

*Stefano Levi*

**NOTE TECNICHE**  
**NT 2/1970**

**“AMPLIFICATORE A BASSO RUMORE  
PER RIVELATORI D'INFRAROSSO”**

**G. COSTANZINI e F. EVANGELISTI**

**Lab. TE.S.R.E. - C.N.R.**  
**VIA DI' CASTAGNOLI, 1**  
**40126 Bologna - Italia**

Felice Celi

SOMMARIO

Scopo della presente nota tecnica NT - 2/1970 è descrivere sinteticamente quanto è stato realizzato nel periodo Novembre 1968 - Giugno 1969 su di un amplificatore a basso rumore, utilizzabile con rivelatori di infrarosso.

## A - INTRODUZIONE

Per osservare l'emissione nell'infrarosso dei corpi celesti occorre realizzare dispositivi per l'amplificazione dei segnali piccolissimi e mascherati dal rumore, che si hanno in uscita dai rivelatori attualmente esistenti. Questi segnali hanno un livello compreso fra  $10^{-8}$  e  $10^{-4}$  Volts, una frequenza molto bassa dell'ordine di qualche Hz o meno e si possono considerare prodotti da un generatore ( bolometro), la cui resistenza di sorgente  $R_s$  è variabile fra  $100K\Omega$  e  $10M\Omega$  a seconda delle condizioni di funzionamento. Si rende dunque necessario un sistema di rivelazione costituito dalle parti seguenti:

- Un "chopperaggio" a bassa frequenza per modulare il livello di uscita del bolometro;
- Un preamplificatore a bassissimo rumore selettivo sulla frequenza del "chopper";
- Un amplificatore logaritmico per prevenire la saturazione degli stadi successivi, qualora il segnale d'ingresso abbia una ampiezza prossima ai valori più elevati;
- Un amplificatore e
- un sistema di demodulazione sincrona, che ripristini la primitiva frequenza del segnale.

In un apparato di misura di questo tipo lo stadio di maggior importanza ed interesse è costituito ovviamente dal preamplificatore a basso rumore; le sue caratteristiche devono essere tali da non contribuire in maniera sensibile al rumore prodotto dal bolometro, che

maschera il segnale di ingresso. Dato che la maggior parte dei bolometri presenta una densità spettrale di tensione di rumore di circa  $100 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ , il preamplificatore alla frequenza di funzionamento deve essere caratterizzato da un generatore equivalente di tensione di rumore d'ingresso molto minore di  $100 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ . E questa è la maggiore difficoltà, in quanto, come noto, il rumore dei componenti in bassa frequenza (per frequenze al di sotto del KHz) va circa come  $1/f$  e la frequenza dei chopper meccanici normalmente usati è dell'ordine di  $10 \div 50 \text{ Hz}$ . I maggiori sforzi quindi sono stati indirizzati soprattutto verso lo studio, la progettazione e la realizzazione del preamplificatore e dell'amplificatore in bassa frequenza, mentre la catena di modulazione sincrona è stata realizzata solo allo scopo di poter effettuare alcune registrazioni in laboratorio.

## B - PREAMPLIFICATORE

Il preamplificatore è costituito da:

- a) Due stadi di ingresso a FET (Fig. 1) montati nella configurazione "a sorgente comune" con debole controreazione e autopolarizzazione di sorgente e con l'ingresso "boostrappato" per aumentare la  $R_{ig}$ ; l'amplificazione di tensione a centro banda è  $A_{o1} = 1,3 \times 10^3$ .
- b) Un amplificatore successivo (Fig. 2) con controreazione selettiva a 33 Hz, che fa uso di transistori bipolari ad alto  $h_{FE}$  e basso rumore, in cui la reazione è costituita da una cella a

doppio T (rete di Scott); l'amplificazione di tensione a 33 Hz è  $A_{o2} = 35$ .

Le caratteristiche principali del preamplificatore dunque sono:

- frequenza di funzionamento a centro banda ....  $f_o = 33$  Hz
- larghezza di banda a -3 dB .....  $BW = 1,5$  Hz
- amplif. di tensione alla freq.  $f_o$  .....  $A_{oV} \approx 4,5 \times 10^4$
- resistenza d'ingresso .....  $R_{in} > 10$  M
- " di uscita .....  $R_{ou} \approx 1$  K
- consumo totale .....  $\approx 140$  mW (5,5mA  
a - 25V)

Per analizzare le prestazioni di rumore del preamplificatore sono state condotte misure di rumore sul solo stadio d'ingresso; infatti dato l'elevato "guadagno di potenza ottenibile" del primo FET ( $> 10^6$ ), il rumore introdotto dagli stadi successivi è assolutamente trascurabile. Il secondo stadio a FET si è usato in queste misure come post-amplificatore e il tutto si è inserito nella catena di misura mostrata nei grafici di Fig. 3 e 4. La Fig. 3 mostra l'andamento della figura di rumore a larga banda  $\overline{NF}$  in funzione della resistenza di sorgente  $R_s$ ; si può notare che

$$\overline{NF} \leq 1 \text{ dB per } 46,4 \text{ K}\Omega \leq R_s \leq 475 \text{ K}\Omega$$
$$\text{con } \overline{NF}_{\min} = 0,7 \text{ dB per } R_s = 100 \text{ K}\Omega$$

La Fig. 4 mostra l'andamento della figura di rumore  $NF$  in funzione della frequenza (con  $R_s = 46,4 \text{ K}\Omega$ ). Nel grafico sono riportati anche i valori rispettivamente della resistenza equivalente di rumore  $R_n$  e del valore efficace della tensione equivalente di rumore all'ingresso  $\left(\frac{v_n}{n}\right)^{\frac{1}{2}}$ .

C - AMPLIFICATORE

L'amplificatore (Fig. 5) è costituito da uno stadio a FET BFX 83 che fornisce un'elevata  $R_{in}$  e da un altro stadio con controreazione selettiva a 33 Hz, identico a quello del preamplificatore, con amplificazione variabile. Le caratteristiche principali di questo amplificatore sono:

- frequenza di funzionamento a centro banda .....  $f_o = 33 \text{ Hz}$
- larghezza di banda a - 3 dB .....  $BW = 1,5 \text{ Hz}$
- amplificazione di tensione alla freq.  $f_o$  .....  $A_{o_v} = 0 + 1200$
- resistenza d'ingresso .....  $R_{in} = 10 \text{ M}\Omega$
- resistenza d'uscita .....  $R_o = 1 \text{ K}\Omega$
- consumo totale .....  $100 \text{ mW}$  (4 mA  
a - 25V)

D - CATENA DI DEMODULAZIONE SINCRONA

La catena di demodulazione sincrona (Fig. 6) è costituita da uno sfasatore e un circuito squadratore tipo trigger di Schmitt, pilotati da un segnale di riferimento in fase con la frequenza di "chopperaggio". Le due onde quadre che così si generano sono in opposizione di fase, della stessa frequenza del chopper e in sincronismo col segnale sinusoidale all'uscita dell'amplificatore. Il demodulatore sincrono è un circuito tipo amplificatore differenziale con gli ingressi pilotati dalle due onde quadre di riferimento e col segnale di uscita dell'amplificatore che modula la resistenza comune sugli emettitori. Tale modulazione deforma l'onda quadra di uscita, in mo-

do tale che i valori medi di tali onde quadre siano diversi da zero. L'entità di questo valore medio è proporzionale all'ampiezza del segnale da rivelare; i segnali in uscita sono poi integrati e mandati al registratore.

#### E - METODO DI PROVA

Avendo gli stadi di amplificazione complessivamente un guadagno molto elevato, una particolare cura si è posta per evitare qualunque possibilità di innesco, mediante l'uso di batterie per gli amplificatori. Sempre per diminuire i disturbi che l'ambiente può introdurre nei circuiti, ogni blocco è stato schermato racchiudendolo in appositi contenitori di alluminio. Anche i collegamenti delle masse hanno richiesto molta attenzione, soprattutto perchè tutto il sistema ha una configurazione ad anello, il che facilita l'instaurarsi di ritorni di segnali parassiti e di regimi oscillatori.

Si è proceduto poi ad un montaggio di tipo sperimentale, inserendo i componenti su basette sia di bachelite, sia di vetroresina indifferentemente.

Il metodo di prova ha richiesto l'uso di un sistema come indicato nello schema di Fig. 7. Racchiuso in una linea tratteggiata è il dispositivo in prova, gli altri sono strumenti di misura.

Prima di procedere alla registrazione si è misurato il guadagno dei due stadi preamplif. e amplif. in cascata a loop aperto e si è verificato che tale guadagno si mantenesse inalterato chiudendo la catena. L'attenuatore poi è stato uno dei punti cruciali di tutta la misura e ha richiesto cure particolari e molti tentativi. Il tipo utilizzato

è realizzato in aria con resistenze di precisione. Si tratta di una cascata di tre celle, ciascuna delle quali con attenuazione 100, di cui l'ultima chiusa su di un potenziometro che introduce un'ulteriore attenuazione.

Di registrazioni ne sono state eseguite un certo numero per diversi valori del guadagno di tensione e quella che ha fornito i risultati migliori ci è parso essere l'ultima, relativa a un  $A_{oV} = 45 \times 10^6$ , (Fig. 8 e 9). Dalla Fig. 8 si deduce un rapporto  $S/N \approx 7,8$ , mentre dalla Fig. 9 si può vedere che l'ampiezza del segnale di uscita dall'amplificatore è  $\approx 8V_{pp}$ , il che corrisponde a una  $V_{in} \approx 180 nV_{pp}$ . Quindi il segnale minimo d'ingresso rivelabile con un rapporto  $S/N = 6 \text{ dB}$  è  $\approx 46 \times 10^{-9} nV_{pp}$ .

I risultati finali dunque ottenuti col dispositivo descritto si possono riassumere come segue:

- frequenza di centro banda .....  $f_o = 33 \text{ Hz}$
- larghezza di banda a - 3 dB .....  $BW = 1,5 \text{ Hz}$
- resistenza d'ingresso .....  $R_{in} > 10 \text{ M}\Omega$
- amplificaz. di tensione a  $= f_o$  .....  $A_{oV} = 153 \text{ dB}$
- minimo segnale d'ingresso
- rivelabile .....  $(V_{in})_{min} \approx 50 nV_{pp}$
- rapporto S/N corrispond. a  $(V_{in})_{min}$  .....  $S/N = 6 \text{ dB}$
- costante di integrazione .....  $\tau \approx 4 \text{ sec.}$

F - ALCUNI COMMENTI

A conclusione di questa prima parte del lavoro pensiamo che i ri-



sultati ottenuti siano suscettibili di miglioramento per i seguenti motivi:

- a) - fino ad ora nella scelta dei componenti ci si è serviti esclusivamente di tipi facilmente reperibili in commercio, come ad esempio, resistenze comuni a impasto della Allen Bradley, condensatori elettrolitici a elettrolito liquido ecc.
- b) - i transistori sia unipolari che bipolari (tutti della produzione SGS, in quanto immediatamente reperibili in commercio) presentano caratteristiche di rumore buone per l'epoca in cui si è incominciato il lavoro, ma ora non più competitive con quelle di altri prodotti di case diverse.

D'altra parte si deve dire che, qualora ben dimensionato per il guadagno di potenza, il primo stadio è quello che contribuisce in maniera essenziale al rumore complessivo di tutto il preamplificatore. E se questo primo stadio, a sua volta, è dimensionato in modo da fornire i valori richiesti di  $A_{oV}$ ,  $R_{in}$ ,  $R_o$ , BW ecc. e realizzato con componenti passivi a basso rumore, alta stabilità e affidabilità, il fatto che il preamplificatore non dia la voluta NF sarà imputabile soltanto al componente attivo d'ingresso del 1° stadio stesso, piuttosto che alle condizioni in cui si trova a funzionare. Ciò implica la necessità di procedere nel modo seguente:

- 1° - scegliere il tipo di circuito e dimensionarlo in modo da ottenere i valori voluti delle varie grandezze tipo  $A_{oV}$ ,  $R_{in}$ , ecc.;
- 2° - ottimizzare i componenti passivi mediante l'uso di resistenze a "metal film" o "metal oxide" ad alta stabilità e basso

rumore e condensatori elettrolitici al tantalio o a elettrolita solido di piccole dimensioni, bassissime correnti di fuga, alti valori di capacità;

- 3° - realizzare il montaggio circuitale su circuito stampato, avendo particolare cura delle masse e delle alimentazioni, incorporando il tutto, se possibile, entro un unico contenitore, avente anche le funzioni di schermo metallico.

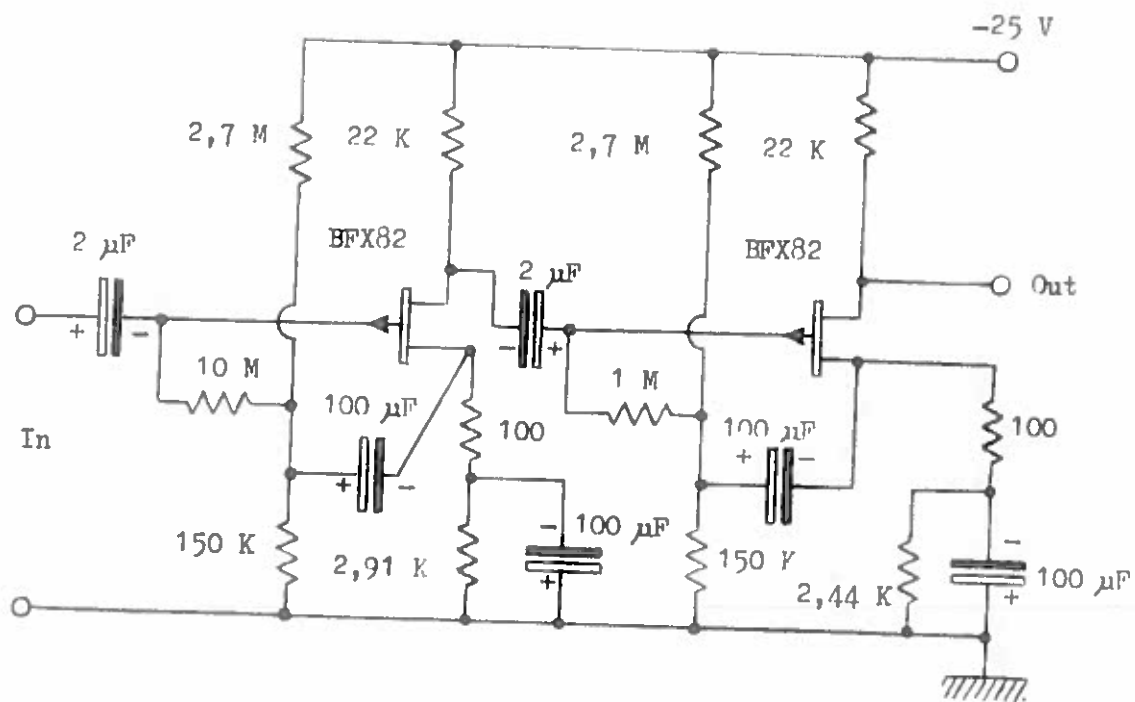
Una volta che tutto ciò sia stato realizzato il conseguimento della voluta minima figura di rumore si raggiunge solo attraverso una scelta accurata del transistor dello stadio d'ingresso. Questa scelta permette di ottimizzare il circuito dal punto di vista della sua NF, lasciandolo inalterato per tutto il resto.

La stabilità con la temperatura, che consente l'uso del preamplificatore in applicazioni spaziali, si potrà conseguire a posteriori, per esempio mediante l'uso di reazione negativa, senza alterare la NF ottenuta in precedenza.

---

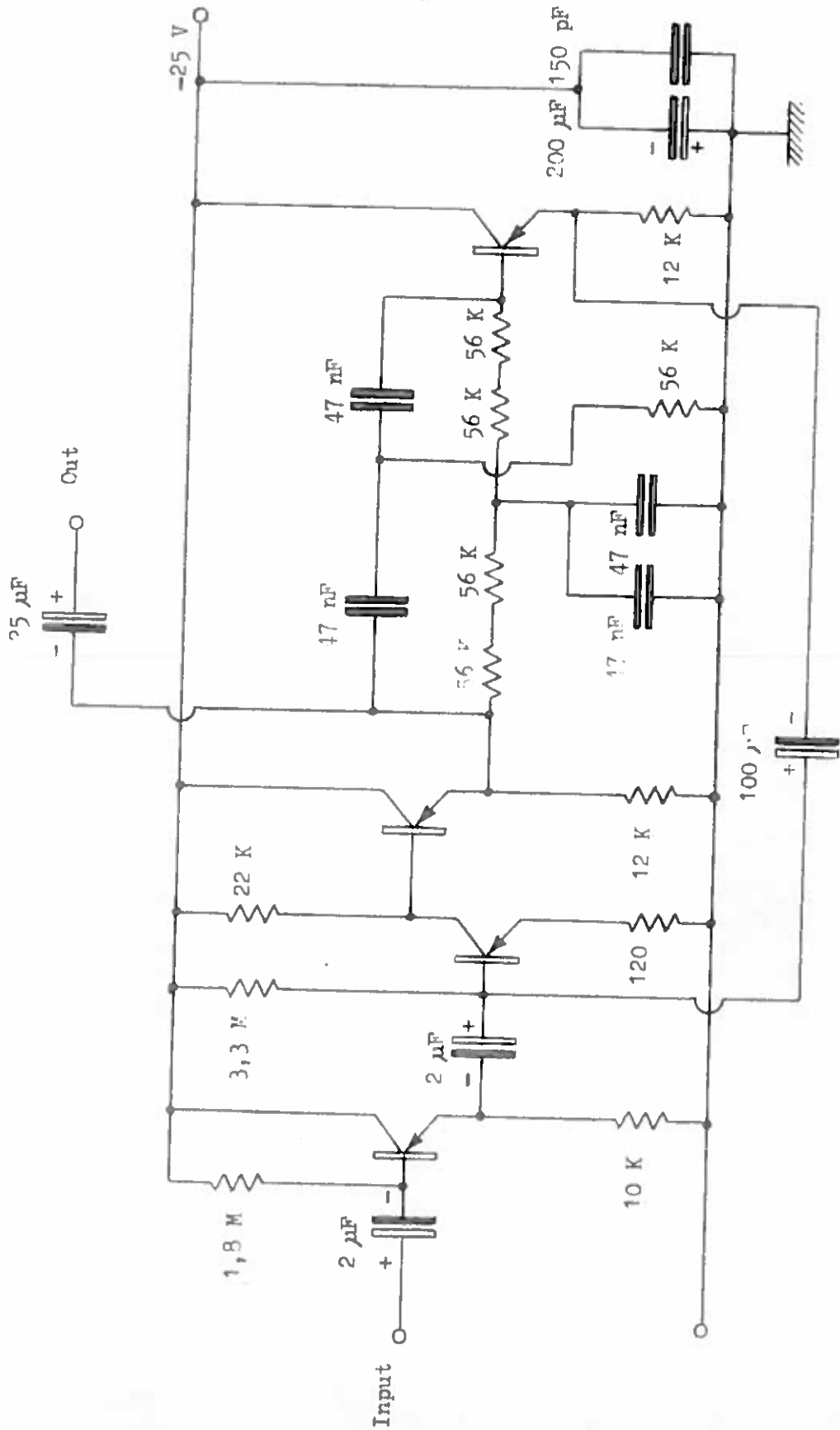
ELENCO DELLE FIGURE

- Fig. 1 - Stadio di ingresso a FET del preamplificatore
- Fig. 2 - Seconda parte del preamplificatore
- Fig. 3 - Figura di rumore a larga banda del preamplificatore  
in funzione di  $R_s$
- Fig. 4 - Figura di rumore del preamplificatore in funzione della  
frequenza
- Fig. 5 - Amplificatore
- Fig. 6 - Schema a blocchi di tutto il sistema di rivelazione
- Fig. 7 - Sistemazione sperimentale per la registrazione
- Fig. 8 - Esempio di registrazione
- Fig. 9 - Forme d'onda:  
a) uscita dell'amplificatore  
b,c) uscite del demodulatore sincrono prima della integrazione



- \*  $A_v = 1,3 \times 10^3$  ;  $R_{in} = 10 \text{ M}$  ;  $R_o = 20 \text{ K}$  .
- \* Alimentazione a pile in scatolate a parte.
- \* Assorbimento pari acirca 1,5 mA .
- \* I FET sono della SGS ( non più in commercio ) .
- \* Le resistenze sono tutte ad impasto della Allen Bradley .
- \* I condensatori di accoppiamento sono al Tantalio da 25 V .
- \* I condensatori di polarizzazione sono elettrolitici normali da 25 V .
- \* Tutti i valori delle resistenze sono in  $\Omega \text{ hm}$

Fig. 1

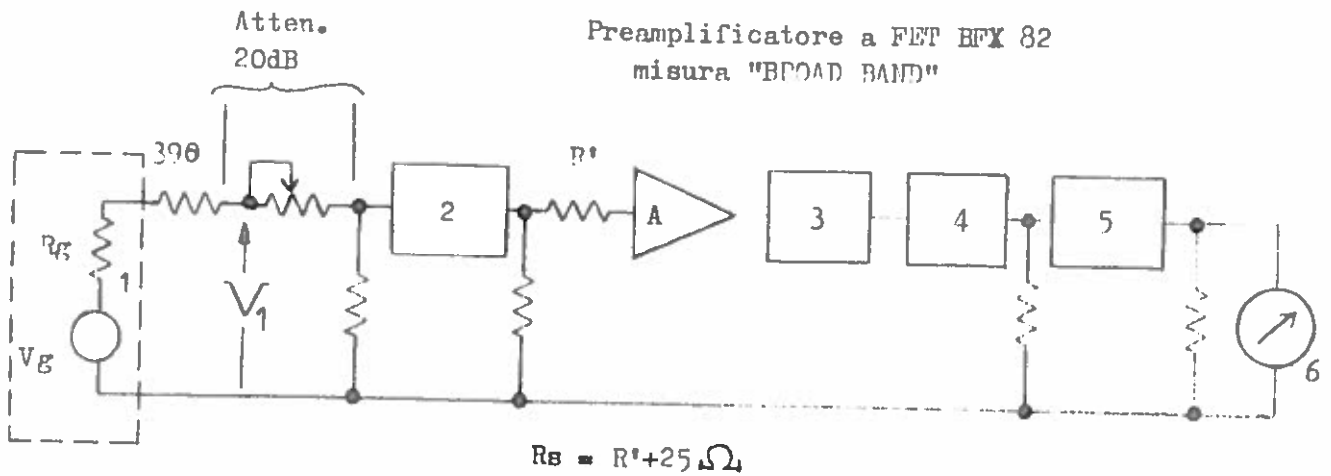


\* Tutti i transistori sono BC151 .

\* Tutti i valori delle resistenze sono in Ωhn

Fig. 2

Preamplificatore a FET BFX 82  
misura "BROAD BAND"



- 1) Noise gen. HP 8057A (B<sub>eq</sub>=27 KHz)
- 2) Attenuatore HP 40 dB
- 3) Post Amplificatore
- 4) Adattatore di impedenza
- 5) Attenuatore HP 0+ 3dB
- 6) R.M.S. Voltmetro
- A) Amplificatore sotto prova

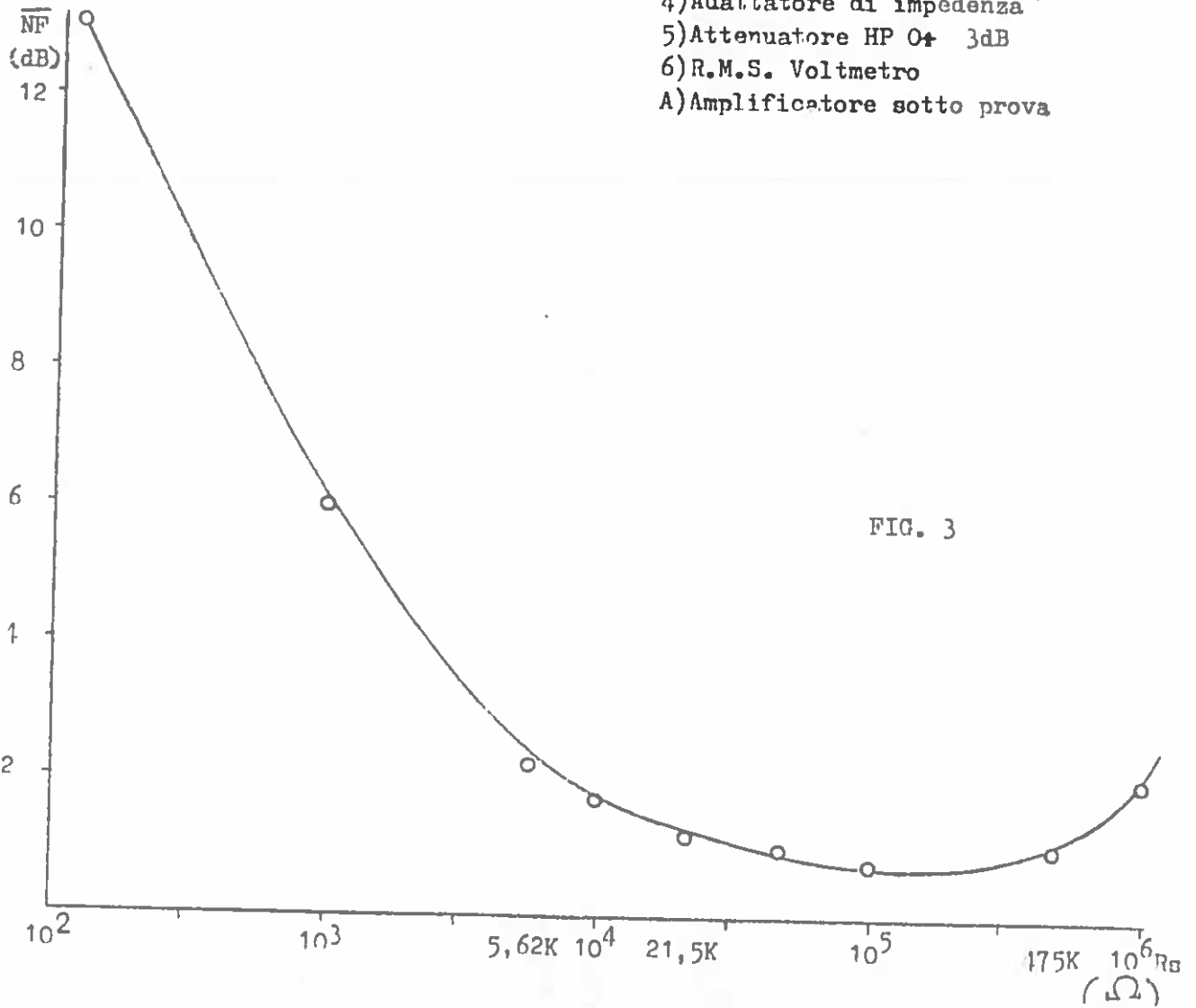
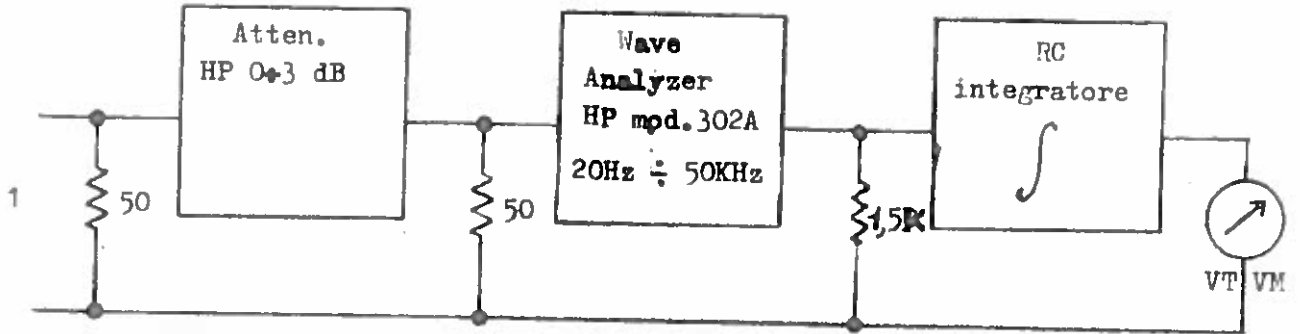


FIG. 3

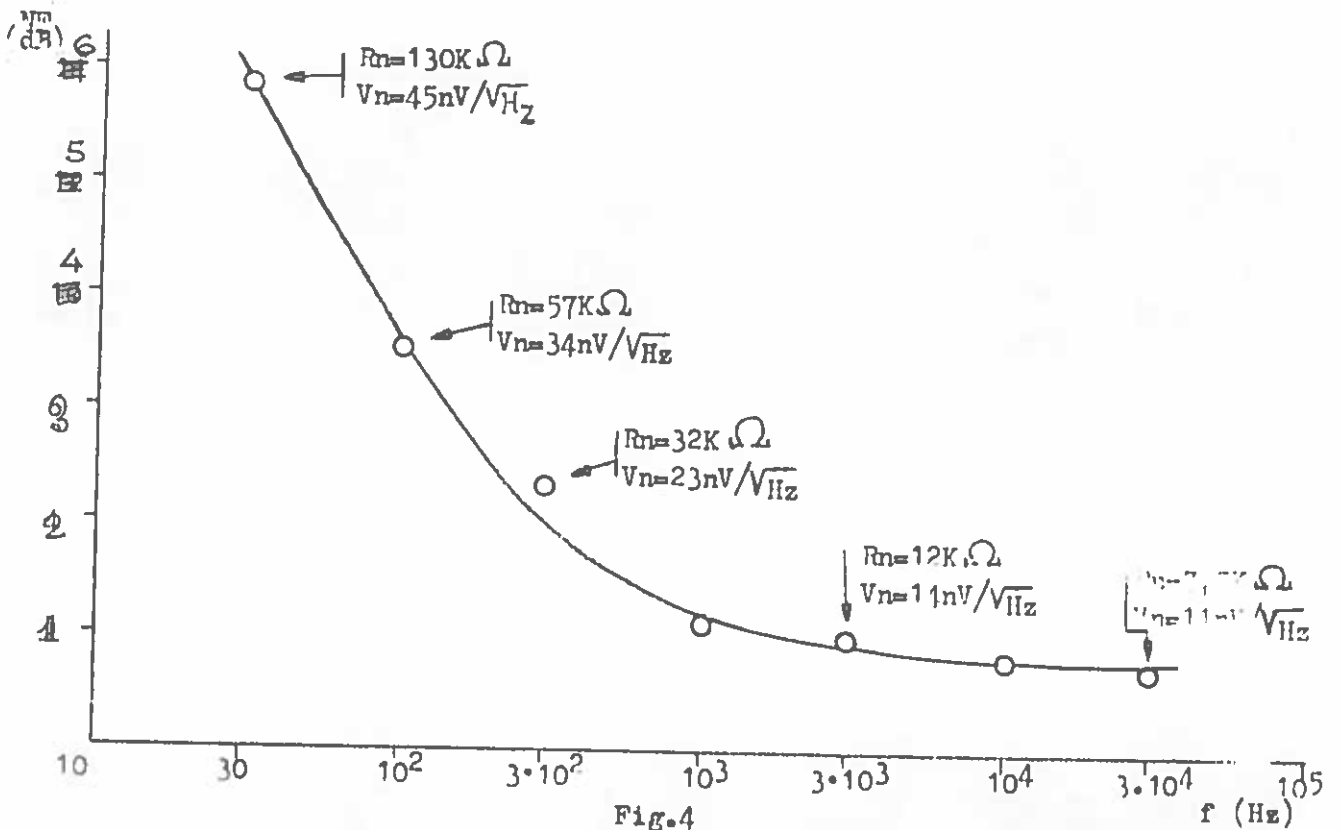
Preamplificatore a FET BFX 82  
misura "SPOT"

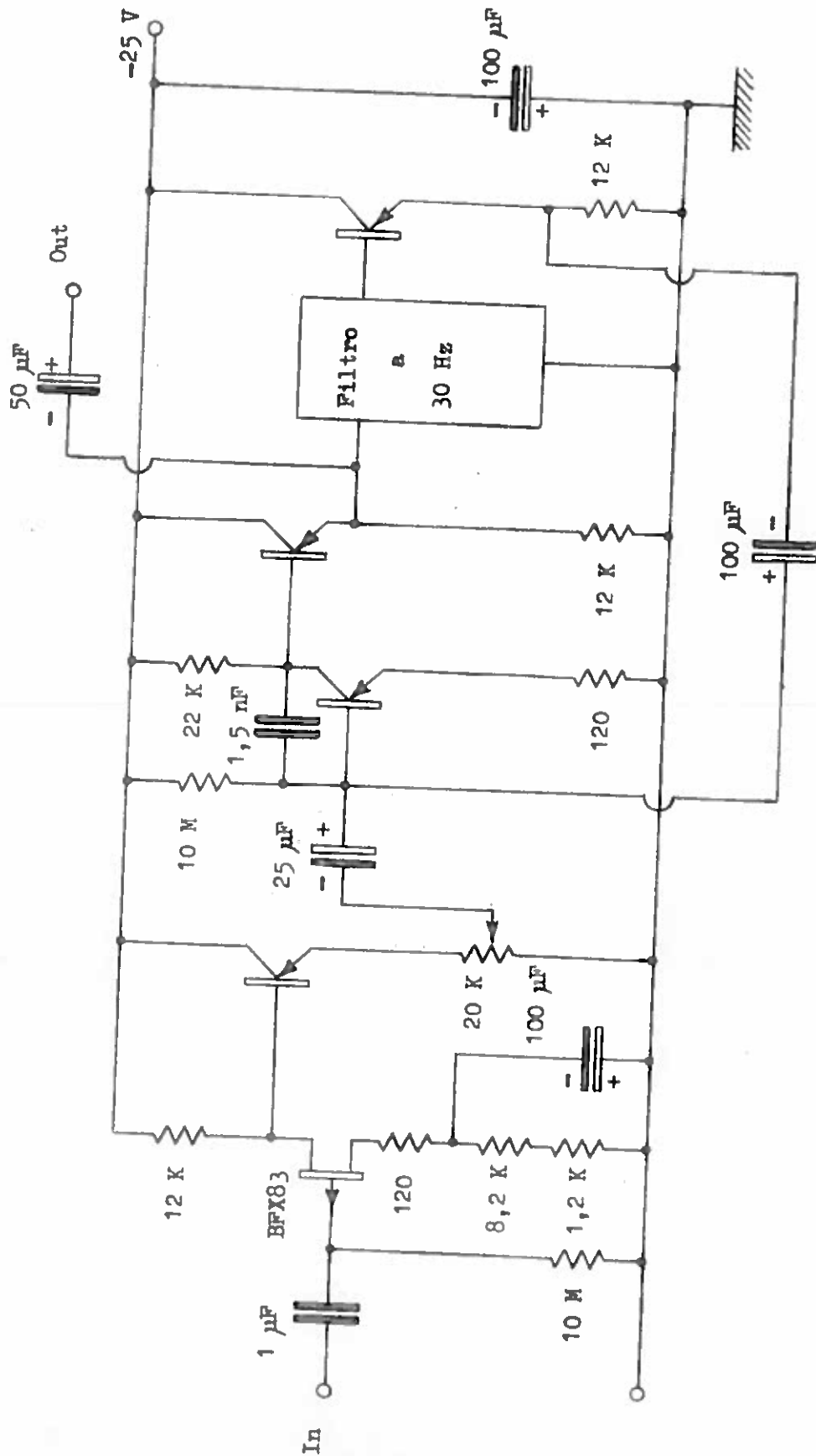


1 Stessa disposizione  
circuitale della Fig.3  
 $R_B = 46,4K \Omega$

$$F \approx 1 + \frac{R_n}{R_B} \quad f \leq 10KHz$$

$$F \approx 1 + \frac{R_n}{R_B} \left[ 1 + \left( \frac{R_B}{X_C} \right)^2 \right] \quad f \gg 10KHz$$





\* Tutti i transistori tranne il primo sono BC154 .

\* Tutti i valori delle resistenze sono in  $\Omega$ hm

Fig. 5



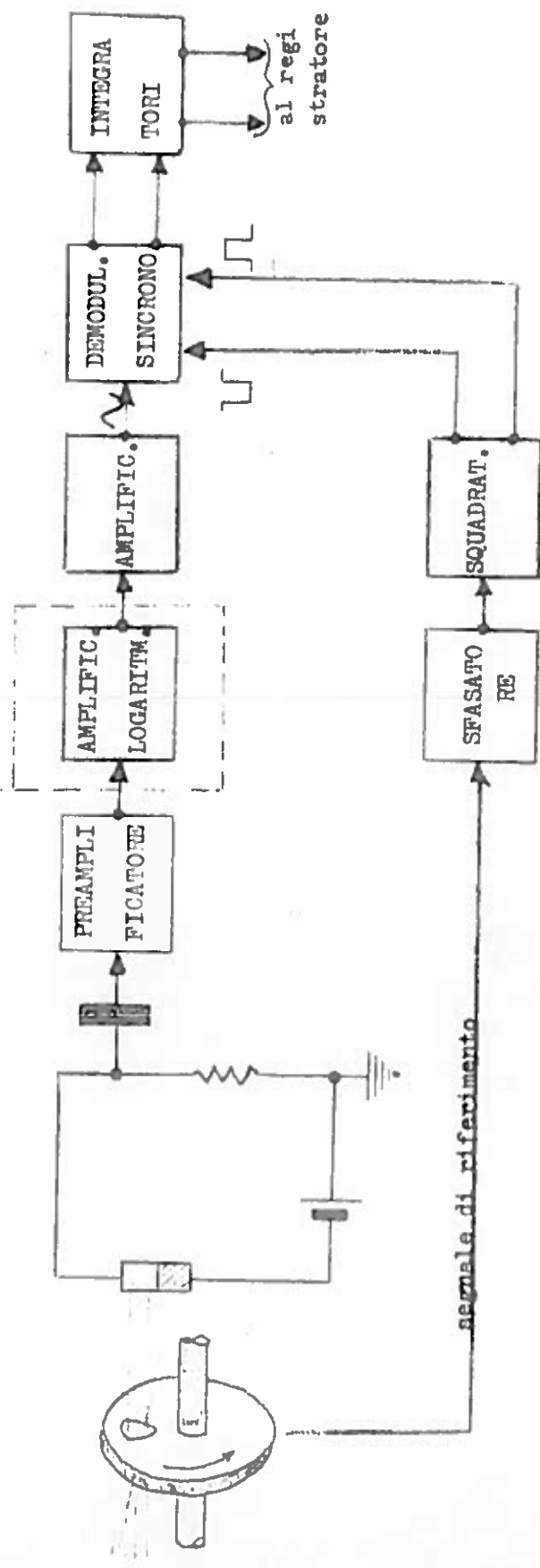
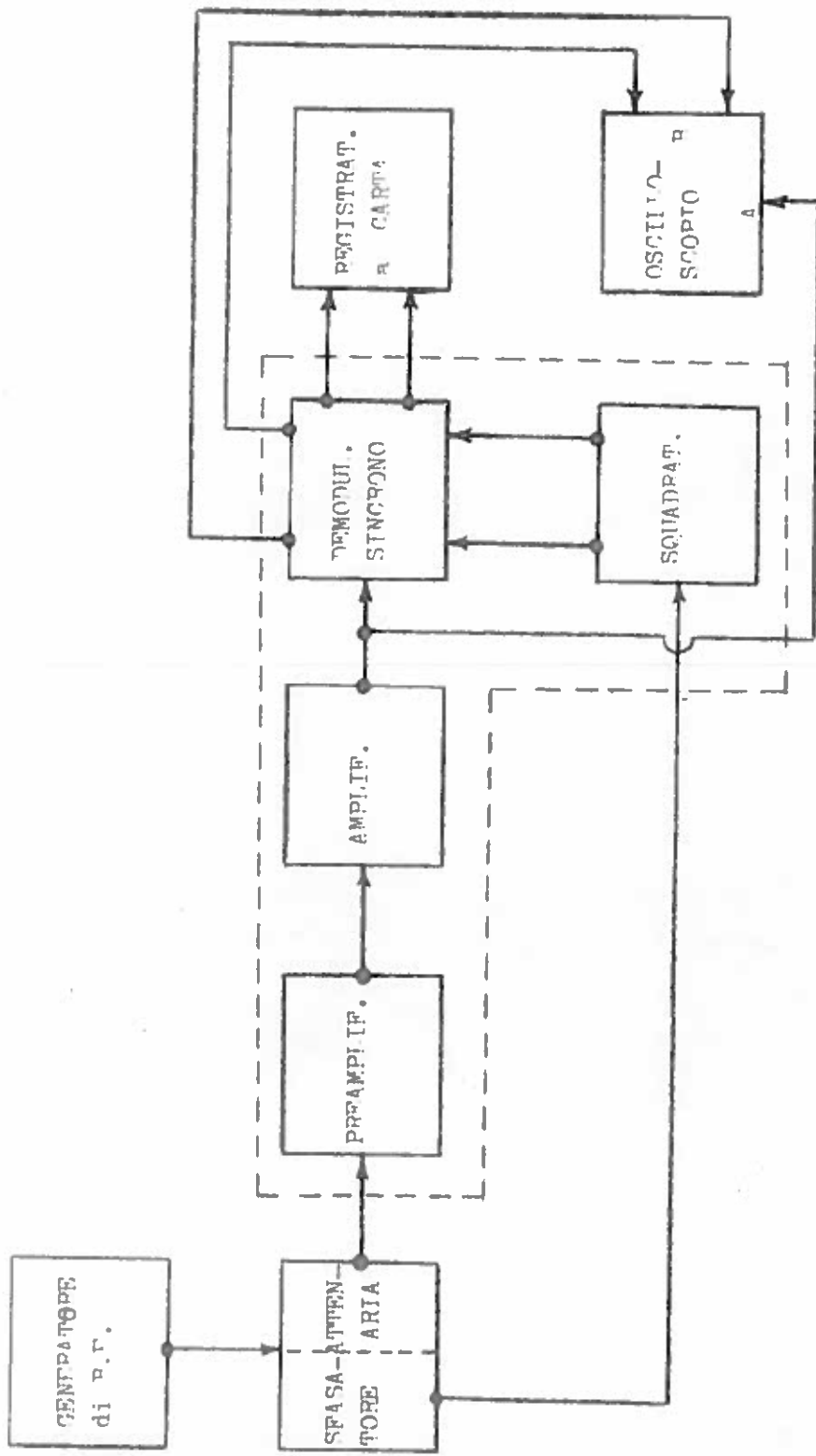


Fig. 6



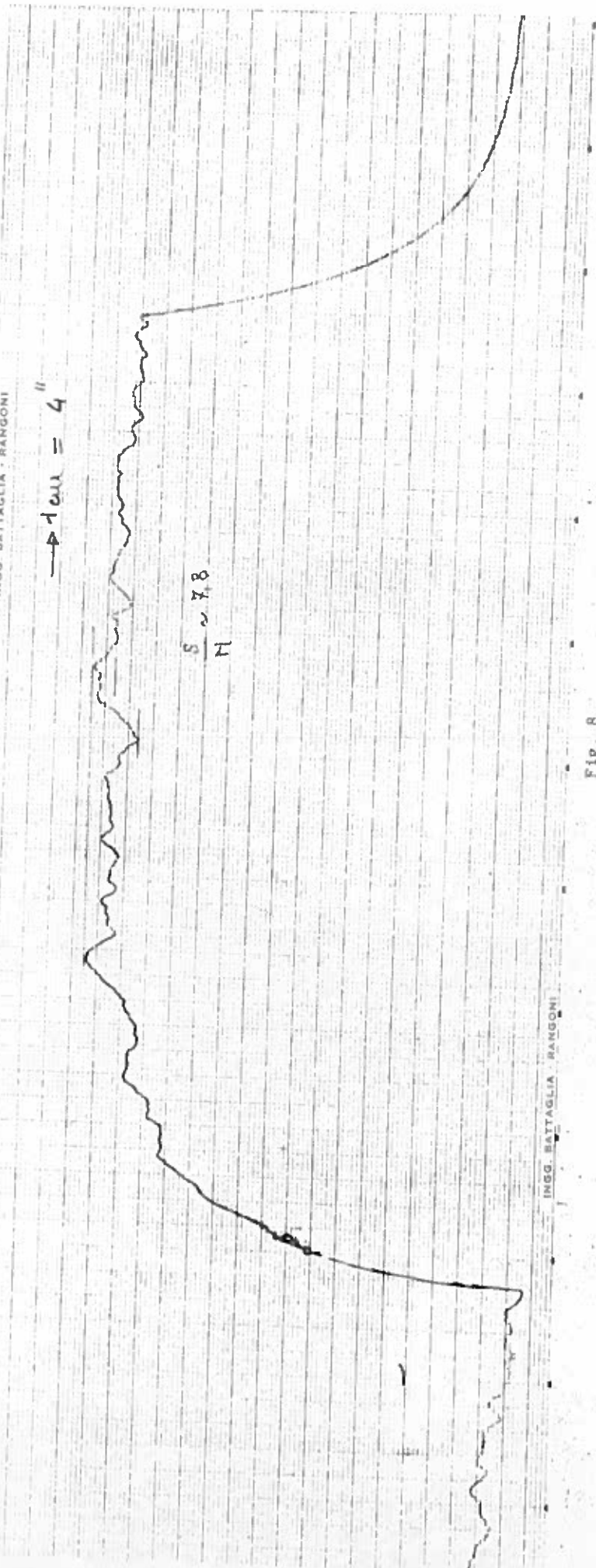
INGG. BATTAGLIA - RANGONI

→  $\rho_{\text{eau}} = 4''$

$\frac{S}{H} \sim 7.8$

INGG. BATTAGLIA - RANGONI

FIG. 8



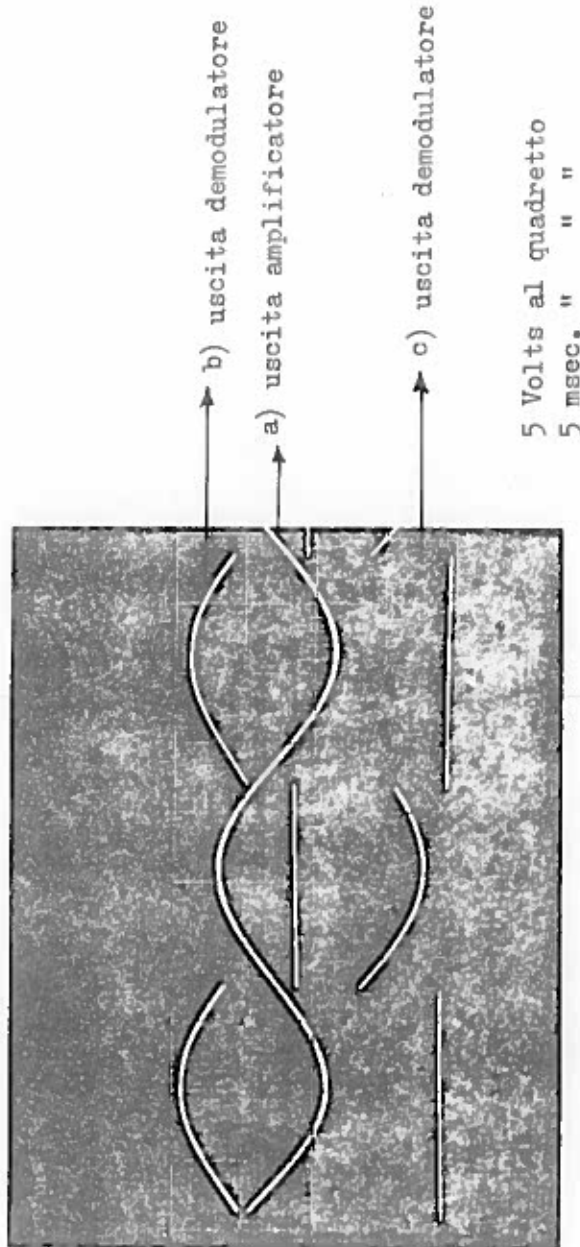


Fig. 9

INDICE

A - Introduzione .....	Pag.	1
B - Preamplificatore .....	"	2
C - Amplificatore .....	"	4
D - Catena di demodulazione sincrona .....	"	4
E - Metodo di prova .....	"	5
F - Alcuni commenti .....	"	6
Elenco figure .....	"	9