

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-61/4 (20. 1. 61)

F. Amman, R. Cerchia, M. Puglisi: ELEMENTI DI PROGETTO DI UN  
ELETTROSINCROTRONE DA 10 GeV.

Nota interna: n° 65  
20 Gennaio 1961

F. Amman - R. Cerchia - M. Puglisi: ELEMENTI DI PROGETTO  
DI UN ELETTROSINCROTRONE DA 10 GeV.

1) Introduzione

In questa relazione vengono esaminati brevemente i dati essenziali di costo e le difficoltà tecniche da superare nella realizzazione di un sincrotrone per elettroni, ad alta frequenza di ripetizione ed energia massima di 10 GeV.

Come si vedrà le soluzioni prese in considerazione sono assolutamente convenzionali: qualora si dovesse passare ad un progetto costruttivo molti punti andrebbero riesaminati, e probabilmente in qualche caso sarebbe più conveniente, per ottenere migliori prestazioni, affrontare soluzioni tecniche nuove. Riteniamo però che tale riesame non sposterebbe sensibilmente l'entità dello sforzo finanziario o tecnico rispetto a quello valutato in questa relazione.

La scelta dei parametri della macchina, una volta fissata tentativamente l'energia massima in 10 GeV, viene fatta ricercandone i valori ottimi, in compromesso tra costo e prestazioni; alla base del calcolo di ottimo stanno alcune ipotesi, delle quali alcune fissate in via

puramente empirica, che e' bene ricordare qui. La frequenza di ripetizione e' stata fissata in 20 periodi al secondo; a frequenze minori le dimensioni radiali del fascio ad alta energia divengono proibitive e probabilmente si sarebbe costretti a ricorrere a dispositivi per ridurre l'antidamping delle oscillazioni di betatrone; a frequenze maggiori la potenza perduta per correnti parassite nei conduttori aumenta tanto da consigliare l'uso di conduttori Litz invece che in rame pieno. Un limite superiore e' fissato dalle perdite nel ferro del magnete.

Da queste considerazioni si puo' concludere che con conduttori in rame pieno il campo di frequenza e' ristretto tra 20 e 25 c/sec. Passando a conduttori Litz si potrebbe salire anche sino a 50+60 c/sec. Data la frequenza scelta, l'alimentazione e' in corrente alternata con bias; lo schema di alimentazione e' simile a quello usato per il protosincrotrone di Princeton e per l'elettrosincrotrone di Cambridge, con risonanza serie tra gruppi di settori del magnete e banchi di condensatori, in modo da non far salire a valori proibitivi la tensione della bobina verso massa. E' stata considerata la soluzione con corrente alternata senza bias, ma il maggior costo dei condensatori e del gruppo di alimentazione (aumentano le perdite in alternata) non e' compensato dall'assenza dell'induttore di protezione e del generatore di corrente continua. A proposito del tipo di alimentazione vi e' da dire che per un migliore sfruttamento del fascio accelerato sarebbe conveniente aumentare il rapporto tra il tempo durante il quale il fascio di elettroni viene tenuto entro una certa banda di energia, diciamo l'1%, ed il tempo totale, questo rapporto; che chiameremo fattore di utilizzazione del fascio, nel caso di alimentazione con corrente alternata, e' del 6% con uno spread in energia dell'1%. Esso potrebbe essere aumentato sino al

20+25%, con un no spread in energia dell'ordine del 0,1+0,2%, ricorrendo ad uno schema di alimentazione simile a quello usato nella maggior parte dei protosincrotroni esistenti, cioè con forma d'onda di corrente trapezoidale. Questo sistema non è mai stato usato con frequenze di ripetizione dell'ordine di 20+30 cicli per secondo; certamente in tal caso le difficoltà da superare sono notevoli ed anche il suo costo sarà maggiore di quello per le soluzioni convenzionali.

Riteniamo però che in sede di progetto costruttivo di qualunque tipo di macchina converrà considerare con molta attenzione questo punto, dato anche che il costo dell'impianto di alimentazione rispetto al costo totale di una macchina è dell'ordine del 10% o meno, e che quindi, anche qualora una soluzione del tipo prospettato significasse un raddoppio del costo dell'impianto di alimentazione, ciò si rifletterebbe semplicemente in un aumento del 10% del costo totale, contro un deciso miglioramento nelle prestazioni della macchina.

Il raggio medio della macchina è stato fissato in 100 m (il raggio di curvatura nei settori magnetici è di 71 m); in corrispondenza di questo valore del raggio si ha il minimo nel costo totale. Il calcolo di minimo costo è stato fatto con l'ipotesi di mantenere costanti le dimensioni del traferro ed il campo magnetico all'iniezione col variare del raggio. Con queste ipotesi gli elementi determinanti ai fini del calcolo di minimo costo sono: l'impianto a radiofrequenza ed il banco di condensatori (i cui costi aumentano al diminuire del raggio), l'iniettore e la galleria (i cui costi diminuiscono al diminuire del raggio).

I costi sono stati calcolati basandosi sui costi di macchine analoghe già realizzate: per gli edifici si sono presi come punto di riferimento i costi del CERN,

per la radiofrequenza sono stati chiesti dei prezzi indicativi all'industria, per il magnete e l'impianto di alimentazione si è fatto riferimento ai costi del sincrotrone di Frascati.

## 2) Il magnete

In questo calcolo preliminare si è scelta la stessa struttura magnetica del CERN: la sezione del magnete (riportata in fig. 1) è naturalmente diversa, essendo minore il campo magnetico massimo nel traferro. Anche la struttura meccanica dovrà essere diversa da quella del CERN, poichè nel nostro caso il magnete è di lamierino al silicio dello spessore di 0,35 mm.

La potenza dissipata nel ferro è di circa 200 kw; il raffreddamento forzato del ferro del magnete è quindi necessario; senza di esso infatti la sovratemperatura media della superficie del ferro rispetto all'aria circostante sarebbe di circa 20°C.

Per evitare dannosi gradienti di temperatura si pensa di usare piastre raffreddate ad acqua a contatto delle superfici superiore ed inferiore del C.

La bobina potrà essere di alluminio o di rame: la scelta tra i due materiali dipende essenzialmente dalla possibilità di approvvigionamento di sbarre quadre, col foro centrale per il passaggio dell'acqua di raffreddamento, di lunghezza tale da evitare le saldature.

La potenza totale dissipata nella bobina è di circa 1.150 kW; la portata d'acqua necessaria per il raffreddamento, ammettendo un salto massimo tra entrata e uscita di 5° C, è di 60 lt/sec. La tensione massima tra la bobina e massa, col tipo di alimentazione scelto, è di circa 4.000 V, e non presenta particolari problemi di isolamento. L'energia massima immagazzinata nel traferro del

magnete e' di circa  $2 \times 10^6$  J.

Il campo magnetico all'iniezione e' di 33 Gs; si devono prevedere quindi dei dispositivi che permettano di dare piccole variazioni ai parametri di focalizzazione all'iniezione.

### 3) L'impianto di alimentazione

Lo schema dell'impianto di alimentazione del magnete (fig. 2) e' uguale a quello usato per il protosincrotrone di Princeton; ogni gruppo di cinque settori del magnete e' in risonanza serie con un banco di condensatori e le venti sezioni cosi' ottenute sono in serie tra loro.

In parallelo ad ogni banco di condensatori vi e' un'impedenza di blocco (costituita da un circuito risonante parallelo) ad alta impedenza per la corrente alternata e bassa per la corrente continua.

Lo schema di alimentazione a risonanza serie permette di mantenere entro limiti ragionevolmente bassi la tensione tra la bobina e massa.

Il gruppo di alimentazione e' simile a quello usato per il nostro sincrotrone, a meno della potenza totale che risulta essere poco più del triplo, e cioè circa 2500 kW: raddrizzatori statici, gruppo rotante regolato in frequenza, trainato da un motore in c.c. da 2.500 kW, comprendente un alternatore a 20 Hz da 2000 kVA e una dinamo da 1.100 kW.

In sede di progetto costruttivo si potrà considerare la possibilità di aumentare la potenza totale del gruppo convertitore, aggiungendovi un alternatore a 60 Hz, che fornisca potenza, a tensione e frequenza stabilizzate, a tutti gli apparati ed impianti connessi con il Sincrotrone (radiofrequenza, iniettore, deflettore, controlli,

etc.). L'esperienza fatta a Frascati dimostra che il maggior costo di questa soluzione e' ripagato dalla maggior ripetibilità nel funzionamento della macchina, in quanto tutte le perturbazioni e i ripples sono sincroni. Dai calcoli di minimo costo per l'impedenza di blocco già eseguiti per il sincrotrone di Frascati, risulta che, sul mercato italiano, si ha il minimo costo con un circuito risonante in cui l'induttore abbia un'induttanza circa tripla di quella del magnete (in questo calcolo si fa l'ipotesi di mantenere costante la densità di corrente nell'induttore).

Il modo più conveniente di realizzare i 20 induttori di protezione o' accoppiarli magneticamente; una soluzione di questo tipo, totalmente in aria (soluzione adottata per il Sincrotrone di Frascati), viene ad essere un cilindro del diametro esterno di circa 3,30 m; altezza circa 2,60 e del peso di 110 ton.

Se si volessero fare 20 induttori distinti, ciascuno di essi vorrebbe a pesare circa 15 ton; il peso complessivo risulterebbe triplicato, e pure triplicati sarebbero il costo e la potenza dissipata.

#### 4) L'impianto a radiofrequenza

Le perdite per irraggiamento al termine del ciclo di accelerazione sono di 12,5 MeV/giro, il guadagno di energia all'iniezione e' di 0,33 MeV/giro e, a metà ciclo, e' di 1,3 MeV/giro.

Per avere una fase sincrona di 45°, e tenendo conto dell'effetto del tempo di transito nelle cavità a R.F., la tensione totale al termine del ciclo di accelerazione dev'essere di 20 MV su un giro.

Per la frequenza di lavoro della R.F. si e' scelta la 1.000<sup>a</sup> armonica della frequenza di rotazione,

corrispondente a 478 Me/sec.

Le cavità acceleratrici sono 40, e ciascuna lavora ad una tensione massima di 500 kV, esse sono cilindriche (lunghezza circa 0,3 m, diametro circa 0,5 m), eccitate nel modo fondamentale  $TM_{010}$ , con una spira. Lo schema di massima dell'impianto (fig. 3) comprende un generatore pilota ed un modulatore di ampiezza, un amplificatore da 50 kW, una cavità sincronizzante cui sono connesse, tramite altri 40 amplificatori da 50 kW, le 40 cavità acceleratrici.

Ciascuna cavità, compresa quella di sincronizzazione, deve essere provvista di un dispositivo di accordo automatico con un campo di variazione di circa  $\pm 10^\circ$  in fase.

La potenza massima per cavità, a 500 kV, è di circa 25 kW; la potenza totale a R.F. risulta essere di 2 MW; la potenza media assorbita dalla rete può essere valutata in circa 700-900 kW.

Gli amplificatori da 50 kW sono prodotti commercialmente.

## 5) Iniettore

L'iniettore è un acceleratore lineare da 70 MeV. Il costo e le caratteristiche ci sono stati forniti dalla HVEC, e sono simili, a parte il fattore di scala, a quelli dell'iniettore attualmente usato a Cornell.

Iniettando 200 mA (valore di corrente ottenuto a Cornell entro una banda di energia dell'1%) per 2µsec (tempo corrispondente a poco meno di un giro) si dovrebbero catturare ed accelerare circa  $10^{12}$  elettroni per impulso; se però si tiene conto del limite di intensità attualmente raggiunto a Frascati, e si fa l'ipotesi che esso sia dovuto ad effetti di risonanza dovuti agli ioni del gas residuo, è più realistico pensare ad una intensità mag



sima di  $5 \times 10^{10} \cdot 10^{11}$  elettroni accelerati per impulso. L'emittanza del fascio in uscita dall'iniettore è bassissima, dell'ordine di  $5 \times 10^{-6}$  rad cm; l'accettanza della macchina d'altra parte è di alcuni ordini di grandezza maggiore (dell'ordine di  $5 \times 10^{-2}$  cm rad per il modo di oscillazione orizzontale, e  $10^{-2}$  cm rad per il modo verticale), quindi l'ottica di iniezione non presenta particolari problemi; bisogna soltanto curare che il sistema di iniezione, compreso il deflettore, sia acromatico.

#### 6) Impianto di vuoto e ciambella

La ciambella dovrà essere simile a quella del sincrotrone di Frascati; per l'impianto di vuoto si pensa a 50 stazioni di pompaggio con pompe da 1000 litri/sec.

#### 7) Edifici

Per gli edifici si è presa in considerazione la stessa disposizione realizzata al CERN, e cioè una galleria del diametro medio di 200 metri, che ospita la macchina, ed un complesso di edifici, per un totale di 7.000 mq. comprendente la sala esperienze, la sala controllo, la sala macchine, laboratori, etc.

I costi, valutati sulle indicazioni dateci da un'impresa edile, comprendono tutte le installazioni fisse, ed in particolare per la galleria: il basamento in calcestruzzo per la macchina, impianti di illuminazione e di termoventilazione, apparecchi di sollevamento; per gli edifici: impianti di illuminazione e di condizionamento, 2 gru a ponte da 20 tonn. ciascuna, impianti idraulici vari, isolamento termoacustico, basamenti per il gruppo di alimentazione.

8) Personale

Una macchina come quella qui descritta richiede un impegno finanziario e di personale dello stesso ordine di grandezza di quello richiesto dai due grandi protosincrotroni oggi esistenti (CERN e Brookhaven); il personale impiegato per la realizzazione del secondo assomma a circa 600 uomini-anno; per il primo ci si avvicina a 1000 uomini-anno.

Nel nostro caso si può pensare ad un impegno pari a quello di Brookhaven, e cioè 600 uomini-anno, da suddividersi probabilmente in cinque anni

9) Stima dei costi (in milioni di Lire italiane)

a) Edifici		ML.	3.400
Galleria	ML.	1.800	
Edifici annessi	'	1.500	
Impianti elettrici	'	100	
b) Acceleratore lineare (70 MeV)		'	1.400
c) Magnete		'	1.600
d) Impianto di alimentazione		'	1.600
Condensatori	ML.	700	
Induttore di protezione	'	400	
Gruppo convertitore	'	500	
e) Impianto a Radio Frequenza		'	1.880
41 cavità acceleratrici	ML.	200	
41 amplificatori 50 kW	'	1.430	
Controlli, cablaggi e pilota	'	250	
f) Sistema di vuoto		'	600
50 gruppi di pompaggio	ML.	250	
Ciambella	'	350	
g) Controlli		'	700
h) Progetti preliminari e studi su modelli		'	600
i) Personale		'	<u>1.500</u>
	Totale		ML. 13.280

ELETTROSINCROTRONE 10 GeV - TABELLA DATIMagnete e alimentazione

Raggio di curvatura nei magneti	$R_0 = 71 \text{ m}$
Raggio medio della macchina	$R = 100 \text{ m}$
Focheggiamento forte, struttura	$\frac{1}{2}F\frac{1}{2}D\frac{1}{2}D\frac{1}{2}F$
Numero dei settori magnetici	$N = 100$
Sezioni diritte	20 di 3 m 80 di 1,53 m
Sezione del traferro utile	circa $150 \times 100 \text{ mm}^2$
Numero delle oscillaz* di betatro- ne per giro	$Q_r = Q_v = 6,25$
Momentum compaction	$\alpha = 0.026$
Campo magnetico sull'orbita di equil. all'iniez.	$B = 33 \text{ Gs}$
Campo magnetico sull'orbita di equil. massimo	$B = 4.700 \text{ Gs}$
Energia max immagazzinata nel traferro	$W_{\text{max}} = 2 \times 10^6 \text{ J}$
Peso ferro	1.100 tonn.
Peso bobina	110 tonn.
Potenze dissipate: nella bobina	1.120 kW
nel ferro	190 kW
nei condensatori	250 kW
nell'induttore di prote- zione	520 kW
nello connessioni	120 kW
Potenza totale condensatori	84 MVA
Peso approssimativo induttore di protezione	110 tonn.
Gruppo di alimentazione:	
Alternatore monofase 20 Hz, 2.000 kVA - 4.000 V - 500 A	
Dinamo 1.100 kW - 690 A - 1600 V	

Radiofrequenza

Numero di cavità acceleratrici	40
Frequenza	478 Mc/sec
Tensione max per cavità	500 kV

Tipo di cavità: cilindrica, eccitata nel modo  $TM_{010}$   
 Fase sincrona al termine del ciclo di accelerazione  $\phi_s = 45^\circ$   
 Potenza max dissipata per cavità alla max tensione 25 KW  
 Potenza disponibile per cavità 50 KW

Varie

Perdita di energia per giro alla max energia  $\Delta E_g = 12,5 \text{ MeV/giro}$   
 Guadagno di energia per giro all'iniezione  $\Delta E_{in} = 0,33 \text{ MeV/giro}$   
 Guadagno di energia per giro a metà ciclo  $\Delta E_M = 1,3 \text{ MeV/giro}$   
 Costante di tempo di antidamping delle oscillazioni radiali di betatrone  $\tau = 3 \text{ msec}$

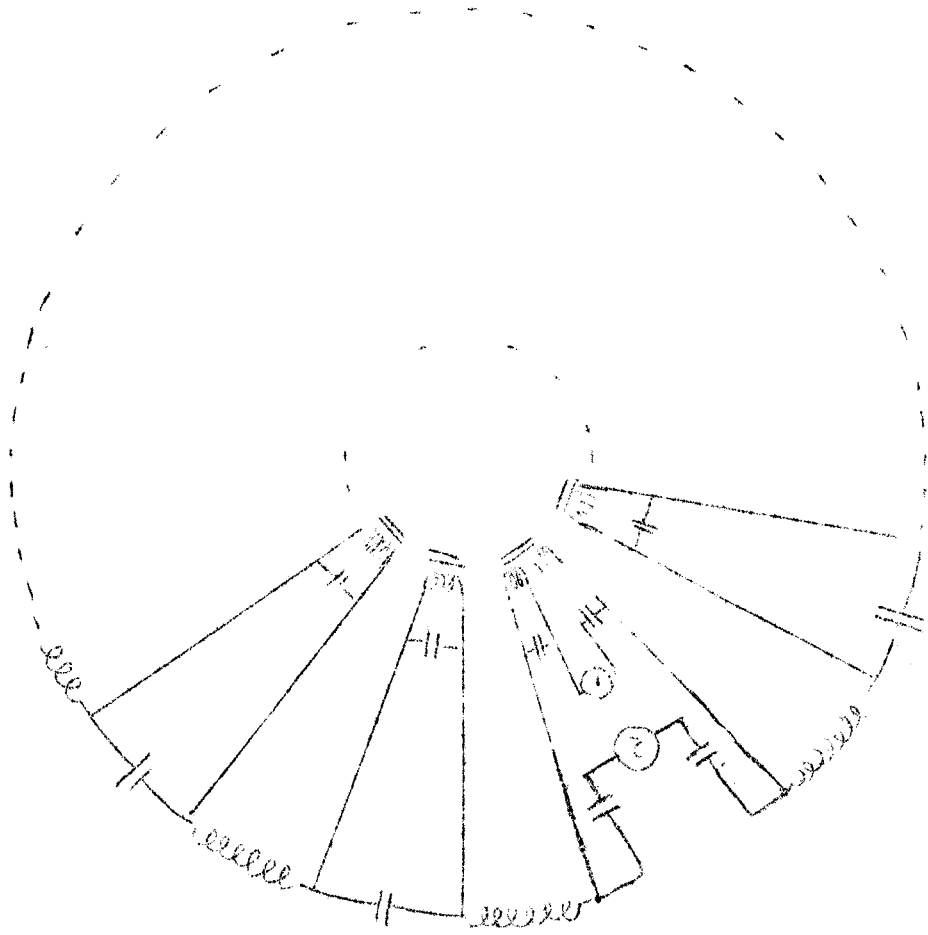


FIG. 2  
SCHEMA ALIMENTAZIONE

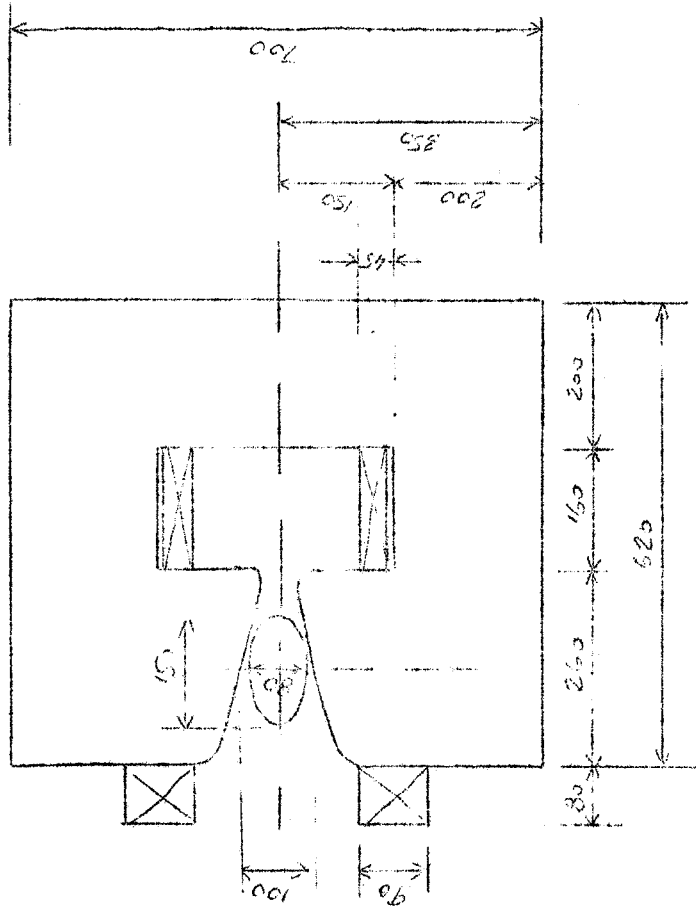


FIG. 1  
SEZIONE DEL MAGNETE

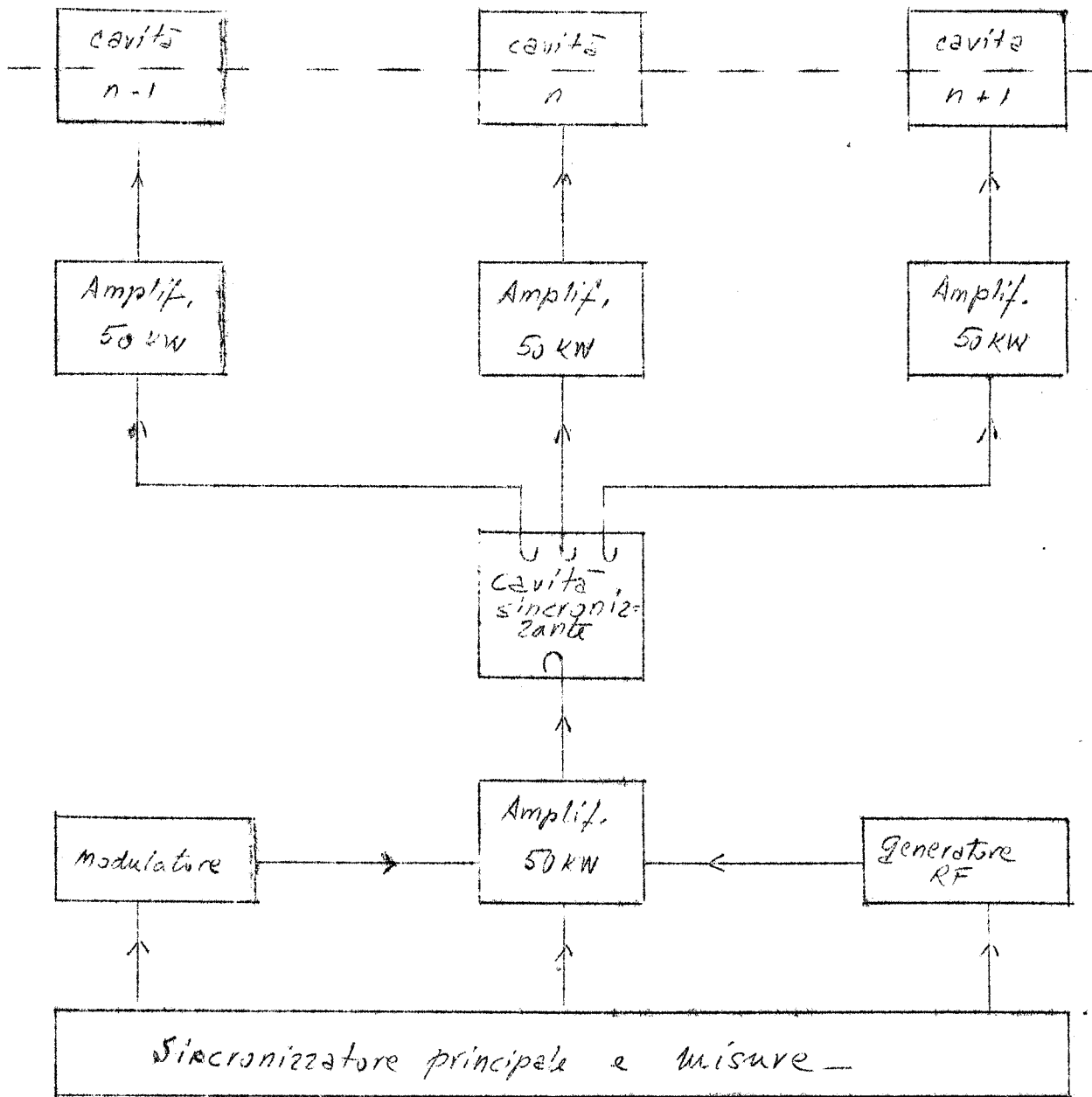


FIG. 3