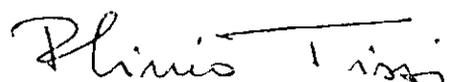


1. Classificação <i>INPE-COM. 1/TPT</i> <i>C. D. U-621. 365. 46</i>	2. Período	4. Critério de Distribuição: interna <input type="checkbox"/> externa <input checked="" type="checkbox"/>
3. Palavras Chave (selecionadas pelo autor) <i>IMAGEADOR TÉRMICO</i> <i>INFRAVERMELHO</i> <i>DETETORES PIROELÉTRICOS</i>		7. Revisado por - <i>Alderico R. de Paula Jr.</i> <i>Alderico R. de Paula Jr.</i>
5. Relatório nº <i>INPE-972-TPT/45</i>	6. Data <i>Novembro de 1976</i>	9. Autorizado por - <i>Parada</i> <i>Nelson de Jesus Parada</i> <i>Diretor</i>
8. Título e Sub-Título <i>IMAGEADOR TÉRMICO DE INFRAVERMELHO UTILIZANDO</i> <i>UM CONJUNTO DE DETETORES PIROELÉTRICOS</i> <i>DISPOSTOS AO LONGO DE UMA LINHA</i>		11. Nº de cópias <i>10</i>
10. Setor <i>DEE</i>	Código <i>400</i>	14. Nº de páginas <i>157</i>
12. Autoria <i>Alvaro Orlando Costa de Araujo Goes</i> <i>Juan Carlos Pinto de Garrido</i>		15. Preço
13. Assinatura Responsável	<i>Alvaro Orlando Costa de Araujo Goes</i> <i>Juan Carlos Pinto de Garrido</i>	
16. Sumário/Notas <i>O presente trabalho descreve o desenvolvimento de um instrumento capaz de comparar a temperatura de diversos pontos de uma superfície com a temperatura de um corpo tomada como referência. A varredura longitudinal da superfície considerada é obtida através de um espelho rotativo, enquanto a multiplexação no tempo dos sinais provenientes de um conjunto de detetores piroelétricos, distribuídos ao longo de uma linha, realiza a varredura transversal. O sinal multiplexado sofre, então, um processamento eletrônico, para que a imagem, formada de 16 linhas, seja mostrada em perspectiva sobre a tela de um Tubo de Raios Catódicos</i>		
17. Observações		

Aprovado pela Banca Examinadora
em cumprimento dos requisitos exigidos
para a obtenção do Título de Mestre em
Eletrônica e Telecomunicações

Dr. Plínio Tissi



Presidente da Banca

Eng. Alderico R. de Paula Jr., MSc.



Orientador

Dr. Eduardo W. Bergamini



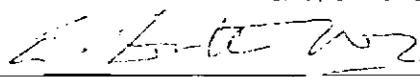
Membro da Banca

Dr. Barclay Robert Clemesha



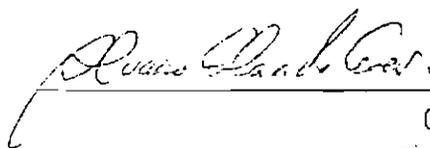
Membro da Banca

Dr. Amitava Dutta-Roy



Membro da Banca

Álvaro Orlando Costa de Araujo Goes



Candidato

Juan Carlos Pinto de Garrido



Candidato

São José dos Campos, 14 de outubro de 1976

CAPÍTULO III - ESQUEMA GERAL DO IMAGEADOR.....	33
CAPÍTULO IV - O DETETOR PIROELÉTRICO.....	37
4.1 - Características físicas.....	37
4.2 - Relação entre a potência de radiação incidente e a corrente resultante no detetor piroelétrico.....	41
4.3 - Determinação da temperatura e corrente do detetor em função do tempo.....	47
4.4 - Responsividade do detetor.....	59
CAPÍTULO V - SISTEMA DE PRÉ-AMPLIFICAÇÃO.....	73
5.1 - Descrição geral.....	73
5.2 - Projeto dos circuitos do sistema de pré-amplificação.....	78
5.2.1 - Pré-amplificador.....	78
5.2.2 - Filtro passa-alto.....	85
5.2.3 - Circuito do monoestável.....	87
5.2.4 - Chaves e seus circuitos de controle.....	90
5.2.5 - Circuito do integrador.....	93
CAPÍTULO VI - SISTEMA DE MULTIPLEXAÇÃO.....	95
6.1 - Descrição geral.....	95
6.2 - Biestável RS.....	98
6.3 - Astável.....	100
6.4 - Contador Síncrono.....	101
6.5 - Multiplexador.....	103

CAPÍTULO VII - CIRCUITO DE SINCRONISMO.....	107
7.1 - Descrição geral.....	107
7.2 - Realização física do circuito de sincronismo.....	108
CAPÍTULO VIII - IMAGEM FORMADA NO TUBO DE RAIOS CATÓDICOS.....	115
8.1 - Descrição geral.....	115
8.2 - Circuito gerador de rampa.....	116
8.3 - Controle do Eixo Horizontal do Tubo de Raios Catódicos....	118
8.4 - Controle do Eixo Vertical do Tubo de Raios Catódicos.....	121
8.5 - Controle do Eixo de Modulação de Intensidade Luminosa do Tubo de Raios Catódicos.....	123
8.6 - Correção no controle do Eixo Vertical do Tubo de Raios Catódicos, devido ao movimento de rotação do espelho E ₁ ...	126
CAPÍTULO IX - CONCLUSÕES.....	129
AGRADECIMENTOS.....	134
BIBLIOGRAFIA.....	135
APÊNDICE A - Programa auxiliar para determinação da área varrida por 16 e 100 detetores piroelétricos.....	A.1
APÊNDICE B - Programa auxiliar para o traçado das curvas da tem peratura e corrente do detetor em função do tempo..	B.1
APÊNDICE C - Programa auxiliar para o traçado das curvas do m <u>o</u> du lo e fase da responsividade.....	C.1
APÊNDICE D - Programa auxiliar para o traçado da curva da tens <u>o</u> de saída do pr <u>e</u> -amplificador em função do tempo....	D.1

ABSTRACT

The present work describes the design of an instrument which can compare the temperature of a target, with the known temperature of a standard body. The longitudinal sweep of the target is performed by a rotating mirror, while the transversal sweep is obtained by the time multiplexing of a set of pyroelectric detectors distributed along a line. The multiplexed signal is electronically processed, in order to get a 16-line image, displayed in perspective on the screen of a Cathode Ray Tube.

LISTA DE SÍMBOLOS

- a - espessura do detetor
- A - área da superfície normal ao eixo polar
- A_e - área do espelho esférico E_2
- CVI - campo de visão instantâneo
- c_p - calor específico
- E_f - energia fornecida ao sistema
- E_p - energia perdida
- E_1 - espelho plano rotativo de forma elíptica
- E_2 - espelho esférico
- E_3 - espelho plano de forma elíptica
- FOV - campo de visão ("field of view")
- h - constante de Planck
- $h(t)$ - transformada inversa de Laplace da responsividade
- H - capacidade térmica
- I_d - corrente de deslocamento
- k - constante de Boltzmann
- m - massa
- N - radiância total
- N_λ - radiância espectral
- NEP - potência equivalente de ruído
- $p(T)$ - coeficiente piroelétrico
- $P(T)$ - coeficiente de polarização do cristal em função da temperatura
- r_{\min} - raio mínimo da mancha circular devido à aberração esférica
- R_T - resistência térmica

$R_{E_1}, R_{E_2}, R_{E_3}$ - reflectância dos espelhos E_1, E_2 e E_3 .

R_{TH} - constante de tempo térmica

t_p - período da potência incidente sobre os detetores

T - temperatura do detetor em relação a seu suporte

V - volume

ω - frequência angular

W_0 - potência de radiação média incidente sobre os detetores

$W(t)$ - potência da radiação incidente sobre os detetores em função do tempo

W_p - potência perdida pelo detetor

ΔE - variação da energia interna do sistema

ΔN_λ - diferença de potência emitida

ΔT - resolução de temperatura

ϵ - emissividade

σ - constante de Stefan - Boltzmann

ϕ - abertura de espelho esférico E_2

λ - comprimento de onda

ρ - densidade

Ω - ângulo sólido sob o qual o elemento de área é visto

LISTA DE FIGURAS

Figura I.1 - Potência emitida por um corpo negro com temperatura na faixa de 0 a 40°C	2
Figura II.1 - Sistema Ótico Mecânico do Imageador	8
Figura II.2 - Faixa transversal do alvo focalizada sobre a linha de detetores	9
Figura II.3 - Circuito para obtenção dos pulsos de sincronismo FOV e CVI	12
Figura II.4 - Área varrida pela linha de detetores no plano do alvo	13
Figura II.5 - Sistema de coordenadas auxiliares uvw para aplicação da lei da reflexão	14
Figura II.6 - Aplicação da lei da reflexão no sistema de coordenadas uvw	16
Figura II.7 - Área varrida no plano do alvo por 16 detetores pirolétricos	19
Figura II.8 - Área varrida no plano do alvo por 100 detetores pirolétricos	20
Figura II.9 - Radiância espectral para uma temperatura fixa T .	21
Figura II.10 - Mancha circular provocada pela aberração esférica.	26
Figura II.11 - Astigmatismo	27

Figura II.12 - Desfocalização de uma linha transversal do alvo, devido aos detetores que estão afastados do eixo principal do espelho.....	29
Figura II.13 - Calota resultante da área de E_3 projetada sobre E_2	30
Figura II.14 - Área das duas calotas.....	32
Figura III.1 - Esquema geral do Imageador.....	35
Figura IV.1 - Circuito equivalente para a medida direta do $p(\tau)$...	39
Figura IV.2 - Montagem para a medida do coeficiente piroelétrico...	40
Figura IV.3 - Corrente piroelétrica em função da temperatura.....	40
Figura IV.4 - Circuito elétrico com tensão de saída V , que apresenta uma eq. diferencial análoga à eq. derivada da lei da Conservação da Energia.....	44
Figura IV.5 - Gráfico de $\left \frac{I(\omega)}{W(\omega)} \right $ em função de ω	45
Figura IV.6 - Gráfico da fase de $\frac{I(\omega)}{W(\omega)}$ em função de ω	46
Figura IV.7 - Circuito equivalente do detetor piroelétrico.....	47
Figura IV.8 - Forma de onda aproximada para a potência incidente $W(t)$	47
Figura IV.9 - Gráfico da temperatura em função do tempo.....	57
Figura IV.10 - Gráfico da corrente em função do tempo.....	58
Figura IV.11 - Circuito equivalente do detetor seguido do pré-amplificador.....	59
Figura IV.12 - Módulo da responsividade em função da frequência...	62
Figura IV.13 - Fase da responsividade em função da frequência....	63

Figura IV.14 - Formas de onda para $h_i(u)$ e $h_i(t-u)$	65
Figura IV.15 - Convolução entre $h_i(t)$ e $W(t)$ para um instante $t = ntp + \alpha tp/2; 0 \leq \alpha \leq 1$	65
Figura IV.16 - Convolução entre $h_i(t)$ e $W(t)$ para um instante $t = (n+1/2)tp + \alpha tp/2; 0 \leq \alpha \leq 1$	68
Figura IV.17 - Gráfico da tensão na entrada do pré-amplifica- dor em função do tempo.....	71
Figura V.1 - Circuitos do sistema de pré-amplificação corres- pondentes a somente um detetor.....	75
Figura V.2 - Formas de onda geral processadas no Imageador	77
Figura V.3 - Circuito do pré-amplificador.....	79
Figura V.4 - Filtro passa-altas.....	85
Figura V.5 - Circuito do monoestável (1).....	88
Figura V.6 - Circuito do monoestável (2).....	90
Figura V.7 - Circuito da chave e seu controle.....	91
Figura V.8 - Circuito do integrador.....	94
Figura VI.1 - Circuitos do sistema de multiplexação.....	96
Figura VI.2 - Formas de onda do sistema de multiplexação.....	97
Figura VI.3 - Biestável realizado com portas "NOR".....	99
Figura VI.4 - Matriz de fluxo do biestável.....	99
Figura VI.5 - Circuito do astável.....	100
Figura VII.1 - Circuito de sincronismo.....	110
Figura VII.2 - Formas de onda do circuito de sincronismo.....	111
Figura VIII.1 - Imagem em perspectiva formada sobre o TRC.....	115
Figura VIII.2 - Circuito de varredura Miller para obtenção das rampas α , β e γ	117
Figura VIII.3 - Circuito somador das rampas α e γ	118

Figura VIII.4 - Duas posições da imagem no TRC realizadas pelo controle Perspectiva.....	120
Figura VIII.5 - Circuito somador da rampa β e do sinal de $v_{i\text{deo}}$	121
Figura VIII.6 - Duas posições da imagem do TRC realizadas pelo controle Ajuntamento.....	123
Figura VIII.7 - Chave analógica.....	124
Figura VIII.8 - Somador de ganho unitário.....	125
Figura VIII.9 - Correção da forma de onda a ser fornecida ao Eixo Vertical do TRC.....	126
Figura VIII.10 - Formas de onda para obtenção do sinal RIV. (a) Entrada S_Y ; (b) Saídas do Contador; (c) Saída do conversor D/A; (d) Sinal RIV desejado.....	128
Figura IX.1 - Forma de onda experimental obtida na saída do pré-amplificador.....	130

LISTA DE TABELAS

Tabela IV.1 - Temperatura e corrente em regime estacionário....	54
Tabela IV.2 - Parâmetros do detetor.....	54
Tabela V.1 - Parâmetros do "FET" BFW10.....	80
Tabela V.2 - Tabela de funções do 74123.....	87
Tabela VI.1 - Estados do contador síncrono.....	102
Tabela VI.2 - Tabela de verdade do 4051AE.....	104
Tabela VII.1 - Estados do contador.....	112
Tabela VIII.1 - Parâmetros das rampas α , β e γ	118

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 - NATUREZA DA RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

A radiação infravermelha é uma forma de radiação eletromagnética, do visível às microondas, pois apresenta comprimentos de onda entre $0,7 \mu\text{m}$ até aproximadamente $1000 \mu\text{m}$.

Qualquer corpo com temperatura superior ao zero absoluto (-273°C) emite radiação infravermelha, sendo que a maior parte da potência emitida por um corpo com temperatura de 0° a 40°C se concentra na faixa do espectro entre $5 \mu\text{m}$ e $15 \mu\text{m}$ (Figura 1.1).

A região útil do infravermelho, que iremos considerar, se estende de 8 a $14 \mu\text{m}$ porque, nesta região, a energia emitida, pelos corpos com temperatura entre 0 e 40°C , possui um máximo, e as variações de energia seguem de modo aproximadamente linear as variações de temperatura. Portanto, nesta faixa, obtemos medições mais precisas de temperatura.

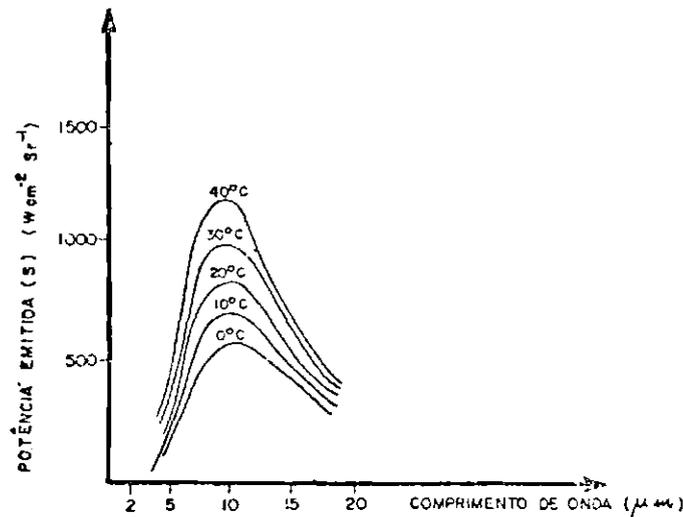


Fig. I.1 - Potência emitida por um corpo negro com temperatura na faixa de 0 a 40°C.

1.2 - DETEÇÃO DE RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

A radiação, proveniente do objeto de interesse será, sempre, comparada com a radiação de uma fonte de referência. A radiação, focalizada sobre o detetor, deve fornecer uma variação de sinal acima do ruído do detetor e do pré-amplificador.

Certo tipo de detetor responde somente a variações de energia radiante. É necessário, então, uma fonte de referência, de modo

que possamos medir diferenças de energia radiante, quando o detetor visualiza, alternadamente, o objeto e a fonte de referência. A medida da diferença, entre a temperatura do objeto e a da referência, pode ser realizada utilizando-se um disco rotativo, com diversas janelas, chamado disco de amostragem. Portanto, a variação do sinal de saída é relacionada à diferença entre a radiação do objeto e do disco de amostragem.

Os detetores que utilizam o efeito do calor das radiações emitidas por uma determinada superfície são chamados detetores térmicos. O tipo de detetor térmico que utilizamos neste trabalho é o detetor piroelétrico. Eletricamente, ele se comporta como um gerador de corrente em paralelo com um capacitor, quando existe variação de temperatura.

1.3 - PROPRIEDADES IMPORTANTES DOS DETETORES

As propriedades mais importantes dos detetores são:

1.3.1 - RESPONSIVIDADE

A finalidade de um detetor é converter radiação eletromagnética em sinal elétrico. Assim, a propriedade básica que define o desempenho de um detetor é a razão entre a saída elétrica (volts ou ampères) e a potência incidente (watts) sobre a área sensível do detetor; esta relação é chamada responsividade.

1.3.2 - POTÊNCIA EQUIVALENTE DE RUÍDO (NEP)

A agitação térmica dos elétrons é responsável pelo ruído elétrico nos detetores. Este ruído estabelece um limite para o nível mínimo de radiação que pode ser detetado. O ruído de um detetor é definido como o valor r.m.s da saída elétrica, medida numa banda passante de 1Hz, centralizada em uma dada frequência, sob condições de operação típicas. Essa quantidade pode ou não depender da frequência em uma determinada faixa. No caso de ser independente da frequência, ela é denominada "ruído branco" nesta faixa. Para este ruído, a magnitude medida é proporcional à raiz quadrada da banda passante, de modo que o ruído de um detetor é medido em V/\sqrt{Hz} .

A relação sinal-ruído deve ser verificada, quando pretendemos utilizar um detetor para medir pequenas quantidades de radiação. Isso depende da intensidade da radiação usada, da frequência de modulação, do ruído e da banda passante. Uma quantidade mais útil é a potência equivalente de ruído ou NEP. Esta é definida como a quantidade de energia detetada, que dará um sinal igual ao ruído em uma banda passante de 1Hz. Em geral, a NEP é uma função do comprimento de onda e da frequência de medida. A NEP também pode ser definida como sendo o quociente entre o ruído (por unidade de banda passante) e a responsividade.

1.4 - O IMAGEADOR DE INFRAVERMELHO

Os Imageadores são sistemas constituídos de um ou mais detetores, os quais, geralmente, operam no infravermelho e são capazes de captar energia radiante de um determinado alvo. Através dos Imageadores

obtêm-se um quadro das diferenças de radiação e, conseqüentemente, das diferenças de temperatura, que podem ser apresentadas diretamente sobre a tela de um Tubo de Raios Catódicos.

O Imageador, referente a este trabalho, possui 16 detetores piroelétricos e tem a finalidade de servir como protótipo para um Imageador com 100 detetores.

CAPÍTULO II

SISTEMA ÓTICO-MECÂNICO DO IMAGEADOR TÉRMICO DO INFRAVERMELHO

2.1 - DESCRIÇÃO GERAL

O Imageador Térmico do Infravermelho (Figura II.1) possui um conjunto de 16 detetores piroelétricos, dispostos ao longo de uma linha, destinados a captar radiações das faixas transversais do alvo. Estas radiações incidem sobre o espelho plano rotativo E_1 , sendo por ele refletidas para o espelho esférico convergente E_2 ; este concentra as radiações de forma que, após serem refletidas pelo espelho plano E_3 , incidem sobre os detetores.

A varredura transversal do alvo é realizada através da multiplexação, no tempo, dos sinais dos detetores. A faixa transversal, focalizada sobre os detetores, é função do ângulo de rotação do espelho E_1 . A varredura no sentido longitudinal é realizada pela rotação do espelho E_1 ; portanto, neste sentido se verifica um deslocamento das faixas transversais, que são focalizadas sobre os detetores.

Da área total varrida pelo Imageador, somente será utilizada aquela que estiver sendo vista sob um ângulo de 60° pelo aparelho. Esta área é suposta estar sobre um plano vertical e é chamada Campo de Ação de Varredura Vertical (CAVV). O elemento de área visado por um detetor em um dado instante será chamado de Campo de Visão Instantâneo (CVI), sendo que a cada elemento está associada uma temperatura média.

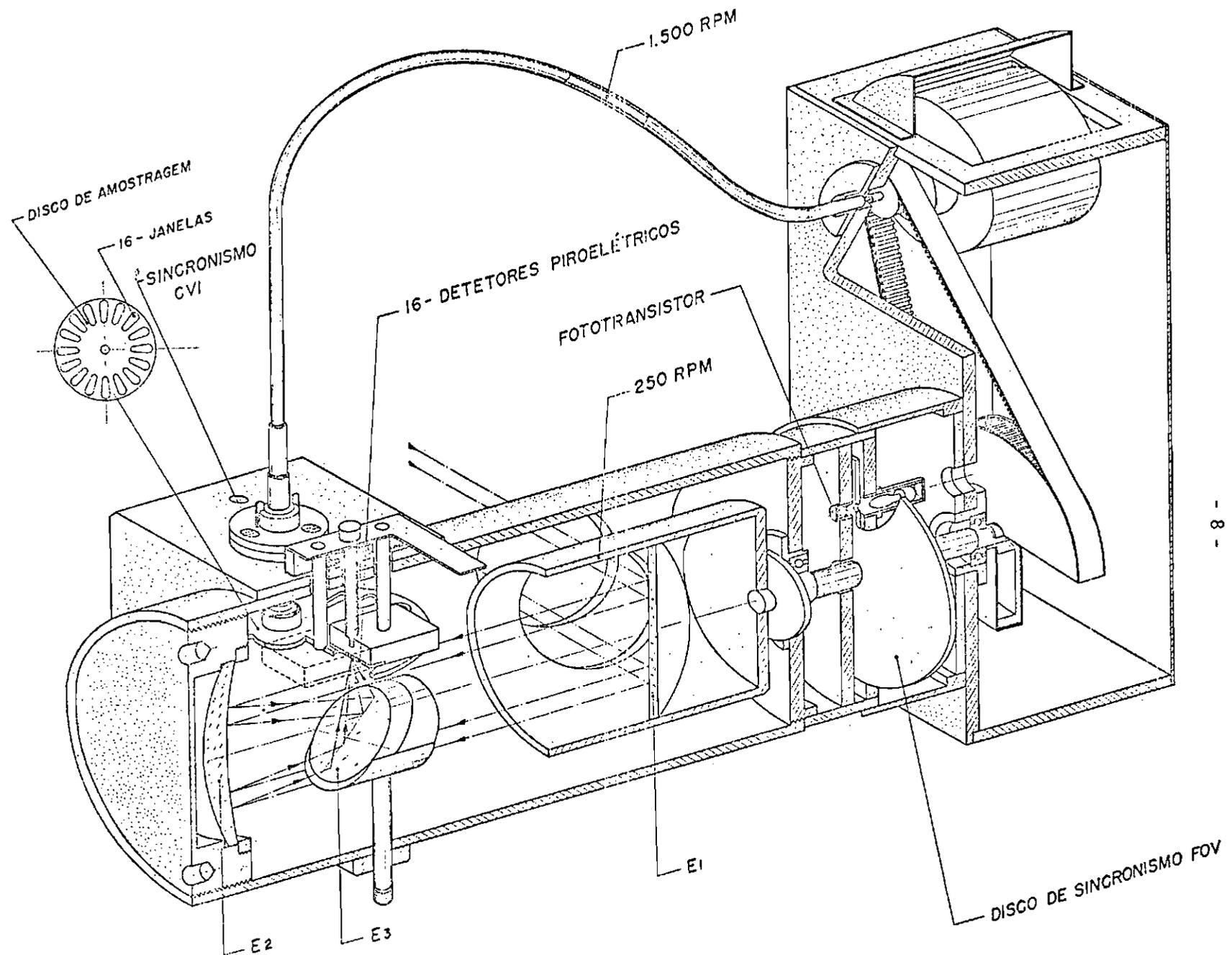


Fig. II.1 - Sistema Ótico-Mecânico do Imageador

A escolha do ângulo de visão instantâneo depende da área do elemento de resolução e da distância deste ao aparelho. Como o Imageador se destina a medidas de laboratório, decidiu-se que esta distância seria de 3 metros e o elemento de resolução deveria ser um quadrado de 3 cm. de lado; portanto, o aparelho deve ter um ângulo de visão instantâneo de 10 mrd. Uma vez especificado este ângulo, podemos determinar a distância focal do sistema ótico, se o tamanho do detetor é conhecido. Se o detetor tiver 0,1 cm de lado, o comprimento de uma linha de detetores é 1,6 cm, sem considerarmos o espaçamento existente entre eles. O tamanho de uma faixa transversal do alvo é 48cm. A Figura II.2 ilustra como uma faixa transversal é focalizada sobre os detetores.

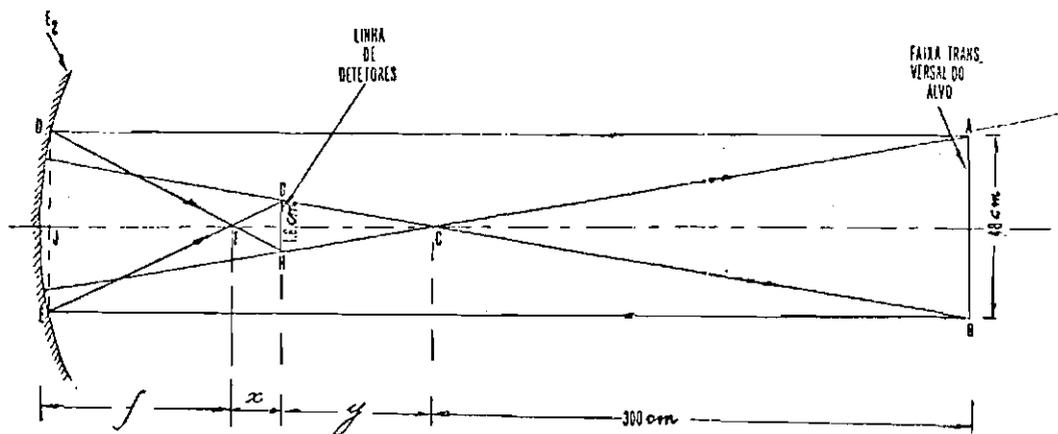


Fig. II.2 - Faixa transversal do alvo focalizada sobre a linha de detetores.

A semelhança entre os triângulos ABC e CGH fornece:

$$\frac{48 \text{ cm}}{1,6 \text{ cm}} = \frac{300}{y} \quad y = 10 \text{ cm}$$

A distância focal f é, aproximadamente, igual a FJ.. Portanto, da semelhança entre os triângulos DEF e FGH, resulta:

$$\frac{48 \text{ cm}}{1,6 \text{ cm}} = \frac{f}{x} \quad x = \frac{f}{30}$$

Como o espelho é esférico, a distância focal f é metade do raio da curvatura. Portanto: $f = x + y$, resultando:

$$f = \frac{30}{29} y \quad f = 10,34 \text{ cm}$$

A linha de detetores deve estar a uma distância $x = 0,34$ cm do foco do espelho E_2 .

Para que o Imageador tenha uma boa resolução de temperatura, é necessário que a menor variação detetável de radiação, proveniente do alvo, seja suficiente para produzir uma relação sinal - ruído (RSR) maior que 1.

$$RSR = \frac{\text{amplitude do sinal}}{\text{amplitude do ruído}} > 1$$

2.2 - SINCRONISMO PARA O PROCESSAMENTO ELETRÔNICO DO SINAL

O Imageador possui um disco rotativo de amostragem (Figura II.1) com 16 janelas. Esse disco permite que os detetores sejam, ora expostos às radiações do alvo, ora às radiações do próprio disco.

O disco de sincronismo FOV fornece um sinal, o qual indica que a superfície a ser imageada está dentro do campo de visão do aparelho. A obtenção deste sinal é feita pela iluminação de um fototransistor através de uma simples abertura nesse disco.

Um outro sinal, denominado sincronismo CVI, indica o início de cada linha transversal a ser varrida e é realizado pela iluminação de um fototransistor focalizado em frente ao disco de amostragem. Portanto, quando um pulso de CVI ocorre, os detetores estão expostos às radiações do alvo.

Um pulso de sincronismo FOV e 96 pulsos de sincronismo CVI ocorrem para cada rotação do espelho E_1 . O movimento de rotação do disco de amostragem é fornecido por um motor com velocidade de 1500 RPM. A transmissão de movimento, realizada por uma correia dentada, fornece a velocidade de 250 RPM para E_1 e para o disco de sincronismo FOV. Assim, teremos 4,17 quadros/s, sendo cada quadro composto de 16 linhas transversais. Os detetores recebem energia destas linhas com uma frequência de 400 Hz.

2.3 - OBTENÇÃO DOS PULSOS DE SINCRONISMO FOV E CVI

O circuito para obtenção dos pulsos de sincronismo FOV e CVI é mostrado na Figura II.3.

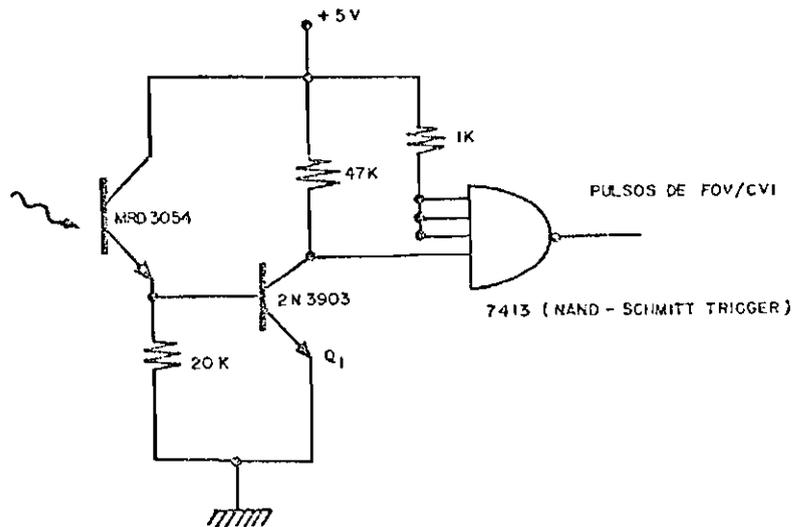


Fig. II.3 - Circuito para obtenção dos pulsos de sincronismo FOV e CVI

Este circuito representa uma maneira pela qual os foto transistores podem ser acoplados com TTL. O transistor Q_1 deve ser capaz de drenar 1,6 mA em 0,8 volts para assegurar nível lógico "0" na entrada da porta. O 7413 é um "NAND-SCHMITT TRIGGER", cuja saída mudará de estado, assim que sua entrada alcance um nível de disparo, não obstante o tempo de subida do sinal de entrada. Teremos, então, uma comutação rápida, evitando o aparecimento de qualquer oscilação na saída.

2.4 - ÁREA VARRIDA PELOS DETETORES NO PLANO DO ALVO

A Figura II.4 apresenta o espelho rotativo E_1 e um sistema de coordenadas xyz, cuja origem é o centro deste espelho. Se não con

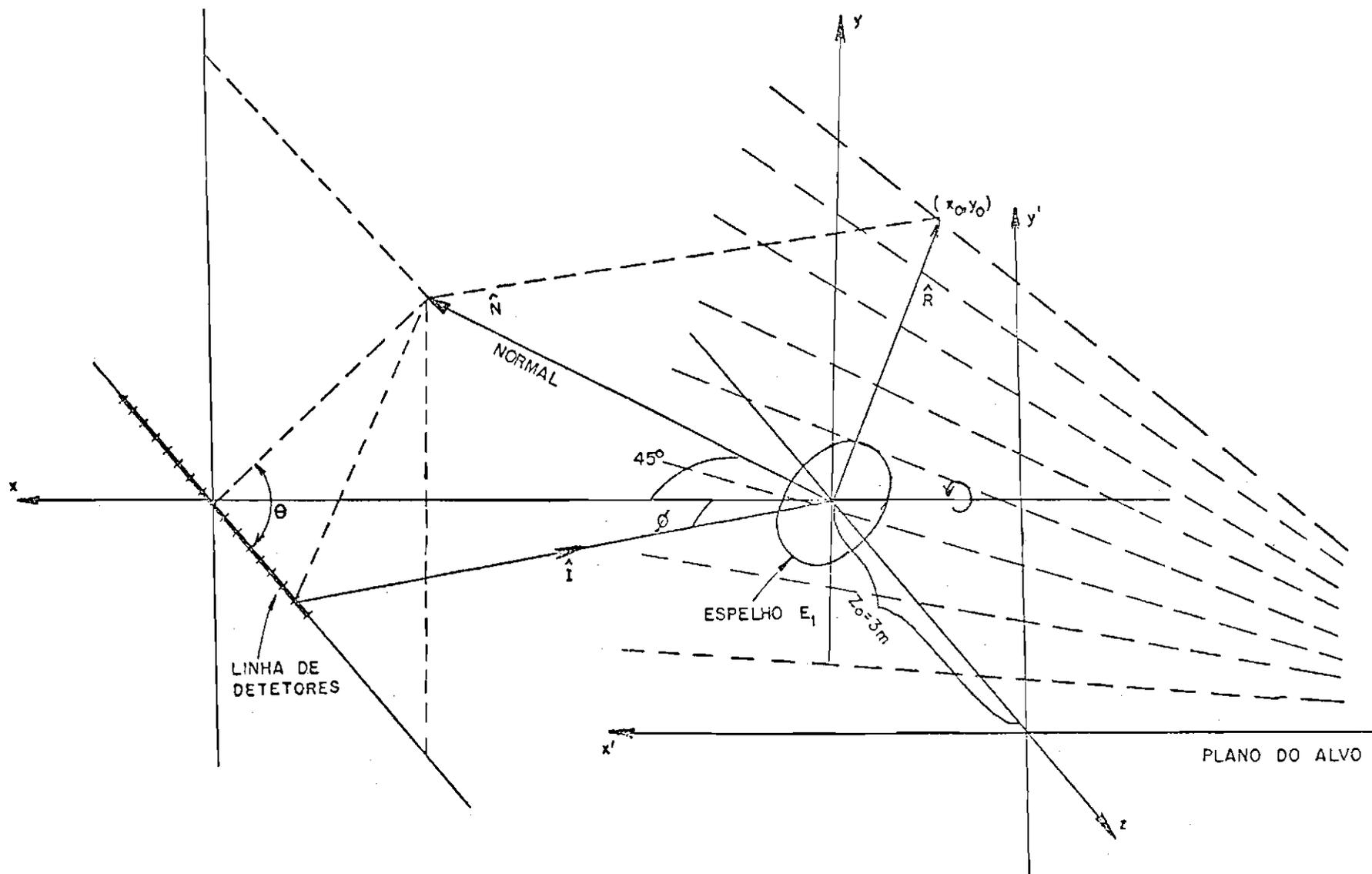


Fig. II. 4- Área varrida pela linha de detetores no plano do alvo

siderarmos a reflexão provocada por E_3 e rebatermos a linha de detetores de 90° , esta pode ser representada sobre uma linha paralela ao eixo z , a uma distância de 0,34 cm do foco de E_2 . O espelho E_1 gira com um ângulo θ , contado a partir do eixo z , sendo x o eixo de rotação. A normal \hat{N} ao plano de E_1 faz sempre um ângulo de 45° com o eixo de rotação x .

Para determinar a área varrida pelos detetores no plano do alvo, consideremos um sistema de coordenadas auxiliares uvw , onde u e v contêm os eixos maior e menor do espelho de forma elíptica E_1 , e w contém a normal ao plano de E_1 . (Figura II.5). Aplicamos, então, a lei

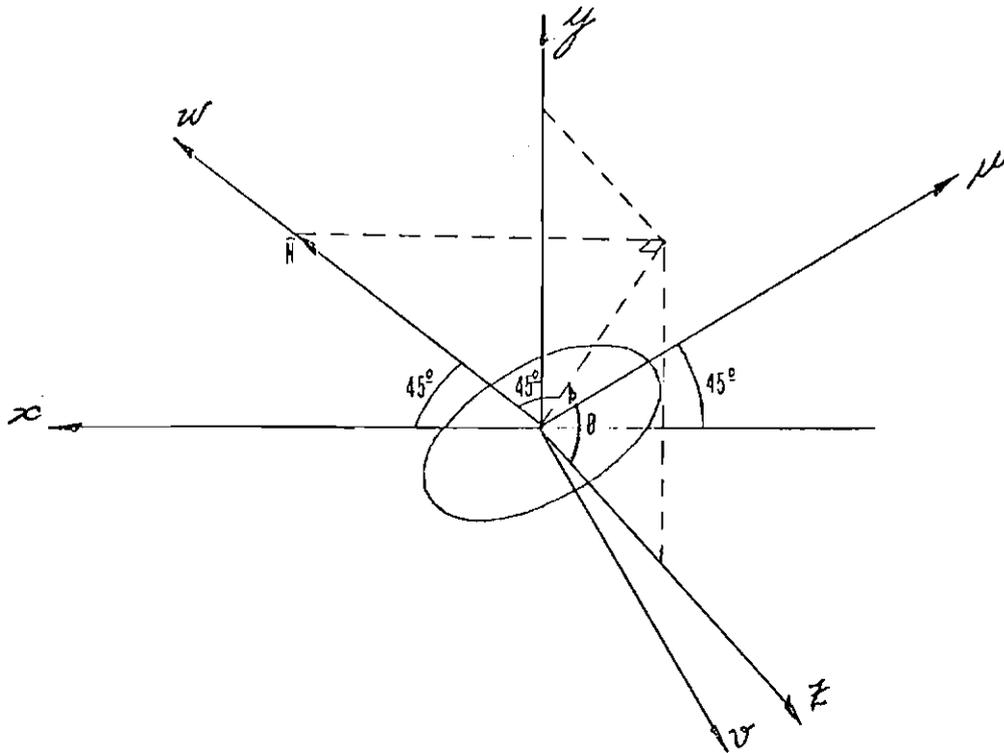


Fig. II.5 - Sistema de coordenadas auxiliares uvw para aplicação da lei da reflexão.

da reflexão para um raio \hat{I} , proveniente de um dos detetores que, após refletir no espelho esférico E_2 , passa pelo seu centro; como o centro de E_2 foi projetado para coincidir com o centro de E_1 , o raio escolhido incide no centro deste, fazendo um ângulo ϕ com o eixo x (Figura II.4).

Os vetores unitários \hat{u} , \hat{v} , $\hat{w} = \hat{N}$ e o raio \hat{I} podem ser expressos, através de seus cossenos diretores, em relação ao sistema de coordenadas xyz , pelas seguintes expressões:

$$\begin{aligned}\hat{u} &= -\cos 45^\circ \hat{x} + \cos 45^\circ \sin \theta \hat{y} + \cos 45^\circ \cos \theta \hat{z} \\ \hat{v} &= -\cos \theta \hat{y} + \sin \theta \hat{z} \\ \hat{w} = \hat{N} &= \cos 45^\circ \hat{x} + \cos 45^\circ \sin \theta \hat{y} + \cos 45^\circ \cos \theta \hat{z}\end{aligned}\tag{II.1}$$

$$\hat{I} = -\cos \phi \hat{x} - \sin \phi \hat{z}\tag{II.2}$$

A lei da reflexão estabelece que um raio \hat{I} fazendo um determinado ângulo com a normal ao plano de incidência, reflete-se com esse mesmo ângulo. Com essa lei vai ser aplicada no sistema de coordenadas auxiliares uvw , devemos expressar os vetores unitários \hat{x} , \hat{y} e \hat{z} neste sistema. Portanto:

$$\begin{aligned}\hat{x} &= -\cos 45^\circ \hat{u} + \cos 45^\circ \hat{w} \\ \hat{y} &= \cos 45^\circ \sin \theta \hat{u} - \cos \theta \hat{v} + \cos 45^\circ \sin \theta \hat{w} \\ \hat{z} &= \cos 45^\circ \cos \theta \hat{u} + \sin \theta \hat{v} + \cos 45^\circ \cos \theta \hat{w}\end{aligned}\tag{II.3}$$

Podemos expressar o raio \hat{I} no sistema de coordenadas uvw , substituindo a Fórmula (3) em (2). Logo:

$$\hat{I} = -\cos \phi (-\cos 45^\circ \hat{u} + \cos 45^\circ \hat{w}) - \sin \phi (\cos 45^\circ \cos \theta \hat{u} + \sin \theta \hat{v} + \cos 45^\circ \cos \theta \hat{w})$$

ou seja:

$$\hat{I} = \cos 45^{\circ} (\cos \phi - \operatorname{sen} \phi \cos \theta) \hat{u} - \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \theta \hat{v} - \cos 45^{\circ} (\cos \phi + \operatorname{sen} \phi \cos \theta) \hat{w} \quad (\text{II.4})$$

Aplicando a lei da reflexão, verificamos que as componentes do vetor refletido \hat{R} nas direções \hat{u} e \hat{v} não se modificam em intensidade e sentido; entretanto, na direção \hat{w} a componente de \hat{R} tem a mesma intensidade, porém, o sentido contrário em relação à componente de \hat{I} nesta direção (Figura II.6).

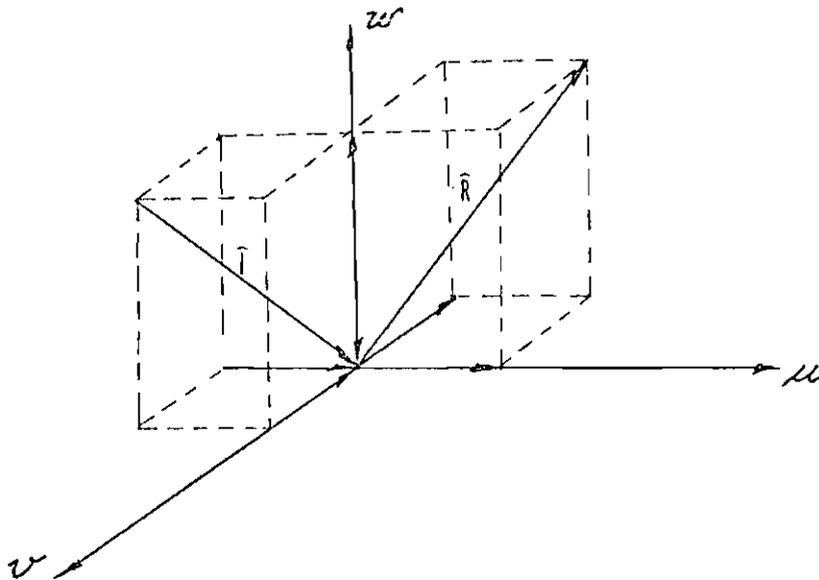


Fig. II.6 - Aplicação da lei da reflexão no sistema de coordenadas uw.

Portanto, o raio refletido \widehat{R} tem a seguinte expressão:

$$\begin{aligned}\widehat{R} = & \cos 45^{\circ} (\cos \phi - \operatorname{sen} \phi \cos \theta) \widehat{u} - \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \theta \widehat{v} + \\ & + \cos 45^{\circ} (\cos \phi + \operatorname{sen} \phi \cos \theta) \widehat{w}\end{aligned}\quad (\text{II.5})$$

O raio \widehat{R} pode ser expresso no sistema de coordenadas xyz, aplicando a Fórmula (1) em (5). Temos, então:

$$\begin{aligned}\widehat{R} = & \cos 45^{\circ} (\cos \phi - \operatorname{sen} \phi \cos \theta) (-\cos 45^{\circ} \widehat{x} + \cos 45^{\circ} \operatorname{sen} \theta \widehat{y} + \\ & \cos 45^{\circ} \cos \theta \widehat{z}) - \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \theta (-\cos \theta \widehat{y} + \operatorname{sen} \theta \widehat{z}) + \cos 45^{\circ} (\cos \phi + \\ & \operatorname{sen} \phi \cos \theta) (\cos 45^{\circ} \widehat{x} + \cos 45^{\circ} \operatorname{sen} \theta \widehat{y} + \cos 45^{\circ} \cos \theta \widehat{z})\end{aligned}$$

ou seja:

$$\begin{aligned}\widehat{R} = & \operatorname{sen} \phi \cos \theta \widehat{x} + \operatorname{sen} \theta (\cos \phi + \operatorname{sen} \phi \cos \theta) \widehat{y} + (\cos \phi \cos \theta - \\ & \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen}^2 \theta) \widehat{z}\end{aligned}\quad (\text{II.6})$$

Fazendo $A = \cos \phi + \operatorname{sen} \phi \cos \theta$, os cossenos diretores de \widehat{R} , em relação a xyz, são:

$$\begin{aligned}l_R &= A - \cos \phi \\ m_R &= A \operatorname{sen} \theta \\ n_R &= A \cos \theta - \operatorname{sen} \phi\end{aligned}\quad (\text{II.7})$$

As coordenadas (x_0, y_0) do vetor \widehat{R} sobre o plano vertical do alvo, situado a uma distância $z_0 = 3\text{m}$ do plano xy, podem ser expressos por:

$$x_0 = z_0 \frac{l_R}{n_R}\quad (\text{II.8})$$

$$y_0 = z_0 \frac{m_R}{n_R}\quad (\text{II.9})$$

O campo de visão do aparelho \bar{e} definido entre $\theta = -30^\circ$ e $\theta = +30^\circ$ em relação ao eixo z. Como 16 linhas do alvo são varridas dentro do campo de visão, os valores que o ângulo de rotação θ podem tomar são: $\theta = \pm 2^\circ, \pm 6^\circ, \pm 10^\circ, \pm 14^\circ, \pm 18^\circ, \pm 22^\circ, \pm 26^\circ, \pm 30^\circ$.

Considerando uma linha de 16 detetores piroelétricos, o ângulo ϕ associado a cada detetor pode tomar, aproximadamente, os seguintes valores: ± 10 mrd, ± 20 mrd,, ± 80 mrd, ou seja: $\phi = \pm 0,573^\circ, \pm 1,146^\circ, \dots, \pm 4,574^\circ$. Para 100 detetores, ϕ pode variar, aproximadamente, de ± 10 mrd até ± 500 mrd, ou seja, de $\pm 0,573^\circ$ até $\pm 28,66^\circ$.

No Apêndice A \bar{e} mostrado um programa em FORTRAN, usado para nos auxiliar no traçado dos gráficos, que representam a área varrida, no plano do alvo, por 16 e por 100 detetores piroelétricos. (Figuras II.7 e II.8).

2.5 - POTÊNCIA INCIDENTE SOBRE OS DETETORES

A radiância total N , em um ponto de uma superfície radiante, numa determinada direção, \bar{e} definida como a potência radiante (em watts) nesta direção, por unidade de ângulo sólido, por unidade de área projetada. A radiação espectral N_λ \bar{e} definida pela variação da radiância N com o comprimento de onda, no intervalo $(\lambda, \lambda + d\lambda)$, ou seja:

$$N_\lambda = \frac{\partial N(\lambda, T)}{\partial \lambda} \left[\text{watts m}^{-2} \text{str}^{-1} \mu^{-1} \right] \quad (\text{II.10})$$

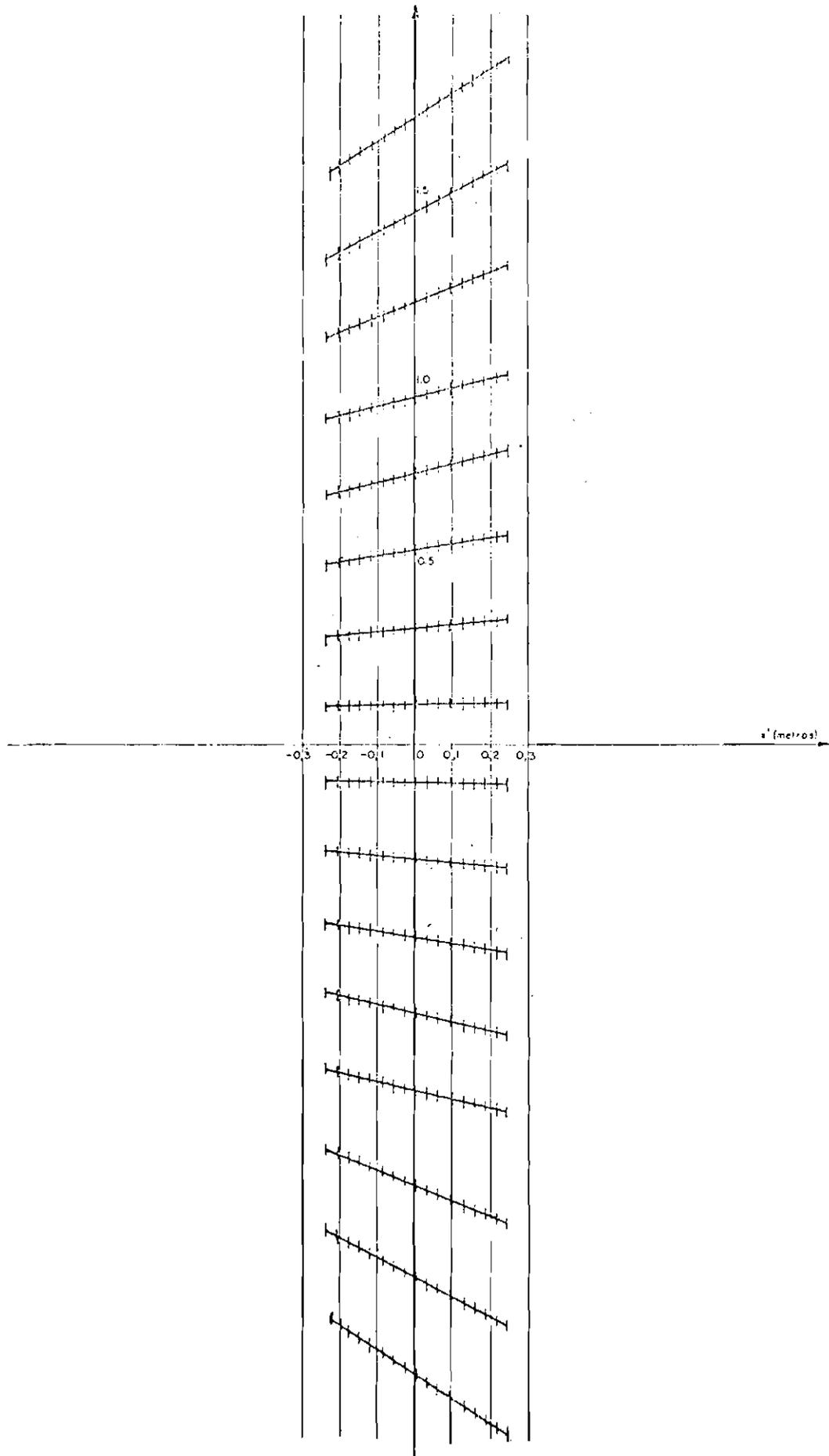


Fig. II.7 - Área varrida no plano do alvo por 16 detetores piroelétricos

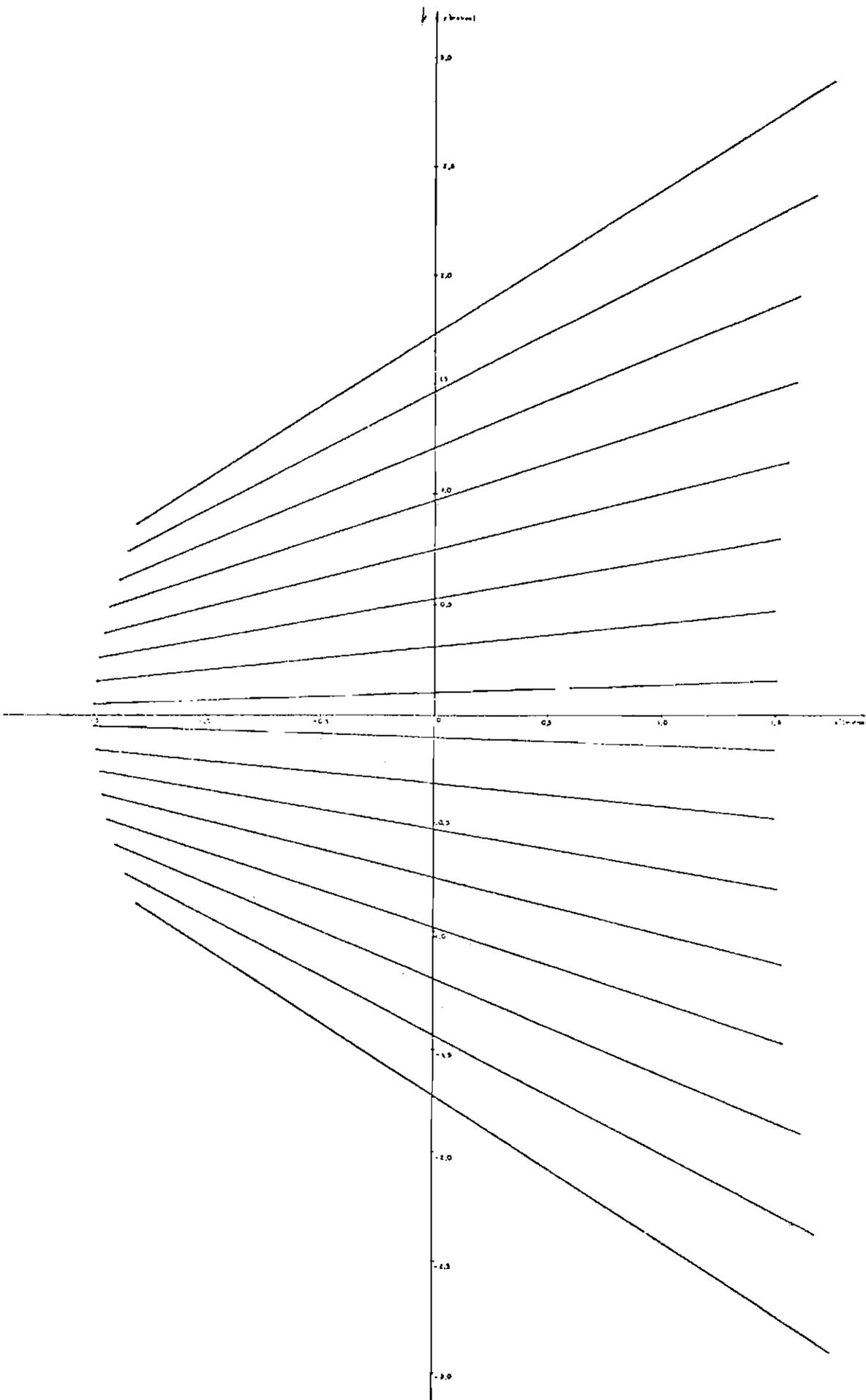


Fig. II.8 - Área varrida no plano do alvo por 100 detetores piroelétricos

A lei da radiação estabelecida por Planck para a radiação espectral de um corpo negro é:

$$N_{\lambda} = \frac{c_1}{\pi} \lambda^{-5} (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} \quad (II.11)$$

onde:

$$c_1 = 2\pi c^2 h \quad (II.12)$$

$$c_2 = ch/k \quad (II.13)$$

h = constante de Planck = $6,6252 \times 10^{-34}$ watts. s²

c = velocidade da luz = 3×10^8 m/s

k = constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ joule/⁰K

λ = comprimento de onda

T = temperatura em ⁰K da superfície emissora

Para uma temperatura fixa T , a radiação espectral é função somente do comprimento de onda λ (Figura II.9)

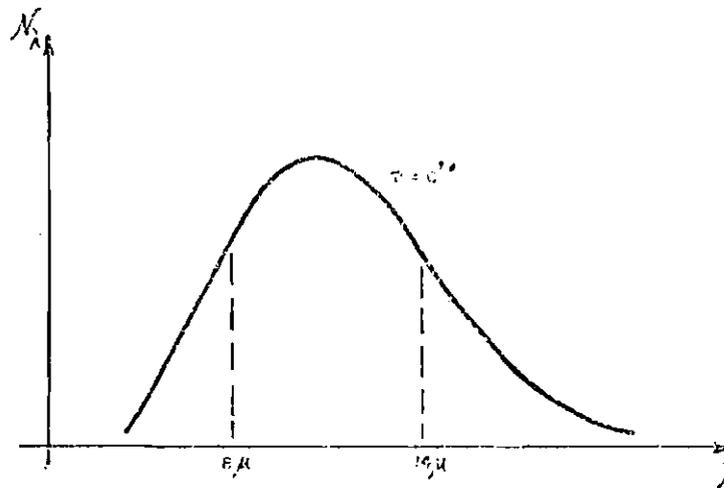


Fig. II.9 - Radiação espectral para uma temperatura fixa T .

A radiância N pode ser obtida, integrando-se os valores de N_λ para todos os comprimentos de onda de 0 a $+\infty$.

$$N = \int_0^{\infty} N_\lambda d\lambda = \sigma T^4 \quad (\text{II.14})$$

onde σ = constante de Stefan - Boltzmann = $\frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} =$
 $= 5,6686 \times 10^{-8} \text{ watts m}^{-2} (\text{°K})^{-4}$

Se a temperatura de um elemento de resolução variar positivamente de ΔT em relação a um outro, cuja temperatura é T , então a curva de radiância espectral se deslocará para cima e para a esquerda. A diferença entre as áreas sob as curvas será a diferença de radiância espectral correspondente às diferentes temperaturas, podendo, portanto, ser relacionada com a variação ΔT na temperatura. Como os detectores piroelétricos respondem a variações de radiância, devemos diferenciar a fórmula (11) em relação a T , a fim de calcular a diferença de radiância espectral ΔN_λ , ou seja, a diferença de potência emitida para pequenas inhomogeneidades de temperatura. Logo:

$$\frac{\partial N_\lambda(T)}{\partial T} = \frac{c_1}{\pi} \frac{c_2}{T^2} \lambda^{-6} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-2} e^{c_2/\lambda T} \quad (\text{II.15})$$

Passando para diferenças finitas, obtemos:

$$\frac{\Delta N_\lambda(T)}{\Delta T} = \frac{c_1 c_2}{\pi T^2} \lambda^{-6} e^{c_2/\lambda T} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-2} \quad (\text{II.16})$$

A aproximação: $e^{\frac{c_2/\lambda T}{-1}} = (1 - e^{-\frac{c_2/\lambda T}{-1}}) \approx 1$ é válida somente se $c_2/\lambda T > 3$, isto é, pode ser usada para temperaturas menores que 300°K e comprimentos de onda de 2 a 14μ . Portanto, a fórmula (16) se reduz a:

$$\frac{\Delta N_{\lambda}(T)}{\Delta T} = \frac{c_1 c_2}{\pi T^2} \lambda^{-6} \left(e^{\frac{c_2/\lambda T}{-1}} - 1 \right) \quad (\text{II.17})$$

A diferença de radiância por $^{\circ}\text{K}$, entre 0 e λ , é definido por:

$$\frac{\Delta N_{0-\lambda}}{\Delta T} = \int_0^{\lambda} \frac{\Delta N_{\lambda}(T) d\lambda}{\Delta T} \quad (\text{II.18})$$

Fazendo $x = c_2/\lambda T$ na fórmula (17), obtemos:

$$\frac{\Delta N_{\lambda}(T)d\lambda}{\Delta T} = - \frac{c_1}{\pi c_2^4} T^3 \frac{x^4}{e^x - 1} dx \quad (\text{II.19})$$

Logo:

$$\frac{\Delta N_{0-\lambda}}{\Delta T} = \frac{c_1}{\pi c_2^4} T^3 \int_x^{\infty} \frac{x^4 dx}{e^x - 1} \quad (\text{II.20})$$

A diferença de potência emitida por $^{\circ}\text{K}$, entre 0 e λ , é tabulada por Bramson (1968) para pequenas inhomogeneidades de temperatura. Entre 8 e 14μ , esta diferença é determinada pela seguinte expressão:

$$\frac{\Delta N_{8-14}}{\Delta T} = \frac{\Delta N_{0-14}}{\Delta T} - \frac{\Delta N_{0-8}}{\Delta T} \quad (\text{II.21})$$

Para $T = 300^{\circ}\text{K}$, a tabela dada por Bramson (1968) nos fornece:

$$\frac{\Delta N_{0-14}}{\Delta T} = 1,3626 \text{ watts m}^{-2} \text{ str}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$$

$$\frac{\Delta N_{0-8}}{\Delta T} = 5,2094 \times 10^{-1} \text{ watts m}^{-2} \text{ str}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$$

Logo:

$$\frac{\Delta N_{8-14}}{\Delta T} = 8,4166 \times 10^{-1} \text{ watts m}^{-2} \text{ str}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$$

Supondo que a resolução de temperatura seja $0,5^{\circ}\text{K}$, a diferença de potência emitida será: $\Delta N_{8-14} = 4,2083 \times 10^{-1} \text{ watts m}^{-2} \text{ str}^{-1}$. Esta diferença de potência foi obtida para uma superfície que tem emissividade igual a 1. Considerando uma superfície com emissividade igual a 0,1 (pior caso), a diferença de potência emitida será $4,2083 \times 10^{-2} \text{ watts m}^{-2} \text{ str}^{-1}$.

O valor r.m.s. da potência de radiação incidente sobre um detetor de nosso Imageador é dado pela Fórmula (22), supondo as aberrações desprezíveis.

$$W = \Delta N_{8-14} \Omega A_e 0,707 R_{E_1} R_{E_2} R_{E_3} \quad (\text{II.22})$$

onde:

A_e = área do espelho esférico E_2

Ω = ângulo sólido sob o qual um elemento de área é visto.

$$\Omega = \frac{9 \text{ cm}^2}{(300)^2 \text{ cm}^2} = 10^{-4} \text{ str}$$

$R_{E_1}, R_{E_2}, R_{E_3}$ = reflectância dos espelhos.

Utilizando Pyrex recoberto com alumínio, temos um coeficiente de reflectância da ordem de 0,97 para cada espelho. Portanto:

$$0,707 R_{E_1} R_{E_2} R_{E_3} = 0,645$$

Assim, a potência incidente W , pela Fórmula (22), seria:

$$W = 4,2 \times 10^{-2} \times 10^{-4} \times 0,645 A_e$$

ou seja:

$$W = 2,7 \times 10^{-6} A_e \text{ m}^{-2} \text{ watts}$$

O NEP por unidade de banda passante, do detetor de nosso Imageador, é da ordem de $1,3 \times 10^{-10} \text{ watts} / \sqrt{\text{Hz}}$ (Roundy, 1973). Para um pré-amplificador que apresenta uma banda de 200 Hz, o NEP será $18,38 \times 10^{-10} \text{ watts}$. Se o espelho tiver uma abertura de 9 cm de diâmetro, sua área será $63,58 \text{ cm}^2$. Então, $W = 17,22 \times 10^{-9} \text{ watts}$, e, desse modo, a variação na quantidade de energia que chega ao detetor é, aproximadamente, 10 vezes maior que o NEP.

2.6 - ABERRAÇÕES DO SISTEMA ÓTICO

Temos dois tipos de aberração a considerar: aberração esférica e astigmatismo.

Aberração Esférica - Consideremos que os raios de luz, provenientes de um ponto objeto distante, incidam sobre o espelho da Figura II.10. Se o espelho fosse ideal, todos os raios deveriam convergir para o ponto focal. Entretanto, os raios mais afastados do eixo principal, após sofrerem reflexão, vão para um foco mais perto do espelho, enquanto os mais próximos vão para um foco mais distante. O fato dos raios refletidos não se interceptarem no ponto focal, provoca uma mancha circular, cujo centro é o próprio foco. O raio mínimo da mancha circular (INPE, Projeto SERE, 1973) será

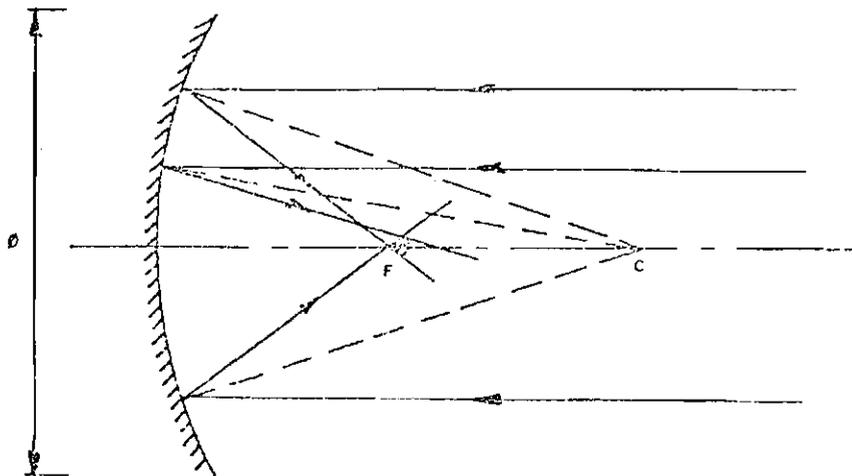


Fig. II.10 - Mancha circular provocada pela aberração esférica

$$r_{\min} = \left(\frac{\phi}{f}\right)^3 \frac{f}{128} \left(\frac{M-1}{M+1}\right)^2 \quad (\text{II.23})$$

onde:

$$f = \text{distância focal} = 10,34 \text{ cm}$$

$$\frac{\phi}{f} = \text{abertura relativa} = \frac{9}{10,34} = 0,87$$

M é a razão entre a distância do objeto e da imagem em relação ao centro do espelho E_2 . Pela Figura II.2, obtemos:

$$M = \frac{300 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} = 30$$

Substituindo estes valores na Fórmula (23), verificamos que o raio mínimo da mancha circular é 0,5 mm.

Astigmatismo - A Figura II.11 representa um espelho esférico, que forma a imagem de um ponto A.

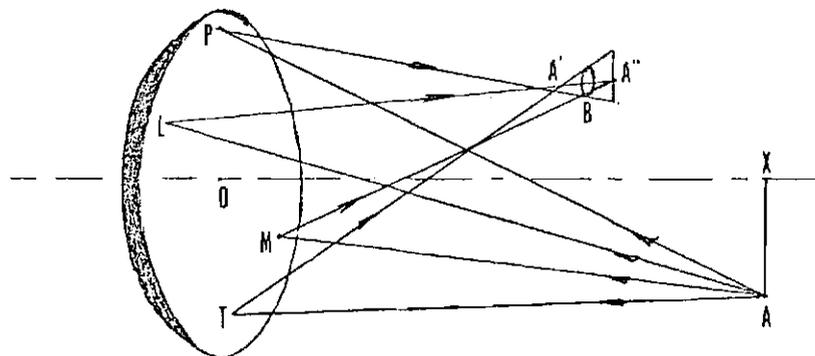


Fig. II.11 - Astigmatismo

Os pontos P, O e T sobre o espelho definem uma linha paralela a XA. O plano contendo o ponto A e a linha POT (também contém A' e o eixo ótico) é chamado plano tangencial. A linha LOM, perpendicular a POT, define juntamente com o ponto A" o plano "sagital". O feixe de raios no plano tangencial, proveniente de A, vai para um foco em A'; embora A seja um ponto objeto, a imagem em A' não é um ponto, mas uma pequena linha no plano sagital. O feixe de raios, proveniente de A, que se reflete segundo raios no plano sagital, vai para um foco em A", definindo também uma pequena linha no plano tangencial. Essas duas pequenas linhas são chamadas linhas focais do feixe elementar, e a distância entre elas define o astigmatismo. Como a imagem de A é para ser formada sobre a linha detetores, a melhor localização para esta linha seria a que passasse por B, entre A' e A", onde a imagem de A seria um pequeno disco. (Jacobs, 1943).

Se a abertura que permite a entrada de energia no sistema ótico for um círculo, cujo centro coincide com o centro de curvatura do espelho, qualquer raio principal pode ser considerado um eixo de sistema (Figura II.12). Assim, a qualidade da imagem varia muito pouco, quando o eixo do campo de visão faz um pequeno ângulo em relação ao eixo perpendicular ao plano de abertura. Como os detetores piroelétricos estão dispostos em linha, somente os que estiverem próximos ao eixo principal do espelho estarão focalizados. Isto pode ser corrigido, se construirmos uma linha de detetores que acompanhe a curvatura da superfície focal do espelho esférico.

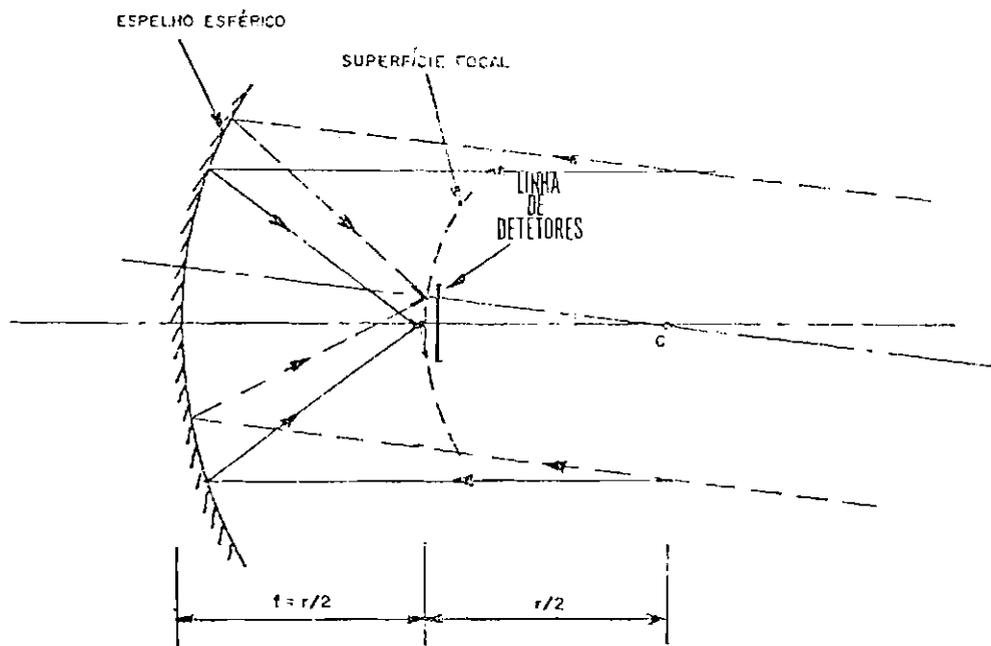


Fig. II.12 - Desfocalização de uma linha transversal do alvo, devido aos detetores que estão afastados do eixo principal do espelho.

2.7 - PERDA DE ENERGIA DEVIDA À SOMBRA

Existe uma perda de energia devida ao espelho plano de forma elíptica E_3 , que forma uma sombra sobre E_2 . Como o eixo principal de E_2 faz um ângulo de 45° com o eixo maior da elipse, e sendo este $\sqrt{2}$ vezes o eixo menor (3,4 cm), a área de E_3 projetada sobre E_2 será uma calota de abertura igual ao eixo menor da elipse (Figura II.13). A percentagem de energia perdida será dada pela razão entre esta área projetada e a área de E_2 .

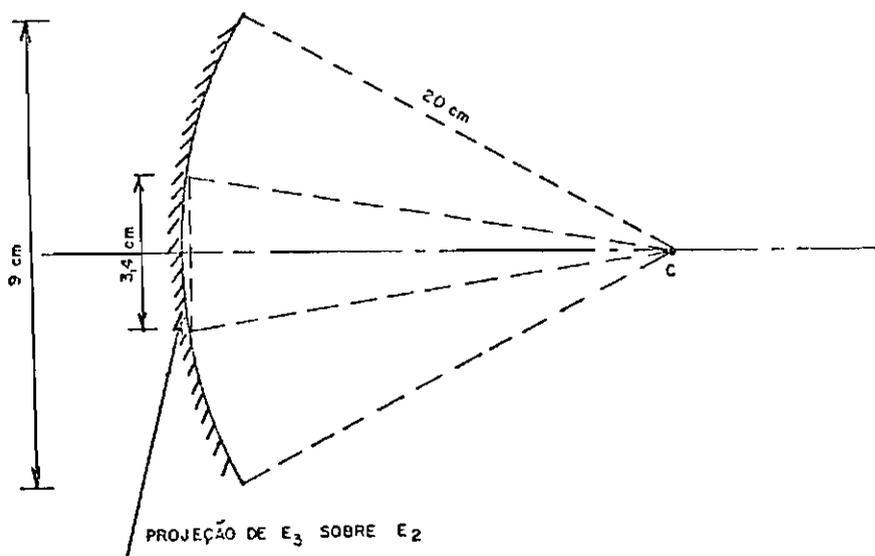


Fig. II.13 - Calota resultante da área de E_3 , projetada sobre E_2 .

A razão entre as áreas das duas calotas (Figura II.14) é:

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{2\pi R h_2}{2\pi R h_1} = \frac{h_2}{h_1}$$

onde:

R = raio de curvatura das calotas

$h_1 = R - x$ e $h_2 = R - y$

Peça geometria da Figura II.15, temos:

$$x^2 = 20^2 - 4,5^2 \longrightarrow = 19,48$$

$$y^2 = 20^2 - 1,7^2 \longrightarrow = 19,927$$

Logo,

$$h_1 = 0,52 \text{ cm} \text{ e } h_2 = 0,073 \text{ cm}$$

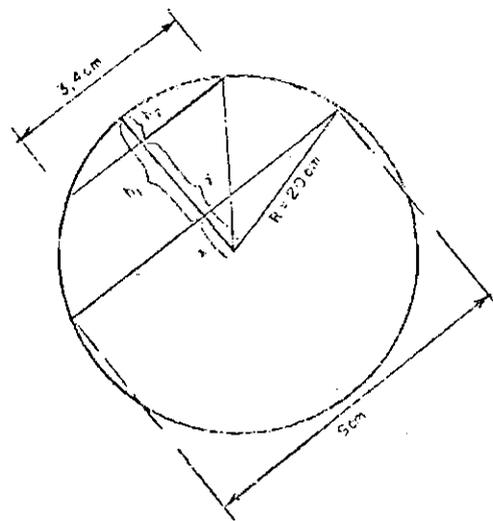


Fig. II.14 - Área das duas calotas

A perda de energia que chega aos detetores devido à sombra é $\frac{h_2}{h_1} \times 100\%$
 $\cong 14\%$.

CAPÍTULO III

ESQUEMA GERAL DO IMAGEADOR

Descreveremos, agora, sem muitos detalhes, o diagrama de blocos do Imageador (Figura III.1).

Os sinais dos detetores serão processados eletronicamente, de forma que a imagem, formada sobre eles, seja mostrada em perspectiva na tela de um Tubo de Raios Catódicos (TRC). Inicialmente, os sinais dos detetores passam pelo sistema de pré-amplificação, onde são pré-amplificados e integrados. Desta maneira, consegue-se aumentar o nível dos sinais e minimizar o ruído. Os sinais vão, então, para o sistema de multiplexação, do qual faz parte um multiplexador com 16 canais, onde os sinais dos detetores são multiplexados no tempo. O sistema de multiplexação fornece 4 saídas: a saída S_1 para o circuito de sincronismo, a saída \bar{S}_1 , para o sistema de pré-amplificação e os sinais de vídeo e vídeo. As saídas do circuito de sincronismo serão fornecidas aos circuitos Miller, α , β e γ , que formarão os sinais dente de serra, necessários para se montar a imagem em perspectiva na tela do TRC.

O sinal de vídeo juntamente com a saída do Miller β será injetado no Eixo Vertical do TRC; obtém-se, desta maneira, uma separação entre as linhas que compõem a imagem no sentido vertical. A soma das saídas dos Miller α e γ será injetada no Eixo Horizontal do TRC. O Miller γ será responsável pela varredura horizontal da tela do TRC, enquanto o Miller α terá a função de defazar, ligeiramente, o início

desta varredura, cada vez que uma linha transversal do alvo é focalizada sobre os detetores; portanto, para um determinado quadro de imagem, a varredura horizontal da tela nunca se inicia em um mesmo ponto, obtendo-se a impressão de perspectiva.

Durante a ausência do sinal de vídeo, um nível de tensão alto será aplicado ao Eixo de Modulação de Intensidade do TRC, para o apagamento do feixe eletrônico. Quando o sinal de vídeo está presente dentro do campo de visão do aparelho, ele será fornecido ao Eixo de Modulação, através de uma chave analógica controlada por $\overline{S_Y}$, de modo que os elementos de área, que apresentam maior nível de radiação, sejam mostrados na tela do TRC com maior intensidade.

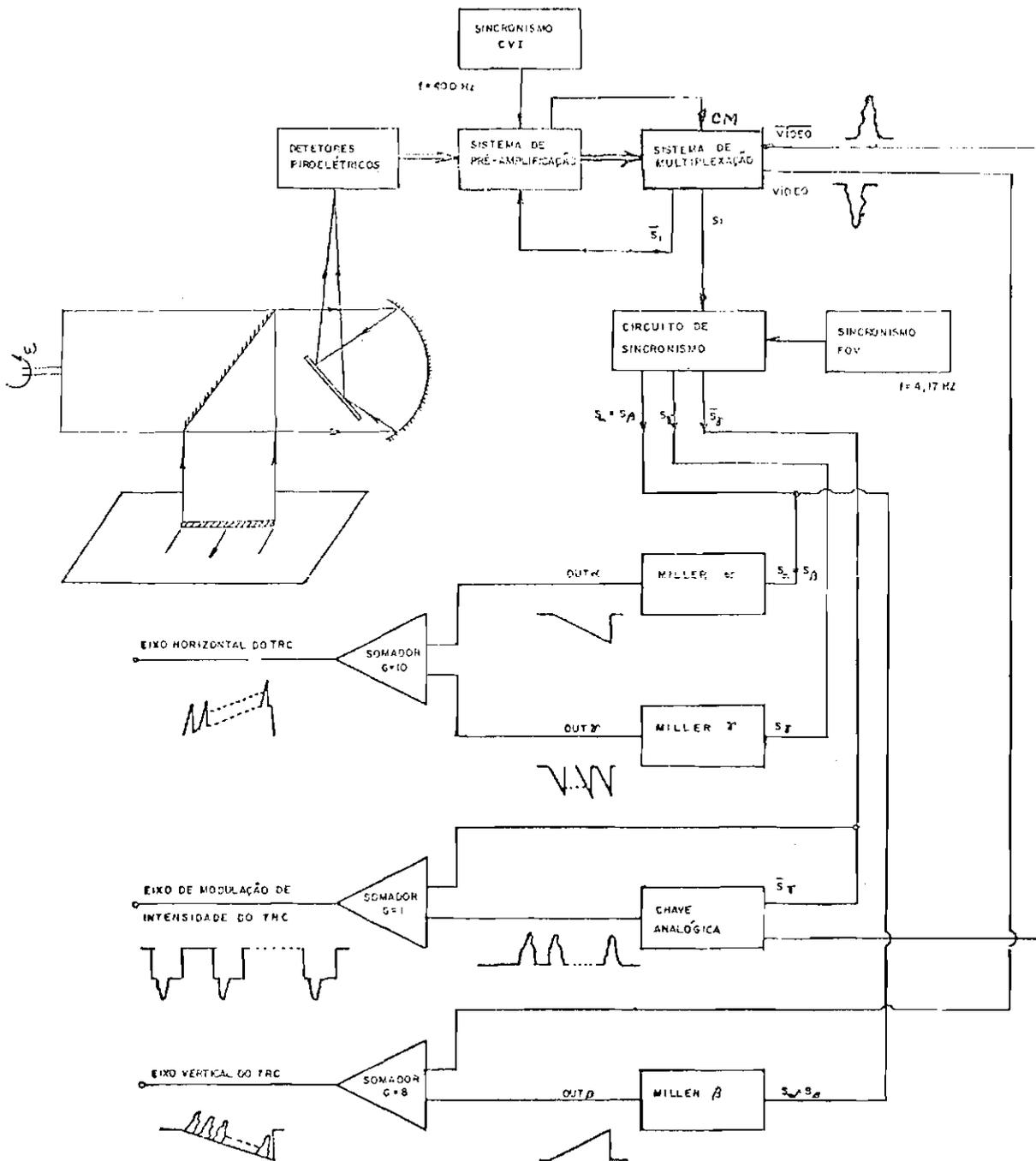


Fig. III.1 - Esquema Geral do Imageador

CAPÍTULO IV

O DETETOR PIROELÉTRICO

4.1 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Este tipo de detetor térmico é baseado no efeito piroelétrico exibido por certos cristais ferroelétricos (Astheimer, 1968). Se um campo elétrico é aplicado através de um dielétrico, este torna-se polarizado na mesma direção do campo externo. O grau de polarização depende da constante dielétrica do material. Um material ferroelétrico, por analogia com o ferromagnetismo, se caracteriza por apresentar uma polarização espontânea ou residual, na ausência de qualquer campo elétrico.

A piroeletricidade é a polarização em cristais ferroelétricos devida à variação de temperatura. A carga constante sobre um cristal ferroelétrico é, eventualmente, neutralizada pela fuga; entretanto, se ele é piroelétrico, uma variação na temperatura provocará o aparecimento de cargas elétricas, induzindo, portanto, uma tensão. Este efeito é suficientemente grande em alguns materiais, podendo ser usado como um mecanismo de detecção de variação de temperatura e é particularmente interessante, pois não é necessária tensão ou corrente de polarização. Por analogia, com os detetores fotovoltaicos, podemos considerar o detetor piroelétrico como um elemento termovoltáico.

Quando os detetores piroelétricos são submetidos a uma variação na temperatura, o espaçamento dos íons que não estão localizados simetricamente é modificado, ocorrendo uma variação na polarização espontânea do cristal (Byer, 1972). Esta variação dá origem a uma corrente de deslocamento I , paralela ao eixo polar, descrita por:

$$I = A p(T) \frac{dT}{dt} \quad (IV.1)$$

onde: $p(T) = \frac{dP(T)}{dT}$ é o coeficiente piroelétrico, avaliado na temperatura T ; A é a área da superfície normal ao eixo polar, e $P(T)$ é o coeficiente de polarização do cristal em função da temperatura.

O coeficiente piroelétrico é dado por:

$$p(T) = \frac{I}{A \frac{dT}{dt}} \quad (IV.2)$$

Portanto, quando $\frac{dT}{dt}$ é tomado constante sobre uma determinada faixa de temperaturas, a medida da corrente I fornece um gráfico direto de $p(T)$ versus T . O circuito equivalente para a medida direta de $p(T)$ é mostrado na Figura IV.1, onde R_c é a resistência de fuga do cristal, e R_m é a resistência de entrada do medidor. Para este circuito, a corrente piroelétrica é dada pela fórmula (1), e a corrente medida é:

$$I_m = I \left(\frac{R_c}{R_c + R_m} \right) \quad (IV.3)$$

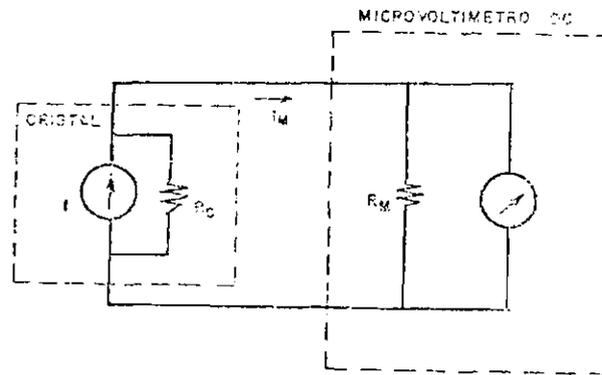


Fig. IV.1 - Circuito equivalente para a medida direta de $p(T)$

Como $R_C > 100 R_M$, a corrente medida I_M é, aproximadamente, igual a I , com um erro menor que 1%. Isto é facilmente obtido experimentalmente, pois, tipicamente: $R_M = 10^5 \Omega$ e $R_C > 10^{10} \Omega$.

O sistema de medida é mostrado esquematicamente na Figura IV.2. Para a medida de $p(T)$, utiliza-se uma estufa com uma taxa de $1^\circ\text{C}/\text{min}$ ou um analisador térmico diferencial padrão (DTA). Considerando a taxa acima e uma área do eletrodo de $0,25 \text{ cm}^2$, um coeficiente piroelétrico de $10^{-3} \mu\text{C}/\text{cm}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ produz corrente de $4,17 \text{ pA}$ ou uma tensão de $0,417 \mu\text{V}$ através de uma impedância de $10^5 \Omega$. A taxa ou a área do eletrodo podem ser aumentadas para melhorar a sensibilidade de detecção. A corrente piroelétrica em função da temperatura tem a forma mostrada na Figura IV.3.

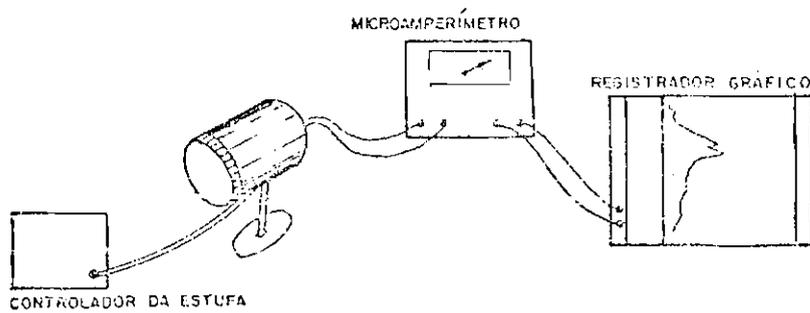


Fig. IV.2 - Montagem para a medida do coeficiente piroelétrico

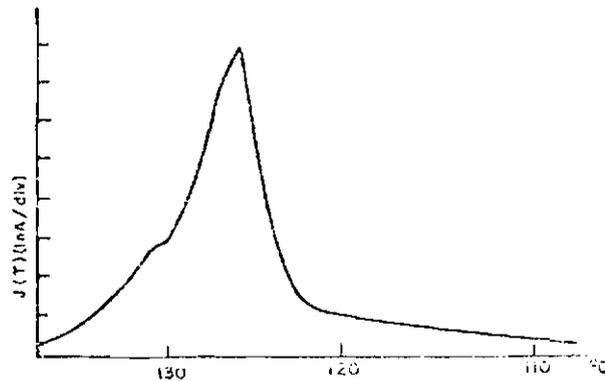
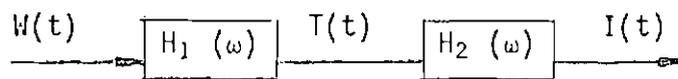


Fig. IV.3 - Corrente piroelétrica em função da temperatura

O principal fator de limitação de precisão deste método, é o problema da não uniformidade de dT/dt . Para superar este problema, utiliza-se o cristal LiNbO_3 como uma referência e determina-se $p(T)$ para outros materiais relativos a ele.

4.2 - RELAÇÃO ENTRE A POTÊNCIA DE RADIAÇÃO INCIDENTE E A CORRENTE RESULTANTE NO DETETOR PIROELÉTRICO

Representamos, abaixo, o diagrama de blocos que relaciona a corrente obtida no detetor piroelétrico, quando aplicamos uma potência de radiação luminosa, vinda de uma determinada superfície.



Para a obtenção de $I(t)$ em função de $W(t)$, precisamos de alguns conceitos sobre capacidade térmica (H) e calor específico (c_p) (Resnick, 1965)

CAPACIDADE TÉRMICA (H)

A capacidade térmica relaciona a quantidade de calor dE fornecida a um corpo e o correspondente acréscimo de temperatura dT .

$$H = \frac{dE}{dT} \quad (IV.4)$$

CALOR ESPECÍFICO (c_p)

A capacidade térmica por unidade de massa é chamada calor específico e é característica do material constituinte do corpo.

$$c_p = \frac{\text{capacidade térmica}}{\text{massa}} = \frac{1}{m} \frac{dE}{dT} \quad (IV.5)$$

Pelo 1º Princípio da Termodinâmica, que estabelece a lei da Conservação de Energia, temos:

$$dE = E_f - E_p \quad (\text{IV.6})$$

onde:

dE = variação da energia interna do sistema

E_f = energia fornecida ao sistema

E_p = energia perdida

A potência perdida pelo detetor (W_p), devida à condução térmica, é a razão entre a diferença de temperatura em relação ao suporte (T), onde ele é fixado, e sua resistência térmica (R_T)

$$W_p = \frac{T}{R_T} \quad (\text{IV.7})$$

Substituindo as Fórmulas (5) e (7) em (6), resulta:

$$mc_p dT = E_f - \frac{T}{R_T} dt$$

ou, em termos de potência:

$$mc_p \frac{dT}{dt} = W(t) - \frac{T}{R_T} \quad (\text{IV.8})$$

onde:

$W(t)$ = potência fornecida

T = temperatura do detetor em relação a seu suporte

R_T = resistência térmica

m = massa

c_p = calor específico

t = tempo

Como a capacidade térmica $H = \frac{dE}{dT} = mc_p$, a Fórmula (8) resulta em:

$$H \frac{dT}{dt} = W(t) - \frac{T}{R_T}$$

ou seja:

$$\frac{dT(t)}{dt} + \frac{T(t)}{R_T H} = \frac{W(t)}{H} \quad (\text{IV.9})$$

Tomando-se a transformada de Fourier de ambos os membros da Fórmula (9), temos:

$$j\omega T(\omega) + \frac{T(\omega)}{R_T H} = \frac{W(\omega)}{H}$$

A equação acima resulta em:

$$H_1(\omega) = \frac{T(\omega)}{W(\omega)} = \frac{R_T}{1 + j\omega R_T H} \quad (\text{IV.10})$$

OBS.: A equação diferencial referente a Fórmula (9) é análoga à equação apresentada pelo circuito elétrico com tensão de saída V (Figura

IV.4). A equação que representa este circuito é: $\frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{RC} = \frac{i}{C}$

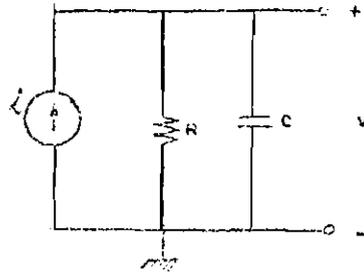


Fig. IV.4 - Circuito elétrico com tensão de saída V , que apresenta uma equação diferencial análoga à equação derivada da Lei da Conservação de Energia.

Os parâmetros análogos entre as duas equações são:

$$V(t) \rightarrow T(t)$$

$$i(t) \rightarrow W(t)$$

$$R \rightarrow R_T$$

$$C \rightarrow H$$

O relacionamento entre a corrente e temperatura é dada pela Fórmula (1), que é repetida abaixo:

$$I(t) = Ap(T) \frac{dT(t)}{dt}$$

OBS.: $p(T)$ é constante sobre a faixa de temperaturas que estamos considerando.

Tomando-se a transformada de Fourier desta equação, temos:

$$I(\omega) = Ap(T) (j\omega)T(\omega)$$

ou seja:

$$\frac{I(\omega)}{T(\omega)} = H_2(\omega) = j\omega Ap(T) \quad (IV.11)$$

Considerando a função $H_T(\omega) = H_1(\omega) H_2(\omega)$, temos:

$$\frac{I(\omega)}{W(\omega)} = H_1(\omega) H_2(\omega) = \frac{j\omega Ap(T)R_T}{1+j\omega R_T H} \quad (IV.12)$$

O m\u00f3dulo e a fase de $H_T(\omega)$ s\u00e3o:

$$\left| \frac{I(\omega)}{W(\omega)} \right| = \frac{\omega Ap(T)R_T}{\sqrt{1+\omega^2 R_T^2 H^2}} \quad (IV.13)$$

$$\phi(\omega) = 90^\circ - \text{tg}^{-1} \omega R_T H \quad (IV.14)$$

Os gr\u00e1ficos do m\u00f3dulo e da fase de $\frac{I(\omega)}{W(\omega)}$ s\u00e3o mostrados nas Figuras IV.5 e IV.6.

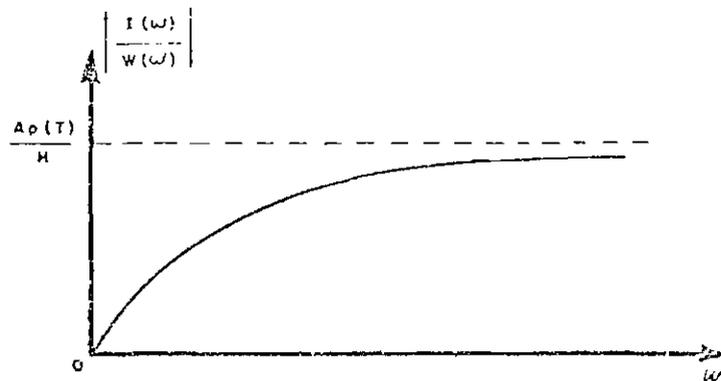


Fig. IV.5 - Gráfico de $\left| \frac{I(\omega)}{W(\omega)} \right|$ em função de ω .

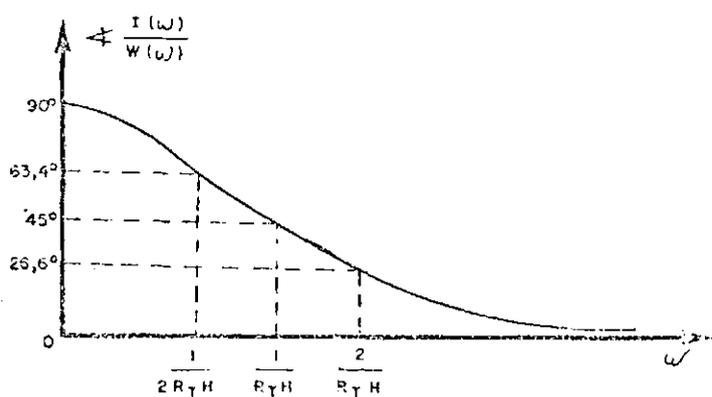


Fig. IV.6 - Gráfico da fase de $\frac{I(\omega)}{W(\omega)}$ em função de ω .

OBS.: 1) Pela Figura IV.5 verificamos que o detetor piroelétrico não responde a nível DC.

2) O circuito equivalente do detetor piroelétrico será representado por uma fonte de corrente em paralelo com um capacitor C (Figura IV.7).

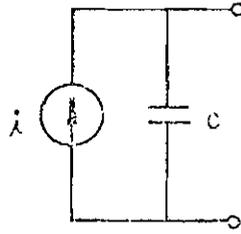


Fig. IV.7 - Circuito equivalente do detetor piroelétrico

4.3 - DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA E CORRENTE DO DETETOR EM FUNÇÃO DO TEMPO

Nesta seção, vamos determinar a temperatura e corrente do detetor, quando aplicamos sobre ele radiação com potência $W(t)$. Esta potência incidente, levando-se em consideração o movimento de rotação do disco de amostragem, pode ser aproximada por uma onda quadrada (Figura IV.8).

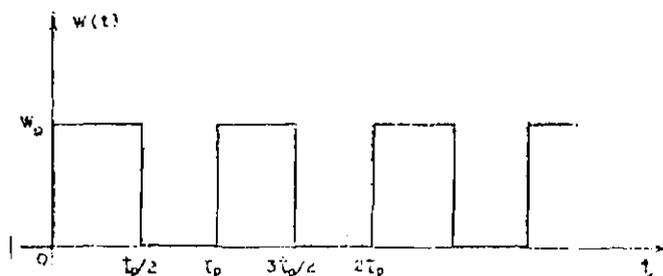


Fig. IV.8 - Forma de onda aproximada para a potência incidente $W(t)$

Conforme já vimos, a equação diferencial, que relaciona a temperatura com a potência incidente $W(t)$, é dada pela Fórmula (9), ou seja:

$$\frac{dT(t)}{dt} + \frac{T(t)}{R_T H} = \frac{W(t)}{H}$$

A solução particular para a equação diferencial acima é:

$$T_p(t) = uv$$

$$\frac{dT_p(t)}{dt} = uv' + vu'$$

Substituindo na Fórmula (9), resulta:

$$uv' + vu' + \frac{uv}{R_T H} = \frac{W(t)}{H}$$

ou seja:

$$uv' + v \left(u' + \frac{u}{R_T H} \right) = \frac{W(t)}{H} \quad (\text{IV.15})$$

Fazendo $u' + \frac{u}{R_T H} = 0 \rightarrow u = e^{-t/R_T H}$

Na Fórmula (15) temos, então:

$$uv' = \frac{W(t)}{H}$$

Logo, v' será:

$$v' = \frac{W(t)}{H} e^{t/R_T H} \rightarrow v = \int_0^t \frac{W(t)}{H} e^{t/R_T H} dt$$

Conseqüentemente, a solução particular para $T(t)$ é:

$$T_p(t) = \left[\int_0^t \frac{W(t)}{H} e^{t/R_T H} dt \right] e^{-t/R_T H} \quad (IV.16)$$

A solução da homogênea será:

$$\frac{dT(t)}{dt} + \frac{T(t)}{R_T H} = 0$$

$$T_h(t) = ce^{-t/R_T H} \quad (IV.17)$$

$T(t)$ será o resultado da soma das soluções da homogênea e particular, ou seja:

$$T(t) = \left[c + \int_0^t \frac{W(t)}{H} e^{t/R_T H} dt \right] e^{-t/R_T H} \quad (IV.18)$$

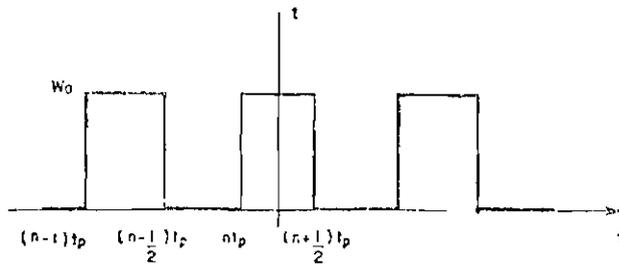
Para a determinação da constante c da Fôrmula (18), consideremos que no instante inicial $t=0$, a temperatura do detetor seja igual \tilde{a} de seu suporte. Logo, $T(0)=0$, e neste caso, a Fôrmula (18) se reduz a:

$$T(t) = \left[\int_0^t \frac{W(t)}{H} e^{t/R_T H} dt \right] e^{-t/R_T H} \quad (IV.19)$$

Para determinação da integral da Fôrmula (19), iremos considerar, inicialmente, os instantes de tempo entre ntp e $ntp+tp/2$; posteriormente a integral será determinada entre $(n+1/2)tp$ e $(n+1/2)tp + tp/2$.

A integral da Fôrmla (19) pode ser separada em duas parcelas. Para $t = ntp + \alpha tp/2$; $0 < \alpha < 1$, podemos escrever:

$$T_1(t) = \left[\int_0^{ntp} \frac{W(t)}{H} e^{t/R_T H} dt + \int_{ntp}^t \frac{W(t)}{H} e^{t/R_T H} dt \right] e^{-t/R_T H}$$



onde a 1ª parcela é dada por:

$$\int_0^{ntp} \frac{W(t)}{H} e^{t/R_T H} dt = \int_0^{tp/2} \frac{W_0}{H} e^{t/R_T H} dt + \int_{tp}^{3tp/2} \frac{W_0}{H} e^{t/R_T H} dt + \dots + \int_{(n-1)tp}^{(n-1/2)tp} \frac{W_0}{H} e^{t/R_T H} dt$$

ou seja:

$$\int_0^{ntp} \frac{W(t)}{H} e^{t/R_T H} dt = \frac{W_0}{R_T H^2} \left[\left(e^{tp/2R_T H} + e^{3tp/2R_T H} + \dots + e^{(n-1/2)tp/R_T H} \right) - (1 + e^{tp/R_T H} + \dots + e^{(n-1)tp/R_T H}) \right]$$

e a 2ª parcela é igual a:

$$\int_{ntp}^{ntp+\alpha tp/2} \frac{W(t)}{H} e^{t/R_T H} dt = \frac{W_0}{R_T H^2} e^{ntp/R_T H} \left[e^{\alpha tp/2R_T H} - 1 \right]$$

Efetuada-se o produto da soma das duas parcelas por $e^{-t/R_T H}$, e fazendo $t = ntp + \alpha tp/2$, resulta:

$$T_1(\alpha) = \frac{W_0}{R_T H^2} \left[e^{(1/2 - n - \alpha/2)tp/R_T H} + e^{(3/2 - n - \alpha/2)tp/R_T H} + \dots + e^{(-1/2 - \alpha/2)tp/R_T H} - (e^{(-n - \alpha/2)tp/R_T H} + e^{(1 - n - \alpha/2)tp/R_T H} + \dots + e^{(-1 - \alpha/2)tp/R_T H}) \right] + \frac{W_0}{R_T H^2} \left[1 - e^{-\alpha tp/2R_T H} \right]$$

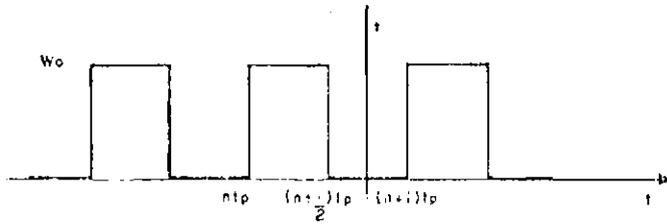
Para obtermos $T_1(\alpha)$ estacionário, calculemos o $\lim_{n \rightarrow \infty} T_1(\alpha)$, observando

que $T_1(\alpha)$ contém a soma de duas progressões geométricas de razão

$$\lim_{n \rightarrow \infty} T_1(\alpha) = \frac{W_0}{R_T H^2} \left[1 - \frac{e^{-\alpha tp/2R_T H}}{1 + e^{-tp/R_T H}} \right] \quad (IV.20)$$

Considerando $t = (n+1/2)tp + \alpha tp/2$; $0 \leq \alpha \leq 1$, temos:

$$T_2(t) = \left[\int_0^{(n+1/2)tp} \frac{W(t)}{H} e^{t/R_T H} dt + \int_{(n+1/2)tp}^t \frac{W(t)}{H} e^{tp/R_T H} dt \right] \cdot e^{-t/R_T H}$$



A 2ª parcela da equação acima é zero, porque $W(t)$ é zero no intervalo

$\left[(n+1/2)tp, (n+1)tp \right]$. Portanto:

$$T_2(t) = \int_0^{(n+1/2)tp} \frac{W(t)}{H} e^{t/R_T H} dt \Big| e^{-t/R_T H} = \int_0^{tp/2} \frac{W(t)}{H} e^{t/R_T H} dt +$$

$$+ \int_{tp}^{3tp/2} \frac{W(t)}{H} e^{t/R_T H} dt + \dots + \int_{ntp}^{(n+1/2)tp} \frac{W(t)}{H} e^{t/R_T H} dt \Big| e^{-t/R_T H}$$

Fazendo $t=(n+1/2 + \alpha/2)tp$ na equação acima, resulta:

$$T_2(\alpha) = \frac{w_0}{R_T H^2} \left[e^{-(n+\alpha/2)tp/R_T H} + e^{-(n-1+\alpha/2)tp/R_T H} + \dots + \right.$$

$$+ e^{-(\alpha/2)tp/R_T H} - \left. \left(e^{-(n+1/2+\alpha/2)tp/R_T H} + e^{-(n-1/2+\alpha/2)tp/R_T H} + \dots + e^{-(1/2+\alpha/2)tp/R_T H} \right) \right]$$

Fazendo $n \rightarrow \infty$ para obtermos $T_2(\alpha)$ estacionário:

$$T_2(\alpha) = \lim_{n \rightarrow \infty} T_2(\alpha) = \frac{w_0}{R_T H^2} \frac{e^{-tp/2R_T H}}{1 + e^{-tp/2R_T H}} \quad (IV.21)$$

Considerando que a corrente vinda de um detetor \bar{e} é dada por $I = Ap(T) \frac{dT}{dt}$, onde $p(T)$ é constante para uma determinada faixa de temperatura, temos:

$$I_1(\alpha) = \left[\frac{Ap(T)W_0tp}{2R_T^2H^3} \frac{(1 - e^{-tp/2R_TH})}{(1 - e^{-tp/R_TH})} \right] e^{-\alpha tp/2R_TH} \quad (IV.22)$$

para $t = ntp + \alpha tp/2$

$$I_2(\alpha) = \left[- \frac{Ap(T)W_0tp}{2R_T^2H^3} \frac{(1 - e^{-tp/2R_TH})}{(1 - e^{-tp/R_TH})} \right] e^{-\alpha tp/2R_TH} \quad (IV.23)$$

para $t = (n+1/2)tp + \alpha tp/2$

$0 \leq \alpha \leq 1$

Na Tabela IV.1 estão condensados os resultados da temperatura $T(t)$ e da corrente $I(t)$ em regime estacionário. (Fórmulas (20), (21), (22) e (23)).

Na Tabela IV.2 são dados os parâmetros do detetor piroelétrico de $LiTaO_3$ (Roundy, 1973), com a finalidade de se traçar os gráficos da temperatura e da corrente.

TABELA IV.1

TEMPERATURA E CORRENTE EM REGIME ESTACIONÁRIO

TEMPO (t)	TEMPERATURA T (L)	CORRENTE I (t)
$t = ntp + a \cdot tp/2$ 0 ≤ a ≤ 1	$T_1(a) = \frac{W_0}{R_T H^2} \left[1 - \frac{e^{-atp/2R_T H}}{1 + e^{-tp/2R_T H}} \right]$	$I_1(a) = \left[\frac{A_p(T) W_0 tp}{2R_T^2 H^3} \frac{(1 - e^{-tp/2R_T H})}{(1 - e^{-tp/R_T H})} \right] e^{-atp/2R_T H}$
$t = (n + 1/2)tp + a \cdot tp/2$ 0 ≤ a ≤ 1	$T_2(a) = \frac{W_0}{R_T H^2} \frac{e^{-atp/2R_T H}}{1 + e^{-tp/2R_T H}}$	$I_2(a) = \left[\frac{A_p(T) W_0 tp}{2R_T^2 H^3} \frac{(1 - e^{-tp/2R_T H})}{(1 - e^{-tp/R_T H})} \right] e^{-atp/2R_T H}$

TABELA IV.2

PARÂMETROS DO DETETOR

p(T)	COEFICIENTE PIRELÉTRICO	$1,76 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
ϵ_r	PERMISSIVIDADE RELATIVA	43
ρ	MASSA ESPECÍFICA	$7,45 \text{ g/cm}^3$
c_p	CAPACIDADE CALORÍFICA	$0,43 \text{ J/g } ^\circ\text{C}$
C	CAPACITÂNCIA DO DETETOR	12,7 pF
V	VOLUME DO DETETOR	1 mm x 1 mm x 0,03 mm
δ	CONDUTIVIDADE TÉRMICA	$4,2 \times 10^{-2} \text{ J/cm } ^\circ\text{C seg}$

Considerando que o detetor tenha densidade ρ , sua massa será: $m = \rho Aa$. Consequentemente, a capacidade térmica H pode ser escrita como:

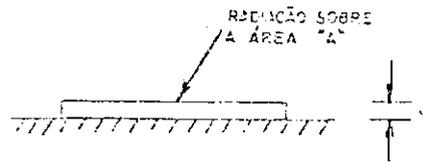
$$H = \rho A a c_p \tag{IV.24}$$

Tendo em vista os valores dados na Tabela IV.2, H será igual a $9,6 \times 10^{-5} \text{ J/C}$.

RESISTÊNCIA TÉRMICA DO DETETOR

A resistência térmica de um detetor, quando sua superfície está apoiada sobre uma outra, é dada por

$$R_T = \frac{a}{\delta A} \quad (IV.25)$$



Logo:

$$R_T = \frac{0,003}{4,2 \times 10^{-2} \times 10^{-2}} \rightarrow R_T = 7,14 \text{ } ^\circ\text{C seg/J}$$

A constante de tempo térmica $R_T H$ será, então:

$$\tau_t = R_T H = 7,14 \times 9,6 \times 10^{-5}$$

$$\tau_t = 685,4 \text{ } \mu\text{s}$$

Como o disco de amostragem possui 16 janelas e está girando a uma velocidade de 1500 RPM, o período t_p da potência incidente sobre os detetores é 2,5 ms.

Os gráficos da temperatura $T(t)$ e da corrente $I(t)$, tendo em vista as Tabelas IV.1 e IV.2, são mostrados nas Figuras IV.9 e IV.10.

OBS.: No Apêndice B é mostrado um programa em FORTRAN, utilizado para nos auxiliar no traçado das curvas mostradas nas Figuras IV.9 e IV.10.

Por estes gráficos, podemos verificar que, quando os de tetores são expostos à radiação, a temperatura $T(t)$ (Figura IV.9), do de tetor em relação a seu suporte, cresce exponencialmente até atingir um valor determinado pela intensidade da radiação incidente, enquanto a corrente $I(t)$ (Figura IV.10) cresce subitamente, para logo em seguida, decrescer de modo exponencial em direção a zero, pois, conforme já foi visto, o detetor piroelétrico não responde a nível constante de energia incidente. Quando os detetores deixam de ser expostos às radiações do alvo, $T(t)$ decresce exponencialmente em direção a zero, ou seja, a temperatura do detetor tende a se igualar com a de seu suporte, enquanto $I(t)$ sofre uma transição súbita no sentido negativo, para, em seguida, crescer de modo exponencial em direção a zero; a corrente não chega a se anular, porque os detetores são novamente expostos à radiação.

OBS.: $T(t)$ e $I(t)$ crescem ou decrescem exponencialmente com uma cons tante de tempo igual a $2R_T H / t_p$.

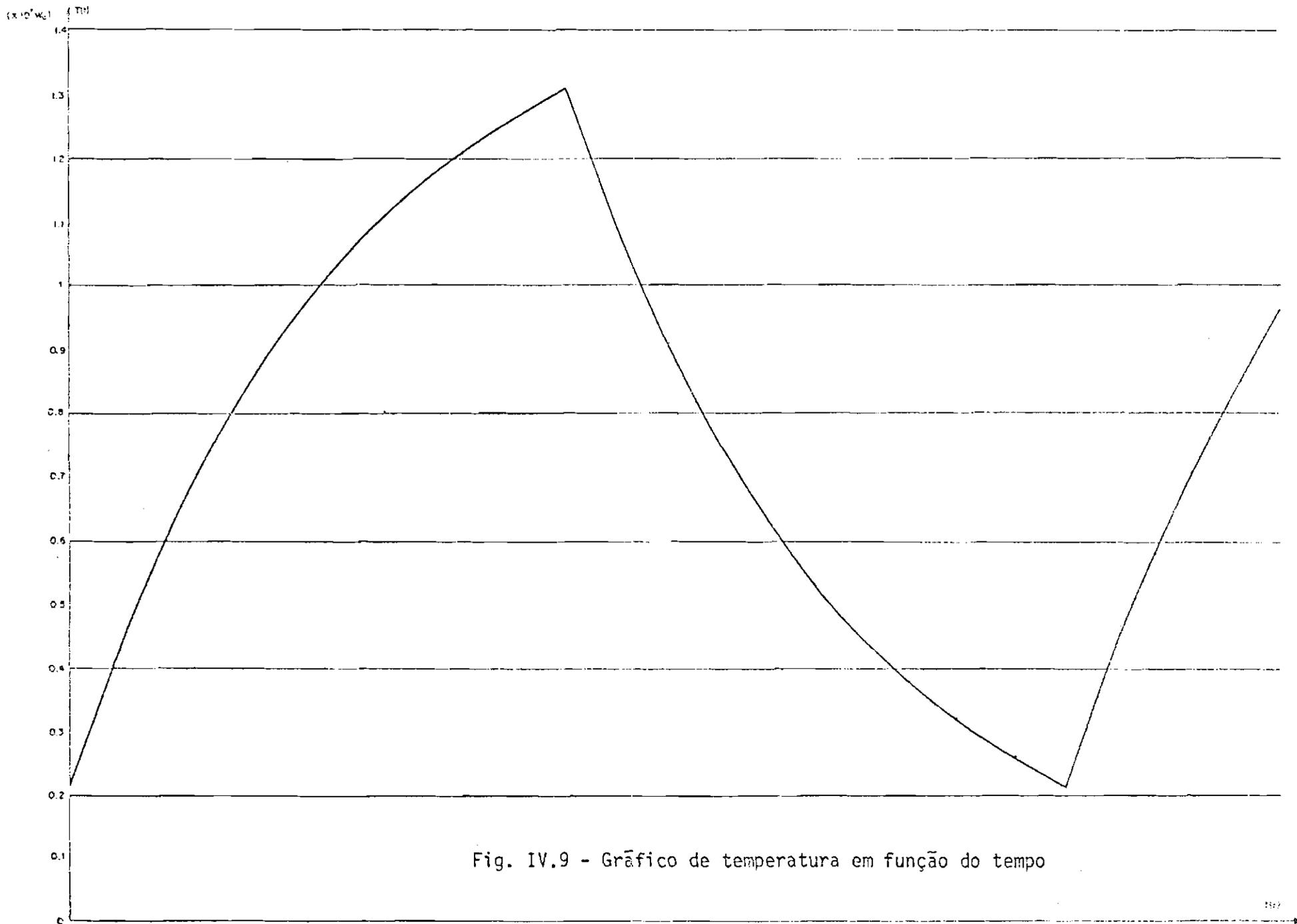


Fig. IV.9 - Gráfico de temperatura em função do tempo

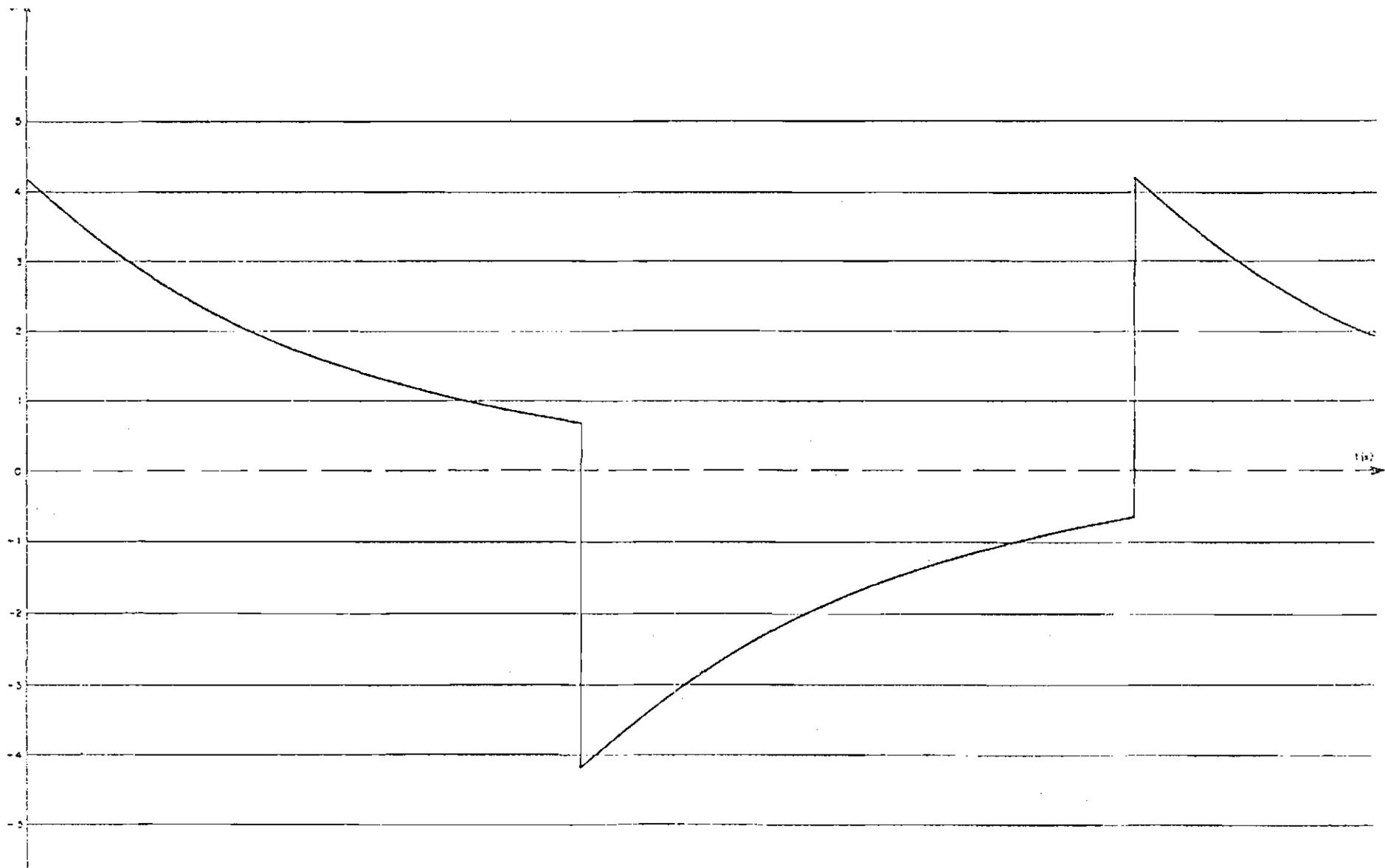


Fig. IV.10 - Gráfico da corrente em função de tempo

4.4 - RESPONSIVIDADE DO DETETOR

Vamos determinar a responsividade do detetor, através da Figura IV.11, que representa o circuito equivalente do detetor seguido do pré-amplificador. Como veremos mais adiante, o primeiro estágio do pré-amplificador é um "FET" que apresenta uma impedância de entrada muito alta. Portanto, R_L representa a resistência de carga do detetor, e C representa a capacitância total, resultante da soma das capacitâncias do detetor e do FET.

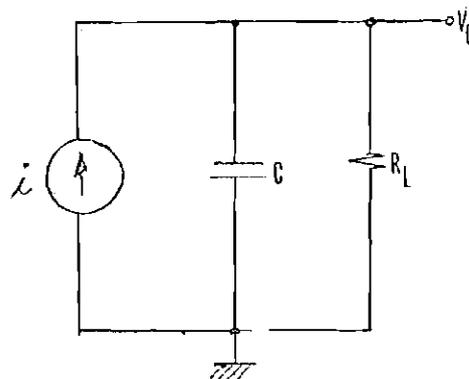


Fig. IV.11 - Circuito equivalente do detetor seguido do pré-amplificador

No domínio da frequência, a saída V_o em função da corrente i , fornecida pelo detetor, será:

$$\frac{V_o(\omega)}{I(\omega)} = \frac{R_L}{1+j\omega R_L C} \quad (\text{IV.26})$$

A responsividade do detetor, definida como a razão entre a tensão na saída (V_o) e a potência de radiação (W) será:

$$\frac{V_o(\omega)}{W(\omega)} = \frac{I(\omega)}{W(\omega)} \times \frac{V_o(\omega)}{I(\omega)} = \frac{j\omega A_p(T) R_T}{1+j\omega R_T H} \times \frac{R_L}{1+j\omega R_L C} \quad (\text{IV.27})$$

A Fôrmla (27) estã na forma:

$$\frac{V_o(\omega)}{W(\omega)} = \frac{Kj\omega}{(1+j\omega\tau_1)(1+j\omega\tau_2)} \quad (\text{IV.28})$$

onde:

$$\tau_1 = R_T H \quad (\text{IV.29})$$

$$\tau_2 = R_L C \quad (\text{IV.30})$$

$$K = A_p(T) R_T R_L \quad (\text{IV.31})$$

Substituindo nas Fôrmlas (29), (30) e (31), a resistênciã de carga R_L por $10^7 \Omega$, os parâmetros do detetor e do "FET" BFW10 dados nas Tabelas IV.2 e V.1, resulta:

$$\tau_1 = R_T H = 68,54 \times 10^{-5} \text{s}$$

$$\tau_2 = R_L C = 10^7 \times 17,7 \times 10^{-12} = 17,7 \times 10^{-5} \text{s}$$

$$K = A_p(T) R_T R_L = 12,56 \times 10^{-3} \text{ Vs/watt}$$

Levando-se em conta que $f_i = \frac{1}{2\pi\tau_i}$. para $i = 1,2$, temos:

$$f_1 \approx 232 \text{ Hz}$$

$$f_2 \approx 900 \text{ Hz}$$

O módulo e a fase da responsividade, em função da frequência, são dados pela equação abaixo:

$$\left| \frac{V_o(f)}{W(f)} \right| = \frac{2\pi f K}{(\sqrt{1 + (2\pi f \tau_1)^2}) (\sqrt{1 + (2\pi f \tau_2)^2})} \quad (\text{IV.32})$$

$$\angle \frac{V_o(f)}{W(f)} = 90^\circ - \text{tg}^{-1} (2\pi f \tau_1) - \text{tg}^{-1} (2\pi f \tau_2) \quad (\text{IV.33})$$

O Apêndice C contém um programa em FORTRAN, usado para auxílio no traçado do módulo e fase da responsividade (Figuras IV.12 e IV.13).

O espectro de frequência da radiação, proveniente da superfície emissora, será limitado nas frequências altas pelo sistema ótico-mecânico. Conseqüentemente, a banda da responsividade deve estar dentro do espectro da energia radiante, incidente sobre os detetores.

Determinemos, agora, qual a forma de onda na entrada do pré-amplificador (V_o), quando aplicamos uma radiação, com potência $W(t)$ (Figura IV.8), sobre os detetores piroelétricos.

Sabemos, da Fórmula (28), que a responsividade, em função de $s = j\omega$, é dada por:

$$\frac{V_o(s)}{W(s)} = H(s) = \frac{Ks}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)} = \frac{Ks}{\tau_1 \tau_2 (s + 1/\tau_1)(s + 1/\tau_2)}$$

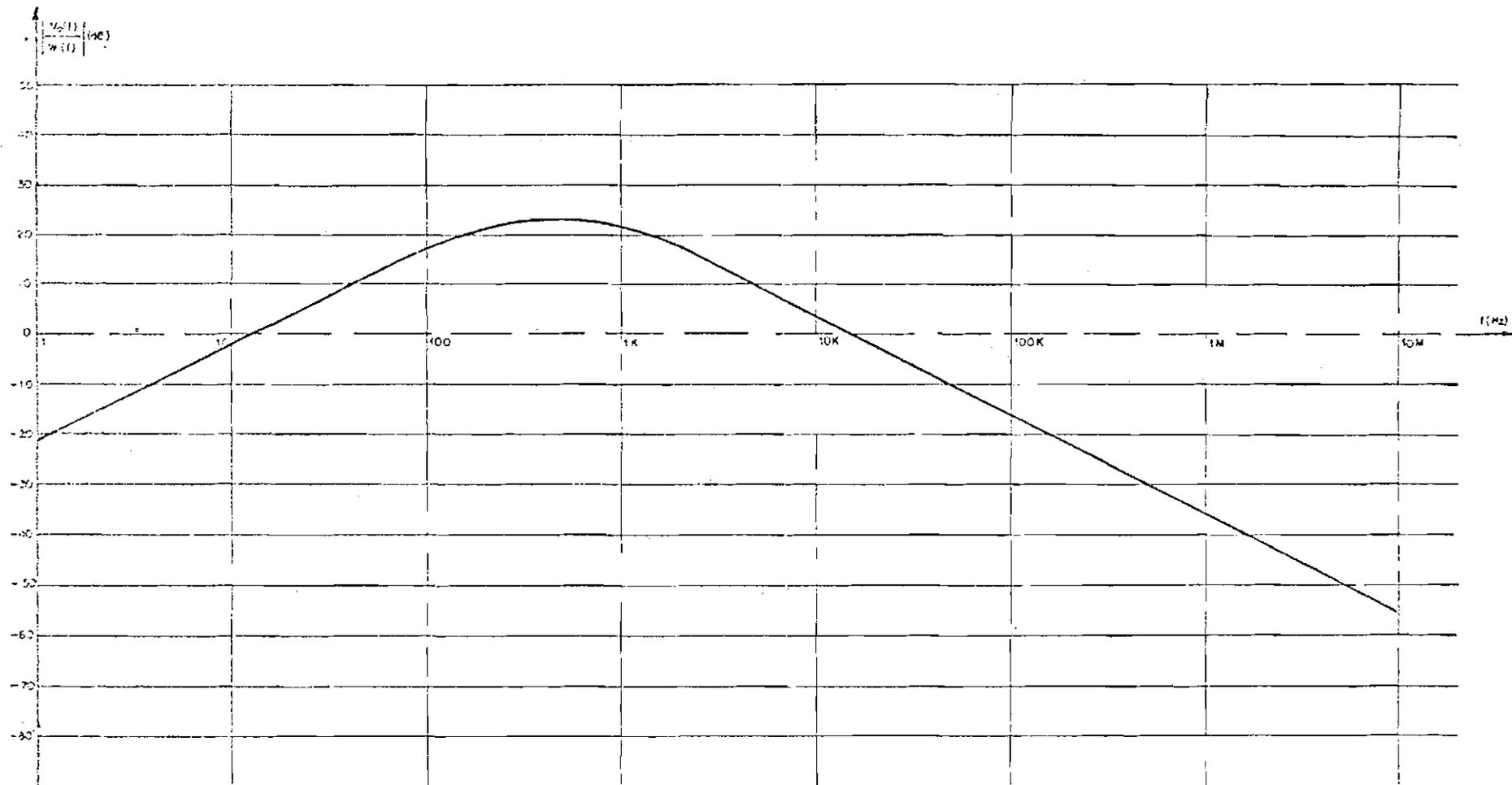


Fig. IV.12 - M\u00f3dulo da responsividade em fun\u00e7\u00e3o da frequ\u00eancia

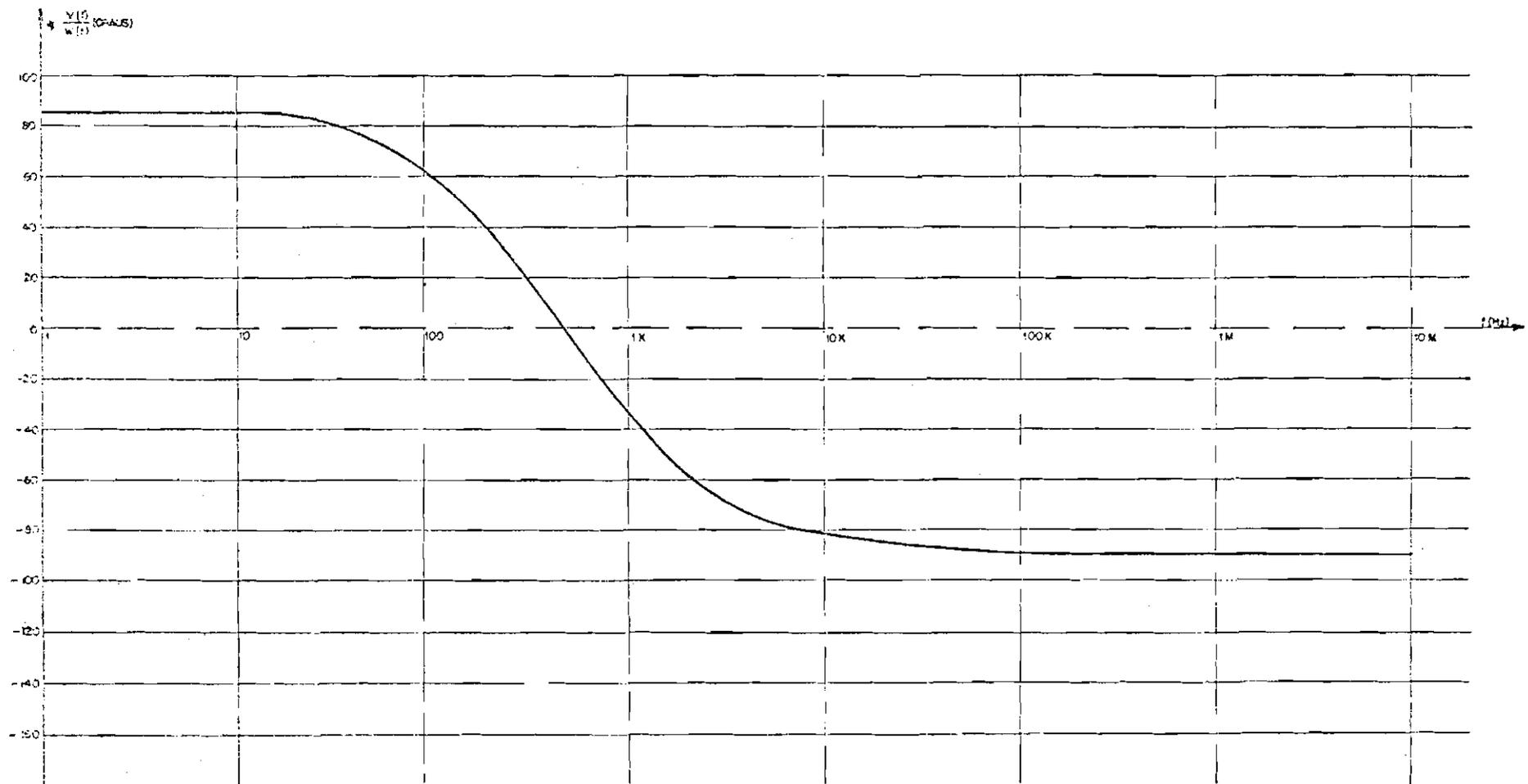


Fig. IV.13 - Fase da responsividade em função da frequência

$H(s)$ pode ser escrito na seguinte forma:

$$H(s) = \frac{K_1}{(s+1/\tau_1)} + \frac{K_2}{(s+1/\tau_2)}$$

onde:

$$K_1 = \frac{Ks}{\tau_1\tau_2(s+1/\tau_2)} \Bigg|_{s = -1/\tau_1} = \frac{K}{\tau_1(\tau_2 - \tau_1)}$$

$$K_2 = \frac{Ks}{\tau_1\tau_2(s+1/\tau_1)} \Bigg|_{s = -1/\tau_2} = \frac{K}{\tau_2(\tau_1 - \tau_2)}$$

$h(t)$ é dado pela transformada inversa de Laplace, ou seja:

$$h(t) = L^{-1} \left\{ H(s) \right\}$$

Portanto:

$$h(t) = \begin{cases} 0 & \text{para } t < 0 \\ K_1 e^{-t/\tau_1} + K_2 e^{-t/\tau_2} = h_1(t) + h_2(t) & \text{para } t \geq 0 \end{cases} \quad (\text{IV.34})$$

$V_0(t)$ é a convolução de $h(t)$ com $W(t)$. Logo:

$$V_0(t) = h(t) * W(t) = \int_0^t h(t-u)W(u)du \quad (\text{IV.35})$$

Para $t \geq 0$, as fórmulas (34) e (35) nos permitem escrever:

$$V_0(t) = \sum_{i=1}^2 \left[h_i(t) * W(t) \right] = \sum_{i=1}^2 \int_0^t h_i(t-u)W(u)du \quad (\text{IV.36})$$

Como $h_i(u) = K_i e^{-u/\tau_i}$ e $h_i(t-u) = K_i e^{-(t-u)/\tau_i}$ (Figura

IV.14), temos:

$$V_0(t) = \sum_{i=1}^2 \int_0^t K_i e^{-(t-u)/\tau_i} W(u) du \quad (IV.37)$$

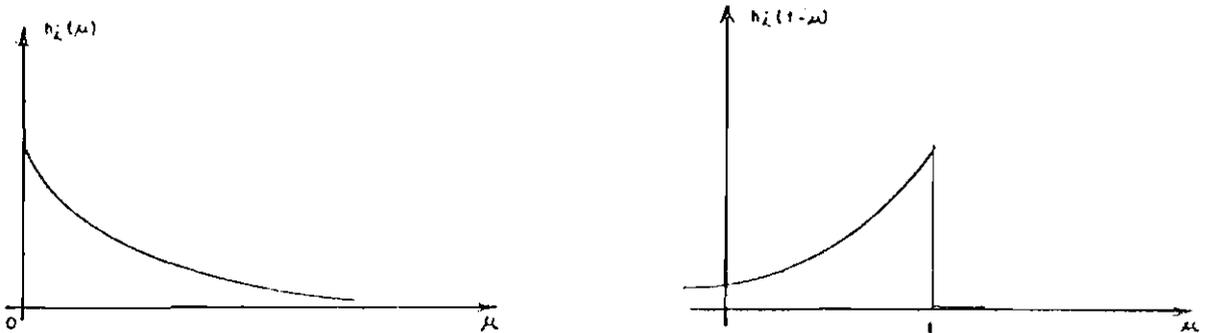


Fig. IV.14 - Formas de onda para $h_i(u)$ e $h_i(t-u)$

Vamos, agora, determinar $V_0(t)$, quando os detetores são expostos a uma radiação de potência W_0 , ou seja, quando $t = ntp + \alpha tp/2$; $0 \leq \alpha \leq 1$ (Figura IV.15).

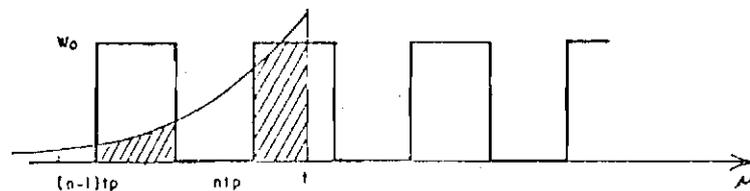


Fig. IV.15 - Convolução entre $h_i(t)$ e $W(t)$ para um instante $t = ntp + \alpha tp/2$; $0 \leq \alpha \leq 1$

$$v_0(t) = \sum_{i=1}^2 \left[\int_0^t K_i e^{-(t-u)/\tau_i} W(u) du + \int_{ntp}^{ntp+\alpha tp/2} K_i e^{-(t-u)/\tau_i} W(u) du \right] = \sum_{i=1}^2 \left[\int_0^{ntp} K_i e^{-(t-u)/\tau_i} W(u) du + \int_{ntp}^{ntp+\alpha tp/2} K_i e^{-(t-u)/\tau_i} W(u) du \right] \quad (IV.38)$$

onde:

$$\int_0^{ntp} K_i e^{-(t-u)/\tau_i} W(u) du = \int_0^{tp/2} K_i e^{-(t-u)/\tau_i} W_0 du + \int_{tp}^{3tp/2} K_i e^{-(t-u)/\tau_i} W_0 du + \dots + \int_{(n-1)tp}^{(n-1/2)tp} K_i e^{-(t-u)/\tau_i} W_0 du$$

ou seja:

$$\int_0^{ntp} K_i e^{-(t-u)/\tau_i} W(u) du = K_i W_0 \tau_i e^{-t/\tau_i} \left[(e^{tp/2\tau_i} + e^{3tp/2\tau_i} + \dots + e^{(n-1/2)tp/\tau_i}) - (1 + e^{tp/\tau_i} + \dots + e^{(n-1)tp/\tau_i}) \right] \quad (IV.39)$$

$$\int_{ntp}^{ntp+\alpha tp/2} K_i e^{-(t-u)/\tau_i} W(u) du = K_i W_0 \tau_i e^{-t/\tau_i} e^{ntp/\tau_i} (e^{\alpha tp/2\tau_i} - 1) \quad (IV.40)$$

Substituindo as Fórmulas (39) e (40) em (38), e fazendo $t = ntp + \alpha tp/2$, temos:

$$\begin{aligned}
 V_0(\alpha) = & \sum_{i=1}^2 K_i W_0 \tau_i \left[e^{(1/2-n-\alpha/2)tp/\tau_i} + e^{(3/2-n-\alpha/2)tp/\tau_i} + \dots + \right. \\
 & + e^{(-1/2-\alpha/2)tp/\tau_i} - (e^{(-n-\alpha/2)tp/\tau_i} + e^{(1-n-\alpha/2)tp/\tau_i} + \dots + \\
 & \left. + e^{(-1-\alpha/2)tp/\tau_i}) \right] + K_i W_0 \tau_i e^{-(ntp+\alpha tp/2)/\tau_i} \times \\
 & \times \left[e^{ntp/\tau_i} (e^{\alpha tp/2\tau_i} - 1) \right]
 \end{aligned}$$

Para obtermos $V_0(\alpha)$ estacionário, temos que calcular o $\lim_{n \rightarrow \infty} V_0(\alpha)$, observando que $V_0(\alpha)$ contém a soma de duas P.G. de razão e^{tp/τ_i} . Então

$$\lim_{n \rightarrow \infty} V_0(\alpha) = \sum_{i=1}^2 K_i W_0 \tau_i \left[1 - \frac{e^{-\alpha tp/2\tau_i}}{1 + e^{-tp/2\tau_i}} \right] \quad (IV.41)$$

Determinemos $V_0(t)$ quando os detetores deixam de ser expostos às radiações do alvo, ou seja, $t = (n+1/2)tp + \alpha tp/2$; $0 \leq \alpha \leq 1$. (Figura IV.16).

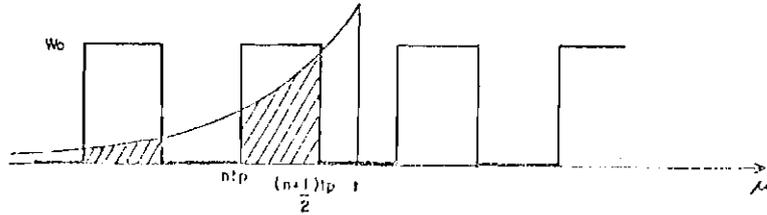


Fig. IV.16 - Convolução entre $h_i(t)$ e $W(t)$ para um instante $t=(n+1/2)tp + \alpha tp/2$; $0 \leq \alpha \leq 1$

Neste caso, $V_o(t)$ é dado por:

$$V_o(t) = \sum_{i=1}^2 \int_0^t K_i e^{-(t-u)/\tau_i} W(u) du = \sum_{i=1}^2 \left[\int_0^{(n+1/2)tp} K_i e^{-(t-u)/\tau_i} W(u) du + \int_{(n+1/2)tp}^t K_i e^{-(t-u)/\tau_i} W(u) du \right] \quad (IV.42)$$

A integral da 2ª parcela à direita da Fórmula (42) é nula, porque $W(u) = 0$ no intervalo $(n+1/2)tp \leq t \leq (n+1/2)tp + tp/2$. Temos, então:

$$V_o(t) = \sum_{i=1}^2 \left[\int_0^{tp/2} K_i e^{-(t-u)/\tau_i} W_0 du + \int_{tp}^{3tp/2} K_i e^{-(t-u)/\tau_i} W_0 du + \dots + \int_{ntp}^{(n+1/2)tp} K_i e^{-(t-u)/\tau_i} W_0 du \right]$$

Resolvendo a equação acima e fazendo $t=(n+1/2)tp+\alpha tp/2$,

obtemos:

$$V_0(\alpha) = \sum_{i=1}^2 K_i W_0 \tau_i \left[e^{-(n+\alpha/2)tp/\tau_i} + e^{-(n-1+\alpha/2)tp/\tau_i} + \dots + e^{\alpha tp/2\tau_i} - (e^{-(n+1/2+\alpha/2)tp/\tau_i} + e^{-(n-1/2+\alpha/2)tp/\tau_i} + \dots + e^{-(1/2+\alpha/2)tp/\tau_i}) \right]$$

$V_0(\alpha)$ estacionário \bar{e} :

$$V_0(\alpha) = \lim_{n \rightarrow \infty} V_0(\alpha) = \sum_{i=1}^2 K_i W_0 \tau_i \frac{e^{-\alpha tp/2\tau_i}}{1 + e^{-tp/2\tau_i}} \quad (IV.43)$$

Os valores numéricos de τ_1 , τ_2 , K , K_1 e K_2 , necessários para a determinação de $V_0(\alpha)$, são:

$$\tau_1 = 68,54 \times 10^{-5} \text{ s}$$

$$\tau_2 = 17,70 \times 10^{-5} \text{ s}$$

$$K = 12,56 \times 10^{-3} \text{ Vs/Watt}$$

$$K_1 = -36,05 \times 10^3 \text{ V/Joule}$$

$$K_2 = 13,96 \times 10^4 \text{ V/Joule}$$

Tendo em vista as Fórmulas (41) e (43) e os valores numéricos das constantes acima, traçamos o gráfico de $V_0(\alpha)$ na Figura IV.17.

OBS.: No APÊNDICE D é mostrado um programa em FORTRAN, usado para nos auxiliar no traçado da Figura IV.17.

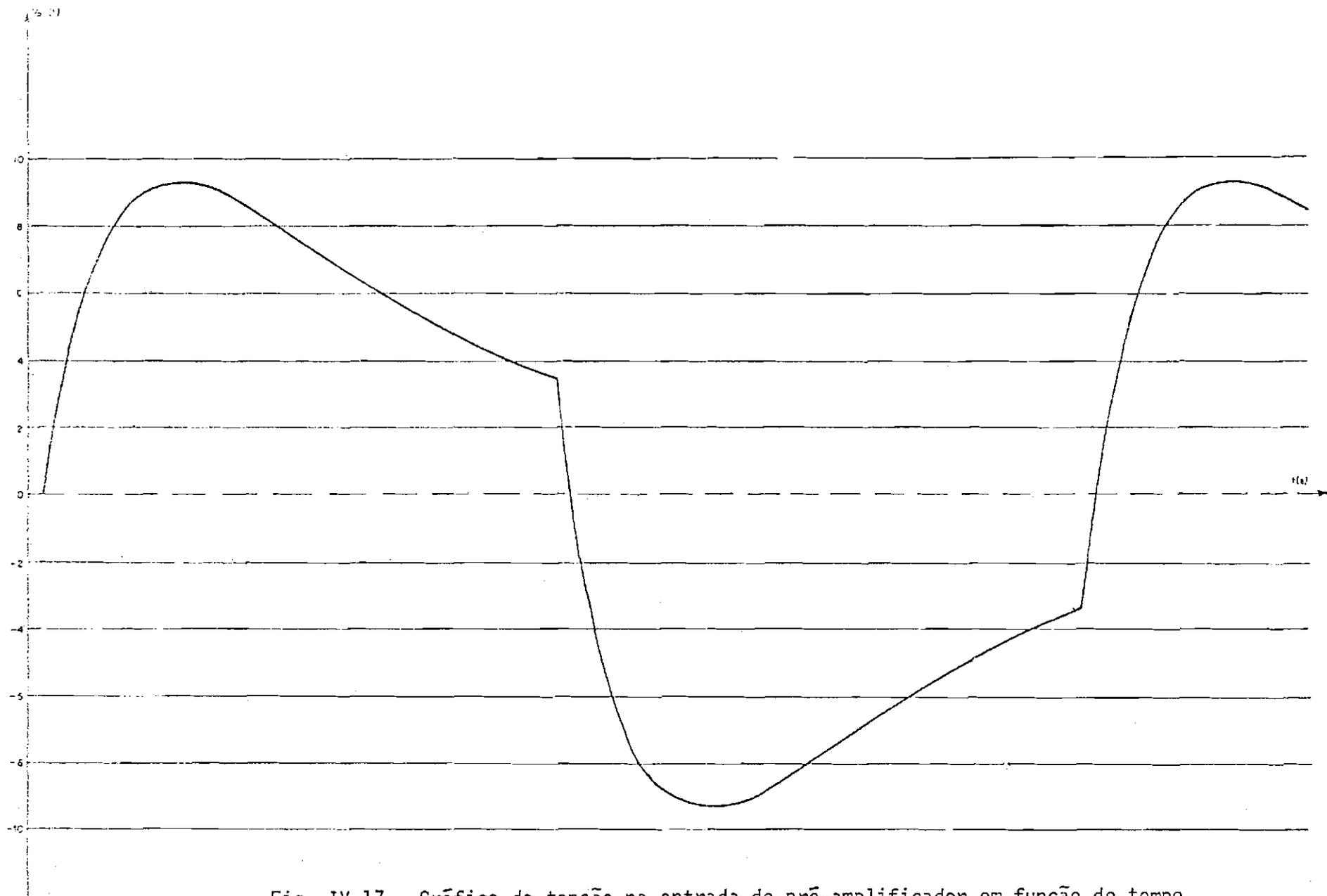


Fig. IV.17 - Gráfico da tensão na entrada do pré-amplificador em função do tempo

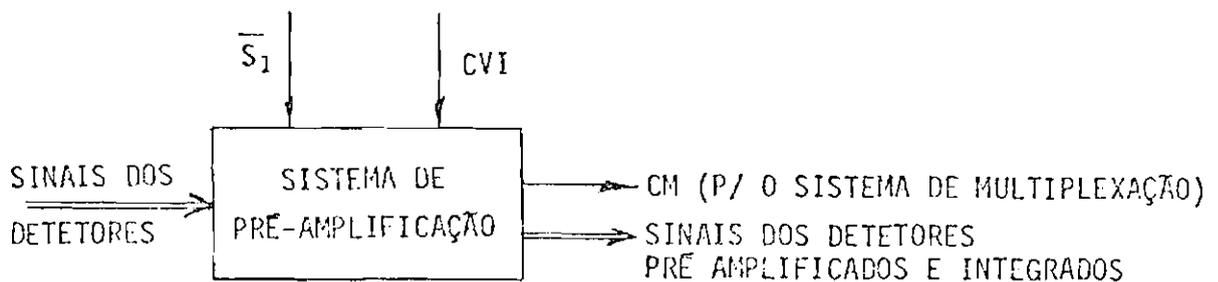
CAPÍTULO V

SISTEMA DE PRÉ-AMPLIFICAÇÃO

5.1 - DESCRIÇÃO GERAL

Como já vimos, o detetor piroelétrico é essencialmente um gerador de corrente, tendo uma capacitância muito baixa (da ordem de alguns pF) e uma alta resistância de fuga. Para obtenção de um nível de sinal e uma largura de faixa consideráveis, na saída de um pré-amplificador, este deverá ter alta resistância e baixa capacitância de entrada. Para efetuar tal pré-amplificação, um transistor de efeito de campo ("FET") satisfaz plenamente estas condições.

O diagrama de bloco do sistema de pré-amplificação, com suas entradas e saídas, é representado abaixo:



O sistema de pré-amplificação possui as seguintes entradas:

- 1) Os sinais vindos dos detetores;
- 2) O sinal de controle $\overline{S_1}$, que vem do sistema de multiplexação;
- 3) Pulsos de sincronismo CVI, que indicam o início da varredura de uma linha transversal.

A Figura V.1 apresenta os circuitos do sistema de pré-amplificação, correspondente a somente um dos 16 detetores. Os controles das chaves CH_1 e CH_2 são os únicos circuitos comuns a todos os detetores. Portanto, as saídas CCH_1 e CCH_2 alimentam, simultaneamente, todas as chaves CH_1 e CH_2 associadas a cada detetor.

Assim que um detetor é exposto às radiações do alvo, através de uma das janelas do disco de amostragem, ele responde com um pequeno tempo de subida, até um nível de tensão determinado pela intensidade da radiação pelo ganho do pré-amplificador, constituído de um "FET" e de um transistor PNP. Como o detetor piroelétrico responde somente a variações de energia incidente, o nível de tensão AC do sinal tende a zero. Dependendo da velocidade do disco de amostragem, pode acontecer que, antes desta tensão se anular, o detetor deixe de ser exposto à radiação do alvo, para ser exposto aos elementos de área do disco de amostragem. Desse modo, a saída do pré-amplificador vai variar no sentido negativo, com o nível de tensão inicial diferente de zero. Portanto, é necessário um filtro passa-alto na saída do pré-amplificador, para atenuar as componentes de baixa frequência do sinal, assegurando um nível de tensão zero, tanto no início como no fim da exposição dos detetores aos elementos de área do alvo.

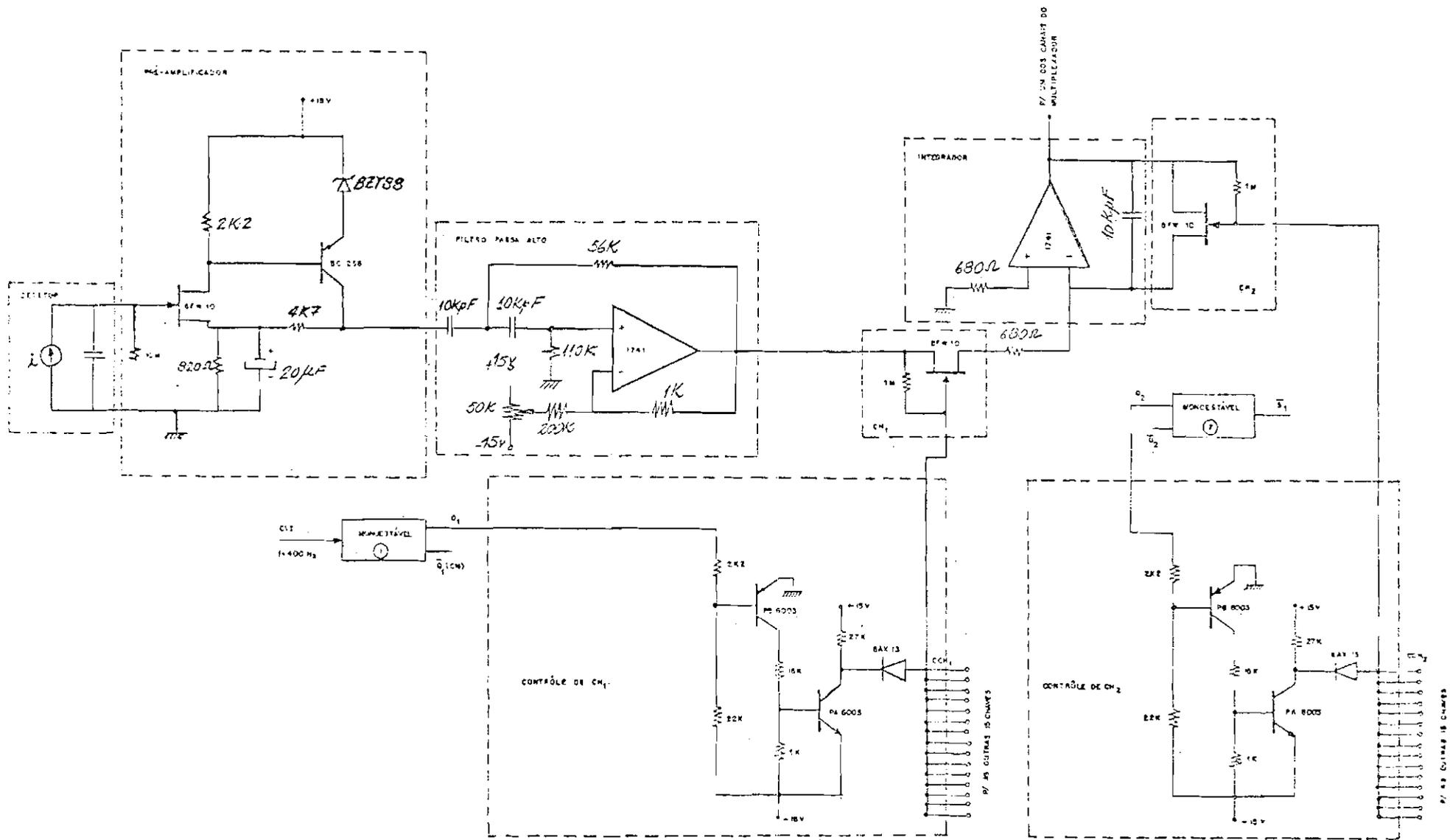


Fig. V.1 - Circuitos do sistema de prē-amplificaçāo, correspondentes a somente um detetor

Toda vez que os detetores são expostos às radiações do alvo, um pulso de CVI ocorre, e, neste instante, inicia-se a integração dos sinais durante 1ms (chaves CH_1 fechadas e chaves CH_2 abertas). (Figura V.2). Esta integração permite aumentar o nível dos sinais e minimizar o ruído. Em seguida, o valor de cada integração é amostrado durante 1ms, para um dos canais do multiplexador (CH_1 e CH_2 abertas). Antes de ocorrer o próximo pulso de sincronismo CVI, 0,45ms são reservados para a descarga do capacitor de integração (Chaves CH_1 abertas e chaves CH_2 fechadas). Esta descarga é realizada somente quando a saída Q do monoestável (2), controlado por $\overline{S_1}$, está em nível alto.

O sinal CM, para controle do sistema de multiplexação, é gerado na saída Q do monoestável (1) ($\overline{Q_1}$). Durante a integração dos sinais, CM está em nível baixo, enquanto no período de amostragem e descarga do capacitor, ele está em nível alto.

OBS.: 1) Quando um pulso de sincronismo CVI ocorre, os detetores já de vem estar expostos às radiações do alvo; desse modo, garantimos que somente a parte positiva do sinal será integrada.

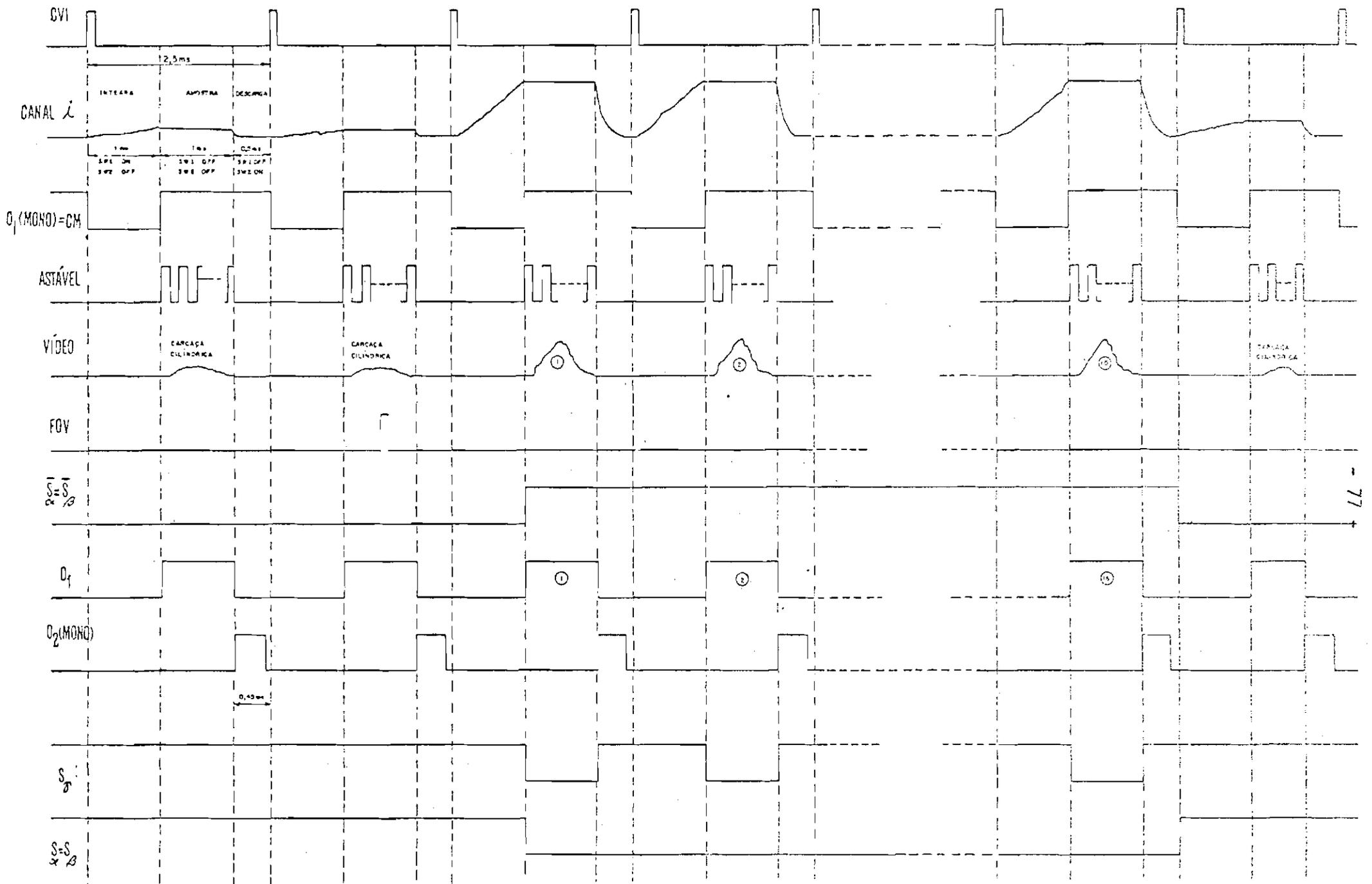


Fig. V.2 - Formas de onda processadas no Imageador

- 2) Fora do campo de visão útil do aparelho, o sinal, que vai ser integrado, será dos elementos de área que compõem a carcaça do cilindro e envolvem o espelho E_1 . Este sinal não tem interesse e não aparece na tela do TRC.
- 3) A temperatura do corpo, tomada como referência, será a parte do disco de amostragem, que impede a passagem das radiações do alvo para os detetores.

5.2 - PROJETO DOS CIRCUITOS DO SISTEMA DE PRÉ-AMPLIFICAÇÃO

Nesta seção será mostrado como foram projetados os diferentes tipos de circuitos, que compõem o esquema eletrônico do sistema de pré-amplificação (Figura V.1).

5.2.1 - PRÉ-AMPLIFICADOR

O circuito do pré-amplificador é realizado conforme a Figura V.3 (Gosling, 1965). O primeiro estágio do pré-amplificador é constituído por um "FET", que apresenta alta resistência e baixa capacitância de entrada. O estágio seguinte é um transistor PNP, que amplifica, consideravelmente, o sinal na saída do "FET".

Nas aplicações como amplificador, o FET é utilizado, quase sempre, acima da região "pinch-off", também chamada região de saturação de corrente. Se I_D é a corrente de saturação de dreno, e seu valor para $V_{GS} = 0$ é I_{DSS} , podemos estabelecer a relação entre I_D e V_{GS} , pela seguinte expressão (Millman, 1972):

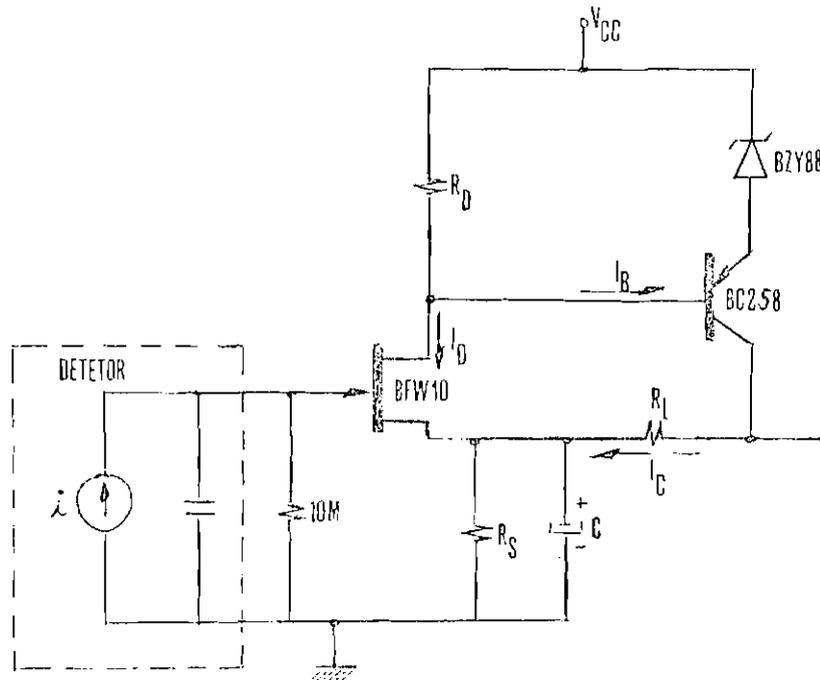


Fig. V.3 -- Circuito do prē-amplificador

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right)^2 \quad (V.1)$$

onde V_p é a tensão de V_{GS} para o qual $I_D = 0$, chamada tensão de "pinch-off".

Pela Tabela V.1, que apresenta os principais parâmetros do "FET" utilizado (BFW10), verificamos que: $V_p = -4,4v$ e $I_{DSS} = 12mA$. Para determinação do ponto de operação do "FET", verifiquemos qual a corrente de dreno, se escolhermos $V_{GS} = -2.5v$. Temos, então, pela Fôrmula (1):

$$I_D = 12 \left(1 - \frac{2,5}{4,4} \right)^2 \longrightarrow I_D = 2.16mA$$

TABELA V.1

PARÂMETROS DO "FET" BFW10

C_{is}	CAPACITÂNCIA DE ENTRADA	< 5pF
C_{gd}	CAPACITÂNCIA DE REALIMENTAÇÃO	< 0,75pF
C_{gs}	CAPACITÂNCIA "GATE-SOURCE"	$C_{gs} = C_{is} - C_{gd}$ (<4,25pF)
g_m	ADMITÂNCIA DE TRANSFERÊNCIA	> 3.5 mΩ ⁻¹ < 6.5 mΩ ⁻¹
g_{ds}	ADMITÂNCIA DE SAÍDA	< 85μΩ ⁻¹
V_p	TENSÃO DE "PINCH-OFF"	- 4,4v
I_{DSS}	CORRENTE DE SATURAÇÃO DE DRENO PARA $V_{GS} = 0$	12mA

A corrente de coletor do transistor \bar{I}_C é determinada pela corrente de base, que é dada por:

$$I_B = I_D - \frac{V_Z + V_{EB}}{R_D} \quad (V.2)$$

onde V_Z é a tensão do diodo Zener. Conseqüentemente:

$$I_C = \beta I_B = \beta \left(I_D - \frac{V_Z + V_{EB}}{R_D} \right)$$

ou seja:

$$R_D = \frac{V_Z + V_{EB}}{I_D - \frac{I_C}{\beta}} \quad (V.3)$$

O diodo Zener é o BZY88, que apresenta uma tensão de polarização reversa: $V_Z = 3,9v$. Escolhendo $I_C = 1mA$, a Fórmula (3) fornece:

$$R_D = \frac{3,9 + 0,6}{2,16 - \frac{1}{150}} = 2.08K$$

Como a tensão através do resistor de $10M$ é, praticamente, nula, devido à baixa corrente de "gate", temos:

$$V_{GS} = - R_S (I_C + I_D) \quad (V.4)$$

ou seja:

$$R_S = \frac{-V_{GS}}{I_C + I_D} = \frac{2.5}{3.16} \longrightarrow R_S = 0,79K$$

O valor padrão mais próximo para R_S seria 820Ω , enquanto para R_D seria $2K$. Entretanto, por inspeção da Fórmula (2), se I_D é fixo, R_D deve satisfazer a Fórmula (5), para que I_B seja maior que zero.

$$R_D > \frac{V_Z + V_{BE}}{I_D} \quad (V.5)$$

Portanto, $R_D=2K$ não é um valor aceitável, e $R_D=2,2K$ é escolhido. As correntes I_C e I_D são recalculadas pelas Fórmulas (3) e (4), tendo em

vista que: $R_D = 2,2K$ e $R_S = 820\Omega$; os valores obtidos são: $I_D = 2,04mA$ e $I_C = 0,99mA$.

A malha de saída do estágio a transistor nos fornece a seguinte expressão:

$$R_S (I_D + I_C) + V_Z + R_L I_C + V_{EC} = V_{CC} \quad (V.6)$$

Devemos escolher $V_{EC} = R_L I_C$, para que o pré-amplificador forneça a maior tensão de saída possível, para um sinal simétrico. Nestas condições, da Fórmula (6) resulta:

$$R_L = \frac{V_{CC} - R_S (I_D + I_C) - V_Z}{2I_C} \quad (V.7)$$

Portanto:

$$R_L = \frac{15 - 0,82 (2,04 + 0,99) - 3,9}{2 \times 0,99} = \frac{8,62}{1,98} = 4,35K$$

O valor padrão mais próximo é: $R_L = 4,7K$.

Vamos, agora, calcular o ganho total do pré-amplificador (A_V), sem considerar a realimentação do coletor do transistor para o "source" do "FET". Posteriormente, será calculado o ganho total com realimentação (A_V').

A expressão do ganho do 1º estágio do pré-amplificador é:

$$A_{v1} = \frac{-g_m (R_D || h_{ie})}{1 + g_m (R_S || Z_C)} \quad (V.8)$$

onde:

h_{ie} = resistência de entrada do transistor

Z_C = impedância do capacitor C

Escolhendo $C = 20\mu F$, e levando-se em conta que a frequência de amostragem do sinal é 400Hz, Z_C será:

$$Z_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{0,159}{400 \times 20 \times 10^{-6}} \longrightarrow Z_C \cong 20\Omega$$

Como $3,5m\Omega^{-1} < g_m < 6,5m\Omega^{-1}$ (Tabela V.1), e considerando que $h_{ie} = 4,5K$, a Fôrmla (8) fornece:

$$-8,45 < A_{v1} < -4,8$$

A expressão para o ganho do 2º estágio é:

$$A_{v2} = \frac{h_{fe} R_L^*}{h_{ie}} \quad (V.9)$$

onde:

$$R_L^* = R_L + R_S^*$$

$$R_S^* = R_o // R_S // Z_C$$

$R_o \cong 1/g_m$ = impedância vista no terminal "source" do "FET".

Como: $R_L \gg R_S^*$, então: $R_L^* \cong R_L$

Portanto, a Fórmula (9) se transforma em:

$$A_{V_2} = \frac{-h_{fe} R_L}{h_{ie}} \quad (V.10)$$

ou seja:

$$A_{V_2} = \frac{-150 \times 4,7}{4,5} \cong -157$$

O ganho total, sem realimentação, é $A_V = A_{V_1} A_{V_2}$. Considerando o pior caso para o ganho do 1º estágio, ou seja: $A_{V_1} = 4,8$, o ganho total A_V será, aproximadamente, 754.

Para frequências baixas, a impedância capacitiva é considerável, implicando numa realimentação negativa para o "source" do FET. O ganho total, então, é dado por:

$$A_V' = \frac{A_V}{1 + \left[(R_S // Z_C) / (R_S // Z_C) + R_L \right] A_V} \quad (V.11)$$

onde:

A_V = ganho de tensão total sem realimentação

A_V' = ganho de tensão total com realimentação

No caso em que $f = 400\text{Hz}$, $Z_C // R_S \cong 20\Omega$, e substituindo os valores acima obtidos na Fórmula (V.11), o ganho total com realimentação A_V' é, aproximadamente, 180.

5.2.2 - FILTRO PASSA-ALTAS

O filtro passa-altas (Graeme, 1971) é realizado segundo a Figura V.4.

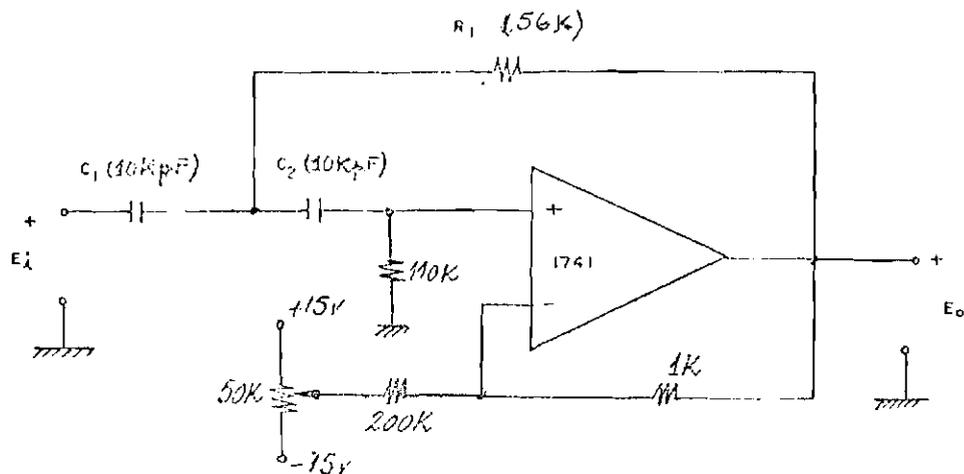


Fig. V.4 - Filtro passa-altas

A função de transferência é:

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{Ks^2}{s^2 + s \left[\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} + \frac{(1-K)}{R_1 C_1} \right] + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (V.12)$$

Os parâmetros do sistema são:

$$H_0 = K \text{ (ganho do filtro)}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \text{ (frequência de corte)}$$

$$\alpha = \left(\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}\right)^{1/2} + \left(\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}\right)^{1/2} + \left(\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}\right)^{1/2} - K \left(\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}\right)^{1/2}$$

Para $H_0 = 1$, $\alpha = 1,5$, $f_0 = 200\text{Hz}$ ($\omega_0 = 1256,63\text{rd/s}$), e, escolhendo $C_1 = C_2 = C = 10\text{kpF}$, podemos calcular os valores de R_1 e R_2 , através das Fórmulas (13) e (14) abaixo:

$$R_1 = \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 8(H_0 - 1)}}{4\omega_0 C} \quad (\text{V.13})$$

$$R_2 = \frac{4}{\omega_0 C} \frac{1}{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 8(H_0 - 1)}} \quad (\text{V.14})$$

Portanto:

$$R_1 = \frac{\alpha}{2\omega_0 C} = \frac{1,5}{2 \times 1256,63 \times 10 \times 10^{-9}} = 59,68 \text{ K} \longrightarrow R_1 = 56\text{K}$$

$$R_2 = \frac{2}{\omega_0 \alpha C} = \frac{2}{1256,63 \times 1,5 \times 10 \times 10^{-9}} = 106,1\text{K} \longrightarrow R_2 = 110\text{K}$$

5.2.3 - CIRCUITO DO MONOESTÁVEL

Para a realização deste circuito, foi utilizado o inte
grado 74123, que é composto de dois monoestáveis independentes. A Tabe
la de Funções deste integrado é mostrado na Tabela V.2.

TABELA V.2

TABELA DE FUNÇÕES DO 74123

ENTRADAS			SAÍDAS	
CLEAR	A	B	Q	\bar{Q}
L	X	X	L	H
X	H	X	L	H
X	X	L	L	H
H	L	↑		
H	↑	H		
↑	L	H		

H= nível alto

L= nível baixo

↑= transição do nível baixo para o alto

- ↓ = transição do nível alto para o baixo
- ┌┐ = pulso de nível alto
- └└ = pulso de nível baixo
- x = irrelevante (qualquer entrada, inclusive transições)

Quando o pulso de sincronismo CVI apresenta uma transição positiva, o monoestável (1) fornece na sua saída Q_1 um pulso de largura determinada pelo capacitor e resistor externo C_{ext} e R_T (Figuras V.2 e V.5). Durante a ocorrência do pulso em Q_1 , a chave CH_1 se fecha, permitindo a passagem dos sinais dos detetores para os integradores. A saída invertida $\overline{Q_1}$ fornece ao sistema de multiplexação o sinal CM, para iniciar a varredura de uma linha transversal do alvo. O circuito que realiza a função acima descrita é mostrada na Figura V.5.

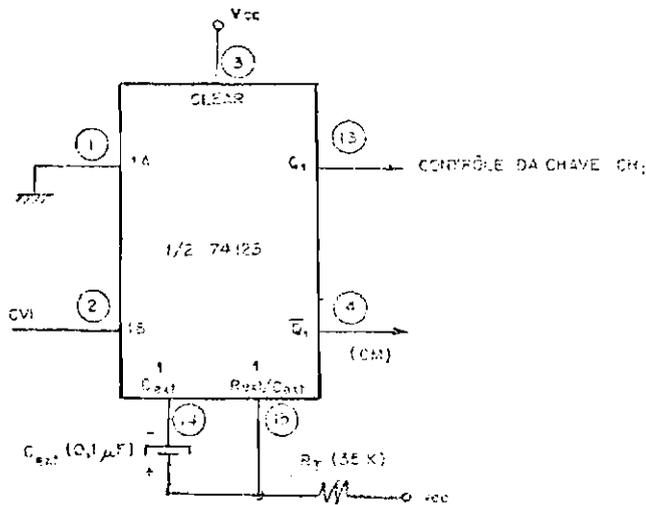


Fig. V.5 - Circuito do monoestável (1)

Para $C_{ext} > 1000 \text{ pF}$, t_w é definido como:

$$t_w = KR_T C_{ext} \left(1 + \frac{0,7}{R_T}\right) \quad (V.15)$$

R_T em $K\Omega$

t_w em ns

C_{ext} em pF

$K = 0,28$ para o 74123

Para $t_w = 1\text{ms}$, temos pela F6rmula (15):

$$10^6 = 0,28 C_{ext} (R_T + 0,7)$$

Escolhendo $C_{ext} = 0,1\mu\text{F}$ (10^5pF), resulta: $R_T = 35\text{K}$

A descarga do capacitor C do integrador é realizada através do "FET" controlado pelo monoestável (2). Este monoestável é acionado por \bar{S}_1 , quando o último detetor é multiplexado. A largura do pulso de saída do monoestável (2)(Q₂) é 0,45ms, para garantir a descarga total do capacitor de integração, antes de ocorrer o próximo pulso de sincronismo CVI. A Figura V.6 mostra como se realiza esta função.

Aplicando novamente a F6rmula (15), com $t_w = 0,45\text{ms}$ e $C_{ext} = 0,1\mu\text{F}$, resulta:

$$0,45 \times 10^6 = 0,28 \times 10^5 (R_T + 0,7) \longrightarrow R_T \cong 15\text{K}$$

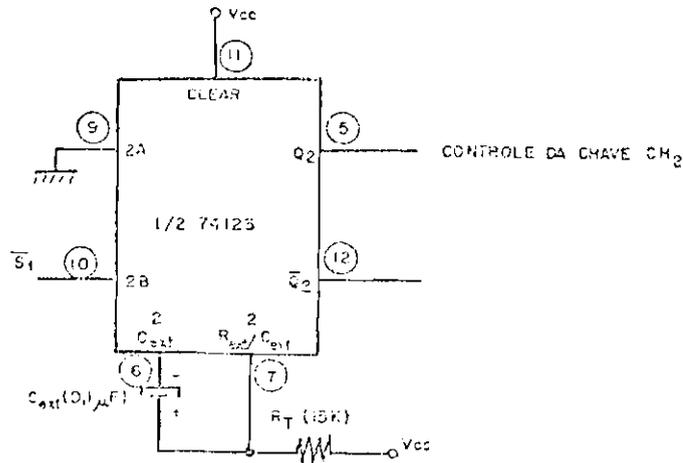


Fig. V.6 - Circuito do monoestável (2)

5.2.4 - CHAVES E SEUS CIRCUITOS DE CONTROLE

O circuito da chave e seu controle é realizado conforme a Figura V.7.

Considerando que a entrada do circuito de controle esteja no nível lógico "1", os transistores T_1 e T_2 devem estar cortados, $V_{C2} \approx 15v$ (tensão no coletor de T_2 em relação a terra) e o diodo não conduz. Neste caso, $V_{GS} = 0$ e o "FET" conduz; dizemos, então, que a chave está fechada. Portanto, com 2,4v na entrada de controle da chave (tensão mínima na saída do monoestável para nível lógico "1"), temos que levar ao corte T_1 e T_2 , ou seja:

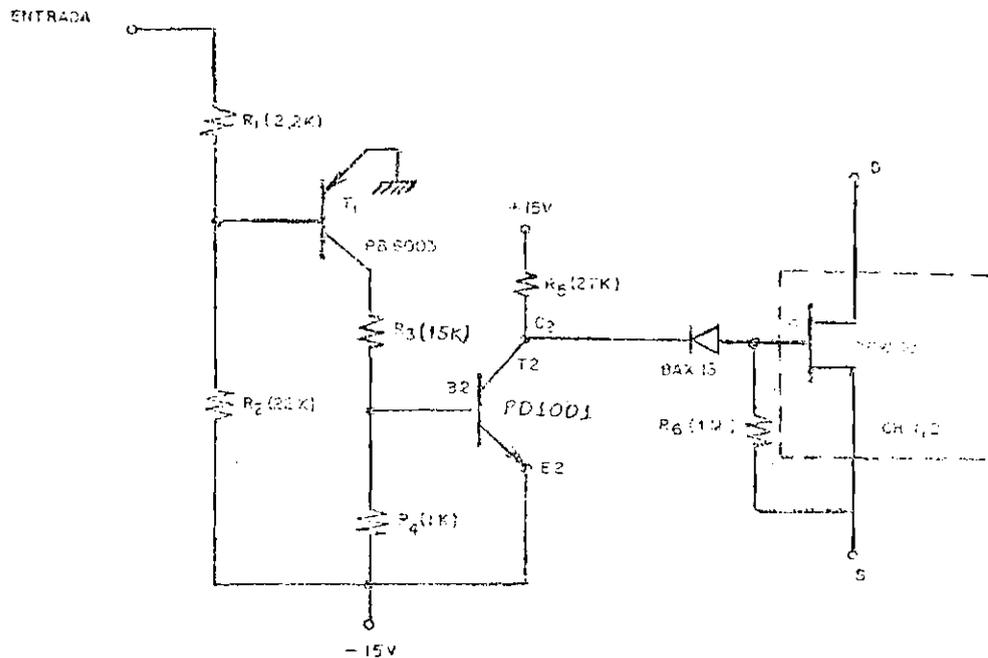


Fig. V.7 - Circuito da chave e seu controle

$$\frac{2,4R_2}{R_1+R_2} - \frac{15 R_1}{R_1+R_2} \geq 0 \longrightarrow R_2 \geq 6,25 R_1 \quad (V.16)$$

Se a entrada do circuito de controle estiver em "0", T_1 e T_2 devem estar saturados, $V_{C2} = -15V$ e o diodo conduz. Neste caso, V_{GS} está abaixo da tensão de "pinch-off", e, conseqüentemente, o FET não conduz; dizemos, então, que a chave está aberta. Portanto, com 0,4V na entrada de controle da chave (tensão máxima na saída do monoestável para nível lógico "0"), temos que saturar T_1 e T_2 . A saturação de T_2 é assegurada pelas seguintes expressões:

$$\frac{15R_4}{R_3+R_4} \geq 0,7 \quad \longrightarrow \quad R_3 \leq 20,42 R_4 \quad (V.17)$$

$$I_{B_2} > \frac{I_{C_2} \text{ (sat)}}{\beta_{\min}} \quad (V.18)$$

A corrente de base de T_2 (I_{B_2}) pode ser expressa por:

$$I_{B_2} = \frac{14,1}{R_3} - \frac{0,7}{R_4} \quad (V.19)$$

A corrente de coletor de T_2 , na saturação, é dada, aproximadamente, por:

$$I_{C_2} \text{ (sat)} \approx \frac{15 + 14,8}{R_5}$$

Se $I_{C_2} \text{ (sat)} = 1\text{mA}$, então, $R_5 = 29,8\text{K}$. O valor padrão mais próximo para R_5 é 27K ; $I_{C_2} \text{ (sat)}$ recalculado, para este valor de R_5 , é $1,1\text{mA}$.

Considerando que os transistores tenham um $\beta_{\min} = 30$, da fórmula (18) e (19) resulta:

$$\frac{14,1}{R_3} - \frac{0,7}{R_4} > \frac{1,1}{30} \quad (V.20)$$

A corrente de coletor de T_1 , na saturação, é: $I_{C_1} \text{ (sat)} = \frac{14,1}{R_3}$. Escolhendo $I_{C_1} \text{ (sat)} = 1\text{mA}$, então, $R_3 = 14,1$. O valor padrão mais próximo é $R_3 = 15\text{K}$; $I_{C_1} \text{ (sat)}$ recalculado, para este valor de R_3 , é $0,94\text{mA}$.

Se $R_4 = 1K$, a saturação de T_2 está garantida, pois as F \bar{o} r \bar{m} ulas (17) e (20) são satisfeitas.

A saturação de T_1 \bar{e} garantida por:

$$\frac{-15 R_1}{R_1 + R_2} \leq -0,7 \quad \longrightarrow \quad R_2 < 20,42R_1 \quad (V.21)$$

$$\frac{14,3}{R_2} - \frac{1,1}{R_1} \geq \frac{0,94}{30} \quad (V.22)$$

Das F \bar{o} r \bar{m} ulas (16) e (21) resulta: $6,25 \leq R_2/R_1 < 20,42$.
Fazendo $R_2=10R_1$, e substituindo este valor na F \bar{o} r \bar{m} ula (22), obtemos:
 $R_1 < 10,53K$. Escolhendo $R_1 = 2,2K$, ent \bar{a} o $R_2 = 22K$.

Quando T_1 e T_2 est \bar{a} o saturados, R_6 (1M) deve ser escolhido, de modo que a queda de tens \bar{a} o, provocada pela passagem de uma corrente por ele, esteja abaixo da tens \bar{a} o de "pinch-off", abrindo, consequentemente, a chave.

5.2.5 - CIRCUITO DO INTEGRADOR

A integraç \bar{a} o do sinal, pr \bar{e} -amplificado e filtrado, \bar{e} realizada atrav \bar{e} s de um amplificador operacional (Figura V.8), cuja entrada inversora \bar{e} ligada ao sinal por uma resist \bar{e} ncia R , e uma realimentaç \bar{a} o, para a entrada, \bar{e} obtida atrav \bar{e} s de um capacitor C .

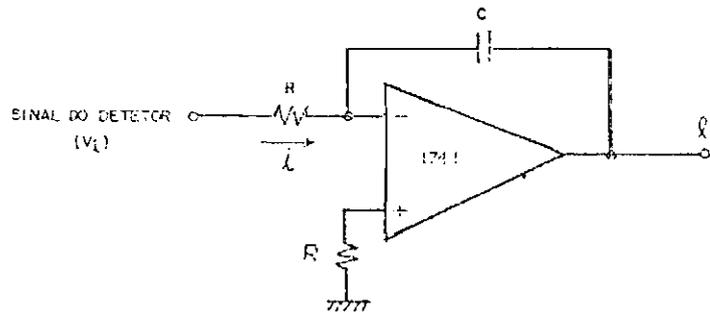


Fig. V.8 - Circuito do integrador

Este circuito fornece:

$$i = \frac{V_i}{R}$$

e,

$$l_s = -\frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad t = \text{tempo que o sinal } \bar{e} \text{ integrado} = \text{ms}$$

Logo:

$$l_s = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_i dt \quad (V.23)$$

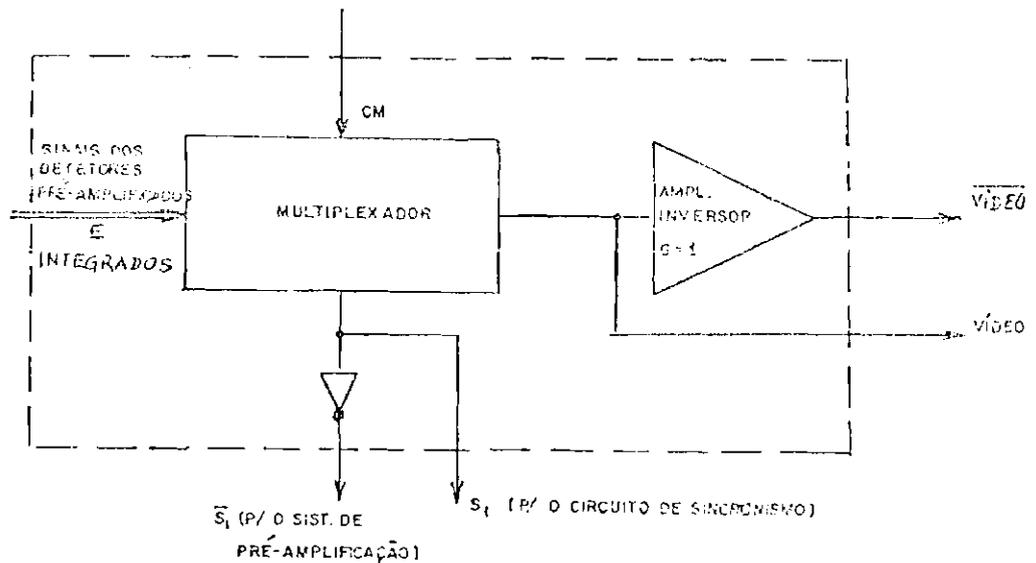
Para que l_s seja 100 vezes maior que o sinal integrado, R e C são escolhidos como sendo 100K e 0.1 μ F, respectivamente.

CAPÍTULO VI

SISTEMA DE MULTIPLEXAÇÃO

6.1 - DESCRIÇÃO GERAL

O diagrama de bloco do sistema de multiplexação, com suas entradas e saídas, é representado abaixo.



O sistema de multiplexação possui duas entradas:

- 1) Os sinais dos detetores pré-amplificados e integrados.
- 2) O sinal de controle CM, gerado na saída Q_1 do monoestável (1) (Figura V.1).

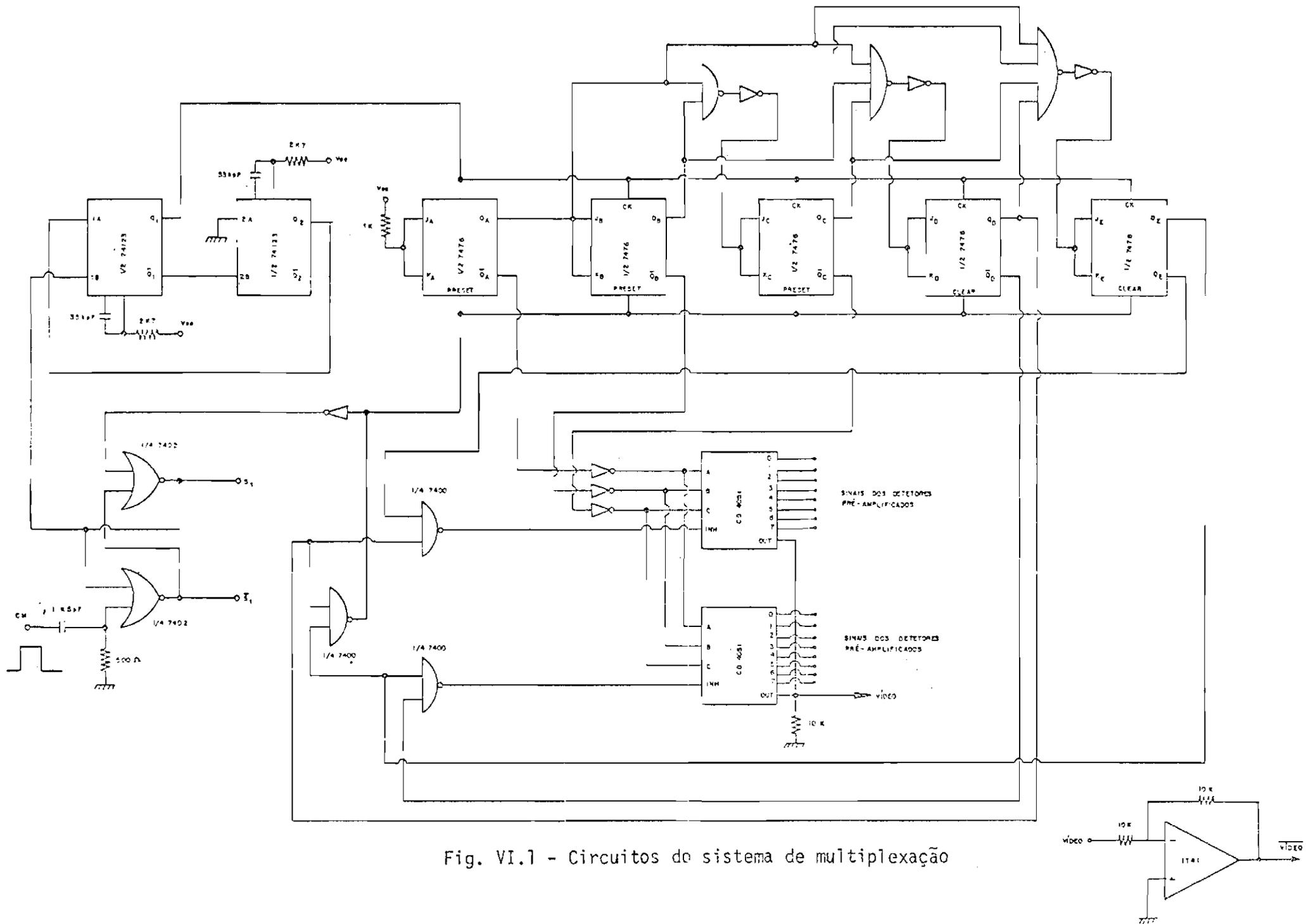


Fig. VI.1 - Circuitos do sistema de multiplexação

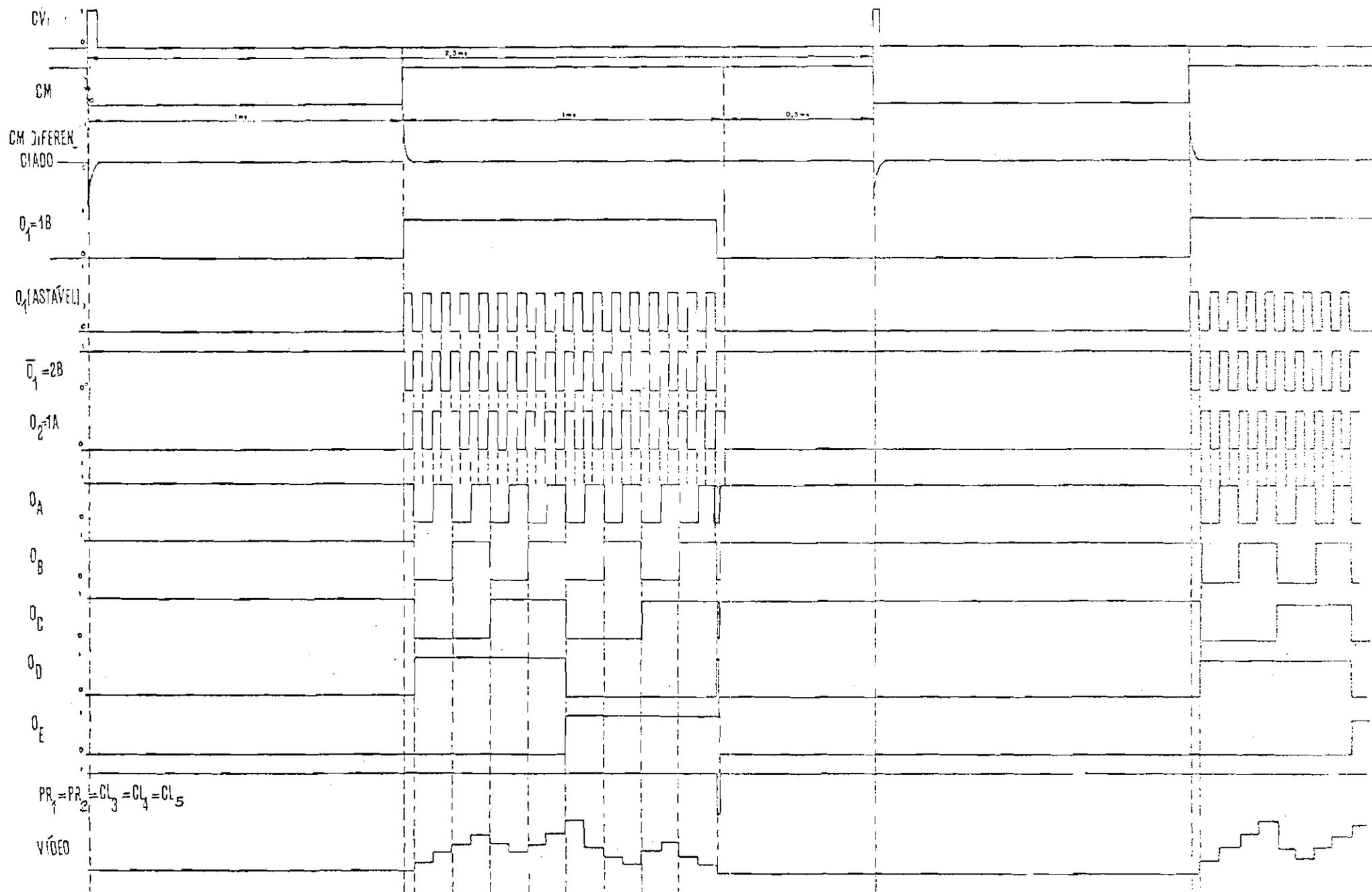


Fig. VI.2 - Formas de onda do sistema de multiplexação

Ele fornece quatro saídas:

- 1) O sinal \overline{S}_1 para o sistema de pré-amplificação;
- 2) O sinal S_1 para controle do circuito de sincronismo;
- 3) Duas saídas (vídeo e vídeo) sendo uma a inversa da outra.

O circuito eletrônico do sistema de multiplexação e suas formas de onda são apresentados nas Figuras VI.1 e VI.2, respectivamente. Esse circuito é composto de:

- 1) Biestável R-S
- 2) Astável
- 3) Contador síncrono
- 4) Multiplexador

6.2 - BIESTÁVEL R-S

O biestável RS é realizado com portas "NOR" (Figuras VI.1 e VI.3), sendo que uma de suas entradas é o sinal de controle \overline{CM} diferenciado. A matriz de fluxo desse biestável é mostrada na Figura VI.4.

Observamos, pela matriz de fluxo, que a entrada 11 nunca deverá ocorrer, pois se houver a transição 11 \rightarrow 00, uma corrida crítica ocorrerá, ou seja, o biestável pode assumir tanto o estado estável ① como o ②. Esse biestável serve para controlar a oscilação do astável, ou seja, quando ocorre uma transição positiva no sinal de controle \overline{CM} ; S_1 acompanha essa transição e o astável inicia a oscilação (Figura VI.2). Essa oscilação permanece enquanto S_1 está em "1", cessando após S_1 efetuar uma transição negativa.

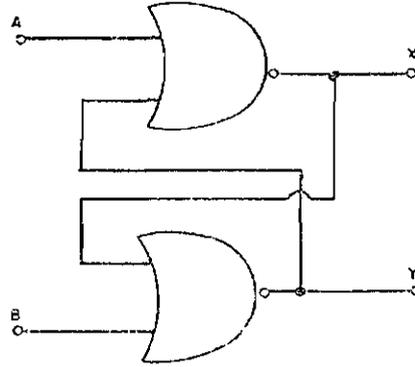


Fig. VI.3 - Biestável realizado com portas "NOR"

AB	00	01	11	10
xy				
00	1,2	3	④	5
01	①	3	4	⑤
11	1,2	3	4	5
10	②	③	4	5

Fig. VI.4 - Matriz de fluxo do biestável

6.3 - ASTÁVEL

O circuito do astável é constituído de dois monoestáveis (Figura VI.5) de um mesmo integrado 74123, cuja tabela de funções é mostrada na Tabela V.2.

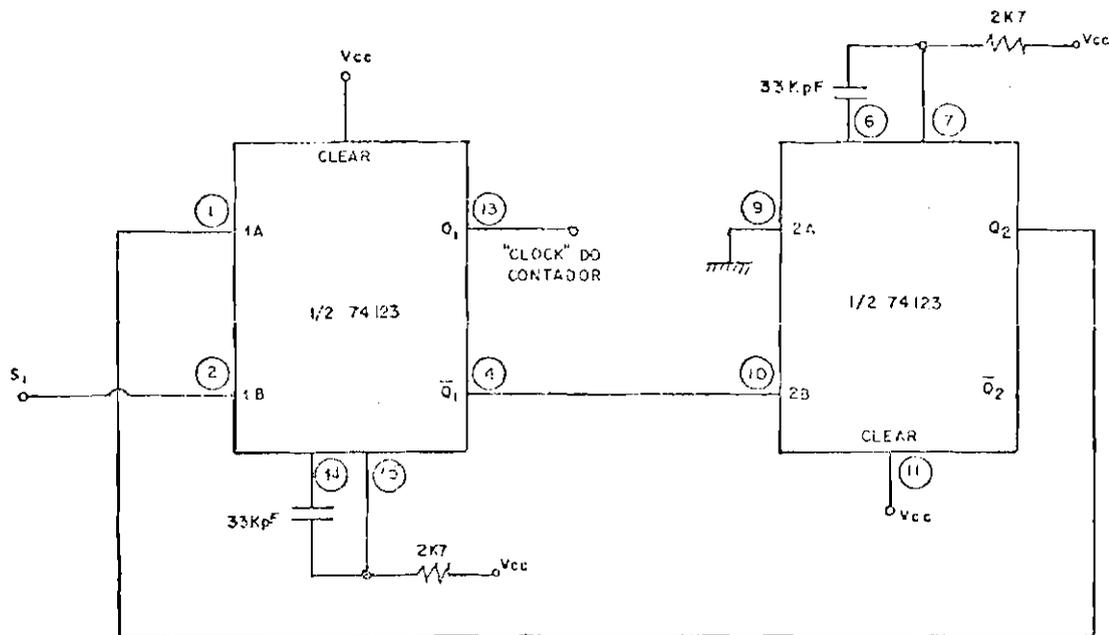


Fig. VI.5 - Circuito do astável

Inicialmente as saídas Q_1 e Q_2 dos monoestáveis estão no nível lógico "0". Quando S_1 efetua uma transição positiva, a saída Q_1 será um pulso, cuja largura será determinada pelos valores de R_1 e C_1 . (Figura VI.2). No momento que \bar{Q}_1 efetuar uma transição positiva, Q_2 será um pulso determinado por R_2 e C_2 . Como Q_2 é realimentado para a entrada 1A, na próxima transição negativa desta entrada, um novo pulso ocorre

para Q_1 . Após 16,5 períodos, o astável deixa de oscilar, porque o contador ao atingir o estado 00011, zera o biestável RS_ (tabela VI.1). Portanto, S_1 vai para o nível lógico "0" e inibe a oscilação do astável. O astável iniciará novamente a oscilação, na próxima transição positiva de CM.

6.4 - CONTADOR SÍNCRONO

Este contador é constituído de cinco biestáveis JK, três portas "NAND" e três inversores, sendo seu pulso de relógio dado pela saída Q_1 do astável. Ele é disparado com transição negativa e é síncrono, ou seja, suas saídas mudam de estado simultaneamente, para evitarmos a ocorrência de picos indesejáveis na saída do multiplexador (sinal de vídeo).

Um biestável, deste contador, somente muda de estado se todos os biestáveis anteriores estiverem no nível lógico "1". A Tabela VI.1 mostra os diversos estados do contador. Observamos, por esta Tabela, que no momento de disparo do circuito do astável, o contador não está em 00000, pois, se isto ocorresse, o sinal do primeiro detetor somente seria amostrado durante metade do tempo correspondente à amostragem dos outros 15 detetores, desde que o contador só muda de estado quando ocorre uma transição negativa. O nível de repouso do contador é dado por 11100, e, após a contagem de 17 pulsos, ele atinge o estado instável 00011.

TABELA VI.1

ESTADOS DO CONTADOR SÍNCRONO

Q_A	Q_B	Q_C	Q_D	Q_E	
0	0	0	0	0	
1	0	0	0	0	
0	1	0	0	0	
1	1	0	0	0	
0	0	1	0	0	
1	0	1	0	0	
0	1	1	0	0	
1	1	1	0	0	← NÍVEL DE REPOUSO
0	0	0	1	0	CANAL 0
1	0	0	1	0	" 1
0	1	0	1	0	" 2
1	1	0	1	0	" 3
0	0	1	1	0	" 4 } 10 MULTIPLEXADOR
1	0	1	1	0	" 5
0	1	1	1	0	" 6
1	1	1	1	0	" 7
0	0	0	0	1	CANAL 0
1	0	0	0	1	" 1
0	1	0	0	1	" 2
1	1	0	0	1	" 3
0	0	1	0	1	" 4 } 20 MULTIPLEXADOR
1	0	1	0	1	" 5
0	1	1	0	1	" 6
1	1	1	0	1	" 7
0	0	0	1	1	← ESTADO INSTÁVEL (CONTADOR VAI PARA SEU NÍVEL DE REPOUSO)

Q_A, Q_B, Q_C - SELEÇÃO DO CANAL
 Q_D, Q_E - SELEÇÃO DO MULTIPLEXADOR.

Os dois últimos bits (Q_D, Q_E) passam através de um "NAND". As entradas "PRESET" dos três primeiros biestáveis, e as entradas "CLEAR" dos dois últimos estão ligados a esse "NAND". Portanto, logo após o contador atingir o estado instável 00011, ele vai para seu estado de repouso 11100. O sinal $\overline{Q_D Q_E}$ passa também por um inversor e vai zerar o biestável RS, inibindo consequentemente o astável. Portanto, durante todo o tempo que o astável oscila, S_1 permanece no nível lógico "1".

6.5 - MULTIPLEXADOR

O multiplexador é constituído de dois circuitos integrados COS/MOS CD 4051 AE, cada um tendo oito canais. Esses integrados possuem quatro entradas de controle, A ("bit" menos significativo), B, C e uma entrada de inibição. Esses três sinais binários (A,B,C) selecionam um dos oito canais, e a entrada de inibição seleciona qual dos multiplexadores está em operação. A tabela de verdade do integrado CD 4051 AE é mostrada abaixo (Tabela VI.2).

Observamos, pela Figura VI.1, que as saídas invertidas dos três primeiros biestáveis do contador síncrono são ligadas, através de inversores, às três entradas de controle dos multiplexadores, enquanto as outras duas saídas inversoras são ligadas, através de portas "NAND", às entradas de inibição dos multiplexadores. Logo, os três primeiros "bits" do contador selecionam um dos oito canais, pelo qual a entrada será ligada à saída, enquanto os dois últimos selecionam qual dos dois multiplexadores está em operação.

TABELA VI.2

TABELA DE VERDADE DO 4051AE

ESTADOS DE ENTRADA				CANAL DE OPERAÇÃO
ENTRADA DE INIBIÇÃO	C	B	A	
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	2
0	0	1	1	3
0	1	0	0	4
0	1	0	1	5
0	1	1	0	6
0	1	1	1	7
1	*	*	*	NENHUM

* independente das entradas C,B,A.

OBS.: 1) A temperatura do alvo é medida em relação a temperatura do disco de amostragem. O nível de tensão, referente à temperatura desse disco, será fornecido na saída dos multiplexadores (si

nal de vídeo), durante a ocorrência de metade do 1º período do astável (Figura VI.2).

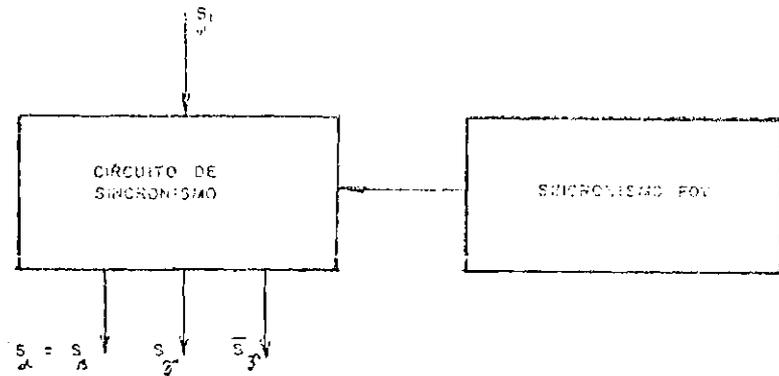
- 2) Como os pulsos nas entradas de inibição dos multiplexadores são resultantes do "NAND" dos dois últimos "bits" do contador, temos que o estado destas entradas terão um atraso correspondente ao tempo de propagação de um "NAND". Por este motivo, tomamos as saídas invertidas dos três primeiros "bits" do contador e passamos estas por inversores (os tempos de propagação de um "NAND" e de um inversor são aproximadamente iguais), em vez de tomarmos, diretamente, as saídas não inversoras, para as entradas de controle dos multiplexadores (A,B,C). Desta maneira, evitamos que picos ocorram na saída do sistema de multiplexação (sinal de vídeo), pois os sinais, para as entradas de controle dos multiplexadores, chegam ao mesmo tempo.

CAPÍTULO VII

CIRCUITO DE SINCRONISMO

7.1 - DESCRIÇÃO GERAL

O diagrama de bloco do circuito de sincronismo, com suas entradas e saídas, é mostrado abaixo:



O circuito de sincronismo possui duas entradas:

- 1) O sinal S_1 , vindo do sistema de multiplexação (sinal este que está presente, sempre que existir sinal de vídeo).
- 2) O sincronismo FOV, que indica o início do campo de visão.

Este circuito fornece três saídas ($S_\alpha = S_\beta$, S_γ , $\overline{S_\gamma}$), que serão entradas para os Miller α , β e γ para uma chave analógica (Figura III.1)

A ocorrência de um pulso de sincronismo FOV determina que, a partir desse momento, os elementos de área do alvo visado estão dentro do campo de visão do aparelho. Nesse instante, o sinal S_1 , que está presente mesmo fora do campo de visão, pode estar se referindo ao sinal de vídeo, correspondente a elementos de área da carcaça cilíndrica do aparelho. Uma das funções do circuito de sincronismo é ignorar o sinal S_1 sem interesse, e somente considerar o sinal S_1 que se refira a elementos de área do alvo visado.

A outra função do circuito de sincronismo é fornecer sinais para as entradas dos Miller α , β , γ e para uma chave analógica os quais controlarão os Eixos Horizontal, Vertical e de Modulação de Intensidade do Tubo de Raios Catódicos. (Figura III.1).

7.2 - REALIZAÇÃO FÍSICA DO CIRCUITO DE SINCRONISMO

O circuito de sincronismo é composto essencialmente de três biestáveis: FF_1 , FF_2 , FF_3 e um contador (Figura VII.1). A Figura VII.2 apresenta as formas de onda para este circuito.

O contador é constituído dos integrados 7493, 7473, de uma porta "NAND" e de um inversor. Como, desde o início até o término do campo de visão, ocorrem 16 pulsos de CVI, o contador deve contar 16 pulsos completos de S_1 . Estes pulsos devem somente se referir a elementos de área do alvo visado, que estejam dentro do campo de visão do aparelho. Para que isto ocorra, o contador somente será acionado quando ocorrer a primeira transição positiva em S_1 , após a transição positiva do pulso de FOV.

O biestável FF_1 é acionado pelo pulso de FOV, enquanto FF_2 somente é acionado quando S_1 estiver no nível lógico "0", após o disparo de FF_1 . Na próxima transição positiva de S_1 , o contador e, consequentemente FF_3 , são acionados.

A Tabela VII.1 mostra os diversos estados do contador, que tem por finalidade contar 16 pulsos de S_1 , dentro do campo de visão do aparelho. Verificamos por esta tabela e pela Figura VII.2, que o contador apresenta um estado de repouso 00000. Quando o contador atinge o estado instável 10001, o biestável JK 7473, o contador 7493, e os biestáveis FF_1 , FF_2 e FF_3 são zerados.

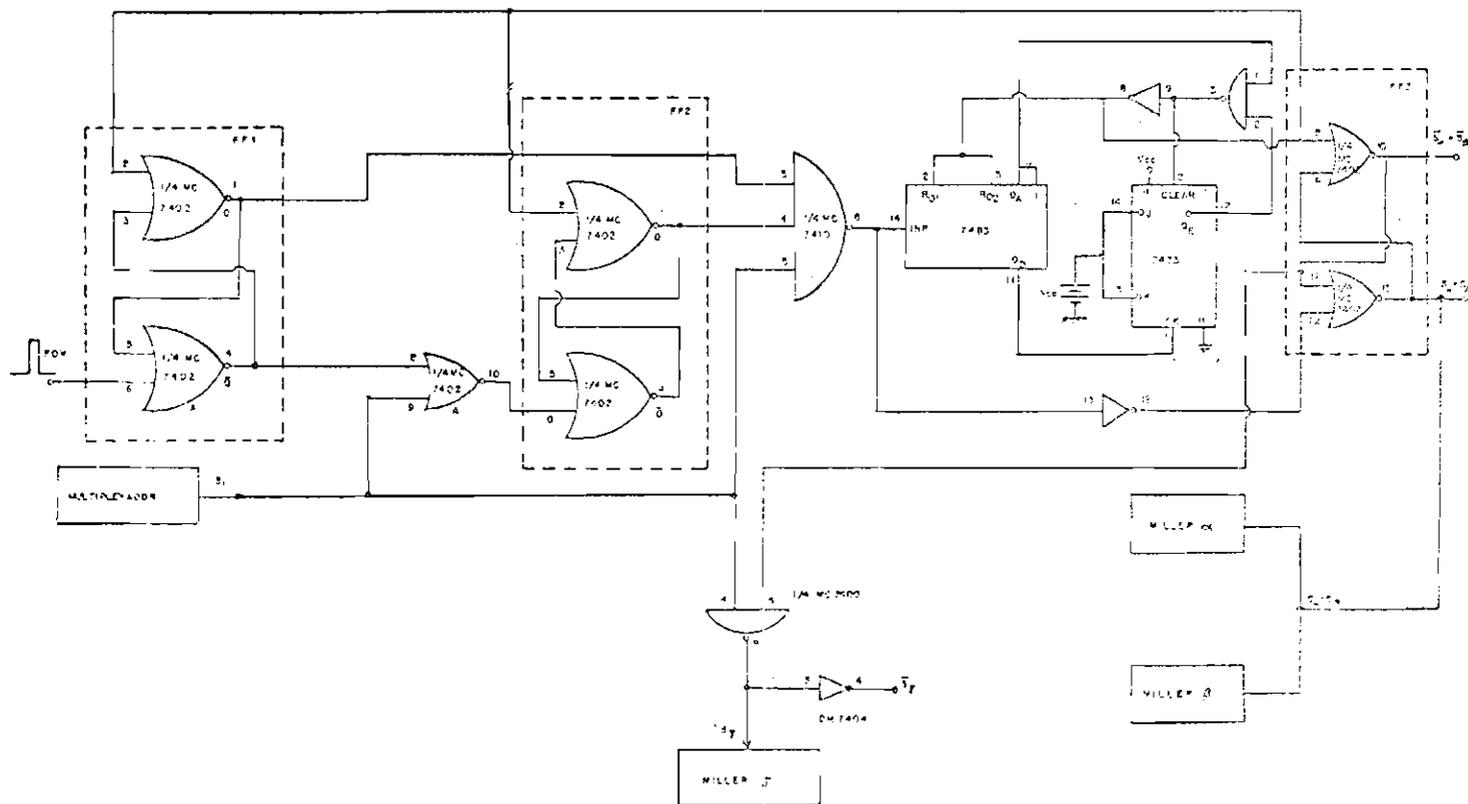


Fig. VII.1 - Circuito de sincronismo

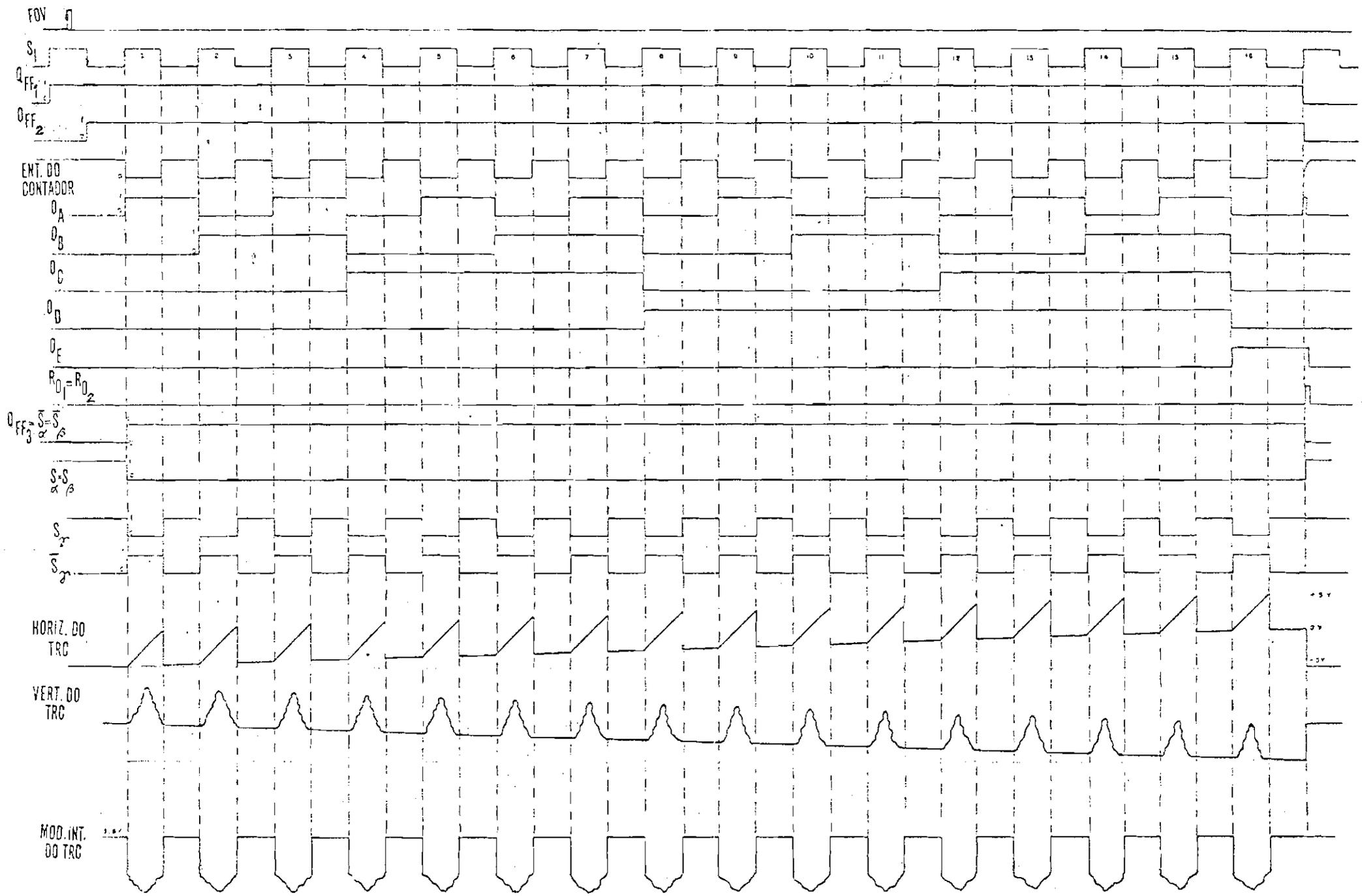


Fig. VII.2 - Formas de onda do circuito de sincronismo

TABELA VII.1

ESTADOS DO CONTADOR.

CONTA - GEM	SAIDAS				
	Q _E	Q _D	Q _C	Q _B	Q _A
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1
2	0	0	0	1	0
3	0	0	0	1	1
4	0	0	1	0	0
5	0	0	1	0	1
6	0	0	1	1	0
7	0	0	1	1	1
8	0	1	0	0	0
9	0	1	0	0	1
10	0	1	0	1	0
11	0	1	0	1	1
12	0	1	1	0	0
13	0	1	1	0	1
14	0	1	1	1	0
15	0	1	1	1	1
16	1	0	0	0	0
17	1	0	0	0	1

O sinal de saída $S_{\alpha} = S_{\beta}$ é fornecido, pelo circuito de sincronismo, para os Miller α e β , através de FF₃ (Figura VII.1). Observa-se que $S_{\alpha} = S_{\beta}$ permanece em "0", durante a contagem de 16 pulsos de S_1 . A saída S_{γ} , fornecida ao Miller γ , é gerada através de uma porta "NAND", com entradas S_1 e $\overline{S_{\alpha}} = \overline{S_{\beta}}$. S_{γ} é invertido, para o controle do Eixo de Intensidade Luminosa do TRC (Figura III.1).

CAPÍTULO VIII

IMAGEM FORMADA NO TUBO DE RAIOS CATÓDICOS

8.1 - DESCRIÇÃO GERAL

A imagem formada no TRC é composta de 16 linhas (Figura VIII.1) que, através de uma exposição em perspectiva, nos dão uma idéia de alto relevo.

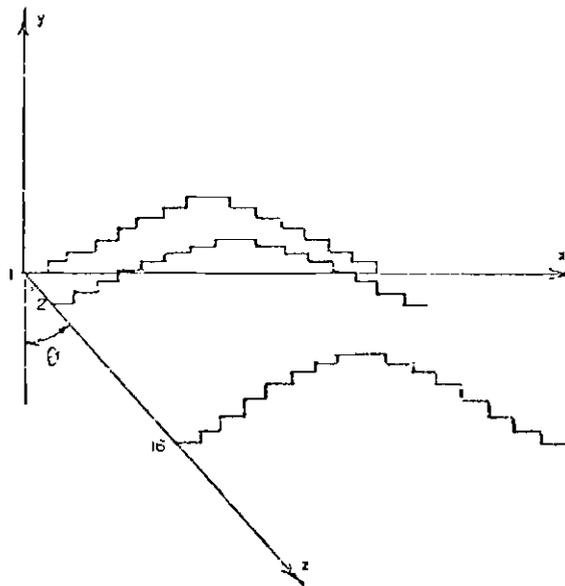


Fig. VIII.1 - Imagem em perspectiva formada sobre o TRC

Para obtenção desta perspectiva, injetamos o sinal de vídeo somado com uma rampa decrescente, no Eixo Vertical do TRC (Figuras III.1 e VII.2). As linhas posteriores da imagem se afastarão das anteriores na direção z, sendo a distância entre linhas adjacentes regulada pela inclinação da rampa gerada pelo Miller β .

No Eixo Horizontal injetamos a soma das rampas α e γ de frequências diferentes. A rampa α é responsável pelo ângulo θ na perspectiva, enquanto a rampa γ efetua o deslocamento horizontal de uma linha do sinal de vídeo.

O Eixo de Modulação de Intensidade Luminosa do TRC é utilizado para o apagamento do feixe eletrônico, quando:

- 1) Estamos fora do campo de visão;
- 2) O sinal de vídeo está ausente no campo de visão.

O próprio sinal de vídeo, que nos interessa, será injetado neste eixo, de modo que os componentes da área varrida, que apresentem maior nível de radiação, sejam mostrados na tela do TRC com maior intensidade. (Figuras III.1 e VII.2).

8.2 - CIRCUITO GERADOR DE RAMPA

Para obtenção das rampas α , β e γ (Figura VII.2) foi utilizado o circuito de varredura Miller, mostrado na Figura VIII.2. Este circuito é composto por um integrador e uma chave controlada por uma das saídas do circuito de sincronismo ($S_\alpha = S_\beta, S_\gamma$).

As rampas α , β e γ são obtidas através de passagem de uma corrente constante I , em um capacitor C (Figura VIII.2), pois:

$$e_o = - \frac{1}{C} \int_0^{t_f} I dt$$

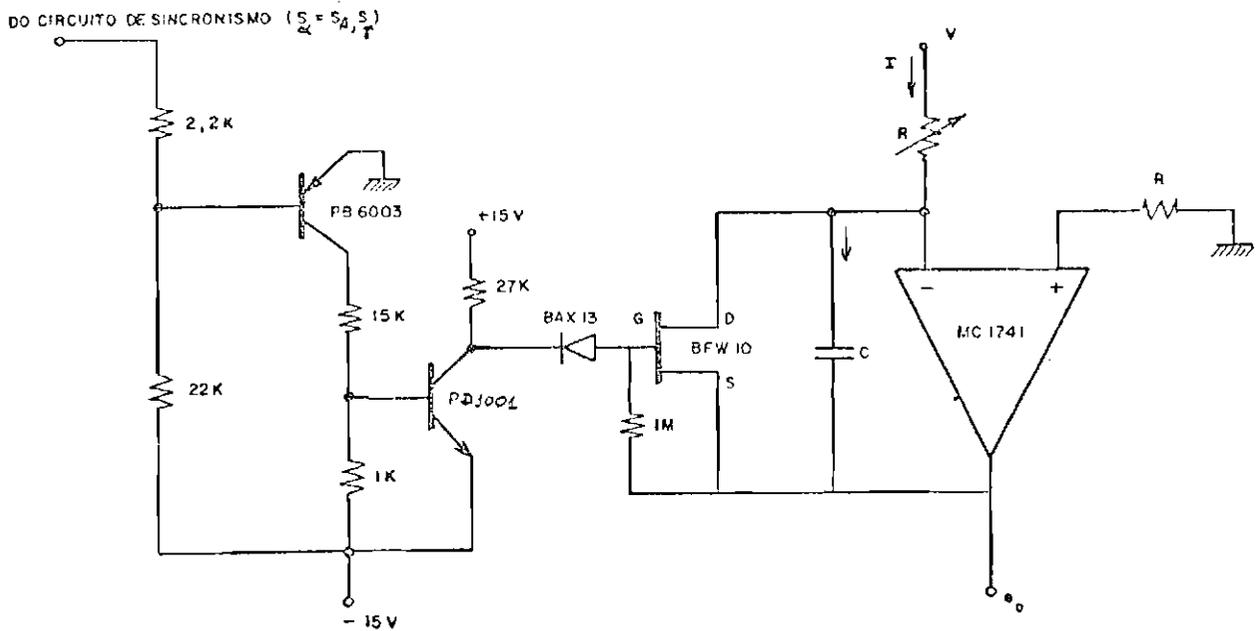


Fig. VIII.2 - Circuito de varredura Miller para obtenção das rampas α , β e γ .

Como $I = \frac{V}{R}$, resulta:

$$e_o = -\frac{Vt_f}{RC} \quad (\text{VIII.1})$$

t_f = tempo de varredura

Observamos, pela Figura VII.2, que os tempos de duração das rampas α e β são iguais, diferindo somente na inclinação, pois a rampa β cresce enquanto a rampa α decresce. O tempo de duração γ é 32 vezes menor que o tempo das rampas α e β . O valor máximo da tensão das rampas ($e_{o\max}$) foi especificado como sendo 1v. Na Tabela VIII.1 são especificados os tempos de varredura e os valores de R, C e V para as rampas α , β e γ .

TABELA VIII.1

PARÂMETROS DAS RAMPAS α , β , γ

RAMPAS	t_f (ms)	RC(ms)	R	C(KpF)	V(volts)
Rampa α	32	480	1M	470	15
Rampa β	32	480	1M	470	-15
Rampa γ	1	15	1M	15	15

8.3 - CONTROLE DO EIXO HORIZONTAL DO TUBO DE RAIOS CATÓDICOS

A soma das rampas α e γ será injetada no Eixo Horizontal, através de um circuito somador realizado com amplificador operacional (Figura VIII.3).

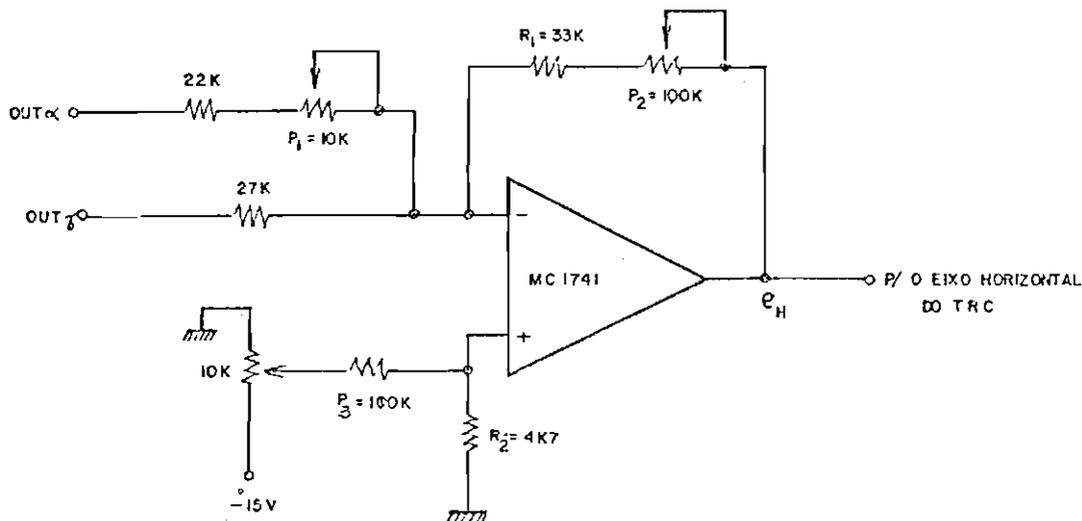


Fig. VIII.3 - Circuito somador das rampas α e γ

A faixa de tensão do Eixo Horizontal do TRC varia de -5v a + 5v. Como a tensão máxima de varredura das rampas α e γ (relativo a OUT_{α} e OUT_{γ}) foi fixado em 1V, o somador deve ter ganho 5. O circuito so mador acima possui ganho e nível DC ajustáveis, de modo a permitir que a varredura horizontal preencha a tela do TRC, o máximo possível. O va lor de R_1 para que e_H seja máximo é resultante da seguinte equação:

$$e_H = 2 \left(\frac{100K + R_1}{27K} \right) \times 1V = 10V$$

Portanto:

$$R_1 = 35K \quad \longrightarrow \quad R_1 \text{ (padrão)} = 33K$$

Para o cálculo do ganho DC, vamos supor que o potenciôme tro de realimentação P_2 apresente uma resistência de 50K. Nessas condi ções, temos:

$$G_{DC} = \frac{83K + 13,5K}{13,5K} = 7,1$$

Para que haja uma variação DC de 5v na saída e_H , de modo que a varredu ra horizontal seja centralizada no TRC, a variação de tensão, no termini nal não inversor do amplificador operacional, será:

$$\Delta e = \frac{5v}{7,1} \approx 0,7$$

R_2 será, então:

$$\frac{15R_2}{105 + R_2} = 0,7 \quad R_2 = 5,1K \quad \longrightarrow \quad R_2 \text{ (padrão)}=4,7K$$

Os controles na imagem, que podem ser feitos através deste somador, são:

- 1) Ganho horizontal - realizado pelo potenciômetro P_2 de realimentação do somador.
- 2) Deslocamento horizontal - realizado pelo potenciômetro P_3 , ajustando-se o nível DC do somador.
- 3) Perspectiva - realizada pelo potenciômetro de entrada P_1 , ligado à saída da rampa α . A Figura VIII.4 mostra duas posições da imagem, ao se efetuar a variação da resistência do potenciômetro P_1 .

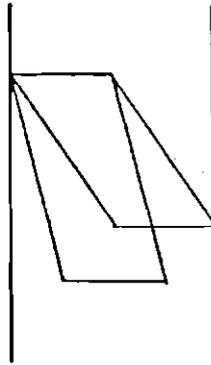


Fig.VIII.4 - Duas posições da imagem no TRC realizadas pelo controle Perspectiva

8.4 - CONTROLE DO EIXO VERTICAL DO TUBO DE RAIOS CATÓDICOS

No Eixo Vertical do TRC será injetado a soma da rampa β com o sinal de vídeo (Figura VIII.5).

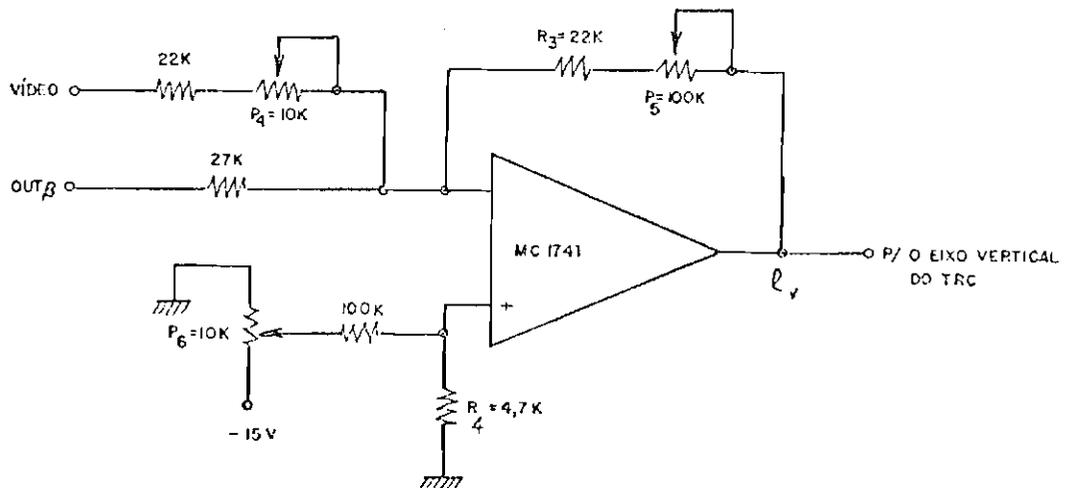


Fig. VIII.5 - Circuito somador da rampa β e do sinal de vídeo

A faixa de tensão do Eixo Vertical do TRC varia de $-4v$ a $+4v$. Como as tensões máximas de varredura da rampa β e do sinal de vídeo são $1V$ e $0,8V$, respectivamente, R_3 será dado por:

$$\frac{100K + R_3}{27K} 1V + \frac{(100K + R_3)}{27K} 0,8V = 8V$$

Portanto:

$$R_3 = 20K \quad \longrightarrow \quad R_3 \text{ (padrão)} = 22K$$

Este circuito também possui ganho e nível DC ajustáveis, de modo que a imagem preencha a tela do TRC, o máximo possível, no sentido vertical. Supondo que P_5 apresente uma resistência de 50K, para efeito de cálculo do ganho DC, temos:

$$G_{DC} = \frac{72K + 13,5K}{13,5K} = 6,3$$

Para ocorrer uma variação DC de 4V na saída de e_v , de modo a obtermos uma centralização da imagem em relação ao Eixo Vertical do TRC, a variação de tensão no terminal não inversor do amplificador operacional será:

$$\Delta e = \frac{4}{6,3} = 0,63V$$

R_4 será então:

$$\frac{15 R_4}{105 + R_4} = 0,63 \quad \longrightarrow \quad R_4 = 4,7K$$

Os controles na imagem, que podem ser feitos através deste somador, são:

- 1) Ganho Vertical - realizado pelo potenciômetro P_5 de realimentação do somador.
- 2) Deslocamento Vertical - realizado pelo potenciômetro P_6 , ajustando-se o nível DC do somador.

- 3) Ajuntamento - realizado pelo potenciômetro de entrada P_4 , ligado ao sinal de vídeo. A Figura VIII.6 mostra duas posições da imagem ao se efetuar a variação da resistência deste potenciômetro.

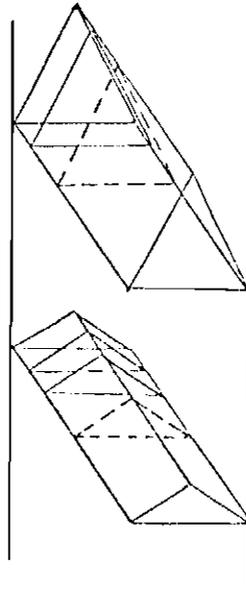


Fig. VII.6 - Duas posições da imagem no TRC realizadas pelo controle Ajuntamento.

8.5 - CONTROLE DO EIXO DE MODULAÇÃO DE INTENSIDADE LUMINOSA DO TUBO DE RAIOS CATÓDICOS

A passagem do sinal de vídeo invertido, para o Eixo de Modulação de Intensidade Luminosa do TRC, é controlada por S_Y , do circuito de sincronismo, através de uma chave analógica (Figura III.1, VII.2 e VII.7).

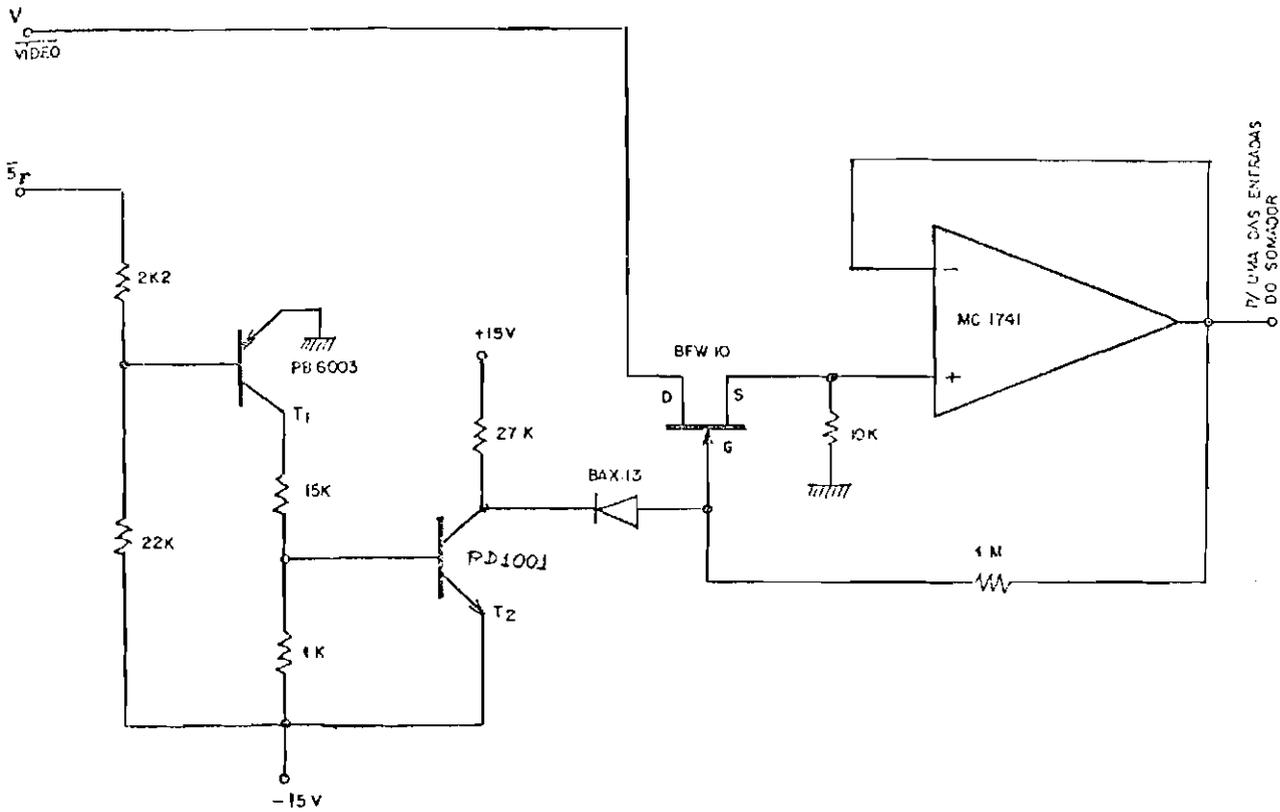


Fig. VIII.7 - Chave analógica

Quando $\overline{S_Y}$ está no nível lógico "1", os transistores T_1 e T_2 estão cortados, o diodo D não conduz e o "FET" deixa passar o sinal de vídeo invertido através de seu canal, pois $V_{GS} \approx 0$. No caso que $\overline{S_Y}$ está em "0", T_1 e T_2 estão saturados, o diodo D conduz e o "FET" está cortado, pois uma tensão negativa, abaixo do "pinch-off", é aplicada entre o "gate" e o "source" do "FET".

A saída da chave analógica e $\overline{S_Y}$ são entradas de um somador de ganho 1 (Figuras III.1 e VIII.8). A saída deste somador será, então, fornecida ao Eixo de Modulação de Intensidade Luminosa do TRC.

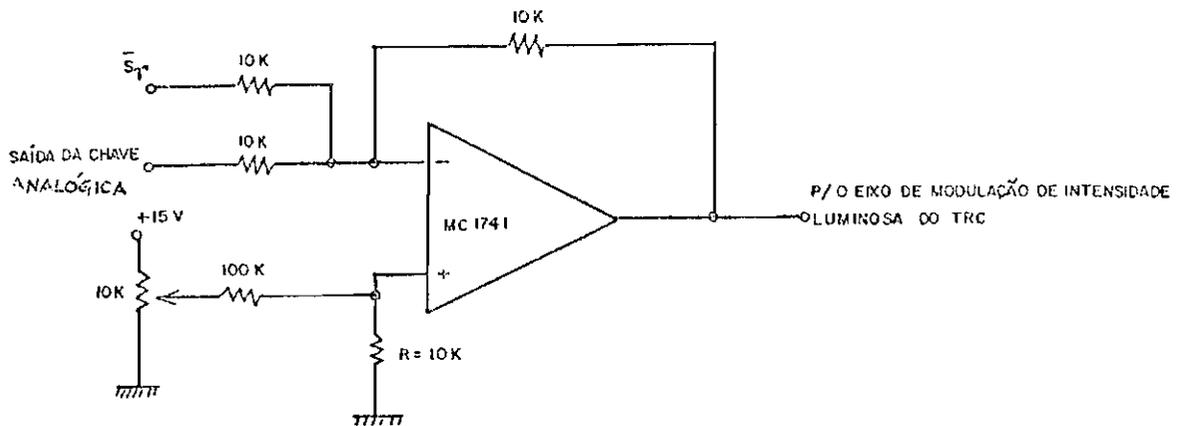


Fig. VIII.8 - Somador de ganho unitário

Devemos ajustar o nível DC da saída do somador acima, porque o sinal de vídeo invertido, que está superposto a $\overline{S_Y}$, varia na direção negativa. O ganho DC deste somador é:

$$G_{DC} = \frac{10K + 5K}{5K} = 3$$

Supondo que a variação máxima do sinal de vídeo seja de 0,8v e o nível alto de $\overline{S_Y}$ seja 3,5V, temos:

$$\Delta e = \frac{4,3}{3} \approx 1,4V$$

R será, então:

$$\frac{15R}{105K + R} = 1,4$$

$R = 10,8K \longrightarrow R \text{ (padrão)} = 10K$

8.6 - CORREÇÃO NO CONTROLE DO EIXO VERTICAL DO TUBO DO RAIOS CATÓDICOS DEVIDO AO MOVIMENTO DE ROTAÇÃO DO ESPELHO E_1 .

Conforme vimos na seção 2.4, as diversas faixas transversais do alvo, vistas pelos detetores, não são paralelas (Figuras II.6 e II.7), sendo suas inclinações, em relação ao eixo x' (Figura II.5), dependentes do ângulo de rotação θ . Devemos, então, modificar a forma de onda a ser injetada no Eixo Vertical do TRC, adicionando uma terceira entrada ao somador da Figura VIII.5. Para 16 faixas transversais, esta entrada deve ser constituída de rampas de inclinações variáveis com ângulos de $\pm 2^\circ, \pm 6^\circ, \pm 10^\circ, \pm 14^\circ, \pm 18^\circ, \pm 22^\circ, \pm 26^\circ, \pm 30^\circ$. Ela será chamada RIV, e será resultante da passagem do sinal S_Y por um contador, um conversor D/A e um integrador (Figura VIII.9).

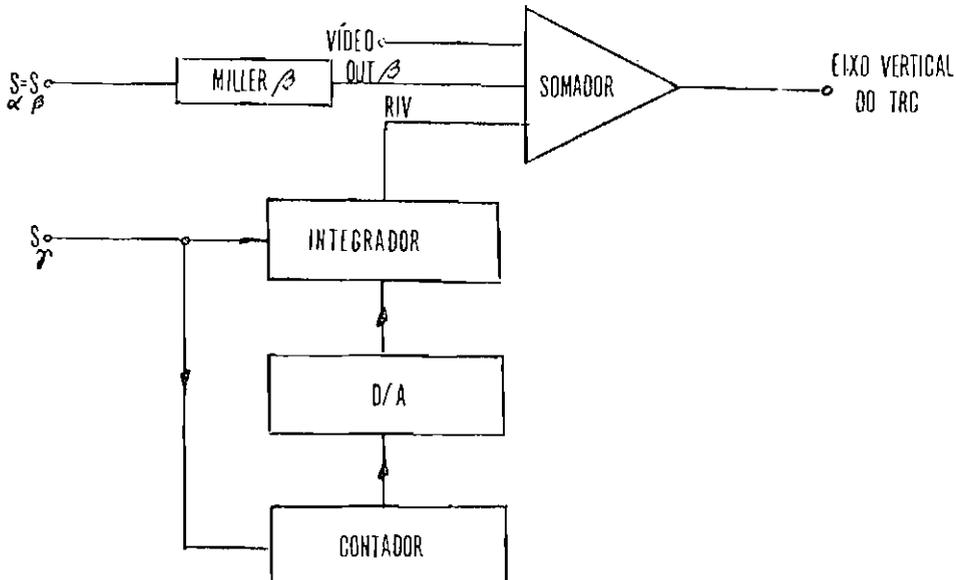


Fig. VIII.9 - Correção da forma de onda a ser fornecida ao Eixo Vertical do TRC.

O contador \bar{e} disparado na transiçãõ negativa de S_{γ} (Figura VIII.10 (a)) e deve contar de forma decrescente (Figura VIII.10 (b)), com a finalidade de obtermos, na saída do conversor D/A, a forma de onda na Figura VIII.10(c). Esta saída \bar{e} , em seguida, injetada em um integrador, cujo controle \bar{e} realizado por S_{γ} . A integraçãõ do sinal \bar{e} feita somente durante meio perıodo de S_{γ} ; no meio perıodo seguinte, o capacitor de integraçãõ \bar{e} descarregado, resultando na forma de onda desejada para RIV (Figura VIII.10(d)).

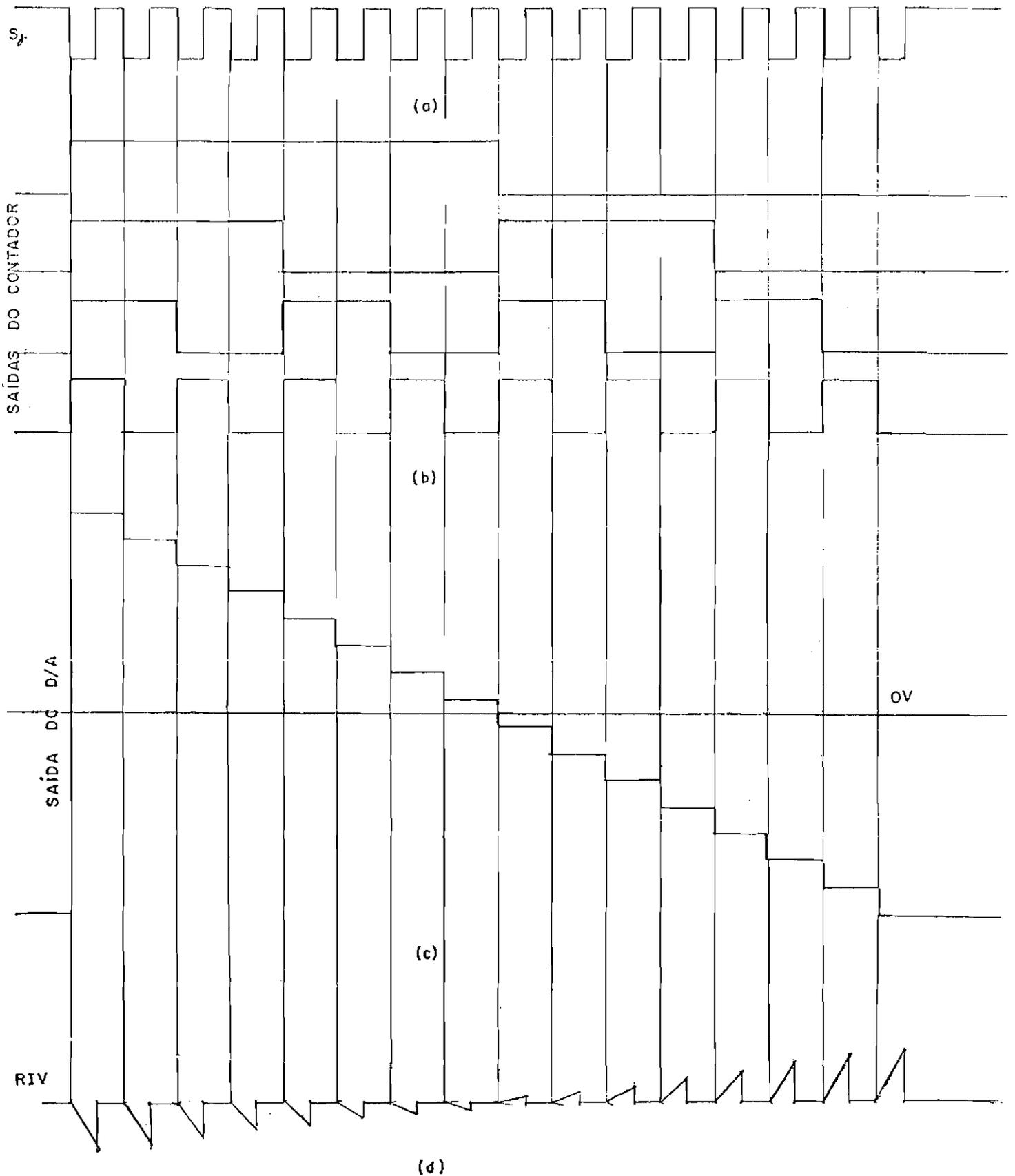


Fig. VIII.10 - Formas de onda para a obtenção do sinal RIV. (a) Entrada S_f ; (b) Saídas do Contador; (c) Saída do conversor D/A; (d) Sinal RIV desejado.

CAPÍTULO IX

CONCLUSÕES

Como tivemos oportunidades de frisar diversas vezes ao longo deste trabalho, o detetor piroelétrico apresenta a propriedade (que o caracteriza) de responder somente a variações de energia radiante, justificando, portanto, a existência do disco de amostragem. A temperatura deste disco serve também como referência, porque, quando estamos dentro do campo de visão do aparelho, tanto as linhas transversais do alvo como as linhas que constituem o disco são focalizadas sobre os detetores. Consequentemente, o disco de amostragem deve emitir radiações como se fosse um corpo negro, para desempenhar a contento a função de elemento de referência.

Idealmente, o alvo deveria ter as dimensões de um quadrado, e suas linhas transversais, vistas pelos detetores, deveriam ser paralelas. Entretanto, como vimos na seção 2.4, isto não ocorre, devido ao movimento de rotação do espelho E_1 , como ilustram as Figuras II.6 e II.7. Para o aparelho protótipo, que é constituído por 16 detetores piroelétricos, o alvo tem as dimensões de um trapézio (Figura II.6), sendo que a dimensão da área no sentido longitudinal é cerca de 6 vezes maior que no sentido transversal, pois uma linha neste sentido é vista, aproximadamente, sob um ângulo de 9° , enquanto que o campo de visão do aparelho é 60° . Para um Imageador com 100 detetores piroelétricos, as dimensões do alvo se aproximam mais de um quadrado, porque uma linha transversal é vista, aproximadamente, sob um ângulo de 57° . Entretanto,

devido ao efeito da rotação do espelho E_1 , o alvo \bar{e} , ainda, um trapézio, cuja dimensão no sentido transversal \bar{e} bem maior que no caso do nosso protótipo (Figura II.7).

Os testes iniciais foram feitos, incidindo-se sobre cada detetor, através do disco de amostragem, um raio laser com 0,2 mw de potência. Verificou-se, então, que a forma de onda de Figura V.16, obtida teoricamente, concordava com o sinal na saída do pré-amplificador (Figura IX.1).

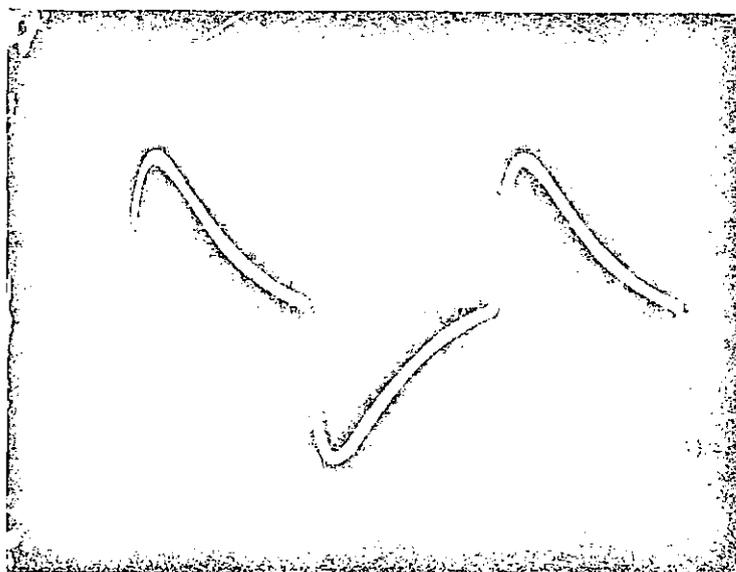


Fig. IX.1 - Forma de onda experimental obtida na saída do pré-amplificador

Portanto, como ficou comprovado experimentalmente, quando expúnhamos o detetor ao laser, a tensão na saída do pré-amplificador atingia, com um pequeno tempo de subida, um certo valor especificado pela intensidade da radiação incidente e pelo ganho do pré-amplificador; a partir deste valor, a tensão tendia a zero, devido à exposição constante de radiação sobre o detetor. Esta tensão não chegava a se anular, porque, logo em

seguida, o detetor deixava de ser exposto ao laser. Consequentemente, a tensão variava no sentido negativo, e, de modo análogo, tendia novamente a zero.

Observou-se também, nestes testes, que quando o suporte dos detetores estava em contacto com a carcaça cilíndrica do aparelho, os detetores respondiam às vibrações transmitidas pela rotação do motor, introduzindo um nível de ruído muito alto na saída do pré-amplificador e nos impedindo de ver o sinal (na tela do TRC) devido ao efeito piroelétrico. A explicação para este fato está em que esse detetor apresenta um efeito piezoelétrico considerável, e uma vez que foi isolado o suporte dos detetores de carcaça cilíndrica, o único ruído que permaneceu foi o do pré-amplificador.

O Imageador Térmico de Infravermelho possui diversas aplicações entre as quais, podemos citar:

- 1) Aplicações na Medicina através da obtenção de imagens termográficas da pele;
- 2) Detecção de falhas no isolamento térmico de construções;
- 3) Monitoramento da temperatura nos processos industriais, para a fabricação de papel, metal, borracha e plástico;
- 4) Inspeção em placas de circuito eletrônico;
- 5) Localização de super-aquecimento nos terminais de alta tensão de sub-estações elétricas.

As sugestões que poderíamos dar, visando a qualquer pesquisa futura baseada neste trabalho (como, por exemplo, a construção de um Imageador Térmico com 100 detetores piroelétricos) são as seguintes:

- 1) Verificar a viabilidade de aumentar o número de janelas do disco de amostragem. Se isto for realizado, obteríamos um número maior de linhas transversais do alvo (visto pelos detetores), para um determinado quadro de imagem.
- 2) Verificar a viabilidade de aumentar a velocidade do motor, do qual são derivadas as velocidades do disco de sincronismo FOV, de amostragem e do espelho rotativo E_1 . Desta maneira, conseguimos um número maior de quadros de imagem por segundo, ou seja, um aumento na frequência de quadro.
- 3) Estudar, com maior profundidade, as aberrações óticas para o caso de um Imageador com 100 detetores piroelétricos.
- 4) Estudar os tipos de ruído que têm maior influência na faixa de frequência de nosso interesse, e que aparecem na saída do pré-amplificador. Tais tipos são:
 - a) O ruído Johnson inerente a todas as resistências envolvidas, principalmente as de valor muito alto, como a resistência de carga do detetor. Este ruído é devido ao movimento randômico dos elétrons livres em um resistor.
 - b) O ruído de tensão ("Voltage Noise") associado com a resistência do canal do FET.

- c) O ruído de corrente ("Current Noise") associado com a flu tuação na corrente de fuga DC e que flui pelo "gate" do FET.
- d) "Loss Tangent Noise" associado com as perdas do dielétrico na capacitância do detetor.

AGRADECIMENTOS

Queremos externar nossa gratidão, pela orientação teórica do trabalho, ao Dr. Carlos B. Roundy, a Antônio Eduardo da Costa Pereira e, em particular, a Alderico Rodrigues de Paula Junior e ao Dr. Robert Barclay Clemesha.

Pela realização prática, agradecemos a José Ângelo da Costa Ferreira Néri e Geraldo Ferreira da Silva Junior na parte eletrônica; a Ivaldo Martins e Pedro Paulo da Cruz na parte mecânica.

Agradecemos, finalmente, ao Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), que forneceu todo o apoio necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- APPLICATIONS OF INFRARED DETECTORS. London, Applications Group of the Electron-optical Department - Mullard Southampton, 1971.
- ASTHEIMER, R.W. e SCHWARZ, F. Thermal Imaging Using Pyroelectric Detectors. *Applied Optics*, 7(9):1687-1695, September, 1968.
- BRAMSON, M.A. *Infrared Radiation: A Handbook for Application*. New York, Plenum Press, 1968.
- BYER, R.L. e ROUNDY, C.B. Pyroelectric Coefficient Direct Measurement Technique and Application to a nsec Response Time Detector. *IEEE Transactions Sonics & Ultrasonics*, 3:333-338, 1972.
- COS/MOS DIGITAL INTEGRATED CIRCUITS. RCA Solid State Data Book Series. Sommerville, N.J., 1972.
- DRUDE, P. *The Theory of Optics*. New York, Dover Publications, INC., 1959.
- GOSLING, W. *Field Effect Transistor Applications*. John Wiley & SONS, INC., New York, 1965.
- GRAEME, J.G. et al. *Operational Amplifiers: Design and Applications*. Burr-Brown Research Corporation, 1971.
- HANDBOOK OF MILITARY INFRARED TECHNOLOGY. Washington D.C., Office of Naval Research Department of the Navy, 1965.
- INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Projeto SERE. *Projeto de um Imageador Didático*. São José dos Campos, jan. 1973.
- JACOBS, D.H. *Fundamentals of Optical Engineering*. New York and London, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1943.

MILLMAN, J. e HALKIAS, C.C. *Integrated Electronics: Analog and Digital Circuits and Systems.* McGraw-Hill, Inc., 1972.

THE OPTOELECTRONICS DATA BOOK FOR DESIGN ENGINEERS. Texas Instruments Incorporated, 1973.

THE TTL DATA BOOK FOR DESIGN ENGINEERS. Texas Instrument Incorporated, 1973.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D. *Física, Parte I.* Trad. de Euclides Cavallari e Bento Afini Jr. São Paulo, Universidade de São Paulo, 1965.

ROUNDY, C.B. e BYER, R.L. Sensitive LiTaO_3 Pyroelectric Detector. *J. Appl. Phys.* 44(2):929-931, February 1973.

APÊNDICE A

PROGRAMA AUXILIAR PARA DETERMINAÇÃO DA ÁREA VARRIDA POR 16 E POR 100 DETETORES PIRROELÉTRICOS

```
DIMENSION TETA(20),TETARD(20),FI(100),FIGR(100),A(100),LR(100),
*NR(100),KR(100),X0(100),Y0(100)
REAL LR,MR,NR
PI=3.14159
Z=3.
CL=0.
DO 1 I=1,16
TETA(I)=-30.+CL
TETARD(I)=(TETA(I)*PI)/180.
1 CL=CL+4.
CALL DETA(FI,FIGR)
WRITE(6,2)

2 FORMAT(15X,69HDETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS (X0,Y0) PARA 16 DETETOR
*RES PIRROELÉTRICOS)
IK=1
IDET=16
3 DO 5 J=1,16
DO 5 K=1,IDET
A(K)=COS(FI(K))+SIN(FI(K))*COS(TETARD(J))
LR(K)=A(K)-COS(FI(K))
NR(K)=A(K)*SIN(TETARD(J))
KR(K)=(A(K)+COS(TETARD(J)))-SIN(FI(K))
X0(K)=(Z+LR(K))/NR(K)
Y0(K)=(Z+NR(K))/KR(K)
IF(K.GE.17)GO TO 16
WRITE(6,9)TETA(J),FIGR(K),X0(K),Y0(K)
9 FORMAT(10X,5HTETA=,F5.1,3X,3HFI=,F9.3,3X,3HX0=,E14.7,3X,3HY0=,
*E14.7)
16 IF(X.NE.100)GO TO 5
WRITE(6,9)TETA(J),FIGR(K),X0(K),Y0(K)
5 CONTINUE
IF(IK.EQ.2)GO TO 15
CALL DETB(FI,FIGR)
WRITE(6,4)
4 FORMAT(15X,69HDETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS (X0,Y0) PARA 100 DETETO
*RES PIRROELÉTRICOS)
IK=IK+1
IDET=100
GO TO 3
15 STOP
END
```

```
SUBROUTINE DETA(F,FIGR)
DIMENSION F(20),FIGR(20)
CLD=0.
PI=3.14159
DO 10 I=1,16
AUX=-0.+CLD
IF(AUX.NE.0.)GO TO 30
AUX=1.
CLD=CLD+1.
30 F(I)=ATAN(AUX*0.01)
FIGR(I)=(180.+F(I))/PI
10 CLD=CLD+1.
RETURN
END
```

```
SGH4GUTJAF DETER(F,FGR)  
DIMENSION F(100),FGR(100)  
CLD=0,  
PI=3.14159  
DO 11 L=1,100  
AUX=-50.+CLD  
IF(AUX.NE.0.)GO TO 40  
AUX=1.  
CLD=CLD+1,  
40 F(L)=ATAN(AUX*0.01)  
FGR(L)=(180.+F(L))/PI  
11 CLD=CLD+1.  
RETURN  
END
```

DETERMINACAO DAS COORDENACAS (X0,Y0) PARA 16 DETEYORES PIRROELETRICOS

TETA	F1	X0	Y0
-30.0	-4.574	-.2345826E+00	-.1575661E+01
-30.0	-4.004	-.2058405E+00	-.1594822E+01
-30.0	-3.434	-.1769354E+00	-.1614092E+01
-30.0	-2.862	-.1478657E+00	-.1633472E+01
-30.0	-2.291	-.1186362E+00	-.1652962E+01
-30.0	-1.718	-.0922727E+01	-.1672564E+01
-30.0	-1.146	-.5965558E-01	-.1692279E+01
-30.0	-0.573	-.2991365E-01	-.1712107E+01
-30.0	0.573	.3008685E-01	-.1732107E+01
-30.0	1.146	.6034842E-01	-.1772281E+01
-30.0	1.718	.9078623E-01	-.1792573E+01
-30.0	2.291	.1214018E+00	-.1812983E+01
-30.0	2.862	.1521968E+00	-.1833513E+01
-30.0	3.434	.1831726E+00	-.1854164E+01
-30.0	4.004	.2143310E+00	-.1874936E+01
-30.0	4.574	.2456736E+00	-.1895831E+01
-26.0	-4.574	-.2359639E+00	-.1335150E+01
-26.0	-4.004	-.2069034E+00	-.1350420E+01
-26.0	-3.434	-.1777201E+00	-.1366756E+01
-26.0	-2.862	-.1484134E+00	-.1382660E+01
-26.0	-2.291	-.1189824E+00	-.1398430E+01
-26.0	-1.718	-.8942640E-01	-.1414469E+01
-26.0	-1.146	-.5974452E-01	-.1430776E+01
-26.0	-0.573	-.2993599E-01	-.1446952E+01
-26.0	0.573	.3006428E-01	-.1463511E+01
-26.0	1.146	.6025767E-01	-.1479595E+01
-26.0	1.718	.9056101E-01	-.1512350E+01
-26.0	2.291	.1210351E+00	-.1528876E+01
-26.0	2.862	.1516209E+00	-.1545474E+01
-26.0	3.434	.1823391E+00	-.1562143E+01
-26.0	4.004	.2131907E+00	-.1578885E+01
-26.0	4.574	.2441765E+00	-.1595699E+01
-22.0	-4.574	-.2371288E+00	-.1108747E+01
-22.0	-4.004	-.2077985E+00	-.1121528E+01
-22.0	-3.434	-.1783801E+00	-.1134347E+01
-22.0	-2.862	-.1488734E+00	-.1147205E+01
-22.0	-2.291	-.1192779E+00	-.1160102E+01
-22.0	-1.718	-.8959320E-01	-.1173037E+01
-22.0	-1.146	-.5981893E-01	-.1186011E+01
-22.0	-0.573	-.2995466E-01	-.1199025E+01
-22.0	0.573	.3004547E-01	-.1225170E+01
-22.0	1.146	.6018217E-01	-.1238302E+01
-22.0	1.718	.9041051E-01	-.1251474E+01
-22.0	2.291	.1207309E+00	-.1264667E+01
-22.0	2.862	.1511438E+00	-.1277939E+01
-22.0	3.434	.1816096E+00	-.1291232E+01
-22.0	4.004	.2122487E+00	-.1304566E+01
-22.0	4.574	.2429415E+00	-.1317941E+01
-18.0	-4.574	-.2380876E+00	-.8934179E+00
-18.0	-4.004	-.2085343E+00	-.9035144E+00
-18.0	-3.434	-.1789221E+00	-.9136432E+00
-18.0	-2.862	-.1492507E+00	-.9237681E+00
-18.0	-2.291	-.1195200E+00	-.9339253E+00
-18.0	-1.718	-.8972927E-01	-.9441029E+00
-18.0	-1.146	-.5987975E-01	-.9543009E+00
-18.0	-0.573	-.2996991E-01	-.9645193E+00
-18.0	0.573	.3003015E-01	-.98850177E+00
-18.0	1.146	.6012073E-01	-.9952979E+00
-18.0	1.718	.9027191E-01	-.1005599E+01

TETA=-10.0	FI=	2.291	XC=	.1204839E+00	Y0=	-.1015920E+01
TETA=-10.0	FI=	2.862	XC=	.1507562E+00	Y0=	-.1026263E+01
TETA=-10.0	FI=	3.434	XC=	.1810910E+00	Y0=	-.1036626E+01
TETA=-10.0	FI=	4.004	XC=	.2114864E+00	Y0=	-.1047011E+01
TETA=-10.0	FI=	4.574	XC=	.2419434E+00	Y0=	-.1057416E+01
TETA=-10.0	FI=	-4.574	XC=	-.2388475E+00	Y0=	-.6866090E+00
TETA=-10.0	FI=	-4.004	XC=	-.2091171E+00	Y0=	-.6742485E+00
TETA=-10.0	FI=	-3.434	XC=	-.1793509E+00	Y0=	-.7018477E+00
TETA=-10.0	FI=	-2.862	XC=	-.1495490E+00	Y0=	-.7095552E+00
TETA=-10.0	FI=	-2.291	XC=	-.1197112E+00	Y0=	-.7172223E+00
TETA=-10.0	FI=	-1.718	XC=	-.8983744E-01	Y0=	-.7248987E+00
TETA=-10.0	FI=	-1.146	XC=	-.5992771E-01	Y0=	-.7325843E+00
TETA=-10.0	FI=	-0.573	XC=	-.2998192E-01	Y0=	-.7402792E+00
TETA=-10.0	FI=	0.573	XC=	.3001611E-01	Y0=	-.7576968E+00
TETA=-10.0	FI=	1.146	XC=	.6007247E-01	Y0=	-.7634196E+00
TETA=-10.0	FI=	1.718	XC=	.9016315E-01	Y0=	-.7711517E+00
TETA=-10.0	FI=	2.291	XC=	.1202902E+00	Y0=	-.7788932E+00
TETA=-10.0	FI=	2.862	XC=	.1504538E+00	Y0=	-.7866440E+00
TETA=-10.0	FI=	3.434	XC=	.1806535E+00	Y0=	-.7944043E+00
TETA=-10.0	FI=	4.004	XC=	.2108904E+00	Y0=	-.8021739E+00
TETA=-10.0	FI=	4.574	XC=	.2411637E+00	Y0=	-.8099529E+00
TETA=-10.0	FI=	-4.574	XC=	-.2394136E+00	Y0=	-.4861142E+00
TETA=-10.0	FI=	-4.004	XC=	-.2095509E+00	Y0=	-.4914610E+00
TETA=-10.0	FI=	-3.434	XC=	-.1796699E+00	Y0=	-.4968111E+00
TETA=-10.0	FI=	-2.862	XC=	-.1497707E+00	Y0=	-.5021645E+00
TETA=-10.0	FI=	-2.291	XC=	-.1198532E+00	Y0=	-.5075211E+00
TETA=-10.0	FI=	-1.718	XC=	-.8991741E-01	Y0=	-.5128810E+00
TETA=-10.0	FI=	-1.146	XC=	-.5996328E-01	Y0=	-.5182442E+00
TETA=-10.0	FI=	-0.573	XC=	-.2999082E-01	Y0=	-.5236107E+00
TETA=-10.0	FI=	0.573	XC=	.3000919E-01	Y0=	-.5343535E+00
TETA=-10.0	FI=	1.146	XC=	.6003677E-01	Y0=	-.5397299E+00
TETA=-10.0	FI=	1.718	XC=	.9008275E-01	Y0=	-.5451695E+00
TETA=-10.0	FI=	2.291	XC=	.1201472E+00	Y0=	-.5504925E+00
TETA=-10.0	FI=	2.862	XC=	.1502300E+00	Y0=	-.5558727E+00
TETA=-10.0	FI=	3.434	XC=	.1803313E+00	Y0=	-.5612683E+00
TETA=-10.0	FI=	4.004	XC=	.2104511E+00	Y0=	-.5666611E+00
TETA=-10.0	FI=	4.574	XC=	.2405893E+00	Y0=	-.5720573E+00
TETA=-6.0	FI=	-4.574	XC=	-.2397892E+00	Y0=	-.2897088E+00
TETA=-6.0	FI=	-4.004	XC=	-.2098386E+00	Y0=	-.2931360E+00
TETA=-6.0	FI=	-3.434	XC=	-.1798814E+00	Y0=	-.2963020E+00
TETA=-6.0	FI=	-2.862	XC=	-.1499176E+00	Y0=	-.2994687E+00
TETA=-6.0	FI=	-2.291	XC=	-.1199473E+00	Y0=	-.3026360E+00
TETA=-6.0	FI=	-1.718	XC=	-.8997035E-01	Y0=	-.3058041E+00
TETA=-6.0	FI=	-1.146	XC=	-.5998682E-01	Y0=	-.3089728E+00
TETA=-6.0	FI=	-0.573	XC=	-.2999670E-01	Y0=	-.3121423E+00
TETA=-6.0	FI=	0.573	XC=	.3000330E-01	Y0=	-.3153118E+00
TETA=-6.0	FI=	1.146	XC=	.6001319E-01	Y0=	-.3216548E+00
TETA=-6.0	FI=	1.718	XC=	.9002967E-01	Y0=	-.3244271E+00
TETA=-6.0	FI=	2.291	XC=	.1200528E+00	Y0=	-.3272000E+00
TETA=-6.0	FI=	2.862	XC=	.1500824E+00	Y0=	-.3311736E+00
TETA=-6.0	FI=	3.434	XC=	.1801187E+00	Y0=	-.3344479E+00
TETA=-6.0	FI=	4.004	XC=	.2101616E+00	Y0=	-.3375230E+00
TETA=-6.0	FI=	4.574	XC=	.2402111E+00	Y0=	-.3406987E+00
TETA=-2.0	FI=	-4.574	XC=	-.2399766E+00	Y0=	-.9637695E-01
TETA=-2.0	FI=	-4.004	XC=	-.2099821E+00	Y0=	-.9742502E-01
TETA=-2.0	FI=	-3.434	XC=	-.1799868E+00	Y0=	-.9847312E-01
TETA=-2.0	FI=	-2.862	XC=	-.1499909E+00	Y0=	-.9952124E-01
TETA=-2.0	FI=	-2.291	XC=	-.1199942E+00	Y0=	-.1005694E+00
TETA=-2.0	FI=	-1.718	XC=	-.8999671E-01	Y0=	-.1016176E+00
TETA=-2.0	FI=	-1.146	XC=	-.5999854E-01	Y0=	-.1026657E+00
TETA=-2.0	FI=	-0.573	XC=	-.2999963E-01	Y0=	-.1037140E+00
TETA=-2.0	FI=	0.573	XC=	.3000037E-01	Y0=	-.1054105E+00
TETA=-2.0	FI=	1.146	XC=	.6000146E-01	Y0=	-.1068588E+00
TETA=-2.0	FI=	1.718	XC=	.9000329E-01	Y0=	-.1079071E+00
TETA=-2.0	FI=	2.291	XC=	.1200059E+00	Y0=	-.1089555E+00
TETA=-2.0	FI=	2.862	XC=	.1500091E+00	Y0=	-.1100038E+00
TETA=-2.0	FI=	3.434	XC=	.1800132E+00	Y0=	-.1110522E+00
TETA=-2.0	FI=	4.004	XC=	.2100179E+00	Y0=	-.1121007E+00
TETA=-2.0	FI=	4.574	XC=	.2400234E+00	Y0=	-.1131491E+00
TETA=2.0	FI=	-4.574	XC=	-.2399766E+00	Y0=	.9637695E-01
TETA=2.0	FI=	-4.004	XC=	-.2099821E+00	Y0=	.9742502E-01
TETA=2.0	FI=	-3.434	XC=	-.1799868E+00	Y0=	.9847312E-01
TETA=2.0	FI=	-2.862	XC=	-.1499909E+00	Y0=	.9952124E-01
TETA=2.0	FI=	-2.291	XC=	-.1199942E+00	Y0=	.1005694E+00
TETA=2.0	FI=	-1.718	XC=	-.8999671E-01	Y0=	.1016176E+00
TETA=2.0	FI=	-1.146	XC=	-.5999854E-01	Y0=	.1026657E+00
TETA=2.0	FI=	-0.573	XC=	-.2999963E-01	Y0=	.1037140E+00
TETA=2.0	FI=	0.573	XC=	.3000037E-01	Y0=	.1054105E+00
TETA=2.0	FI=	1.146	XC=	.6000146E-01	Y0=	.1068588E+00
TETA=2.0	FI=	1.718	XC=	.9000329E-01	Y0=	.1079071E+00
TETA=2.0	FI=	2.291	XC=	.1200059E+00	Y0=	.1089555E+00

TE1A=	2.0	F1=	2.862	XC=	.1500091E+00	Y0=	.1100038E+00
TE1A=	2.0	F1=	3.434	XC=	.1800132E+00	Y0=	.1110522E+00
TE1A=	2.0	F1=	4.004	XC=	.2100179E+00	Y0=	.1121067E+00
TE1A=	2.0	F1=	4.574	XC=	.2400234E+00	Y0=	.1131491E+00
TE1A=	6.0	F1=	-4.574	XC=	-.2397892E+00	Y0=	.2899708E+00
TE1A=	6.0	F1=	-4.004	XC=	-.2098386E+00	Y0=	.2931360E+00
TE1A=	6.0	F1=	-3.434	XC=	-.1798814E+00	Y0=	.2963020E+00
TE1A=	6.0	F1=	-2.862	XC=	-.1499176E+00	Y0=	.2994687E+00
TE1A=	6.0	F1=	-2.291	XC=	-.1199473E+00	Y0=	.3026360E+00
TE1A=	6.0	F1=	-1.718	XC=	-.8997035E-01	Y0=	.3058041E+00
TE1A=	6.0	F1=	-1.146	XC=	-.5998682E-01	Y0=	.3089728E+00
TE1A=	6.0	F1=	-0.573	XC=	-.2999670E-01	Y0=	.3121423E+00
TE1A=	6.0	F1=	0.573	XC=	.3000330E-01	Y0=	.3184833E+00
TE1A=	6.0	F1=	1.146	XC=	.6001319E-01	Y0=	.3216548E+00
TE1A=	6.0	F1=	1.718	XC=	.9002967E-01	Y0=	.3248271E+00
TE1A=	6.0	F1=	2.291	XC=	.1200524E+00	Y0=	.3280000E+00
TE1A=	6.0	F1=	2.862	XC=	.1500824E+00	Y0=	.3311736E+00
TE1A=	6.0	F1=	3.434	XC=	.1801197E+00	Y0=	.3343479E+00
TE1A=	6.0	F1=	4.004	XC=	.2101616E+00	Y0=	.3375230E+00
TE1A=	6.0	F1=	4.574	XC=	.2402111E+00	Y0=	.3406987E+00
TE1A=	10.0	F1=	-4.574	XC=	-.2394136E+00	Y0=	.4861142E+00
TE1A=	10.0	F1=	-4.004	XC=	-.2095509E+00	Y0=	.4914610E+00
TE1A=	10.0	F1=	-3.434	XC=	-.1796699E+00	Y0=	.4968111E+00
TE1A=	10.0	F1=	-2.862	XC=	-.1497707E+00	Y0=	.5021645E+00
TE1A=	10.0	F1=	-2.291	XC=	-.1198532E+00	Y0=	.5075211E+00
TE1A=	10.0	F1=	-1.718	XC=	-.8991741E-01	Y0=	.5128810E+00
TE1A=	10.0	F1=	-1.146	XC=	-.5996320E-01	Y0=	.5182442E+00
TE1A=	10.0	F1=	-0.573	XC=	-.2999082E-01	Y0=	.5236107E+00
TE1A=	10.0	F1=	0.573	XC=	.3000919E-01	Y0=	.5294355E+00
TE1A=	10.0	F1=	1.146	XC=	.6003677E-01	Y0=	.5347249E+00
TE1A=	10.0	F1=	1.718	XC=	.9008275E-01	Y0=	.5405109E+00
TE1A=	10.0	F1=	2.291	XC=	.1201472E+00	Y0=	.5464925E+00
TE1A=	10.0	F1=	2.862	XC=	.1502300E+00	Y0=	.5528787E+00
TE1A=	10.0	F1=	3.434	XC=	.1803333E+00	Y0=	.5598633E+00
TE1A=	10.0	F1=	4.004	XC=	.2104511E+00	Y0=	.5666611E+00
TE1A=	10.0	F1=	4.574	XC=	.2405893E+00	Y0=	.5720573E+00
TE1A=	14.0	F1=	-4.574	XC=	-.2388475E+00	Y0=	.6866090E+00
TE1A=	14.0	F1=	-4.004	XC=	-.2091173E+00	Y0=	.6942485E+00
TE1A=	14.0	F1=	-3.434	XC=	-.1793509E+00	Y0=	.7018972E+00
TE1A=	14.0	F1=	-2.862	XC=	-.1495490E+00	Y0=	.7095552E+00
TE1A=	14.0	F1=	-2.291	XC=	-.1197112E+00	Y0=	.7172223E+00
TE1A=	14.0	F1=	-1.718	XC=	-.8983744E-01	Y0=	.7248917E+00
TE1A=	14.0	F1=	-1.146	XC=	-.5992771E-01	Y0=	.7325843E+00
TE1A=	14.0	F1=	-0.573	XC=	-.2998192E-01	Y0=	.7402792E+00
TE1A=	14.0	F1=	0.573	XC=	.3001811E-01	Y0=	.7479792E+00
TE1A=	14.0	F1=	1.146	XC=	.6007247E-01	Y0=	.7556968E+00
TE1A=	14.0	F1=	1.718	XC=	.9016315E-01	Y0=	.7634196E+00
TE1A=	14.0	F1=	2.291	XC=	.1202902E+00	Y0=	.7711517E+00
TE1A=	14.0	F1=	2.862	XC=	.1504538E+00	Y0=	.7788932E+00
TE1A=	14.0	F1=	3.434	XC=	.1806538E+00	Y0=	.7866440E+00
TE1A=	14.0	F1=	4.004	XC=	.2108904E+00	Y0=	.7944043E+00
TE1A=	14.0	F1=	4.574	XC=	.2411637E+00	Y0=	.8021739E+00
TE1A=	18.0	F1=	-4.574	XC=	-.2380876E+00	Y0=	.8099529E+00
TE1A=	18.0	F1=	-4.004	XC=	-.2085343E+00	Y0=	.8177223E+00
TE1A=	18.0	F1=	-3.434	XC=	-.1789221E+00	Y0=	.8254917E+00
TE1A=	18.0	F1=	-2.862	XC=	-.1492507E+00	Y0=	.8332611E+00
TE1A=	18.0	F1=	-2.291	XC=	-.1195200E+00	Y0=	.8410305E+00
TE1A=	18.0	F1=	-1.718	XC=	-.8972972E-01	Y0=	.8488000E+00
TE1A=	18.0	F1=	-1.146	XC=	-.5987975E-01	Y0=	.8565694E+00
TE1A=	18.0	F1=	-0.573	XC=	-.2996991E-01	Y0=	.8643388E+00
TE1A=	18.0	F1=	0.573	XC=	.3003015E-01	Y0=	.8721082E+00
TE1A=	18.0	F1=	1.146	XC=	.6012073E-01	Y0=	.8798776E+00
TE1A=	18.0	F1=	1.718	XC=	.9027191E-01	Y0=	.8876470E+00
TE1A=	18.0	F1=	2.291	XC=	.1204839E+00	Y0=	.8954164E+00
TE1A=	18.0	F1=	2.862	XC=	.1507562E+00	Y0=	.9031858E+00
TE1A=	18.0	F1=	3.434	XC=	.1810910E+00	Y0=	.9109552E+00
TE1A=	18.0	F1=	4.004	XC=	.2114864E+00	Y0=	.9187246E+00
TE1A=	18.0	F1=	4.574	XC=	.2419434E+00	Y0=	.9264940E+00
TE1A=	22.0	F1=	-4.574	XC=	-.2371288E+00	Y0=	.1108147E+01
TE1A=	22.0	F1=	-4.004	XC=	-.2077985E+00	Y0=	.1121528E+01
TE1A=	22.0	F1=	-3.434	XC=	-.1783801E+00	Y0=	.1134909E+01
TE1A=	22.0	F1=	-2.862	XC=	-.1488734E+00	Y0=	.1148290E+01
TE1A=	22.0	F1=	-2.291	XC=	-.1192779E+00	Y0=	.1161671E+01
TE1A=	22.0	F1=	-1.718	XC=	-.8959300E-01	Y0=	.1175052E+01
TE1A=	22.0	F1=	-1.146	XC=	-.5981893E-01	Y0=	.1188433E+01
TE1A=	22.0	F1=	-0.573	XC=	-.2995466E-01	Y0=	.1201814E+01
TE1A=	22.0	F1=	0.573	XC=	.3004547E-01	Y0=	.1215195E+01
TE1A=	22.0	F1=	1.146	XC=	.6018217E-01	Y0=	.1228576E+01
TE1A=	22.0	F1=	1.718	XC=	.9041051E-01	Y0=	.1241957E+01
TE1A=	22.0	F1=	2.291	XC=	.1207309E+00	Y0=	.1255338E+01

TETA= 22.0	F1= 2.862	XC= .151143E+00	YN= .1277939E+01
TETA= 22.0	F1= 3.434	XC= .1816496E+00	YN= .1291237E+01
TETA= 22.0	F1= 4.004	XC= .2122487E+00	YN= .1304566E+01
TETA= 22.0	F1= 4.574	XC= .2429415E+00	YN= .1317941E+01
TETA= 26.0	F1= -4.574	XC= -.2359639E+00	YN= .1335150E+01
TETA= 26.0	F1= -4.004	XC= -.2069039E+00	YN= .1350920E+01
TETA= 26.0	F1= -3.434	XC= -.1777201E+00	YN= .1366756E+01
TETA= 26.0	F1= -2.862	XC= -.1484134E+00	YN= .1382560E+01
TETA= 26.0	F1= -2.291	XC= -.1199824E+00	YN= .1398630E+01
TETA= 26.0	F1= -1.718	XC= -.8942640E-01	YN= .1414669E+01
TETA= 26.0	F1= -1.146	XC= -.5974452E-01	YN= .1430776E+01
TETA= 26.0	F1= -0.573	XC= -.2993599E-01	YN= .1446952E+01
TETA= 26.0	F1= 0.573	XC= .3006428E-01	YN= .1479511E+01
TETA= 26.0	F1= 1.146	XC= .6025767E-01	YN= .1495895E+01
TETA= 26.0	F1= 1.718	XC= .9058101E-01	YN= .1512350E+01
TETA= 26.0	F1= 2.291	XC= .1210351E+00	YN= .1528876E+01
TETA= 26.0	F1= 2.862	XC= .1516209E+00	YN= .1545474E+01
TETA= 26.0	F1= 3.434	XC= .1823391E+00	YN= .1562143E+01
TETA= 26.0	F1= 4.004	XC= .2131907E+00	YN= .1578885E+01
TETA= 26.0	F1= 4.574	XC= .2441765E+00	YN= .1595699E+01
TETA= 30.0	F1= -4.574	XC= -.2345826E+00	YN= .1575661E+01
TETA= 30.0	F1= -4.004	XC= -.2058405E+00	YN= .1594822E+01
TETA= 30.0	F1= -3.434	XC= -.1769354E+00	YN= .1614092E+01
TETA= 30.0	F1= -2.862	XC= -.1478657E+00	YN= .1633472E+01
TETA= 30.0	F1= -2.291	XC= -.1186302E+00	YN= .1652962E+01
TETA= 30.0	F1= -1.718	XC= -.8922727E-01	YN= .1672564E+01
TETA= 30.0	F1= -1.146	XC= -.5965558E-01	YN= .1692279E+01
TETA= 30.0	F1= -0.573	XC= -.2991365E-01	YN= .1712107E+01
TETA= 30.0	F1= 0.573	XC= .3008689E-01	YN= .1732107E+01
TETA= 30.0	F1= 1.146	XC= .6034048E-01	YN= .1752241E+01
TETA= 30.0	F1= 1.718	XC= .9078623E-01	YN= .1772523E+01
TETA= 30.0	F1= 2.291	XC= .1214018E+00	YN= .1792983E+01
TETA= 30.0	F1= 2.862	XC= .1521968E+00	YN= .1813751E+01
TETA= 30.0	F1= 3.434	XC= .1831726E+00	YN= .1834164E+01
TETA= 30.0	F1= 4.004	XC= .2143310E+00	YN= .1854934E+01
TETA= 30.0	F1= 4.574	XC= .2456736E+00	YN= .1875831E+01
DETERMINACAO DAS COORDENADAS (X0,Y0) PARA 100 DETURAS PIRULETRICAS			
TETA=-30.0	F1= -26.565	XC= -.1310802E+01	YN= -.8581819E+00
TETA=-30.0	F1= -26.105	XC= -.1287835E+01	YN= -.8734235E+00
TETA=-30.0	F1= -25.641	XC= -.1264751E+01	YN= -.8888826E+00
TETA=-30.0	F1= -25.174	XC= -.1241550E+01	YN= -.9043500E+00
TETA=-30.0	F1= -24.702	XC= -.1218231E+01	YN= -.9198962E+00
TETA=-30.0	F1= -24.228	XC= -.1194792E+01	YN= -.9355219E+00
TETA=-30.0	F1= -23.750	XC= -.1171234E+01	YN= -.9512276E+00
TETA=-30.0	F1= -23.268	XC= -.1147554E+01	YN= -.9670140E+00
TETA=-30.0	F1= -22.782	XC= -.1123752E+01	YN= -.9828817E+00
TETA=-30.0	F1= -22.294	XC= -.1099828E+01	YN= -.9988312E+00
TETA=-30.0	F1= -21.801	XC= -.1075740E+01	YN= -.1014863E+01
TETA=-30.0	F1= -21.306	XC= -.1051607E+01	YN= -.1030979E+01
TETA=-30.0	F1= -20.807	XC= -.1027308E+01	YN= -.1047178E+01
TETA=-30.0	F1= -20.304	XC= -.1002883E+01	YN= -.1063462E+01
TETA=-30.0	F1= -19.799	XC= -.9783292E+00	YN= -.1079830E+01
TETA=-30.0	F1= -19.290	XC= -.9536472E+00	YN= -.1096285E+01
TETA=-30.0	F1= -26.565	XC= .1753027E+01	YN= -.2900732E+01
TETA=-24.0	F1= -26.565	XC= .1355131E+01	YN= -.7278321E+00
TETA=-24.0	F1= -26.105	XC= .1330599E+01	YN= -.7411447E+00
TETA=-24.0	F1= -25.641	XC= .1305971E+01	YN= -.7545009E+00
TETA=-24.0	F1= -25.174	XC= .1281248E+01	YN= -.7679251E+00
TETA=-24.0	F1= -24.702	XC= .1256428E+01	YN= -.7813934E+00
TETA=-24.0	F1= -24.228	XC= .1231512E+01	YN= -.7949144E+00
TETA=-24.0	F1= -23.750	XC= .1206498E+01	YN= -.8084881E+00
TETA=-24.0	F1= -23.268	XC= .1181387E+01	YN= -.8221150E+00
TETA=-24.0	F1= -22.782	XC= .1156176E+01	YN= -.8357954E+00
TETA=-24.0	F1= -22.294	XC= .1130867E+01	YN= -.8495296E+00
TETA=-24.0	F1= -21.801	XC= .1105458E+01	YN= -.8633178E+00
TETA=-24.0	F1= -21.306	XC= .1079949E+01	YN= -.8771605E+00
TETA=-24.0	F1= -20.807	XC= .1054338E+01	YN= -.8910580E+00
TETA=-24.0	F1= -20.304	XC= .1028627E+01	YN= -.9050105E+00
TETA=-24.0	F1= -19.799	XC= .1002813E+01	YN= -.9190184E+00
TETA=-24.0	F1= -19.290	XC= .9768963E+00	YN= -.9330820E+00
TETA=-24.0	F1= -26.565	XC= .1679550E+01	YN= -.2374607E+01
TETA=-22.0	F1= -26.565	XC= .1394473E+01	YN= -.6044278E+00
TETA=-22.0	F1= -26.105	XC= .1368059E+01	YN= -.6157418E+00
TETA=-22.0	F1= -25.641	XC= .1342472E+01	YN= -.6270876E+00
TETA=-22.0	F1= -25.174	XC= .1316361E+01	YN= -.6384656E+00
TETA=-22.0	F1= -24.702	XC= .1290176E+01	YN= -.6498757E+00
TETA=-22.0	F1= -24.228	XC= .1263917E+01	YN= -.6613181E+00
TETA=-22.0	F1= -23.750	XC= .1237584E+01	YN= -.6727931E+00
TETA=-22.0	F1= -23.268	XC= .1211176E+01	YN= -.6843006E+00
TETA=-22.0	F1= -22.782	XC= .1184692E+01	YN= -.6958409E+00
TETA=-22.0	F1= -22.294	XC= .1158133E+01	YN= -.7074141E+00
TETA=-22.0	F1= -21.801	XC= .1131499E+01	YN= -.7190203E+00
TETA=-22.0	F1= -21.306	XC= .1104780E+01	YN= -.7306597E+00

TETA=-22.0	F1=-20.807	XC=-.1078001E+01	YC=-.7423320E+00
TETA=-22.0	F1=-20.304	XC=-.1051137E+01	YC=-.7540386E+00
TETA=-22.0	F1=-19.799	XC=-.1024195E+01	YC=-.7657784E+00
TETA=-22.0	F1=-19.290	XC=-.9971768E+00	YC=-.7775519E+00
TETA=-22.0	F1=-26.565	XC=-.1622806E+01	YC=-.1919225E+01
TETA=-18.0	F1=-26.565	XC=-.1428296E+01	YC=-.4067747E+00
TETA=-18.0	F1=-26.105	XC=-.1401069E+01	YC=-.4060963E+00
TETA=-18.0	F1=-25.641	XC=-.1373791E+01	YC=-.4054158E+00
TETA=-18.0	F1=-25.174	XC=-.1346460E+01	YC=-.4047531E+00
TETA=-18.0	F1=-24.702	XC=-.1319076E+01	YC=-.4041084E+00
TETA=-18.0	F1=-24.228	XC=-.1291640E+01	YC=-.4034481E+00
TETA=-18.0	F1=-23.750	XC=-.1264152E+01	YC=-.4028728E+00
TETA=-18.0	F1=-23.268	XC=-.1236610E+01	YC=-.4022822E+00
TETA=-18.0	F1=-22.782	XC=-.1209015E+01	YC=-.4017096E+00
TETA=-18.0	F1=-22.294	XC=-.1181368E+01	YC=-.4011553E+00
TETA=-18.0	F1=-21.801	XC=-.1153666E+01	YC=-.4006192E+00
TETA=-18.0	F1=-21.306	XC=-.1125911E+01	YC=-.4001013E+00
TETA=-18.0	F1=-20.807	XC=-.1098103E+01	YC=-.3996019E+00
TETA=-18.0	F1=-20.304	XC=-.1070241E+01	YC=-.3991208E+00
TETA=-18.0	F1=-19.799	XC=-.1042324E+01	YC=-.3986581E+00
TETA=-18.0	F1=-19.290	XC=-.1014354E+01	YC=-.3982140E+00
TETA=-14.0	F1=-26.565	XC=-.1579284E+01	YC=-.1514306E+01
TETA=-14.0	F1=-26.565	XC=-.1456086E+01	YC=-.3738266E+00
TETA=-14.0	F1=-26.105	XC=-.1427800E+01	YC=-.3710749E+00
TETA=-14.0	F1=-25.641	XC=-.1399481E+01	YC=-.3683718E+00
TETA=-14.0	F1=-25.174	XC=-.1371129E+01	YC=-.3656571E+00
TETA=-14.0	F1=-24.702	XC=-.1342744E+01	YC=-.3629511E+00
TETA=-14.0	F1=-24.228	XC=-.1314329E+01	YC=-.3602535E+00
TETA=-14.0	F1=-23.750	XC=-.1285873E+01	YC=-.3575646E+00
TETA=-14.0	F1=-23.268	XC=-.1257388E+01	YC=-.3548843E+00
TETA=-14.0	F1=-22.782	XC=-.1228863E+01	YC=-.3522126E+00
TETA=-14.0	F1=-22.294	XC=-.1200316E+01	YC=-.3495495E+00
TETA=-14.0	F1=-21.801	XC=-.1171730E+01	YC=-.3468895E+00
TETA=-14.0	F1=-21.306	XC=-.1143110E+01	YC=-.3442442E+00
TETA=-14.0	F1=-20.807	XC=-.1114454E+01	YC=-.3416121E+00
TETA=-14.0	F1=-20.304	XC=-.1085768E+01	YC=-.3389837E+00
TETA=-14.0	F1=-19.799	XC=-.1057047E+01	YC=-.3363640E+00
TETA=-14.0	F1=-19.290	XC=-.1028292E+01	YC=-.3337530E+00
TETA=-14.0	F1=-26.565	XC=-.1546645E+01	YC=-.1145410E+01
TETA=-10.0	F1=-26.565	XC=-.1477382E+01	YC=-.2644597E+00
TETA=-10.0	F1=-26.105	XC=-.1448271E+01	YC=-.2696719E+00
TETA=-10.0	F1=-25.641	XC=-.1419143E+01	YC=-.2748873E+00
TETA=-10.0	F1=-25.174	XC=-.1389997E+01	YC=-.2801058E+00
TETA=-10.0	F1=-24.702	XC=-.1360833E+01	YC=-.2853275E+00
TETA=-10.0	F1=-24.228	XC=-.1331652E+01	YC=-.2905523E+00
TETA=-10.0	F1=-23.750	XC=-.1302453E+01	YC=-.2957803E+00
TETA=-10.0	F1=-23.268	XC=-.1273236E+01	YC=-.3010114E+00
TETA=-10.0	F1=-22.782	XC=-.1244002E+01	YC=-.3062457E+00
TETA=-10.0	F1=-22.294	XC=-.1214750E+01	YC=-.3114831E+00
TETA=-10.0	F1=-21.801	XC=-.1185481E+01	YC=-.3167238E+00
TETA=-10.0	F1=-21.306	XC=-.1156194E+01	YC=-.3219676E+00
TETA=-10.0	F1=-20.807	XC=-.1126888E+01	YC=-.3272145E+00
TETA=-10.0	F1=-20.304	XC=-.1097566E+01	YC=-.3324647E+00
TETA=-10.0	F1=-19.799	XC=-.1068225E+01	YC=-.3377180E+00
TETA=-10.0	F1=-19.290	XC=-.1038867E+01	YC=-.3429745E+00
TETA=-10.0	F1=-26.565	XC=-.1523321E+01	YC=-.4017265E+00
TETA=-6.0	F1=-26.565	XC=-.1491805E+01	YC=-.1576539E+00
TETA=-6.0	F1=-26.105	XC=-.1462129E+01	YC=-.1607901E+00
TETA=-6.0	F1=-25.641	XC=-.1432446E+01	YC=-.1639271E+00
TETA=-6.0	F1=-25.174	XC=-.1402757E+01	YC=-.1670648E+00
TETA=-6.0	F1=-24.702	XC=-.1373061E+01	YC=-.1702031E+00
TETA=-6.0	F1=-24.228	XC=-.1343359E+01	YC=-.1733422E+00
TETA=-6.0	F1=-23.750	XC=-.1313650E+01	YC=-.1764819E+00
TETA=-6.0	F1=-23.268	XC=-.1283925E+01	YC=-.1796223E+00
TETA=-6.0	F1=-22.782	XC=-.1254213E+01	YC=-.1827634E+00
TETA=-6.0	F1=-22.294	XC=-.1224484E+01	YC=-.1859051E+00
TETA=-6.0	F1=-21.801	XC=-.1194750E+01	YC=-.1890476E+00
TETA=-6.0	F1=-21.306	XC=-.1165008E+01	YC=-.1921908E+00
TETA=-6.0	F1=-20.807	XC=-.1135260E+01	YC=-.1953344E+00
TETA=-6.0	F1=-20.304	XC=-.1105506E+01	YC=-.1984791E+00
TETA=-6.0	F1=-19.799	XC=-.1075745E+01	YC=-.2016243E+00
TETA=-6.0	F1=-19.290	XC=-.1045978E+01	YC=-.2047703E+00
TETA=-6.0	F1=-26.565	XC=-.1508265E+01	YC=-.4747127E+00
TETA=-2.0	F1=-26.565	XC=-.1499087E+01	YC=-.5238110E-01
TETA=-2.0	F1=-26.105	XC=-.1469123E+01	YC=-.5342810E-01
TETA=-2.0	F1=-25.641	XC=-.1439158E+01	YC=-.5447512E-01
TETA=-2.0	F1=-25.174	XC=-.1409193E+01	YC=-.5552217E-01
TETA=-2.0	F1=-24.702	XC=-.1379227E+01	YC=-.5656924E-01
TETA=-2.0	F1=-24.228	XC=-.1349260E+01	YC=-.5761634E-01
TETA=-2.0	F1=-23.750	XC=-.1319293E+01	YC=-.5866347E-01
TETA=-2.0	F1=-23.268	XC=-.1289324E+01	YC=-.5971062E-01

TE1A=	-2.0	F1=	-22.782	XC=	-.1259355E+01	Y0=	-.6075779E-01
TE1A=	-2.0	F1=	-22.294	XC=	-.1229386E+01	Y0=	-.6140499E-01
TE1A=	-2.0	F1=	-21.801	XC=	-.1199415E+01	Y0=	-.6205222E-01
TE1A=	-2.0	F1=	-21.306	XC=	-.1169444E+01	Y0=	-.6270947E-01
TE1A=	-2.0	F1=	-20.807	XC=	-.1139472E+01	Y0=	-.6336675E-01
TE1A=	-2.0	F1=	-20.304	XC=	-.1109500E+01	Y0=	-.6402405E-01
TE1A=	-2.0	F1=	-19.799	XC=	-.1079526E+01	Y0=	-.6468138E-01
TE1A=	-2.0	F1=	-19.290	XC=	-.1049552E+01	Y0=	-.6533874E-01
TE1A=	-2.0	F1=	26.565	XC=	.1500915E+01	Y0=	-.1572072E+00
TE1A=	2.0	F1=	-26.565	XC=	-.1499087E+01	Y0=	.5238110E-01
TE1A=	2.0	F1=	-26.105	XC=	-.1469123E+01	Y0=	.5302810E-01
TE1A=	2.0	F1=	-25.641	XC=	-.1439158E+01	Y0=	.5367512E-01
TE1A=	2.0	F1=	-25.174	XC=	-.1409193E+01	Y0=	.5432212E-01
TE1A=	2.0	F1=	-24.702	XC=	-.1379227E+01	Y0=	.5496924E-01
TE1A=	2.0	F1=	-24.228	XC=	-.1349260E+01	Y0=	.5561634E-01
TE1A=	2.0	F1=	-23.750	XC=	-.1319293E+01	Y0=	.5626347E-01
TE1A=	2.0	F1=	-23.268	XC=	-.1289324E+01	Y0=	.5691062E-01
TE1A=	2.0	F1=	-22.782	XC=	-.1259355E+01	Y0=	.5755779E-01
TE1A=	2.0	F1=	-22.294	XC=	-.1229386E+01	Y0=	.5820499E-01
TE1A=	2.0	F1=	-21.801	XC=	-.1199415E+01	Y0=	.5885222E-01
TE1A=	2.0	F1=	-21.306	XC=	-.1169444E+01	Y0=	.5949947E-01
TE1A=	2.0	F1=	-20.807	XC=	-.1139472E+01	Y0=	.6014675E-01
TE1A=	2.0	F1=	-20.304	XC=	-.1109500E+01	Y0=	.6079405E-01
TE1A=	2.0	F1=	-19.799	XC=	-.1079526E+01	Y0=	.6144138E-01
TE1A=	2.0	F1=	-19.290	XC=	-.1049552E+01	Y0=	.6208874E-01
TE1A=	2.0	F1=	26.565	XC=	.1500915E+01	Y0=	.1572072E+00
TE1A=	6.0	F1=	-26.565	XC=	-.1491805E+01	Y0=	.1576539E+00
TE1A=	6.0	F1=	-26.105	XC=	-.1462129E+01	Y0=	.1607901E+00
TE1A=	6.0	F1=	-25.641	XC=	-.1432446E+01	Y0=	.1639271E+00
TE1A=	6.0	F1=	-25.174	XC=	-.1402757E+01	Y0=	.1670644E+00
TE1A=	6.0	F1=	-24.702	XC=	-.1373061E+01	Y0=	.1702031E+00
TE1A=	6.0	F1=	-24.228	XC=	-.1343359E+01	Y0=	.1733422E+00
TE1A=	6.0	F1=	-23.750	XC=	-.1313650E+01	Y0=	.1764819E+00
TE1A=	6.0	F1=	-23.268	XC=	-.1283939E+01	Y0=	.1796233E+00
TE1A=	6.0	F1=	-22.782	XC=	-.1254213E+01	Y0=	.1827634E+00
TE1A=	6.0	F1=	-22.294	XC=	-.1224484E+01	Y0=	.1859051E+00
TE1A=	6.0	F1=	-21.801	XC=	-.1194750E+01	Y0=	.1890476E+00
TE1A=	6.0	F1=	-21.306	XC=	-.1165008E+01	Y0=	.1921904E+00
TE1A=	6.0	F1=	-20.807	XC=	-.1135260E+01	Y0=	.1953346E+00
TE1A=	6.0	F1=	-20.304	XC=	-.1105506E+01	Y0=	.1984791E+00
TE1A=	6.0	F1=	-19.799	XC=	-.1075745E+01	Y0=	.2016243E+00
TE1A=	6.0	F1=	-19.290	XC=	-.1045978E+01	Y0=	.2047703E+00
TE1A=	6.0	F1=	26.565	XC=	.1500285E+01	Y0=	.4747127E+00
TE1A=	10.0	F1=	-26.565	XC=	-.1477382E+01	Y0=	.2644597E+00
TE1A=	10.0	F1=	-26.105	XC=	-.1448271E+01	Y0=	.2696719E+00
TE1A=	10.0	F1=	-25.641	XC=	-.1419143E+01	Y0=	.2748873E+00
TE1A=	10.0	F1=	-25.174	XC=	-.1389997E+01	Y0=	.2801058E+00
TE1A=	10.0	F1=	-24.702	XC=	-.1360833E+01	Y0=	.2853275E+00
TE1A=	10.0	F1=	-24.228	XC=	-.1331652E+01	Y0=	.2905523E+00
TE1A=	10.0	F1=	-23.750	XC=	-.1302453E+01	Y0=	.2957803E+00
TE1A=	10.0	F1=	-23.268	XC=	-.1273236E+01	Y0=	.3010114E+00
TE1A=	10.0	F1=	-22.782	XC=	-.1244002E+01	Y0=	.3062457E+00
TE1A=	10.0	F1=	-22.294	XC=	-.1214750E+01	Y0=	.3114831E+00
TE1A=	10.0	F1=	-21.801	XC=	-.1185481E+01	Y0=	.3167238E+00
TE1A=	10.0	F1=	-21.306	XC=	-.1156194E+01	Y0=	.3219676E+00
TE1A=	10.0	F1=	-20.807	XC=	-.1126883E+01	Y0=	.3272145E+00
TE1A=	10.0	F1=	-20.304	XC=	-.1097556E+01	Y0=	.3324647E+00
TE1A=	10.0	F1=	-19.799	XC=	-.1068225E+01	Y0=	.3377180E+00
TE1A=	10.0	F1=	-19.290	XC=	-.1038887E+01	Y0=	.3429745E+00
TE1A=	10.0	F1=	26.565	XC=	.1523321E+01	Y0=	.8017265E+00
TE1A=	14.0	F1=	-26.565	XC=	-.1457026E+01	Y0=	.3738266E+00
TE1A=	14.0	F1=	-26.105	XC=	-.1427800E+01	Y0=	.3810949E+00
TE1A=	14.0	F1=	-25.641	XC=	-.1399481E+01	Y0=	.3883718E+00
TE1A=	14.0	F1=	-25.174	XC=	-.1371129E+01	Y0=	.3956571E+00
TE1A=	14.0	F1=	-24.702	XC=	-.1342744E+01	Y0=	.4029511E+00
TE1A=	14.0	F1=	-24.228	XC=	-.1314325E+01	Y0=	.4102535E+00
TE1A=	14.0	F1=	-23.750	XC=	-.1285873E+01	Y0=	.4175646E+00
TE1A=	14.0	F1=	-23.268	XC=	-.1257388E+01	Y0=	.4248843E+00
TE1A=	14.0	F1=	-22.782	XC=	-.1228868E+01	Y0=	.4322126E+00
TE1A=	14.0	F1=	-22.294	XC=	-.1200316E+01	Y0=	.4395495E+00
TE1A=	14.0	F1=	-21.801	XC=	-.1171730E+01	Y0=	.4468950E+00
TE1A=	14.0	F1=	-21.306	XC=	-.1143110E+01	Y0=	.4542492E+00
TE1A=	14.0	F1=	-20.807	XC=	-.1114456E+01	Y0=	.4616121E+00
TE1A=	14.0	F1=	-20.304	XC=	-.1085769E+01	Y0=	.4689837E+00
TE1A=	14.0	F1=	-19.799	XC=	-.1057047E+01	Y0=	.4763640E+00
TE1A=	14.0	F1=	-19.290	XC=	-.1028292E+01	Y0=	.4837530E+00
TE1A=	14.0	F1=	26.565	XC=	.1546645E+01	Y0=	.1145410E+01
TE1A=	14.0	F1=	-26.565	XC=	-.1428296E+01	Y0=	.4867947E+00
TE1A=	14.0	F1=	-26.105	XC=	-.1401069E+01	Y0=	.4940963E+00
TE1A=	14.0	F1=	-25.641	XC=	-.1373791E+01	Y0=	.5014158E+00
TE1A=	14.0	F1=	-25.174	XC=	-.1346460E+01	Y0=	.5147531E+00

TETA= 18.0	F1= -24.702	XC= -.1119076E+01	Y0= .5241080E+00
TETA= 18.0	F1= -24.220	XC= -.1291640E+01	Y0= .5334816E+00
TETA= 18.0	F1= -23.750	XC= -.1264152E+01	Y0= .5428720E+00
TETA= 18.0	F1= -23.268	XC= -.1236610E+01	Y0= .5522022E+00
TETA= 18.0	F1= -22.782	XC= -.1209015E+01	Y0= .5617096E+00
TETA= 18.0	F1= -22.294	XC= -.1181360E+01	Y0= .5711553E+00
TETA= 18.0	F1= -21.801	XC= -.1153669E+01	Y0= .5806192E+00
TETA= 18.0	F1= -21.306	XC= -.1125911E+01	Y0= .5901013E+00
TETA= 18.0	F1= -20.807	XC= -.1098103E+01	Y0= .5996019E+00
TETA= 18.0	F1= -20.304	XC= -.1070241E+01	Y0= .6091208E+00
TETA= 18.0	F1= -19.799	XC= -.1042324E+01	Y0= .6186581E+00
TETA= 18.0	F1= -19.290	XC= -.1014354E+01	Y0= .6282140E+00
TETA= 18.0	F1= -26.565	XC= -.1579284E+01	Y0= .1514306E+01
TETA= 22.0	F1= -26.565	XC= -.1394473E+01	Y0= .6044278E+00
TETA= 22.0	F1= -26.105	XC= -.1368509E+01	Y0= .6157418E+00
TETA= 22.0	F1= -25.641	XC= -.1342472E+01	Y0= .6270874E+00
TETA= 22.0	F1= -25.174	XC= -.1316361E+01	Y0= .6384656E+00
TETA= 22.0	F1= -24.702	XC= -.1290176E+01	Y0= .6498757E+00
TETA= 22.0	F1= -24.228	XC= -.1263917E+01	Y0= .6613181E+00
TETA= 22.0	F1= -23.750	XC= -.1237584E+01	Y0= .6727931E+00
TETA= 22.0	F1= -23.268	XC= -.1211176E+01	Y0= .6843006E+00
TETA= 22.0	F1= -22.782	XC= -.1184692E+01	Y0= .6958409E+00
TETA= 22.0	F1= -22.294	XC= -.1158133E+01	Y0= .7074141E+00
TETA= 22.0	F1= -21.801	XC= -.1131494E+01	Y0= .7190203E+00
TETA= 22.0	F1= -21.306	XC= -.1104782E+01	Y0= .7306597E+00
TETA= 22.0	F1= -20.807	XC= -.1078001E+01	Y0= .7423324E+00
TETA= 22.0	F1= -20.304	XC= -.1051137E+01	Y0= .7540384E+00
TETA= 22.0	F1= -19.799	XC= -.1024195E+01	Y0= .7657784E+00
TETA= 22.0	F1= -19.290	XC= -.9971768E+00	Y0= .7775519E+00
TETA= 22.0	F1= -26.565	XC= .1622806E+01	Y0= .1919225E+01
TETA= 26.0	F1= -26.565	XC= -.1355131E+01	Y0= .7278321E+00
TETA= 26.0	F1= -26.105	XC= -.1330599E+01	Y0= .7411447E+00
TETA= 26.0	F1= -25.641	XC= -.1305971E+01	Y0= .7545089E+00
TETA= 26.0	F1= -25.174	XC= -.1281248E+01	Y0= .7679251E+00
TETA= 26.0	F1= -24.702	XC= -.1256428E+01	Y0= .7813934E+00
TETA= 26.0	F1= -24.228	XC= -.1231512E+01	Y0= .7949144E+00
TETA= 26.0	F1= -23.750	XC= -.1206499E+01	Y0= .8084861E+00
TETA= 26.0	F1= -23.268	XC= -.1181387E+01	Y0= .8221150E+00
TETA= 26.0	F1= -22.782	XC= -.1156175E+01	Y0= .8357954E+00
TETA= 26.0	F1= -22.294	XC= -.1130867E+01	Y0= .8495294E+00
TETA= 26.0	F1= -21.801	XC= -.1105458E+01	Y0= .8633178E+00
TETA= 26.0	F1= -21.306	XC= -.1079949E+01	Y0= .8771605E+00
TETA= 26.0	F1= -20.807	XC= -.1054330E+01	Y0= .8910580E+00
TETA= 26.0	F1= -20.304	XC= -.1028627E+01	Y0= .9050105E+00
TETA= 26.0	F1= -19.799	XC= -.1002812E+01	Y0= .9190184E+00
TETA= 26.0	F1= -19.290	XC= -.9768963E+00	Y0= .9330820E+00
TETA= 26.0	F1= -26.565	XC= .1679550E+01	Y0= .2374607E+01
TETA= 30.0	F1= -26.565	XC= -.1310802E+01	Y0= .8581819E+00
TETA= 30.0	F1= -26.105	XC= -.1287835E+01	Y0= .8734935E+00
TETA= 30.0	F1= -25.641	XC= -.1264751E+01	Y0= .8888826E+00
TETA= 30.0	F1= -25.174	XC= -.1241550E+01	Y0= .9043500E+00
TETA= 30.0	F1= -24.702	XC= -.1218231E+01	Y0= .9198462E+00
TETA= 30.0	F1= -24.228	XC= -.1194792E+01	Y0= .9355219E+00
TETA= 30.0	F1= -23.750	XC= -.1171234E+01	Y0= .9512276E+00
TETA= 30.0	F1= -23.268	XC= -.1147554E+01	Y0= .9670140E+00
TETA= 30.0	F1= -22.782	XC= -.1123752E+01	Y0= .9828817E+00
TETA= 30.0	F1= -22.294	XC= -.1099826E+01	Y0= .9988312E+00
TETA= 30.0	F1= -21.801	XC= -.1075780E+01	Y0= .1014863E+01
TETA= 30.0	F1= -21.306	XC= -.1051607E+01	Y0= .1030979E+01
TETA= 30.0	F1= -20.807	XC= -.1027308E+01	Y0= .1047178E+01
TETA= 30.0	F1= -20.304	XC= -.1002883E+01	Y0= .1063462E+01
TETA= 30.0	F1= -19.799	XC= -.9783292E+00	Y0= .1079830E+01
TETA= 30.0	F1= -19.290	XC= -.9536472E+00	Y0= .1096285E+01
TETA= 30.0	F1= -26.565	XC= .1753027E+01	Y0= .2900732E+01

APÊNDICE B

PROGRAMA AUXILIAR PARA O TRAÇADO DAS CURVAS
DA TEMPERATURA E CORRENTE DO DETECTOR EM FUNÇÃO DO TEMPO

```

DIMENSION T(5),I(5)
REAL I
RT=7,14
H=9,6E-05
RTH=RT*H
TP=2,5E+03
A=1E-02
PT=1,76E-08
X2=-TP/(2,*RTH)
X3=-TP/RTH
3 X1=(Y*TP)/(2,*RTH)
Z1=EXP(X1)
Z2=EXP(X2)
Z3=EXP(X3)
T(1)=(1./(RTH*H))*(1.-(Z1/(1.+Z2)))
T(2)=(1./(RTH*H))*(Z1/(1.+Z2))
CI=(A*PT+TP)/(2.+(RT**2)*(H**3))
I(1)=(CI*(1.-Z2)/(1.-Z3))*Z1
I(2)=I(1)
WRITE(6,1)Y,T(1),T(2),I(1),I(2)

1 FORMAT(1X,2HY#,F7,4,3X,5HT(1)#,E14,7,3X,5HT(2)#,E14,7,3X,5HT(1)#,
*E14,7,3X,5HT(2)#,E14,7)
CREMTO=1./32.
Y=Y+CREMTO
IF(Y.GT.1.)GO TO 2
GO TO 3
2 STOP
END

```

Y= 0,0000	T(1)= .2112344E+07	T(2)= .1308471E+08	I(1)= .4199690E-02	I(2)= -.4199690E-02
Y= 0,0313	T(1)= .2837177E+07	T(2)= .1235987E+08	I(1)= .3967046E-02	I(2)= -.3967046E-02
Y= 0,0625	T(1)= .3521859E+07	T(2)= .1167519E+08	I(1)= .3747290E-02	I(2)= -.3747290E-02
Y= 0,0938	T(1)= .4168611E+07	T(2)= .1102844E+08	I(1)= .3539707E-02	I(2)= -.3539707E-02
Y= 0,1250	T(1)= .4779537E+07	T(2)= .1041751E+08	I(1)= .3343623E-02	I(2)= -.3343623E-02
Y= 0,1563	T(1)= .5356620E+07	T(2)= .9840431E+07	I(1)= .3158402E-02	I(2)= -.3158402E-02
Y= 0,1875	T(1)= .5901736E+07	T(2)= .9295315E+07	I(1)= .2983440E-02	I(2)= -.2983440E-02
Y= 0,2188	T(1)= .6416654E+07	T(2)= .8780397E+07	I(1)= .2818171E-02	I(2)= -.2818171E-02
Y= 0,2500	T(1)= .6903049E+07	T(2)= .8294002E+07	I(1)= .2662057E-02	I(2)= -.2662057E-02
Y= 0,2813	T(1)= .7362499E+07	T(2)= .7834552E+07	I(1)= .2514591E-02	I(2)= -.2514591E-02
Y= 0,3125	T(1)= .7796498E+07	T(2)= .7400553E+07	I(1)= .2375294E-02	I(2)= -.2375294E-02
Y= 0,3438	T(1)= .8206455E+07	T(2)= .6990596E+07	I(1)= .2243714E-02	I(2)= -.2243714E-02
Y= 0,3750	T(1)= .8593702E+07	T(2)= .6603349E+07	I(1)= .2119422E-02	I(2)= -.2119422E-02
Y= 0,4063	T(1)= .8959498E+07	T(2)= .6237553E+07	I(1)= .2002016E-02	I(2)= -.2002016E-02
Y= 0,4375	T(1)= .9305030E+07	T(2)= .5892021E+07	I(1)= .1891113E-02	I(2)= -.1891113E-02
Y= 0,4688	T(1)= .9631422E+07	T(2)= .5565629E+07	I(1)= .1786354E-02	I(2)= -.1786354E-02
Y= 0,5000	T(1)= .9939733E+07	T(2)= .5257319E+07	I(1)= .1687398E-02	I(2)= -.1687398E-02
Y= 0,5313	T(1)= .1023096E+08	T(2)= .4966087E+07	I(1)= .1593924E-02	I(2)= -.1593924E-02
Y= 0,5625	T(1)= .1050606E+08	T(2)= .4690988E+07	I(1)= .1505628E-02	I(2)= -.1505628E-02
Y= 0,5938	T(1)= .1076592E+08	T(2)= .4431128E+07	I(1)= .1422223E-02	I(2)= -.1422223E-02
Y= 0,6250	T(1)= .1101139E+08	T(2)= .4185664E+07	I(1)= .1343438E-02	I(2)= -.1343438E-02
Y= 0,6563	T(1)= .1124325E+08	T(2)= .3953797E+07	I(1)= .1269018E-02	I(2)= -.1269018E-02
Y= 0,6875	T(1)= .1146228E+08	T(2)= .3734775E+07	I(1)= .1198720E-02	I(2)= -.1198720E-02
Y= 0,7188	T(1)= .1166917E+08	T(2)= .3527885E+07	I(1)= .1132316E-02	I(2)= -.1132316E-02
Y= 0,7500	T(1)= .1186460E+08	T(2)= .3332456E+07	I(1)= .1069591E-02	I(2)= -.1069591E-02
Y= 0,7813	T(1)= .1204920E+08	T(2)= .3147853E+07	I(1)= .1010340E-02	I(2)= -.1010340E-02
Y= 0,8125	T(1)= .1222357E+08	T(2)= .2973476E+07	I(1)= .9543720E-03	I(2)= -.9543720E-03
Y= 0,8438	T(1)= .1238829E+08	T(2)= .2808759E+07	I(1)= .9015041E-03	I(2)= -.9015041E-03
Y= 0,8750	T(1)= .1254388E+08	T(2)= .2653166E+07	I(1)= .8515649E-03	I(2)= -.8515649E-03
Y= 0,9063	T(1)= .1269086E+08	T(2)= .2506193E+07	I(1)= .8043920E-03	I(2)= -.8043920E-03
Y= 0,9375	T(1)= .1282969E+08	T(2)= .2367361E+07	I(1)= .7598323E-03	I(2)= -.7598323E-03
Y= 0,9688	T(1)= .1296083E+08	T(2)= .2236220E+07	I(1)= .7177411E-03	I(2)= -.7177411E-03
Y= 1,0000	T(1)= .1308471E+08	T(2)= .2112344E+07	I(1)= .6779814E-03	I(2)= -.6779814E-03

APÊNDICE C

PROGRAMA AUXILIAR PARA O TRAÇADO DAS CURVAS DO MÓDULO E FASE DA RESPONSIVIDADE

```
REAL K
INTEGER FF
DIMENSION F3DB(5),TT(5)
PI=3.14159
K=12.56E-03
TT(1)=0.6854E-03
TT(2)=0.177E-03
DO 1 I=1,2
1 F3DB(I)=1./((2.*PI*TT(I))
  FF=1
  CALL RESP(FF,TT)
  DO 2 FF=10,100,10
2 CALL RESP(FF,TT)
  DO 3 FF=200,5000,100
3 CALL RESP(FF,TT)
  DO 4 FF=5500,10000,500
4 CALL RESP(FF,TT)
  DO 11 J=11,19,1
  FF=J*1000
11 CALL RESP(FF,TT)
  DO 5 J=20,100,10
  FF=J*1000
5 CALL RESP(FF,TT)
  DO 6 J=200,1000,100
  FF=J*1000
6 CALL RESP(FF,TT)
  DO 7 J=2,10,1
  FF=J*1000000
7 CALL RESP(FF,TT)
  DO 9 J=20,100,10
  FF=J*1000000
9 CALL RESP(FF,TT)
  DO 8 I=1,4
  C=F3DB(I)
8 CALL RESP(C,TT)
  STOP
  END
```

```
SUBROUTINE RESP(F,T)
DIMENSION T(5)
REAL K,MODULO
K=12.56E-03
PI=3.14159
MODULO=(2.*PI*F*K)/((SQRT(1.+((2.*PI*F*T(1))**2)))*(SQRT(1.+((2.*
*PI*F*T(2))**2))))
DB=20.*ALOG10(MODULO)
FASE=PI/2.-ATAN(2.*PI*F*T(1))-ATAN(2.*PI*F*T(2))
GRAUS=(FASE*180.)/PI
WRITE(6,10)F,MODULO,DB,GRAUS
10 FORMAT(10X,2HF=,F14.2,3X,7HMODULO=,E14.7,3X,3HDB=,F7.2,3X,6HGRAUS=
*,F7.2)
RETURN
END
```

f=	1.00	MODULU=	.7891596E-01	DB=	-22.06	GRAUS=	89.69
f=	10.00	MODULU=	.7883879E+00	DB=	-2.07	GRAUS=	86.90
f=	20.00	MODULU=	.1572124E+01	DB=	3.93	GRAUS=	83.60
f=	30.00	MODULU=	.2346682E+01	DB=	7.41	GRAUS=	80.73
f=	40.00	MODULU=	.3107774E+01	DB=	9.85	GRAUS=	77.68
f=	50.00	MODULU=	.3851476E+01	DB=	11.71	GRAUS=	74.67
f=	60.00	MODULU=	.4574265E+01	DB=	13.21	GRAUS=	71.69
f=	70.00	MODULU=	.5273121E+01	DB=	14.44	GRAUS=	68.77
f=	80.00	MODULU=	.5945542E+01	DB=	15.48	GRAUS=	65.91
f=	90.00	MODULU=	.6589558E+01	DB=	16.38	GRAUS=	63.10
f=	100.00	MODULU=	.7203718E+01	DB=	17.15	GRAUS=	60.35
f=	200.00	MODULU=	.1167374E+02	DB=	21.34	GRAUS=	36.72
f=	300.00	MODULU=	.1374635E+02	DB=	22.76	GRAUS=	19.29
f=	400.00	MODULU=	.1544000E+02	DB=	23.22	GRAUS=	6.15
f=	500.00	MODULU=	.1452553E+02	DB=	23.24	GRAUS=	-4.17
f=	600.00	MODULU=	.1421564E+02	DB=	23.06	GRAUS=	-12.56
f=	700.00	MODULU=	.1372454E+02	DB=	22.75	GRAUS=	-19.55
f=	800.00	MODULU=	.1314819E+02	DB=	22.38	GRAUS=	-25.47
f=	900.00	MODULU=	.1254118E+02	DB=	21.97	GRAUS=	-30.56
f=	1000.00	MODULU=	.1193511E+02	DB=	21.54	GRAUS=	-34.97
f=	1100.00	MODULU=	.1134771E+02	DB=	21.10	GRAUS=	-38.82
f=	1200.00	MODULU=	.1078850E+02	DB=	20.66	GRAUS=	-42.20
f=	1300.00	MODULU=	.1026197E+02	DB=	20.22	GRAUS=	-45.20
f=	1400.00	MODULU=	.9769566E+01	DB=	19.80	GRAUS=	-47.87
f=	1500.00	MODULU=	.9310953E+01	DB=	19.38	GRAUS=	-50.26
f=	1600.00	MODULU=	.8884778E+01	DB=	18.97	GRAUS=	-52.41
f=	1700.00	MODULU=	.8489151E+01	DB=	18.58	GRAUS=	-54.35
f=	1800.00	MODULU=	.8121948E+01	DB=	18.19	GRAUS=	-56.11
f=	1900.00	MODULU=	.7780986E+01	DB=	17.82	GRAUS=	-57.71
f=	2000.00	MODULU=	.7464129E+01	DB=	17.46	GRAUS=	-59.17
f=	2100.00	MODULU=	.7169352E+01	DB=	17.11	GRAUS=	-60.51
f=	2200.00	MODULU=	.6894764E+01	DB=	16.77	GRAUS=	-61.74
f=	2300.00	MODULU=	.6638625E+01	DB=	16.44	GRAUS=	-62.88
f=	2400.00	MODULU=	.6399344E+01	DB=	16.12	GRAUS=	-63.93
f=	2500.00	MODULU=	.6175475E+01	DB=	15.81	GRAUS=	-64.91
f=	2600.00	MODULU=	.5965707E+01	DB=	15.51	GRAUS=	-65.82
f=	2700.00	MODULU=	.5768854E+01	DB=	15.22	GRAUS=	-66.67
f=	2800.00	MODULU=	.5593845E+01	DB=	14.94	GRAUS=	-67.46
f=	2900.00	MODULU=	.5409713E+01	DB=	14.66	GRAUS=	-68.20
f=	3000.00	MODULU=	.5245583E+01	DB=	14.40	GRAUS=	-68.89
f=	3100.00	MODULU=	.5090666E+01	DB=	14.14	GRAUS=	-69.54
f=	3200.00	MODULU=	.4944247E+01	DB=	13.88	GRAUS=	-70.15
f=	3300.00	MODULU=	.4805678E+01	DB=	13.64	GRAUS=	-70.73
f=	3400.00	MODULU=	.4674372E+01	DB=	13.39	GRAUS=	-71.28
f=	3500.00	MODULU=	.4549796E+01	DB=	13.16	GRAUS=	-71.80
f=	3600.00	MODULU=	.4431468E+01	DB=	12.93	GRAUS=	-72.29
f=	3700.00	MODULU=	.4318941E+01	DB=	12.71	GRAUS=	-72.75
f=	3800.00	MODULU=	.4211817E+01	DB=	12.49	GRAUS=	-73.19
f=	3900.00	MODULU=	.4109728E+01	DB=	12.28	GRAUS=	-73.61
f=	4000.00	MODULU=	.4012337E+01	DB=	12.07	GRAUS=	-74.01
f=	4100.00	MODULU=	.3919337E+01	DB=	11.86	GRAUS=	-74.39
f=	4200.00	MODULU=	.3830445E+01	DB=	11.66	GRAUS=	-74.75
f=	4300.00	MODULU=	.3745401E+01	DB=	11.47	GRAUS=	-75.10
f=	4400.00	MODULU=	.3663969E+01	DB=	11.28	GRAUS=	-75.43
f=	4500.00	MODULU=	.3585926E+01	DB=	11.09	GRAUS=	-75.75
f=	4600.00	MODULU=	.3511071E+01	DB=	10.91	GRAUS=	-76.05
f=	4700.00	MODULU=	.3439217E+01	DB=	10.73	GRAUS=	-76.34
f=	4800.00	MODULU=	.3370190E+01	DB=	10.55	GRAUS=	-76.62
f=	4900.00	MODULU=	.3303830E+01	DB=	10.38	GRAUS=	-76.89
f=	5000.00	MODULU=	.3239987E+01	DB=	10.21	GRAUS=	-77.15
f=	5500.00	MODULU=	.2954035E+01	DB=	9.41	GRAUS=	-78.30
f=	6000.00	MODULU=	.2713894E+01	DB=	8.67	GRAUS=	-79.26
f=	6500.00	MODULU=	.2509494E+01	DB=	7.99	GRAUS=	-80.08
f=	7000.00	MODULU=	.2333469E+01	DB=	7.36	GRAUS=	-80.78
f=	7500.00	MODULU=	.2180341E+01	DB=	6.77	GRAUS=	-81.39
f=	8000.00	MODULU=	.2045944E+01	DB=	6.22	GRAUS=	-81.92
f=	8500.00	MODULU=	.1927063E+01	DB=	5.70	GRAUS=	-82.40
f=	9000.00	MODULU=	.1821164E+01	DB=	5.21	GRAUS=	-82.82
f=	9500.00	MODULU=	.1728246E+01	DB=	4.74	GRAUS=	-83.19
f=	10000.00	MODULU=	.1640692E+01	DB=	4.30	GRAUS=	-83.53
f=	11000.00	MODULU=	.1492647E+01	DB=	3.48	GRAUS=	-84.12
f=	12000.00	MODULU=	.1364035E+01	DB=	2.73	GRAUS=	-84.61
f=	13000.00	MODULU=	.1264281E+01	DB=	2.04	GRAUS=	-85.02
f=	14000.00	MODULU=	.1174337E+01	DB=	1.40	GRAUS=	-85.38
f=	15000.00	MODULU=	.1096404E+01	DB=	0.80	GRAUS=	-85.68
f=	16000.00	MODULU=	.1028116E+01	DB=	0.24	GRAUS=	-85.95
f=	17000.00	MODULU=	.9678247E+00	DB=	-0.28	GRAUS=	-86.19
f=	18000.00	MODULU=	.9142036E+00	DB=	-0.78	GRAUS=	-86.40
f=	19000.00	MODULU=	.8662058E+00	DB=	-1.25	GRAUS=	-86.59
f=	20000.00	MODULU=	.8229909E+00	DB=	-1.69	GRAUS=	-86.76

F=	30000.00	MDDULU=	+5489888E+00	DB=	-5.21	GRAUS=	-87.84
F=	40000.00	MDDULU=	+4118279E+00	DB=	-7.71	GRAUS=	-88.38
F=	50000.00	MDDULU=	+3294943E+00	DB=	-9.64	GRAUS=	-89.70
F=	60000.00	MDDULU=	+2745930E+00	DB=	-11.23	GRAUS=	-89.92
F=	70000.00	MDDULU=	+2353729E+00	DB=	-12.56	GRAUS=	-89.07
F=	80000.00	MDDULU=	+2054556E+00	DB=	-13.72	GRAUS=	-89.19
F=	90000.00	MDDULU=	+1830742E+00	DB=	-14.75	GRAUS=	-89.28
F=	100000.00	MDDULU=	+1647684E+00	DB=	-15.66	GRAUS=	-89.35
F=	200000.00	MDDULU=	+8238689E-01	DB=	-21.68	GRAUS=	-89.68
F=	300000.00	MDDULU=	+5492492E-01	DB=	-25.20	GRAUS=	-89.78
F=	400000.00	MDDULU=	+4114378E-01	DB=	-27.70	GRAUS=	-89.84
F=	500000.00	MDDULU=	+3295505E-01	DB=	-29.64	GRAUS=	-89.87
F=	600000.00	MDDULU=	+2746256E-01	DB=	-31.23	GRAUS=	-89.89
F=	700000.00	MDDULU=	+2353934E-01	DB=	-32.56	GRAUS=	-89.91
F=	800000.00	MDDULU=	+2054693E-01	DB=	-33.72	GRAUS=	-89.92
F=	900000.00	MDDULU=	+1830838E-01	DB=	-34.75	GRAUS=	-89.93
F=	1000000.00	MDDULU=	+1647755E-01	DB=	-35.66	GRAUS=	-89.94
F=	2000000.00	MDDULU=	+8238777E-02	DB=	-41.68	GRAUS=	-89.97
F=	3000000.00	MDDULU=	+5492518E-02	DB=	-45.20	GRAUS=	-89.98
F=	4000000.00	MDDULU=	+4114389E-02	DB=	-47.70	GRAUS=	-89.98
F=	5000000.00	MDDULU=	+3295511E-02	DB=	-49.64	GRAUS=	-89.99
F=	6000000.00	MDDULU=	+2746259E-02	DB=	-51.23	GRAUS=	-89.99
F=	7000000.00	MDDULU=	+2353936E-02	DB=	-52.56	GRAUS=	-89.99
F=	8000000.00	MDDULU=	+2054694E-02	DB=	-53.72	GRAUS=	-89.99
F=	9000000.00	MDDULU=	+1830839E-02	DB=	-54.75	GRAUS=	-89.99
F=	10000000.00	MDDULU=	+1647755E-02	DB=	-55.66	GRAUS=	-89.99
F=	20000000.00	MDDULU=	+8238778E-03	DB=	-61.68	GRAUS=	-90.00
F=	30000000.00	MDDULU=	+5492518E-03	DB=	-65.20	GRAUS=	-90.00
F=	40000000.00	MDDULU=	+4114389E-03	DB=	-67.70	GRAUS=	-90.00
F=	50000000.00	MDDULU=	+3295511E-03	DB=	-69.64	GRAUS=	-90.00
F=	60000000.00	MDDULU=	+2746259E-03	DB=	-71.23	GRAUS=	-90.00
F=	70000000.00	MDDULU=	+2353936E-03	DB=	-72.56	GRAUS=	-90.00
F=	80000000.00	MDDULU=	+2054694E-03	DB=	-73.72	GRAUS=	-90.00
F=	90000000.00	MDDULU=	+1830839E-03	DB=	-74.75	GRAUS=	-90.00
F=	100000000.00	MDDULU=	+1647756E-03	DB=	-75.66	GRAUS=	-90.00
f=	232.21	MDDULU=	+1254618E+02	DB=	21.97	GRAUS=	30.52
F=	899.18	MDDULU=	+1254618E+02	DB=	21.97	GRAUS=	-30.52

APÊNDICE D

PROGRAMA AUXILIAR PARA O TRAÇADO DA CURVA DA TENSÃO DE SAÍDA DO PRÉ-AMPLIFICADOR EM FUNÇÃO DO TEMPO

```

DIMENSION V1(5),V2(5),T(5),TK(5)
TP=2.5E-03
T(1)=0.6854E-03
T(2)=0.177E-03
TK(1)=-36.05E+03
TK(2)=13.96E+04
Y=0.
4 DO 1 K=1,2
  X1=(Y*TP)/(2.*T(K))
  X2=-TP/(2.*T(K))
  Z1=EXP(X1)
  Z2=EXP(X2)
  V1(K)=TK(K)*T(K)*(1.-(Z1/(1.+Z2)))
  V2(K)=TK(K)*T(K)*(Z1/(1.+Z2))
  VOUT1=V1(1)+V1(2)
  VOUT2=V2(1)+V2(2)
  WRITE(6,2)Y,V1(1),V1(2),VOUT1
2  FORMAT(1X,2HY=,F7.4,3X,6HV1(1)=,F7.2,3X,6HV1(2)=,F7.2,3X,6HVOUT1=,
  *F7.2)
  WRITE(6,3)Y,V2(1),V2(2),VOUT2
3  FORMAT(1X,2HY=,F7.4,3X,6HV2(1)=,F7.2,3X,6HV2(2)=,F7.2,3X,6HVOUT2=,
  *F7.2)
  A=1./32.
  Y=Y+A
  IF(Y.GT.1.)GO TO 5
  GO TO 4
5 STOP
END

```

Y= 0.0000	V1(1)= -3.43	V1(2)= 0.02	VOUT1= -3.41
Y= 0.0000	V2(1)= -21.27	V2(2)= 24.69	VOUT2= 3.41
Y= 0.0313	V1(1)= -4.61	V1(2)= 4.91	VOUT1= 0.30
Y= 0.0313	V2(1)= -20.10	V2(2)= 19.80	VOUT2= -0.30
Y= 0.0625	V1(1)= -5.73	V1(2)= 8.83	VOUT1= 3.11
Y= 0.0625	V2(1)= -18.98	V2(2)= 15.88	VOUT2= -3.10
Y= 0.0938	V1(1)= -6.78	V1(2)= 11.98	VOUT1= 5.20
Y= 0.0938	V2(1)= -17.93	V2(2)= 12.73	VOUT2= -5.20
Y= 0.1250	V1(1)= -7.77	V1(2)= 14.50	VOUT1= 6.73
Y= 0.1250	V2(1)= -16.94	V2(2)= 10.21	VOUT2= -6.73
Y= 0.1563	V1(1)= -8.71	V1(2)= 16.52	VOUT1= 7.81
Y= 0.1563	V2(1)= -16.00	V2(2)= 8.19	VOUT2= -7.81
Y= 0.1875	V1(1)= -9.60	V1(2)= 18.14	VOUT1= 8.55
Y= 0.1875	V2(1)= -15.11	V2(2)= 6.57	VOUT2= -8.55
Y= 0.2188	V1(1)= -10.43	V1(2)= 19.44	VOUT1= 9.01
Y= 0.2188	V2(1)= -14.28	V2(2)= 5.27	VOUT2= -9.01
Y= 0.2500	V1(1)= -11.22	V1(2)= 20.49	VOUT1= 9.26
Y= 0.2500	V2(1)= -13.48	V2(2)= 4.22	VOUT2= -9.26
Y= 0.2813	V1(1)= -11.97	V1(2)= 21.32	VOUT1= 9.35
Y= 0.2813	V2(1)= -12.74	V2(2)= 3.39	VOUT2= -9.35
Y= 0.3125	V1(1)= -12.68	V1(2)= 21.99	VOUT1= 9.32
Y= 0.3125	V2(1)= -12.03	V2(2)= 2.72	VOUT2= -9.32
Y= 0.3438	V1(1)= -13.34	V1(2)= 22.53	VOUT1= 9.19
Y= 0.3438	V2(1)= -11.37	V2(2)= 2.18	VOUT2= -9.19

Y= 0.3750	V1(1)= -13.97	V1(2)= 22.96	VOUT1= 8.99
Y= 0.3750	V2(1)= -10.74	V2(2)= 1.75	VOUT2= -8.99
Y= 0.4063	V1(1)= -14.57	V1(2)= 23.31	VOUT1= 8.74
Y= 0.4063	V2(1)= -10.14	V2(2)= 1.40	VOUT2= -8.74
Y= 0.4375	V1(1)= -15.13	V1(2)= 23.59	VOUT1= 8.46
Y= 0.4375	V2(1)= -9.58	V2(2)= 1.12	VOUT2= -8.46
Y= 0.4688	V1(1)= -15.66	V1(2)= 23.81	VOUT1= 8.15
Y= 0.4688	V2(1)= -9.05	V2(2)= 0.90	VOUT2= -8.15
Y= 0.5000	V1(1)= -16.16	V1(2)= 23.99	VOUT1= 7.83
Y= 0.5000	V2(1)= -8.55	V2(2)= 0.72	VOUT2= -7.82
Y= 0.5313	V1(1)= -16.63	V1(2)= 24.13	VOUT1= 7.49
Y= 0.5313	V2(1)= -8.07	V2(2)= 0.58	VOUT2= -7.49
Y= 0.5625	V1(1)= -17.08	V1(2)= 24.24	VOUT1= 7.16
Y= 0.5625	V2(1)= -7.63	V2(2)= 0.46	VOUT2= -7.16
Y= 0.5938	V1(1)= -17.50	V1(2)= 24.34	VOUT1= 6.83
Y= 0.5938	V2(1)= -7.20	V2(2)= 0.37	VOUT2= -6.83
Y= 0.6250	V1(1)= -17.90	V1(2)= 24.41	VOUT1= 6.51
Y= 0.6250	V2(1)= -6.81	V2(2)= 0.30	VOUT2= -6.51
Y= 0.6563	V1(1)= -18.28	V1(2)= 24.47	VOUT1= 6.19
Y= 0.6563	V2(1)= -6.43	V2(2)= 0.24	VOUT2= -6.19
Y= 0.6875	V1(1)= -18.64	V1(2)= 24.52	VOUT1= 5.88
Y= 0.6875	V2(1)= -6.07	V2(2)= 0.19	VOUT2= -5.88
Y= 0.7188	V1(1)= -18.97	V1(2)= 24.56	VOUT1= 5.58
Y= 0.7188	V2(1)= -5.74	V2(2)= 0.15	VOUT2= -5.58
Y= 0.7500	V1(1)= -19.29	V1(2)= 24.59	VOUT1= 5.29
Y= 0.7500	V2(1)= -5.42	V2(2)= 0.12	VOUT2= -5.29
Y= 0.7813	V1(1)= -19.59	V1(2)= 24.61	VOUT1= 5.02
Y= 0.7813	V2(1)= -5.12	V2(2)= 0.10	VOUT2= -5.02
Y= 0.8125	V1(1)= -19.87	V1(2)= 24.63	VOUT1= 4.76
Y= 0.8125	V2(1)= -4.83	V2(2)= 0.08	VOUT2= -4.75
Y= 0.8438	V1(1)= -20.14	V1(2)= 24.65	VOUT1= 4.50
Y= 0.8438	V2(1)= -4.57	V2(2)= 0.06	VOUT2= -4.50
Y= 0.8750	V1(1)= -20.40	V1(2)= 24.66	VOUT1= 4.26
Y= 0.8750	V2(1)= -4.31	V2(2)= 0.05	VOUT2= -4.26
Y= 0.9063	V1(1)= -20.63	V1(2)= 24.67	VOUT1= 4.03
Y= 0.9063	V2(1)= -4.07	V2(2)= 0.04	VOUT2= -4.03
Y= 0.9375	V1(1)= -20.86	V1(2)= 24.68	VOUT1= 3.82
Y= 0.9375	V2(1)= -3.85	V2(2)= 0.03	VOUT2= -3.82
Y= 0.9688	V1(1)= -21.07	V1(2)= 24.68	VOUT1= 3.61
Y= 0.9688	V2(1)= -3.64	V2(2)= 0.03	VOUT2= -3.61
Y= 1.0000	V1(1)= -21.27	V1(2)= 24.69	VOUT1= 3.41
Y= 1.0000	V2(1)= -3.43	V2(2)= 0.02	VOUT2= -3.41