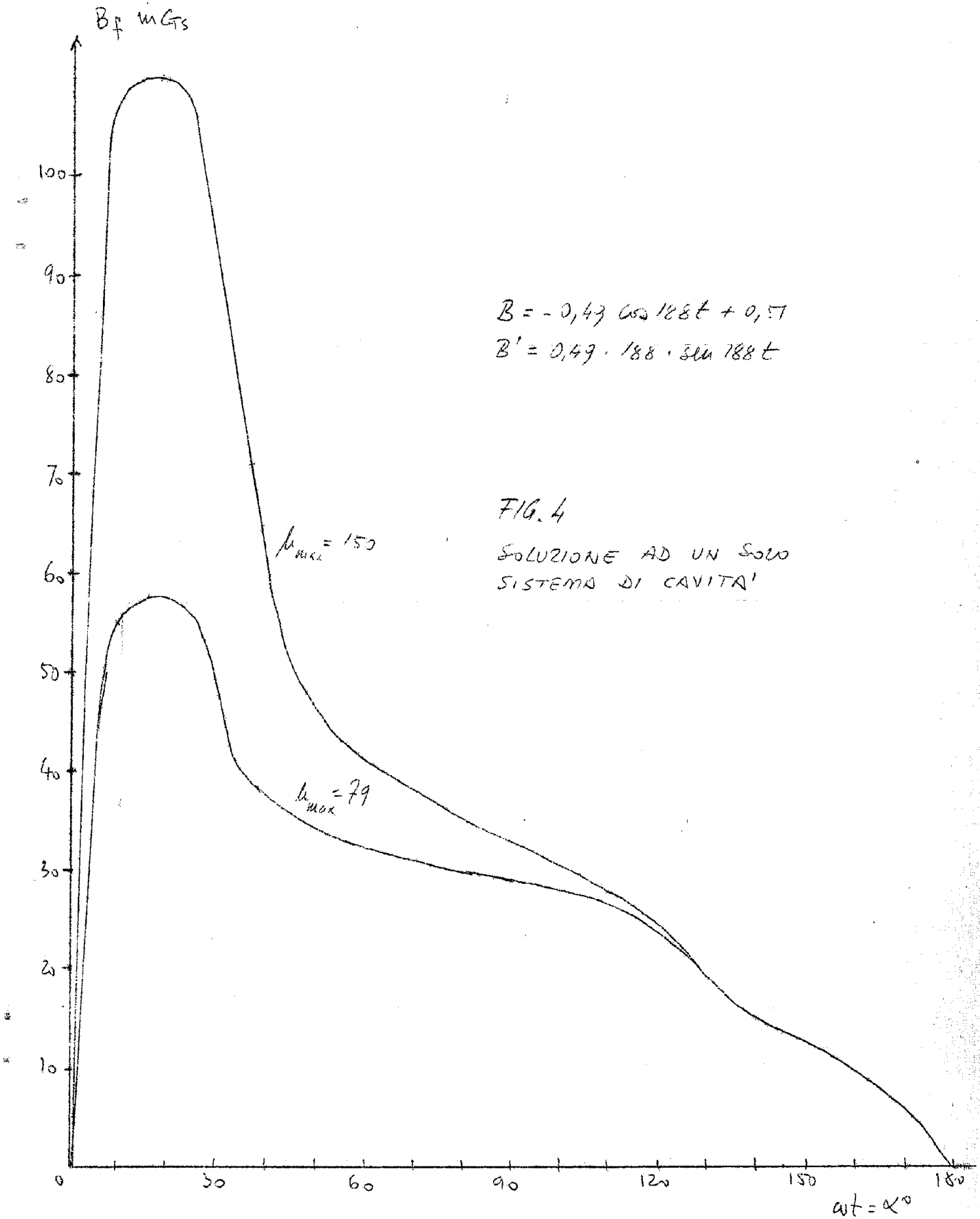
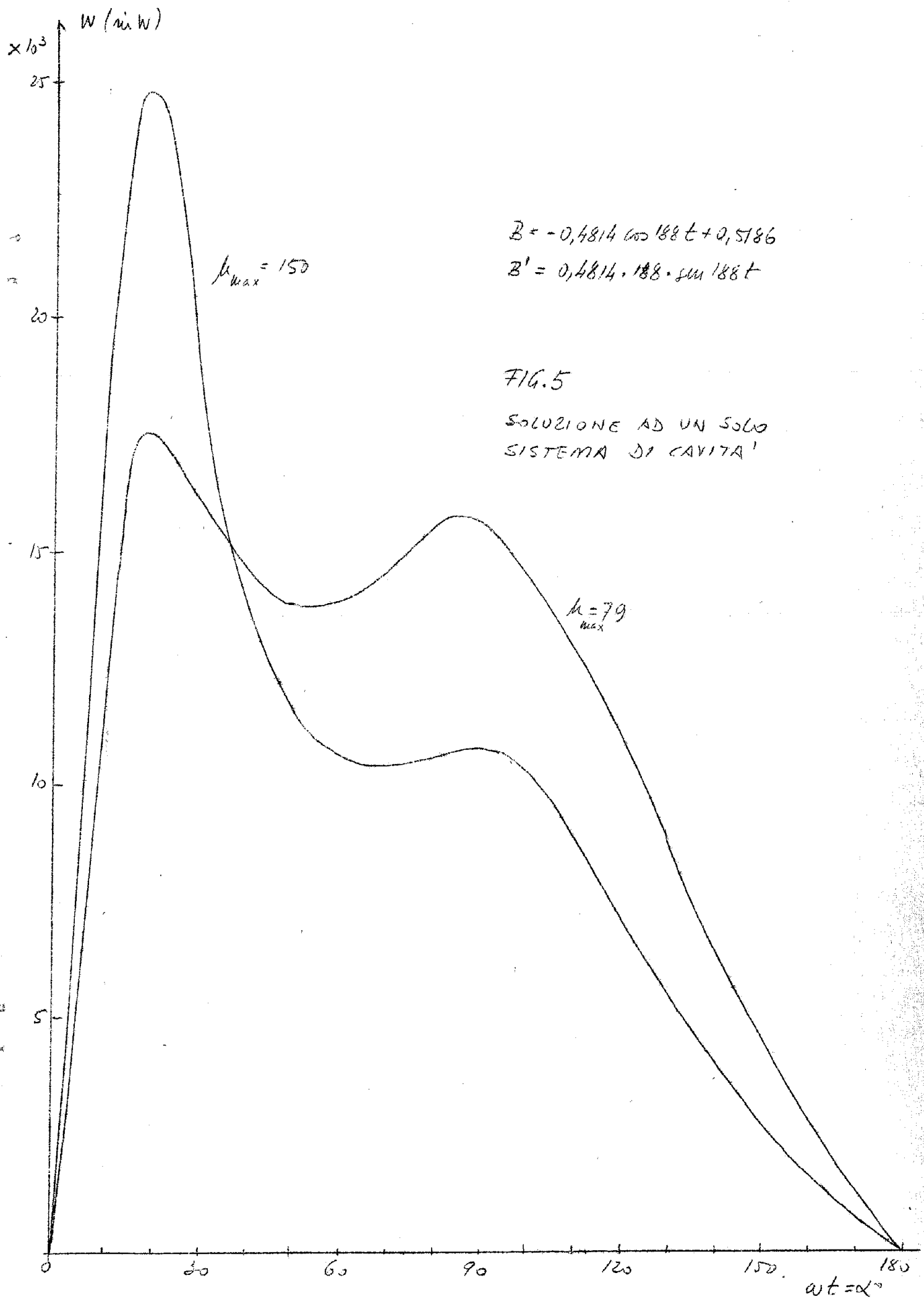
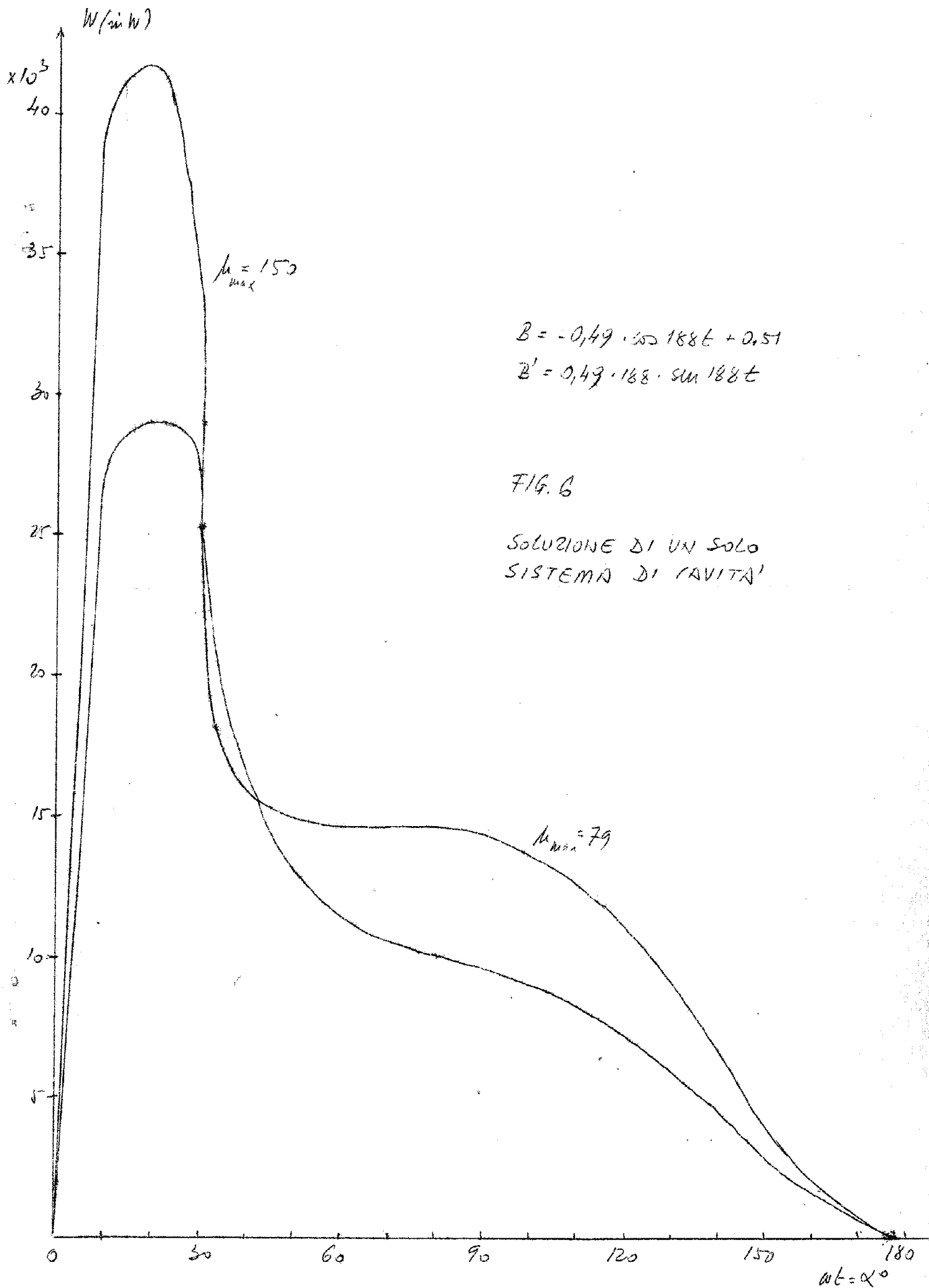


FIG. 2 - SCHEMA ALIMENTAZIONE

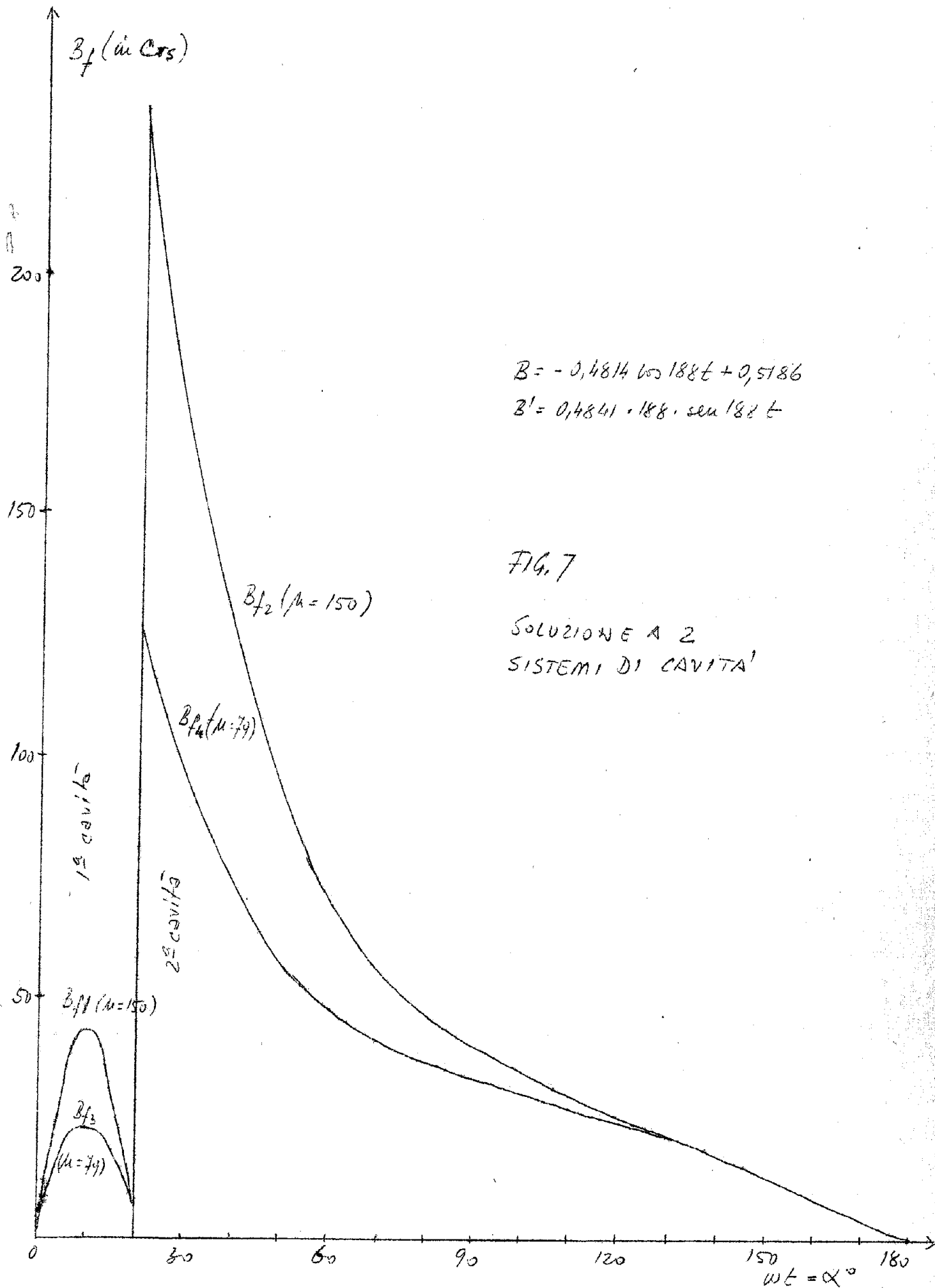












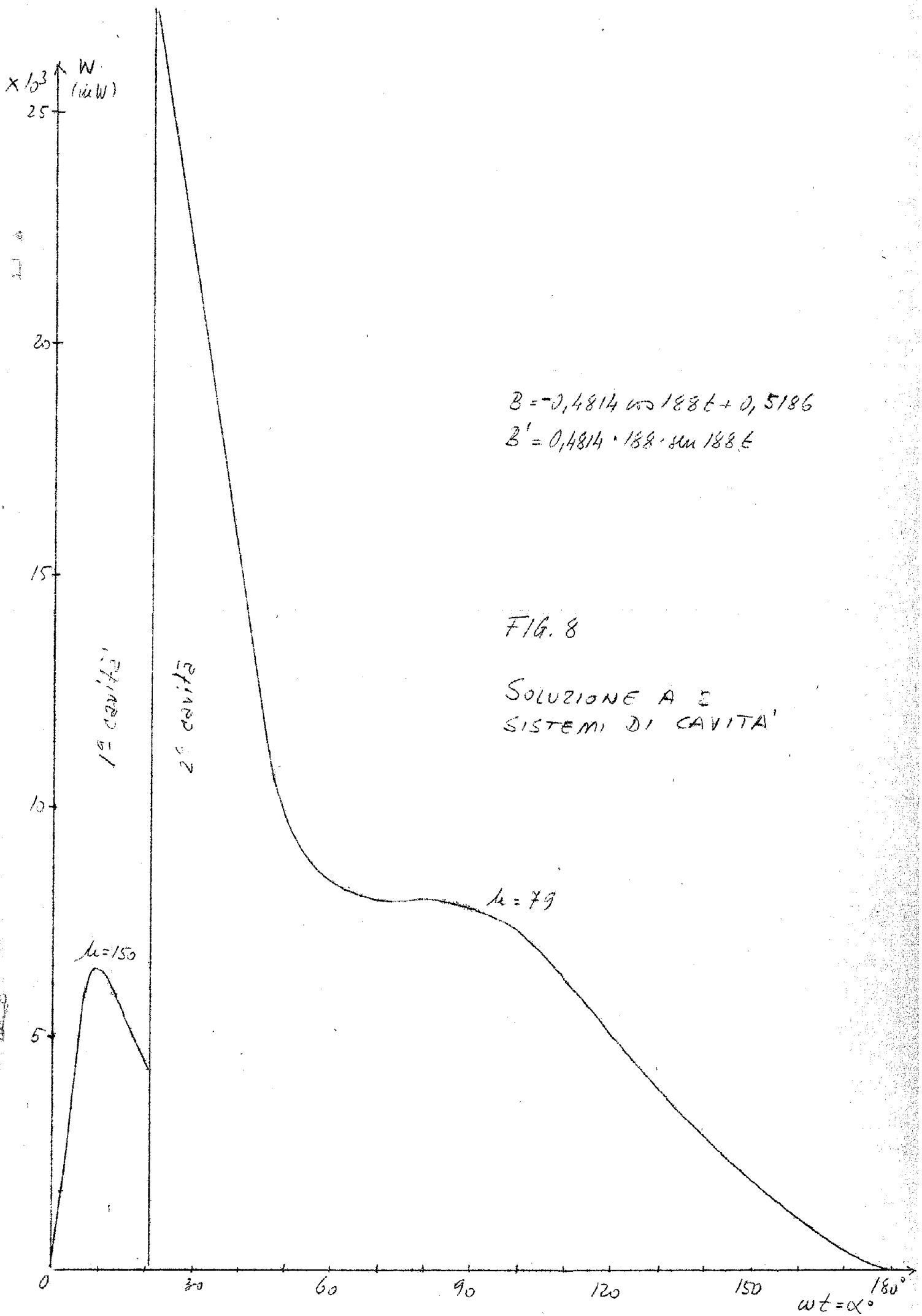


FIG. 8

SOLUZIONE A E  
 SISTEMI DI CAVITA'

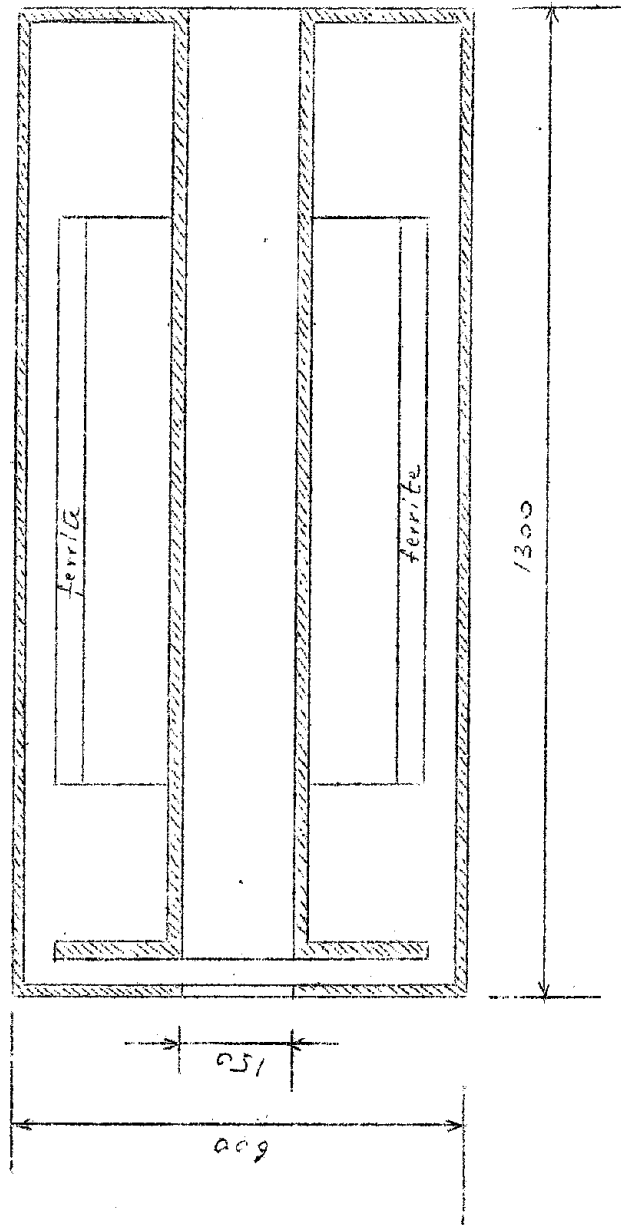


FIG. 9 - SEZIONE CAVITA'

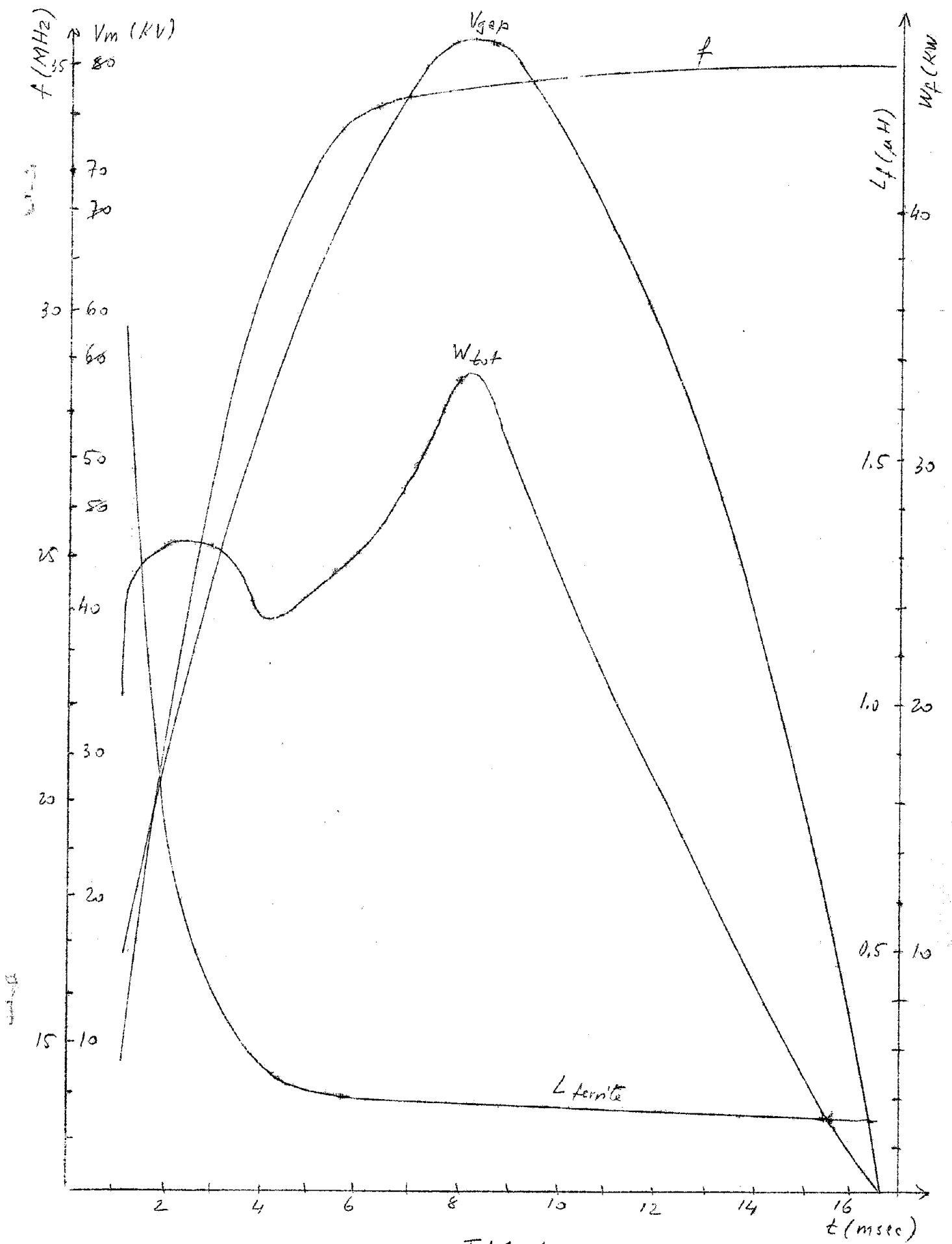


FIG. 10