

LNF - 63/72
28. 11. 1963.

A. Massarotti, M. Puglisi e F. Tazzioli:
STUDIO DEL DEFLETTORE DI ADONE. -

Nota interna: n. 220

LNF-63/72

Nota interna: n° 220
28 Novembre 1963

A. Massarotti, M. Puglisi, F. Tazzioli: STUDIO DEL DEFLETTORE DI ADONE.

1. PRESTAZIONI RICHIESTE.

Uno dei problemi più delicati per la realizzazione di Adone (cfr. bibl. 1,2,3) è costituito dalla parte finale dell'ottica di iniezione e cioè dai deflettori che devono rispettivamente immettere gli elettroni e i positroni nella macchina. I deflettori fanno parte sia dell'ottica di iniezione, sia dell'anello che costituisce la macchina vera e propria, Fig.1, e pertanto le prestazioni cui debbono soddisfare dipendono dalla posizione geometrica e dalle caratteristiche dei fasci che si debbono iniettare.

In Fig.2 sono riportate le caratteristiche geometriche

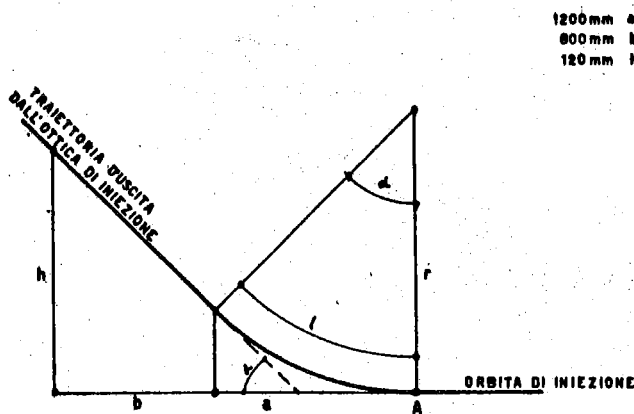


FIG.2

1200 mm a
800 mm b
120 mm h

della traiettoria che si vuol ottenere; con riferimento alle notazioni della figura citata, si ha che lo scostamento h , della traiettoria del fascio in uscita dall'ottica di iniezione, dall'orbita di iniezione, dev'essere $h = 120$ mm, a una distanza $a + b = 2.000$ mm dal punto A in cui la traiettoria di iniezione è tangente all'orbita di iniezione. La lunghezza $a + b$ corrisponde all'incirca

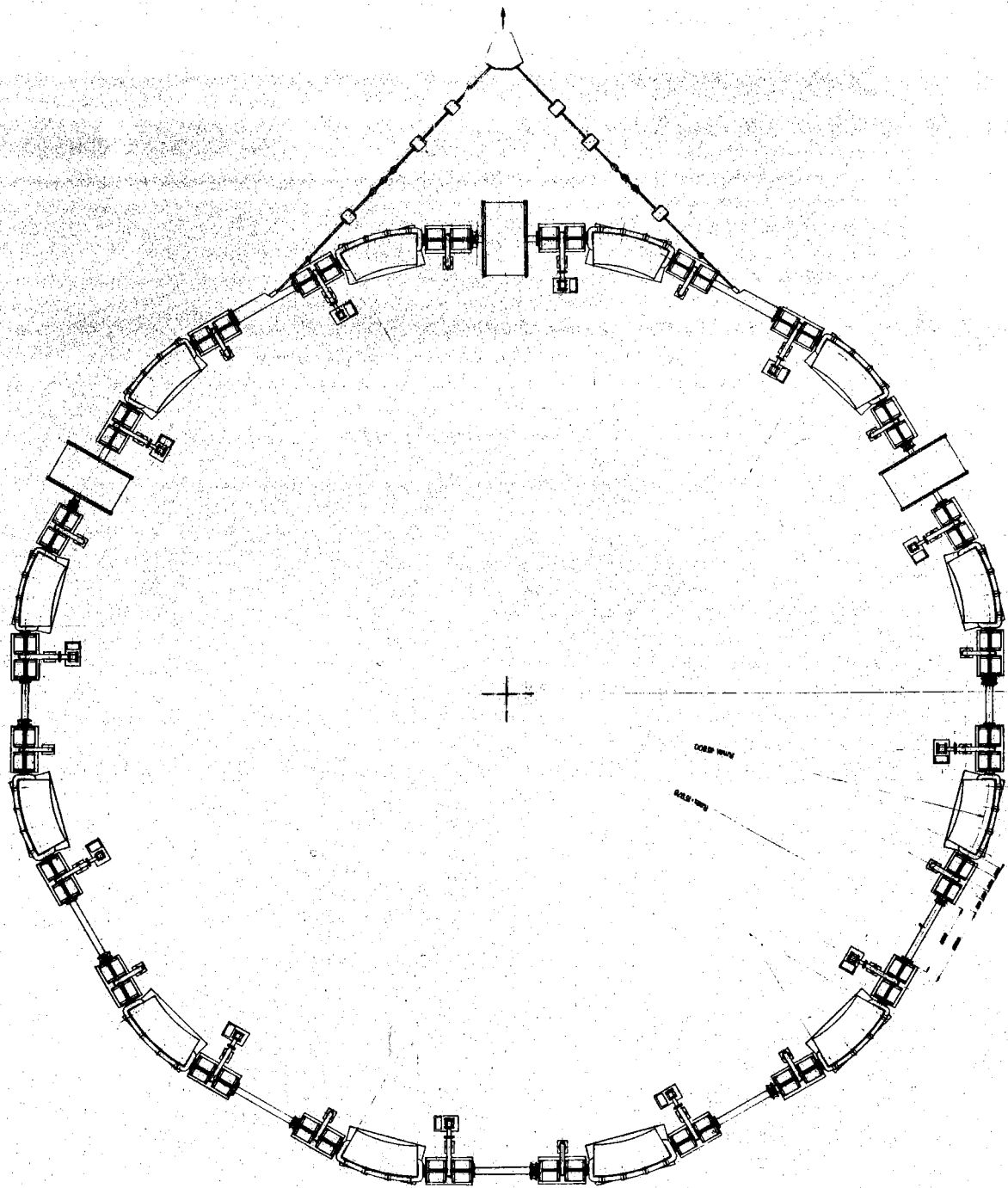


FIG. 1

alla lunghezza di una sezione diritta e quindi la distanza h è determinata dall'ingombro dell'ultimo magnete che precede la sezione diritta d'iniezione. Analoghe considerazioni di ingombro hanno fatto scegliere per a , lunghezza effettiva in cui avviene la deflessione, il valore $a = 1200$ mm.

Da questi dati, con facili considerazioni geometriche, si ricava che il raggio di curvatura della traiettoria della particella, all'interno del deflettore, dev'essere pari a $r \approx 14.000$ mm, mentre la lunghezza l dell'arco di circonferenza è $l \approx 1.200$ mm e l'angolo α è pari a $\approx 5^\circ$. La deflessione degli elettroni e dei positroni può essere ottenuta applicando agli stessi, nella zona di lunghezza l , o un campo elettrico E_r , giacente nel piano del moto e normale punto per punto all'arco di circonferenza che costituisce la traiettoria, o un campo magnetico B_z , normale al piano del moto, o, infine, una combinazione di E_r e B_z . Detto p il modulo del momento delle particelle da iniettare, nel sistema MKS:

$$(1) \quad |E_r| = \frac{pe}{er}$$

oppure

$$(2) \quad |B_z| = \frac{p}{er}$$

o, più in generale:

$$(3) \quad |B_z| + \left| \frac{E_r}{c} \right| = \frac{p}{er}$$

Il verso dei campi dipende ovviamente dal verso secondo il quale si vuole effettuare la deflessione e dal segno della carica rispettivamente dell'elettrone e del positrone. Nel seguito, per quanto detto, ci riferiremo esclusivamente alla deflessione degli elettroni e con B_z , per la 2 e la 3, indicheremo il modulo del campo magnetico equivalente totale necessario alla deflessione.

Sia $p = 400$ MeV/c; ricordando che $r \approx 14$ m si ha:

$$(4) \quad B_z \approx 950 \text{ gauss}$$

Questo valore del campo deve essere ottenuto in un certo volume, nella zona in cui si effettua la deflessione, determinato dalle dimensioni del fascio di elettroni in ingresso al deflettore e dalle proprietà ottiche del fascio stesso che si devono conservare. Consideriamo l'intersezione di un piano normale in un qualsiasi punto alla traiettoria curva di lunghezza l , col piano di Fig.2.

Lungo questa intersezione la sezione della traiettoria

4.

d'iniezione è definita da un punto e supponiamo che in questo punto vi sia il campo di modulo B_{oz} , corrispondente al massimo valore del campo. Per conservare le caratteristiche ottiche anzidette, dato un diametro del fascio di $\sim 5,7$ mm, è necessario che, per uno spostamento di 10 mm, lungo l'intersezione dei due piani anzidetti, centrato intorno al punto che definisce la traiettoria d'iniezione, il rapporto tra il valore del campo sul punto considerato, B_z ed il massimo valore che esso assume in tale zona, B_{oz} , si mantenga costante entro l'1%; si abbia cioè:

$$(5) \quad \frac{B_{oz} - B_z}{B_{oz}} \leq 10^{-2}$$

Altre considerazioni alle quali bisogna soddisfare sono date dal fatto che le proprietà ottiche della macchina sono tali per cui un elettrone, dopo un certo numero di giri (4+7), effettuati a partire dall'istante in cui è stato iniettato, ripassa nella zona di deflessione in cui è avvenuta l'iniezione. Ciò significa che la zona di deflessione non può essere separata dalla camera a vuoto della macchina mediante un setto e che, comunque, non vi possono essere ingombri di qualsiasi natura in senso radiale tra il volume in cui avviene la deflessione e la camera a vuoto della macchina. Sempre dalle dimensioni del fascio deriva che l'altezza libera deve essere di almeno 20 mm nella zona considerata, che, come abbiamo visto, dev'essere completamente aperta verso la camera a vuoto, e si può stimare che si debba estendere per almeno 30 mm dal centro della zona utile nella direzione opposta.

Da questo si origina ovviamente un problema di campo disperso verso l'interno della macchina; questo campo si deve attenuare il più rapidamente possibile radialmente, per evitare che l'orbita di equilibrio delle particelle già accumulate possa essere perturbata.

Sempre dal fatto che gli elettroni ripassano dopo 4+7 giri in una parte del volume in cui avviene la deflessione, deriva la richiesta che il campo deflettente sia impulsato, in maniera che sia "acceso" solo durante il tempo strettamente necessario per la deflessione e "spento" durante tutto il resto del tempo. Nell'ipotesi quindi che il periodo di rivoluzione di un elettrone nella macchina sia $T = 3,3 \cdot 10^{-7}$ sec, il tempo utile di iniezione è all'incirca dato dal tempo che intercorre tra l'istante in cui il primo elettrone viene iniettato nella macchina e l'istante in cui lo stesso elettrone rientra nella zona di deflessione, cioè, per quanto detto, esso corrisponde al tempo impiegato da un elettrone a percorrere 6 giri ed è pari a $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ sec; durante questo tempo il campo deve rimanere costante.

Ammettendo che lo "spegnimento", che deve avvenire il più rapidamente possibile, richieda un tempo dell'ordine di mezzo giro cioè:

$$(6) \quad \tau_d = 2 \cdot 10^{-7} \text{ sec}$$

e che "l'accensione", la cui rapidità non ha eccessiva importanza, richieda un tempo dello stesso ordine di grandezza del precedente, si ha che la durata totale τ_i dell'impulso che provoca la deflessione dev'essere:

$$(7) \quad \tau_i = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ sec}$$

La frequenza di ripetizione prevista è di 0.6+1 imp/sec; il dimensionamento delle varie parti viene però eseguito per una frequenza di ripetizione di 5 imp/sec. e cioè:

$$(8) \quad f_r = 5 \text{ imp/sec}$$

Un altro requisito che bisogna fissare è la massima variazione in ampiezza del valore del campo consentita tra un impulso e l'altro.

Consideriamo per questo la Fig.3 che ripete sostanzialmente la Fig.2; con riferimento alle notazioni riportate sulla figura stessa, si ha che una variazione del campo magnetico B_z lungo tutta la traiettoria di deflessione, provoca una variazione del raggio di curvatura secondo la relazione

$$(9) \quad - \frac{\Delta B_z}{B_z} = \frac{\Delta r}{r}$$

Detto allora Δx lo scostamento dalla traiettoria imperturbata, si ha con semplici passaggi trigonometrici e

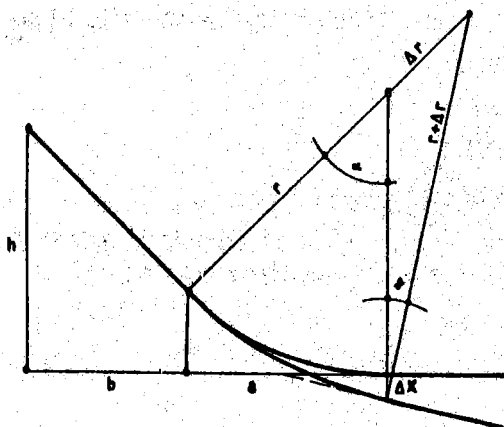


FIG.3

trascurando i Δx di ordine superiore al primo:

$$(10) \quad \Delta r = \frac{\Delta x}{1 - \cos \alpha}$$

con

$$(11) \quad \text{tg } \alpha = \frac{2h}{a + 2b}$$

D'altra parte, per uno scostamento Δx , la tangente alla traiettoria perturbata, forma un angolo ϑ con la tangente alla traiettoria imperturbata, tale che, per ϑ piccoli:

$$(12) \quad \Delta r = r \frac{\vartheta}{\text{Sen } \alpha}$$

6.

Nel caso in esame il massimo Δx , consentito dalla distribuzione del campo all'interno del deflettore è:

$$(13) \quad (\Delta x)_{\max} = 5 \text{ mm}$$

mentre il massimo angolo ϑ che si può ammettere, a causa delle proprietà ottiche della macchina, è:

$$(14) \quad (\vartheta)_{\max} = \pm 2 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

Ricordando i valori dati per a, b, h, r , si deve avere:

$$(15) \quad (\Delta r)_{\max}' \leq 1.350 \text{ mm}$$

per la limitazione imposta dalla distribuzione del campo all'interno del deflettore;

$$(16) \quad (\Delta r)_{\max}'' \leq 270 \text{ mm}$$

per la limitazione imposta dalle proprietà ottiche della macchina. La stabilizzazione deve essere quindi:

$$(17) \quad \frac{\Delta B_z}{B_z} = \pm 2 \times 10^{-2}$$

Riportiamo qui di seguito, con riferimento alle notazioni finora date, i dati di progetto relativi al deflettore:

$$a = 1200 \text{ mm}$$

$$b = 800 \text{ mm}$$

$$h = 120 \text{ mm}$$

$$l = 1200 \text{ mm}$$

$$r = 14000 \text{ mm}$$

$$B_z = 950 \text{ Gauss} \quad (p = 400 \frac{\text{MeV}}{c})$$

$$\frac{B_{oz} - B_z}{B_{oz}} \leq 10^{-2} \quad (\text{per uno spostamento radiale di } \pm 5 \text{ mm})$$

$$\tau_d \leq 2 \cdot 10^{-7} \text{ sec}$$

$$\tau_f = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ sec}$$

$$\frac{\Delta B_z}{B_z} \leq \pm 2 \cdot 10^{-2}$$

B_z deve decrescere quanto più rapidamente possibile dalla fine della zona utile, per uno spostamento radiale verso la camera a vuoto.

Il deflettore dev'essere radialmente aperto con una altezza di 20 mm verso la camera a vuoto e per una lunghezza di 30 mm nella direzione opposta a partire dal centro della zona utile.

2. STRUTTURA PROPOSTA PER IL DEFLETTORE.

L'analisi delle prestazioni richieste conduce immediatamente alla conclusione che, qualunque sia il tipo di soluzione adottata, la potenza che il deflettore deve mettere in gioco è sempre molto grande.

Difatti, se si suppone di dover instaurare una induzione B pari a ~ 1000 gauss, nel volume utile di deflessione (*), entro il tempo prescritto, si trova che la potenza da impiegare è:

$$W = \frac{dE}{dt} \sim \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{(1/2)(B^2/\mu) V}{\tau_r} = \frac{0,5 \times (0,95)^2 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 45 \cdot 10^{-9}} =$$

$$= \sim 9,7 \cdot 10^7 \text{ watt}$$

dove con τ_r è stato indicato il tempo di riempimento del volume di deflessione, assunto pari a 45 n sec. Ovviamente, per generare il campo magnetico delle caratteristiche volute nella zona assegnata, occorre produrre il campo magnetico entro un volume notevolmente maggiore (~ 10 volte) e questo fatto si riflette sfavorevolmente sulle potenze in gioco, che possono venire così facilmente decuplicate. A valori così elevati della potenza istantanea corrispondono anche dei valori notevoli per le potenze medie che vengono applicate al deflettore stesso.

(*) - Il volume utile di deflessione è dato dall'area definita dal prodotto delle lunghezze lungo le quali il campo magnetico rimane costante entro l'1% del valore massimo, supposte uguali sia in orizzontale che in verticale, per la lunghezza della traiettoria interna al deflettore ed è pari a:

$$V_u = 10^{-2} \cdot 10^{-2} \cdot 1,2 = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Si noti che, per ottenere il volume utile di deflessione così definito, in cui il campo magnetico soddisfi alle prestazioni richieste, dato anche che l'apertura in verticale dev'essere di almeno $2 \cdot 10^{-2}$ m si può stimare che il volume in cui dev'essere instaurato il campo magnetico massimo dev'essere pari almeno a:

$$V = 2 \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2 = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

e questo è quindi il volume di deflessione considerato.

Difatti, supponendo $\tau_i = 2,4 \mu\text{sec}$ la durata di ogni impulso e di lavorare con una cadenza $f_r = 5$ impulsi al secondo, la potenza media da impegnare è:

$$\bar{W} = f_r W \tau_i \approx 12 \text{ KW}$$

Le sommarie considerazioni ora effettuate ci mostrano quindi come la progettazione di tutto il deflettore vada fatta tenendo conto sia delle notevolissime potenze in gioco, sia delle sollecitazioni elettromeccaniche conseguenti. Le soluzioni da adottare per realizzare un deflettore che risponda alle prestazioni richieste non sono molte, anche per il fatto che non è conveniente ricorrere a deflessioni prevalentemente elettrostatiche, atteso il notevole valore della tensione che si dovrebbe applicare agli elettrodi di deflessione.

Difatti in questo caso il gradiente elettrico dovrebbe essere pari a $E = 285 \text{ KVolt/cm}$ il che richiede una tensione pari ad almeno 600 KV.

Chiaramente non è agevole usare tensioni così alte e soprattutto queste pongono delle notevoli limitazioni sulle dimensioni degli elettrodi e dei passanti che devono funzionare sotto alto vuoto. Più facili da realizzare appaiono le soluzioni che impongono la deflessione magnetica o quella mista; difatti in questo secondo caso un campo di 1000 Gauss risulta sufficiente. Si è condotti in definitiva a pensare alla costruzione di un magnete pulsato.

Due sono le soluzioni possibili: magnete pulsato caricato con ferriti⁽⁴⁾ e magnete pulsato in "aria"⁽⁵⁾ (nel nostro caso sotto vuoto).

La soluzione di caricare il magnete deflettente con le ferriti lascia molte perplessità in quanto il comportamento delle ferriti, poste sotto vuoto e notevolmente sollecitate, sia dal punto di vista termico che elettrico, non è ancora sicuramente conosciuto.

Per questa ragione i primi studi sono stati fatti cercando di evitare la soluzione con ferriti e ci si è rivolti verso la soluzione tipo "magnete pulsato in aria" cioè verso una struttura funzionante sotto vuoto e senza particolari difetti elettrici.

Questo tipo di soluzione, certamente difficile dal punto di vista elettrico, offre notevoli vantaggi dal punto di vista del vuoto e delle possibilità di degassare opportunamente tutta la struttura.

Date le dimensioni geometriche della zona di deflessione (sezione $10^{-2} \times 10^{-2} \text{ m}$, lunghezza $1,2 + 1,8 \text{ m}$ con gap aperto radialmente per un'altezza di $2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ su tutta la lunghezza) ed i tempi di salita e discesa richiesti, non sembra facile realizzare un magnete pulsato di tipo convenzionale e pertanto è stata studiata una struttura radicalmente diver-

sa, basata sul concetto delle linee di trasmissione.

In altri termini la deflessione viene ottenuta facendo passare le particelle da deflettere nel campo prodotto da una linea di trasmissione. Il meccanismo di deflessione può essere descritto come segue:

Nello schema dato in Fig.4 è rappresentata una linea di

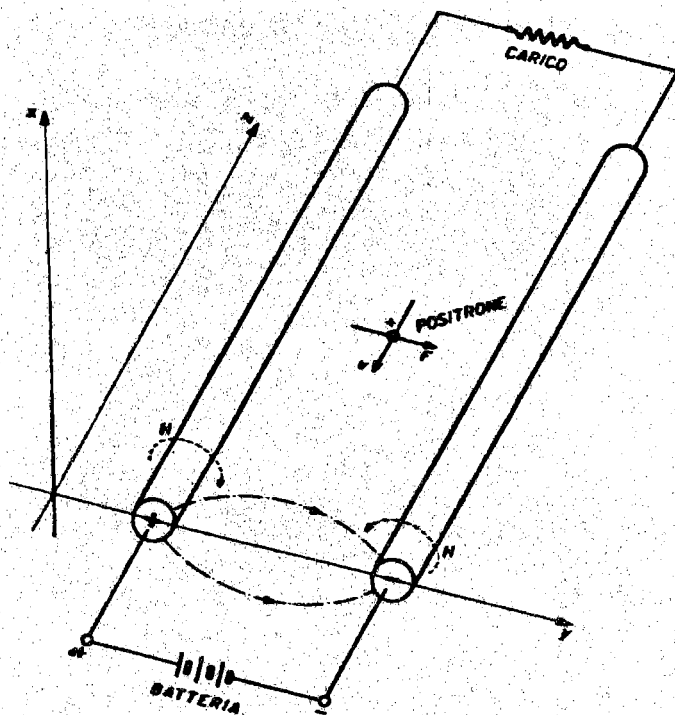


FIG.4

propagazione uniforme, che giace nel piano ZY degli assi di riferimento e che è parallela all'asse Z. Supponiamo di alimentare da un estremo con una batteria e di chiudere la linea all'altro estremo su di una resistenza. La polarità della batteria è scelta in modo da creare, tra i conduttori, il campo elettrico diretto come l'asse Y ed il campo magnetico tra i conduttori nel verso opposto dell'asse X.

Consideriamo adesso una particella carica positivamente, per esempio un positrone, che giaccia nella porzione del piano YZ compresa tra i conduttori della linea

e che sia animata da una velocità diretta in verso opposto a quello definito dall'asse Z.

In questo caso le azioni della forza di Lorentz e del campo elettrico si sommano esercitando sulla particella una forza diretta come l'asse Y.

Con le notazioni date in Fig.4 questa forza vale:

$$F_y = (E_y + v_r B_x) e$$

dove con E_y e B_x si sono indicati rispettivamente il valore del campo elettrico e della induzione magnetica nel punto occupato dalla particella.

A conclusione di quanto detto per illustrare il meccanismo di deflessione, vogliamo osservare che le azioni del campo elettrico e del campo magnetico si sommano, agli effetti della deflessione da realizzare, se la velocità della particella è opposta a quella dell'onda elettromagnetica che si propaga lungo la linea deflettente all'atto della sua eccitazione. Occorre notare che il funzionamento in corrente continua

ed il funzionamento impulsato danno luogo sempre a campi puramente trasversali che differiscono però nella forma geometrica delle linee di flusso. Nel funzionamento impulsato infatti lo "skin effect" e la presenza di superfici metalliche intorno ai conduttori modificano la forma dei campi prodotti. Nel funzionamento in corrente continua i valori del campo elettrico e del campo magnetico possono essere scelti arbitrariamente in quanto i valori delle tensioni e delle correnti che li generano sono legati tra di loro solo dal valore della resistenza ohmica di chiusura. Nel nostro caso però il funzionamento è di tipo impulsato e si vuole che l'ampiezza dell'impulso e cioè l'ampiezza dei campi ad esso associati sia costante entro $\pm 2\%$ per tutta la durata dell'impulso stesso.

Conseguentemente i valori della tensione e della corrente, che eccitano la linea, vengono ad essere definiti dalla impedenza caratteristica della linea stessa, che, per di più, deve risultare adattata al carico, se si vogliono evitare riflessioni.

Sfortunatamente i valori di impedenza caratteristica che si possono ottenere con linee di ingombro trasversale compatibile con tutto il progetto della macchina, sono troppo elevati e quindi per avere corrente e campi magnetici del valore voluto, occorre aumentare molto la tensione di eccitazione, il che rende il deflettore di difficile costruzione specie per quanto riguarda i passanti ad alta tensione che devono lavorare sotto alto vuoto.

Così, per dare l'idea dei valori che si possono assumere per l'impedenza caratteristica, riportiamo la formula valevole per una linea costituita da due conduttori a sezione rettangolare. Si ha:

$$Z_0 = 120\pi \frac{a}{b} \quad \text{per } a \ll b$$

dove a è la distanza fra i conduttori e b la dimensione maggiore dei conduttori che devono avere spessore trascurabile rispetto ad a .

Si comprende quindi come per avere circa 10.000 Amp di corrente, che, come vedremo nel seguito generano un campo di ~ 1000 gauss nel volume di deflessione, si debba ricorrere ad impulsi di tensione di circa $Z_0 \times 10000$ Volt. Inoltre, come già detto, le prestazioni imposte al deflettore da costruire, comportano il fatto che il deflettore stesso deve essere completamente trasparente alle particelle lungo la direzione radiale.

Conseguentemente la linea deflettente dovrà essere costituita da 4 conduttori, a due a due in parallelo, come indicato in Fig. 5.

Con questa disposizione si ottiene una certa riduzione della impedenza caratteristica che però non è sufficiente

ai nostri scopi, in quanto difficilmente si riesce a scendere sotto i $70 - 50 \Omega$.

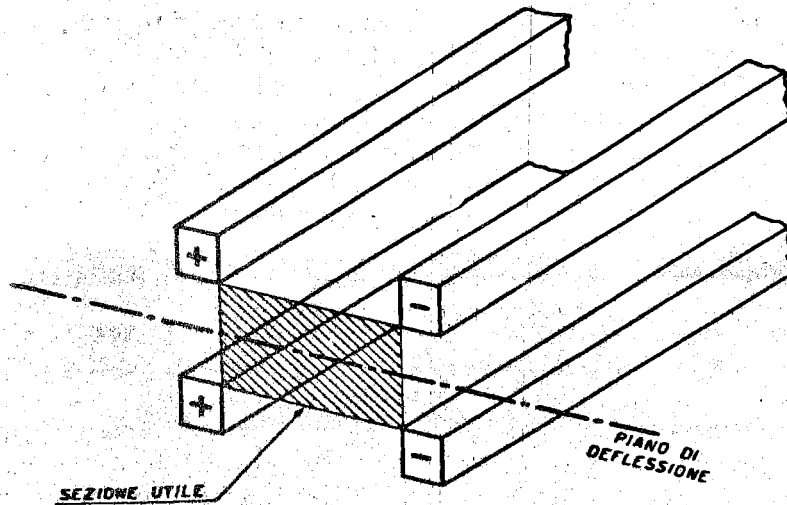


FIG. 5

In vista dei notevoli vantaggi che una simile struttura offre, sia dal punto di vista del funzionamento e del trattamento di degassaggio, oltre che dal comportamento elettrico perfettamente lineare, si è cercato di vedere se non fosse possibile ridurre l'impedenza caratteristica di una simile linea per mezzo di carichi capacitivi

semiconcentrati, disposti periodicamente lungo la linea stessa.

Una possibile struttura basata su questo concetto è quella mostrata schematicamente in Fig. 6.

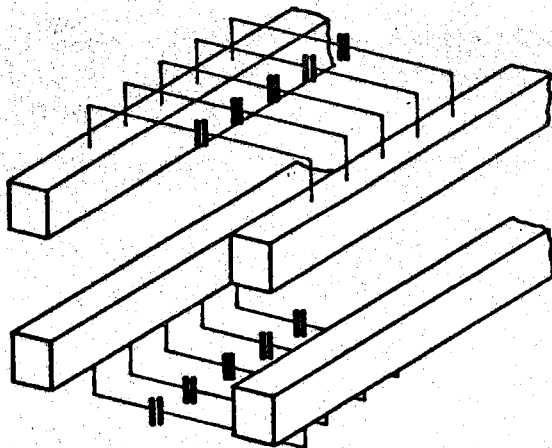


FIG. 6

Con la disposizione indicata, la linea perde il carattere di linea uniforme a costanti distribuite e diviene una linea a costanti semiconcentrate, fortemente dispersiva e nella quale il ritardo caratteristico viene a dipendere dalla geometria della costruzione. Attenendosi ad una schematizzazione piuttosto grossolana, si può ritenere che la cellula equivalente ad ogni sezione di linea sia quella riportata in Fig. 7.

Conseguentemente il comportamento della linea tenderà

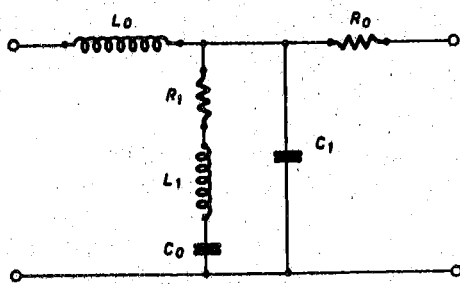


FIG. 7

al comportamento di un filtro passa basso, di tipo a K costante, fino a quelle frequenze per le quali gli elementi L_1 e C_1 hanno effetti trascurabili rispetto a quello degli elementi L_0 C_0 . Quindi entro i limiti di validità di questa ipotesi (e cioè entro la banda passante fondamentale della linea in questione) si potranno ottenere i desiderati valori della impedenza carat-

teristica.

La progettazione di simili linee non è facile, ma molte difficoltà possono essere sormontate con l'ausilio del tracciamento dei campi per mezzo della vasca elettrolitica. Ciò è lecito in quanto, entro la sezione compresa fra i quattro conduttori, il campo elettromagnetico può considerarsi, con ottima approssimazione, come "trasversale elettromagnetico" e quindi descrivibile mediante una funzione armonica delle coordinate.

Poichè il campo elettromagnetico deflettente deve avere le prescritte caratteristiche almeno nella zona di deflessione, lo studio alla vasca elettrolitica permette di rilevare empiricamente quale deve essere la forma dei conduttori che realizzano il campo deflettente e di calcolare la riluttanza dei tubi di flusso che si vengono a creare. (Notiamo che per tener conto del funzionamento impulsato, occorre simulare, nello studio alla vasca, anche la struttura metallica che agisce da schermo intorno al deflettore stesso).

Nota che sia la riluttanza di un tubo di flusso, per una data lunghezza di linea, è facile valutare quale deve essere il valore della capacità da associare all'elemento di linea per ottenere l'impedenza caratteristica voluta.

Sempre nell'ipotesi di lavorare con frequenze che cadono entro il primo passa banda della struttura in questione ed indicando con L_0 e C_0 i valori della induttanza e della capacità di ciascun elemento della linea, si può scrivere per l'impedenza caratteristica:

$$(1) \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$$

e per il ritardo caratteristico di ogni elemento:

$$(2) \quad \tau_r' = \sqrt{L_0 C_0}$$

Dal numero degli elementi posti in serie si può dedurre il ritardo totale della linea.

Notiamo come le relazioni (1) e (2) siano molto importanti in quanto, essendo Z_0 e τ_r' facilmente misurabili, permettono di arrivare con pochi tentativi al dimensionamento di tutta la linea. La maggiore o minore attitudine di una data struttura a dare le prestazioni volute può essere definita in vari modi.

Un parametro che ci sembra particolarmente utile a questo fine è il rapporto dimensionale I/B , dove con I si è indicata la corrente che fluisce nella linea adottata e con B il valore della induzione al centro della zona di deflessione. Il valore di questo rapporto è ricavabile direttamente dai rilievi fatti alla vasca elettrolitica e finisce per essere il parametro che permette di individuare tutta la struttura.

3. I PROFILI DEI CONDUTTORI.

Il criterio di scelta del profilo dei conduttori è basato sulla realizzazione del miglior compromesso fra due esigenze contrastanti. La prima di queste è la necessità di una zona utile di campo magnetico, nella sezione compresa tra i conduttori, che ha, come abbiamo visto, le seguenti caratteristiche:

- a) ampiezza, in senso radiale e verticale, circa 10 mm;
- b) costanza del valore del modulo del campo magnetico, nella zona utile, entro l'1% del valore massimo, che si raggiunge, per ovvie ragioni di simmetria, nel punto del piano mediano in cui il campo magnetico è puramente verticale.
- c) Massima riduzione del campo al di fuori della zona utile verso l'asse della ciambella.

La seconda esigenza è quella di ottenere il campo necessario per la deflessione con la minima corrente possibile.

Per lo studio dei profili si è ricorsi ad un'analogia coniugata fra il campo di corrente in una vasca elettrolitica ed il campo magnetico nella sezione trasversa del deflettore. In tale analogia la funzione di corrente corrisponde al potenziale magnetico ed il potenziale elettrico corrisponde alla funzione di flusso magnetico. Nel nostro caso tale analogia è applicabile sotto l'ipotesi che, alle frequenze delle armoniche di maggior contributo dell'impulso di corrente che passa nei conduttori, le superfici dei conduttori siano superfici di flusso del campo magnetico e che nel volume interno agli elettrodi il campo sia T.E.M. Con ciò infatti, per quanto detto, le superfici degli elettrodi possono essere rappresentate in vasca da superfici equipotenziali. Questa ipotesi nel nostro caso è plausibile, essendo le piastre abbastanza distanti dalla zona interessata dal fascio.

L'apparecchiatura impiegata per le misure è riportata in Fig. 8. Essa è costituita da un generatore di onde quadre

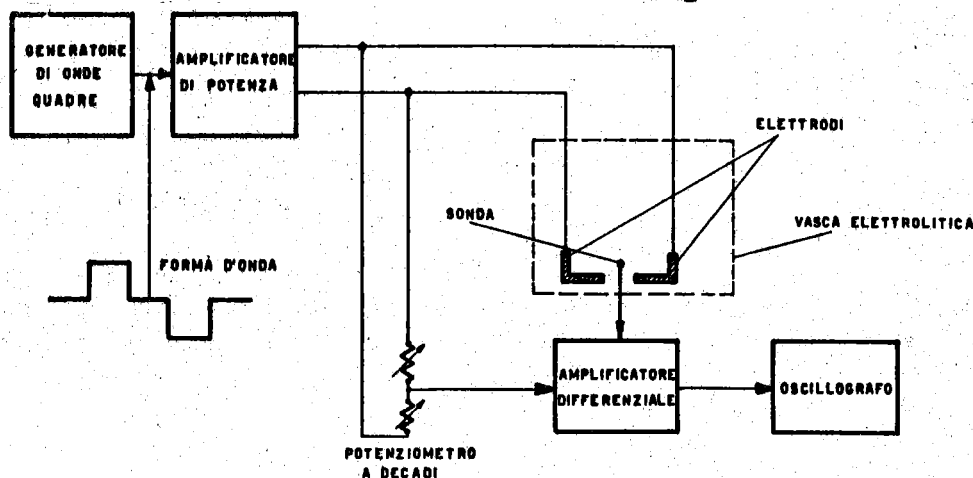


FIG. 8

dre, con ripetizione 50 Hz, che, attraverso un amplificatore di potenza, alimenta gli elettrodi immersi nell'acqua della vasca e, in parallelo ad essi, un potenziometro. I segnali prelevati dal cursore del potenziometro e dalla sonda vengono inviati ad un amplificatore differenziale il cui segnale di uscita viene immesso in un oscillografo che serve quale strumento di zero. La differenza di potenziale corrispondente ad un dato spostamento della sonda viene calcolata dal numero di divisioni di cui deve essere spostato il cursore del potenziometro per azzerare nuovamente il segnale sull'oscillografo.

E' stata adottata la forma d'onda indicata, con valore medio nullo, perchè evita fenomeni di elettrolisi e permette di ottenere un buon azzeramento del segnale che esce dall'amplificatore differenziale, riducendo l'influenza della polarizzazione dello strato superficiale degli elettrodi. Un ulteriore miglioramento delle condizioni di lavoro si è ottenuto verniciando elettrodi di rame od ottone con grafite colloidale.

Con questo metodo è difficile ottenere una precisione molto spinta; tuttavia esso è stato giudicato sufficiente per ottenere un confronto fra strutture diverse e per determinare, approssimativamente, l'andamento dei campi.

Nella Fig. 9 è riportata, a prescindere dalle piastre che caricano la linea, la forma della sezione trasversa che ha dato i migliori risultati.

In essa sono anche tracciate le linee di flusso del campo magnetico. Ricordiamo che l'apertura in senso radiale di ambedue gli elettrodi è imposta, con le dimensioni verticali indicate, dal fatto che le particelle circolano nella ciambella ripassano nel deflettore dopo il termine di ciascun impulso. Vari tentativi sono stati fatti prima di arrivare alla forma suddetta⁽⁶⁾.

Il confronto fra vari profili è stato fatto, a parità di zona utile, massimizzando il fattore di merito definito dalla formula seguente:

$$F = L^{\times} \left(\frac{\bar{\Phi}}{\Phi} \text{ utile} / \bar{\Phi} \text{ totale} \right)$$

Dove L^{\times} è l'induttanza per metro, facilmente calcolabile dal rilevamento di un tubo di flusso completo; Φ totale è il flusso totale di induzione concatenato con i conduttori e $\bar{\Phi}$ utile è la porzione di tale flusso compreso entro la zona utile. Il fattore di merito così definito permette di giudicare quale struttura fornisca, a parità di corrente iniettata, il maggior valore del campo utile.

Per la struttura di Fig. 9 si ha:

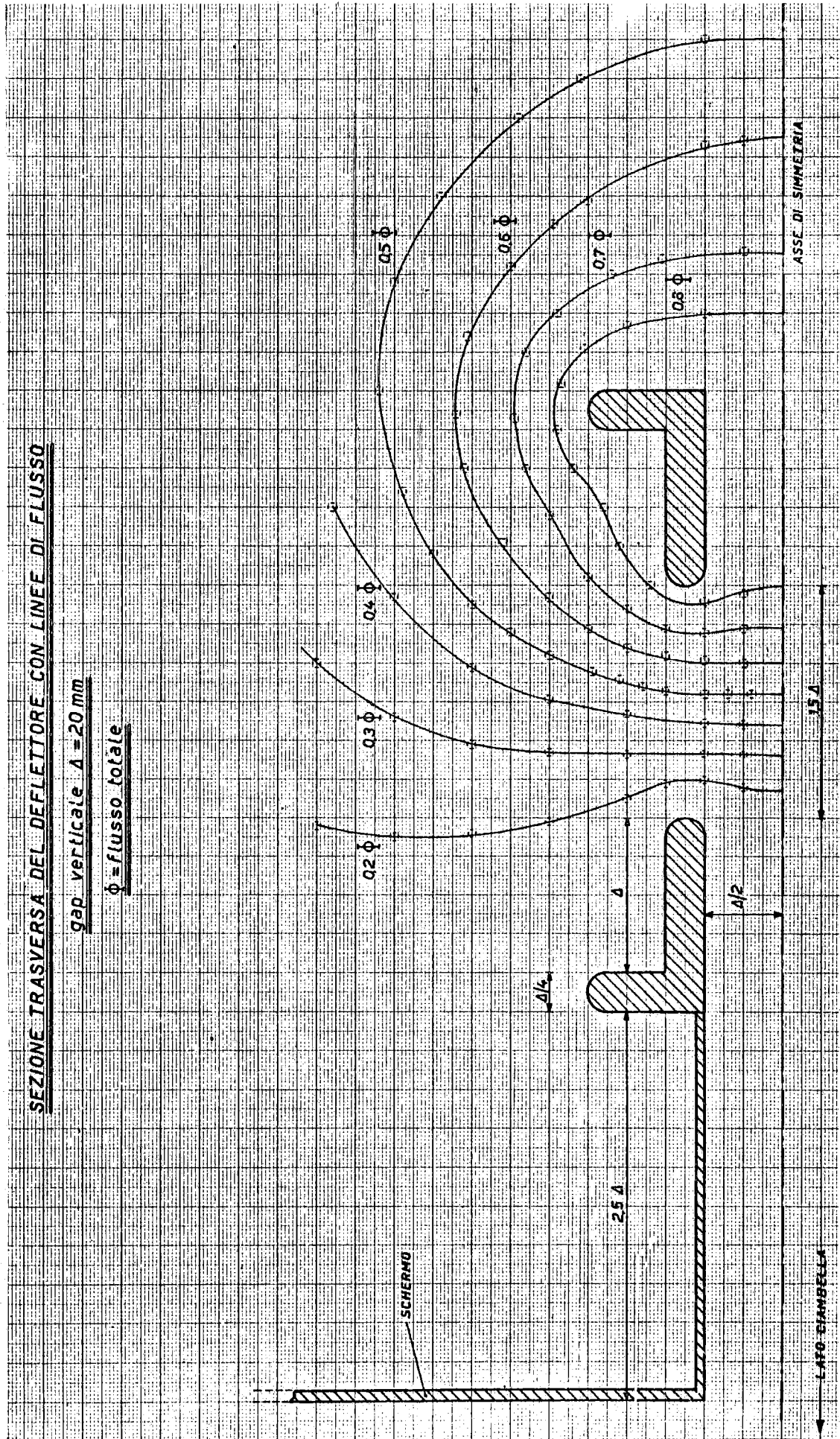


FIG. 9

$$L^* = 0,37 \text{ } \mu\text{H/m}$$

$$\frac{\Phi_{\text{utile}}}{\Phi_{\text{totale}}} = 0,23$$

La forma ad L degli elettrodi tende ad uniformare il campo nella zona utile. I tratti verticali dell'L devono però essere ridotti al minimo perchè essi aumentano la riluttanza del circuito magnetico. Lo schermo che collega uno degli elettrodi a massa riduce fortemente il campo verso l'asse della ciambella.

Nella Fig. 10 è riportato l'andamento del campo lungo l'asse di simmetria della sezione.

4. PROGETTO DEL DEFLETTORE E MISURE SUL MODELLO.

Il dimensionamento del deflettore è stato eseguito in base alle misure effettuate in vasca elettrolitica (cfr § 3) assumendo cioè un'induttanza $L = 0,37 \mu \text{ H/m}$ e un rapporto $\Phi_{\text{utile}} / \Phi_{\text{totale}} \approx 0,23$, per i profili che abbiamo già visto. Ciò significa che il rapporto tra la corrente che si propaga nella linea e il campo magnetico che si genera nella zona utile per la deflessione, è pari a:

$$(1) \quad \frac{I}{B_u} = 10,6 \text{ A/gauss}$$

e quindi per ottenere il campo magnetico di 950 gauss, necessario alla deflessione, in base ai dati riportati al § 1, la corrente deve avere un'ampiezza

$$(2) \quad I = 10,6 \cdot 950 = 10.000 \text{ A}$$

questo, naturalmente, senza tener conto dell'effetto del campo elettrico che è tenuto come margine di sicurezza. Questo valore è sembrato ragionevole, in quanto, dimensionando la linea di trasmissione in modo che la sua impedenza caratteristica sia $Z_0 = 10 \Omega$, l'impulso di tensione deve avere un'ampiezza di $\sim 100 \text{ KV}$ per ottenere una corrente di 10^4 A . Dalla Fig. 9 si ha che il rapporto tra il valore E_u del campo elettrico nella zona utile di deflessione e il valore E che assumerebbe il campo elettrico, se fosse uniforme, lungo i 3 cm di spaziatura tra le coppie, di conduttori, è pari a:

$$(3) \quad \frac{E_u}{E} = 0,7$$

ciò che corrisponde, applicando una tensione pari a 100 Kv, a un campo elettrico $E_u = 2,3 \cdot 10^6 \text{ V/m}$. L'effetto, per quanto riguarda la deflessione, è equivalente a quello di un campo magnetico B_{eq} pari a:

$$(4) \quad B_{eq} = 77 \text{ gauss}$$

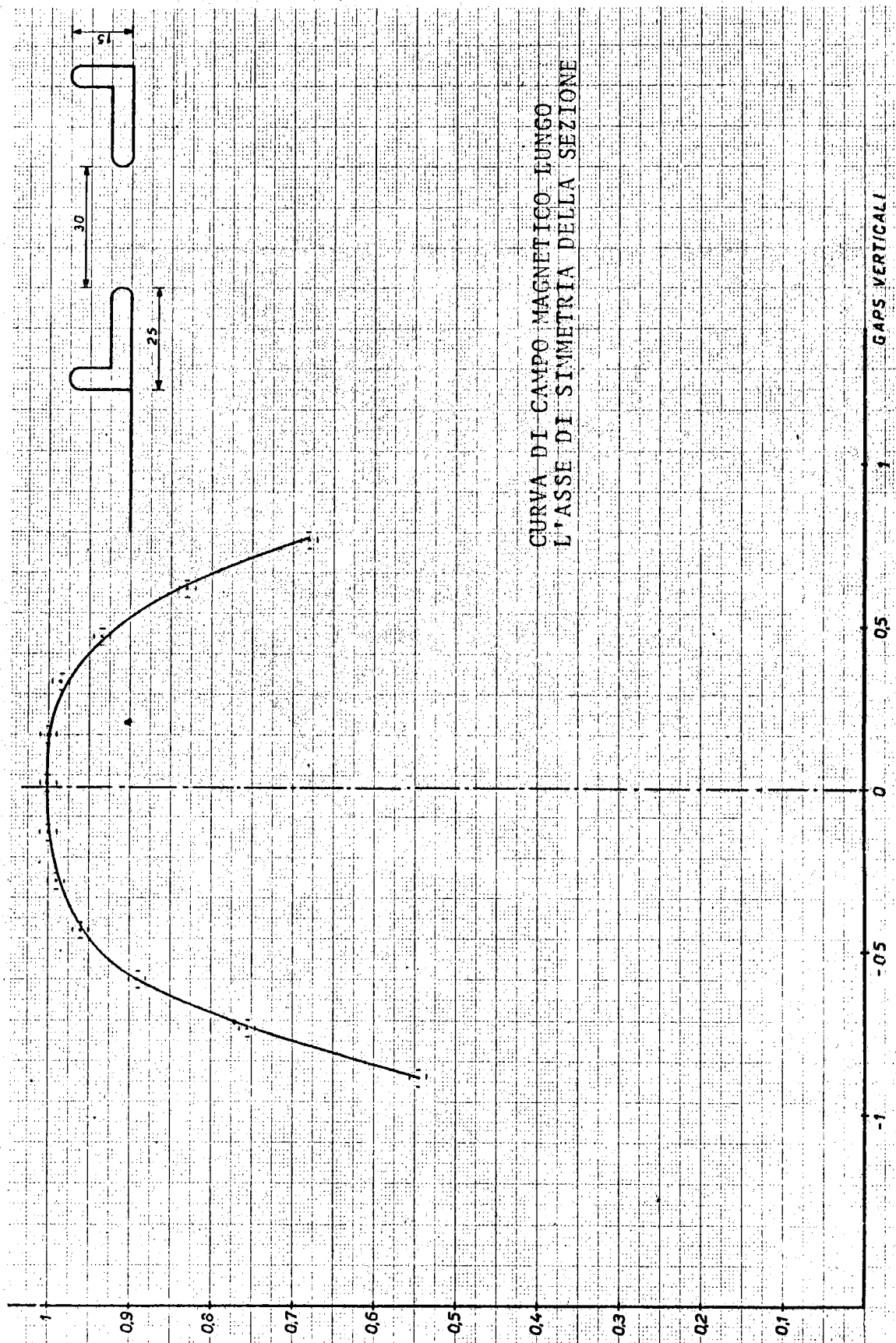


FIG. 10

e cioè pari a $\sim 8\%$ del puro campo magnetico che si ha nella zona utile.

Per ottenere l'impedenza caratteristica voluta, $Z_0 = 10 \Omega$, la linea, costituita dai quattro conduttori che abbiamo visto, è stata caricata capacitivamente, mediante piastre, collegate alternativamente a una coppia e all'altra di conduttori in modo da costituire l'insieme riportato in Fig. 11. Le

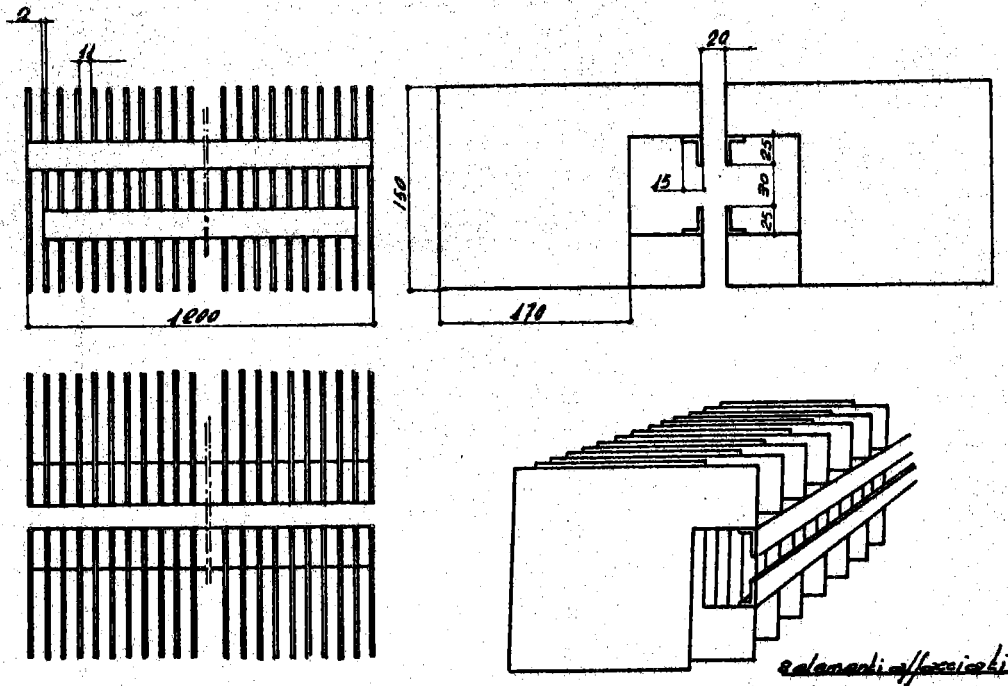


FIG. 11

piastre, le cui dimensioni sono riportate nella figura citata, sono in totale 50 coppie e ogni coppia di piastre è distanziata dall'altra di 10 mm. Essendo la lunghezza effettiva totale del deflettore 1180 mm, l'induttanza della linea è pari a:

$$(5) \quad L = 0,37 \cdot 1,18 \cdot 10^{-6} \text{ H} = 0,436 \mu \text{ H}$$

e quindi la capacità totale per la quale sono state calcolate le piastre è:

$$(6) \quad C = \frac{L}{Z_0^2} = \frac{4,36 \cdot 10^{-7}}{100} = 4360 \text{ pF}$$

È stato quindi costruito il modello riportato in Fig. 12 e in Fig. 13 sul quale sono state eseguite le misure che ora descriveremo.

a) Misure di adattamento.

Queste misure sono state effettuate con la disposizio-

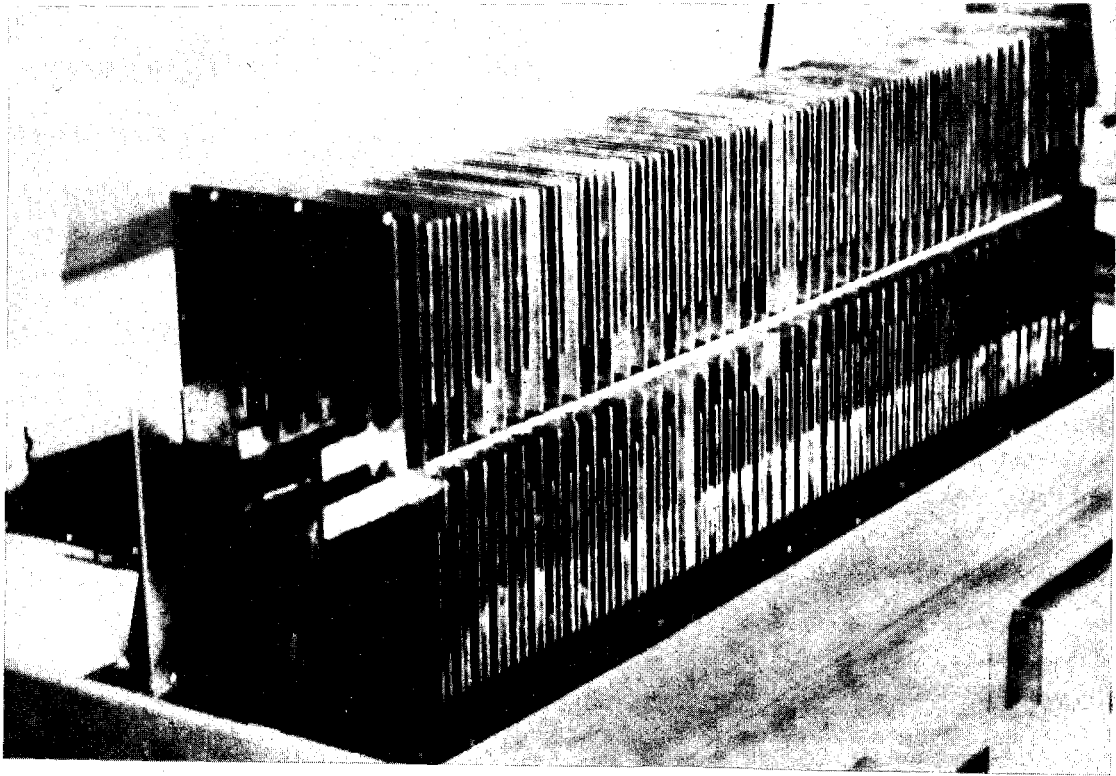


FIG. 12

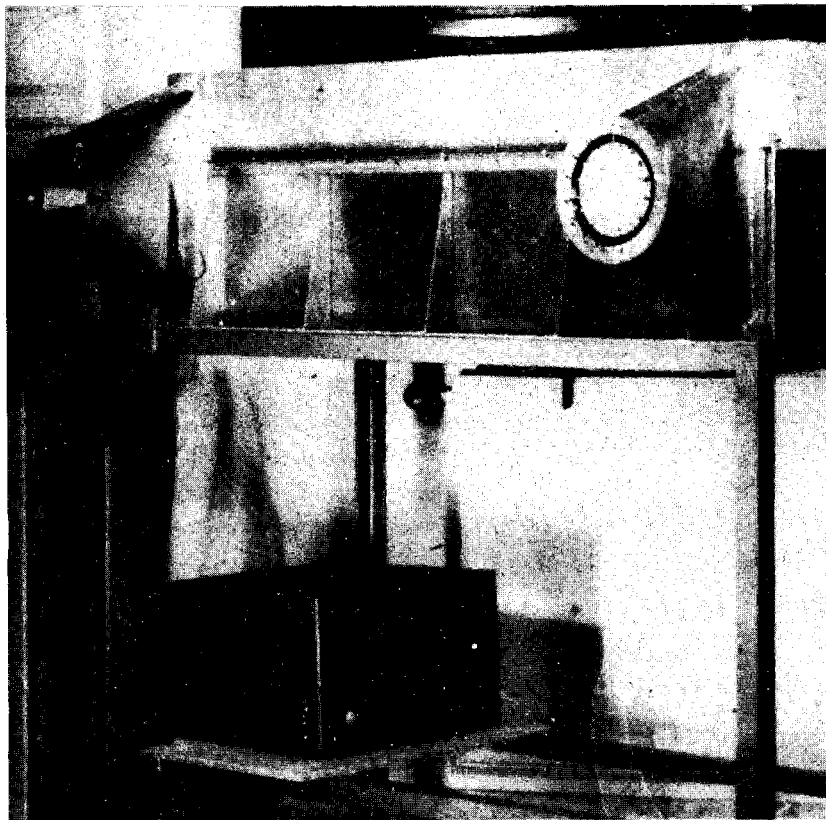


FIG. 13

ne sperimentale riportata in Fig. 14. Si è rilevata, in regime

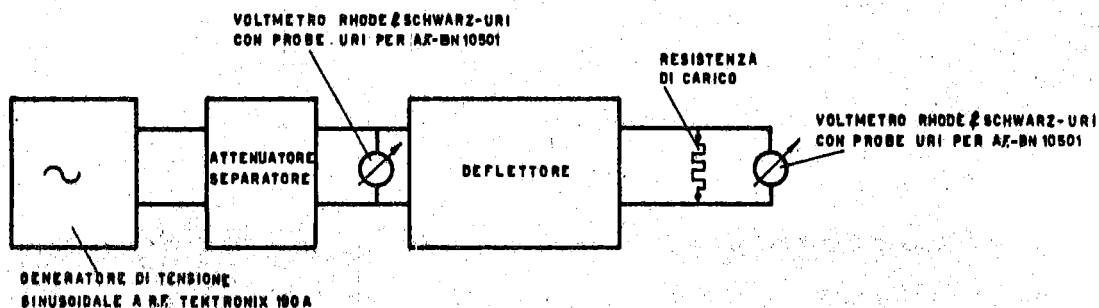


FIG. 14

sinusoidale, la tensione sul carico al variare della frequenza, mantenendo costante la tensione d'ingresso nel campo di frequenza compreso tra 0 e 30 MHz. Per ogni valore della resistenza di carico si ottiene allora una curva del tipo di quelle riportate in Fig. 15.

Da queste curve si rileva che, per un'impedenza di chiusura pari a $9,9 \Omega$, si ha un rapporto d'onda stazionaria pari a:

$$(7) \quad VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \leq 1,1$$

nel campo di frequenze considerato e si può ritenere che questo carico sia quello che adatta meglio la linea. Si assume quindi per l'impedenza caratteristica della linea il valore:

$$(8) \quad Z_0 = 9,9 \Omega$$

Essendo il periodo corrispondente a 30 MHz pari a 33 nsec, se ammettiamo che il minimo tempo di salita dell'impulso che dà luogo alla deflessione sia dello stesso ordine di grandezza, si può ritenere che il deflettore, alimentato con un impulso di queste caratteristiche, dia luogo a riflessioni trascurabili.

b) Misure di ritardo.

Le misure di ritardo sono state effettuate con la disposizione strumentale riportata in Fig. 16. Esse consistono nella misura del tempo che intercorre tra una certa fase della tensione d'ingresso del deflettore e la stessa fase della tensione sul carico, essendo le frequenze in gioco tali che lo sfasamento è sempre minore di 2π .

Queste misure sono state eseguite a varie frequenze in regime sinusoidale e, tenendo conto del ritardo introdotto dai raccordi d'ingresso e d'uscita del deflettore, che ammonta a ~ 3 nsec, si ottiene un ritardo:

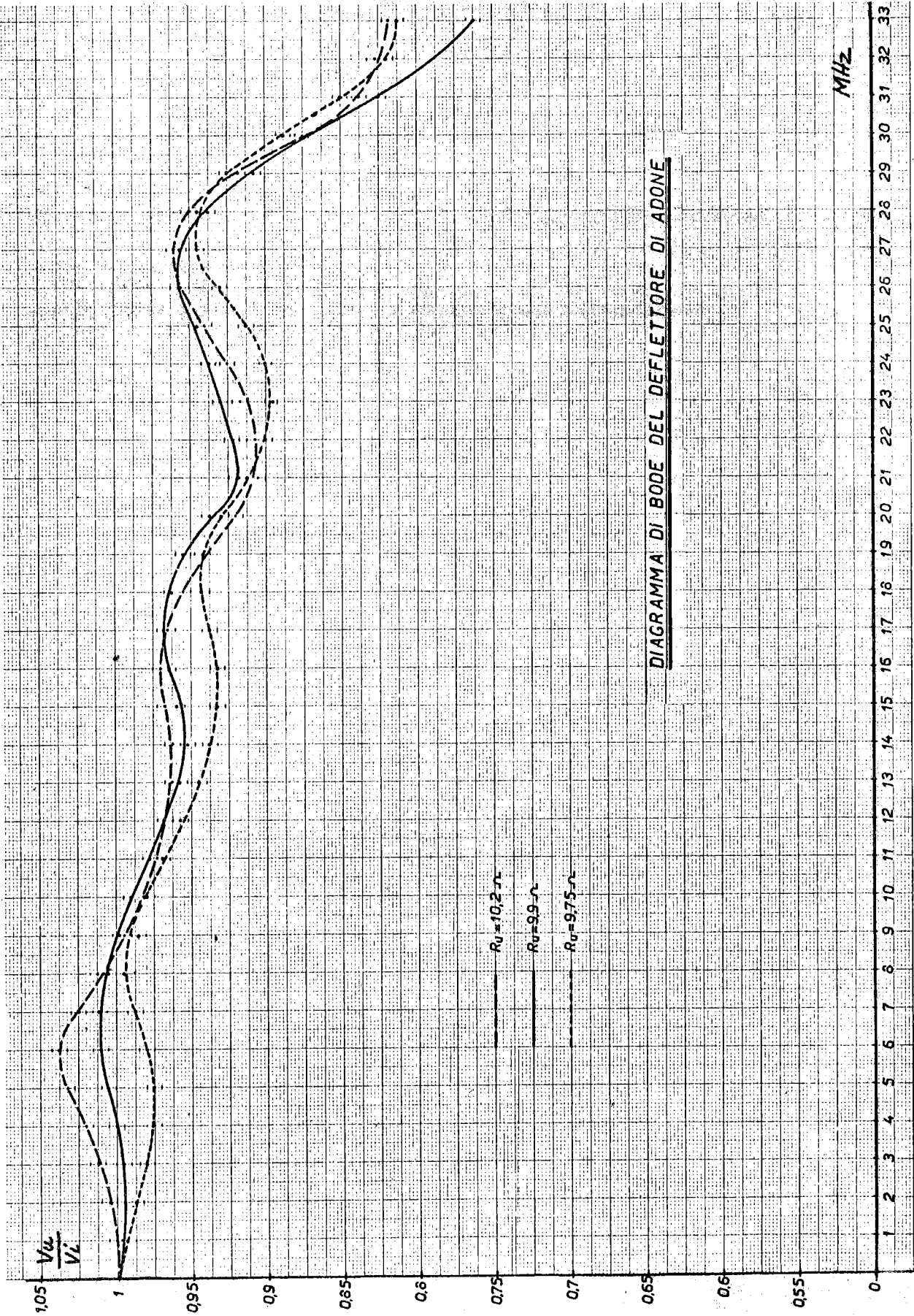


DIAGRAMMA DI BODE DEL DEFLETTORE DI ADONE

FIG. 15

(9)

$$\tau_r \approx 45 \text{ nsec}$$

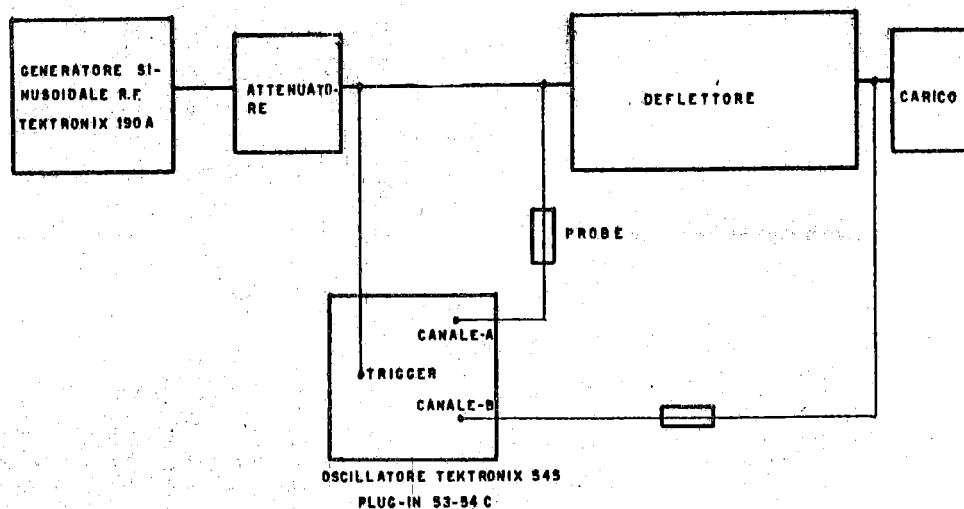


FIG. 16

Dal ritardo e dall'impedenza caratteristica si può risalire al valore dell'induttanza e della capacità totale del deflettore.

Si trova:

$$(10) \quad L = Z_0 \tau_r = 9,9 \cdot 4,5 \cdot 10^{-8} = 0,445 \text{ } \mu\text{H}$$

$$(11) \quad C = \frac{\tau_r}{Z_0} = \frac{4,5 \cdot 10^{-8}}{9,9} \approx 4550 \text{ pF}$$

L'induttanza è maggiore del calcolato (5) di $\sim 2,5\%$, mentre la capacità è maggiore del calcolato (6) di $\sim 4,5\%$ e quindi i valori misurati possono essere ritenuti in buon accordo col calcolato.

c) Misure di campo massimo.

Il rapporto I/B è stato misurato in regime sinusoidale con la disposizione sperimentale riportata in Fig. 17.

Il deflettore è stato alimentato con una tensione V_a sinusoidale di ampiezza e pulsazione note. Mediante una bobina di area spire nota S è stata misurata la tensione indotta $V = \omega SB$ ottenendo così il rapporto:

$$(12) \quad \frac{I}{B} = \frac{\omega S V_a}{Z_0 V}$$

Si è trovato, esprimendo B in gauss, il valore:

$$\frac{I}{B} = 10,85 \pm 3\% \text{ A/gauss}$$

che è in accordo, entro il limite degli errori di misura, col valore calcolato.

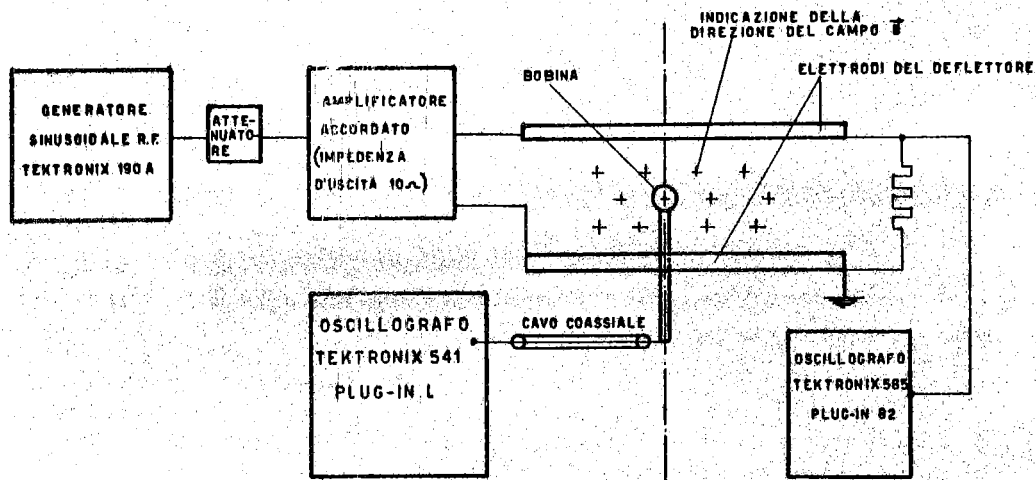


FIG. 17

Per quanto riguarda questa misura, vogliamo osservare che è essenziale che il generatore, che alimenta il deflettore, eroghi una corrente sinusoidale con distorsione totale inferiore all'1%, in quanto il contributo percentuale delle armoniche, portato alla tensione indotta sulla bobina di misura, è dato dal prodotto dell'ordine dell'armonica per la percentuale di distorsione propria dell'armonica stessa. Pertanto è stato costruito un generatore dotato di appositi sistemi di filtro, atto a garantire le prestazioni volute.

La bobina di misura, dato il campo di frequenze ($0,1 \pm 1$ MHz) in cui queste misure sono state effettuate, deve avere una frequenza di risonanza propria molto maggiore della massima frequenza di lavoro. Le misure sono state effettuate con bobine fatte avvolgendo 15 spire di filo di rame di diametro $\Phi_1 = 0,05$ mm su supporti di perspex di diametro $\Phi_2 = 5$ mm.

L'area spire è stata tarata mediante una bobina di Helmholtz che forniva un campo noto al 2% a 50 Hz e l'area spire era in ogni caso entro 1% del valore calcolato (*).

d) Misure di andamento radiale del campo.

L'andamento radiale del campo è stato misurato con la disposizione sperimentale descritta in c) usando una bobina la cui sezione era di 72×1 mm² col lato maggiore posto parallelamente ai conduttori del deflettore.

(*) - Attualmente sono in corso le misure in regime impulsato e le prime misure sono in buon accordo, entro i limiti degli errori di misura, con le misure effettuate in regime sinusoidale.

Il numero di spire doveva essere sufficiente per ottenere un segnale di ampiezza tale da poter apprezzare l'1% del valore assunto dal campo massimo. Si è ottenuto così il diagramma di Fig. 18 in cui in ascissa è riportato il numero di gap verticali (2 cm) del quale la sonda distava dal centro geometrico della sezione dei conduttori, mentre in ordinata è riportato il rapporto tra il campo corrispondente a un certo posizionamento della sonda e il campo massimo che si ha nel punto di ascissa - 0,1. I punti sperimentali riportati si riferiscono a una serie di misure effettuate con una frequenza della tensione di alimentazione di 0,5 MHz. La curva tracciata è entro i limiti degli errori di misura di tutti i punti sperimentali ottenuti nel campo di frequenze $0,1 \pm 1$ MHz. In queste misure ovviamente non ha importanza che la frequenza di risonanza propria della bobina sia molto lontana dalla frequenza della tensione di alimentazione, ma è sufficiente che la frequenza stessa sia stabile entro qualche % durante ogni serie di misure.

e) Misure di andamento del campo nella zona di deflessione.

Queste misure sono state effettuate usando il dispositivo sperimentale riportato in Fig. 19 e Fig. 20. Le bobine

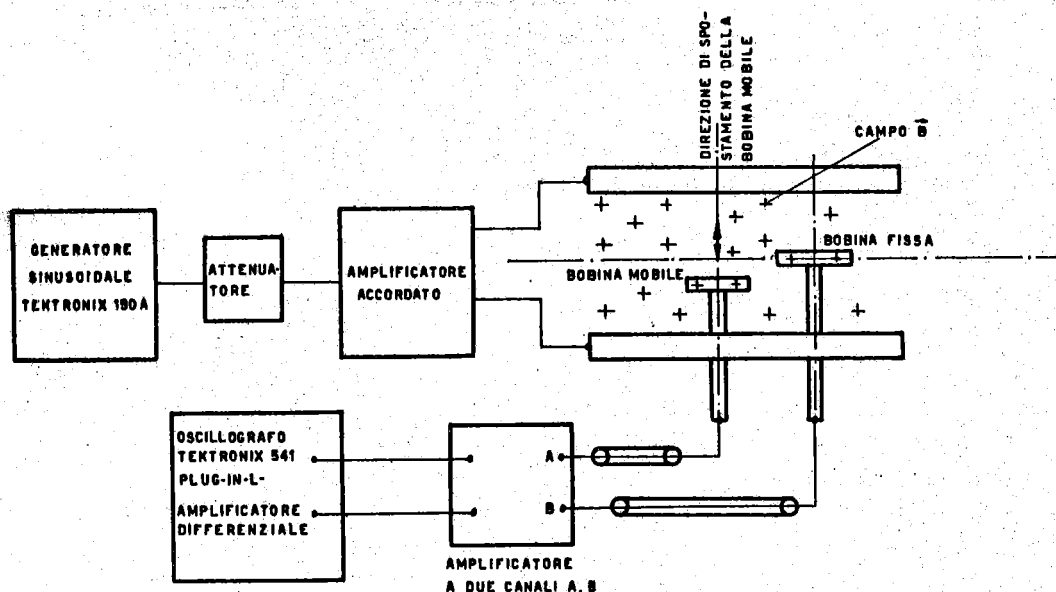


FIG. 19

che sono state usate, Fig. 21, sono le stesse della misura precedente; queste sono state costruite in modo da avere circa la stessa frequenza di risonanza propria e quindi dare, nella stessa posizione nell'interno del deflettore e a parità di ampiezza e frequenza della tensione di alimentazione, circa la stessa tensione d'uscita. La misura è stata effettuata ponendo la sonda mobile nella zona di campo massimo, parallelamente agli elettrodi ed azzerando il segnale in uscita dell'amplificatore differenziale mediante uno spostamento ortogonale

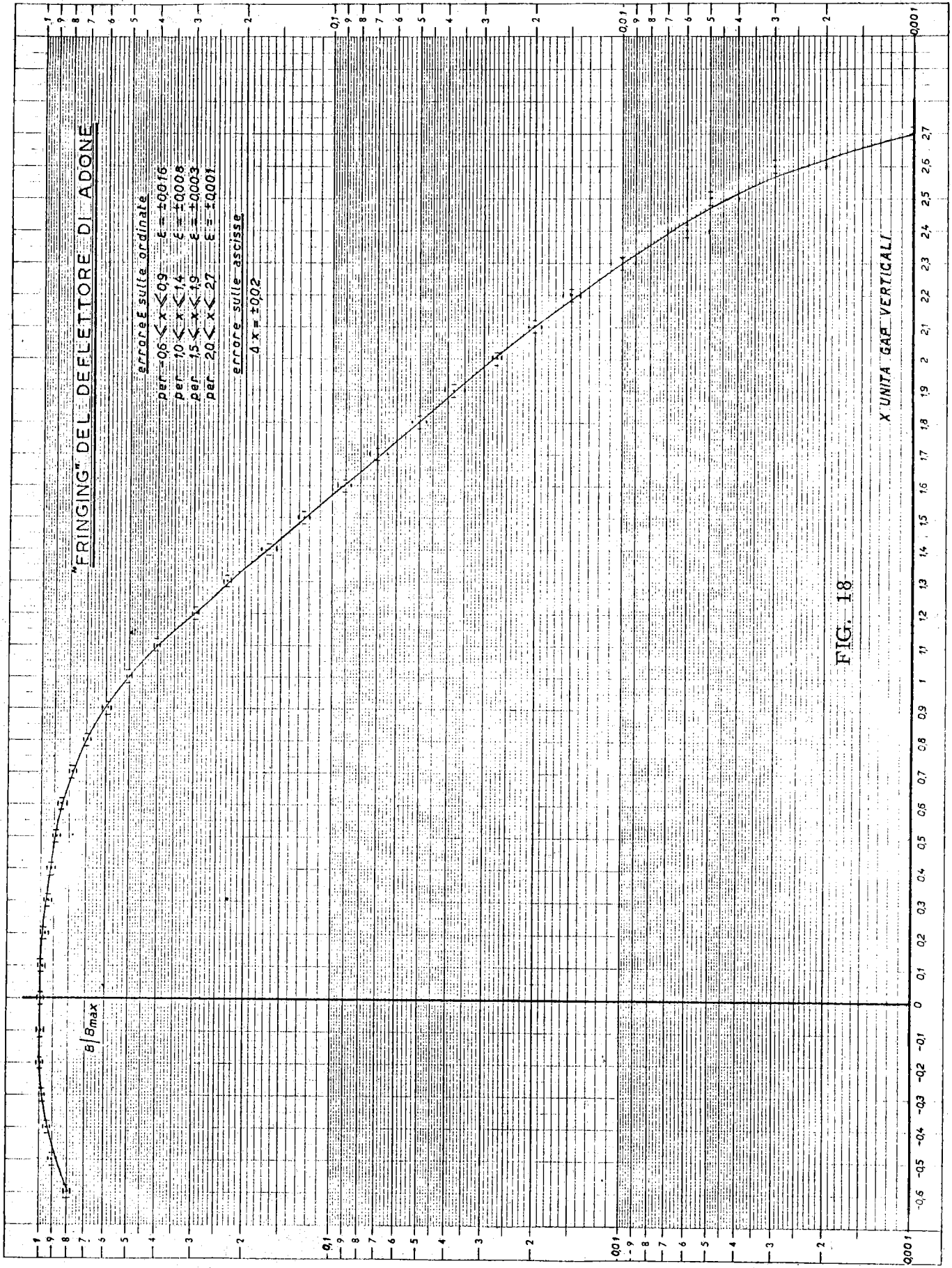


FIG. 18

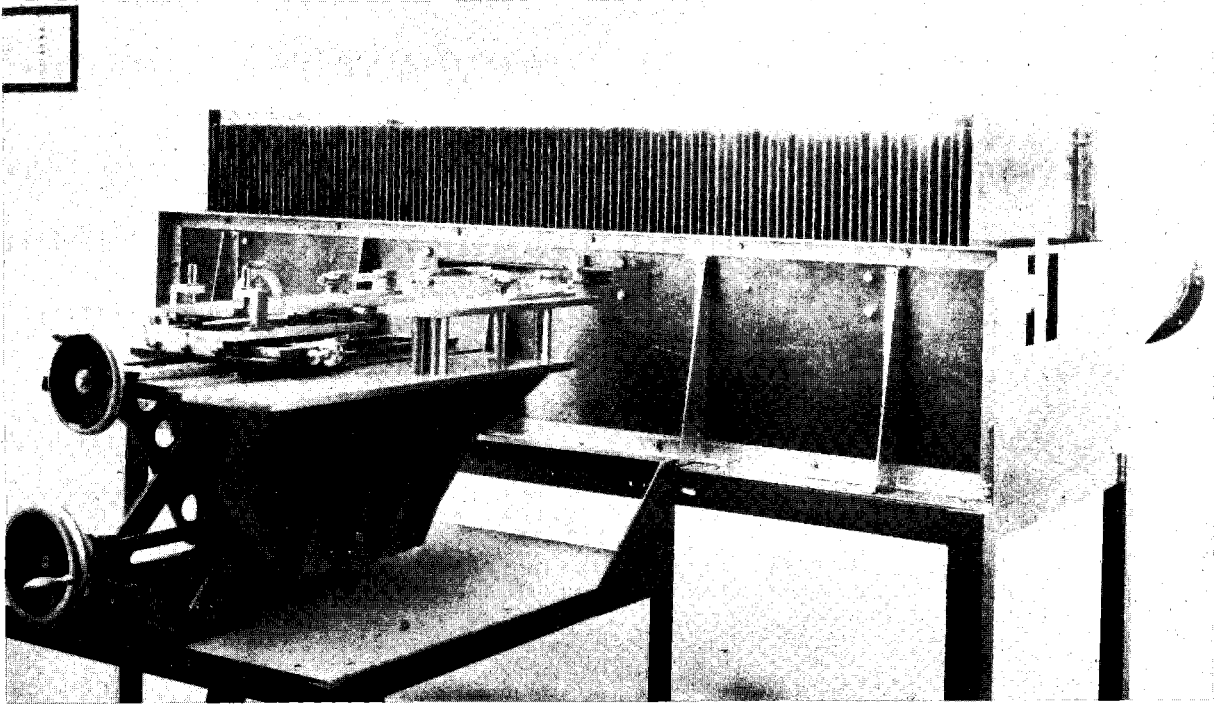


FIG. 20

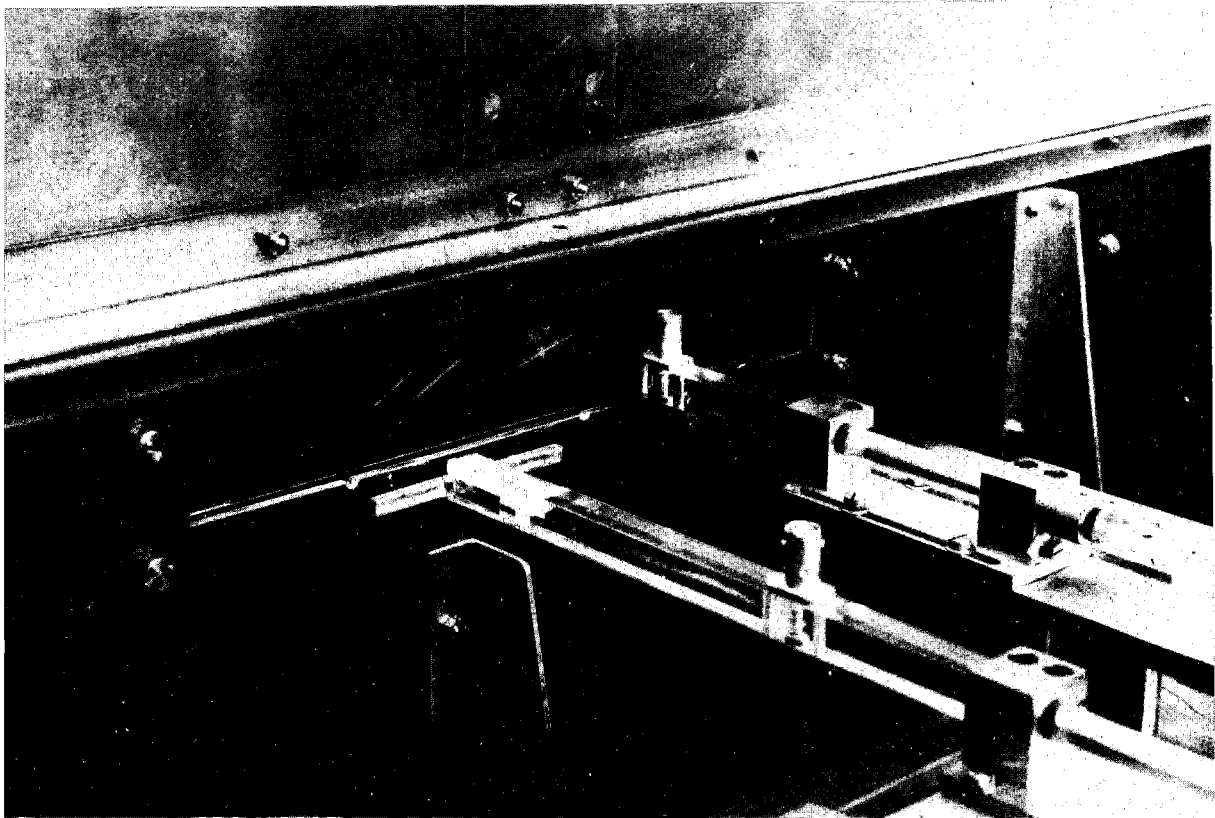


FIG. 21

agli elettrodi della bobina di riferimento; l'ampiezza normalizzata della tensione differenza è riportata con i relativi errori in Fig. 22.

Questo tipo di misura si è dimostrato molto ripetibile e l'ampiezza dell'errore è dovuta essenzialmente al rumore degli amplificatori e all'errore di lettura dell'oscillografo che non si sono potuti evitare a causa dei livelli di tensione molto bassi, dell'ordine di qualche millivolt, che si dovevano apprezzare. L'amplificatore a due canali simmetrici⁽⁷⁾ ha il compito, oltre che di permettere l'azzeramento fine in ampiezza dei segnali provenienti dalle sonde, di introdurre uno sfasamento variabile, tale da compensare lo sfasamento dovuto alla posizione geometrica delle sonde all'interno del deflettore. A questo proposito notiamo che in questa misura è essenziale che la tensione d'alimentazione del deflettore abbia la minore distorsione possibile, per ottenere un buon azzeramento; questa è stata una delle cause che ha determinato la massima ampiezza della tensione di alimentazione stessa. Inoltre è stato necessario schermare elettrostaticamente le bobine, per evitare accoppiamenti capacitivi, che, trascurabili nelle altre misure, introducono una sia pur piccola dipendenza, in ampiezza e fase, della tensione differenza, dalla posizione della bobina di riferimento.

5. L'IMPIANTO COMPLETO.

In Fig. 23 è riportato lo schema a blocchi di un impianto completo.

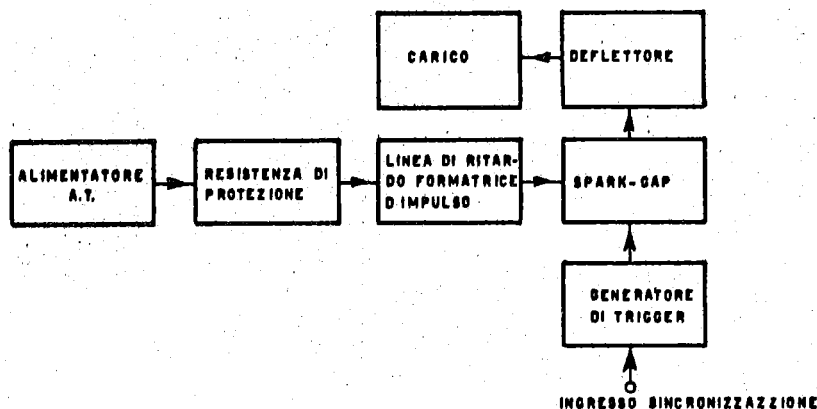


FIG. 23

Un alimentatore di potenza, ad alta tensione, carica, attraverso una resistenza di protezione, una linea di ritardo formatrice d'impulso, che ha la stessa impedenza caratteristica $Z_0 \approx 10 \Omega$ del deflettore.

Quando all'ingresso del circuito di sincronizzazione

giunge l'impulso di comando, il generatore di trigger comanda la spark-gap che si "accende" e la linea formatrice d'impulso si scarica sul deflettore, che è chiuso sulla sua impedenza caratteristica, generando un impulso rettangolare la cui ampiezza massima è metà della tensione di carica della linea, la cui durata è doppia del ritardo proprio della linea stessa

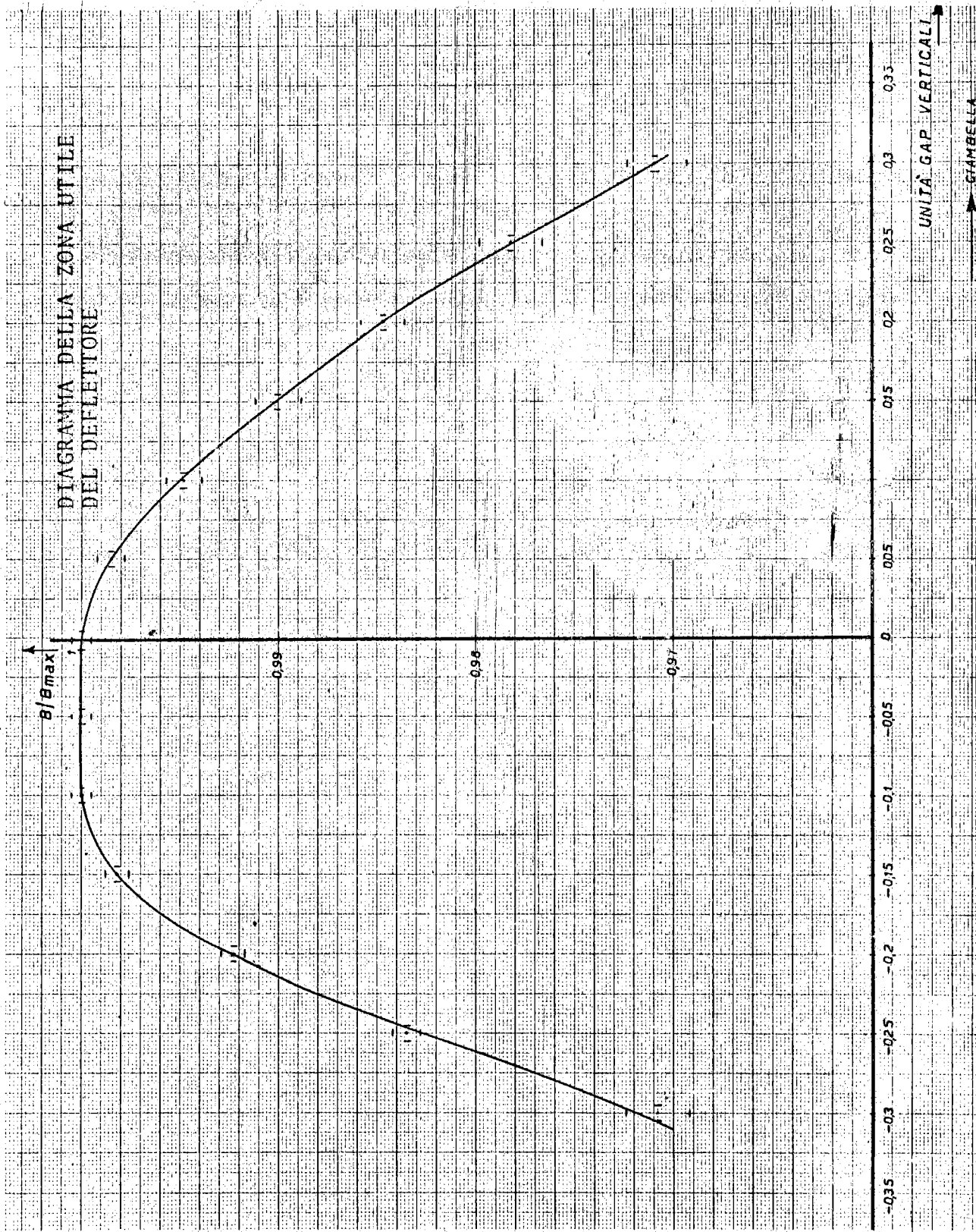


FIG. 22

ed infine il cui tempo di salita e discesa è determinato dai parametri propri della linea. Attualmente l'intero impianto è in fase di progetto e quindi non tutti i componenti sono stati completamente definiti. Riporteremo quindi le caratteristiche salienti di ogni blocco dello schema di Fig. 23, nella ipotesi che la durata dell'impulso sia $\tau_i \approx 2,4 \cdot 10^{-6}$ sec e la massima frequenza di ripetizione dell'impulso sia $f_r = 5$ imp/sec (cfr § 1-7) e 8)).

a) Il carico.

Il carico può essere costituito da una o più resistenze in serie-parallelo, con la condizione che la impedenza totale parallela sia puramente resistiva e pari a:

$$R = Z_0 = 10 \Omega$$

Ricordando che (cfr § 4) la tensione di picco massima, necessaria per effettuare la deflessione, è $V_p = 100$ KV, il carico deve essere in grado di sopportare questa tensione.

La corrispondente potenza di picco è:

$$W_p = 1000 \text{ MW}$$

e quindi la potenza media

$$W = 12 \text{ KW}$$

Si pensa di realizzare il carico usando resistenze S.E.C.I. tipo ACH 12, raffreddate ad acqua, che sono in grado di dissipare 10 KW ciascuna, in regime continuo, a radiofrequenza. Queste resistenze sono in uso al CERN(*) per un carico con caratteristiche simili a quelle richieste da questo impianto.

b) La spark-gap.

La spark-gap dev'essere dimensionata in modo da poter sopportare, sia tra i suoi elettrodi, che verso massa, la tensione $V_1 = 200$ KV; deve poter portare, col ciclo di ripetizione voluto, una corrente di picco:

$$i_p = \frac{V_p}{R} = 10.000 \text{ A}$$

deve poter funzionare per almeno 10^4 impulsi, (~ 5 cariche complete dell'anello) senza che sia necessario effettuare aggiustamenti della superficie degli elettrodi. L'induttanza

(*) - B. Kuiper, Comunicazione privata.

propria della spark-gap deve essere molto piccola e inoltre il jitter si deve mantenere entro qualche nanosecondo. Si pensa di usare, a questo scopo, una spark-gap a 4 elettrodi, del tipo usato al Laboratorio Gas Ionizzati⁽⁸⁾. In particolare si stà studiando la migliore conformazione degli elettrodi di trigger.

c) Il generatore di trigger.

Il generatore di trigger è costituito dal circuito di Fig. 24. Di questo circuito sono stati costruiti e provati

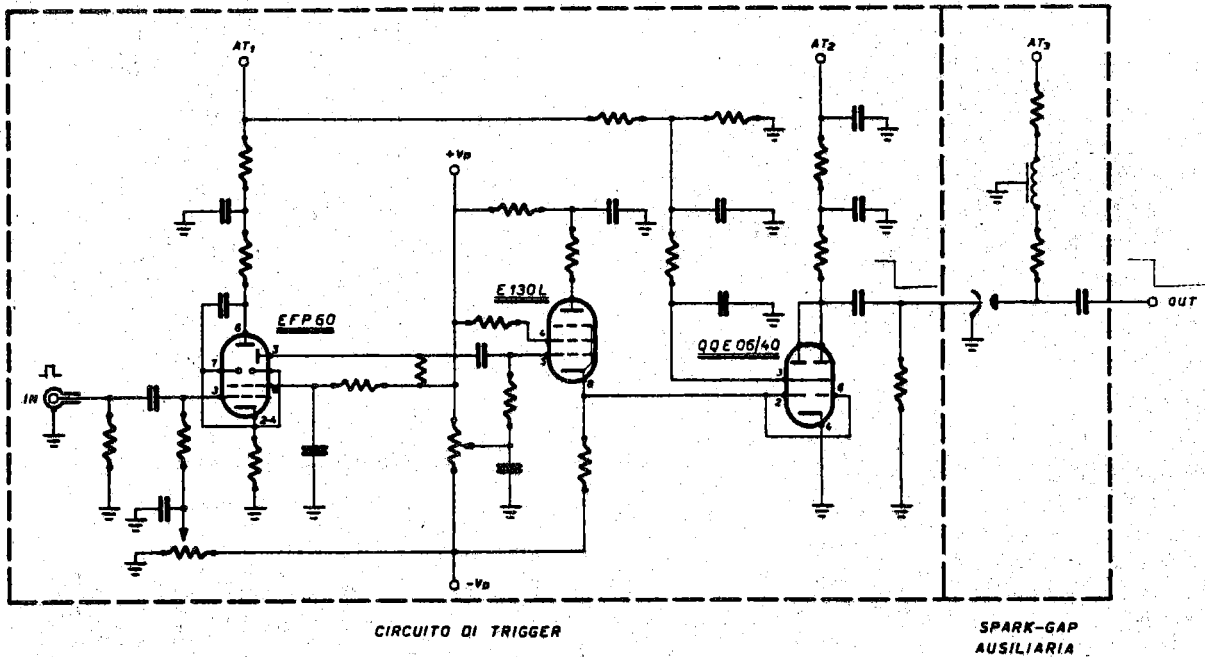


FIG. 24

due prototipi, in cui la spark-gap usata era già costruita⁽⁹⁾, ma per tensioni relativamente basse (20-30KV). Si pensa di usare una spark-gap dello stesso tipo, ma che possa fornire alla spark-gap principale un impulso di trigger di ~ 10 KV. Il circuito di trigger della spark-gap ausiliaria si pensa possa essere quello definitivo⁽¹⁰⁾.

Esso fornisce un impulso di ~ 6 KV con un tempo di salita di 11 nsec e con un ritardo rispetto all'impulso di comando in ingresso di $\sim 25-30$ nsec. Il jitter è inapprezzabile. L'impulso di comando d'ingresso deve avere ampiezza superiore a 5 Volt, tempo di salita inferiore a qualche nsec a durata maggiore di 10 nsec.

d) La linea formatrice.

Come linea formatrice si pensa di usare un cavo coassiale appositamente costruito dalla "Sterling Cable Company" di Aldermaston. La sua impedenza caratteristica è $Z_0 = 10 \Omega$

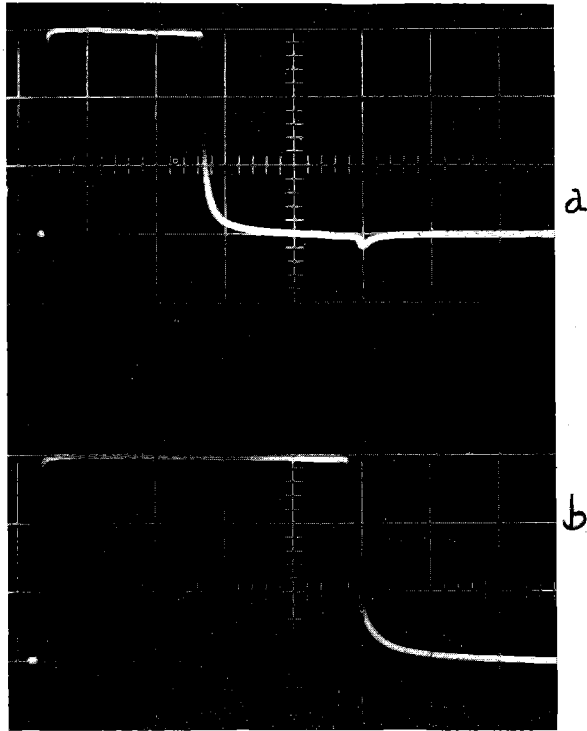


FIG. 25

e il suo ritardo per metro è $\tau_{r1} = 6,53$ nsec/m.

Per ottenere pertanto un impulso della durata voluta, $\sim 2,4$ μ sec, la linea formatrice dev'essere costituita da ~ 200 mt di tale cavo. Ovviamente tale cavo è stato costruito per essere in grado di sopportare una tensione continua di 200 KV tra armatura interna e esterna e per essere in grado di trasmettere un impulso di 100 KV di ampiezza massima, sovrapposto alla tensione continua di carica e con polarità inversa a quest'ultima. Il cavo oltre che come linea formatrice, può essere usato per connettere i vari elementi dell'impianto. Esso è stato provato come linea formatrice a bassa tensione, usando al posto della spark-gap un relais a mercurio e chiudendolo semplicemente su una resistenza da 10Ω . L'impulso così formato è riportato in Fig. 25 in cui l'asse dei tempi (b) è di $0,5$ μ sec/cm e si riferisce a 176 mt di cavo.

e) La resistenza di protezione.

La resistenza di protezione deve soddisfare al requisito di limitare a valori accettabili la corrente di carica della linea, che dev'essere erogata dall'alimentatore, permettendo che la ricarica avvenga col ciclo di ripetizione voluto; inoltre dev'essere tale che l'impedenza vista dalla linea formatrice d'impulso all'estremo opposto a quello della spark-gap sia molto maggiore dell'impedenza caratteristica della linea che quindi può essere considerata aperta allo stesso estremo.

Detto quindi R^* il valore della resistenza di protezione e assumendo che la costante di tempo di carica sia pari a $1/20$ del periodo di ripetizione, si ha:

$$R^* = \frac{1}{20} \frac{2 Z_0}{f_r \tau_i} = 84 \text{ K}\Omega$$

e questo valore soddisfa a entrambe le condizioni poste.

La resistenza deve poter avere applicata ai suoi capi la tensione $V_1 = 200$ KV e deve essere isolata verso massa per la stessa tensione.

La potenza media dissipata dalla resistenza è data da:

$$W^* = f_r \int_0^{1/f_r} \frac{V_1^2 e^{-\frac{4Z_0}{R^* \tau_i} t}}{R^*} dt = \frac{V_1^2 f_r \tau_i}{4 Z_0} (1 - e^{-\frac{4Z_0}{f_r R^* \tau_i}}) = 12 \text{ KW}$$

E' in progetto un carico che si realizza usando 28 resistenze da $3 \text{ K}\Omega$, a filo, su supporto ceramico, poste in serie. Esse sono raffreddate in olio circolante per convezione naturale e ciò aiuta a risolvere i problemi d'isolamento. Le resistenze che si pensa d'usare sono di tipo speciale, costruite appositamente dalla S.E.C.I. di Milano.

f) L'alimentatore.

La potenza che deve erogare l'alimentatore ad alta tensione è pari alla somma delle potenze dissipate nell'impianto e cioè ~ 24 KW sotto la tensione di 200 KV; quest'ultima dev'essere stabilizzata contro le variazioni nel tempo entro $\pm 1\%$ e regolabile con continuità nel campo 100 + 200 KV. L'alimentatore deve essere inoltre in grado di erogare, con la ripetizione voluta, la corrente di picco

$$I = \frac{V_1}{R^*} = 2,4 \text{ A}$$

Un primo alimentatore, (50 KW di potenza media, 220 KV di tensione massima erogabile, con stabilizzazione $\pm 1\%$) è stato fornito dalla ditta Passoni e Villa di Milano e servirà per effettuare le prove in potenza di tutto l'impianto.

CONCLUSIONI.

La struttura proposta ci sembra promettente e pertanto gli ulteriori studi saranno rivolti principalmente ai problemi connessi con le alte tensioni e con il vuoto, oltre che alla realizzazione delle spark-gaps di potenza. E' possibile che i risultati delle prove in potenza ci consiglino di considerare soluzioni diverse da quella attualmente proposta.

Fino ad ora infatti tutto lo studio è stato concentrato sulla struttura elettromagnetica fin qui descritta in quanto altre soluzioni sulle quali eventualmente ripiegare sono quelle realizzate al CERN dal Kuiper e Plass⁽⁴⁾ e da O'Neil a Stanford⁽¹¹⁾.

RINGRAZIAMENTI.

Gli autori desiderano ringraziare il Sig. M. Fascetti per la notevole collaborazione data a tutto il lavoro e per aver curato la realizzazione di molte delle apparecchiature impiegate.

BIBLIOGRAFIA.

- (1) - F. Amman, R. Andreani ed al., "Elementi di Progetto di un Anello di Accumulazione per elettroni e positroni da 750 MeV".
- (2) - F. Amman, R. Andreani ed al., "Stato di avanzamento dei progetti di Anelli di Accumulazione per Elettroni e positroni di alta energia", Nuovo Cimento Vol. XXIX, Serie X, (1963).
- (3) - F. Amman, R. Andreani et al., "Status Report on the 1.5 GeV $e^+ e^-$ Storage Ring "Adone", LNF-63/32.
- (4) - B. Kuiper and G. Plass, "On the fast extraction of particles from a 25 GeV proton synchrotron", CERN report 59/30 (24.8.1959).
- (5) - A. Massarotti e M. Puglisi, "Deflettori impulsati", LNF/Int.-AD/62/3.
- (6) - F. Tazzioli, "Misure in Vasca Elettrolitica", LNF/Int.-AD/62/8.
- (7) - M. Fascetti, "Amplificatore a due canali simmetrici per misure di campo magnetico nel deflettore impulsato di Adone", LNF/Int-VA-63/3.
- (8) - Il Laboratorio Gas Ionizzati, Notiziario del CNEN n.4, Aprile '61.
- (9) - R. Del Fabbro, "Spark-gap pressurizzata", LNF-61/69, (11.12.61).
- (10) - M. Fascetti e A. Massarotti, "Un circuito di trigger per spark-gap", in corso di pubblicazione.
- (11) - G.K. O'Neill, "Storage rings for electrons and protons. Proceedings International Conference on High Energy Accelerators and Instrumentation", p. 125 (Geneve CERN).