

NOTAS TÉCNICAS
VOLUME II
Nº 1

NOVA IDÉIA
PARA
ESTABILIZAÇÃO DE TENSÃO
D. C.

por

Danilo Marcondes

Colaboração: Rubens Torres Carrilho

Rio de Janeiro, GB, 15 de maio de 1965

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS
Av. Wenceslau Braz, 71
RIO DE JANEIRO
BRASIL
1965

NOVA IDÉIA PARA ESTABILIZAÇÃO DE TENSÃO D.C.

O artigo apresenta Fonte de Alimentação com alta qualidade de estabilização

I - Introdução:

As fontes de alimentação estabilizadas eletronicamente podem sofrer melhoria de qualidade pelo aumento do ganho do laço de realimentação ou emprêgo de válvulas - de maiores fatores de amplificação. Mas, a despeito dos esforços realizados pelos estudiosos e pelos técnicos, há, evidentemente, uma sistemática limitação para a obtenção do ótimo. Assim, em busca de melhores performances, imaginámos que um sistema de dupla realimentação pudesse trazer com facilidade um salto no sentido de realização sonhada. Qual a idéia? -Muito simples. Passemos ao estudo, que não é original, nem pretendemos que o seja, da fonte de alimentação estabilizada eletronicamente com um só laço de realimentação, como o fazem EL MORE and SANDS em "Electronics, Experimental Techniques" e apenas com o objetivo de fazer a análise do circuito que se pretende apresentar e poder compará-lo com o convencional.

Assim, definamos um fator de estabilização

$$S = \frac{E_o}{E_s} \cdot \frac{d E_s}{d E_o} \dots\dots\dots(1)$$

onde E_s é a tensão de alimentação e E_o é a tensão de saída estabilizada; definamos a impedância de saída

$$R_o = - \frac{d E_o}{d I_o} = - \frac{e_o}{i_o} \dots\dots\dots(2)$$

onde I_o é a corrente fornecida à carga, e definamos também um fator de alisamento, ou de atenuação do "ripple".

$$\alpha = \frac{d E_0}{d E_1} \dots\dots\dots (3), \text{ onde}$$

E_1 é a tensão de saída do circuito que precede a estabilização (transformador - retificador - filtro).

Dentro da faixa de estabilização, os três fatores não são normalmente constantes, pois seus valores dependem da carga, da tensão da linha etc... Para comparar a performance dos diferentes circuitos é usualmente suficiente obter apenas valores aproximados de S , R_0 e α .

O circuito básico das fontes estabilizadas eletronicamente é do tipo abaixo indicado (fig. 1)

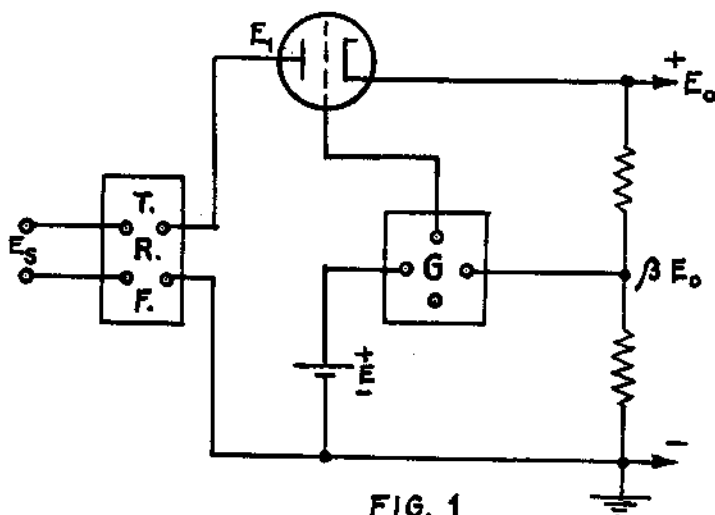


FIG. 1

O circuito consiste em uma fonte convencional não regulada (transformador, retificador e filtro) representada pelo bloco T-R-F, seguido de um triodo conectado em série com a barra positiva. Uma fração β da tensão de saída é comparada com uma tensão E , obtida de uma VR ou de uma bateria. A diferença entre as duas tensões é amplificada por um amplificador de diferença, de ganho G , e usada para controlar a polarização de grade do triodo série, de forma a obter a compensação.

ção degenerativa a qualquer mudança nas condições do circuito que tenda a alterar a tensão de saída, E_o . As tensões do circuito devem ser tais que permitam o uso de acoplamentos d.c. do amplificador que fecha o laço de realimentação. Onde o uso do acoplamento d.c. resulta em atenuação do ganho, os resistores devem ser shuntados por capacitores para que se obtenha maior ganho para sinais a.c. e, em particular, para as tensões de "ripple".

Um circuito equivalente simplificado do esquema acima apresentado é o que segue (fig. 2)

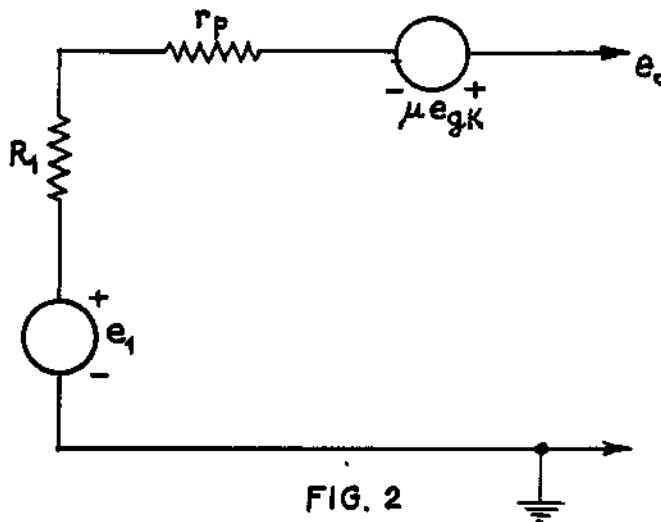


FIG. 2

A análise do circuito permite definir S , R_o e α .

$$e_{gk} = - (1 + G \beta) e_o, \text{ onde } e_o = d E_o$$

$$\text{Se } G \beta \gg 1, \text{ o que é razoável, } e_{gk} \cong - G \beta e_o,$$

$$\text{donde: } \mu e_{gk} \cong - \mu G \beta e_o$$

e, portanto, para que não haja variação na saída quando R_1 va-

Fl. 4

riar, é necessário que:

$$e_1 = \mu G \beta e_0$$

$$\text{ou } dE_0 = \frac{e_1}{\mu G \beta}$$

Como E_1 é da ordem de grandeza de E_s e as variações de E_1 podem ser tomadas pelas de E_s , teremos:

$$\frac{dE_0}{dE_s} \cong \mu \beta G$$

Assim:

$$S = \frac{E_0}{E_s} \cdot \frac{dE_s}{dE_0} \cong \frac{E_0}{E_1} \cdot \mu \beta G \dots \dots \dots (1).$$

Para definirmos R_0 , analisemos o circuito equivalente, curtocircuitando o gerador externo (e_1):

$$e_0 - \mu e_{gk} = (r_p + R_1) i_0$$

ou

$$e_0 + \mu G \beta e_0 = (r_p + R_1) i_0$$

e

$$R_0 = \frac{e_0}{i_0} = \frac{r_p + R_1}{1 + \mu G \beta}$$

ou

$$R_0 \cong \frac{r_p + R_1}{\mu G \beta} \dots \dots \dots (2)$$

Finalmente, o fator de alisamento será:

$$\alpha = \frac{d}{d} \frac{E_0}{E_1} \cong \frac{1}{\mu G \beta} \dots\dots\dots(3)$$

Definidos os parâmetros apresentados, vamos verificar a ordem de grandeza desses parâmetros para algumas fontes.

A um modelo de fonte com a estabilização mais simples que usa uma 6SJ7 como amplificador de diferença, e a tensão de comparação é cerca de $\frac{1}{3}$ da tensão de saída, podem ser atribuídos, como razoáveis, os seguintes valores:

$$E_0 = 300 \text{ volts}, E_1 = 550 \text{ volts}, R_1 = 800 \Omega,$$

$$G = 125, \mu = 5, r_p = 750 \Omega, \beta = \frac{1}{3} \text{ para}$$

ra tensão d.c. e $\beta = 1$ para ripple.

A aplicação das fórmulas que definem os parâmetros nos fornecem:

$$S \cong 115$$

$$R_0 \cong 7,4 \text{ ohms}$$

$$\alpha \cong 1,6 \times 10^{-3} \text{ para ripple}$$

A um modelo de fonte com uma estabilização elaborada e que usa dois amplificadores de diferença na alça de realimentação, com válvulas do tipo 12AX7, podem ser atribuídos os valores seguintes $E_0 = 300 \text{ volts}, E_1 = 450 \text{ volts},$
 $r_p \cong 375, \beta \cong \frac{1}{3}$ para d.c., $R_1 = 800 \text{ ohms}, G = 850,$ obtendo-se:

$$S \cong 770$$

$$R_0 \cong 0,83 \text{ ohms}$$

$$\alpha \cong 2,3 \times 10^{-4} \text{ para ripple}$$

2 - Desenvolvimento:

A idéia a ser desenvolvida é a de obter melhor estabilização pelo emprego de dupla realimentação. Assim

dois esquemas serão estudados:

2 - a - Dupla realimentação com as tensões de erro tomadas na saída.

O esquema abaixo (fig. 3) é o que corresponde a esse ítem;

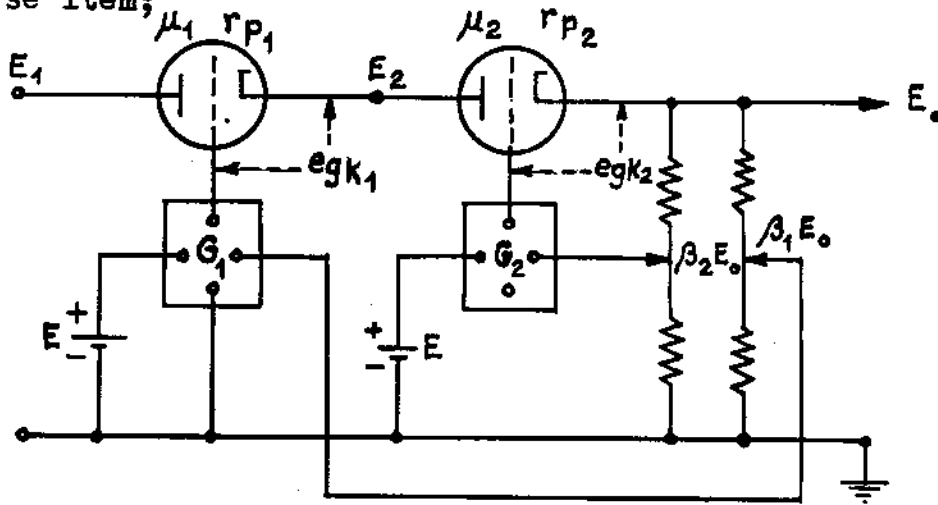


FIG. 3

e cujo equivalente é o seguinte:

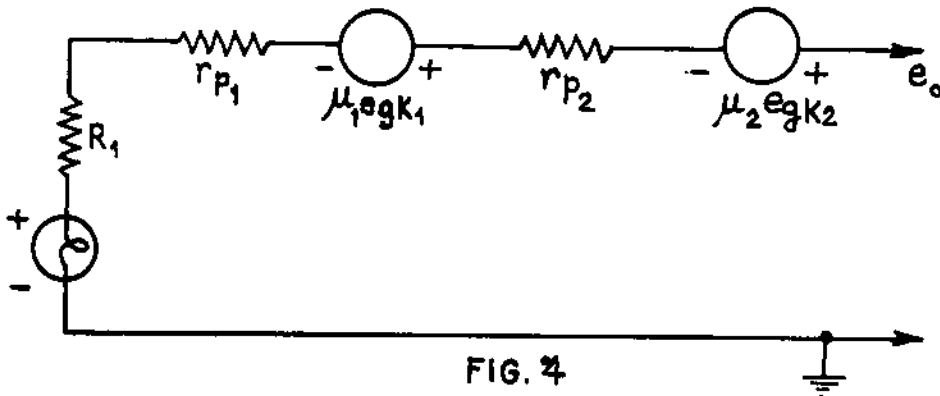


FIG. 4

Do circuito, obtém-se, para a malha de índice 2:

$$e_{gk2} = - (1 + G_2 \beta_2) e_o$$
, onde " e_o " representa variações de E_o .

Se $G_2 \beta_2 \gg 1 \therefore e_{gk2} = - G_2 \beta_2 e_o$

$$e \mu_2 e_{gk2} = - \mu_2 G_2 \beta_2 e_0 \quad e, \text{ portanto,}$$

$$e_2 = \mu_2 G_2 \beta_2 e_0$$

Para a malha maior, a da primeira válvula, obtém-se:

$$- e_{gk1} = e_2 + e_0 + G_1 \beta_1 e_0$$

ou

$$- e_{gk1} = \mu_2 G_2 \beta_2 e_0 + e_0 + G_1 \beta_1 e_0$$

Considerando

$$\mu_2 G_2 \beta_2 + G_1 \beta_1 \gg 1:$$

$$\mu_1 e_{gk1} \cong - (\mu_1 \mu_2 G_2 \beta_2 + \mu_1 G_1 \beta_1) e_0 \quad e$$

daí:

$$e_1 = \mu_2 G_2 \beta_2 e_0 + (\mu_1 \mu_2 G_2 \beta_2 + \mu_1 G_1 \beta_1) e_0$$

ou

$$e_1 = [\mu_2 G_2 \beta_2 (1 + \mu_1) + \mu_1 G_1 \beta_1] e_0$$

e:

$$e_0 = d E_0 = \frac{e_1}{\mu_2 G_2 \beta_2 (1 + \mu_1) + \mu_1 G_1 \beta_1}$$

Por considerações já feitas:

$$d E_1 = d E_s = e_1$$

Assim, tem-se:

$$\frac{d E_s}{d E_0} = \mu_2 G_2 \beta_2 (1 + \mu_1) + \mu_1 G_1 \beta_1$$

Finalmente:

$$S = \frac{E_0}{E_s} \cdot \frac{dE_s}{dE_0} \cong \frac{E_0}{E_1} \left[\mu_2 G_2 \beta_2 (1 + \mu_1) + \mu_1 G_1 \beta_1 \right] \dots (4)$$

$$\alpha = \frac{d E_0}{d E_1} = \frac{1}{\mu_2 G_2 \beta_2 (1 + \mu_1) + \mu_1 G_1 \beta_1} \dots (5)$$

$$e \quad R_0 = - \frac{dE_0}{dI_0} = - \frac{e_0}{I_0} = \frac{e_0}{\frac{e_0 - \mu_2 e_{gk2} - \mu_1 e_{gk1}}{R_1 + r_{p1} + r_{p2}}}$$

ou

$$R_0 = \frac{R_1 + r_{p1} + r_{p2}}{1 + \mu_2 G_2 \beta_2 + \mu_1 \mu_2 G_2 \beta_2 + \mu_1 G_1 \beta_1}$$

e

$$R_0 \cong \frac{R_1 + r_{p1} + r_{p2}}{\mu_2 G_2 \beta_2 (1 + \mu_1) + \mu_1 G_1 \beta_1} \dots (6)$$

Podem ser simplificadas as fórmulas dos parâmetros se supuzermos que $\mu_1 G_1 \beta_1 \cong \mu_2 G_2 \beta_2$; e $\mu_1 \cong \mu_2$, e

$$r_{p1} \cong r_{p2}$$

$$S \cong \frac{E_0}{E_1} \mu G \beta (2 + \mu) \dots (7)$$

$$\alpha \cong \frac{1}{\mu G \beta (2 + \mu)} \dots (8)$$

$$R_0 \cong \frac{R_1 + 2 r_p}{\mu G \beta (2 + \mu)} \dots (9)$$

Se compararmos as fórmulas (7), (8) e (9) com as de números (1), (2) e (3), veremos que a melhora obtida foi apenas por um fator $(\mu + 2)$, o que na realidade não representa muito, de vez que " μ " tem baixo valôr como já vimos em exemplos anteriores.

Aplicando às fontes já exemplificadas, se obteria para a primeira

$$S \cong 115 \times 6 = 690$$

$$R_o \cong 2 \text{ ohms}$$

$$\alpha \cong \frac{1,6}{6} \cdot 10^{-3} = 0,23 \cdot 10^{-3} \text{ para ripple,}$$

e para a segunda

$$S \cong 770 \times 6 = 4.620$$

$$R_o \cong 0,25 \text{ ohms}$$

$$\alpha \cong \frac{2,3}{6} \cdot 10^{-4} = 0,4 \cdot 10^{-4} \text{ para ripple}$$

2 - b - : Dupla realimentação em cascata.

O esquema abaixo (fig. 5) é o definido pelo título:

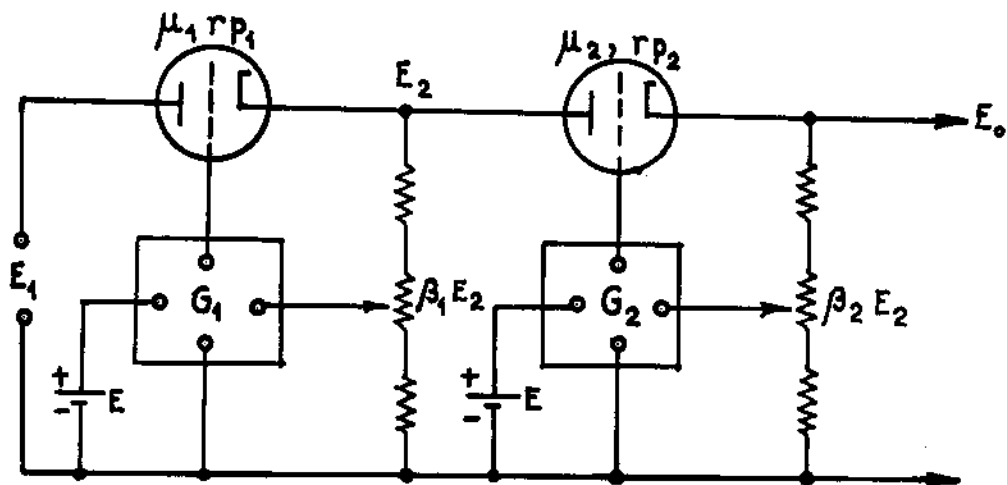


FIG. 5

e cujo equivalente é o que se segue:

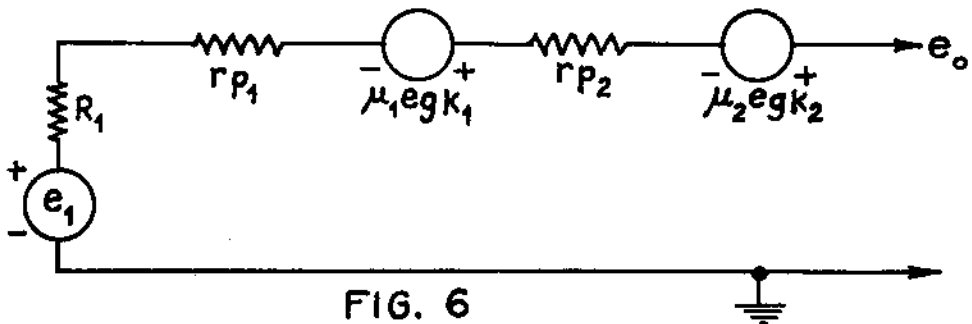


FIG. 6

Como as malhas são independentes, as fórmulas (1), (2) e (3) se adaptam a cada malha.

Assim

$$S_2 \cong \frac{E_o}{E_2} \mu_2 \beta_2 G_2 \quad e \quad S_1 \cong \frac{E_2}{E_1} \cdot \mu_1 \beta_1 G_1$$

$$e \quad S = S_1 S_2 \cong \frac{E_o}{E_1} \cdot \mu_1 \mu_2 \beta_1 \beta_2 G_1 G_2 \dots\dots\dots(10)$$

$$\infty = \frac{e_o}{e_1} = \frac{e_o}{e_2} \cdot \frac{e_2}{e_1} \cong \frac{1}{\mu_2 \beta_2 G_2} \cdot \frac{1}{\mu_1 \beta_1 G_1}$$

ou

$$\infty = \frac{1}{\mu_1 \mu_2 \beta_1 \beta_2 G_1 G_2} \dots\dots\dots(11)$$

e, para

$$R_o = \frac{e_o}{i_o}, \text{ se cortocircuitarmos o gerador exte}r$$

no, e_1 , do circuito equivalente, têm-se:

$$e_o - \mu_2 e_{gk2} - \mu_1 e_{gk1} = (r_{p1} + r_{p2} + R_1) i_o$$

Sendo

$$\mu_2 e_{gk2} \cong -\mu_2 \beta_2 G_2 e_o$$

$$e \quad \mu_1 e_{gk1} \cong -\mu_1 \beta_1 G_1 e_2 = -\mu_1 \mu_2 \beta_1 \beta_2 G_1 G_2 e_o$$

resulta

$$\begin{aligned} e_o (\mu_2 \beta_2 G_2 + \mu_1 \beta_1 G_1 + \mu_2 \beta_2 G_2) &= \\ &= (r_{p1} + r_{p2} + R_1) i_o \end{aligned}$$

ou

$$R_o = -\frac{e_o}{i_o} \cong \frac{r_{p1} + r_{p2} + R_1}{\mu_2 \beta_2 G_2 (1 + \mu_1 \beta_1 G_1)}$$

ou

$$R_o \cong \frac{r_{p1} + r_{p2} + R_1}{\mu_1 \mu_2 \beta_1 \beta_2 G_1 G_2} \dots\dots\dots(12).$$

As fórmulas (10), (11) e (12) podem ser simplificadas se considerarmos $\mu_1 \beta_1 G_1 = \mu_2 \beta_2 G_2 = \mu \beta G$, e $r_{p1} = r_{p2}$.

Assim:

$$S \cong \frac{R_o}{E_1} (\mu \beta G)^2 \dots\dots\dots(13).$$

$$\alpha \cong \frac{1}{(\mu \beta G)^2} \dots\dots\dots(14).$$

$$R_o \cong \frac{R_1 + 2 r_p}{(\mu \beta G)^2} \dots\dots\dots(15).$$

As fórmulas (13), (14) e (15) comparadas com (1), (2) e (3) mostram agora a grande vantagem do uso da dupla realimentação em cascata, que transforma as características da fonte, dotando-a de primorosa qualidade.

Assim, se a regulação com uma malha de realimentação é de boa qualidade, poderá, com o emprêgo da dupla realimentação em cadeia, ter sempre melhor qualidade.

Se aplicarmos as fórmulas (13), (14) e (15) às fontes dos exemplos anteriores, imaginando que outra malha de realimentação foi anexada em cadeia, supondo ainda que as malhas sejam aproximadamente iguais, obteremos para a primeira fonte os seguintes valores aproximados:

$$S \cong (115)^2 \cong 10^4$$

$$\alpha \cong 2,5 \times 10^{-6} \text{ para ripple}$$

$$R_o \cong 0,15 \text{ ohms.}$$

Se compararmos os valores obtidos para os parâmetros no caso da dupla realimentação em cadeia, aplicada a partir de uma regulação grosseira, nada elaborada, com os valores dos mesmos parâmetros da fonte mais elaborada, mas com uma só malha de realimentação, fica patente a vantagem do emprêgo da dupla realimentação como se propõe nesse item.

3 - Aplicação:

Duas fontes são apresentadas, uma de 200 V. 75 mA, com válvulas, e uma de 15 volts, 50 mA, com transistores.

Em ambos os casos foram obtidos dados suficientes para fazer-se a comparação na base da realidade prática.

3.1 - Fonte de alimentação regulada com válvulas.

3.1.1 - Características da Fonte de Tensão regulada usada na experiência convencional.

A fonte de alimentação que apresentaremos é fina, porém não foi ajustada para a sua melhor performance para fazer ressaltar a vantagem da técnica proposta.

O esquema é o da fig. -7-

A fonte apresentada é de 300 volts e 100 mA. e as medidas de suas características apresentaram os seguintes dados:

A) Com tensão de rede nominal (115 volts)

A-1) Para variação de 100 mA. de carga obteve-se 1 Volt de variação na tensão de saída.

A-2) Ripple de:

- 30 mV. p.p. com plena carga (máxima).

- 10 mV. p.p. sem carga

B) Com carga máxima (100 mA)

B-1) Tensão de rede 105 volts

Ripple 1,5 V. p.p.

Tensão de rede 110 volts
Ripple 0,5 V. p.p.
Tensão de rede 135 volts
Ripple 0,020 V. p.p.

B-2) Variando a rede de 105 a 135 Volts obtém-se 10 Volts de variação na tensão de saída.

C) Variação da tensão de saída com a variação da carga desde máxima até zero para várias tensões de rede.

- Tensão de rede 105 V
Variação de saída 10 V.
- Tensão de rede 110 V
Variação de saída 2 V.
- Tensão de rede 135 V
Variação de saída 1 V.

3.1.2 - Características da Fonte de Tensão regulada utilizando dupla realimentação com as tensões de erro tomadas na saída.

O circuito em tela é o abaixo fig. -8- em que se percebe a utilização da fonte convencional do item 3.1.1 acrescida de outra malha de aproximadamente iguais características:

O circuito de fonte regulada desse item apresentou as seguintes características:

A) Com tensão nominal da rede (115 Volts)

A-1) Para variação de 75 mA de carga obteve-se 0,150V. de variação na saída.

A-2) Ripple de:

2 mV p.p. com plena carga

B) Com carga máxima (75 mA)

B-1)

Tensão de rede de 85 Volts.....

Ripple 0,01 V.

Tensão de rede de 90 Volts.....

Ripple 0,002 V.

Tensão de rede de 135 Volts.....

Ripple 0,002 V.

B-2)

Para variação da rede, de 85 Volts. a 135 V., a saída apresenta uma variação de 0,600 Volts.

C) Variação da tensão de saída com a variação da carga, desde máxima até zero, para várias tensões de rede:

- Tensão de rede: 85 volts.....

Variação na saída: 0,98V..

- Tensão de rede: 135 volts.....

Variação na saída: 0,200 V

3.1.3 - Características da Fonte de Tensão regulada com dupla realimentação em cadeia.

O circuito final utilizado, e que é o proposto como realmente bastante eficiente, pode ser visto na fig.

-9-

Essa fonte de tensão com dupla realimentação em cascata apresentou os seguintes resultados:

A) Com tensão nominal de rede (115 volts).

A-1) Para variação de 75 mA. de carga, obteve-se 0,010 Volts de variação na

saída.

- A-2) Ripple de
0,1 mV p.p. com plena carga
- B) Com carga máxima (75 mA)

B-1)

- Tensão de rede de 85 Volts...
Ripple 0,001 V.
- Tensão de rede de 90 Volts...
Ripple 0,0008 V.
- Tensão de rede de 100 Volts..
Ripple 0,0004 V.
- Tensão de rede de 135 Volts..
Ripple 0,0001 V.

B-2)

Para variação da rede, de 85 a 135 volts, a saída apresenta uma variação de 0,1 volt.

- C) Variação da tensão de saída com a variação da carga, desde máxima até zero, para várias tensões de rede:

- Tensão de rede : 85 Volts....
Variação na saída:0,3V
- Tensão de rede :135 Volts....
Variação na saída:0,02V

3.2 - Fonte de alimentação regulada eletronicamente com transistores:

Seria exaustivo refazer o estudo com a mesma técnica para a fonte de alimentação a transistor.

Apresentaremos apenas dois circuitos de fonte de alimentação a transistor com suas características para comparação.

3.2.1 - Fonte de alimentação regulada com apenas um laço de realimentação.

A fonte que ora apresentamos é a C.B.P.F., modelo FAT-1 de 15 volts e 50 mA. Foi projetada no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas para uso específico em uma montagem de estudo de efeito Mossbauer. O esquema é o apresentado na fig. -10-, cujas características principais são as seguintes:

A) Com 90 volts de rede

- A-1) Para 50 mA de carga:
saída de 14,6 Volts.
- A-2) A circuito aberto:
saída de 15,1 Volts.
- A-3) Ripple: 0,007 Volts.

B) Com 130 Volts de rede;

- B-1) Para 50 mA de carga:
saída de 15,2 Volts.
- B-2) A circuito aberto:
saída de 15,4 Volts.
- B-3) Ripple: 0,004 volts.

C) Com 115 Volts de rede

- C-1) Para 50 mA de carga:
saída de 15,0 volts.
- C-2) A circuito aberto:
saída de 15,2 volts.
- C-3) Ripple: 0,003 Volts.

3.2.2 - Fonte de alimentação regulada com dupla realimentação em cadeia

A fonte que ora apresentamos é uma fonte altamente estabilizada constituída de duas unidades já existentes

e projetadas no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas para fins específicos, e são as modelo FAT-1 já apresentada e a FAT-2 de 25V. e 200 mA.

Com o emprêgo das duas constituiu-se uma fonte de alimentação superestabilizada e de grande performance que apresentamos na fig. -11-, a FATD-1, cujas características são apresentadas a seguir:

A - Com 85 Volts de rede:

A-1) Para 50 mA de carga:
saída de 14,93 volts.

A-2) A circuito aberto:
saída de 15,0 Volts.

A-3) Ripple: 0,0004 Volt.

B - Com 130 Volts de rede:

B-1) Para 50 mA de carga:
saída de 14,955 Volts

B-2) A circuito aberto:
saída de 15 Volts.

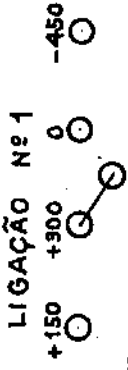
B-3) Ripple: 0,0004 Volts.

4 - Conclusão:

O estudo teórico, bem como os dados práticos levantados em laboratório, bem demonstram a eficiência que resulta da técnica da dupla realimentação em cascata. É evidente que as limitações práticas não permitem sejam repetidos na prática os dados fantásticos previstos na teoria, pois seria assim possível, pelo emprêgo da tríplice realimentação em cascata, obter-se uma performance que mesmo o menos experimentado sabe ser impossível.

Pode ser obtido um resultado bastante mais aproximado da teoria se para referência de tensão for usada uma pilha e não a válvula a gás ou diodo zener.

PAINEL FRONTAL



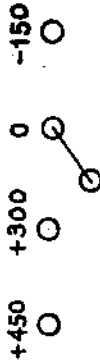
SAÍDAS NOS OCTAIS - LIGAÇÃO Nº 1

- ① -300 V 100 mA ESTABILIZADO
- ② 6,3 V. AC-10 A
- ③ 6,3 V. AC-10 A
- ④ 150 V.
- ⑤ TERRA
- ⑥ 450 V. 15 mA ESTABILIZADO

SAÍDAS NOS OCTAIS - LIGAÇÃO Nº 2

- ① TERRA
- ② 6,3 V. AC-10 A
- ③ 6,3 V. AC-10 A
- ④ 450 V.
- ⑤ 300 V. 100 mA ESTABILIZADO
- ⑥ 150 V. 15 mA ESTABILIZADO

LIGAÇÃO Nº 2



CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FISICAS

REFICADOR MODELO RS-5A

PEÇA: ESQUEMA

MOD.: RS-5A

PROJETO:

VISTO:

DESENHO:

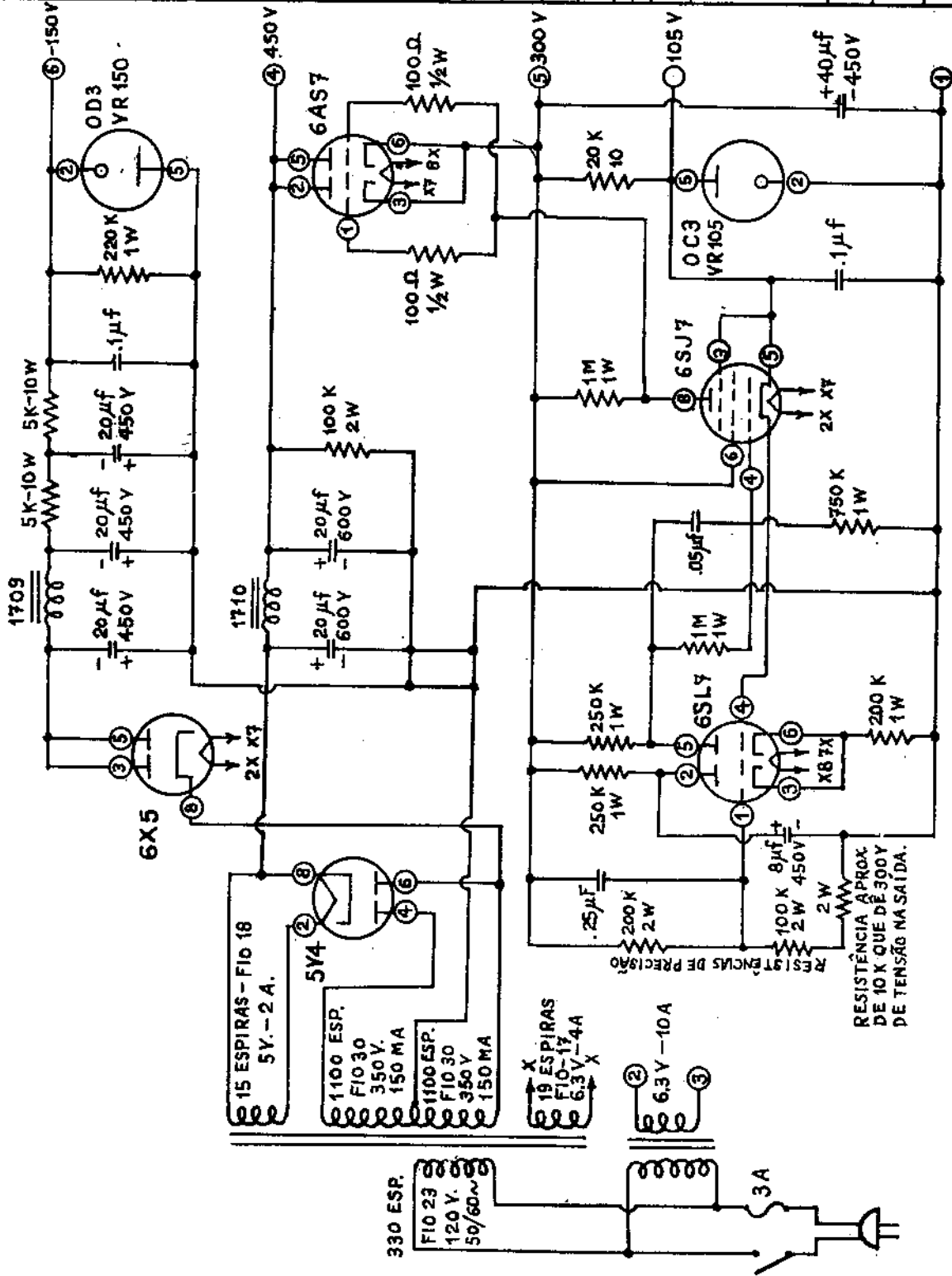


FIG. 7

