

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-62/130 (1962)

D. Fabiani, A. Lupoli, A. Massarotti, M. Puglisi: L'ELETTROSINCRO-  
TRONE: L'IMPIANTO RF<sub>2</sub>

Estratto dal: Nuovo Cimento,

### CAPITOLO III

#### L'impianto RF<sub>2</sub>.

D. FABIANI, A. LUPOLI, A. MASSAROTTI e M. PUGLISI

##### 1. - Lo schema a blocchi.

Nel Cap. I di questa Parte V sono state indicate le prestazioni richieste all'impianto RF<sub>2</sub>. La tensione minima che si deve sviluppare al gap del risonatore della RF<sub>2</sub> è indicata nel diagramma di Fig. V.I.2 e, come è detto, per poter accelerare il fascio in condizioni di buona stabilità, la tensione di cresta della RF<sub>2</sub> deve essere dell'ordine di 70 kV.

Una caratteristica importante dell'impianto RF<sub>2</sub> è la seguente: la tensione che si manifesta al gap della cavità risonante della RF<sub>2</sub> deve avere una relazione di fase definita e costante rispetto alla tensione con la quale è eccitato il risonatore della RF<sub>1</sub>. Questa condizione deve essere soddisfatta rigorosamente se non si vuole andare incontro a perdite nella intensità del fascio catturato al momento dello scambio tra le due cavità.

Nella Fig. V.III.1. è riportato lo schema a blocchi dell'impianto.

I vari blocchi, contraddistinti con numeri da 1 a 16, non rappresentano tutti, ovviamente, parti materialmente separabili dell'impianto ma stanno ad indicare qual'è il meccanismo di funzionamento di tutto l'insieme.

Tutto l'impianto è stato progettato in modo da poter funzionare in condizioni notevolmente diverse l'una dall'altra come è richiesto dalle particolari ricerche che vengono fatte con l'elettrosincrotrone (e.s.). In particolare, poichè le caratteristiche del fascio  $\gamma$  dipendono completamente dalla forma dell'inviluppo della tensione a RF al momento nel quale questa viene abbassata, si è prevista la possibilità di eseguire tutta o parte della modulazione di ampiezza in ciascuno degli stadi di potenza anche se questo non è corretto dal punto di vista del rendimento di tutto l'impianto. Inoltre il dimensionamento dell'impianto è tale da permetterne il funzionamento in regime continuo alla massima tensione ammissibile in cavità.

Prima di passare alla descrizione dettagliata dei singoli circuiti è opportuno esaminare brevemente lo schema riportato in Fig. V.III.1.

Il blocco 1 comprende i circuiti di «interstadio» e può considerarsi il circuito pilota di tutto l'impianto. Di fatti dalla griglia controllo dello stadio prefinale della catena  $RF_1$  (Fig. V.II.8) viene prelevato il segnale a RF che va a pilotare l'amplificatore interstadio [1].

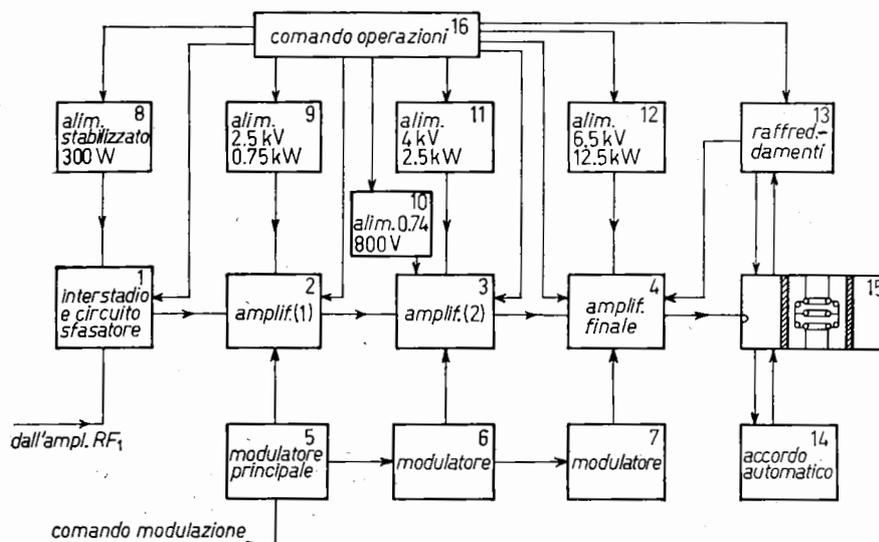


Fig. V.III.1. - Schema a blocchi dell'impianto  $RF_2$ .

Qui il segnale attraversa una linea artificiale a ritardo variabile; viene «limitato» ed infine amplificato in tensione.

In questo modo, il segnale di ampiezza costante in uscita dall'amplificatore interstadio ha la frequenza e la fase opportuna per pilotare tutta la catena e quindi la cavità risonante di potenza, nel modo voluto. Si è ottenuto cioè un segnale della stessa frequenza e fase opportuna rispetto al segnale che pilota lo stadio di amplificazione prefinale della  $RF_1$ , ma di ampiezza indipendente dalla modulazione d'ampiezza della  $RF_1$  stessa.

Il blocco 2 comprende un amplificatore a due stadi che in condizioni di funzionamento normale è pilotato dal segnale proveniente dall'interstadio.

I blocchi 3 e 4 indicano rispettivamente gli amplificatori prefinale e finale.

Questi amplificatori montano le stesse valvole impiegate nella catena  $RF_1$  (che peraltro vengono fatte funzionare in modo completamente diverso) allo scopo di unificare il più possibile i componenti dei due impianti.

Dall'amplificatore finale il segnale a RF, che può raggiungere il livello di 10 kW, viene comunicato alla cavità di potenza (blocco 15).

L'accoppiamento tra l'amplificatore di potenza e la cavità risonante è ottenuto per mezzo di un cavo coassiale adattato. Si è scelto questo sistema che

è diverso da quello usato negli e.s. di Caltech e di Cornell per svincolare le caratteristiche della cavità da quelle dell'amplificatore consentendo una maggiore elasticità di funzionamento dell'insieme.

I blocchi 8, 9, 10, 11, 12 stanno ad indicare i complessi alimentatori della catena. Solo gli alimentatori 9, 10, 11, 12 non sono stabilizzati. Di questi, quelli di potenza 9, 11, 12 sono montati a doppio ponte trifase e quindi, dato anche il sovradimensionamento del filtro, la tensione alternata in uscita risulta molto bassa. Il blocco 16 rappresenta tutta la circuitistica relativa al comando degli alimentatori del sistema di raffreddamento e protezioni come sarà meglio precisato nel seguito.

I blocchi 5, 6, 7 indicano i circuiti di polarizzazione degli stadi di potenza; ciascuno di questi circuiti è realizzato in modo da poter variare la polarizzazione secondo una qualsiasi forma d'onda fornita all'ingresso di ogni polarizzatore.

In 13 sono rappresentati i circuiti di raffreddamento specifici della cavità risonante e dell'amplificatore finale ed il blocco 14 indica i circuiti ed i meccanismi previsti per l'accordo automatico della cavità risonante.

Questo è realizzato mediante un rivelatore che misura la fase tra la tensione fornita dall'amplificatore e la tensione prelevata da una spira accoppiata alla cavità.

La relazione di fase tra queste due tensioni dipende dalla frequenza sulla quale è sincronizzata la cavità risonante.

Quando per una qualsiasi ragione (variazioni termiche, ecc.) l'accordo della cavità viene a variare, il discriminatore di fase, tramite un asservimento, fa variare uno dei parametri della cavità risonante riportandola in accordo [2].

## 2. - La catena di amplificazione.

A) *Il circuito di interstadio.* - Le Fig. V.III.2 e V.III.3 riportano gli schemi elettrici dei circuiti di interstadio.

Il segnale a radiofrequenza che proviene dalla catena RF<sub>1</sub> viene fatto passare attraverso la linea artificiale indicata (Fig. V.III.2).

Questa è composta da 4 sezioni a ritardo fisso (rispettivamente 90°, 180°, 270°, 360°) che possono venire poste in serie, mediante gli opportuni selettori, ad una sezione a ritardo variabile ( $\pm 45^\circ$ ). Le linee a ritardo fisso hanno impedenza caratteristica pari a 300  $\Omega$  mentre la linea a ritardo variabile è stata progettata in modo da far variare la sua impedenza caratteristica di circa il 10% per una variazione complessiva di fase pari a 90°.

Attraversando la linea in questione il segnale pilota subisce uno sfasamento fisso (l'attenuazione della linea è piccolissima) più uno sfasamento regolabile a piacere tra 0 e 360° ed in questo modo la tensione che appare al gap della

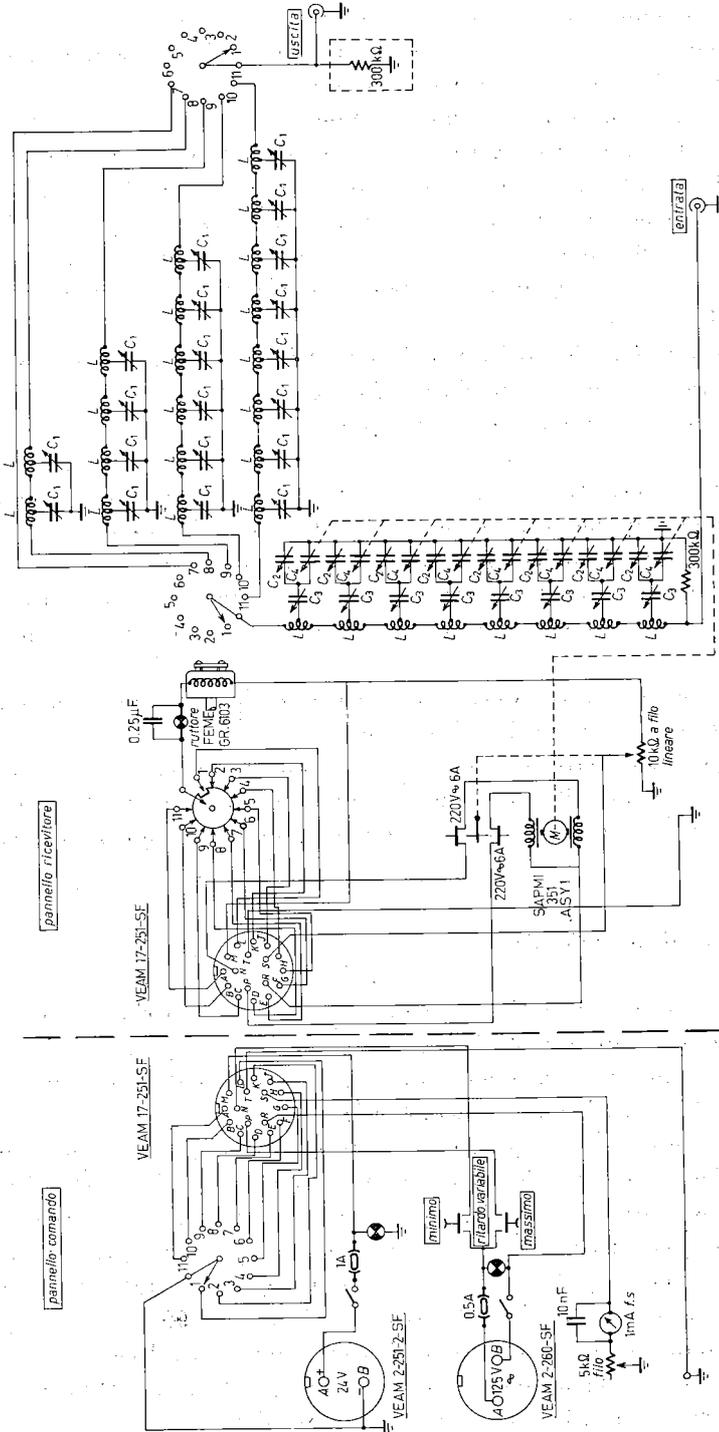


Fig. V.III.2. -- Linea di ritardo variabile. Parte elettrica.

cavità risonante può essere sfasata a piacimento e sincronizzata quindi con la fase della tensione che appare al gap della cavità RF<sub>1</sub>.

Tutta la linea è progettata per funzionare a bassi livelli di potenza (5 V<sub>eff</sub> all'ingresso) ed è montata su di uno chassis che serve anche a schermarla completamente.

La variazione di ritardo è telecomandabile e può essere eseguita anche con

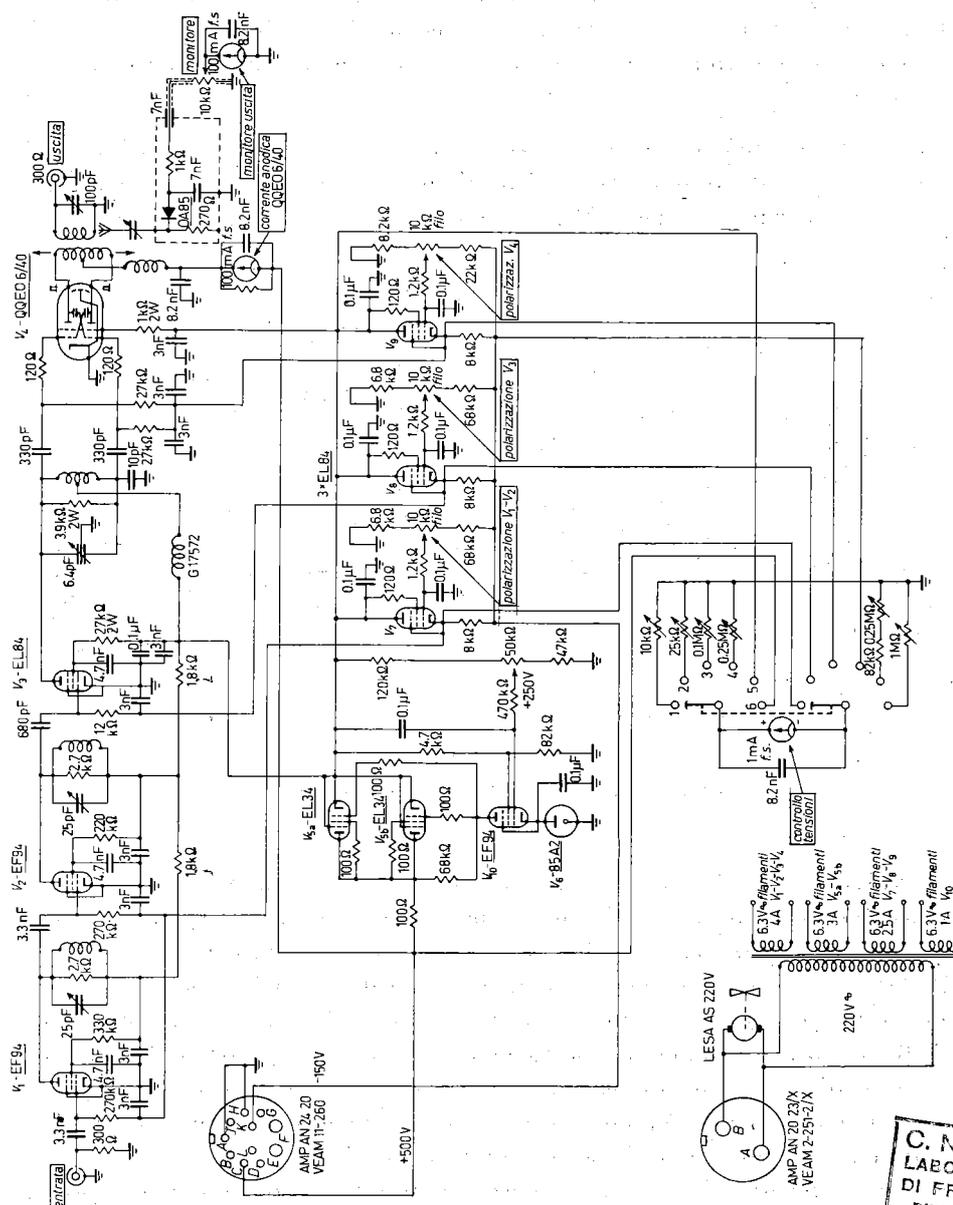


Fig. V.III.3. - Amplificatore RF interstadio.

l'impianto in funzione. Si è preferito adoperare una linea artificiale, della quale vengono fatte variare le capacità in parallelo, ad una linea reale (cavo coassiale rientrante) per ragioni di ingombro e comodità di funzionamento.

Dalla linea artificiale il segnale entra nel gruppo dei circuiti indicati nella Fig. V.III.3.

Questi circuiti hanno la funzione di rendere l'ampiezza del segnale a RF in uscita indipendente dalle variazioni in ampiezza del segnale in ingresso.

Difatti le valvole  $V_1$  e  $V_2$  funzionano come limitatrici mentre  $V_4$  e  $V_5$  funzionano come amplificatrici. La banda passante di questo amplificatore è di 1.3 MHz.

B) *Il primo stadio amplificatore.* - Il blocco 2 comprende tutti i circuiti del primo stadio di amplificazione. Lo schema dei circuiti che compongono questo stadio è riportato nella Fig. V.III.4.

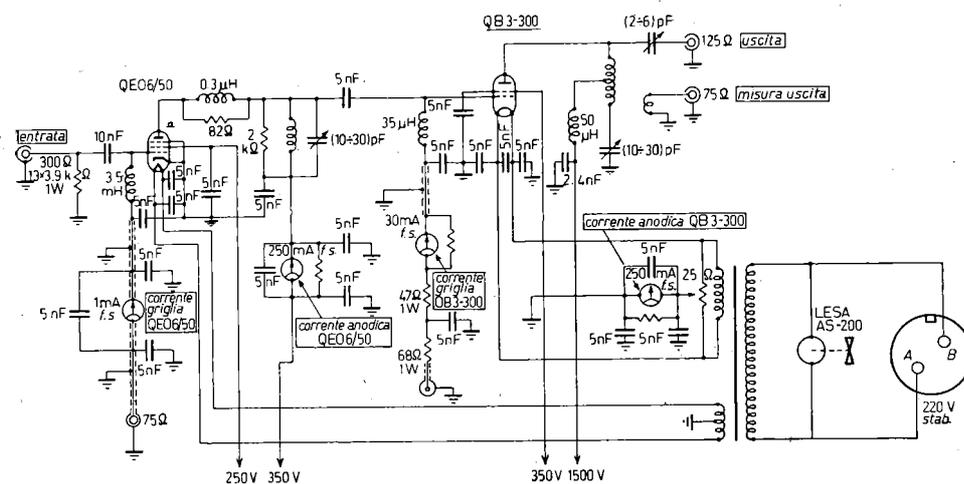


Fig. V.III.4. - 1° stadio amplificatore.

La valvola di uscita, QB3/300, è connessa in modo da poter eseguire la modulazione di ampiezza variando la polarizzazione della griglia controllo di questa valvola. L'uscita è fatta su cavo coassiale da 125  $\Omega$ .

Nella descrizione dello schema a blocchi si è detto che la modulazione di ampiezza viene fatta variando la polarizzazione della griglia controllo degli stadi di potenza. Ovviamente questo non è il sistema migliore dal punto di vista del rendimento e della linearità. Nel nostro caso però è stato scelto proprio questo sistema in quanto, seppure a scapito del rendimento, permette la massima flessibilità nelle prestazioni richieste all'impianto [1].

Si è deciso poi di effettuare la modulazione principale sulla griglia della prima

valvola di potenza con forma d'onda come riportato nella Fig. V.III.5. Questo per soddisfare alle prestazioni seguenti.

Durante il periodo nel quale la cavità di potenza non è eccitata la tensione al gap deve essere effettivamente zero; durante l'accelerazione del fascio la modulazione di ampiezza non è critica; durante l'estrazione del fascio la modulazione d'ampiezza deve seguire una legge che dipende dal particolare esperimento che si sta facendo. Per avere segnale zero sulla cavità risonante è

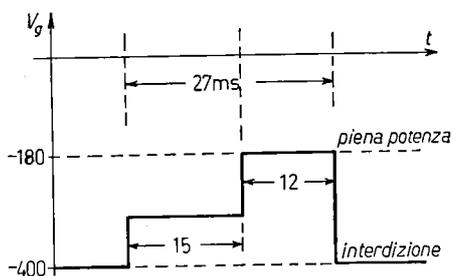


Fig. V.III.5.

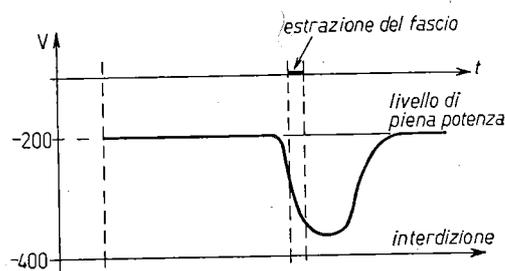


Fig. V.III.6.

necessario che la catena sia interdetta fin dal primo stadio di potenza in modo da evitare che il segnale possa « passare » per capacità eccitando la cavità, magari a livelli bassissimi. Modulando però solo sul primo stadio è difficile dare la forma voluta alla tensione a RF al momento della estrazione del fascio, e pertanto si è introdotta una piccola modulazione sulla polarizzazione della griglia controllo dei due stadi successivi che deve operare quando la tensione a RF deve incominciare a diminuire. In Fig. V.III.6 è dato l'andamento di uno di questi segnali modulanti.

C) *Il secondo stadio amplificatore.* - In Fig. V.III.7 è riportato lo schema elettrico del secondo stadio (blocco 3 della Fig. V.III.1).

Questo è costituito da un solo tetrodo di potenza QB5/1750.

Per avere una sufficiente neutralizzazione la griglia schermo del tetrodo è messa a terra con una capacità distribuita di 2000 pF [1, 3].

Il circuito di griglia è fortemente smorzato ed il segnale in uscita è prelevato direttamente dalla placca con un accoppiamento capacitivo. L'uscita è fatta con cavo coassiale a 60 Ω.

Questo amplificatore deve pilotare l'amplificatore finale che a sua volta è montato griglia a terra, e quindi richiede una notevole potenza (~ 600 W). Ciò richiede che l'amplificatore che lo pilota sia largamente sovradimensionato anche in vista del fatto che durante la modulazione di ampiezza la tensione continua di placca rimane invariata.



la cavità risonante. Il circuito di catodo non richiede accorgimenti particolari per l'accordo, in quanto, a causa dell'alto valore della transconduttanza del tubo, risulta a banda estremamente larga. Il dimensionamento di prima approssimazione delle linee risonanti di placca e di catodo [5] è stato fatto

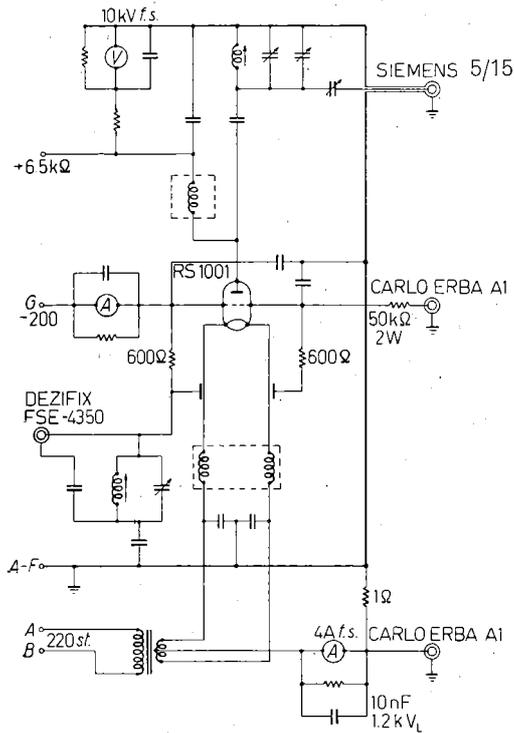


Fig. V.III.8. - Amplificatore finale.

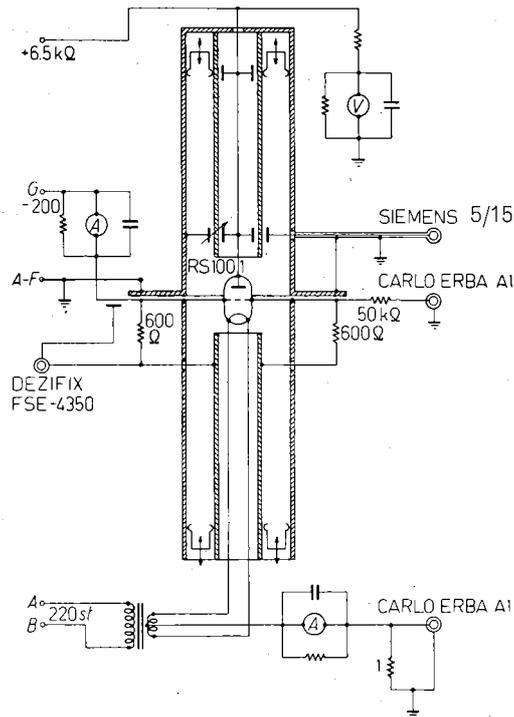


Fig. V.III.9. - Amplificatore finale.

imponendo l'uguaglianza tra le reattanze totali di ingresso e di uscita (capacitive) del tubo e le reattanze di ingresso delle linee coassiali, che sono funzioni della lunghezza secondo la formula:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r_e}{r_i} \operatorname{tg} 2\pi \frac{l}{\lambda},$$

dove  $r_e$ ,  $r_i$  sono i raggi esterno ed interno,  $l$  è la lunghezza della linea coassiale che costituisce il circuito oscillante e  $\lambda$  la lunghezza d'onda. La neutralizzazione, che non è molto critica, è stata fatta aggiustando empiricamente l'induttanza dei collegamenti (a raggera) tra l'anello di griglia della valvola e la capacità verso massa [6].

La capacità di accoppiamento tra il tubo e l'estremo caldo della linea coas-

siale di placca e la capacità che mette a terra la griglia sono di tipo distribuito, realizzate in teflon, mentre la capacità di blocco della RF (sempre di tipo distribuito) è realizzata con mylar.

Tutti gli amplificatori della catena radiofrequenza hanno la polarizzazione esterna (realizzata con lo stesso sistema già descritto per l'impianto della RF<sub>1</sub>) e sono protetti dalle sovracorrenti che potrebbero derivare da guasti ai circuiti di polarizzazione, da disaccordo o iperpilotaggio di qualche stadio per mezzo di relais inseriti sui circuiti di catodo, che a loro volta possono comandare sia i dispositivi di allarme (segnalatori luminosi e acustici) sia gli alimentatori.

*E) Prestazioni richieste ai modulatori.* — Come è stato detto precedentemente la modulazione di ampiezza è effettuata variando la polarizzazione di griglia di tutte e tre le valvole di potenza al momento opportuno.

Il circuito modulatore può quindi essere pensato come diviso in due parti: il circuito che genera le forme d'onda comandato direttamente dal sincronizzatore principale; i circuiti a bassa impedenza che fanno variare la polarizzazione delle valvole. Questi ultimi sono realizzati a inseguitore catodico come è stato descritto nel Cap. II di questa Parte V.

Per lo schema elettrico ed il meccanismo di funzionamento del circuito che genera le forme d'onda di modulazione rimandiamo alla Parte VII, Cap. II, Fig. VII.11.7.

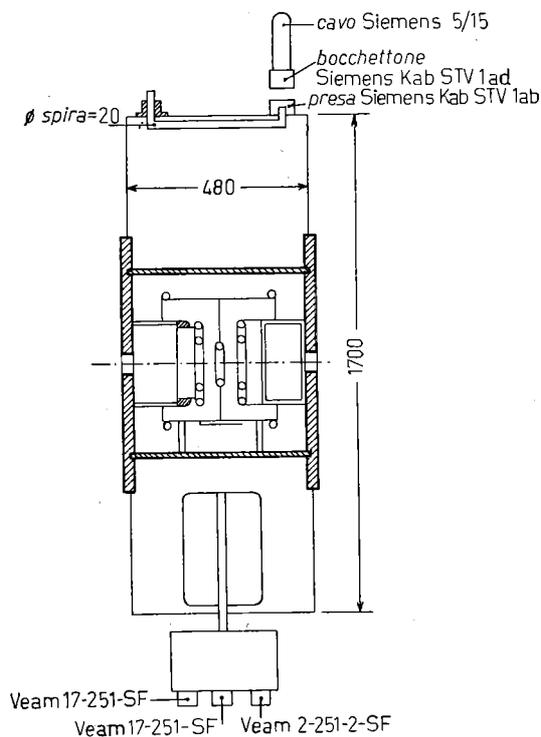


Fig. V.III.10. — Schema elettrico cavità.

### 3. — La cavità risonante.

*A) Caratteristiche generali.* — La cavità da noi adottata è illustrata nello schema elettrico della Fig. V.III.10 e nei particolari costruttivi nei disegni di Fig. V.III.11 e V.III.12.

Il tipo di cavità prescelta ha la parte ad alta tensione (gap) sotto vuoto e la parte induttiva in aria. Questa soluzione semplifica enormemente la costruzione del risonatore e l'attacco della spira di eccitazione. La forma della cavità è stata imposta dalla larghezza massima a disposizione nella sezione diritta ove si

doveva sistemare la cavità. Difatti una volta sistemati gli attacchi del vuoto rimanevano solo 500 mm per la cavità stessa. Per queste ragioni si è dovuto tenere grande il diametro del risonatore.

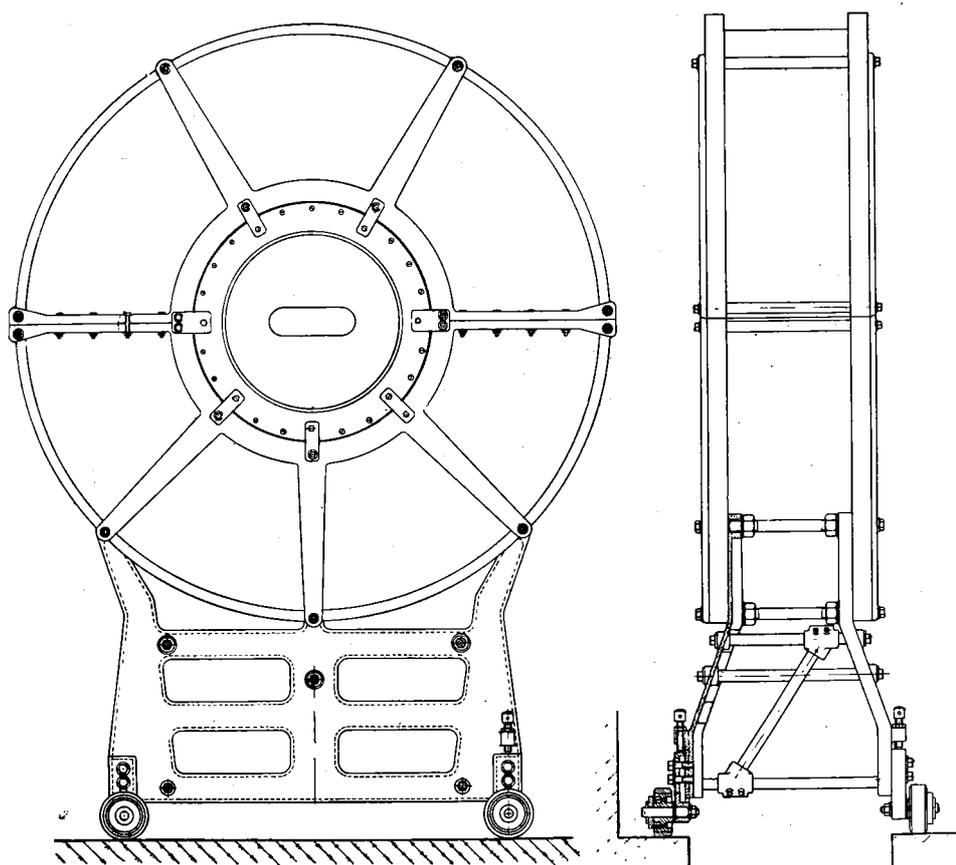


Fig. V.III.11. - Disegno d'insieme della cavità RF<sub>2</sub>.

*B) Caratteristiche meccaniche.* - La cavità è limitata esternamente da una superficie cilindrica di altezza 480 mm e diametro 1700 mm. Lungo l'asse della cavità si trova un gap a simmetria cilindrica. La superficie esterna è costituita da due D di lamiera di rame ricotto da 12/10 di mm, formati rispettivamente da due semicerchi saldati a stagno ad una parete laterale con sezione semicircolare. Tutto ciò è fissato ad una struttura portante di alluminio, esterna ai D. La parte « gap » è invece costituita da due flange di ottone ramato di 20 mm di spessore che sostituiscono la lamiera nella parte centrale dei D e che poggiano su un tubo di quarzo di  $\varnothing$  500 mm e spessore 10 mm che si trova così ad essere coassiale al cilindro formato dai due D.

Ad ognuna delle flange è saldato un tubo di lamiera di rame di  $\varnothing = 370$  mm ed  $h = 120$  mm, ognuno dei quali è coassiale al tubo di quarzo. All'interno del tubo di quarzo e coassiale con esso è montato un tubo di rame di  $\varnothing = 400$  mm, che porta una parete di rame a metà della sua lunghezza. Questa costituisce un diaframma simmetrico rispetto ai tubi saldati alle flange. Questo insieme

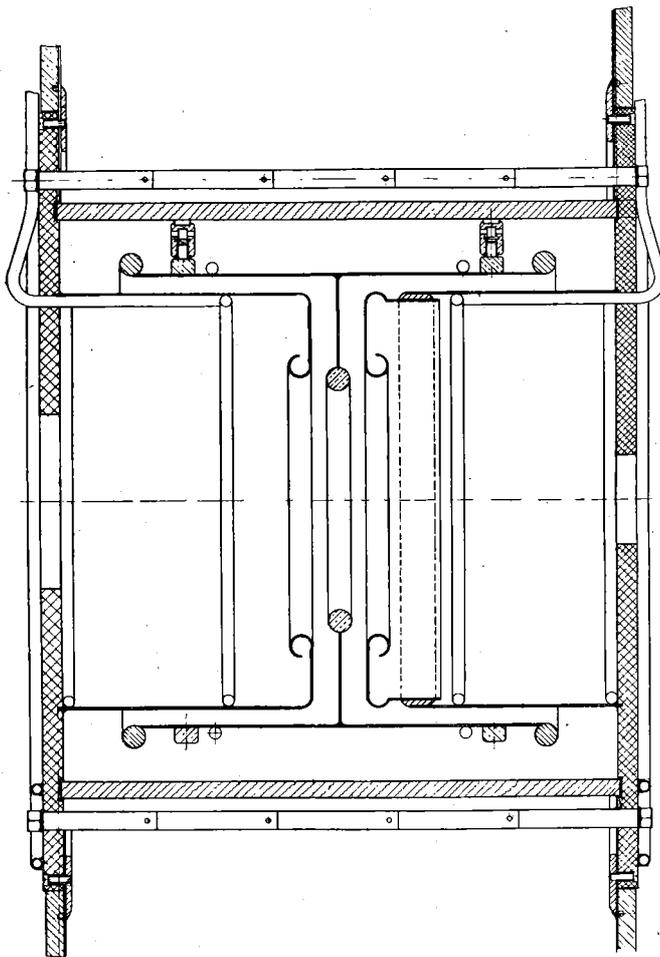


Fig. V.III.12. - Parte sotto vuoto della cavità  $RF_2$ . Sono in vista i tiranti di assemblaggio.

viene così a formare una capacità costituita da due condensatori in serie le cui armature sono rispettivamente: il tubo saldato alla prima flangia e metà del tubo di rame che poggia sul quarzo; l'altra metà dello stesso tubo e il tubo saldato alla seconda flangia. Il contatto elettrico tra le flange e le pareti dei D è stato realizzato mediante deformazione per compressione di un anello di

filo di rame argentato di  $\varnothing = 2$  mm posto tra le pareti stesse (rinforzate lungo quella circonferenza) e le flange. Il raffreddamento sia delle flange sia dei due tubi ad esse rispettivamente connessi è realizzato mediante circolazione di acqua entro appositi tubicini di rame. Il tubo fissato al quarzo è raffreddato mediante circolazione d'olio; i tubi di raffreddamento per questo elettrodo, anch'essi di rame, escono da un foro praticato a metà della lunghezza del tubo di quarzo. La saldatura per la tenuta del vuoto, che è praticato nella zona delimitata dal tubo di quarzo e dalle flange, è stata eseguita con araldite applicata a freddo. Questi due tubi, andata e ritorno, sono di gomma sintetica speciale e vanno dall'uscita del tubo di quarzo all'esterno della cavità che ne risulta così attraversata radialmente.

Le flange sono poi collegate esternamente alla ciambella mediante appositi cannocchiali.

*C) Caratteristiche elettriche.* - Il risultato principale degli accorgimenti meccanici descritti è stato l'aver potuto ottenere un  $Q \simeq 6500$  ( $Z = 55 \Omega$ ) misurato col metodo della deviazione di frequenza corrispondente alla metà potenza. Ciò ha permesso di avere la massima tensione di picco richiesta al gap con una potenza relativamente modesta, che è di circa 7 kW per ottenere circa 70 000 V di picco al gap, mentre la potenza media è di circa 3 kW. La formula che è stata usata per il dimensionamento della parte induttiva della cavità è

$$L = \frac{\mu l}{2\pi} \ln \frac{r_{\max}}{r_{\min}} \text{ henry ,}$$

dove  $l$  è la lunghezza della cavità in metri,  $r_{\max}$  e  $r_{\min}$  rispettivamente il raggio massimo e il raggio minimo della stessa. Per la parte capacitiva sono state invece usate le normali formule delle capacità concentrate tenendo conto dei campi dispersi; la frequenza di risonanza calcolata è risultata superiore del 5% alla frequenza misurata. L'eccitazione della cavità è stata ottenuta mediante un accoppiamento induttivo tra una spira che termina il cavo coassiale proveniente dall'amplificatore di potenza e la parte induttiva della cavità stessa. Il calcolo della spira è stato effettuato usando la formula di prima approssimazione:

$$\sqrt{\frac{Z_0 Q_0}{R_{\text{eq}}}} = \frac{l}{\lambda} \frac{\ln(r_{\max}/r_{\min})}{\ln(r_2/r_1)},$$

dove  $R_{\text{eq}}$  è la resistenza equivalente riportata sulla spira,  $\lambda$  la larghezza della spira stessa,  $r_1$  e  $r_2$  le distanze minima e massima della spira dall'asse della cavità,  $z_0$ ,  $Q_0$ ,  $l$ ,  $r_{\max}$  e  $r_{\min}$  i parametri già menzionati.

Era stato previsto di impedire le scariche elettroniche a risonanza (multipacting) mediante un campo elettrico continuo tra l'elettrodo centrale e le

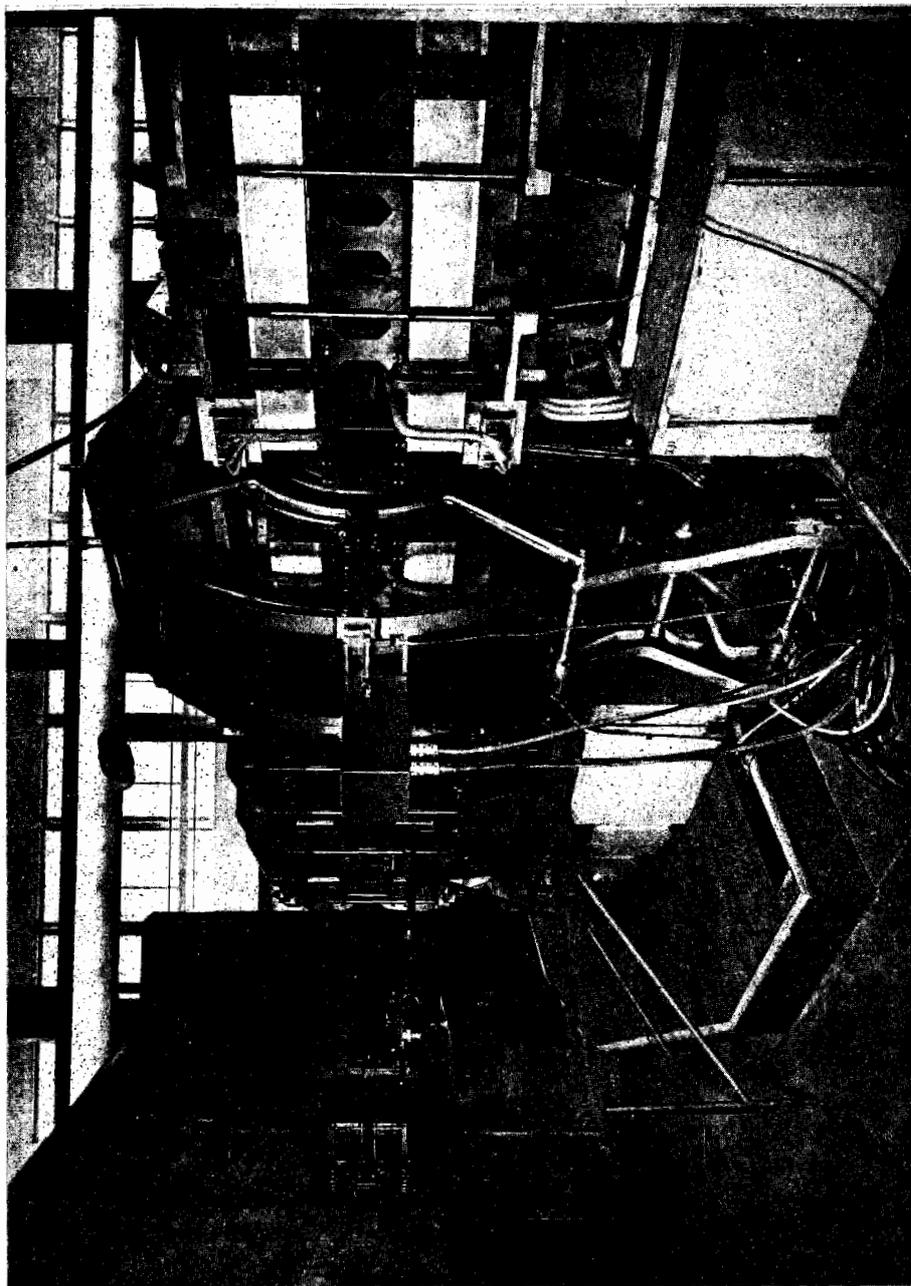


Fig. V.m.13. - La cavità RF<sub>2</sub> montata sull'elettrosincrotrone.

pareti a massa della cavità. In effetti in fase di prova dell'impianto era necessario applicare una tensione continua di 3 kV tra detto elettrodo e massa. Una volta installato l'impianto, il componente continuo del campo magnetico disperso del magnete s'è dimostrato sufficiente ad ovviare a questo inconveniente. Nella Fig. V.III.13 è in vista la cavità della RF<sub>2</sub> montata sull'elettrosincrotrone.

Questa cavità ha funzionato per più di 10 000 ore di fascio senza alcun inconveniente notevole.

È attualmente allo studio un risonatore interamente sotto vuoto da 150 kV, con accoppiamento induttivo all'amplificatore finale di potenza. Per poter ottenere alte tensioni è necessario ricorrere a questa soluzione:

- a) per non sollecitare proibitivamente i dielettrici;
- b) per ottenere il  $Q$  più alto possibile, evitando quindi tutto ciò che può aumentare le perdite della cavità stessa.

#### 4. - Alimentatori e circuiti di protezione.

A) *Alimentatori.* - Il criterio seguito nella progettazione degli alimentatori per la catena di amplificazione è stato quello di ottenere le migliori prestazioni con i minimi ingombri pur volendo avere la possibilità di eccitare la cavità a piena potenza in regime continuo. Per questo tutti gli alimentatori di potenza sono stati dimensionati per erogare una potenza notevolmente superiore alla potenza media erogata con la macchina in condizione di normale funzionamento.

Gli alimentatori ad alta tensione sono quattro ed esattamente: alimentatore per la QB3/300 (1.5 kW); alimentatore per la tensione anodica della QB5/1750 (2.5 kW); alimentatore per lo schermo della stessa valvola; alimentatore per la valvola finale RS1001L (12 kW). Gli alimentatori anodici di alta tensione sono a ponte esafase con con filtro a ingresso induttivo. Tutti gli altri sono invece a due semionde con filtro a ingresso capacitivo e stabilizzazione contro le variazioni di rete e di carico.

Nelle Fig. V.III.14 e V.III.15 è riportato, a titolo di esempio, lo schema dell'alimentatore dello stadio finale.

B) *Circuiti di protezione.* - Le protezioni sono di vario tipo e si possono suddividere in due categorie. Quelle a carattere generale che proteggono tutto l'impianto e quelle a carattere particolare che ne proteggono una singola parte.

Del primo tipo è essenzialmente la sequenza di avviamento dell'impianto. Mediante un sistema di relais e teleruttori si può procedere all'accensione degli alimentatori che danno le alte tensioni solo seguendo un ordine prestabilito e cioè ad esempio non può essere data la tensione di schermo alla QB5/1750, se non è già stata data l'anodica alla stessa valvola. Questo serve

ad evitare false manovre; in particolare qualora manchi l'alimentazione 24 V c.c. viene interrotta anche la tensione alternata di rete e quando la tensione viene ridata, bisogna procedere alla riaccensione completa dell'impianto. Analogamente avviene se manca la tensione di rete.

Infine un sistema di controlli dell'efficienza del sistema di raffreddamento

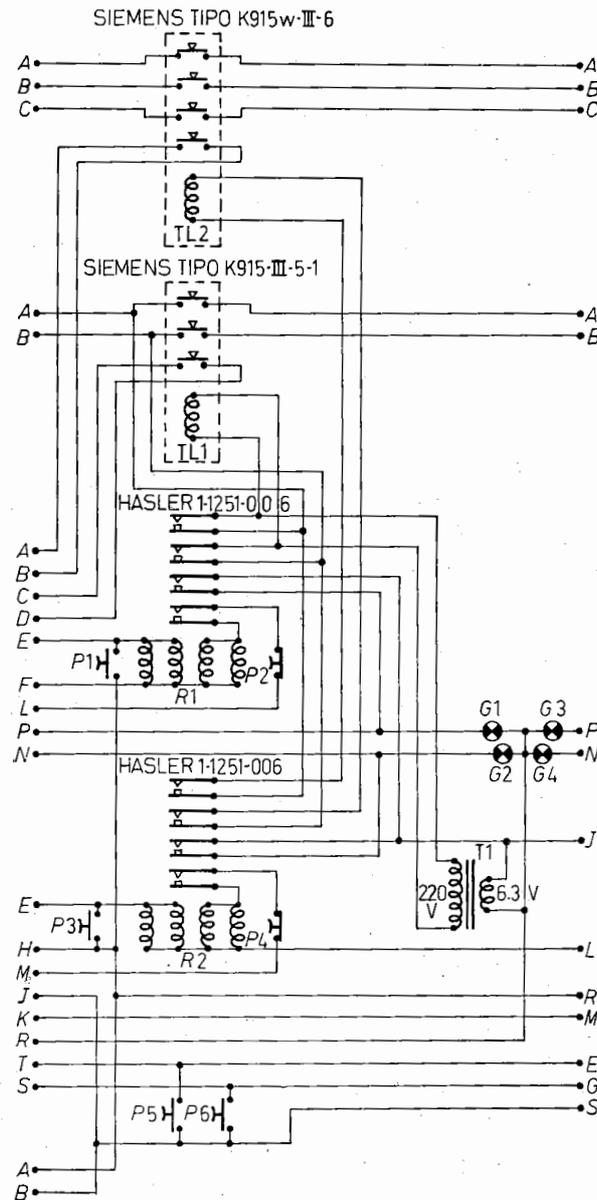


Fig. V.III.14. - Alimentatore alta tensione dello stadio finale. Unità comando.

della cavità risonante e della valvola RS1001L dà un'informazione che agisce sulla sequenza, provocando il completo spegnimento dell'impianto qualora vi sia un guasto parziale o totale dell'impianto di raffreddamento.

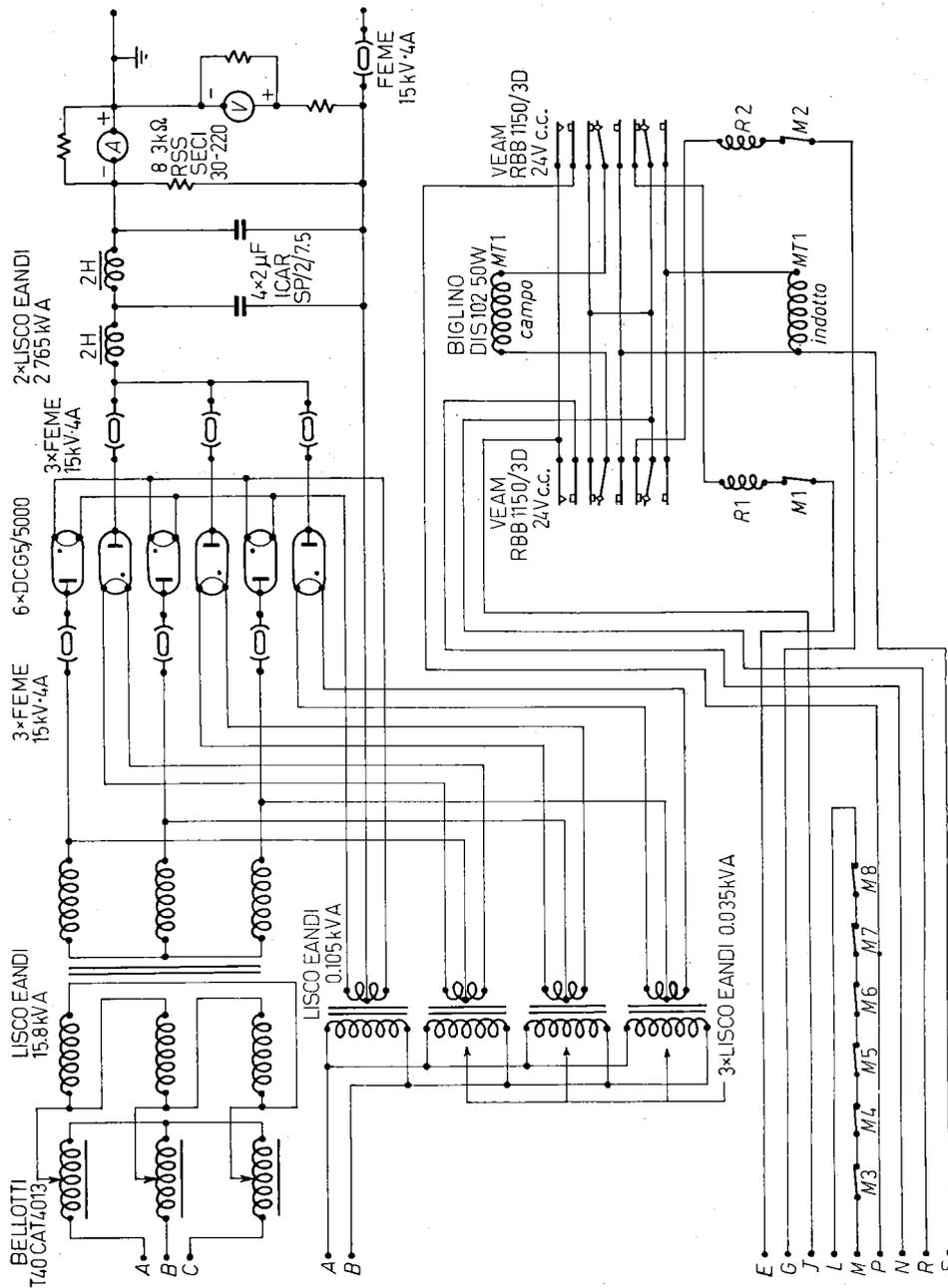


Fig. V.III.15. - Alimentatore alta tensione dello stadio finale. Schema elettrico.

Del secondo tipo è invece la protezione sulla griglia della RS1001L che provoca lo spegnimento delle alte tensioni qualora il negativo di griglia di detta valvola risalga oltre un valore prefissato. Sempre del secondo tipo sono le segnalazioni di allarme per massimo assorbimento catodico delle tre valvole di potenza QB3/300, QB5/1750, RS1001L. Queste segnalazioni entrano in funzione qualora la corrente catodica di una di queste valvole superi il valore massimo consentito, senza peraltro comandare una qualunque manovra alla catena.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] E. K. SANDEMAN: *Radio Engineering*, vol. 1 e 2 (London, 1953).
- [2] L. B. ARGUIMBAU: *Vacuum Tube Circuits* (New York, 1948), p. 500.
- [3] L. B. ARGUIMBAU: *Vacuum Tube Circuits* (New York, 1948).
- [4] M. PUGLISI: *L'Elettrotecnica*, 44, 507 (1959).
- [5] S. RAMO e J. WHINNERY: *Fields and Waves in Modern Radio* (New York, 1953).
- [6] J. P. HEYBOER e P. ZIJLSTRA: *Transmitting Valves* (Eindhoven, 1953).