

## ALGUMAS NOTAS SOBRE A ESTABILIZAÇÃO DA CORRENTE ELÉCTRICA CONTÍNUA

JOÃO BESSA SOUSA, MARIA RENATA CHAVES, MARIA DE FÁTIMA PINHEIRO \*  
Laboratório de Física da Faculdade de Ciências do Porto

### RESUMO

Referem-se variadas situações que no laboratório exigem o emprego de correntes eléctricas altamente estáveis, analisando potencialidades e limitações das fontes electrónicas correntes, das fontes com amplificação servo-foto-eléctrica, pilhas e acumuladores.

Chama-se a atenção para a existência de um método prático extremamente simples, barato e eficaz, baseado numa associação conveniente de acumuladores (de Pb, por exemplo) que permite obter correntes estáveis a menos de  $2/10^7$  por minuto, em circuitos cuja resistência total se possa tomar na prática como constante. Apresentam-se testes de uma tal unidade, construída localmente e ensaiada nas condições acima referidas.

### 1. INTRODUÇÃO

No laboratório são variadas as situações de emprego de correntes eléctricas contínuas estáveis. Na estabilização do zero de um potenciómetro, na termometria de resistência, na produção de campos magnéticos permanentes, no estudo do efeito Hall, surgem tais situações.

Na prática é sempre mais difícil obter correntes estáveis quando se trata de intensidades elevadas (superiores a 1 A) ou muito baixas (infe-

---

\* Bolseiros do Instituto de Alta Cultura, associados ao projecto de investigação PF1.

riores ao  $\mu\text{A}$ ). No primeiro caso os efeitos térmicos que se manifestam nos circuitos das unidades de regulação da corrente podem afectar criticamente as suas características, e no segundo torna-se difícil contrariar a presença de correntes parasitas nos circuitos de utilização. Basta observar que uma f.e.m. parasita de  $1\ \mu\text{V}$  dá origem, num circuito com resistência da ordem de  $1\ \Omega$ , a uma corrente com uma intensidade da ordem de  $1\ \mu\text{A}$ .

Há situações em que o circuito de utilização apresenta uma resistência praticamente constante no tempo, como acontece, por exemplo, no caso de um potenciómetro ou de um magnete depois de atingidos os respectivos regimes de equilíbrio térmico. Para obter uma corrente estável basta dispor nestes casos de uma fonte de *tensão* estabilizada. Por vezes o circuito de utilização, embora de resistência  $r$  variável, apresenta valores de  $r$  tão baixos que a ligação em série de uma resistência adicional  $R_0 \gg r$  e altamente estável é suficiente para construir um circuito com uma resistência total praticamente constante no tempo <sup>(1)</sup>; nestes casos está também indicado o uso de uma fonte de *tensão* estabilizada. Em todos os outros casos impõe-se em geral o emprego de fontes de *corrente* estabilizada.

## 2. ESTABILIDADE A CURTO E A LONGO PRAZO

Na prática, interessa garantir que as variações relativas da corrente eléctrica se conservem inferiores a um dado valor, pelo menos durante o intervalo de tempo estritamente necessário para executar todas as operações inerentes a cada medição completa. Define-se por isso a estabilidade ( $1/S$ ) da corrente num intervalo de tempo  $\Delta t$  através do coeficiente:

$$S = [(\text{sup } |I - I_m|) / I_m] \Delta t$$

onde  $\text{sup } |I - I_m|$  representa o módulo da diferença máxima, ocorrida no intervalo  $\Delta t$ , entre o valor instantâneo da corrente  $I$  e o seu valor médio nesse mesmo intervalo,  $I_m$ .

Como ilustração, suponhamos que  $I(t)$  é uma função monotonamente decrescente, com uma derivada em módulo suficientemente pequena para garantir uma boa estabilidade num pequeno intervalo de tempo (Fig. 1, a): Vemos que  $S$  toma valores reduzidos quando  $\Delta t$  é suficientemente pequeno (boa estabilidade a curto prazo) mas pode tomar valores consideravelmente elevados quando  $\Delta t$  é elevado (má estabilidade a longo prazo).

---

<sup>(1)</sup> Por exemplo, num circuito com  $r = 10^{-3}\ \Omega$  e apresentando variações relativas  $\frac{\Delta r}{r} \approx 10\%$ , basta uma resistência adicional de  $10\ \Omega$ , suficientemente isolada de perturbações térmicas externas, para obter um circuito com resistência total ( $R_0 + r$ ) estável a menos de  $1/10^5$ .

Suponhamos agora que  $I(t)$  oscila em torno de um valor médio, não se afastando contudo de modo apreciável deste valor (fig. 1, b). Para intervalos  $\Delta t$  pequenos o valor de  $S$  pode ser consideravelmente superior ao da situação da fig. 1a, devido aos elevados valores que  $|dI/dt|$  apresenta em certos pontos; contudo, para intervalos  $\Delta t$  superiores a um dado valor,  $S$  torna-se consideravelmente menor. A noção de estabilidade está portanto associada não só ao valor de  $S$  mas ainda ao valor do intervalo  $\Delta t$  considerado em cada caso.

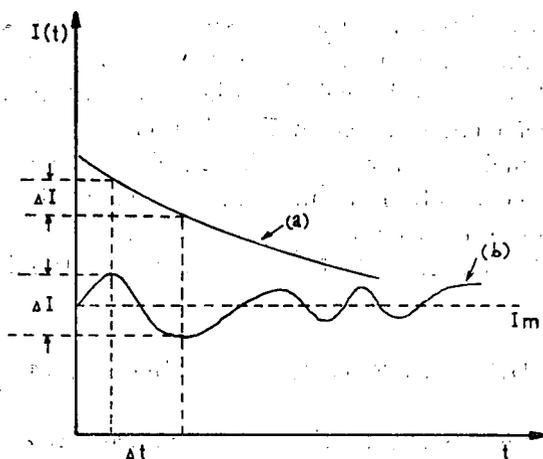


FIGURA 1

Sobrepostas às variações relativamente lentas, embora aleatórias, que a corrente pode apresentar, podem ainda estar presentes componentes alternadas com frequências superiores à do fenómeno em observação («ripple»). É o que acontece, por exemplo, quando a corrente é obtida a partir da rectificação e filtragem de uma tensão alternada. No caso usual em que a tensão tem uma frequência de 50 Hz, o período destas alternâncias é de 0,01 segundo. Quando os aparelhos de medida possuem um elevado tempo de resposta aos sinais de entrada, como acontece por exemplo com os galvanómetros (tempo de resposta da ordem de uma fracção do segundo), a presença destas pequenas componentes alternadas não chega a afectar significativamente as indicações respectivas. Porém, quando se trata de aparelhos electrónicos, a presença das componentes alternadas afecta em geral, de modo apreciável, as respectivas condições de funcionamento.

### 3. FONTES ELECTRÓNICAS

O emprego de unidades electrónicas para a estabilização da tensão ou da corrente encontra-se hoje generalizado, havendo uma larga gama de

correntes, tensões e factores de estabilização realizáveis. Obtém-se no mercado fontes capazes de fornecer correntes da ordem de 1A com uma estabilidade de  $1/10^3$  em qualquer intervalo de tempo de utilização prática corrente. A possibilidade de programação ou controlo remoto destas unidades constitui um atractivo adicional. Os princípios básicos do funcionamento de uma fonte de corrente estabilizada são também conhecidos, como se ilustra no diagrama da figura 2:

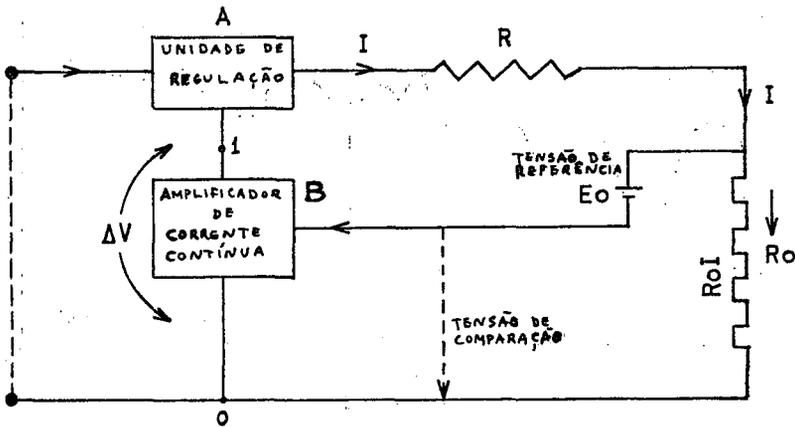


FIGURA 2

A tensão contínua não estabilizada, obtida previamente numa unidade de rectificação e filtragem (reguladores integrados têm hoje grande difusão) produz uma corrente  $I$  que passa numa unidade de regulação  $A$ , na resistência de utilização  $R$  e numa resistência padrão  $R_0$ . A unidade  $A$  não é mais do que um elemento de resistência eléctrica regulável por meio de uma tensão eléctrica conveniente, a tensão de regulação. A resistência  $R_0$  permite obter uma tensão  $R_0I$  que é comparada com uma tensão de referência estável  $E_0$ . Qualquer variação da corrente  $I$  altera a diferença ( $E_0 - R_0I$ ) que, depois de amplificada em  $B$ , actua na unidade de regulação  $A$ . As ligações são feitas de modo que a resistência desta unidade varie sempre no sentido conveniente (realimentação negativa) <sup>(2)</sup>.

Na prática, empregam-se em geral transistores nas unidades de amplificação e regulação, e um dos problemas reside na dificuldade de garantir a estabilidade da unidade de amplificação com transistores, por serem as características destes muito afectadas pela temperatura.

<sup>(2)</sup> Em rigor deveríamos comparar  $E_0$  com  $R_0(I - i)$  onde  $i$  é a corrente que atravessa o ramo que contém  $E_0$ . Contudo na prática garante-se que  $i \ll I$ , graças aos elevados valores do ganho e da impedância de entrada. Para produzir a tensão de referência usam-se em geral díodos do tipo Zener ou pilhas do tipo Mallory ( $Hg$ ), habituais nos modernos amplificadores de c. c.

Mostra-se na figura 3 um gráfico da corrente em função do tempo, obtido com uma fonte electrónica de corrente estabilizada (Keithley 225) ligada a um circuito de resistência constante:

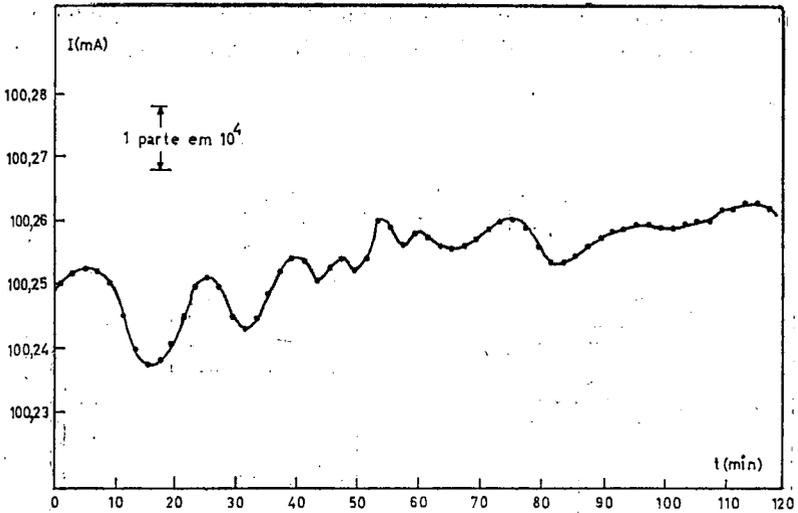


FIGURA 3

#### 4. AMPLIFICAÇÃO SERVO-FOTO-ELÉCTRICA

Empregando métodos de amplificação foto-eléctrica existem no mercado fontes com características excelentes, capazes de fornecer correntes até 2A com uma estabilidade de  $1/10^8$ , para intervalos de tempo de várias horas. A figura 4 ilustra o princípio de funcionamento destas unidades:

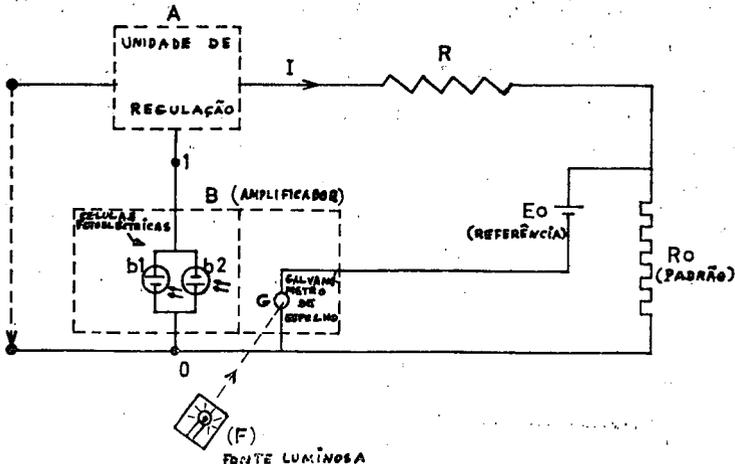


FIGURA 4

Suponhamos ser  $I_0$  o valor da corrente de equilíbrio desejada, para a qual é nula a diferença entre a tensão  $R_0 I_0$  e a tensão de referência  $E_0$  <sup>(3)</sup>. Se houver variações da corrente em relação a este valor, a diferença resultante entre  $R_0 I_0$  e  $E_0$  é aqui detectada por um galvanómetro  $G$  de elevada sensibilidade e com o respectivo espelho iluminado por um feixe luminoso proveniente de uma fonte luminosa como se mostra no esquema.

O desvio do espelho vai modificar a razão das iluminações de duas células foto-eléctricas gémeas, alterando a tensão de regulação (terminais 0-1) <sup>(4)</sup>. As ligações são feitas de modo que a tensão de regulação contraria qualquer variação da corrente em relação ao seu valor de equilíbrio. Como é óbvio, esta unidade é particularmente sensível aos choques e vibrações mecânicas. Estas fontes têm de ser ajustadas para fornecer correntes fixas, de acordo com os valores de vários padrões  $R_0$ , intermutáveis, de modo a garantir em cada caso que  $R_0 I = E_0$ . Esta falta de versatilidade pode tornar-se incómoda na prática. Como é óbvio, a estabilidade destes sistemas depende das estabilidades de  $E_0$  e  $R_0$  (o uso de potenciómetros multiturn em paralelo com  $R_0$  ou uma sua parte poderá ser uma alternativa a considerar).

## 5. ACUMULADORES DE CHUMBO

### 5.1 Características

Quando o circuito de utilização tiver uma resistência praticamente constante, pode adoptar-se uma solução muito simples e económica com o emprego de acumuladores de chumbo de capacidade apreciável, por exemplo, do tipo bateria de automóvel.

Um simples acumulador de chumbo de capacidade elevada constitui já uma fonte de tensão com uma estabilidade satisfatória algumas horas após a sua ligação. É o que pode verificar-se na figura 5, que mostra várias curvas da variação temporal da tensão nos bornes de um acumulador de chumbo com 80 Ah de capacidade, em vários regimes de descarga  $I = 300, 50, 10$  mA):

Inicialmente, a corrente apresenta variações relativas da ordem de  $1/10^4$  por minuto, atingindo-se valores da ordem de  $1/10^6$  por minuto ao fim de várias horas. Um dos maiores inconvenientes reside no tempo demasiado longo necessário para atingir estas condições de estabilidade. Verifica-se ainda que qualquer alteração apreciável do valor da corrente, motivada

---

<sup>(3)</sup> Obtida, por exemplo, a partir de uma pilha padrão do tipo Weston.

<sup>(4)</sup> Naturalmente, as células gémeas poderão ser eventualmente substituídas por uma célula única com sectores em montagem diferencial.

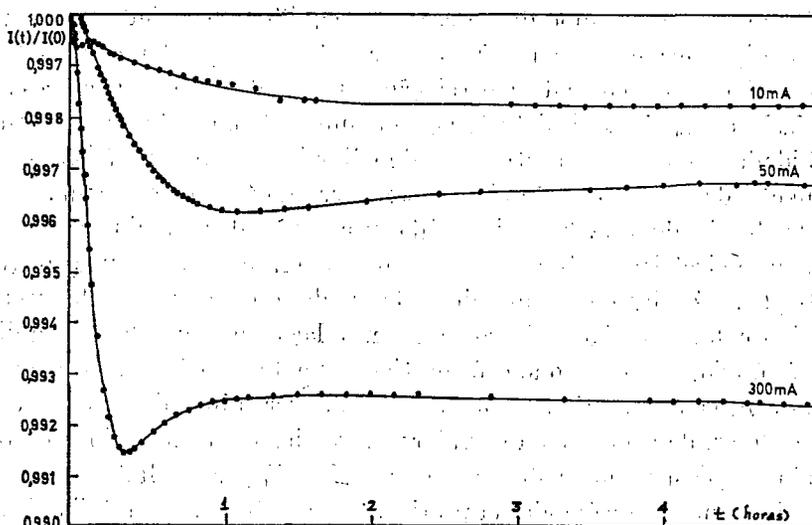


FIGURA 5

por exemplo por modificações bruscas da resistência do circuito, requer novamente um tempo apreciável para atingir um novo regime de equilíbrio.

Como se pode verificar no gráfico, a estabilidade da tensão de um acumulador é tanto melhor quanto menor for o valor da corrente debitada. A f.e.m. é ainda afectada pela temperatura, apresentando na prática variações da ordem de  $200 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . Porém, em condições normais de trabalho no laboratório, as taxas de variação da temperatura são geralmente inferiores a  $0,01^\circ\text{C}/\text{minuto}$ , devido à elevada inércia térmica destes acumuladores. Nestas condições, a estabilidade da f.e.m. devida à variação da temperatura será em geral melhor que  $1/10^6$  por minuto.

Uma outra característica favorável dos acumuladores de chumbo é a sua resistência interna muito baixa, da ordem de  $10^{-2}\Omega$  (em contraste com a resistência interna das pilhas secas, da ordem ou superior a  $10\Omega$ ); e naturalmente a ausência de «ripple» na tensão que produzem.

## 5.2 Resultados experimentais

Como vimos, a estabilidade da tensão de um acumulador aumenta com a diminuição da corrente debitada, sendo possível associar convenientemente vários acumuladores, de modo que um deles seja percorrido por uma corrente de baixa intensidade, precisamente o acumulador que assegura a tensão de saída da unidade. Com base no princípio que a seguir se descreve<sup>(5)</sup>, foram construídas e ensaiadas várias unidades que permitiram

(5) A. N. GERRITSEN, «Handbuch der Physik», IX, 151-152, 1956.

obter elevadas estabilidades para a tensão, da ordem de  $1/10^7$  por minuto. Foram também introduzidos refinamentos e sistematizadas as operações de ajustamento das unidades mais complexas.

O princípio de estabilização é o seguinte: a uma temperatura constante, a estabilidade no tempo da tensão de um acumulador é tanto maior quanto maior for a corrente debitada pelo acumulador. Associando convenientemente vários acumuladores, é possível conseguir que a corrente debitada saia, quase exclusivamente, de um dos acumuladores, utilizando-se justamente os restantes para compensar (com baixos débitos de corrente, logo elevada estabilidade nas respectivas tensões) o decréscimo natural da tensão do primeiro acumulador com o tempo. Como ilustração, consideremos dois acumuladores de f.e.m.  $E_1$  e  $E_2$  ligados em paralelo e com uma resistência  $R_2$  intercalada, como se mostra na Fig. 6a. Sendo  $r_1, r_2$  as resistências internas

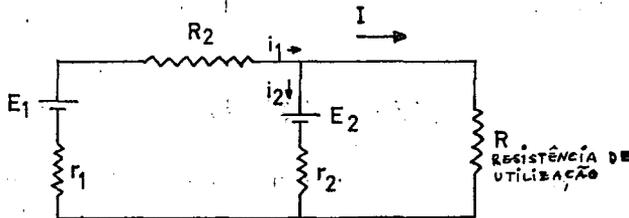


FIGURA 6a

dos acumuladores e  $I, i_1, i_2$  as intensidades das correntes nos vários ramos independentes do circuito, podemos escrever as leis de Kirchoff para o circuito:

$$\begin{aligned} E_1 - E_2 &= R_2 i_1 + r_1 i_1 + r_2 i_2 \\ E_2 &= -r_2 i_2 + RI \\ i_1 &= i_2 + I \end{aligned}$$

Resolvendo este sistema obtém-se para valor da corrente que percorre a resistência de utilização:

$$I = (1/D) \cdot [(r_1 + R_2)E_2 + r_2 E_1] \quad (1)$$

onde  $D$  é o determinante do sistema,  $D = (r_2 + R) \cdot (r_1 + R_2) + r_2 R$ .

Começemos por verificar como é afectada a corrente  $I(I \rightarrow I + \Delta I)$  quando se altera de  $\Delta E_1$  a f.e.m. do primeiro acumulador, tendo-se da eq. (1):

$$\Delta I = (r_2/D) \cdot \Delta E_1$$

e portanto

$$\Delta I/I = \frac{r_2 \cdot \Delta E_1}{(r_1 + R_2)E_2 + r_2 E_1}$$

Atendendo a que  $r_1, r_2 \ll R_1, R_2$  (para acumuladores,  $r_1, r_2 \simeq$  décimos de  $\Omega$ ) e que  $E_1$  e  $E_2$  são da mesma ordem de grandeza, conclui-se que:

$$|\Delta I/I| = |(E_1/E_2) \cdot (r_2/R_2) \cdot (\Delta E_1/E_1)| \ll |\Delta E_1/E_1|$$

Por um processo análogo se conclui também que a variação relativa da corrente  $i$ , provocada pelas variações de  $R_2$ , é dada por:

$$|\Delta I/I| = |(1 - E_1/E_2)(r_2/R_2)(\Delta R_2/R_2)| \ll |\Delta R_2/R_2|$$

Finalmente, vejamos o efeito das variações da f.e.m. do acumulador de saída ( $E_2$ ):

$$|\Delta I/I| = |\Delta E_2/E_2|$$

Em resumo, a corrente debitada pela unidade é estável com respeito às variações da f.e.m.  $E_1$  do primeiro acumulador e da resistência  $R_2$ , mas não quanto às variações da f.e.m.  $E_2$  do acumulador de saída. No entanto, por conveniente ajustamento de  $R_2$ , podemos anular a corrente  $i_2$  que percorre este acumulador e, como vimos, a respectiva f.e.m. torna-se então muito estável<sup>(6)</sup>. Para melhorar ainda mais a estabilidade, devem evitar-se variações apreciáveis na temperatura deste acumulador.

O princípio de estabilização acabado de descrever pode ser generalizado a circuitos com um número arbitrário de acumuladores ( $n$ ):

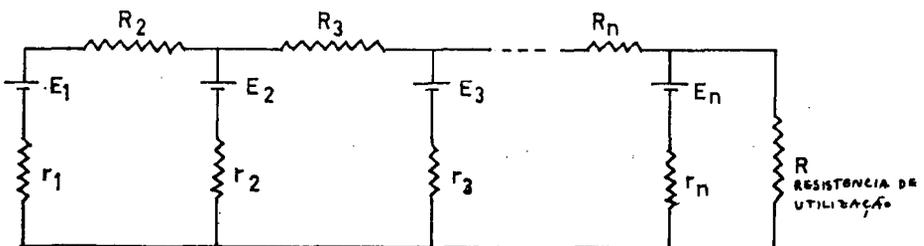


FIGURA 6b

<sup>(6)</sup> Das Leis de Kirchoff tira-se que:

$$i_2 = (1/D) \cdot [RE_1 - (R + R_2 + r_1)E_2]$$

Para ter  $i_2 = 0$ , basta então fazer  $R_2 = R[(E_1/E_2) - 1] - r_1$ .

É fácil verificar que uma alteração  $\Delta E_1$  na f.e.m. do primeiro acumulador origina uma alteração  $\Delta I$  na corrente de saída dada por:

$$\Delta I = (\Delta E_1/R) \cdot [r_2/(r_1 + r_2 + R_2)] \cdot \prod_3^n [r_j/(r_j + R_j)]$$

Uma vez que  $r_j \ll R_j$ , e  $I \simeq E_n/R$ , vem:

$$\Delta I/I = (\prod_3^n r_j/R_j) \cdot (E_1/E_n) \cdot (\Delta E_1/E_1)$$

expressão que conduz a um resultado já obtido no caso particular  $n = 2$ .

Como ilustração do método, tomemos três acumuladores de f.e.m.  $E_1 = 12\text{ V}$ ,  $E_2 = 8\text{ V}$ ,  $E_3 = 4\text{ V}$ , resistências internas  $r_1 = r_2 = r_3 = 0,1\ \Omega$ , e escolhamos  $I = 1\text{ A}$ ,  $R_2 = R_3 = R = 4\ \Omega$ . Nestas condições apenas ocorre uma alteração da corrente de saída de  $I = 1,5 \cdot 10^{-4}\text{ A}$  quando a f.e.m. do primeiro acumulador ( $E_1 = 12\text{ V}$ ) se altera de  $1\text{ V}$ . De notar também que a corrente no segundo acumulador é então de apenas  $6\text{ mA}$  por cada volt de variação da f.e.m.  $E_1$ .

O circuito representa pois uma fonte de alimentação altamente estabilizada, com uma impedância (resistência de saída) da ordem de  $0,1\ \Omega$ .

### 5.3 Resultados experimentais

A Fig. 6c mostra o esquema de uma unidade que construímos e ensaiamos, com uma tensão de saída de  $4\text{ V}$  e formada pela associação de três acumuladores de chumbo com f.e.m. de  $12\text{ V}$ ,  $8\text{ V}$  e  $4\text{ V}$ , e capacidades individuais de  $80\text{ Ah}$ :

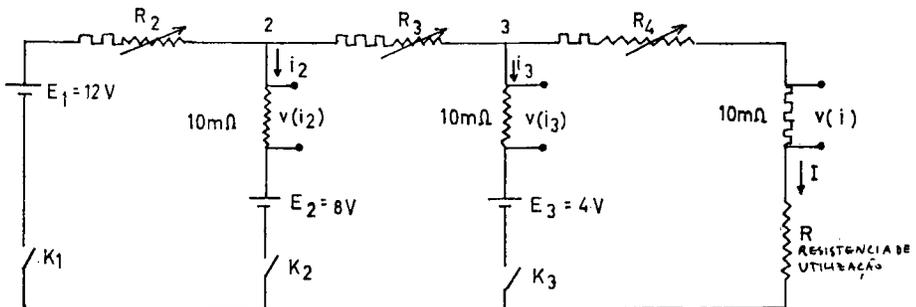


FIGURA 6c

Cada uma das resistências  $R_2, R_3, R$  é constituída por uma resistência fixa de alguns  $\Omega$  (?) em série com uma resistência de décadas de elevada estabilidade e ajustável até ao décimo de  $\Omega$ . A resistência padrão  $R_0 = 0,1 \Omega$  em série com a resistência de utilização  $R$  permite obter uma tensão  $R_0 I$  para a medida precisa da corrente por um método potenciométrico.

Para utilizar a unidade ligam-se os acumuladores  $E_1, E_2$  e  $E_3$ , e ajusta-se a resistência  $R$  de modo a levar  $I$  ao valor desejado; em seguida ajustam-se as resistências  $R_2$  e  $R_3$  de modo a tornar mínimas as intensidades  $i_2$  e  $i_3$  (8).

A figura 7 mostra uma curva da corrente  $I$  em função do tempo, obtida com a unidade descrita. Atingem-se pois valores de estabilidade de cerca de  $2/10^7$  por minuto em menos de 1 hora após a ligação.

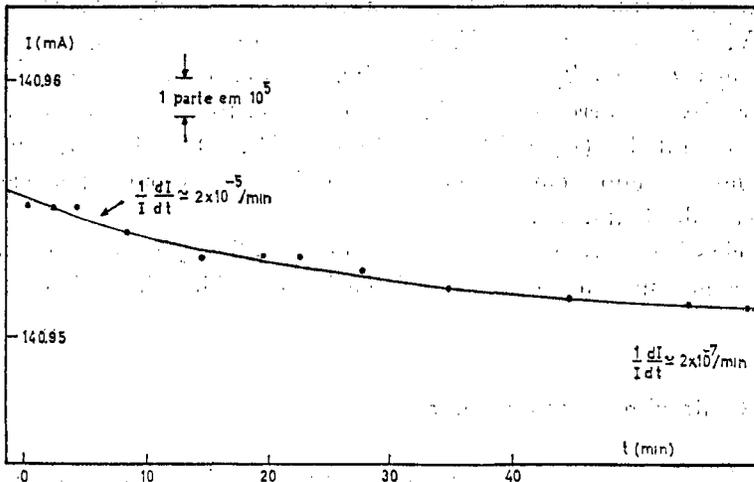


FIGURA 7

(7) As resistências fixas destinam-se apenas a proteger os acumulares.

(8) Na prática,  $i_2(i_3)$  são ajustadas a valores inferiores a  $1 \text{ mA}$ . Como as tensões  $v(i_2)$  e  $v(i_3)$  são obtidas com uma resistência de  $10 \text{ m}\Omega$ , basta dispor de um voltímetro com resolução até  $10 \mu \text{ V}$ . Notar que o valor de  $10 \text{ m}\Omega$  não altera significativamente a resistência dos ramos onde estão intercalados os acumuladores.