

~~Maximilian E. Hehl~~



**INTRODUÇÃO AO ESTUDO DO COMPUTADOR
ANALÓGICO PACE TR-48**

MAXIMILIAN E. HEHL

Série INFORMAÇÕES N.º 4

Julho — 1963

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA

Caixa Postal 11049 (Pinheiros)

CIDADE UNIVERSITÁRIA "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"

SÃO PAULO — BRASIL

Aljoran

INTRODUÇÃO AO ESTUDO DO COMPUTADOR ANALÓGICO

PACE TR - 48

Maximilian E. Hehl

Divisão de Física de Reatores

Série "Informações" Nº 4

Julho-1963



E R R A T A

Pag.	Linha	onde se lê	deve-se ler
II	3	selectores	seletores
1	3	suscinta	sucinta
6	10	$e_o = - \frac{Z_f}{Z_1 Z_2} \cdot \frac{e_1 Z_2 + e_2 Z_1}{1 + \frac{1}{A} \left(1 + \frac{Z_f}{Z_2} + \frac{Z_f}{Z_1} \right)}$	$e_o = - \frac{Z_f}{Z_1 Z_2} \cdot \frac{e_1 Z_2 + e_2 Z_1}{1 + \frac{1}{A} \left(1 + \frac{Z_f}{Z_2} + \frac{Z_f}{Z_1} \right)}$
6	16	$e_o = 6.9999993$	$e_o = - 6.9999993$
8	7	$e_o = - \frac{100K}{100K} \times (-0.2 \text{ volt})$	$e_o = - \frac{100K}{10K} \times (-0.2 \text{ volt})$
9	11	$(e_o) = e_g + E$	$(e_o)_- = e_g + E$
16	26	0.1	0.1β
22	9	quantidade X	quantidade variável Y em outra quantidade X
22	28	de voltagem	da voltagem
42	11	$\frac{dN'}{dt'} = - \frac{\phi}{a} N'$	$\frac{dN'}{dt'} = - \frac{\sigma \phi}{a} N'$
45	21	$a = 10^{-7} \frac{\text{seg}^*}{\text{seg}}$	$a = 10^{-7} \frac{\text{seg}^*}{\text{seg}}$
51	18	$\phi = 1,5 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ e seg}$	$\phi = 1.5 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ x seg}$
51	24	$a = 10^{-7} \frac{\text{seg}^*}{\text{seg}}$	$a = 10^{-7} \frac{\text{seg}^*}{\text{seg}}$
52	6	$\frac{dN'_{28}}{dt'} = 0.0005 N'_{28}$	$\frac{dN'_{28}}{dt'} = - 0.0005 N'_{28}$

Í N D I C E

	<u>Página</u>
Objetivo	1
Capítulo I: Teoria dos Computadores Análogos.....	1
1. Introdução.....	1
2. Amplificadores operacionais.....	2
2.1. Amplificador operacional somador.....	4
2.2. Multiplicação de uma variável (ou constante) por um coeficiente constante.....	6
2.3. Amplificador operacional integrador.....	9
Capítulo II: Uso do Computador PACE TR-48.....	11
1. Descrição Geral.....	11
2. Painel de Programação.....	13
2.1. Remoção e colocação do painel de programação	13
2.2. Balanceamento dos amplificadores.....	13
2.3. Troca de unidades operacionais.....	14
2.4. Unidade amplificador dual d-c.....	15
2.5. Unidade integrador dual.....	16
2.6. Combinação multiplicador-amplificador....	17
2.7. Combinação X ² DFG-amplificador.....	19
2.8. Combinação Log x DFG - amplificador.....	19
2.9. Combinação VDFG - amplificador.....	22
2.10. Acessórios Operacionais.....	24
2.10.1. Comparador de Sinal.....	24
2.10.2. Chaves de funções.....	25
2.10.3. Painel de leitura externa.....	25
2.10.4. Unidade atenuadores-fontes de tensão	26
2.10.5. Unidade Tronco.....	27
3. Painel de Contrôles.....	27
3.1. Considerações operacionais.....	27
3.2. Descrição.....	28
3.2.1. Voltímetro digital.....	28

3.2.2. Voltímetro eletrônico.....	28
3.2.3. Chave FUNCTION.....	29
3.2.4. Selectores de amplificadores e potên ciômetros.....	29
3.2.5. Indicadores de overload.....	29
3.2.6. Chave para operação repetitiva.....	30
3.2.7. Modalidades de contrôles.....	30
Capítulo III: Programação Básica para um Computador Analógico	31
1. Equações do problema.....	31
2. Constantes (parâmetros) do problema.....	32
3. Condições iniciais do problema.....	32
4. Fatores de escala de tempo e escala de ampli tude.....	33
5. Condições iniciais da máquina.....	35
6. Equações da máquina.....	35
7. Diagrama do circuito.....	36
8. Montagem do Circuito no Computador.....	37
9. Soluções do problema.....	38
10. Verificação das soluções.....	39
Capítulo IV: Problemas.....	39
1. Resolução de uma equação diferencial de 2ª or dem.....	39
2. Decaimento do Tório (Reator Indú).....	41
3. Formação do Protoactínio por irradiação.....	45
4. Concentração do Iodo e do Xenon no reator....	48
5. Produção de Plutônio-240 à partir de ^{235}U	51
6. Aplicação de Radioisótopos.....	54
Bibliografia.....	59
Agradecimentos.....	59

OBJETIVO

Este trabalho foi preparado como uma introdução ao uso de calculadores analógicos e destinado aos membros do Instituto de Energia Atômica. A distribuição suscinta e didática dos quatro capítulos, visa facilitar a exposição do conteúdo. Estes capítulos foram desenvolvidos de maneira uniforme e contínua, tendo em vista a formação de pessoal apto a ingressar no Setor de Cálculo Numérico (Analógico) do Instituto de Energia Atômica.

Os capítulos estão assim distribuídos:

Capítulo I: Teoria dos Computadores Analógicos, abrangendo os circuitos básicos da máquina.

Capítulo II: Uso do Computador PACE TR-48, onde é dada uma descrição geral do computador, painel de programação e parte operacional.

Capítulo III: Programação Básica para um Computador Analógico. Seção que trata dos diversos itens de uma programação analógica.

Capítulo IV: Problemas. Diversos problemas são desenvolvidos para melhor familiarização com os circuitos operacionais do computador.

Capítulo I: Teoria dos Computadores Analógicos

1. Introdução.

Um computador analógico é um instrumento eletrônico de cálculo, utilizado para resolver problemas científicos ou de engenharia que envolvam equações ou sistemas de equações diferenciais.

O significado do nome -Computador Analógico- decorre da analogia entre o sistema real e o sistema eletrônico figurado pelo computador, através de uma mudança das variáveis matemáticas em variáveis da máquina, que são: voltagens e tempo. Essa analogia resulta de, realmente, no computador, representar-se o problema em questão através de um circuito elétrico em que entram as variáveis acima referidas, sendo as equações diferenciais que governam a evolução do sistema matemático, as mesmas equações diferenciais que governam a evolução do sistema eletrônico.

O intervalo útil de voltagem da variável do Computador Analógico PACE TR-48, é limitado pelo intervalo -10 à $+10$ volts. Este intervalo é bem definido, uma vez que o calculador é totalmente transistorizado; e que voltagens acima das mencionadas, podem saturar ou danificar os amplificadores, isto é, saem da região linear de operação e em decorrência disto, as soluções do problema ficam afetadas de erros difíceis de analisar e corrigir.

Hoje em dia, os computadores analógicos são utilizados com uma exatidão de 0.01%. Já os computadores digitais, podem ser programados para fornecer uma exatidão muito maior, porém os analógicos continuam a dominar em certas aplicações. Estes dois tipos de computadores, diferem em muitos pontos, sendo o mais importante, o seguinte: as máquinas analógicas podem realizar operações contínuas de "diferenciação" e integração, ao passo que, para um processamento digital, tais operações carecem de uma aproximação por diferenças finitas.

Em engenharia de reatores, os problemas seguintes, são frequentemente resolvidos por meio de computadores analógicos: 1) avimento automático das barras de controle; 2) estabilidade de reatores de potência; 3) estudo da reatividade e evolução do combustível; 4) dinâmica de transferência de calor e sistemas de refrigeração; 5) cinemática de reatores, etc.

O computador analógico é um arranjo de circuitos específicos, os quais podem realizar operações básicas da matemática. O número de operações que o computador pode fazer, é limitado pelo grau para os quais os circuitos são designados.

A solução do problema, pode ser obtida através do voltímetro eletrônico, voltímetro digital, registradores ou mesmo pelo osciloscópio.

2. Amplificadores operacionais.

O componente básico de um computador analógico é o amplificador d-c (direct-coupled) de alto ganho. Este amplificador é esquematizado pelo símbolo apresentado na figura 1, onde e_i (tensão de entrada) e e_o (tensão de saída), são medidas em relação à terra (potencial zero)

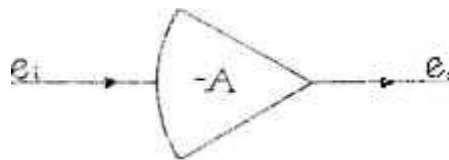


Figura 1
Amplificador d-c de alto ganho

O amplificador de alto ganho é um amplificador eletrônico com um número ímpar de estágios, de sorte que a tensão de saída e_o , tem polaridade oposta à tensão de entrada e_i . O amplificador está estabilizado (balanceado), quando para $e_i = 0$ volt, tem-se $e_o = 0$ volt.

Desta forma, podemos definir ganho de um amplificador: representando-se por A o ganho de um amplificador, tem-se:

$$A = - \frac{e_o}{e_i} \quad \text{Eq. (2.1)}$$

Nota: O ganho, em circuito aberto, do computador analógico PACE TR-48 é de 3×10^7 .

Se em série e em paralelo com um amplificador de alto ganho são conectadas impedâncias, êle se transforma num amplificador operacional. A figura 2 ilustra o diagrama de um amplificador operacional. Pela escolha conveniente destas impedâncias, o amplificador pode realizar as seguintes operações:

- a) adição e subtração;
- b) multiplicação por uma constante;
- c) integração;
- d) diferenciação (não é recomendada, devido à presença de ruídos inevitáveis no amplificador);
- e) combinações das operações acima

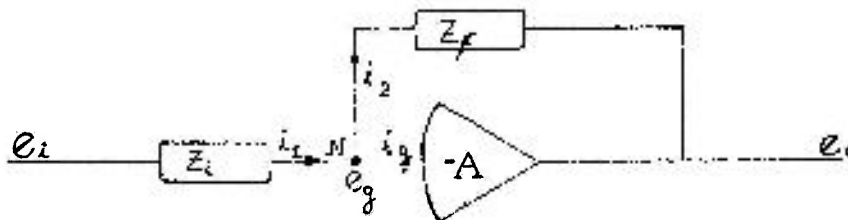


Figura 2
Amplificador operacional

Sabe-se pela equação 2.1, que: $e_g = \frac{e_o}{-A}$

onde $\begin{cases} e_o = \pm 10 \text{ volts} \\ -A = 3 \times 10^7 \end{cases}$

portanto, $e_g \approx 0$ volt, e por conseguinte $i_g \approx 0$.

Da figura 2, pode-se escrever as seguintes equações:

$$i_1 = i_2 \quad \text{Eq. (2.2)}$$

$$i_1 = \frac{e_i - e_g}{Z_i} \quad \text{Eq. (2.3)}$$

$$i_2 = \frac{e_g - e_o}{Z_f} \quad \text{Eq. (2.4)}$$

$$e_o = -A e_g \quad \text{Eq. (2.5)}$$

Das Eqs. (2.2) à (2.4), tem-se:

$$\frac{e_i - e_g}{Z_i} = \frac{e_g - e_o}{Z_f} \quad \text{Eq. (2.6)}$$

Substituindo a Eq. (2.5) na Eq. (2.6):

$$\frac{e_i + \frac{e_o}{A}}{Z_i} = - \frac{\frac{e_o}{A} + e_o}{Z_f} \quad \text{Eq. (2.7)}$$

Simplificando a Eq. (2.7), vem:

$$\frac{e_o}{e_i} = - \frac{A Z_f}{Z_f + Z_i + A Z_i} \quad \text{Eq. (2.8)}$$

Multiplicando numerador e denominador por $1/A$ e fatorando do Z_i no denominador, tem-se:

$$\frac{e_o}{e_i} = - \frac{Z_f}{Z_i} \frac{1}{1 + \frac{1}{A} \left(\frac{Z_f}{Z_i} + 1 \right)} \quad \text{Eq. (2.9)}$$

Se A é suficientemente grande, uma boa aproximação da Eq. (2.9) é:

$$\frac{e_o}{e_i} = - \frac{Z_f}{Z_i} \quad \text{Eq. (2.10)}$$

2.1. Amplificador operacional somador:

Imaginemos que se deseja efetuar a adição de três quantidades que serão representadas pelas tensões e_1 , e_2 e e_3 . Então conectamos à entrada do amplificador, estas tensões através das impedâncias de entrada, que neste caso, são resistências de mesmo valor. A impedância em paralelo é uma resistência de realimentação de valor idêntico às primeiras. Teremos o seguinte sistema apresentado pela figura 3. Sabe-se da Eq. (2.5) que $e_g \approx 0$ volt. Então, para $t < 0$, a chave H permanece fechada (computador desligado) e a resistência de realimentação é nula, e a tensão de saída $e_o = 0$ volt.

A partir de um tempo $t = 0$, origem do problema, abre-se a chave H e obtém-se a seguinte relação dada pela Lei de Kirchof aplicada ao nó N:

$$i_1 + i_2 + i_3 + i + i_g = 0 \quad \text{Eq. (2.11)}$$

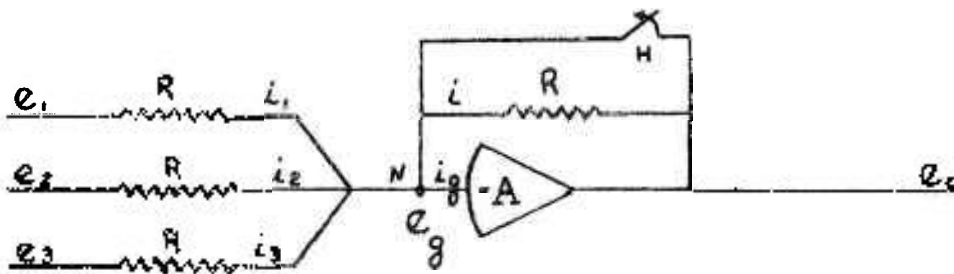


Figura 3
Amplificador operacional somador

$$\text{mas: } i_1 = \frac{e_1 - e_g}{R} ; i_2 = \frac{e_2 - e_g}{R} ; i_3 = \frac{e_3 - e_g}{R} \text{ e } i = \frac{e_0 - e_g}{R}$$

Levando estas considerações na Eq. (2.11) e lembrando que $e_g \approx i_g \approx 0$, tem-se:

$$\frac{e_1}{R} + \frac{e_2}{R} + \frac{e_3}{R} + \frac{e_0}{R} = 0 \quad \text{ou}$$

$$e_0 = - (e_1 + e_2 + e_3) \quad \text{Eq. (2.12)}$$

Dêste modo, o amplificador executa a operação de so ma algébrica, invertendo o sinal do resultado.

O símbolo apresentado na figura 4, é usado esquemati camente para representar a operação acima descrita.

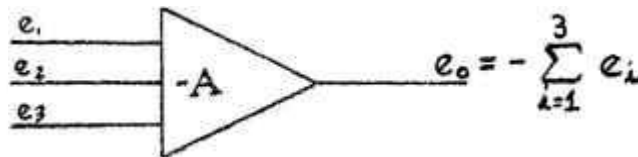
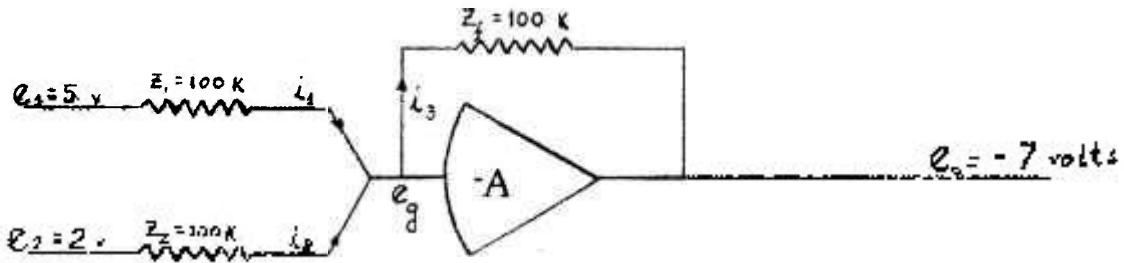


Figura 4
Símbolo para o amplificador operacional somador

Exercício utilizando um amplificador somador:

Verificar no computador, a soma de duas tensões, por exemplo: $e_1 = 5$ volts e $e_2 = 2$ volts.



Para se realizar este exercício, mede-se as duas tensões através do voltímetro e liga-se à entrada do amplificador, por meio das resistências de entrada (100 K).

Seleciona-se o amplificador de saída e pressiona-se o botão OP (operate). Deverá ser assinalado na saída uma tensão igual a -7 volts.

Cálculo do erro

Por desenvolvimento análogo ao que se fez para a Eq. (2.9), tem-se que:

$$\text{Eq. (2.13)} \quad e_o = -\frac{Z_f}{Z_1 Z_2} + \frac{e_1 Z_2 + e_2 Z_1}{1 + \frac{1}{A} \left(1 + \frac{Z_f}{Z_2} + \frac{Z_f}{Z_1}\right)}$$

a) para $A \approx \infty$:

$$e_o = -\frac{Z_f}{Z_1 Z_2} (e_1 Z_2 + e_2 Z_1)$$

substituindo-se os valores dados, tem-se:

$$e_o = -7 \text{ volts}$$

b) para $A = 3 \times 10^7$:

$$e_o = 6.9999993 \text{ volts}$$

2.2. Multiplicação de uma variável (ou constante) por um coeficiente constante :

Seja o circuito apresentado na figura 5:

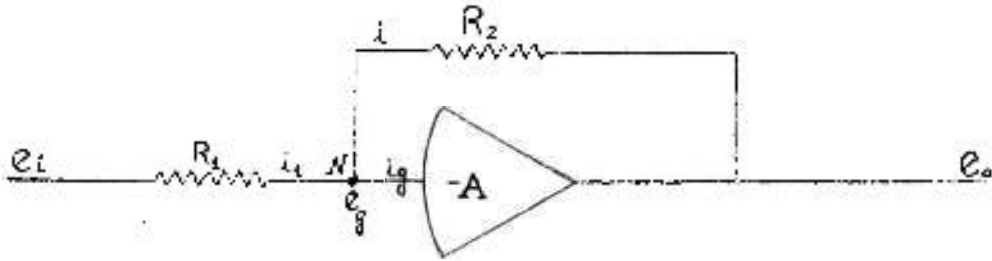


Figura 5
Amplificador operacional multiplicador

temos: Do circuito acima e pelo que foi visto anteriormente,

$$\frac{e_i}{R_1} + \frac{e_o}{R_2} = 0 \quad \text{ou}$$

$$e_o = - \frac{R_2}{R_1} e_i = -K e_i \quad \text{Eq. (2.14)}$$

com $K = \frac{R_2}{R_1}$

Pela escolha conveniente das resistências R_1 e R_2 , obtemos coeficientes de multiplicação limitados apenas pelas resistências disponíveis do computador.

Por outro lado, podemos obter coeficientes de multiplicação de variação contínua entre 0 e 1, através do conjunto de potenciômetros. A figura 6, ilustra o funcionamento de um potenciômetro:

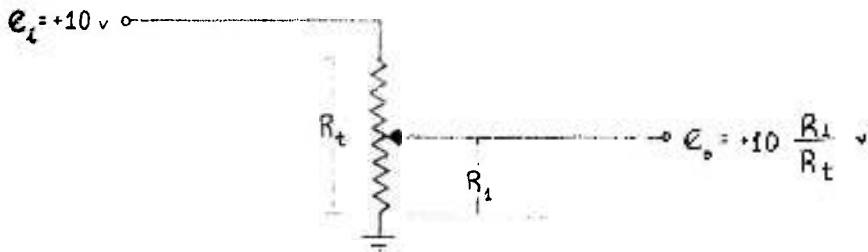


Figura 6
Esquema de um potenciômetro

Nota: Um potenciômetro opera como um divisor de tensão.

O símbolo da operação de multiplicação, utilizando amplificador, é apresentado na figura 7, enquanto que o do potenciômetro, é dado na figura 8:

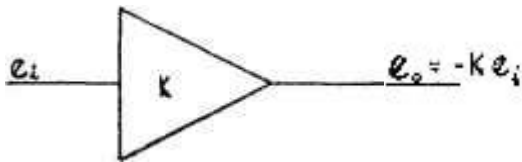


Figura 7



Com $C = \frac{R_1}{R_t}$

Figura 8

Símbolo da multiplicação por um coeficiente constante

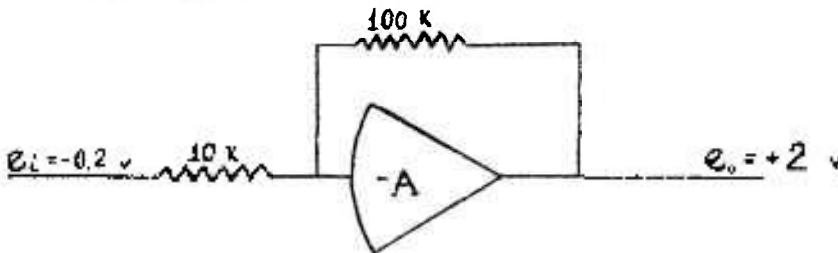
Exercício de multiplicação por uma constante:

Multiplicar - 0.2 volt por 10.

Para se obter o fator constante 10, usa-se uma resistência de 100 K em paralelo com o amplificador e uma de 10 K em série, pois:

$$e_o = - \frac{R_2}{R_1} e_i \quad , \quad \text{então:}$$

$$e_o = - \frac{100 \text{ K}}{10 \text{ K}} \times (-0.2 \text{ volt}) = - (10) \times (-0.2) = + 2 \text{ volts}$$



Inversão de Sinal:

Ainda neste ítem 2.2., podemos considerar o seguinte circuito apresentado na figura 9 :

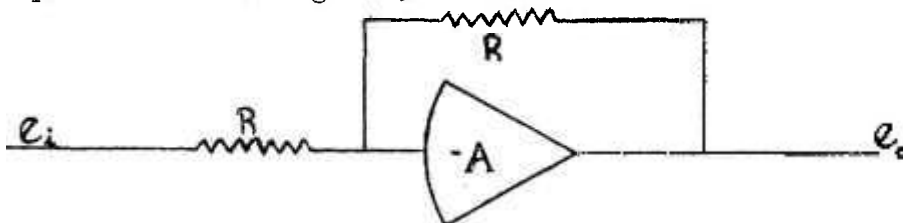


Figura 9
Amplificador operacional inversor

Neste caso, tem-se:

$$e_o = -\frac{R}{R} e_i \quad \text{ou} \quad e_o = -e_i \quad \text{Eq. (2.15)}$$

Esquemáticamente, representa-se o circuito acima, como se segue:



Figura 10
Símbolo do amplificador operacional inversor

2.3. Amplificador operacional integrador:

Quando a impedância em paralelo com o amplificador é um condensador, o amplificador operacional transforma-se num integrador, conforme o circuito apresentado na figura 11:

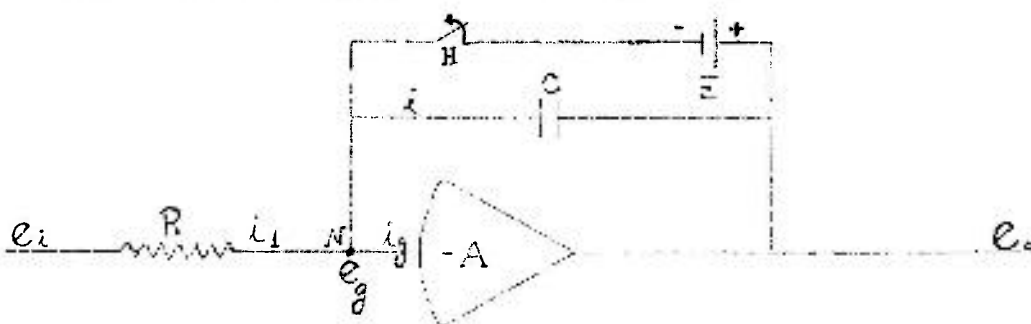


Figura 11
Amplificador operacional integrador

Para $t < 0$, a chave H permanece fechada e a bateria E carrega o condensador C e teremos:

$$\begin{aligned} (e_o) &= e_g + E, \quad \text{mas como } e_g \approx 0, \quad \text{tem-se:} \\ (e_o) &= E \quad \text{Eq. (2.16)} \end{aligned}$$

Para um certo tempo $t = 0$, abre-se a chave H (liga-se o computador) e teremos a seguinte relação no nó N:

$$\begin{aligned} i_1 + i &= 0 \quad \text{Eq. (2.17)} \\ \text{mas: } i_1 &= \frac{e_i}{R} \quad \text{e} \quad i = C \frac{de_o}{dt} \end{aligned}$$

pois:
$$\left. \begin{aligned} dq &= i dt \\ dq &= C de \end{aligned} \right\} i dt = C de \longrightarrow i = C \frac{de}{dt}$$

Substituindo-se na Eq. (2.17), vem :

$$\frac{e_i}{R} + C \frac{de_o}{dt} = 0$$

Resolvendo-se esta equação, temos:

$$de_o = - \frac{1}{RC} e_i dt : \text{integrando entre } 0 \text{ e } t :$$

$$e_o - (e_o)_- = - \frac{1}{RC} \int_0^t e_i dt$$

ou levando-se em conta a Eq. (2.16):

$$e_o = - \frac{1}{RC} \int_0^t e_i dt + E \quad \text{Eq. (2.18)}$$

A quantidade E é a constante de integração, que é denominada no uso de integradores, de condição inicial do circuito integrador.

Pela escolha conveniente do RC, podemos realizar uma integração mais rápida ou mais lenta. Em geral, usa-se $RC = 1$ segundo. Com isto, a Eq. (2.18) se transforma em:

$$e_o = - \int_0^t e_i dt \quad \text{Eq. (2.19)}$$

Simbolicamente, o circuito integrador é representado na figura 12:

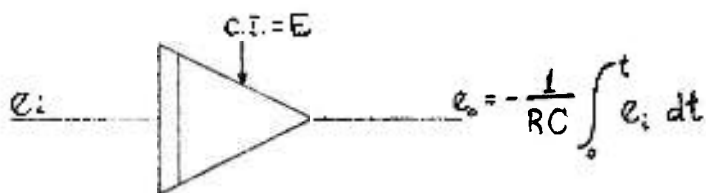
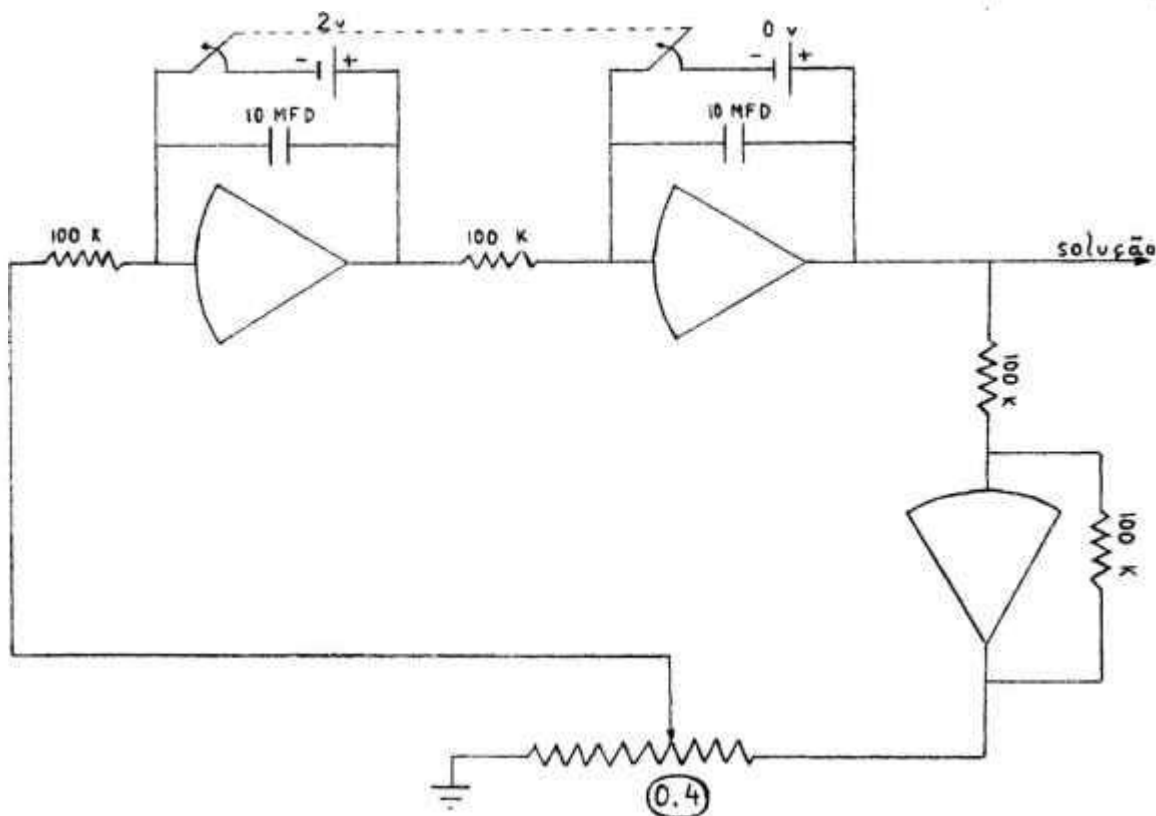


Figura 12
 Símbolo de um amplificador operacional integrador

Exercício utilizando circuito integrador :

Verificar o funcionamento do circuito integrador abai

xo:



Nota: Analisar a solução obtida.

Capítulo II: Uso do Computador PACE TR-48

1. Descrição Geral:

O Computador Analógico PACE TR-48 é um corpo sólido, de finalidade geral, armazenado em um gabinete prático que pode ser instalado em um laboratório de cálculo, sem grandes dificuldades. O gabinete é composto de três seções, onde são alojados seus diversos componentes de cálculo, controles de operação e monitoração e power supplies.

O TR-48 contém espaço para 48 amplificadores (24 unidades duplas), 60 atenuadores (potenciômetros), componentes para gerar funções não lineares, e multiplicadores eletrônicos; sendo que estes dois tipos de unidades são bem flexíveis.

A parte central do TR-48 contém as unidades básicas de cálculo e as unidades flexíveis acima referidas. Todas as terminações destes circuitos se encontram na parte frontal da unidade central (painel de programação).

A seção da esquerda, contém os circuitos de controle e monitoração do TR-48. Esta parte inclui um voltímetro digital com lugar para 4 dígitos, um voltímetro eletrônico, um conjunto de chaves seletoras para leituras de entrada e saída, um indicador de overload para os amplificadores, uma chave para prender e desprender o painel de programação e os controles de modalidade do computador, incluindo, também, a chave de ligar - desligar o computador.

Na parte à direita, encontra-se um conjunto de 60 potenciômetros que tanto servem para atenuar o sinal de entrada nos amplificadores, como servem para leituras de condição inicial para integradores, e cinco chaves de função.

Os dados técnicos do TR-48 podem ser agrupados do seguinte modo:

- a) Tipo de computador: analógico D-C.
- b) Número de componentes: o gabinete dispõe de 60 alojamentos, onde são colocadas as unidades de operação, cada uma delas com ligações elétricas específicas para determinado fim.
- c) Sistema de referência: \pm 10 volts (requerido para os componentes operacionais)
- d) Referências para potência do primário: 115 ou 230 volts, 50 ou 60 ciclos. O computador totalmente carregado com seus componentes, dissipa 150 watts.
- e) A temperatura ambiente onde o computador está instalado (operando) não deve ultrapassar de 22°C. Os dados físicos são:

Largura	46 - 1/2 polegadas
Altura	24 polegadas
Fundo	20 polegadas
Pêso (todo carregado)	320 libras

2. Painel de programação:

O computador PACE TR-48, instalado no Setor de Cálculo Numérico (Digital e Analógico) da Divisão de Física de Reatores do IEA, possui dois painéis de programação perfeitamente idênticos, com a finalidade de facilitar ao programador a montagem dos circuitos elétricos destinados a resolução de um problema genérico. Contêm êstes painéis o esquema dos seguintes blocos de unidades:

- a) 48 amplificadores operacionais (24 unidades duais);
- b) 16 integradores (8 unidades duais);
- c) 5 multiplicadores de função;
- d) 3 VDFG (geradores de função de base variável);
- e) 1 x^2 DFG (gerador de função x^2);
- f) 1 Log x DFG (gerador de função $\log x$);
- g) 12 unidades atenuadores-fontes de tensão;
- h) 1 bloco destinado a selecionar o tipo de saída das soluções;
- i) 1 bloco destinado às chaves de função;
- j) 4 comparadores de sinal (2 unidades duais);
- k) 2 unidades de linha tronco.

2.1. Remoção e colocação do painel de programação

O circuito elétrico destinado à resolução de um problema específico, deve ser montado no painel de programação, sendo que esta operação de montagem deve, de preferência, ser realizada fora da posição de cálculo. Para isso, remove-se o painel de programação, seguindo as seguintes instruções: o computador estando ligado, coloque-o na modalidade Pot-Set (apertando o botão PS do painel de controle); a seguir, segure o painel de programação e pressione a chave desengate - engate na posição desengate, até que o relay desligue o motor de remoção do painel. Uma vez desligado o motor, o painel fica livre para ser removido.

Para colocação, coloque o painel no trilho inferior da parte central, comprimindo-o levemente, para que êle se ajuste perfeitamente no seu lugar; pressione a chave engate, até que o relay desligue o motor. A colocação do painel de programação, deve ser realizada, também, na modalidade Pot-Set.

2.2. Balanceamento dos amplificadores

Balancear um amplificador, significa que para uma tensão nula de entrada, devemos ter uma tensão nula de saída no amplificador.

Os amplificadores operacionais d-c do TR-48, são bastante estáveis, com a finalidade de prevenir resultados errados na computação. Normalmente, não requerem balanceamento por vários meses. Entretanto, quando houver necessidade, o ajuste poderá ser feito, procedendo-se do seguinte modo:

- a) coloque o switch FUNCTION na posição BAL e aperte o botão PS;
- b) usando as chaves seletoras no painel de controle, selecione cada amplificador desde A00 à A49. O ponteiro do voltímetro não deve acusar deflexão do zero, para cada amplificador selecionado;
- c) se qualquer amplificador registrar uma deflexão para um lado ou outro do zero do voltímetro, ajuste o controle de balanceamento correspondente. Os controles de balanceamento dos amplificadores A00 à A47, encontram-se diretamente atrás do painel de programação. Os controles dos amplificadores de referência A48 (referência positiva) e A49 (referência negativa) são localizados atrás da parte onde se acha o conjunto de potenciômetros.

Uma vez realizado o balanceamento de todos os amplificadores, vire a chave FUNCTION para a posição PATCH (posição normal de processamento de cálculos).

2.3. Troca de unidades operacionais

Na solução de um problema típico, pode haver necessidade de se deslocar uma unidade operacional de uma posição à outra. Isto poderá ser feito, seguindo as instruções abaixo:

- a) consulte a tabela do Manual de Operação, figura 2.2-5 (TR-48 Analog Computer), verificando se pode ser feita a troca;
- b) uma vez sendo possível a permuta, remova o painel de programação;
- c) solte os parafusos que prendem a unidade e puxe, com cuidado, utilizando a ferramenta apropriada (peça em forma de U);
- d) efetue a troca das unidades, e preocupe-se em trocar, também, o esquema correspondente no painel de programação;

e) coloque as unidades nos lugares desejados e permitidos e aperte os respectivos parafusos de fixação.

2.4. Unidade Amplificador dual d-c

A teoria correspondente ao amplificador operacional de alto ganho, foi descrita no Capítulo I, razão porque neste ítem só apresentaremos a unidade amplificadora do TR-48 (figura 13) e algumas operações que podem ser realizadas com o emprêgo desta unidade.

Nota: SJ significa "Summing junction"; B significa entrada do amplificador; O indica a saída e 1 e 10 significam resistências de 100 K e 10 K, respectivamente.

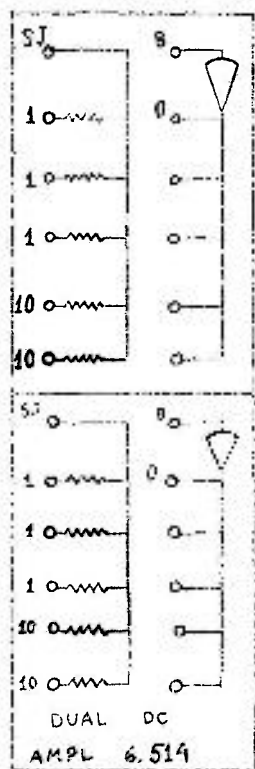


Figura 13

Bloco amplificador d-c operacional

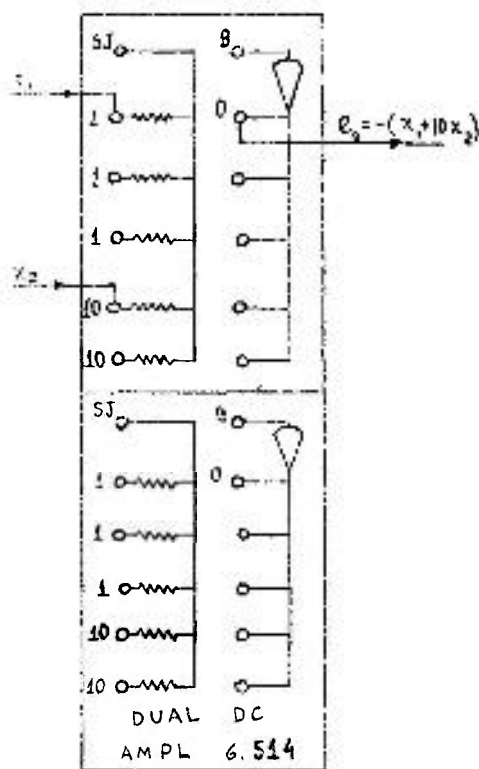


Figura 14

Amplificador operacional somador

Uma das operações que podem ser realizadas com o amplificador operacional, é a soma algébrica que é ilustrada na figura 14. Um plug de 4 pinos é colocado na parte superior do bloco amplificador, entreligando os pontos SJ com B e 1 com O, fazendo com isso que a resistência de 100 K fique em paralelo com o amplificador. Aplicam-se as tensões de entrada, através das resistências em série com o amplificador e obtém-se a saída em O (output).

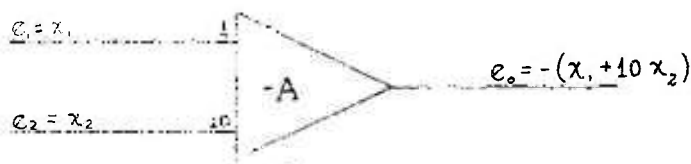


Figura 15- Símbolo esquemático de um amplificador somador

Uma outra operação que pode ser realizada com o emprego do amplificador, é a inversão apresentada na figura 16 (só está sendo apresentado metade do amplificador dual):

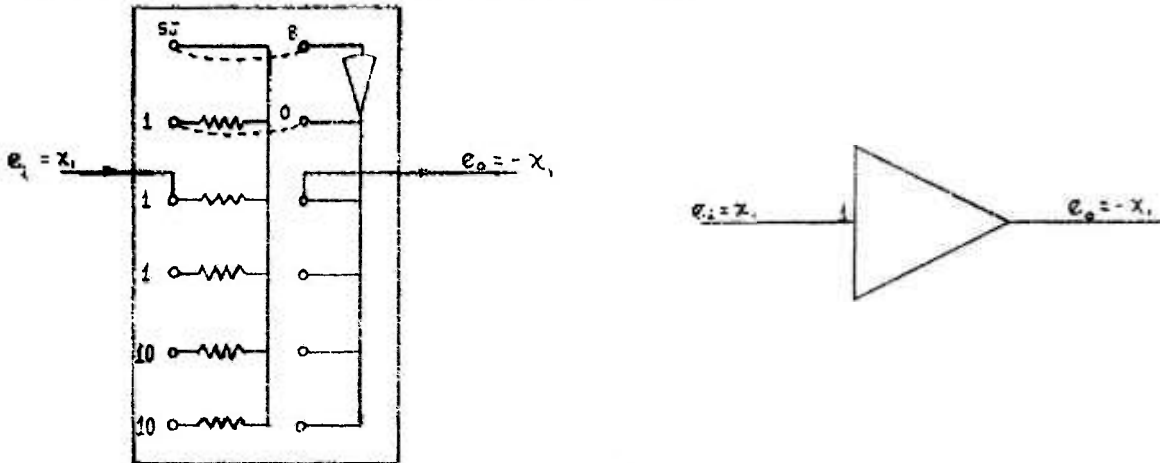


Figura 16
Bloco e símbolo esquemático de um inversor

2.5. Unidade Integrador dual

Esta unidade é usada sempre acoplada ao amplificador operacional através de um plug T com 6 pinos. Este plug interliga o B do amplificador com o B do integrador, o SJ com o SJ e O com O, respectivamente.

A figura 17 ilustra o bloco integrador dual e a figura 18, o integrador acoplado ao amplificador, como é usado em circuitos integradores.

Um integrador dual possui essencialmente 7 áreas separadas, sendo que as em branco, representam os dois integradores, e as achuriadas, representam condições de operação dos integradores.

A terminação IC é utilizada para se introduzir a condição inicial do integrador. O input IC deverá ser menor ou no máximo igual ao módulo de 10 volts, e de polaridade oposta à desejada no problema.

A terminação SJ' é ligada ao summing junction integrador quando a unidade está na modalidade Reset (botão RS do painel de controle). Se se desejar, o amplificador pode ser usado para multiplicar o valor total da voltagem IC por uma constante, ligando-se um resistor de entrada na terminação SJ', de valor adequado.

As áreas diretamente abaixo da zona branca, têm um par de terminações designadas por 0.1β. Para uma operação de integração de escala de tempo normal, as terminações 0.1 devem ser ligadas entre si por meio de um plug de 2 pinos. Para uma integração 10 vezes mais rápida, este plug deve ser deslocado para a área designada por NORMAL.

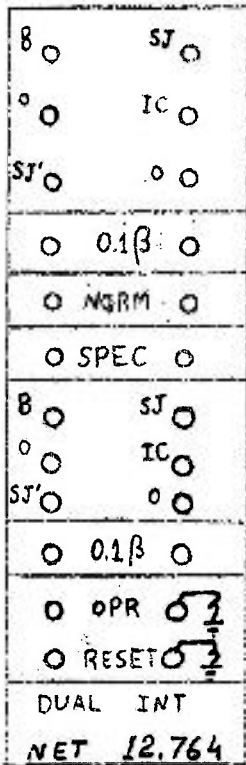


Figura 17

Bloco Dual-Integrador

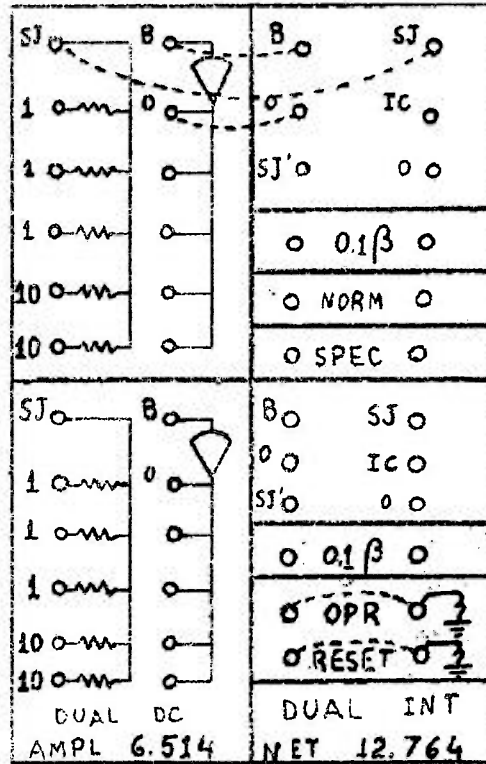


Figura 18

Unidade Amplificador-Integrador

A área designada por SPEC só é utilizada quando o computador está em modalidade RO (operação repetitiva).

Para maior flexibilidade da unidade dual-integrador, os relays operate (OP) e reset (RS) bem como os "buses" OP e RS têm terminações nesta unidade. Estes circuitos se encontram na parte inferior da unidade em estudo. Para integração normal, um plug de 4 pinos é colocado nesta área, como ilustra a figura 18.

O capacitor em paralelo com o amplificador, em operação normal, é de 10MFD.

2.6. Combinação multiplicador - amplificador

O multiplicador do TR-48 utiliza, na multiplicação de duas variáveis X e Y, a técnica do um quarto da diferença dos quadrados da soma e diferença entre as duas variáveis, isto é:

$$XY = \frac{1}{4} \left[(X + Y)^2 - (X - Y)^2 \right] \quad \text{Eq. (3.1)}$$

Quando o multiplicador do um quarto do quadrado é usado como impedância de entrada de um amplificador d-c de alto ganho, o

circuito resultante é capaz de realizar multiplicação ou elevar ao quadrado o valor da variável de entrada. Quando usado como impedância de "feedback" (realimentação), o conjunto é capaz de realizar divisão ou extrair raiz quadrada do valor da variável de entrada.

Na prática, para se efetuar uma multiplicação ou divisão, coloca-se um plug de 4 pinos na área achuriada $\square V$; para se realizar uma operação de se elevar ao quadrado ou extrair raiz quadrada, desloca-se o plug de 4 pinos para a área MD.

A figura 19 ilustra o procedimento prático e esquemático no "patch panel" de uma multiplicação de duas variáveis X e Y. Note que a saída é dada por $-\frac{XY}{10} \cdot 0 + X$ e $-X$ ou $+Y$ e $-Y$ podem ser intercambiados para produzir $+\frac{XY}{10}$.

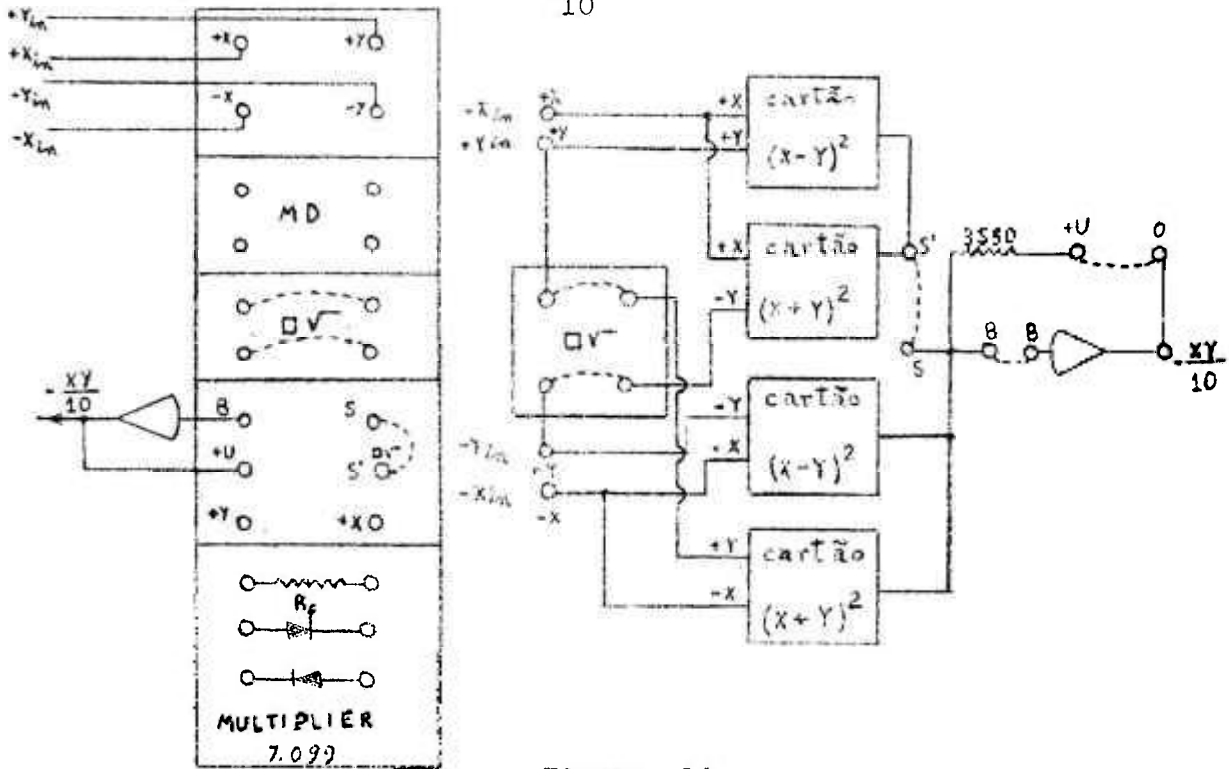


Figura 19

Bloco de multiplicação e esquema simplificado

Antes de passarmos à prática da divisão, as restrições abaixo devem ser observadas:

- a) o valor absoluto do divisor X tem sempre que ser maior ou igual ao valor absoluto do dividendo U, isto é, $U/X \leq 1.0$;
- b) o divisor X não pode ser trocado de sinal durante a operação;
- c) o divisor X nunca pode ser igual a zero.

A figura 20 mostra o esquema simplificado de uma divisão usando o multiplicador de um quarto do quadrado.

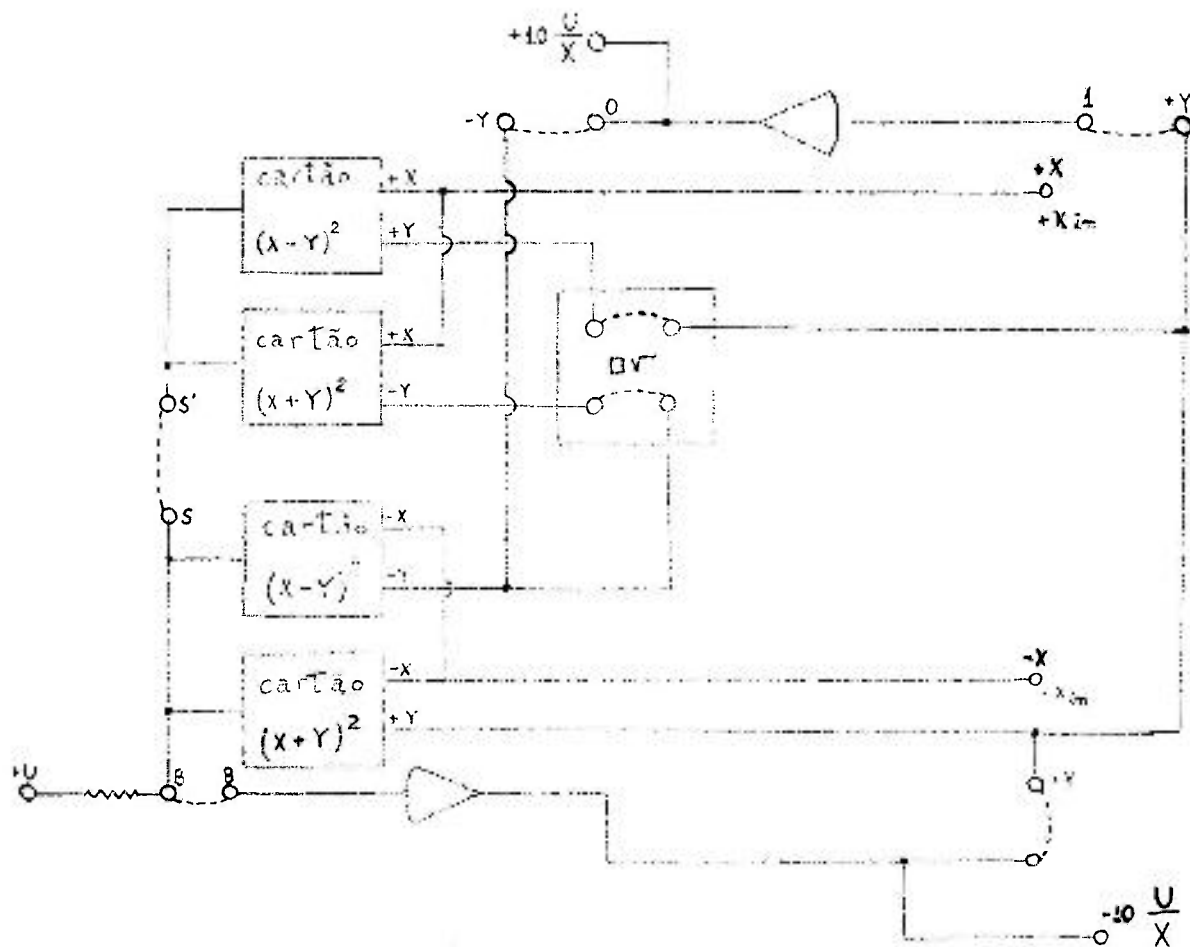


Figura 20 - Esquema Simplificado da divisão

2.7. Combinação X^2 DFG - amplificador

O gerador da função X^2 do TR-48 recebe tensões de entrada, positiva ou negativa, para gerar as funções $+X^2$ ou $-X^2$ de saída, respectivamente. Para gerar a função $+X^2$, um plug de 4 pinos é colocado na área $-(X^2/10)$. Para se determinar a função $-(X^2/10)$, o plug é deslocado para a área superior assinalada por $+(X^2/10)$.

A figura 21.a e 21.b, ilustram tal procedimento.

2.8. Combinação Log X DFG - amplificador

O gerador da função $\log_{10} x$ do TR-48, tem quatro geradores individuais da função logarítmica, todos eles tendo terminações independentes no painel de programação. Dois deles recebem somente voltagens positivas de entrada e os outros dois, somente voltagens negativas. A saída dos geradores é dada em logaritmo decimal, isto é, $5 \log_{10} [10 |X|]$.

A figura 22 ilustra o procedimento prático e o esquema simplificado do gerador da função logarítmica:

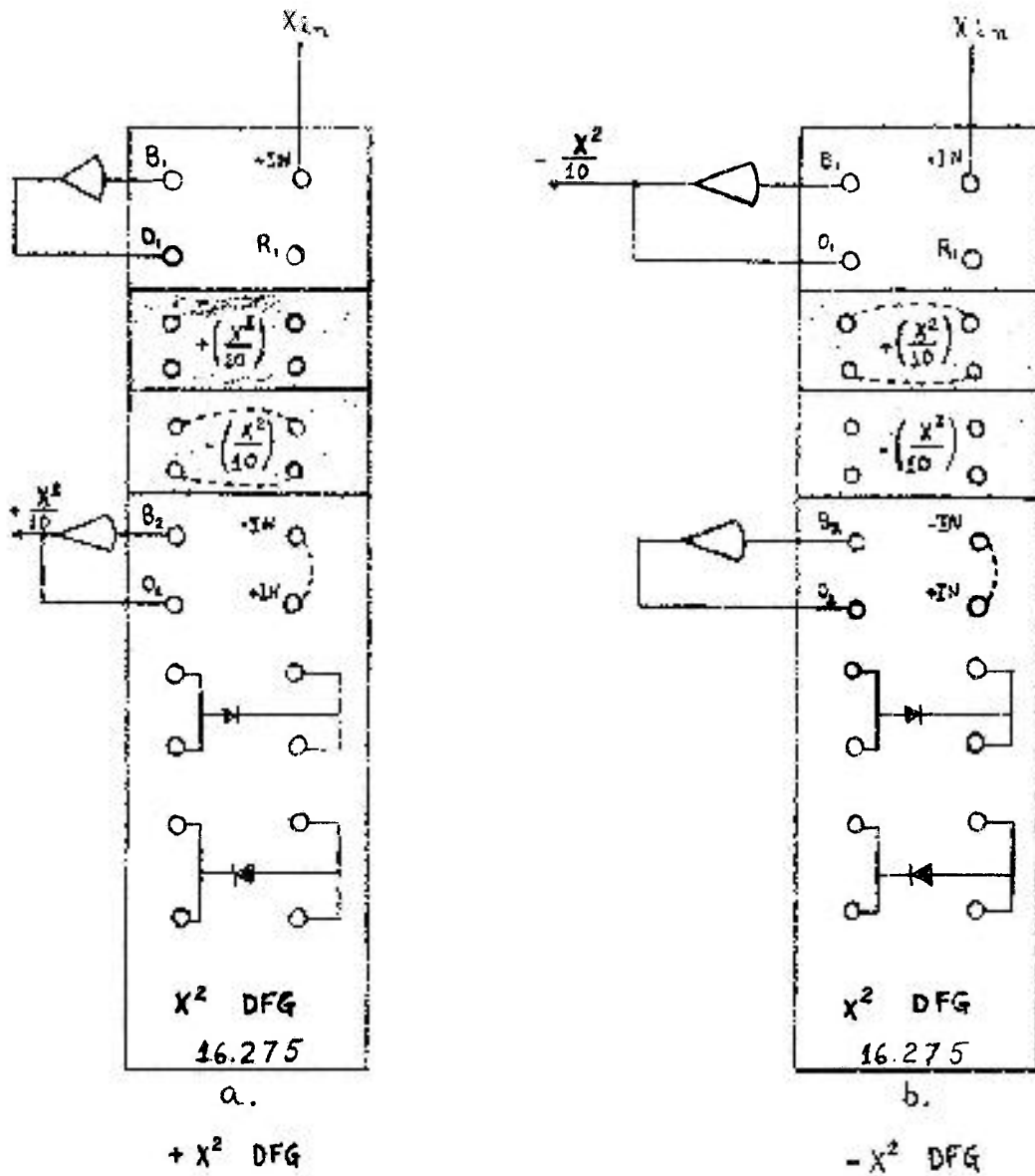


Figura 21
Bloco do gerador da função X^2 de diodo

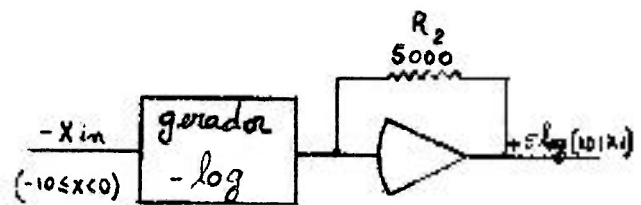
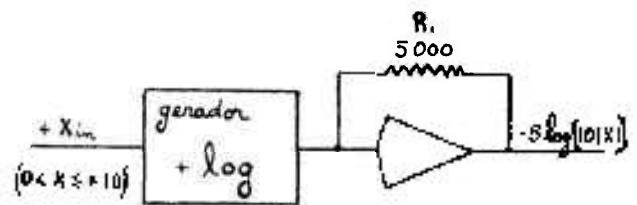
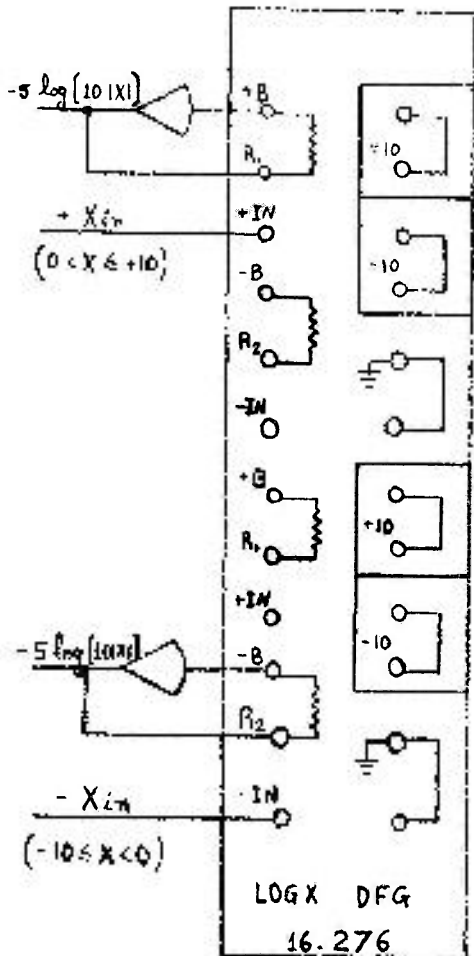


Figura 22
 Bloco e esquema simplificado do gerador da função $\log X$

O gerador da função $\frac{1}{2} \log X$, tem teoria análoga ao gerador da função $\log X$. A única diferença é que na saída tem-se: $2.5 \log_{10} \left(10 \left| x \right| \right)$.

2.9. Combinação VDFG - amplificador

O gerador de função de base variável (VDFG), permite que o operador gere uma função, cujo desenvolvimento é complexo e extremamente difícil por meio de outros componentes do computador.

Frequentemente em um problema, a dependência de uma quantidade X, é conhecida somente através de dados obtidos experimentalmente, e muitas vezes só se conhece alguns pontos desta interdependência. O VDFG é provido de um simples componente que aproxima e gera uma função contínua deste tipo, por meio de segmentos de linha reta, onde somente a inclinação (SLOPE) é controlada pelo operador, para que este componente reproduza uma função o mais próximo possível da função verdadeira; as tensões de corte de cada diodo, isto é, o começo de cada segmento, são fixas e valem 0,1,2,3,4,5,6,7,8 e 9 volts.

O VDFG do TR-48 consiste de dois VDFGs: um gerador negativo que responde às voltagens entre -10 e zero volts, e um positivo que varia entre 0 e +10 volts. Estes geradores (negativo e positivo), podem ser usados individualmente ou combinados, sendo que cada um deles possui 10 diodos para controle de slope. Estas unidades se encontram atrás do painel de potenciômetros e têm a mesma configuração eletrônica, com exceção de que um deles tem os diodos em orientação oposta ao outro.

O gerador de função de base variável utiliza a mesma técnica que os geradores $\log X$, $1/2 \log X$ e X^2 , isto é, ele é usado para variar as relações entre Z_{in} e Z_f do amplificador operacional ao qual está conjugado, como uma função de voltagem de entrada, para aproximar a curva por segmentos de linha reta.

Cada unidade tem onze potenciômetros de ajuste: um deles é o controle de paralaxe e os demais, controles de slope.

O potenciômetro de paralaxe, permite ao operador combinar o valor de Y (para $X=0$), dentro do intervalo -10 à +10 volts. O ajuste do slope +1 permite ao operador combinar a inclinação do 1º segmento entre 0 e +1 volt. Os demais potenciômetros de slope (2 ao 10), permitem mudar a inclinação de cada segmento de 1 em 1 volt, sucessivamente.

A figura 23. a, apresenta os VDFGs, sendo usados separadamente, enquanto que a figura 23.b, ilustra-os em uso combinado:

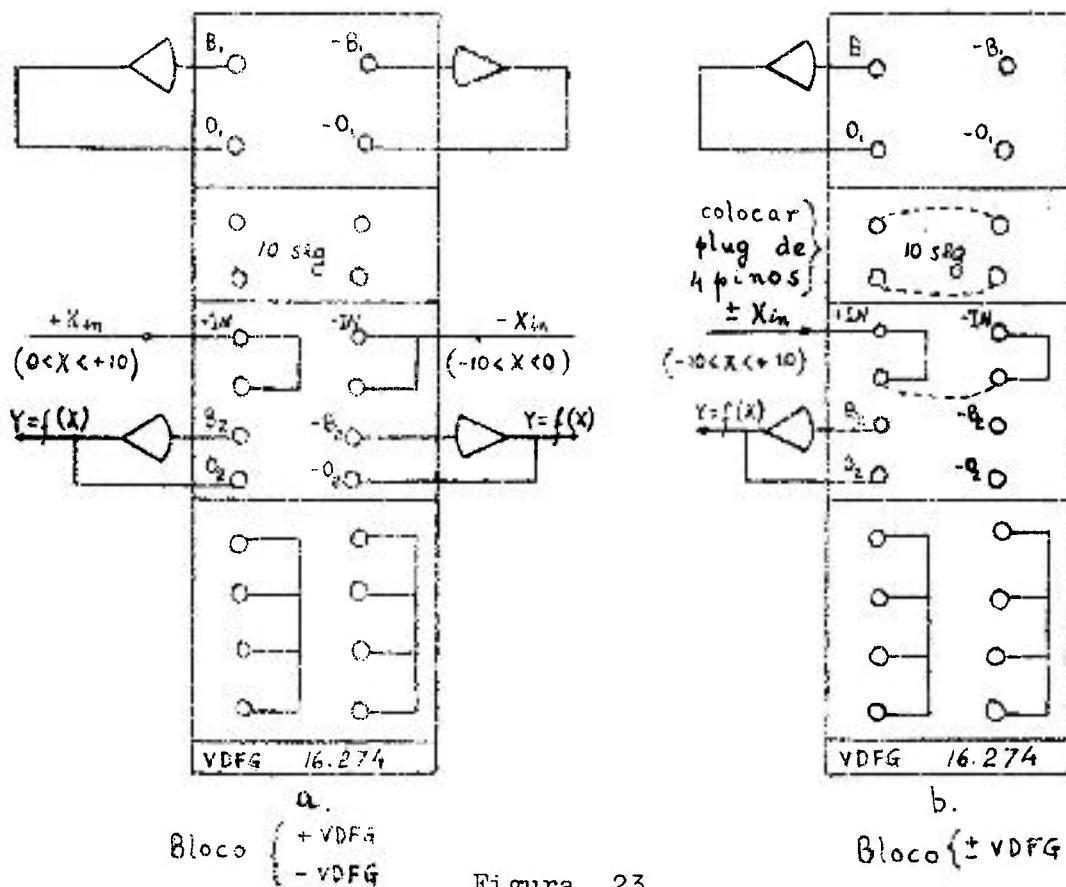


Figura 23

Daremos a seguir, um exemplo típico do uso do + VDFG, que pode ser usado para ilustrar o que ficou acima exposto.

A figura 24, é uma curva de saída do + VDFG. Os ajustes têm que ser iniciados para $X=0$ e continuar em seqüência, até $X= + 10$, conforme a tabela anexa.

Para se obter tal curva, os itens seguintes terão que ser observados:

- a) solte o + VDFG desejado e deslize para fora, até que os potenciômetros de controle fiquem à vista;
- b) selecione o amplificador de saída $Y=f(X)$, para leituras no DVM ou VM;
- c) aterre uma terminação + IN do VDFG. Usando uma chave de fenda pequena, ajuste o parafuso de controle do paralaxe para se ler - 2 volts no DVM;
- d) aplique + 1 volt na terminação + IN e ajuste o controle +1 para se ler no DVM, - 1;

- e) aplique + 2 volts no + IN. Ajuste o contrôlê + 2 para-1;
- f) prossiga aplicando ao + IN, X= + 3, + 4, etc. e ajuste os contrôles equivalentes para os valores de Y, de acôrdo com a tabela abaixo;
- g) para maior precisão, repita os ítens acima, a partir de c), e faça qualquer ajuste se fôr necessário.

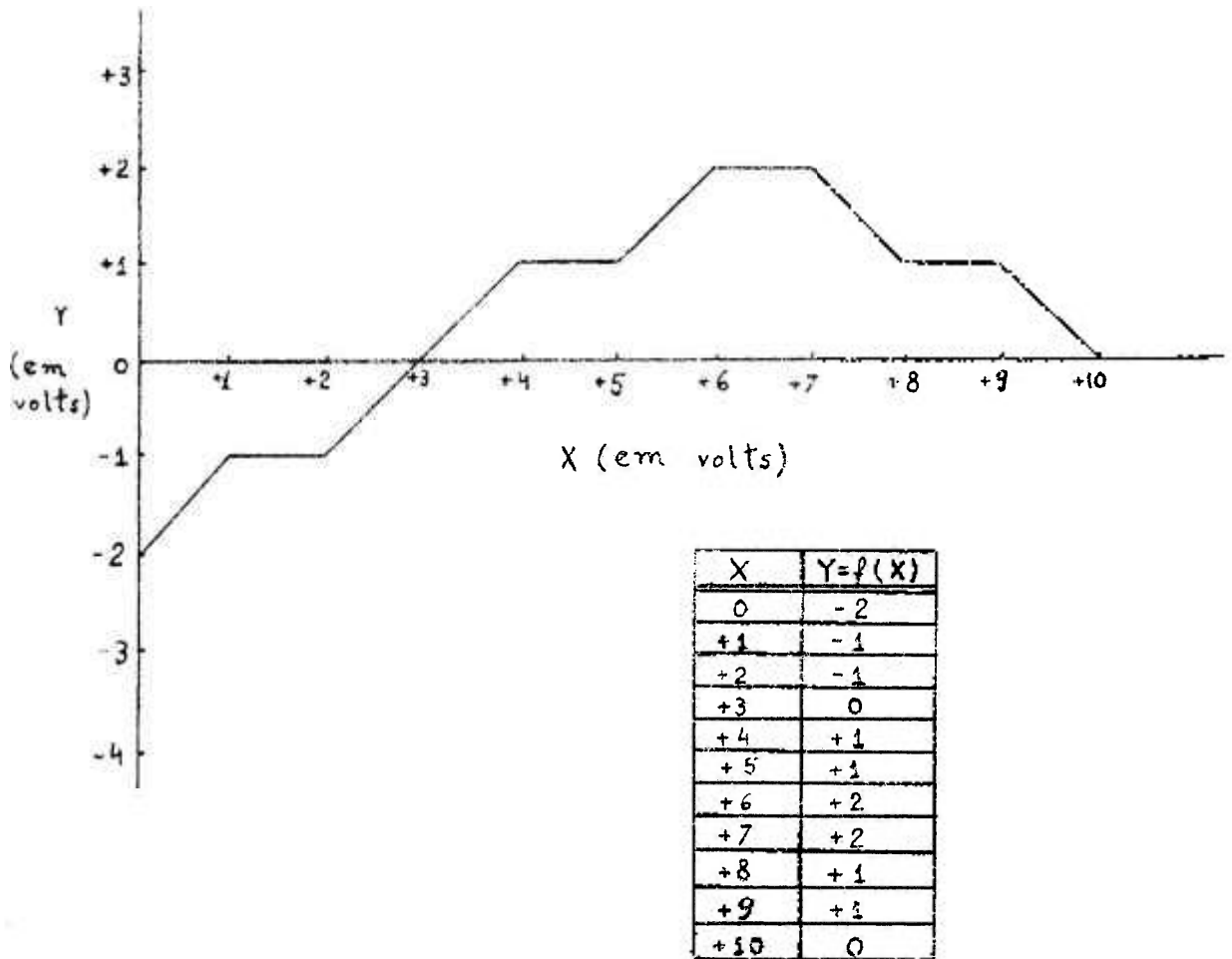


Figura 24 - Amostra do gráfico de curva utilizando o + VDFG

2.10. Acessórios Operacionais.

O TR-48 possui certos componentes, abaixo descritos, que facilitam em muito o processamento de cálculos. São eles:

2.10.1. Comparador de Sinal.

O comparador de sinal é um dispositivo automático, que consiste de um amplificador comparador dotado de dupla polaridade, e um relay de duplo - curso. O amplificador compara duas voltagens de entrada e energiza ou desenergiza o relay, dependendo se a soma das voltagens de entrada é maior que zero (positiva) ou menor que zero (negativa), respectivamente. O bloco comparador é composto de duas unidades isoladas que têm terminações no painel de programação.

A figura 25 ilustra o bloco comparador e o esquema simplificado da unidade quando o relay se encontra desenergizado:

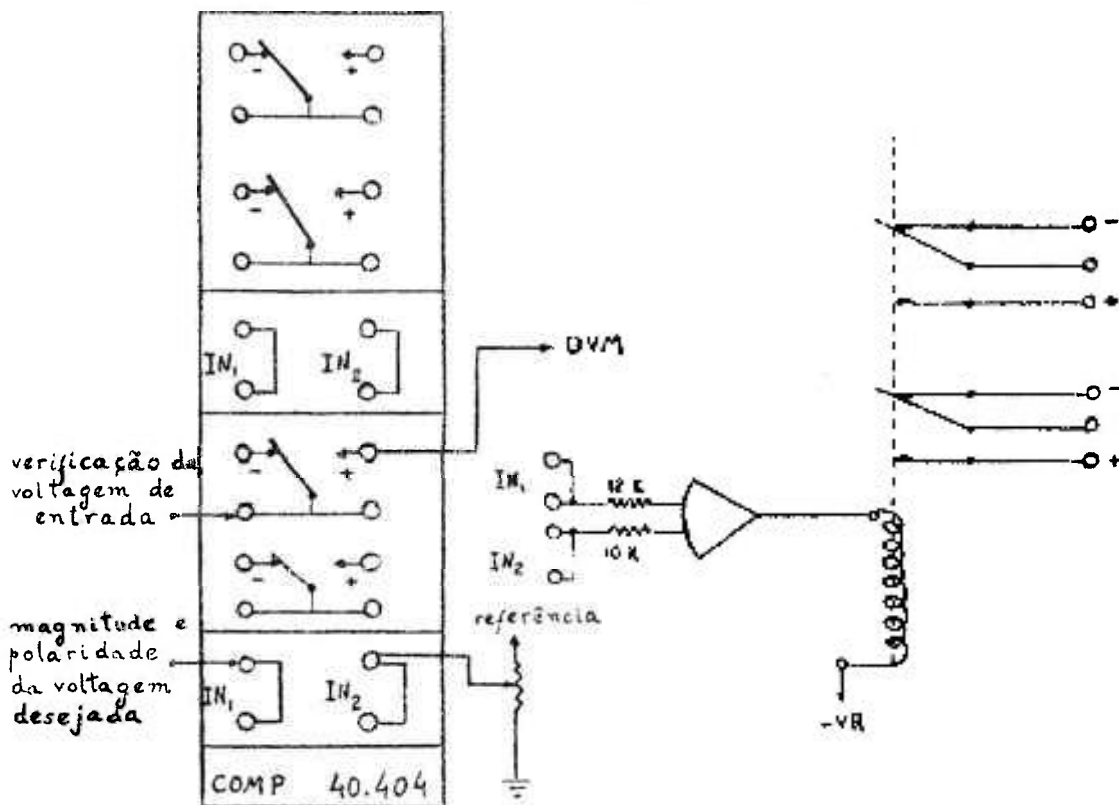


Figura 25
Bloco e símbolo esquemático do comparador

2.10.2. Chaves de Função.

O grupo de switches de função, contém 5 chaves simples de três posições, montada abaixo do conjunto de potenciômetros, no lado direito do computador. Essas 5 chaves têm terminações no painel de programação, conforme mostra a figura 26. Com essas chaves, o operador pode mecânicamente controlar as funções de um dado problema, no computador. A posição central destas chaves corresponde ao ponto desligado.

2.10.3. Painel de leitura externa.

Como o próprio nome indica, esta unidade é utilizada para selecionar a saída da solução através dos seguintes meios: voltímetro digital (DVM); voltímetro eletrônico (VM); osciloscópio e registrador gráfico (DISPLAY). A figura 27 ilustra esta unidade.

Para selecionar uma saída através do DVM ou VM, coloca-se um plug de 2 pinos ligando-se as terminações DVM - SEL ou VM - SEL, respectivamente. Se se quiser a saída tanto pelo DVM e VM, coloca-se um

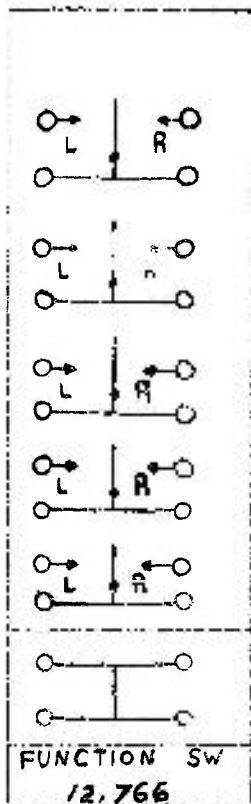


Figura 26

Bloco das chaves de função

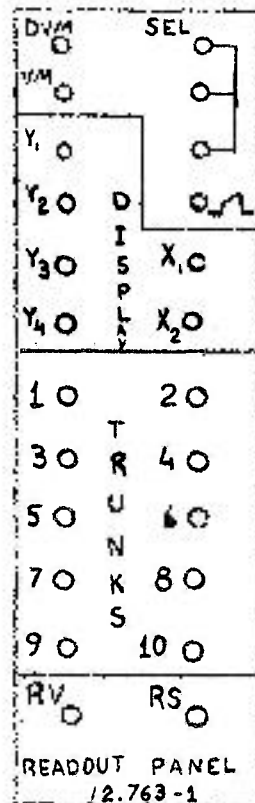


Figura 27

Painel de leitura externa

plug de 4 pinos nas posições DVM - SEL - VM - SEL. Para uma saída no registrador, deve-se interligar Y₁ - SEL e fornecer uma tensão através de um integrador ao X₁.

2.10.4. Unidade Atenuadores - Fontes de tensão

O TR-48 possui 12 destas unidades, sendo cada uma dividida verticalmente ao meio. Na área à esquerda é ilustrado um conjunto de cinco potenciômetros, enquanto que na outra extremidade, se encontram as fontes de tensão.

Os quatro primeiros atenuadores de cada unidade, têm uma extremidade aterrada, enquanto que o último tem as duas pontas livres. Estes potenciômetros são monitorados através do conjunto de atenuadores do painel à direita do computador. Para maior facilidade, estes potenciômetros são numerados desde P00 a P59, tanto no painel de programação, como no painel de atenuadores.

Os potenciômetros do TR-48 são de 10 voltas completas, 5 K, e possuem fusíveis individuais de segurança.

As fontes de tensão são ilustradas na extremidade direita da unidade atenuadores - fontes de tensão, e cada bloco possui 5 fontes de +10 volts e 5 de -10 volts. (Nota: estas tensões podem ser atenuadas para qualquer valor, dentro do intervalo útil, por meio dos potenciômetros).

A figura 28, mostra tal unidade.

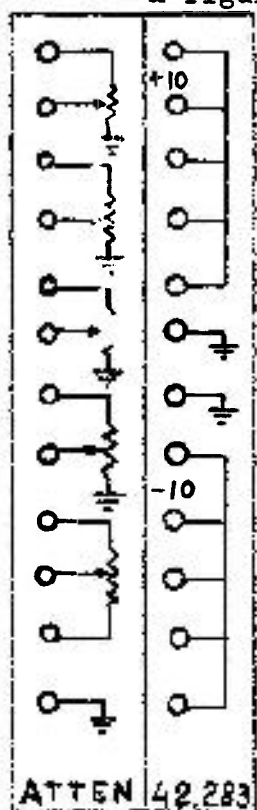


Figura 28

Bloco Atenuadores - Fontes de Tensão

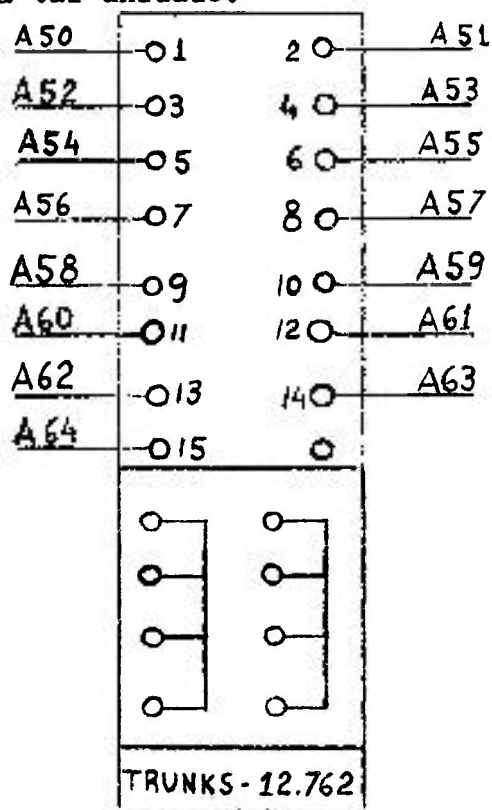


Figura 29

Unidade Tronco

2.10.5. Unidade Tronco.

Certas ligações conectadas ao J64 (atrás do computador) têm suas saídas através do painel de controle, para leituras no sistema seletor. A seleção destas ligações são feitas utilizando os amplificadores A50 à A64, conforme ilustra a figura 29. Isto possibilita ao operador a leitura e a verificação do sinal de entrada.

3. Painel de Controle:

3.1. Considerações operacionais

Antes de se operar com o TR-48, as instruções abaixo, devem ser seguidas:

- a) verifique que todos os amplificadores tenham um plug de 4 pinos. Este plug coloca a resistência de 100 K em paralelo com o amplificador, impedindo-o de uma sobrecarga durante a resolução de um problema;
- b) selecione o DVM e o VM, no READOUT PANEL, para que se possa avaliar as tensões em estudo;

- c) ligue o computador (apertando o POWER) e pressione o botão PS (Pot - Set). Inicialmente as lâmpadas do overload ficam acesas; depois de alguns segundos as lâmpadas se apagam;
- d) verifique as várias tensões do TR-48. Todas as saídas do power supply são conectadas diretamente à chave FUNCTION, através de resistores apropriados (veja parágrafo 3.2.3 desta secção);
- e) verifique o suprimento mais e menos, através do DVM, selecionando A49 e A50 (veja parágrafo 3.2.4 desta secção);
- f) na modalidade Pot Set, ajuste o zero no DVM, por meio de um potenciômetro situado atrás do mesmo;
- g) verifique o balanceamento dos amplificadores.

3.2. Descrição.

O painel de controle do TR-48 contém os seguintes equipamentos:

3.2.1. Voltímetro digital (DVM):

O DVM transistorizado do computador analógico PACE TR 48 tem terminações no READOUT PANEL, como já foi previamente mencionado. Tem lugar para quatro dígitos e tem impedância mínima de entrada igual a 10 MΩ.

Este voltímetro tanto serve para ler os fatores de atenuação nos potenciômetros e as tensões necessárias para cada circuito, como serve para leitura das soluções do problema em estudo.

3.2.2. Voltímetro eletrônico (VM) e escala seletora:

O VM está permanentemente ligado aos diversos circuitos do TR-48, para facilitar uma leitura rápida das tensões que estão em jogo. O VM apresenta um intervalo de utilização até |30| volts, enquanto que no DVM, este intervalo é reduzido a |12| volts.

O VM tem uma chave seletora de tensões, graduada em 0.1; 0.3; 1; 3; 10 e 30 volts. Esta chave seletora (RANGE) somente é operante quando a chave FUNCTION está na posição PATCH. Para que o voltímetro opere, um plug de dois pinos deve estar colocado no lugar próprio do READOUT PANEL.

Nota: A chave RANGE deve estar na escala 30 quando não se conhece os valores das tensões que vão ser medidas.

3.2.3. Chave FUNCTION:

Esta chave tem diversas posições, cujas finalidades são descritas abaixo:

- a) BAL - Posição para se efetuar o balançamento dos amplificadores.
- b) PATCH - Posição normal de operação, que serve para conectar o voltímetro (VM), via chave RANGE e o DVM diretamente aos terminais correspondentes no painel, na unidade READOUT PANEL.
- c) RELAY - Liga o VM ao relay do power supply (- 20 volts).
- d) -15, -8, 30, 15, 2 - Liga o VM às saídas dos power supplies correspondentes.

3.2.4. Seletores de amplificadores e potenciômetros:

O sistema seletor de sinal consiste de três colunas de botões: a primeira contém dois botões designados por A (amplificador) e P (potenciômetro); a segunda e a terceira, contém dez botões numerados de 0 a 9. Apertando o botão A, permite-se selecionar as saídas dos 48 amplificadores operacionais (desde A00 até A47); os 2 amplificadores de referência mais e menos (A48 e A49, respectivamente) e os 15 amplificadores de saída da linha tronco (A50 à A64). Pressionando o botão P, pode-se selecionar individualmente os 60 potenciômetros (desde P00 à P59). Por exemplo, se quisermos obter um coeficiente igual a 0.139 por meio do potenciômetro nº 26, seleciona-se o potenciômetro P26 no sistema SELECTOR, fazendo com isso que o atenuador em questão fique livre para leituras no DVM; a seguir, vira-se o potenciômetro (no painel de atenuadores) P26 até se obter no DVM a constante 0.139, conforme o que foi visto no ítem 2.2 do Capítulo I (vide página sete).

3.2.5. Indicadores de Overload:

Os indicadores de overload são providos de um alarme visual dado através de pequeninas lâmpadas.

Quando um overload ocorre num amplificador, a lâmpada correspondente se acende indicando que aquele amplificador está operando fora da região linear de operação. Quando isto ocorrer, pressione o botão RS (reset) no painel de controle.

Um overload é devido a fatores de escala impróprios (veja Capítulo III, ítem 4), ligações incorretas no painel de programação ou sobrecarga da rede de força.

3.2.6 Chave para operação repetitiva:

Esta chave, como o próprio nome diz, serve para realizar computações repetitivas em intervalos de tempos iguais. É graduada em 20, 50, 100 e 200 milissegundos, e dispõe ainda de um vernier para intercalar outras escalas de tempo. A chave REP OP só tem finalidade, quando o computador opera em modalidade repetitiva (apertando-se o botão RO da modalidade), utilizando um osciloscópio externo como indicador de saída.

3.2.7. Modalidade de controle:

Os controles de operação do TR-48 são dispostos em seis botões, situados na parte inferior do painel de controle (MODE).

Abaixo, damos as diversas especificações e uma breve descrição de suas utilidades:

- a) OP (operate) - Quando este botão é pressionado, todos os integradores e amplificadores ficam simultaneamente livres para responder às voltagens de entrada. É o botão responsável para dar início à resolução do problema.
- b) HD (hold) - Pressionando-se este botão faz-se com que a solução do problema pare, e todas as voltagens em questão param nos potenciais respectivos. Para se continuar o problema, pressiona-se o botão OP, ou se se quiser partir do início, aperta-se o botão RS e depois o OP.
- c) RS (reset) - Nesta modalidade, todas as voltagens voltam à posição inicial. Se um integrador tem IC diferente de zero, o voltímetro deverá assinalar essa tensão. O integrador tem saída igual a zero se não é aplicada a cada IC.
- d) PS (pot set) - Resistor de entrada do amplificador está aterrado. Permite o ajuste dos potenciômetros através do DVM. Nesta modalidade é que se coloca e remove

- o painel de programação e se efetua o balaceamento dos amplificadores.
- e) SL (slave) - Quando o TR-48 é escravo de outro TR-48 com maiores componentes, pressiona-se êste botão. O computador escravo responde aos comandos do computador mestre.
- f) RO (rep op) - Êste botão trabalha juntamente com a chave REP OP, na modalidade de operação repetitiva.

Capítulo III - Programação Básica para um Computador Analógico.

Programação pode ser definida como sendo um conjunto de operações necessárias para preparar um problema matemático, para ser resolvido pelo computador. Inclui os seguintes itens, que serão descritos logo após:

- 1 - Equações do problema.
- 2 - Constantes (parâmetros) do problema.
- 3 - Condições iniciais do problema.
- 4 - Fatores de escala de tempo e escala de amplitude.
- 5 - Condições iniciais da máquina.
- 6 - Equações da máquina.
- 7 - Diagrama do circuito.
- 8 - Montagem do circuito no computador.
- 9 - Solução do problema apresentado.
- 10 - Análise da solução.

Para desenvolver êstes itens, vamos tomar um exemplo bem simples, cuja solução matemática é conhecida, isto é, vamos resolver a equação diferencial que representa o movimento de um corpo suspenso por uma mola, como ilustra a figura 30.

1 - Equação do problema.

A equação diferencial que rege o movimento dêste corpo é de 2ª ordem, sendo sua expressão:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + Kx = 0 \quad \text{Eq. (III-1)}$$

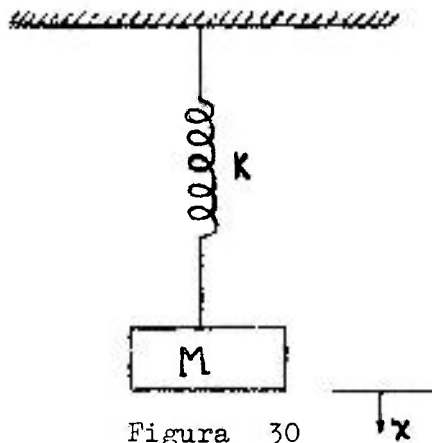


Figura 30

A solução é uma senóide, quando M e K são independentes de x.

Quando se resolve uma equação diferencial em um computador analógico, resolve-se em relação à derivada de maior ordem, isto é, isola-se no 1º membro da equação a derivada de mais alta ordem. Então,

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = - \frac{K}{M} x \quad \text{Eq. (III-2)}$$

2 - Constantes do problema.

As constantes que fazem parte da equação acima, têm os seguintes valores:

$$\begin{aligned} M &= 0.02 \text{ kg} \\ K &= 20 \text{ N/m} \end{aligned}$$

Então a Eq. (III-2) passa a ser:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -1000 x \quad \text{Eq. (III-3)}$$

3 - Condições iniciais do problema.

No caso do problema em questão, as condições iniciais da equação, são:

$$x(0) = 0 \quad ; \quad \frac{dx}{dt}(0) = 1$$

4 - Fatores de escala de tempo e escala de amplitude.

Define-se fatores de escala, como sendo fatores constantes que transformam as variáveis do problema matemático em variáveis do computador. A variável independente do sistema de equações é representada no computador pelo tempo; a variável dependente e suas derivadas com respeito ao tempo, são representadas no computador por voltagens.

Os dois fatores mais importantes a considerar na preparação de um sistema de equações para um computador analógico, são :

- a) fator-escala de tempo;
- b) fator-escala de amplitude.

O fator-escala de tempo controla a velocidade da solução no computador, enquanto que o fator-escala de amplitude controla o máximo valor das tensões variáveis, isto é, não permite sair do intervalo útil de operação que é de ± 10 volts.

Um exame dos valores máximos em que as quantidades podem assumir num sistema físico particular, podem geralmente serem estimados, levando-se em conta:

- 1) um conhecimento do sistema físico a ser estudado;
- 2) uma investigação do sistema de equações.

De um modo geral, a escolha do fator-escala de amplitude é considerado, levando-se em conta a relação:

$$\text{fator-escala de amplitude} = \frac{10}{\frac{\text{máximo valor esperado da variável física}}{\text{volts}} \cdot \text{unidades físicas}} .$$

A tabela apresentada na figura 31, ilustra o cálculo de fatores-escala de amplitude calculados pela relação acima.

Como ficou dito acima, o fator-escala de tempo controla a velocidade da solução; com isso, pode-se ter uma solução mais lenta ou mais rápida, pela escolha conveniente deste fator. Em geral, define-se do seguinte modo:

$$t' = a t \quad \text{Eq. (III-4)}$$

- onde: t' = tempo requerido para a solução no computador (seg*);
- t = tempo requerido para a mesma solução no problema físico (seg);
- a = fator-escala de tempo (seg*/seg) .

Variável do problema		Valor máximo esperado (unidades físicas)	Fatores de escala (volts por unidades físicas)	Variável do computador (volts)
Distância Linear, X	X	0.001 metros	$\frac{10}{0.001} = 10^4$ volts/metros	10^4 X
Distância Linear, S	S	1000 centímetros	$\frac{10}{1000} = \frac{1}{100}$ volts/cm	$\frac{S}{100}$
Aceleração Angular, $\ddot{\theta}$	$\ddot{\theta}$	2 rad/seg ²	$\frac{10}{2} = 5$ volts/rad/seg ²	5 $\ddot{\theta}$
Pressão, P	P	70 atm	$\frac{10}{70} \cdot \frac{10}{100} = \frac{1}{700}$ volts/atm	$\frac{P}{10}$

Figura 31
Cálculo dos fatores-escala de amplitude

Se $a \geq 1$, um segundo do tempo real é representado por a segundos no computador. Se $a < 1$, então um segundo no computador representará mais do que um segundo no tempo real. Se $a = 1$, a solução do computador é dita solução em tempo real.

Se um destes fatores (tempo e amplitude) não fôr convenientemente escolhido, um computador analógico não pode dar resultados satisfatórios.

Um dos atributos de um analógico que contribui grandemente para a versatilidade do equipamento, é este em que as variáveis matemáticas podem ser transformadas em variáveis da máquina através dos fatores de escala. Quando se realiza esta troca, as variáveis do computador tornam-se proporcionais às correspondentes variáveis do sistema físico.

Na escolha destes fatores de escala, muitos conflitos e compromissos têm que ser feitos. Alguns dos fatores a serem considerados, são:

- a) a integração não pode ser nem muito lenta, nem muito rápida, pois podem ocorrer erros neste processo;
- b) as tensões que ocorrem na resolução de um problema não podem sair do intervalo útil de voltagens dos circuitos;

- c) os coeficientes das equações devem, de preferência, estar compreendidos entre 0 e 1, para que sejam fixados por meio de potenciômetros;
- d) as condições iniciais dos integradores (no computador) devem ser bem estudadas no que diz respeito ao tipo de solução a ser obtida.

De um modo geral, se X é uma variável do problema, a relação $X' = a X$ define a variável da máquina X' com o fator de escala a.

No problema que estamos tratando, levando-se em conta o que ficou dito, os fatores de escala, são:

$$t' = at \rightarrow t = \frac{t'}{a} \rightarrow a = 50 \frac{\text{seg}^*}{\text{seg}}$$

$$r' = b x \rightarrow x = \frac{x'}{b} \rightarrow b = 100 \frac{\text{volts}}{\text{m}}$$

Nota: As variáveis assinaladas com linha (') estão representando as variáveis da máquina.

Com os fatores de escala acima escolhidos, vamos obter um coeficiente igual a 0.4 na equação diferencial em estudo, e uma condição inicial para um integrador igual a 2 volts. Esta escolha convenientemente está dentro dos requisitos mencionados anteriormente.

5 - Condições iniciais da máquina

Em virtude das novas variáveis, as condições iniciais do problema passam a ser:

$$x'(0) = 0 \text{ volt} \quad ; \quad \frac{dx'}{dt'}(0) = \frac{b}{a} = 2 \text{ volts}$$

6 - Equação da máquina

Para se chegar à equação do computador, procede-se do seguinte modo:

$$\begin{aligned} dx' &= b dx \\ d^2x' &= b d^2x \\ dt' &= a dt \\ dt'^2 &= a^2 dt^2 \end{aligned}$$

Substituindo estas relações na Eq.(III-3), tem-se:

$$\frac{\frac{d^2 x'}{dt'^2}}{\frac{b}{a^2}} = - 1000 \frac{x'}{b} \quad \text{ou}$$

$$\frac{d^2 x'}{dt'^2} = - 0.4 x' \quad \text{Eq.(III-5)}$$

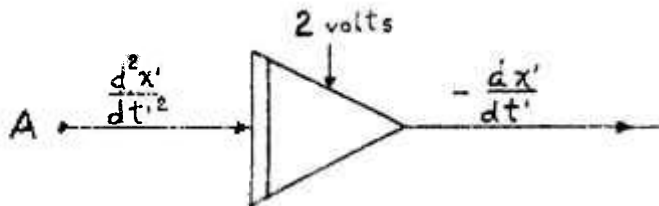
A equação diferencial (III-5), é a mesma equação diferencial que rege o movimento do corpo suspenso por u'a mola, conforme o problema proposto.

7 - Diagrama do circuito

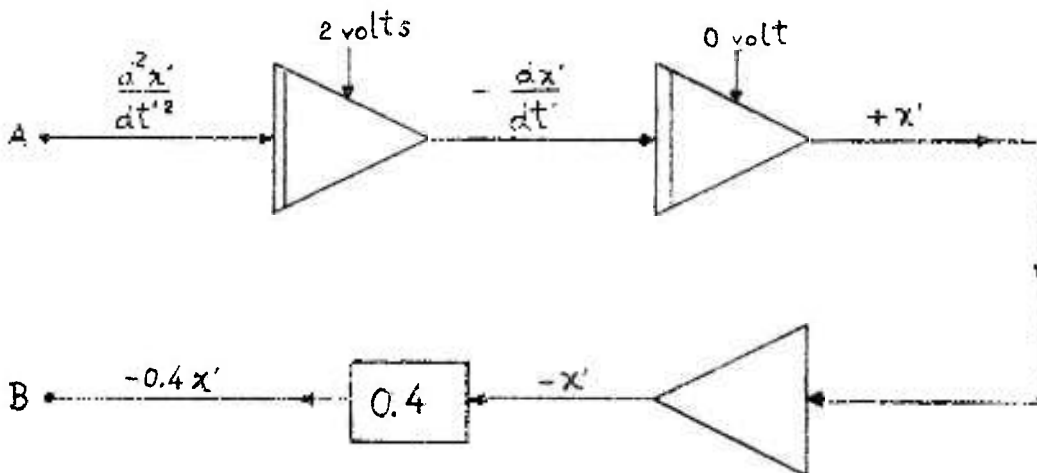
Uma vez de posse da equação da máquina (III-5), podemos esquematizar o circuito eletrônico, que irá resolver o problema.

Note que necessitamos de dois integradores, pois temos uma equação diferencial de 2ª ordem; e necessitamos usar um potenciômetro para fixar o coeficiente constante 0.4. Lembre-se que a saída de um integrador é de sinal oposto à entrada. Lembre-se também, que a solução da equação da máquina é em x' .

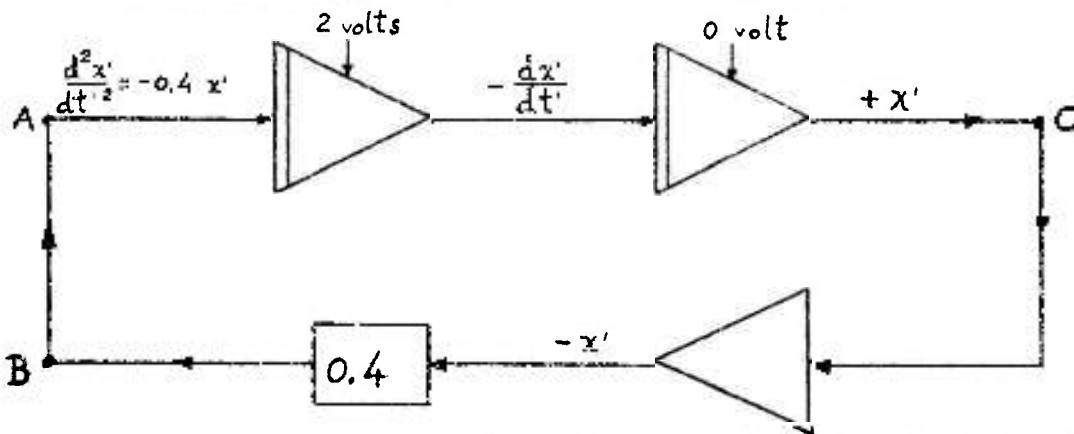
Então, para o primeiro integrador, imaginemos que a tensão de entrada seja igual a $\frac{d^2 x'}{dt'^2}$. Teremos na saída $-\frac{dx'}{dt'}$, isto é:



Se após a saída do 1º integrador, colocarmos um 2º, teremos na saída deste $+ x'$. Invertendo-se o sinal da saída do 2º integrador e multiplicando-se por 0.4, teremos $- 0.4 x'$, que é o segundo membro da equação da máquina. O circuito elétrico será então:



Como os pontos A e B devem ter tensões iguais, em virtude da igualdade representada pela Eq. (III-5), curtocircuitamos estes pontos, obtendo o diagrama final do circuito, isto é:



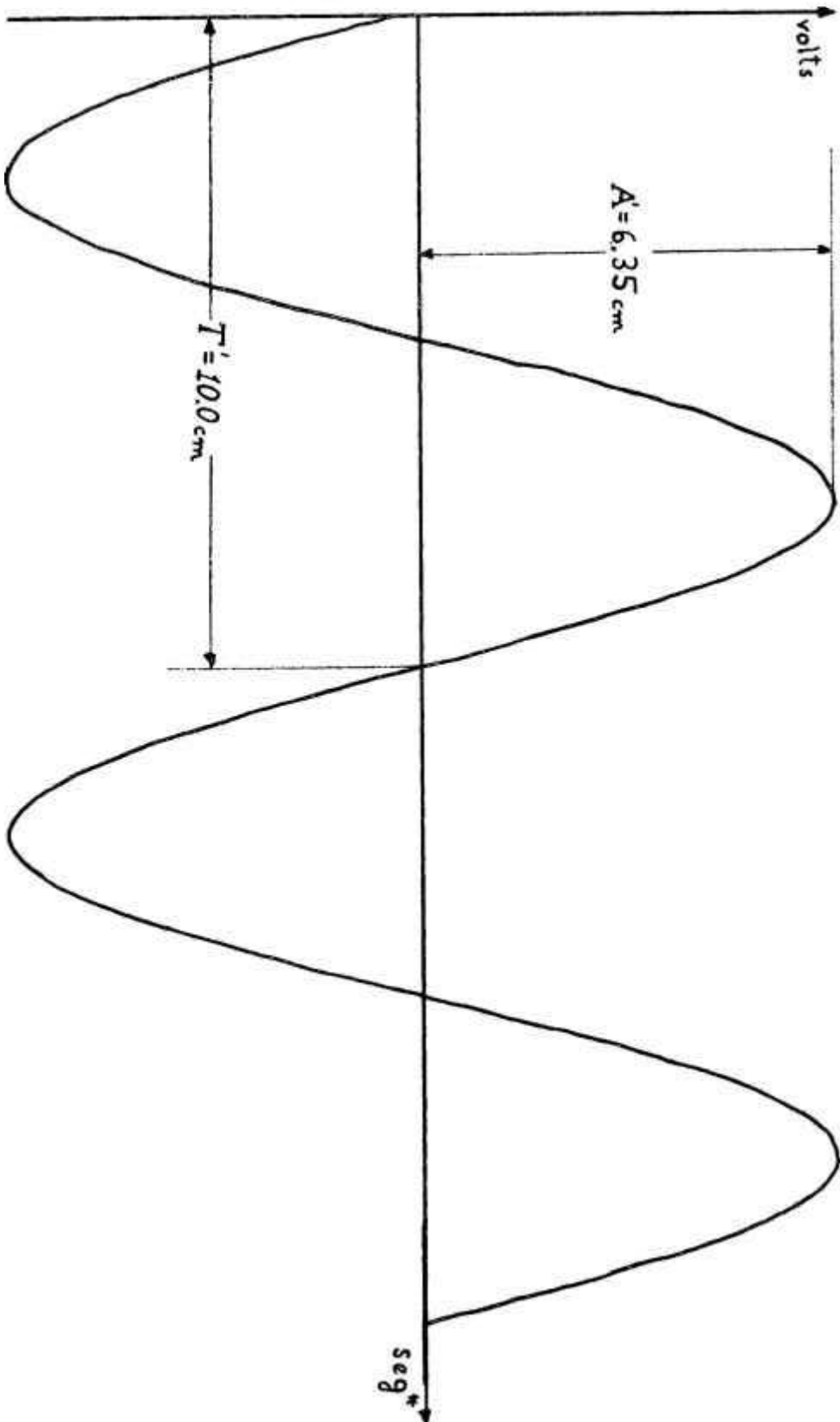
A solução $+ \underline{x}'$ é obtida no ponto C (saída do 2º integrador).

8 - Montagem do circuito no computador

Efetua-se a montagem do diagrama do circuito no painel de programação, e antes de iniciar a resolução do problema, faz-se uma verificação final das ligações realizadas para se evitar qualquer erro de conexão.

Após esta verificação, liga-se o computador, analisando a saída do amplificador selecionado.

escalas do registrador
{ eixo horizontal : 1 seg*/cm
eixo vertical : 0,5 volt/cm



5 - Solução do problema apresentado:

10 - Verificação da solução

Sabe-se que a solução da equação diferencial apresentada, com a condição inicial dada, é do tipo:

$$x = A \text{ sen } \omega t \quad \text{Eq. (III-6)}$$

Então a solução da equação da máquina é:

$$x' = A' \text{ sen } \omega' t' \quad \text{Eq. (III-7)}$$

onde:

A' = amplitude do movimento

$$\omega' = \frac{2\pi}{T'}$$

T' = período do movimento

Levando-se em conta a Eq. (III-7), as escalas do registrador, os dados obtidos pelo gráfico e os fatores de escala do problema, isto é, a conversão das variáveis da máquina para as variáveis do problema, tem-se o deslocamento x do corpo, em relação à posição inicial, em função do tempo.

Capítulo IV - Problemas

Problema 1.

Resolver a equação diferencial que representa um movimento amortecido de um corpo suspenso por u'a mola.

1 - Equação do problema:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2 \frac{dx}{dt} + 16 x = 0 \quad \text{ou}$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = - 2 \frac{dx}{dt} - 16 x$$

2 - Constantes do problema:

São especificadas na equação.

3 - Condições iniciais do problema:

$$x(0) = 0 \quad ; \quad \frac{dx}{dt}(0) = 1$$

4- Fatores de escala:

$$t' = at \rightarrow t = \frac{t'}{a} \rightarrow a = 10$$

$$x' = bx \rightarrow x = \frac{x'}{b} \rightarrow b = 50$$

5- Condições iniciais da máquina:

$$x'(0) = 0 \text{ volt} \quad ; \quad \frac{dx'}{dt'}(0) = \frac{b}{a} = 5 \text{ volts}$$

6- Equação da máquina:

$$dx = \frac{1}{b} dx'$$

$$d^2x = \frac{1}{b} d^2x'$$

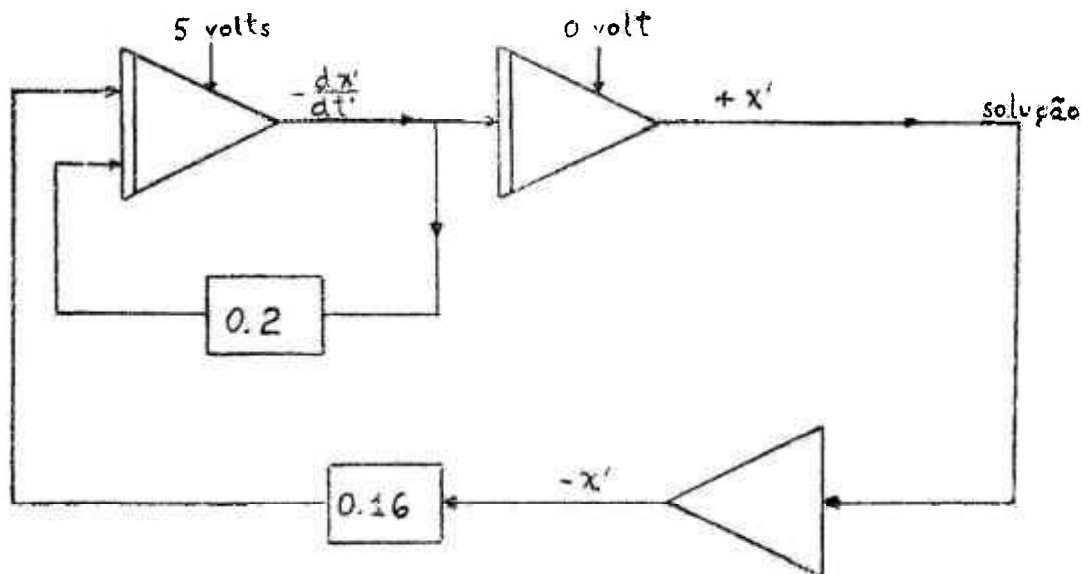
$$dt = \frac{1}{a} dt'$$

$$dt^2 = \frac{1}{a^2} dt'^2$$

$$\frac{\frac{d^2x'}{dt'^2}}{\frac{1}{a^2}} = -2 \frac{\frac{dx'}{dt'}}{\frac{1}{a}} - 16 \frac{x'}{b} \quad \text{ou}$$

$$\frac{d^2x'}{dt'^2} = -0,2 \frac{dx'}{dt'} - 0,16 x'$$

7- Diagrama do circuito:



Problema 2 .

Decaimento do Tório (Reator Indú)

1 - Equação do problema:

$$\frac{dN}{dt} = -N\sigma\phi$$

onde: N = concentração de Tório

σ = secção de choque de absorção do Tório

ϕ = fluxo de neutrons durante a irradiação

t = tempo

2 - Constantes do problema:

$$\sigma = 7.0 \times 10^{24} \text{ cm}^2$$

$$\phi = 10^{13} \text{ n/cm}^2 \times \text{seg}$$

3- Condição inicial do problema:

$$N(0) = 3.27 \times 10^{24} \text{ átomos/cm}^3$$

4 - Fatores de escala:

$$t' = at \rightarrow t = \frac{t'}{a} \rightarrow a = 10^{-10} \frac{\text{seg}^*}{\text{seg}}$$

$$N' = bN \rightarrow N = \frac{N'}{b} \rightarrow b = 3 \times 10^{-24} \frac{\text{volts}}{\text{átomos/cm}^3}$$

5 - Condições iniciais da máquina:

$$N'(0) = bN(0) = 3 \times 10^{-24} \times 3.27 \times 10^{24}$$

$$N'(0) = 9.81 \text{ volts}$$

6 - Equação da máquina:

$$dt' = a dt$$

$$dN' = b dN$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{dN'}{b} \times \frac{a}{dt'} = -\frac{N'}{b} \sigma \phi \quad \text{ou}$$

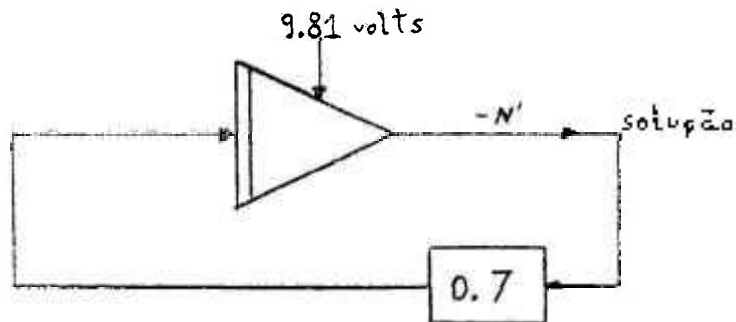
$$\frac{dN'}{dt'} = -\frac{1}{a} N'$$

Substituindo os valores das constantes, tem-se:

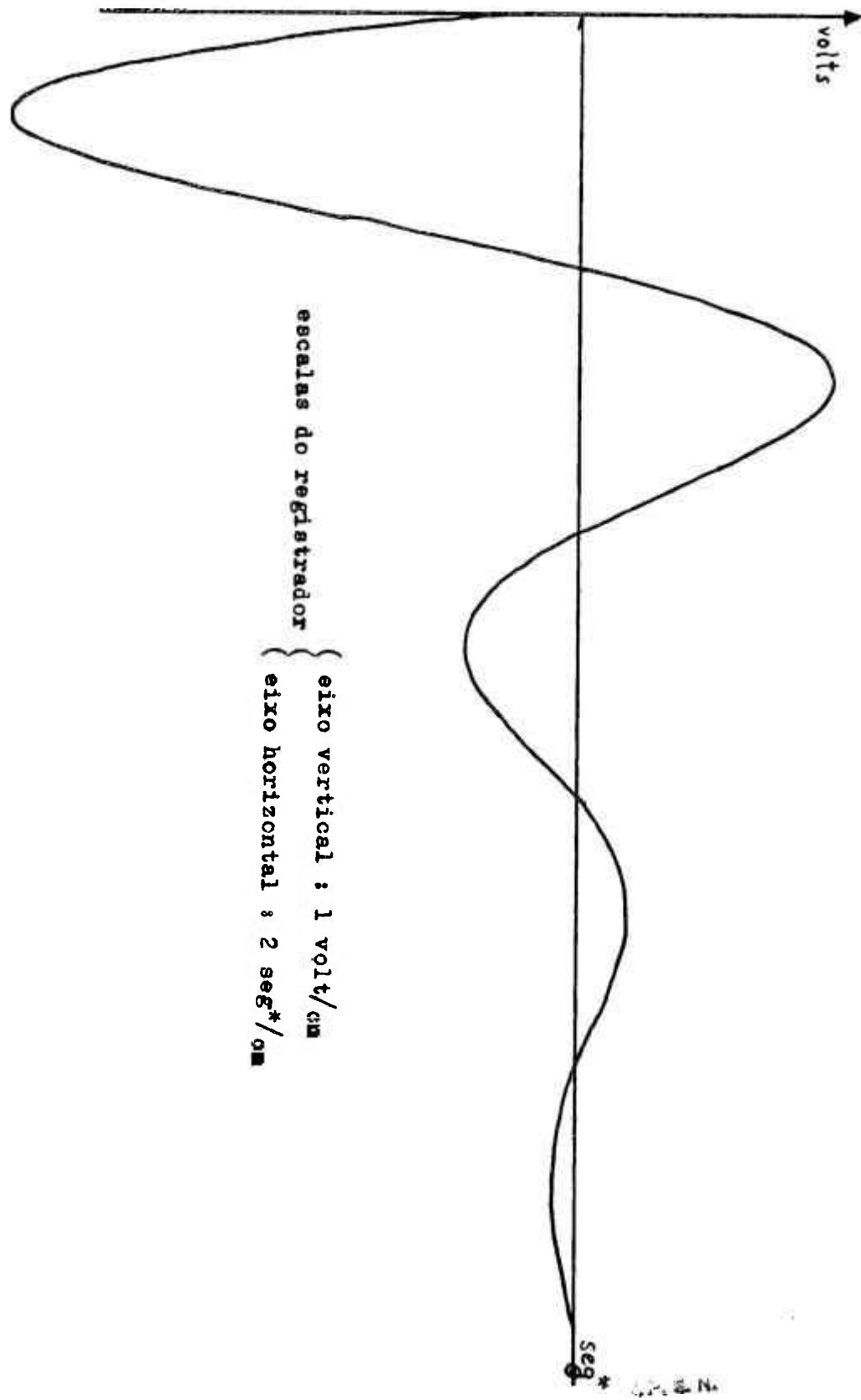
$$\frac{dN'}{dt'} = -\frac{7.0 \times 10^{-24} \times 10^{13}}{10^{-10}} N' \quad \text{ou}$$

$$\frac{dN'}{dt'} = -0.7 N'$$

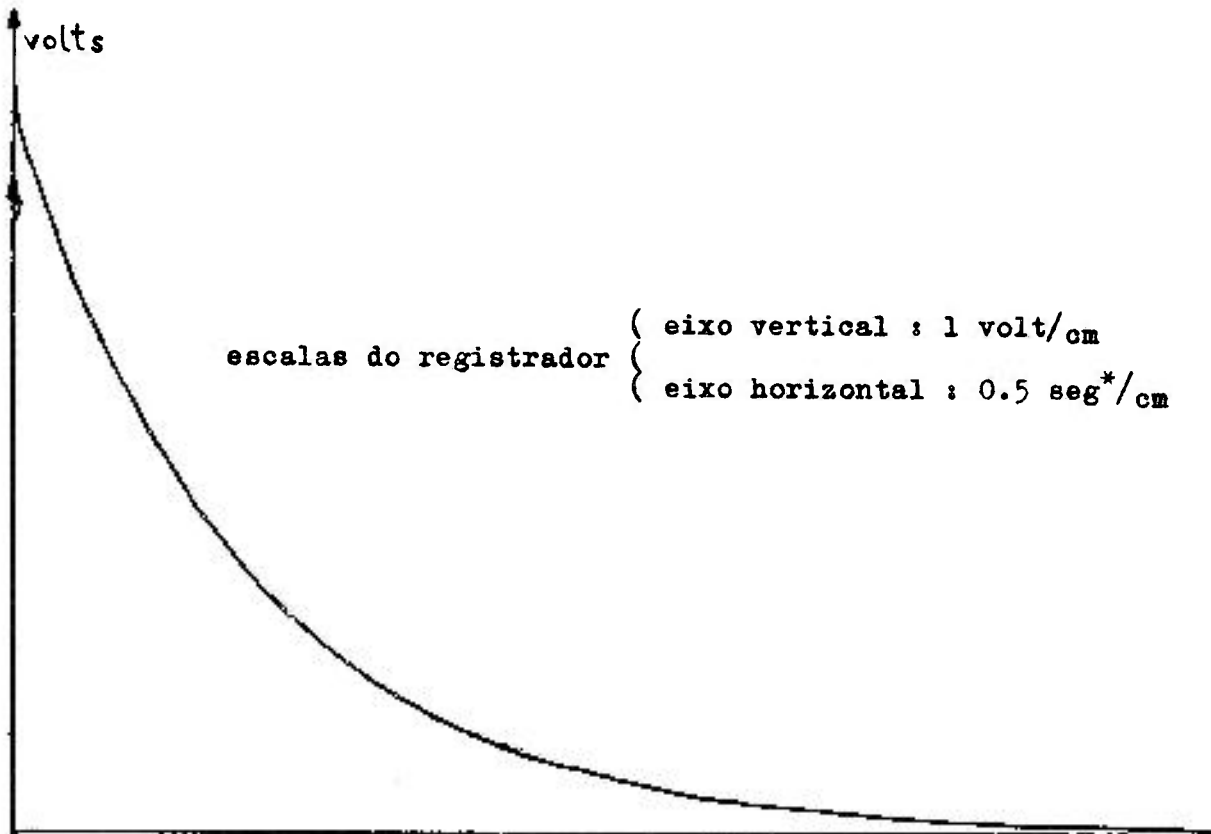
7 - Diagrama do circuito:



8 - Solução do Problema 1



9 -- Solução do Problema 2



Problema 3.

Formação do Protoactínio por irradiação

1 - Equação do problema:

$$\frac{dN_1}{dt} = N_0 \sigma_0 \phi - N_1 (\lambda_1 + \phi \sigma_1)$$

onde:

N_1 = concentração do Pa

N_0 = concentração do Th

σ_0 = secção de choque de absorção do Th

σ_1 = secção de choque de absorção do Pa

ϕ = fluxo de neutrons durante a irradiação

λ_1 = constante de desintegração do Pa

2 - Constantes do problema:

$$N_0 = 3.27 \times 10^{24} \text{ átomos/cm}^3$$

$$\sigma_0 = 7.0 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$\phi = 10^{13} \text{ n/cm}^2 \times \text{seg}$$

$$\lambda_1 = 2.927 \times 10^{-8} \text{ seg}^{-1} \rightarrow \frac{0.693}{27.4 \times 24 \times 3600} = 2.927 \times 10^{-8} = 2.927 \times 10^{-8} \text{ seg}^{-1}$$

$$\sigma_1 = 260 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

3 - Condição inicial do problema:

$$N_1(0) = 0 \text{ átomos/cm}^3$$

4 - Fatores de escala:

$$t' = at \rightarrow t = \frac{t'}{a} \rightarrow a = 10^{-1} \frac{\text{seg}^*}{\text{seg}}$$

$$N'_1 = bN_1 \rightarrow N_1 = \frac{N'_1}{b} \rightarrow b = 0.6553 \times 10^{-21} \frac{\text{volts}}{\text{at/cm}^3}$$

5 - Condição inicial da máquina:

$$N'_1(0) = 0 \text{ volts}$$

6 - Equação da máquina:

$$dt' = a dt$$

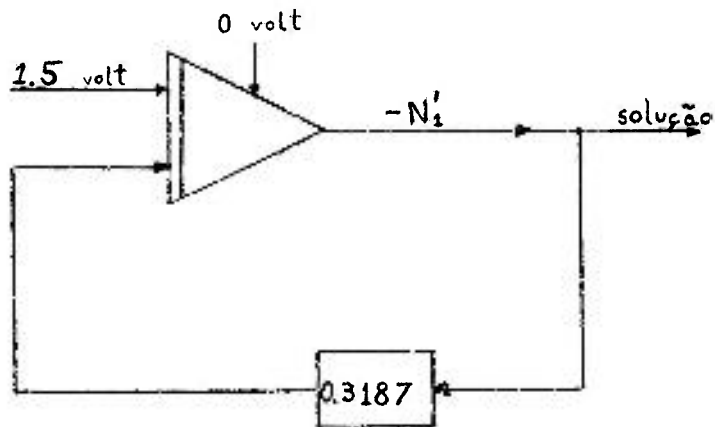
$$dN'_1 = b dN_1$$

$$\frac{\frac{dN'_1}{b}}{\frac{dt'}{a}} = \frac{dN'_1}{dt'} = \frac{a}{b} = N_0 \sigma_0 \phi - \frac{(\lambda_1 + \phi \sigma_1) N'_1}{b}$$

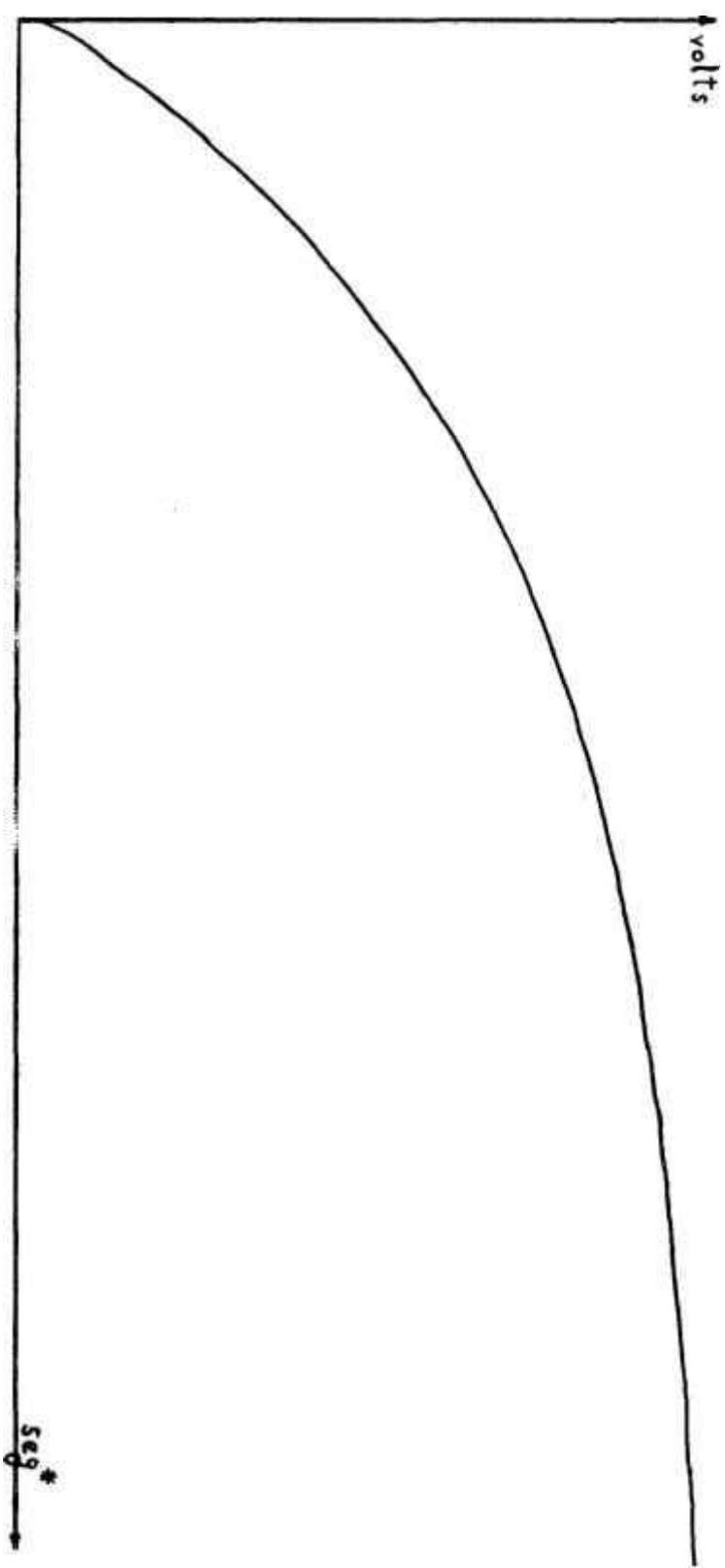
Efetutando-se as substituições, vem:

$$\frac{dN'_1}{dt'} = 1.5 - 0.3187 N'_1$$

7 - Diagrama do circuito:



8- Solução do Problema 3



escalas do registrador { eixo vertical: 0.5 volt/cm
eixo horizontal: 0.5 seg*/cm

Problema 4.

Concentração do iôdo e do xenon no reator

1 - Equações do problema:

$$\frac{dI}{dt} = \lambda_I I + \gamma_I \Sigma_f \phi - \sigma_I \phi I$$

$$\frac{dX}{dt} = \lambda_I I + \gamma_x \Sigma_f \phi - (\lambda_x + \sigma_x \phi) X$$

- onde: I = concentração do iôdo, átomos/cm³
- X = concentração do xenon, átomos/cm³
- λ_I = constante de desintegração do iôdo, seg⁻¹
- λ_x = constante de desintegração do xenon, seg⁻¹
- γ_I = "yield" de fissão do iôdo
- γ_x = "yield" de fissão do xenon
- Σ_f = secção de choque macroscópica da fissão do carôço do reator, cm⁻¹
- ϕ = fluxo de neutrons, n/cm² x seg
- σ_I = secção de choque microscópica de absorção do iôdo, cm²
- σ_x = secção de choque microscópica de absorção do xenon, cm²

Em virtude do desaparecimento do iôdo por captura (n, γ) ser pequeno, o termo $\sigma_I \phi I$, na 1ª equação, pode ser desprezado.

2 - Constantes do problema:

- $\lambda_I = 2.9 \times 10^{-5} \text{ seg}^{-1}$
- $\lambda_x = 2.1 \times 10^{-5} \text{ seg}^{-1}$
- $\gamma_I = 0.056$
- $\gamma_x = 0.003$
- $\phi = 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ x seg}$
- $\sigma_I = 6.7 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$
- $\sigma_x = 3.5 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$
- $\Sigma_f = 0.201 \text{ cm}^{-1}$

3 - Condições iniciais do problema:

$$I(0) = 0 \text{ átomos/cm}^3$$

$$X(0) = 0 \text{ átomos/cm}^3$$

4 - Fatores de escala:

$$t' = at \rightarrow t = \frac{t'}{a} \rightarrow a = 10^{-4} \frac{\text{seg}^*}{\text{seg}}$$

$$I' = bI \rightarrow I = \frac{I'}{b} \rightarrow b = 10^{-15} \frac{\text{volts}}{\text{at/cm}^3}$$

$$X' = cX \rightarrow X = \frac{X'}{c} \rightarrow c = 10^{-15} \frac{\text{volts}}{\text{at/cm}^3}$$

5 - Condições iniciais da máquina:

$$I'(0) = 0 \text{ volt}$$

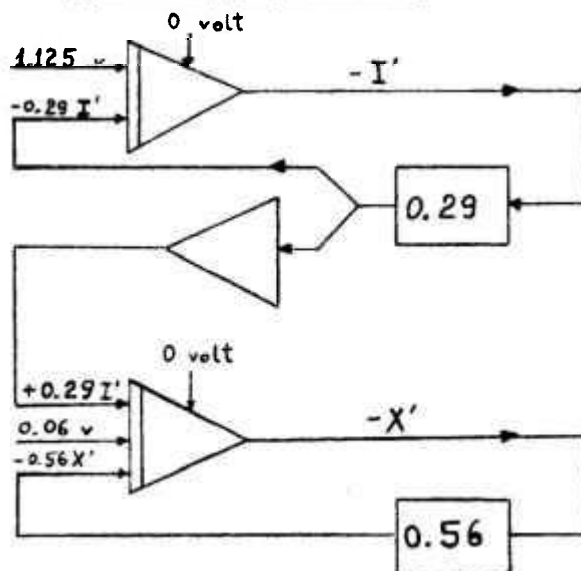
$$X'(0) = 0 \text{ volt}$$

6 - Equações da máquina:

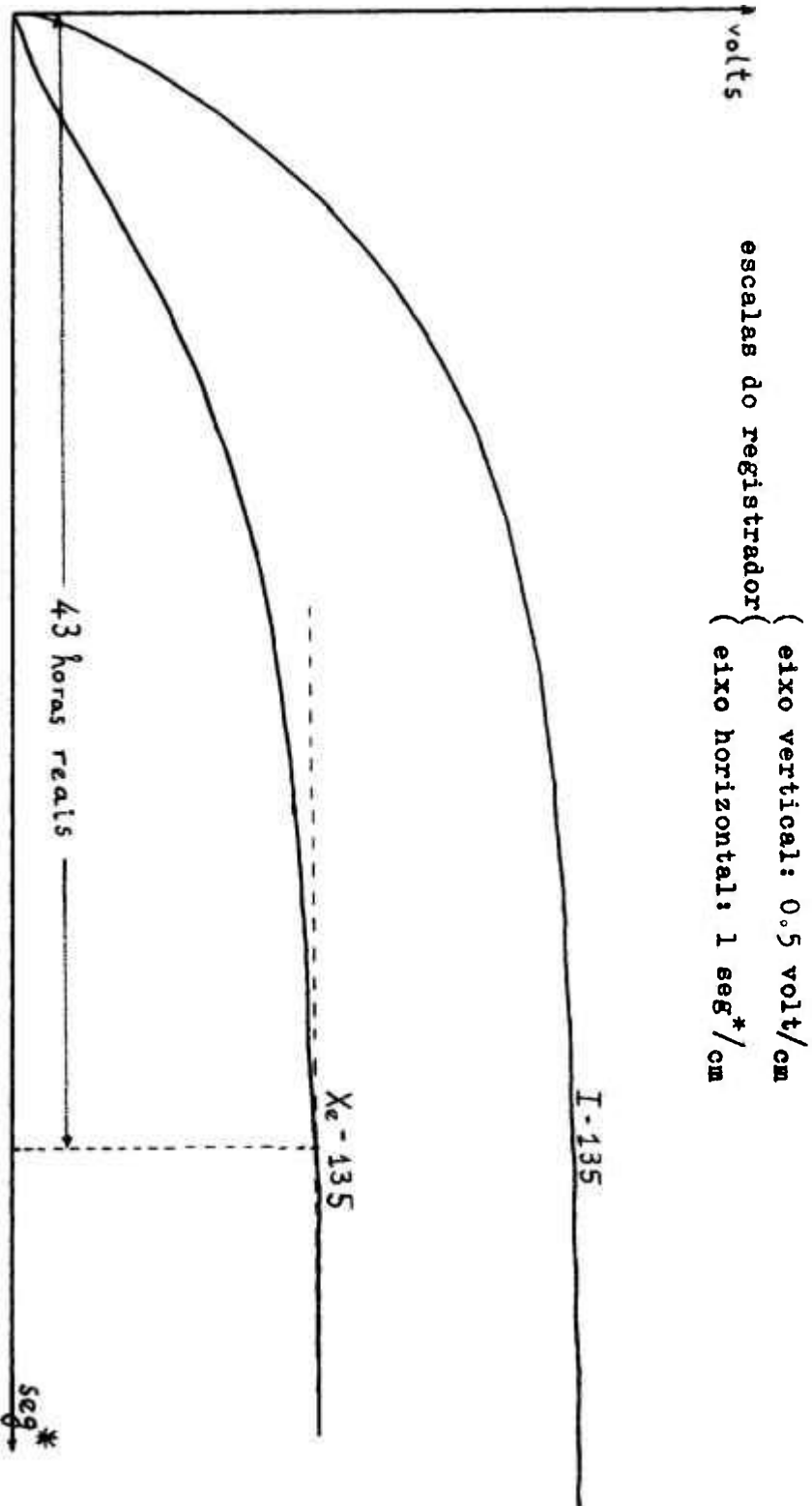
$$\frac{dI'}{dt'} = -0.29I' + 1,125$$

$$\frac{dX'}{dt'} = 0,29I' + 0,06 - 0.56 X'$$

7 - Diagrama do circuito:



8 - Solução do Problema 4



Problema 5.

-51-

Produção de Pu - 240 por irradiação do UO_2 .

1 - Equações do problema:

$$\frac{dN_{28}}{dt} = -\sigma_{28} N_{28} \phi$$

$$\frac{dN_{49}}{dt} = \sigma_{28} N_{28} \phi - \sigma_{49} N_{49} \phi$$

$$\frac{dN_{40}}{dt} = \sigma_{49} N_{49} \phi - \sigma_{40} N_{40} \phi$$

onde: N_{28} = concentração de UO_2 , átomos/ cm^3

N_{49} = concentração do Pu-239, átomos/ cm^3

N_{40} = concentração do Pu-240, átomos/ cm^3

σ_{28} = secção de choque microscópica de absorção do UO_2 , cm^2

σ_{49} = secção de choque microscópica de absorção do Pu-239, cm^2

σ_{40} = secção de choque microscópica de absorção do Pu-240, cm^2

ϕ = fluxo térmico de neutrons, $n/cm^2 \times seg$

2 - Constantes do problema:

$$\sigma_{28} = 3 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{49} = 1029 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{40} = 300 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$\phi = 1,5 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ e seg}$$

3 - Condições iniciais do problema:

$$N_{28}(0) = 2.44 \times 10^{22} \text{ átomos/cm}^2 \rightarrow 10.96 \text{ g/cm}^3 \text{ de } UO_2$$

$$N_{49}(0) = 0 \text{ átomos/cm}^3$$

$$N_{40}(0) = 0 \text{ átomos/cm}^3$$

4 - Fatores de escala:

$$t' = at \rightarrow t = \frac{t'}{a} \rightarrow a = 10^{-6} \frac{\text{seg}}{\text{seg}}^*$$

$$N'_{28} = bN_{28} \rightarrow N_{28} = \frac{N'_{28}}{b} \rightarrow b = 4 \times 10^{-22}$$

$$N'_{49} = cN_{49} \rightarrow N_{49} = \frac{N'_{49}}{c} \rightarrow c = 4 \times 10^{-22}$$

$$N'_{40} = dN_{40} \rightarrow N_{40} = \frac{N'_{40}}{d} \rightarrow d = 4 \times 10^{-22}$$

$\frac{\text{volts}}{\text{at/cm}^3}$

$\frac{\text{volts}}{\text{at/cm}^3}$

$\frac{\text{volts}}{\text{at/cm}^3}$

5 - Condições iniciais da máquina:

$$N'_{28}(0) = 9.76 \text{ volts}$$

$$N'_{49}(0) = 0 \text{ volt}$$

$$N'_{40}(0) = 0 \text{ volt}$$

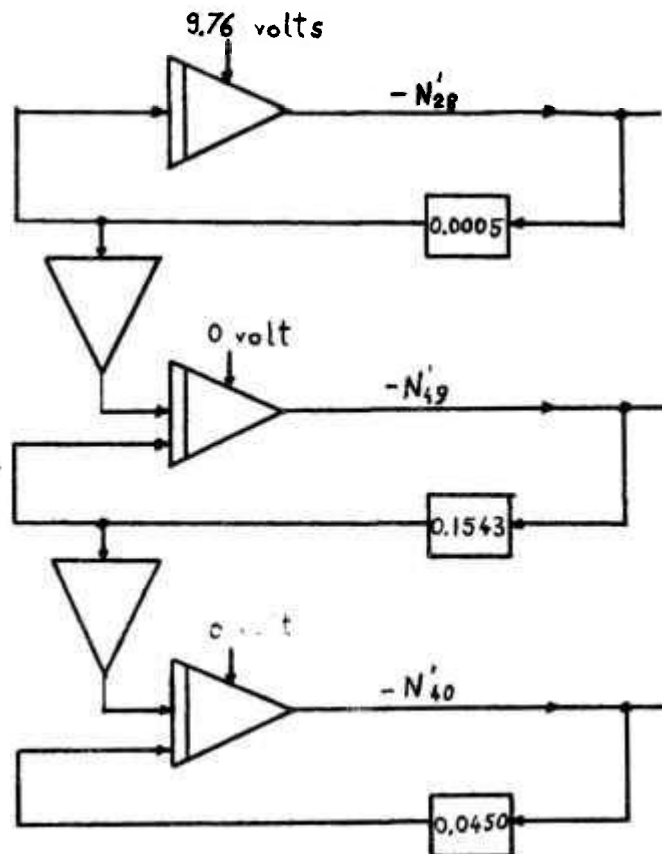
6 - Equações da máquina:

$$\frac{dN'_{28}}{dt'} = 0.0005 N'_{28}$$

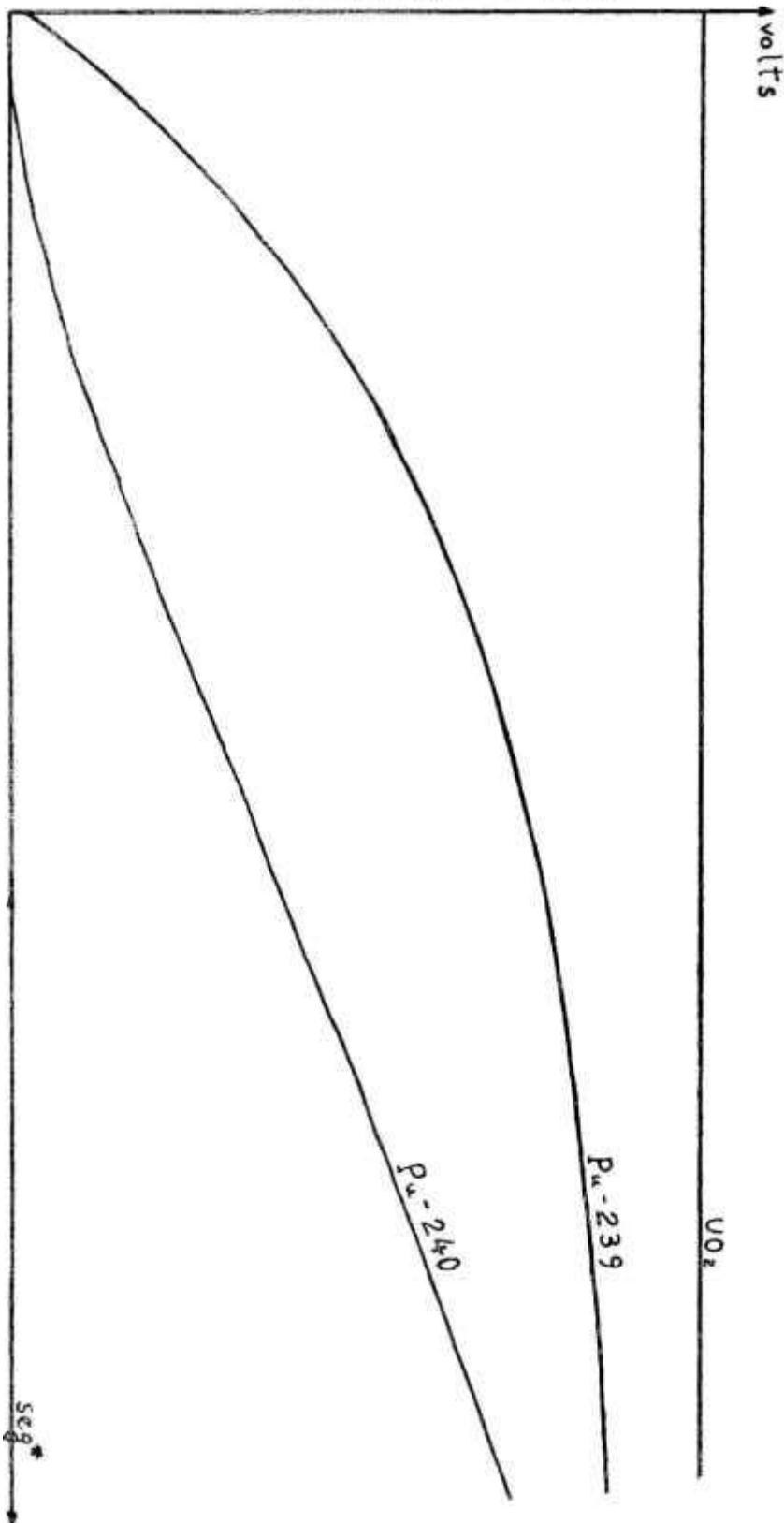
$$\frac{dN'_{49}}{dt'} = 0.0005 N'_{28} - 0.1543 N'_{49}$$

$$\frac{dN'_{40}}{dt'} = 0.1543 N'_{49} - 0.0450 N'_{40}$$

7 - Diagrama do circuito:



8 - Solução do problema 5



Escalas do Registrador {
eixo vertical: (UO₂ : 1 volt/cm
Pu-239: 0.005 volt/cm
Pu-240: 0.01 volt/cm)
eixo horizontal: 1 seg*/cm

Problema 6.

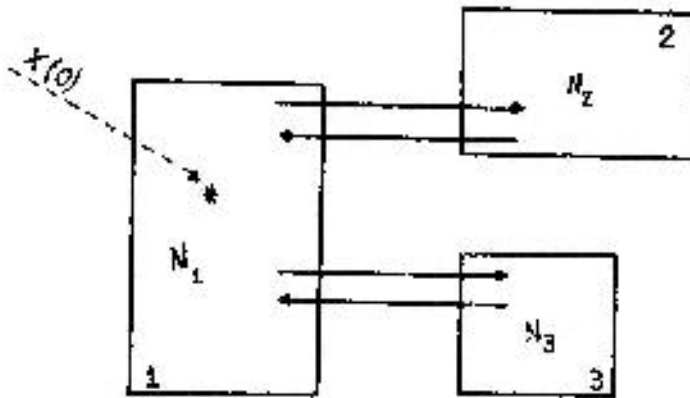
Aplicação de Radioisótopos.

Vamos analisar um problema genérico da Teoria dos Traçadores sem entrarmos em detalhes específicos.

Consideremos três compartimentos em que no tempo $t = 0$, introduzimos uma substância traçadora no compartimento 1. Vamos supor que esta se distribua instantaneamente e de modo uniforme em 1; depois se difunda para os compartimentos 2 e 3.

A quantidade inicial introduzida em 1 é de $X(0)$

3500 cps



A variação da atividade nos 3 compartimentos, em função do tempo, é representada matematicamente pelas seguintes equações diferenciais:

$$\frac{dX_1}{dt} = - P_{12} \frac{X_1}{N_1} + P_{21} \frac{X_2}{N_2} - P_{13} \frac{X_1}{N_1} + P_{31} \frac{X_3}{N_3}$$

$$\frac{dX_2}{dt} = - P_{21} \frac{X_2}{N_2} + P_{12} \frac{X_1}{N_1}$$

$$\frac{dX_3}{dt} = - P_{31} \frac{X_3}{N_3} + P_{13} \frac{X_1}{N_1}$$

onde: P_{12} = constante de permeabilidade de 1 para 2;

P_{21} = constante de permeabilidade de 2 para 1;

P_{13} = constante de permeabilidade de 1 para 3;

P_{31} = constante de permeabilidade de 3 para 1;

N_i ($i=1,2,3$) = quantidade total de substância no sistema, depois do equilíbrio.

A nossa intenção é determinar a atividade (X_i) nos 3 compartimentos após atingir um equilíbrio estável.

Por comodidade, vamos considerar:

$$P_{12} = P_{21}$$

$$P_{13} = P_{31}$$

Com isto, podemos desenvolver o problema com os seguintes itens:

1 - Equações do problema:

$$\frac{dX_1}{dt} = - P_{12} \frac{X_1}{N_1} + P_{12} \frac{X_2}{N_2} - P_{13} \frac{X_3}{N_3} + P_{13} \frac{X_3}{N_3}$$

$$\frac{dX_2}{dt} = - P_{12} \frac{X_2}{N_2} + P_{12} \frac{X_1}{N_1}$$

$$\frac{dX_3}{dt} = - P_{13} \frac{X_3}{N_3} + P_{13} \frac{X_1}{N_1}$$

2 - Constantes do problema:

$$P_{12} = 17.1 \text{ mg/seg}$$

$$P_{13} = 22.8 \text{ mg/seg}$$

$$N_1 = 7000 \text{ mg}$$

$$N_2 = 3000 \text{ mg}$$

$$N_3 = 4000 \text{ mg}$$

3 - Condições iniciais do problema:

$$X_1(0) = 3500 \text{ cps}$$

$$X_2(0) = 0 \text{ cps}$$

$$X_3(0) = 0 \text{ cps}$$

4 - Fatores de escala:

$$t' = at \longrightarrow t = \frac{t'}{a} \longrightarrow a = 5 \times 10^{-2} \frac{\text{seg}^*}{\text{seg}}$$

$$X'_1 = b X_1 \longrightarrow X_1 = \frac{X'_1}{b} \longrightarrow b = 2 \times 10^{-3} \frac{\text{volts}}{\text{cps}}$$

$$X'_2 = c X_2 \longrightarrow X_2 = \frac{X'_2}{c} \longrightarrow c = 10^{-3} \frac{\text{volts}}{\text{cps}}$$

$$X'_3 = d X_3 \longrightarrow X_3 = \frac{X'_3}{d} \longrightarrow d = 10^{-3} \frac{\text{volts}}{\text{cps}}$$

5 - Condições iniciais da máquina:

$$X'_1(0) = b \cdot X_1(0) = 2 \times 10^{-3} \times 3500 = 7 \text{ volts}$$

$$X'_2(0) = 0 \text{ volts}$$

$$X'_3(0) = 0 \text{ volts}$$

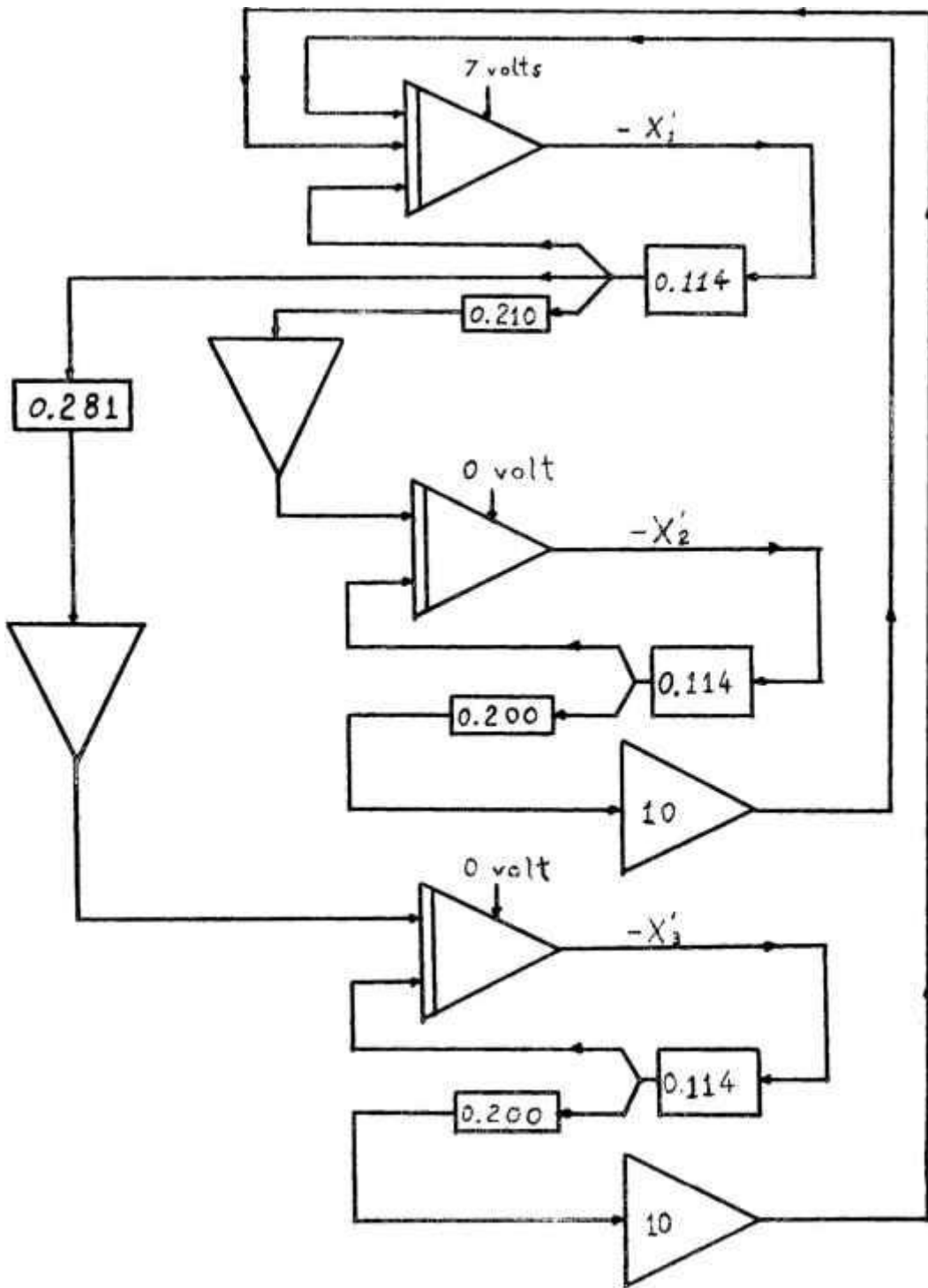
6 - Equações da máquina:

$$\frac{dX'_1}{dt'} = -0.114 X'_1 + 0.228 X'_2 + 0.228 X'_3$$

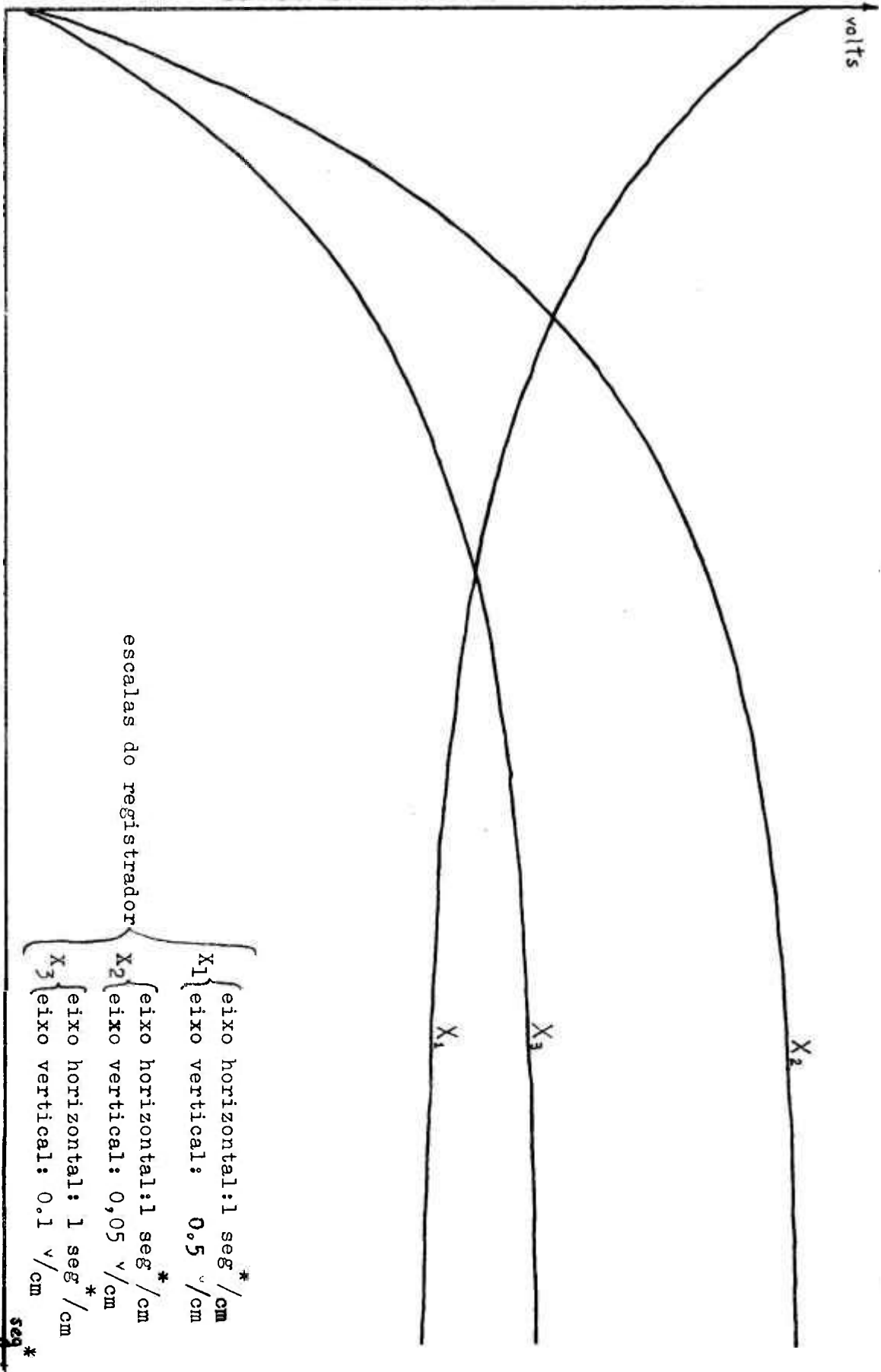
$$\frac{dX'_2}{dt'} = -0.114 X'_2 + 0.024 X'_1$$

$$\frac{dX'_3}{dt'} = -0.114 X'_3 + 0.032 X'_1$$

7 - Diagrama do Circuito:



8 - Solução do Problema 6:



9 - Verificação das soluções:

Os resultados obtidos no TR-48 nos dá que, para um tempo $t = 8.62$ minutos, o sistema atinge um equilíbrio estável; enquanto que a literatura (*) nos fornece um tempo $t = 9$ minutos.

Como bem podemos observar, o resultado por nós obtido é bastante próximo daquele indicado na literatura.

(*) I Radioisotopi Nell'Indagine Medica-G. Monastério e L. Donato

B I B L I O G R A F I A

1. TR-48 Analog Computer - Operators Manual-Eletronic Associates, Inc .
2. Maintenance Manual - Volume I - TR-48 Analog Computer Model 45.034- - Eletronic Associates, Inc.
3. L.T. Bryant, L.C. Just, and G.S. Pawlicki - Introduction to Eletronic Analogue Computing - ANL 6187.
4. William E. Scott - Fundamental Components of the "PACE" Analog Computer - ANL 6075.
5. Daniel F. Hang, Edward G. Manning - Analog Computations of Training Reactor Kinetics.
6. Clarence L. Johnson - Analog Computer Techniques- McGraw-Hill Book Company, Inc. - 1956.
7. Granino A. Korn, Theresa M. Korn - Eletronic Analog Computers-McGraw-Hill Book Company, Inc.- 1956.
8. Gabriele Monastério, Luigi Donato- I Radioisotopi Nell'Indagine Medica - Edizioni Minerva Medica.

AGRADECIMENTOS

Queremos aproveitar a oportunidade para agradecer ao Dr. Romulo Ribeiro Pieroni e Dr. Júlio Kieffer, pela sugestão e orientação em problemas sobre aplicação de radioisótopos, e em especial, ao Prof. Paulo Saraiva de Toledo, pela orientação constante e pelas valiosas discussões e sugestões na realização deste trabalho.