

REALIZZAZIONE DI UN VISORE NOTTURNO AD INFRAROSSI CON IL TUBO RCA-6032A

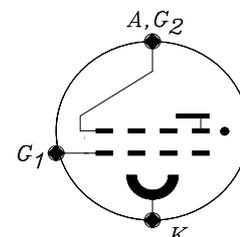
Verso la metà degli anni '80 ebbi l'occasione di impossessarmi di questo particolarissimo tubo in un modo molto fortunoso. Lo tolsi letteralmente dalle mani di un operaio che stava per distruggerlo a martellate presso un cantiere di demolizioni, dove erano intenti a fare a pezzi una nave militare statunitense. Raccolsi anche la scatola, che conservo ancora.



Il convertitore d'immagine CRC-6032A-RCA. A destra di chi guarda vi è il catodo fotoemittente, al centro, l'anello della griglia focalizzatrice, alla sinistra, lo schermo a fosfori verdi da 5/8 di pollice. La lunghezza del tubo è di circa 11,5 cm. Il diametro del fotocatodo è di circa 3 cm



La scatola originale che conteneva il convertitore porta la data del Gennaio 1960 (1/60)



Lo schema del 6032A.

Una volta in possesso di questo raro e preziosissimo tubo, il desiderio di farlo funzionare è stato ossessivo. Ottenute in modo molto avventuroso delle brutte e illeggibili fotocopie dei dati essenziali del convertitore (mi sembra che all'epoca i dati fossero ancora "restricted"), pur non avendo potuto reperire alcun lavoro precedente su cui basarmi, ho buttato giù lo schema di Fig.01, affidandomi molto al buon senso e al ragionamento.

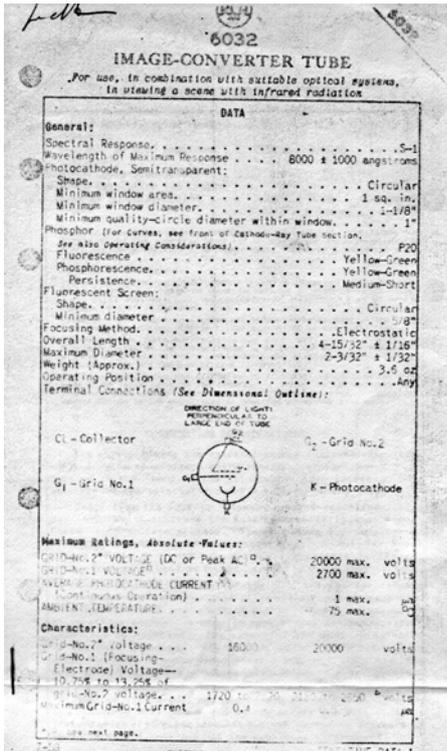
Poiché, in ultima analisi, il potenziale della griglia focalizzatrice non è altro che una percentuale di tutta la tensione anodica, ho ritenuto di non dover far altro che realizzare una polarizzazione formata da un comune partitore di tensione.

Vediamo, allora, come determinare la parte resistiva totale R_t di questo partitore. Dalle caratteristiche del tubo ricaviamo che la tensione della griglia focalizzatrice G_1 deve rimanere nel campo di valori che vanno dal 10,75% al 13,25% della tensione di alimentazione anodica, il cui valore è di 16000V come consiglia la casa costruttrice.

Da ciò si deduce che la tensione di griglia deve essere tra i seguenti valori:

$$V_{G1} = 1720 / 2120 V_{CC}$$

Abbiamo calcolato la media tra questi due valori estremi, ottenendo:



$$V_{G1} = \frac{1729 + 2120}{2} = 1920V$$

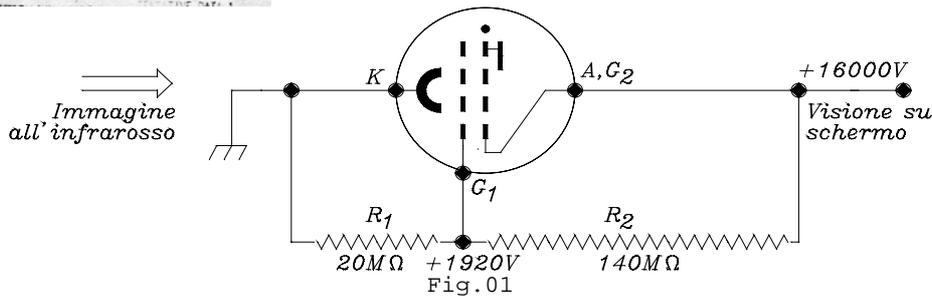
Questo valore di V_{G1} sarà quello che noi adotteremo nel calcolo. Per rendere abbastanza stabile il punto di lavoro della G_1 facciamo scorrere nella resistenza R_t del partitore una corrente molto più alta della I_{G1} , per esempio, $I_R = 100\mu A$. Con questo valore assunto, determiniamo la resistenza totale del partitore R_t :

$$R_t = \frac{V}{I_R} = \frac{16000}{100 \cdot 10^{-6}} = 160M\Omega$$

La casa costruttrice dichiara che la massima corrente I_{G1} , assorbita dalla griglia G_1 è di $0,4 \mu A$. Quantifichiamo quindi quant'è il valore minimo dell'impedenza d'ingresso della griglia focalizzatrice:

$$R_{iG1} = \frac{V_{G1}}{I_{G1}} = \frac{1920}{0,4} \cdot 10^6 = 4,8 \cdot 10^9 \rightarrow 4,8G\Omega$$

Questo valore è molto elevato e non creerà alcun disturbo sensibile al partitore di tensione. Possiamo perciò procedere al suo calcolo come se fosse a carico nullo (circuitto aperto).

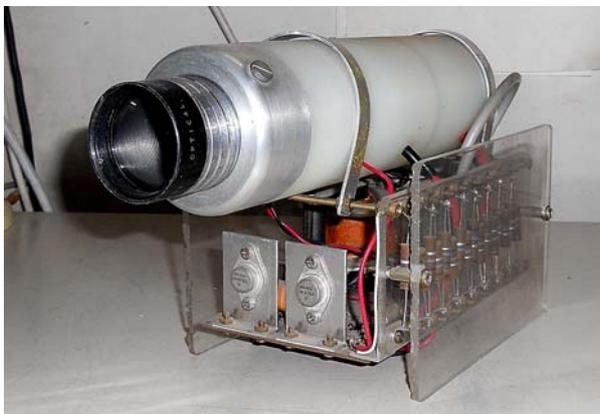


Il valore della resistenza R_1 che insiste tra catodo K e griglia G_1 sarà:

$$R_1 = \frac{V_{G1}}{I_R} = \frac{1920}{100} \cdot 10^6 = 20M\Omega$$

e di conseguenza, otteniamo per la restante R_2 :

$$R_2 = R_t - R_1 = (160 - 20) \cdot 10^6 = 140M\Omega$$



Abbiamo così concluso il calcolo della polarizzazione del tubo.

In pratica abbiamo realizzato il partitore con una serie di 16 resistenze da $10M\Omega$ 1W, delle quali due per la polarizzazione di griglia. Nella foto qui a lato si possono osservare le resistenze montate su un supporto in pexiglass e protette da uno schermo anch'esso di pexiglass per la sicurezza (siamo in presenza di 16000V!). Si nota anche la posizione dei due transistor 2N3054 che fanno parte del Convertitore CC/CC. In primo piano il sistema ottico, che produce l'immagine sul fotocatodo.

Questo obiettivo è stato prelevato da un vecchio proiettore per diapositive. Tutto il sistema tubolare in teflon ed alluminio che contiene il visore è stato realizzato da un ottimo artigiano, molto bravo nell'uso del tornio.

Qui di seguito sono riportati i dati essenziali di questo tubo convertitore:

RCA-6032A Tubo Convertitore d'immagine

Caratteristiche generali:

Lungh. d'onda di max risposta:	8000+/-1000 Angs
Forma del fotocatodo	Circolare
Area max della finestra:	1sq in
Fosforo Anodo	P20
Fluorescenza	Giallo/Verde
Persistenza	Medio-Breve
Schermo	Circolare
Diametro Schermo	5/8 in

Valori massimi:

$V_{A,G2Max}$	20000 V
V_{G1Max}	2700V
I_{KMax}	1 μ A

Valori di funzionamento:

$V_{A,G2}$	16000V
V_{G1} (focus)	10,75%-13,25% di $V_{A,G2}$
I_{G1Max}	0,4 μ A

-----*-----

Progetto dell'alimentatore

E' il momento di pensare all'alimentazione adatta al nostro circuito. Poiché il visore deve essere, molto evidentemente, un sistema portatile, esso deve essere alimentato da batterie. Perciò, dovendo produrre una tensione di 16000V, il nostro alimentatore sarà forzatamente costituito da un **Inverter**.

Un po' di teoria: Il Convertitore Autoeccitato

Cercheremo, ora, di dare un breve sguardo ai **convertitori statici c.c./c.a.** o, come di solito sono chiamati, "**Inverters**", per poi arrivare alla costruzione del nostro "**Converter**". Infatti un "**Converter**" non è altro che un "**Inverter**" seguito da un circuito raddrizzatore.

Il funzionamento degli Inverter è basato sulla produzione artificiosa di una corrente variabile negli avvolgimenti di un trasformatore. Le tensioni indotte da essa, tramite opportuni rapporti di trasformazione, saranno quelle utilizzate come sorgenti di energia in alternata o in continua.

Richiami

Inverters autoeccitati

*Gli Inverters autoeccitati generalmente sono di piccola potenza, sono a transistori BJT o MOSFET e il loro funzionamento si basa sulla **reazione positiva tramite mutua induzione**. Sono di facile realizzazione, ma hanno il difetto di non avere frequenza costante al variare del carico e dell'alimentazione. Anche la tensione d'uscita è troppo dipendente dal carico. Il loro utilizzo è, quindi, adatto con i carichi costanti nel tempo e che non richiedono una grande stabilità della frequenza.*

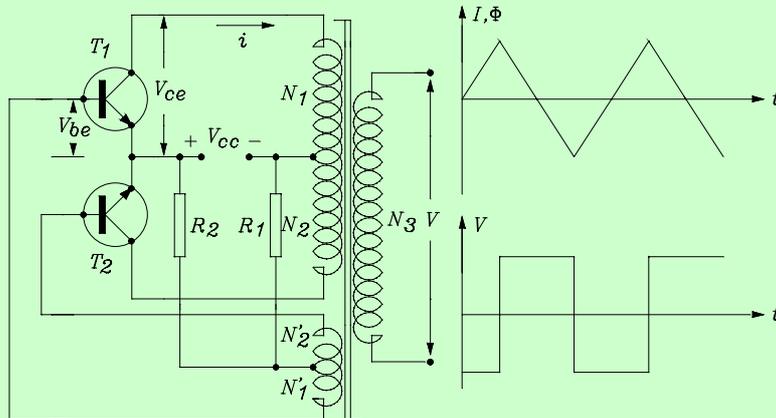


Fig. 02

Lo schema base è quello di Fig.02. Per un buon funzionamento il nucleo del trasformatore deve essere possibilmente con ciclo d'isteresi rettangolare (sono quasi sempre usate le ferriti per realizzare il nucleo). Vediamone il funzionamento.

All'inizio, la polarizzazione diretta data dal partitore R_1/R_2 fa condurre i due transistor. Per inevitabili dissimmetrie uno di essi, ad es. T1, tenderà a condurre più dell'altro. La variazione di corrente sul primario N_1 , produrrà tensioni indotte sugli altri avvolgimenti ed, in particolare, una tensione sull'avvolgimento N_2' , che avendo il senso di avvolgimento appropriato, manderà alla base di T2 una tensione inversa che lo porterà rapidamente all'interdizione, mentre, per lo stesso motivo, tramite N_1' , la tensione diretta sulla base porterà T1 alla saturazione.

La corrente (e quindi Φ) sale in N_1 con legge lineare, perché attraversa una induttanza (che consideriamo ideale ossia con parte resistiva nulla), **finché il nucleo del trasformatore non arriva alla saturazione**. Poiché, a questo punto, non vi è più variazione di flusso ($\Delta\Phi=0$), la tensione si riduce rapidamente su N_1 ed anche su N_1' , e porta T1 a condurre meno. Quest'inversione di tendenza della tensione, per i motivi di cui sopra, porterà immediatamente T1 all'interdizione e T2 alla conduzione. Così il ciclo si ripete facendo passare i due transistor da uno stato all'altro e producendo all'uscita, per mutua induzione su N_3 , una tensione ad onda quadra (ricordiamo che, per la legge di Faraday-Neumann, ai capi di una induttanza, quando essa è attraversata da una corrente che varia **linearmente** nel tempo, si dispone una tensione indotta **costante**).

La formula fondamentale che governa tutto il sistema, allorché la forma d'onda è quadra, è la seguente:

$$V = 4 \cdot f \cdot B_m \cdot S \cdot N_1 \quad (01)$$

dove B_m è l'induzione massima nel nucleo all'inizio della saturazione e dipende dal materiale ferromagnetico usato, S è la sua sezione e N_1 le spire avvolte su di esso.

Poiché B_m , N_1 , e S sono costanti, la frequenza f generata dipende unicamente dalla tensione indotta V . Se non vi fossero perdite resistive la tensione indotta V rimarrebbe legata alla tensione di alimentazione di batteria E e se questa fosse costante anche la frequenza risulterebbe costante al variare delle condizioni di funzionamento. Ciò, purtroppo, nella realtà non avviene perché le perdite resistive non sono trascurabili, quindi avremo variazioni sia di frequenza sia di tensione all'uscita, che possono, a volte, essere considerate intollerabili. Una limitazione a queste variazioni può essere ottenuta realizzando gli avvolgimenti del primario con **fili di grossa sezione**. Ancora meglio, si può mettere un regolatore automatico di tensione a monte che ripristini la caduta all'interno del trasformatore e nel circuito. (Con questo sistema e una buona progettazione si può ridurre la variazione di frequenza a circa un 2%). **Concludendo, possiamo dire che gli Inverters autoeccitati sono validi quando alimentano carichi costanti sui quali la tensione è già regolata e non è strettamente necessaria la stabilità di frequenza** (ad esempio per le luci di emergenza).

-----*-----

Approfondimento Matematico

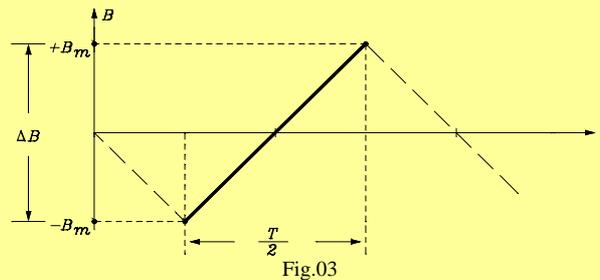
Giustificiamo l'importante espressione (01) ed in particolare il fattore 4 che in essa compare. La legge fondamentale di Faraday-Neumann dice che la tensione indotta V è proporzionale alla variazione del flusso magnetico Φ nel tempo ed è espressa generalmente così:

$$V = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (02)$$

perciò, tenendo conto del significato attribuito alle lettere della (02), possiamo scrivere:

$$V = N \cdot \frac{\Delta(S \cdot B)}{\Delta t} = NS \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t} \quad (03)$$

dove con S intendiamo la sezione del nucleo ferromagnetico e con B il flusso specifico, chiamato anche induzione magnetica, con N il numero delle spire e con t , ovviamente, il tempo. Per la (02) una tensione costante V applicata ad un avvolgimento di N spire provoca nel suo circuito magnetico una variazione lineare di Φ nel tempo:



Dalla (Fig.03) vediamo che la variazione totale del flusso è:

$$\Delta B = +B_m - (-B_m) = 2B_m; \quad \text{mentre: } \Delta t = \frac{T}{2} \quad (04)$$

quindi il rapporto incrementale della (03) dà luogo alla funzione:

$$V = N \cdot S \cdot \frac{2B_m}{\frac{T}{2}} = N \cdot S \cdot 4 \cdot B_m \cdot \frac{1}{T} \quad (05)$$

ricordando che:

$$\frac{1}{T} = f \quad (06)$$

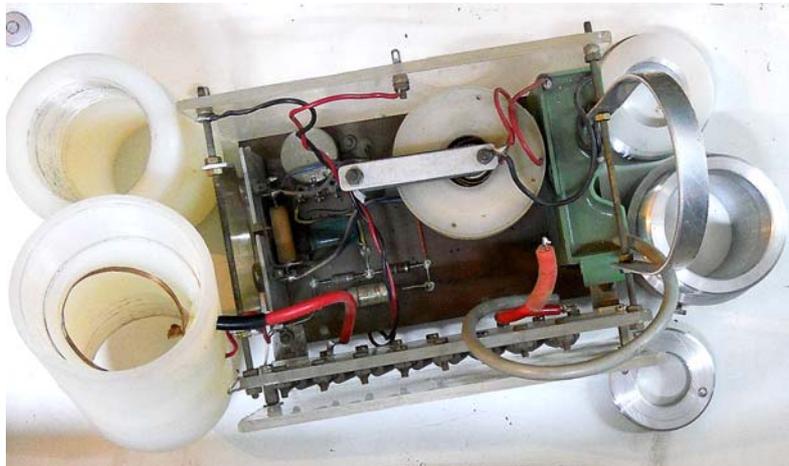
otteniamo immediatamente la (01):

$$V = 4 \cdot f \cdot B_m \cdot S \cdot N_1.$$

Dopo aver dato uno sguardo molto veloce alla teoria cerchiamo finalmente di progettare il nostro alimentatore.

Progetto del circuito di alimentazione

Il circuito che segue (Fig.04) è un Converter ed è stato realizzato per fornire una tensione molto elevata (16.000V), adatta per alimentare il nostro convertitore di immagine ad infrarossi **CRC-6032** (*Presumo che questo anzianotto Visore Notturmo provenga*



verosimilmente dai campi di battaglia del Vietnam). Abbiamo adoperato un nucleo in ferrite tolto da un trasformatore finale di riga TV-B/N. Abbiamo avvolto le spire primarie e di reazione, **in bifilare**, su un tubetto isolante infilato strettamente nel nucleo. Abbiamo, poi, avvolto le spire secondarie su un supporto in plastica con flangie, ritagliato da un rocchetto che era stato in precedenza un contenitore del filo di stagno per saldare. Questo rocchetto o "ciambella" è stato infilato a sua volta sugli avvolgimenti primari.

Nella foto si possono osservare tutte le parti del tubo cilindrico, in teflon e in alluminio, entro cui è sistemato il visore **6032**, completamente smontato. All'interno della scatola dalle pareti in pexiglass si nota il circuito dell'inverter e chiaramente la ciambella su cui sono state avvolte le spire secondarie ad alta tensione. A fianco della ciambella, è visibile il parallelepipedo verde del triplicatore di tensione. Il triplicatore di tensione proviene da un TV-Colore fuori servizio. Il potenziale di 0V è stato applicato al fotocatodo FK, quello di circa +1920V alla griglia di focalizzazione G, quello di +16000V allo schermo a fosfori verdi "A" del visore.

Poiché sulla ghiera d'alluminio che blocca l'anodo vi sono 16000V è bene essere molto cauti ad avvicinare l'occhio allo schermo!

Il circuito, effettivamente realizzato, ha fornito i valori di tensione riportati sullo schema. Essi non si discostano molto dai valori calcolati. L'illuminatore della scena da osservare ai raggi infrarossi è stato realizzato mettendo un filtro all'infrarosso

(filtro "nero" per antifurti) davanti ad una torcia elettrica montata parallelamente all'obiettivo del convertitore. Qui sotto (Fig.04) è riportato lo schema definitivo.

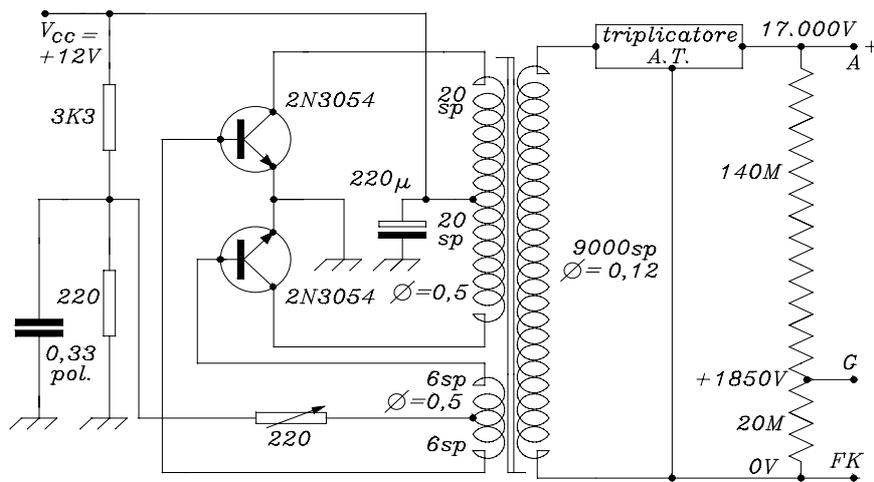
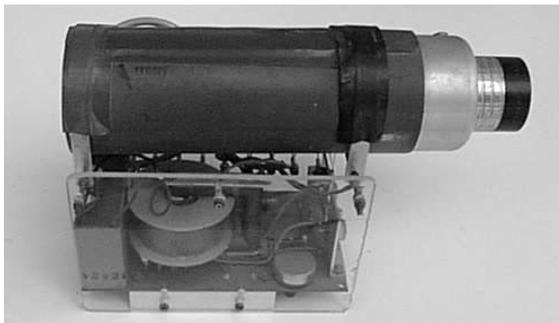


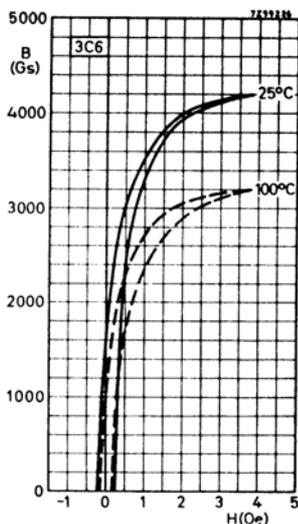
Fig.04

Le due foto che seguono sono di vecchia data: in quella di destra si può notare la copertura in piombo del contenitore del tubo 6032 per evitare l'inquinamento da pericolose radiazioni. Nelle foto recenti la lastra di piombo non è presente perché è stata tolta per lo smontaggio.



Due Foto B/N del visore notturno (anni '80). Foto a sinistra: in primo piano, sotto il tubo convertitore, si nota la ciambella dell'avvolgimento di Alta Tensione, al suo fianco il parallelepipedo del triplicatore. Il 6032A è all'interno di un tubo in teflon alla cui estremità è calettato un sistema di lenti ottiche che focalizzano l'immagine sul catodo fotosensibile. All'altra estremità vi è lo schermo ai fosfori verdi. Nella foto manca l'illuminatore. Foto a destra: Si nota chiaramente lo schermo al centro del contenitore cilindrico. Sotto, in primo piano, vi è il triplicatore.

Calcolo del Converter



Ci orientiamo verso un Inverter autoeccitato il cui schema definitivo è quello di Fig.04, con due transistor 2N3054 come elementi attivi. Adoperiamo un nucleo ad "U" di ferrite 3C6 con diametro di 1,13cm a cui corrisponde una sezione pari ad $S=1\text{cm}^2$ circa. L'induzione del nucleo di ferrite viene posta a $E_m=4200\text{Gauss}$ all'inizio della saturazione (cfr. il diagramma a lato: generalmente i nuclei dei trasformatori di riga sono realizzati in ferrite di classe 3C6¹). Imponiamo che la frequenza di commutazione sia $f=3500\text{Hz}$. Calcoliamo le spire N_1 di metà primario utilizzando l'espressione fondamentale (01):

$$N_1 = \frac{V_{cc} \cdot 10^8}{4 \cdot f \cdot B_m \cdot S} = \frac{12 \cdot 10^8}{4 \cdot 3500 \cdot 4200 \cdot 1} \cong 20\text{spire}$$

(E' da ricordare, per inciso, che in un'onda quadra raddrizzata il valore V_{max} , il valore V_{eff} e il valore V_{med} sono uguali). Pensiamo che possa essere sufficiente una tensione di reazione

¹ Da: PHILIPS Dati Tecnici – CP25a FERROXCUBE: Proprietà e gradazioni – ELCOMA Dic.1970

intorno a $3,6V$, che poi può essere variata tramite R_3 in fase di taratura, per portare stabilmente il circuito alla commutazione. Quindi poniamo: $E_2 = 3,6V$.
Perciò le spire di reazione saranno:

$$N_2 = N_1 \cdot \frac{E_2}{E_1} = 20 \cdot \frac{3,6}{12} = 6 \text{ spire}$$

Per ottenere $16000V$ al secondario avremmo la necessità di avvolgere sul rocchetto oltre 26600 spire. Poiché non si ha a disposizione un filo più sottile di $0,12mm$, ne verrebbe fuori una ciambella enorme, di difficile realizzazione, con la quasi certezza di scariche di alta tensione al suo interno, che non entrerebbe comunque nella finestra del nucleo. La disponibilità di un raddrizzatore triplicatore risolve il problema, perché la tensione al secondario può essere ridotta a $5600V$. Calcoliamo le spire secondarie per questo valore:

$$N_3 = N_1 \cdot \frac{E_3}{E_1} = 20 \cdot \frac{5400}{12} = 9000 \text{ spire}$$

La potenza erogata dal convertitore è trascurabile perciò il diametro dei fili viene valutato soltanto in base allo spazio disponibile tra il nucleo e il diametro interno della ciambella, tenendo presente che negli inverter è bene sempre usare sezioni abbondanti per gli avvolgimenti, come già accennato. Per poter distribuire su una sola passata tutti i quattro avvolgimenti primari abbiamo utilizzato un filo smaltato con il diametro di $0,5mm$.

Calcoliamo, infine, i valori delle resistenze di polarizzazione.

All'inizio del funzionamento facciamo in modo che i due transistor siano nelle condizioni di conduzione: imponiamo, perciò, che sia almeno $V_B = 0,6V$. Quando la tensione di reazione assume il valore $V_R = E_2 = 3,6V$, la corrente di base raggiunge il valore $I_b = I_2 \cong 20mA$, mentre la tensione di base si porta a circa $V_{BE} = 0,7V$ (dalle caratteristiche del 2N3054). Il circuito di polarizzazione di base può essere disegnato come in fig.05a dove il generatore E_2 rappresenta la tensione di reazione sulle basi:

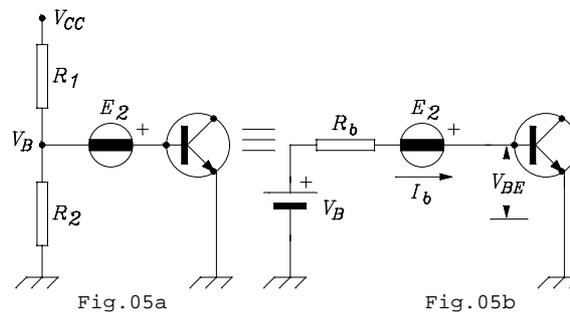


Fig. 05a

Fig. 05b

Tenendo conto della Fig.05a e del teorema di Thevenin, possiamo ridisegnare il circuito come in Fig.05b.

Applicando il principio di Kirchhoff alla maglia e separando la parte che riguarda il generatore da quella che riguarda il carico, possiamo scrivere:

$$V_B + E_2 = R_b I_b + V_{BE}$$

da cui:

$$R_b = \frac{0,6 + 3,6 - 0,7}{20} \cdot 10^3 = 175\Omega$$

Con il noto procedimento troviamo le resistenze di polarizzazione:

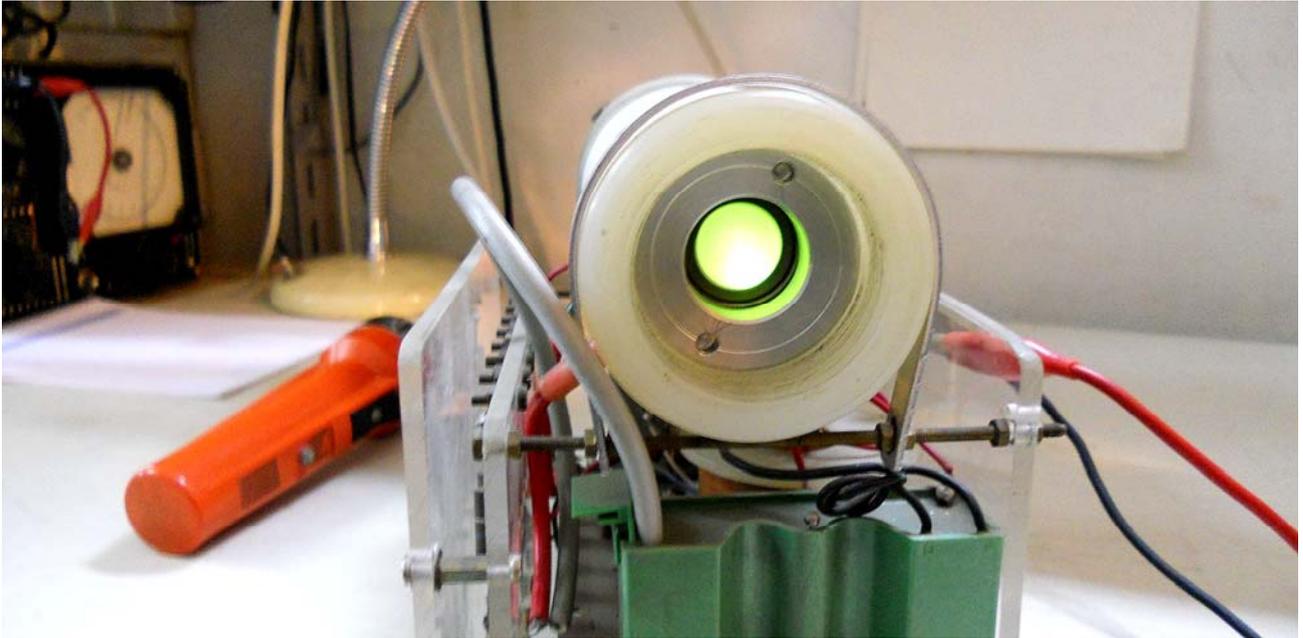
$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_B} \cdot R_b = \frac{12}{0,6} \cdot 175 = 3500 \rightarrow 3K3\Omega$$

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot R_b}{R_1 - R_b} = \frac{1000 \cdot 175}{1000 - 175} \cong 212 \rightarrow 220\Omega$$

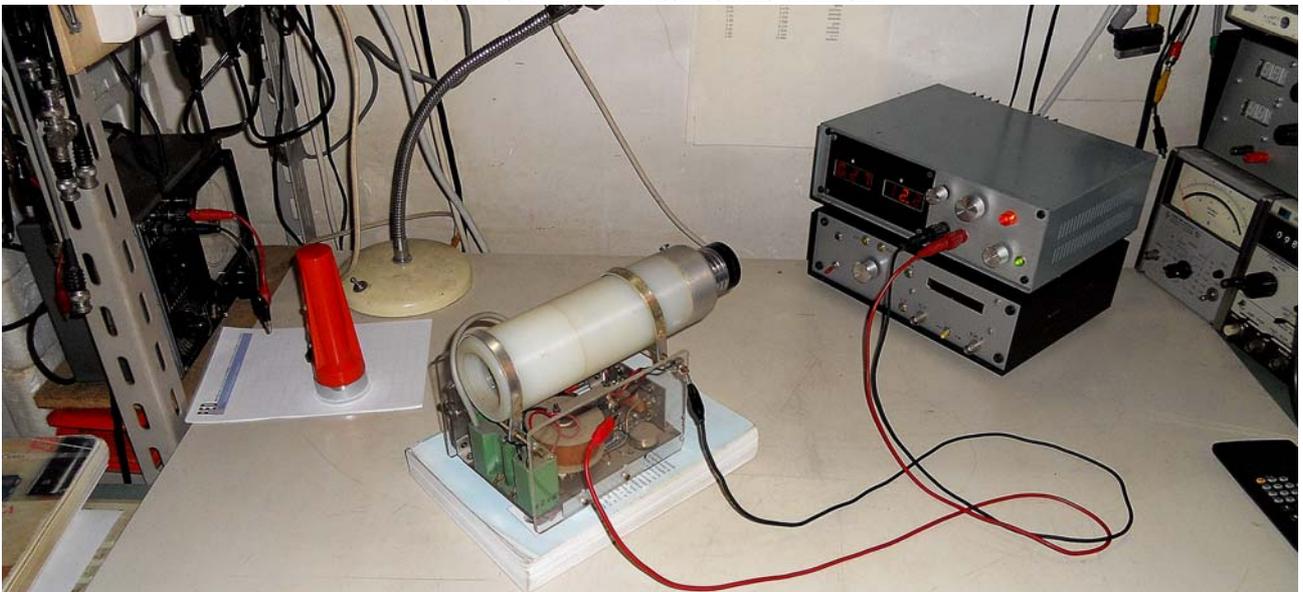
Così abbiamo determinato tutti gli elementi per la costruzione dell'Inverter.

-----*-----

Di seguito alcune foto del Visore in funzione:



Lo schermo illuminato del visore notturno in funzione.



Il visore è puntato sull'alimentatore per leggerne le cifre.



Sullo schermo sono visibili i dati di alimentazione letti sull'alimentatore (0,27 – 12,2). La foto al buio non è stata ben eseguita. Nella visione ad occhio nudo le cifre sono nette e perfettamente a fuoco.

Tutto il sistema è risultato mastodontico e non certamente adatto per essere usato come elemento portatile da montare su un fucile o su un casco!

La realizzazione è stata lunga, sofferta, dispendiosa e piena di dubbi sull'esito finale. Ma alla fine il funzionamento è stato inaspettatamente immediato ed ha ricompensato totalmente il lavoro fatto.

Il desiderio mio e dei miei allievi è stato pienamente appagato (perché riuscii a far “ammalare” anche loro: al primo istante di funzionamento ci fu un urlo da stadio nel laboratorio che fu male interpretato dai miei colleghi e dagli ordini superiori!).

Il lavoro quindi è stato più che soddisfacente ed è servito ottimamente allo scopo didattico che mi ero prefisso: cogliere l'occasione per spiegare il calcolo progettuale delle varie fasi realizzative e chiarire alcuni concetti particolari come il funzionamento del tubo a raggi catodici, la fotoemissione, la fluorescenza, ecc... stimolando l'interesse della classe, man mano che il lavoro procedeva. Questo era importante.

Marzo 2012

Nicola del Ciotto