



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-160-LAFE

Um método de reprodução de fotografias de satélites meteorológicos

Roberto Vicente Calheiros

Tese de Mestrado em Ciências, orientada pelo Dr. Fernando de Mendonça, aprovada em fevereiro de 1971.

INPE
São José dos Campos
1971

UM MÉTODO DE REPRODUÇÃO DE FOTOGRAFIAS DE
SATÉLITES METEOROLÓGICOS

por

Roberto Vicente Calheiros (*)

orientador

Fernando de Mendonça

LAFE, 160

Fevereiro, 1971

SUBMETIDA PARA PREENCHIMENTO PARCIAL DOS
REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE
"MESTRE EM CIÊNCIAS"

PR - Conselho Nacional de Pesquisas
Comissão Nacional de Atividades Espaciais
São José dos Campos - SP - Brasil

(*) Instituto de Pesquisas da Fundação Educacional de Bauru



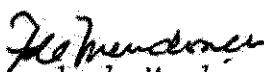
PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA
CONSELHO NACIONAL DE PESQUISAS
COMISSÃO NACIONAL DE ATIVIDADES ESPACIAIS
São José dos Campos - São Paulo - Brasil

UM MÉTODO DE REPRODUÇÃO DE FOTOGRAFIAS DE
SATÉLITES METEOROLÓGICOS (*)

por

Roberto Vicente Calheiros

Este trabalho contém elementos do programa de pesquisas da CNAE, sua execução recebeu a colaboração financeira da Fundação Educacional de Bauru e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, e sua publicação foi autorizada por


Fernando de Mendonça
Diretor Científico

(*) Patente requerida

RESUMO

O método apresentado utiliza osciloscópios comuns, uma fresta de amostragem e uma câmera composta de uma objetiva comum e um mecanismo de puxamento para filme de 35mm.

Vale-se das propriedades de emissão luminosa pelas telas de fósforo dos osciloscópios e das características de formação de imagens em filmes comuns de 35mm, dois efeitos não lineares para obter-se um efeito final linear.

São apresentadas curvas de emissão de luz para quatro tipos diferentes de fósforo, em função da amplitude do sinal de vídeo que contém as informações fotográficas. São dadas as curvas características dos filmes utilizados para reprodução das fotos.

São mostradas as curvas de resposta em frequência dos filmes impressionando o filme pelo processo de amostragem usado, e verificada a adequação do sistema de reprodução das fotos. Para isso é feita uma análise espectral do sinal real, acompanhada de um modelo matemático que descreve o processo de amostragem. Mostra-se finalmente, que o sistema atua como um filtro passa-baixas, eliminando as harmônicas de ordem superior e reproduzindo a faixa básica do sinal.

O método apresenta boas características de linearidade e fornece diretamente dispositivos, com o uso de filmes comuns de 35mm, e liminando a necessidade de uma detecção de amplitude convencional nos circuitos de recepção.

ÍNDICE

Resumo.....iii
Índice.....iv
Índice das Figuras.....v

I - SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE DADOS DE COBERTURA DE NUVENS POR
SATÉLITES METEOROLÓGICOS E SUAS CARACTERÍSTICAS.....1
1.1 - Introdução.....1
1.2 - Tipo de sinal transmitido pelo satélite.....6
1.3 - Análise espectral do sinal real recebido em Terra.....9
1.4 - Modificação do sinal.....19

II - PROCESSO DE DETEÇÃO DO SINAL - CURVAS DE DETEÇÃO.....28
2.1 - Processamento do Sinal.....28
2.2 - Análise matemática do processo.....35
2.3 - Considerações sobre os processos físicos envolvidos na
luminescência.....44
2.4 - Medidas de luminosidade emitida por telas de osciloscó
pios.....49

III- PROPRIEDADES DO SISTEMA - CARACTERÍSTICAS FOTOGRÁFICAS.....61
3.1 - Registro Fotográfico do Sinal.....61
3.2 - Características Ótico-Fotográfica do Sistema de Repro
dução.....68
3.3 - Curvas de Transferência de Modulação.....71
3.4 - Considerações sobre o sistema e conclusões.....77
Bibliografia.....80

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 - Esquema de Órbitas e Sequência Fotográfica para o Sistema Operacional de Satélites Meteorológicos.....3

Fig. 1.2 - Sistema de recepção e reprodução.....5

Fig. 1.3 - Características do IDCS (Nimbus III e IV).....7

Fig. 1.4 - Formato do sinal de 2,4 KHz modulado pelo vídeo (saída do detetor FM).....10

Fig. 1.5 - (a) (b) - Sinal de 2,4 KHz modulado por 50 Hz e 100 Hz (espectro).....12

(c) (d) (e) - Sinal de 2,4 KHz modulado por 500 Hz, 1 KHz e 1,6 KHz.....13

(f) (g) - Subportadora de 2,4 KHz.....14

Fig. 1.6 - (a) (b) - Sinal de 2,4 KHz modulado 100% por 300 Hz (espectro) (a) Gerado em terra, (b) Recebido do satélite.....15

Fig. 1.7 - Varredura típica do sinal reproduzido pela Fig. 1.9.....16

Fig. 1.8 - Espectro médio do sinal da Fig. 1.9.....16

Fig. 1.9 - Região de observação geradora do espectro da figura 1.8.....17

Fig. 1.10- Região de observação geradora do espectro da figura 1.9.....17

Fig. 1.11- Espectro médio das varreduras na região de observação.....20

Fig. 1.12- Espectros superpostos para varreduras ao longo de toda a foto da Fig. 1.10.....21

Fig. 1.13- Espectro do pulso de sincronismo.....21

Fig. 1.14- Espectro de um sinal normal.....21

Fig. 1.15- (a) - Variação do nível DC.....23

(b) - Variação do contraste.....24

(c) - Variação do contraste de escuros.....25

(d) - Variação do nível DC na região dos claros

Variação da tensão de mudança de característica.....26

(e) - Variação do contraste de claros.....27

Fig. 2.1 - Varredura do elemento de tela.....30

Fig. 2.2 - Emissão de luz sob condições de incidência contínua e varredura.....32

Fig. 2.3 - Princípio de composição da foto.....34

Fig. 2.4 - Função de amostragem.....38

Fig. 2.5 - Espectro de $V_a(\omega)$43

Fig. 2.6 - Níveis de energia no cristal.....	45
Fig. 2.7 - Processo de medida da luz.....	50
Fig. 2.8 - Curva de emissão espectral para o fósforo P2 utilizado.....	52
Fig. 2.9 - Curva de emissão espectral para o fósforo P31 utilizado.....	53
Fig. 2.10- Curva de emissão espectral para o fósforo P11 utilizado.....	54
Fig. 2.11- Curva de emissão de luz no centro da tela em função da amplitude do sinal de 2,4 KHz - fósforo P31.....	56
Fig. 2.12- Curva de emissão de luz no centro da tela em função da amplitude do sinal de 2,4 KHz - fósforo P1.....	57
Fig. 2.13- Curva de emissão de luz no centro da tela em função da amplitude do sinal de 2,4 KHz - fósforo P2.....	58
Fig. 2.14- Curva de emissão de luz no centro da tela em função da amplitude do sinal de 2,4 KHz - fósforo P11.....	59
Fig. 3.1 - Curva característica típica para filmes.....	62
Fig. 3.2 - Curvas características para a placa pancromática TRI-X.....	63
Fig. 3.3 - (a) - Curva característica Fuji Neopan.....	65
(b) - Curva característica PLUS-X.....	66
(c) - Curva característica TRI-X.....	67
Fig. 3.4 - Curva de sensibilidade espectral da placa Pancromática TRI-X.....	69
Fig. 3.5 - Curvas de luminosidade ao longo de um ciclo de modulação.....	72
Fig. 3.6 - Transmissão registrada no diapositivo para diferentes modulações.....	73
Fig. 3.7 - Método de levantamento das características de transfe rências de modulações.....	74
Fig. 3.8 - Curvas de transferência de modulação.....	78

CAPÍTULO I

SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE DADOS DE COBERTURA DE NUVENS POR SATÉLITES METEOROLÓGICOS E SUAS CARACTERÍSTICAS

1.1 - Introdução

A capacidade de observação de parâmetros meteorológicos de que o homem dispunha até há pouco tempo viu-se enormemente aumentada pelo surgimento e rápido desenvolvimento da tecnologia espacial. Com o advento dos satélites artificiais da Terra, que levam a bordo os mais variados tipos de sensores pode-se melhorar em muito as previsões de tempo e os estudos climatológicos, com a possibilidade de obtenção de dados numa base temporal e espacial somente alcançada a través dos meios acima descritos. Essas possibilidades encontram sua maior aplicação exatamente em regiões da Terra onde o pequeno número de estações de superfície e de sondagem do ar superior, tornam a tecnologia espacial uma das armas mais importantes no terreno das observações meteorológicas de grande escala. Os satélites meteorológicos que fazem transmissão em tempo real, ou seja, enviam a informação que coletam à medida que sobrevoam a área observada, são equipados com um sistema chamado APT (Automatic Picture Transmission). Esses satélites estão em órbitas quase polares, ou seja, seu plano orbital forma com o equador um ângulo tal que esse plano tem uma precessão de aproximadamente $360^{\circ}/\text{ano}$ ($\approx 0.98^{\circ}$ dia). Com isso o plano orbital mantém, durante o ano todo, a mesma posição relativa ao sol, de modo que uma mesma área da Terra é observada pelo satélite cada dia, aproximadamente no mesmo horário local solar. A altitude da órbita é projetada para um período de revolução de aproximadamente 1 1/2 a 2 horas, variando um pouco para cada tipo de satélite. Essa altura oscila entre 1000 e 1400 Km, mantendo cada órbita uma boa circularidade.

O sistema APT, que é um dentre outros levados a bordo pelos satélites me

teorológicos, fornece fotografias feitas, normalmente na região visível no espectro eletromagnético, cobrindo áreas que variam entre 7 milhões (2,600 km x 2,600 km) e 10 milhões (3,200 km x 3,200 km) de km^2 , aproximadamente, dependendo do tipo de satélite que faz a fotografia (ver referência 1). No entanto, satélites mais recentes levam a bordo sensores que operam na região do infravermelho, em diferentes faixas dessa região do espectro fornecendo fotografias que permitem medir-se temperatura, albedo e até mesmo umidade (ver referências 7 e 8).

O sistema APT consiste basicamente num sistema análogo ao de Televisão porém de baixa velocidade de varredura, e de um equipamento de transmissão para envio dos dados à Terra (ver referências 2,3 e 4). Alguns sistemas mais aperfeiçoados incluem uma objetiva especial para compensar pela diferença de iluminação entre os polos e a região equatorial embora esse não seja um equipamento imprescindível. As objetivas empregadas são grande angulares com cêrca de 108° de abertura a fim de que, para as altitudes em que orbitam os satélites, as áreas acima descritas possam ser cobertas em cada foto. A combinação do período orbital, área coberta por cada foto e sequência temporal das mesmas permite um recobrimento do globo todo durante cada dia. Na região equatorial as fotos se tangenciam lateralmente, com o recobrimento lateral aumentando à medida que nos aproximamos dos polos. Latitudinalmente, na direção do deslocamento do satélite, há um recobrimento que varia de 30% a 50%, dependendo do satélite.

A figura 1.1. esquematiza o processo. Além dos satélites meteorológicos em órbitas aproximadamente circulares e quase polares, chamados heliosíncronos, há os satélites geosíncronos que estão sobre o equador a uma altura tal que o período orbital é de 24 horas, ou seja, se situam em uma posição fixa em relação à Terra. Esses satélites possuem um equipamento que lhes permite foto

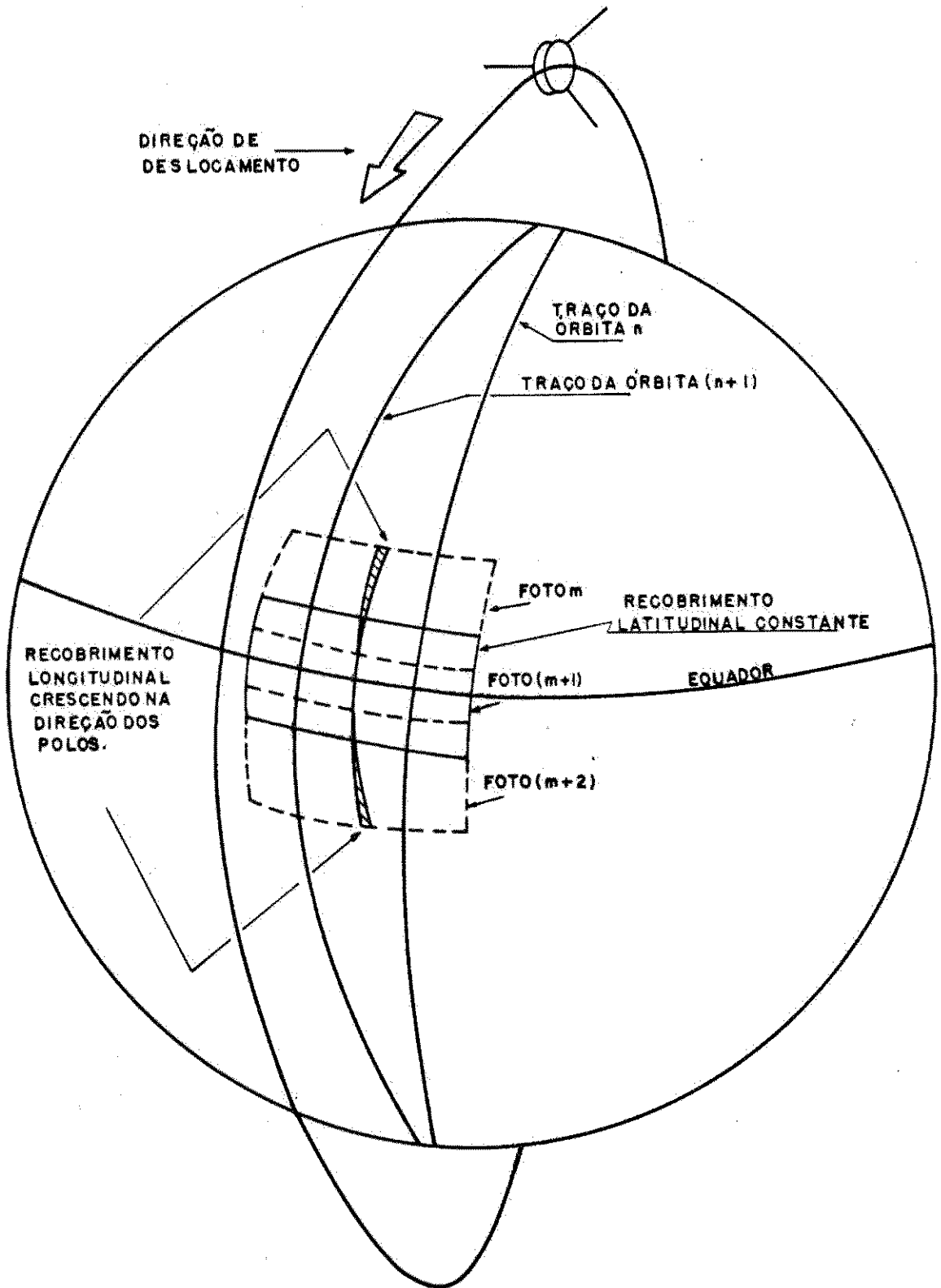


Fig.1.1 - Esquema de Orbitas e Sequência Fotográfica para o Sistema Operacional de Satélites Meteorológicos.

grafar o disco da Terra que lhes é visível e também focalizar áreas predeterminadas com maior detalhe, utilizando diferentes sistemas óticos.

As referências (1 a 13) descrevem em detalhe o procedimento utilizado pe los satélites para formar a imagem e transmiti-la para a Terra. Este trabalho descreve um método destinado a transformar o sinal contendo as informações, em uma fotografia que reproduz a imagem originalmente tomada pelo satélite. Esse método, cuja determinação das características e propriedades constituem êste trabalho de tese, foi por nós visualizado, em conjunto com o grupo do Projeto MESA (Meteorologia com Satélites) então sob nossa coordenação, com orientação da Direção Científica da CNAE e difere dos processos convencionais de que se tem conhecimento.

Uma subportadora modulada pelo sinal de vídeo varre a tela de um osciloscópio que se acha totalmente coberta por uma máscara, exceto por uma fresta horizontal no centro dela. Uma objetiva concentra a luz presente na fresta, em um filme comum de 35 mm. Esse filme é puxado continuamente por um motor síncrono de maneira que as imagens presentes na fresta impressionam o filme sucessivamente formando linhas contíguas. O conjunto de linhas constitui a fotografia.

O sistema detecta a amplitude do sinal de vídeo em termos de uma luminosidade correspondente, sem haver necessidade de uma detecção convencional de amplitude anterior, nos circuitos de recepção. O processo é representado esquematicamente na figura 1.2. A detecção de amplitude mencionada baseia-se no fato de o brilho da tela ser função da velocidade com que o feixe passa por êsse ponto, mantidos os outros parâmetros constantes (ver referências 25 e 27). Obtêm-se diretamente um dispositivo no filme comum de 35 mm. A combinação da detecção de amplitude do sinal de vídeo com o processo de registro da luminosidade correspondente no filme, dois efeitos não lineares, dá um efeito final linear, observadas certas condições.

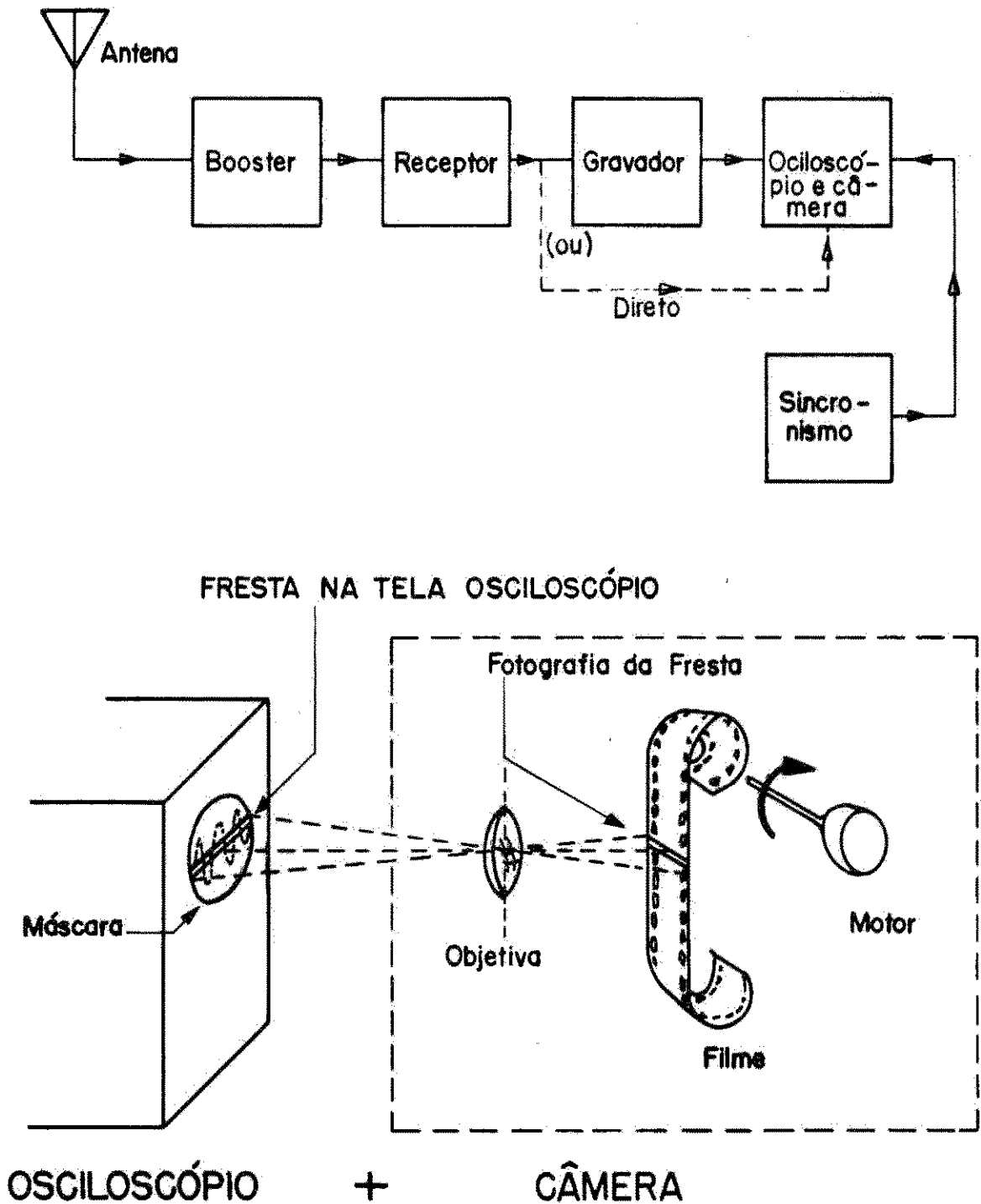


Fig. 1.2 - Sistema de recepção e reprodução

A característica de transferência total do sistema, desde a luminosidade originalmente gerada na tela, que é função da amplitude correspondente do sinal de vídeo, até a luminosidade que impressiona a vista do observador, presente numa tela onde está projetado o dispositivo apresenta, então, bõa linearidade. Determina-se a curva de resposta em frequência do sistema utilizado e faz-se um levantamento prático dos espectros médio e extremo dos sinais recebidos dos satélites. São dados os princípios básicos dos processos físicos envolvidos na emissão de luz por substâncias luminescentes, fazendo-se as aproximações permitidas pelo processo utilizado na reprodução das fotos e chegando-se a uma relação entre a quantidade de luz emitida pela tela e a amplitude do sinal correspondente. É feito o levantamento das curvas de emissão de luz em função da amplitude do sinal para os osciloscópios normalmente utilizados na reprodução de fotografias. Levantam-se as curvas características dos filmes normalmente utilizados procurando-se determinar os intervalos de amplitude adequados para cada filme. Finalmente é feita uma análise crítica do sistema e são apresentadas as conclusões.

1.2 - Tipo de sinal transmitido pelo satélite

A bordo do satélite, o sinal luminoso incidente no sistema ótico de deteção é transformado em um sinal de vídeo. Esse sinal, por sua vez, modula em amplitude uma subportadora de 2,4 KHz. A figura 1.3 nos dá a curva relacionando o sinal de saída no modulador, ou seja os 2,4 KHz modulados em amplitude pelo vídeo com a luz incidente no sistema sensor de luminosidade dos satélites meteorológicos Nimbus III e IV, denominado sistema de câmera dissecadora de imagem (IDCS) (ver refs. 7 e 8).

Observamos que há uma relação de bõa linearidade entre a voltagem de saída do modulador (valor pico-a-pico) e a luz incidente no IDCS, na faixa de lu

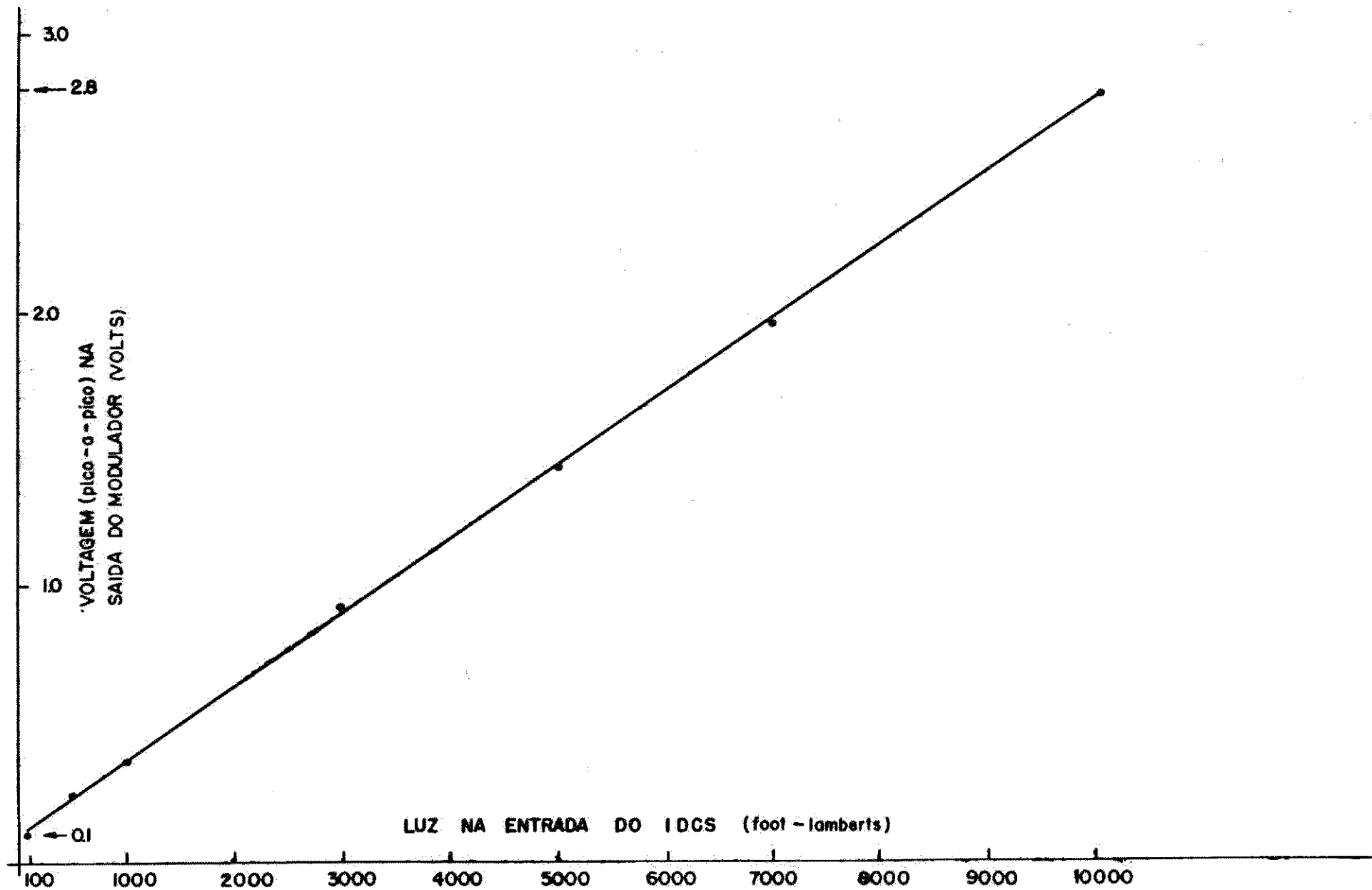


Fig.1.3 - Característica do IDCS (Nimbus III e IV)

minosidade de 100 a 10.000 foot-lamberts. O intervalo correspondente de voltagens vai de aproximadamente 0,1 v a 2,8 v. O sinal de 0,1 v corresponde a um nível de luz que a vista reconhece como preto e o de 2,8 v como branco. O IDCS é um sistema mais aperfeiçoado utilizado apenas nos satélites experimentais Nimbus III e IV. Os satélites operacionais utilizam sistemas cujo sensor de luminosidade é um vidicon de armazenamento.

Uma medida da qualidade da fotografia e, portanto, do sistema que a reproduz, consiste no número de níveis de cinza que a vista pode distinguir. Em alguns vidicons convencionais cerca de 15 níveis puderam ser distinguidos em algumas áreas muito pequenas da fotografia mas, nos vidicons de armazenamento existentes, há uma grande variação ao longo de toda a fotografia. Desta maneira uma calibração de brilho, conforme feita no caso do IDCS, é impraticável. Em geral, pode-se distinguir seis níveis de cinza na fotografia (ver ref.2). Os sistemas dos satélites operacionais detetam, em média, luminosidades num intervalo de aproximadamente 25 para 1, com uma variação de voltagens, na saída do modulador, aproximadamente igual à dos sistemas dos Nimbus III e IV, ou seja, da ordem de 28 para 1.

Essa subportadora de 2,4 MHz, modulada em amplitude pelo vídeo vai, por sua vez, modular em frequência uma portadora de VHF na faixa de 135 a 140 MHz sinal final que é então transmitido à Terra. Cada fotografia é composta de 800 linhas e tem uma relação de aspecto de 1.

Para se manter a mesma resolução horizontal e vertical a faixa de passagem do sinal de vídeo é de 1,6 MHz, de vez que a frequência de repetição da varredura é de 4 Hz. Desta forma $f_{\text{vídeo máxima}} = 4 \text{ Hz} \times \frac{800 \text{ linhas}}{2} = 1,6 \text{ MHz}$.

Como cada linha é varrida à razão de $\frac{1}{4}$ sec. e temos 800 linhas, cada foto leva 200 sec. para ser transmitida. O desvio da portadora de VHF é de ± 10 MHz ($\Delta f = 10 \text{ MHz}$). A subportadora de 2,4 MHz está modulada por um sinal máximo

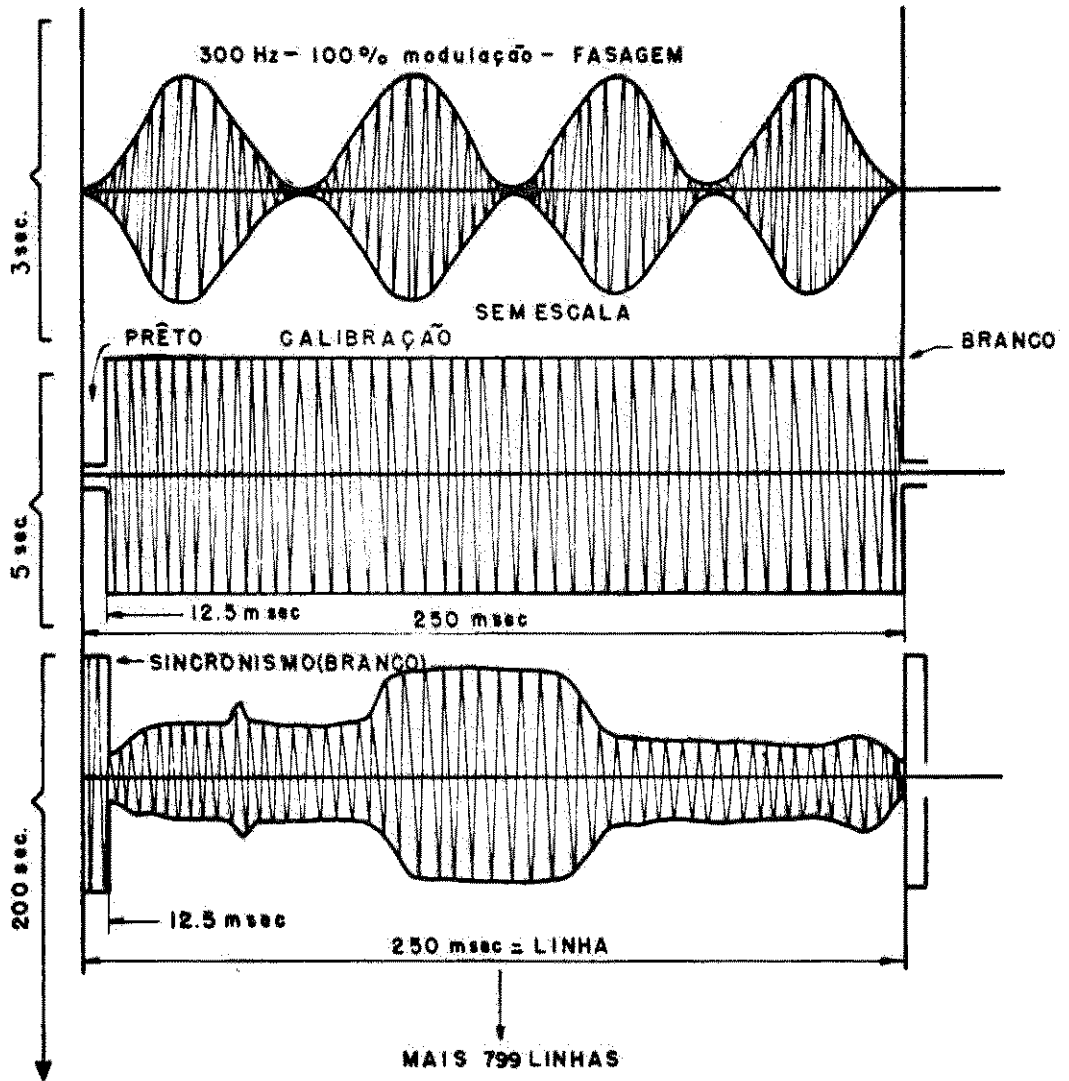
de 1,6 MHz, portanto os valores máximo e mínimo de frequências contidos no espectro AM da subportadora são 0,8 MHz e 4,0 MHz.

Dêste modo a máxima frequência que vai modular a portadora de VHF é de 4 kHz, donde m_f (índice de modulação FM) = $\frac{10}{4} = 2,5$. Na verdade êsse índice de modulação é a razão de desvio, no nosso caso, e a faixa necessária para a recepção da porção significativa do espectro FM será $B \approx 4 \times 10 = 40$ MHz (ver referência 14).

Na figura 1.4 temos o formato do sinal de 2,4 MHz modulado pelo vídeo. Os sinais de fasagem e de sincronismo não são utilizados pelo equipamento que recebe o sinal diretamente do satélite. Sabemos agora de que tipo de sinal dispomos, teoricamente, contendo as informações fotográficas. O sinal de VHF é recebido por uma antena de alto ganho (ver referência 9), é préamplificado e vai a um receptor VHF/FM. Na saída do receptor dispomos do sinal de 2,4 MHz modulado pelo vídeo, ocupando, no máximo, uma faixa de 0,8-4,0 MHz,

1.3 - Análise espectral do sinal real recebido em Terra

Para avaliar a adequação do sistema utilizado para a reprodução das fotos, fizemos um levantamento do tipo de sinal que realmente chega à estação terrestre. Para isso foram analisadas cerca de 200 fotografias recebidas no decorrer de um ano (período aproximado de novembro 1969 a novembro 1970 pela estação APT da CNAE) afim de se obter uma estimativa significativa. Foi usado um osciloscópio de armazenamento Tektronix 549, com uma câmera Polaroid Tektronix C-27 e um Plug-in Tektronix 1L5 analisador de espectros. Para se obter uma boa resolução em frequência teve-se que usar uma varredura de período bem maior que a varredura do sinal, de modo que o espectro de sinal real obtido é um espectro médio de várias varreduras. Isso significa que um dado espectro é composto de frequências obtidas analisando porções diversas de uma série de



TOTAL = 208 sec.

Fig. 1.4 - Formato do sinal de 2,4kHz modulado pelo vídeo (saída do detetor FM)

varreduras. Embora sendo um espectro AM não há simetria em torno da portadora devido à aleatoriedade do sinal de vídeo nas diversas varreduras.

Para facilidade de análise dos espectros obtidos construiu-se em Terra um modulador segundo características fornecidas na ref. 10, normalmente empregado para um processo chamado remodulação do sinal.

As figuras 1.5 (a), (b), (c), (d), (e), (f) e (g) mostram o espectro obtido ao se modular a subportadora de 2,4 Hz com frequências de 50 Hz, 100 Hz, 500 Hz, 1 KHz e 1,6 KHz. O índice de modulação utilizado foi de aproximadamente 70%. A dispersão utilizada foi de 1 KHz/cm, ou seja, em cada cm do reticulado na tela estão representados 1 Hz; a resolução foi de 100KHz. O tempo de varredura selecionado para a melhor resolução observada foi de 2 sec. Agora, naturalmente, o espectro AM é simétrico de vez que o sinal é constante e tem uma só componente modulando a subportadora durante toda a varredura. As figs. 1.5 (f) e (g) mostram a subportadora pura de 2,4 KHz conforme gerada em terra e recebida diretamente do satélite. A reprodutibilidade do sinal em Terra é bom, sendo a subportadora recebida do satélite naturalmente mais ruidosa. A figura 1.5 (a) com os 50 Hz modulando a subportadora mostra que a resolução do analisador é bastante boa. A distorção para altas frequências de modulação é evidente para 1,6 KHz de modulação (fig. 1.5 (g)) onde o índice de modulação real medido cai para ~ 55%.

Com base nesses padrões obteve-se uma série de espectros de várias fotos. A fig. 1.6 (a) e (b) nos mostra a subportadora de 2,4 KHz modulada 100% por 300 Hz, conforme obtida pelo sistema de Terra e diretamente recebida do satélite. Essa região corresponde aos 300 Hz que modulam 100% a subportadora durante 3 sec, aos 5 segundos antes do início de cada foto, conforme mostra o formato do sinal na fig. 1.4. O espectro é simétrico de vez que a duração da modulação de 300 Hz é maior que a duração da varredura e ambas foram iniciadas

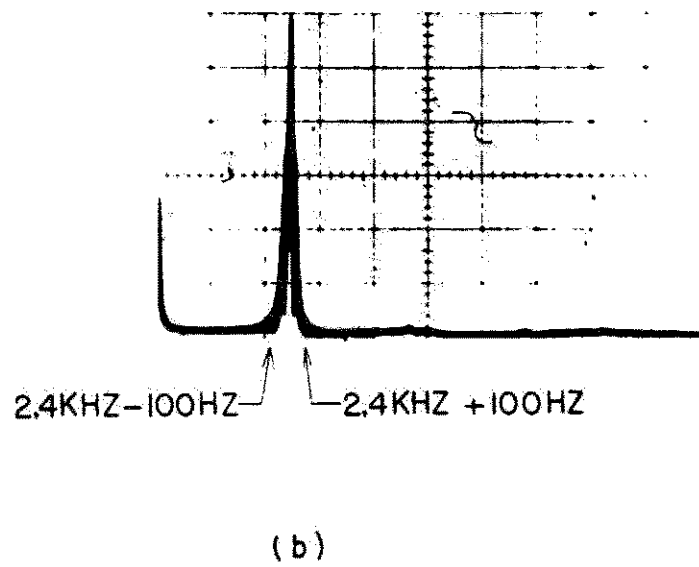
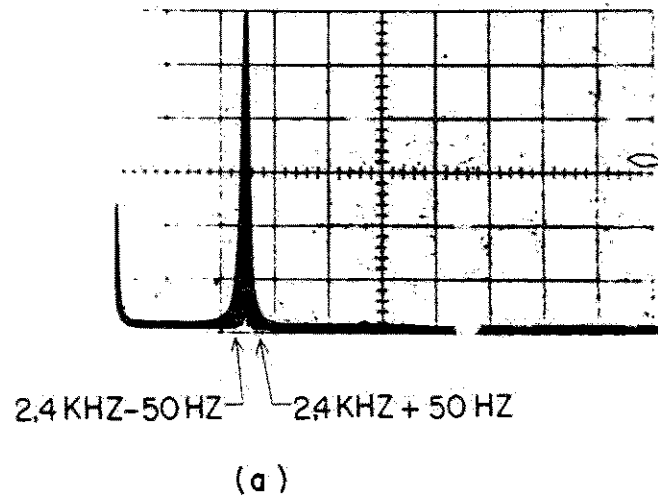
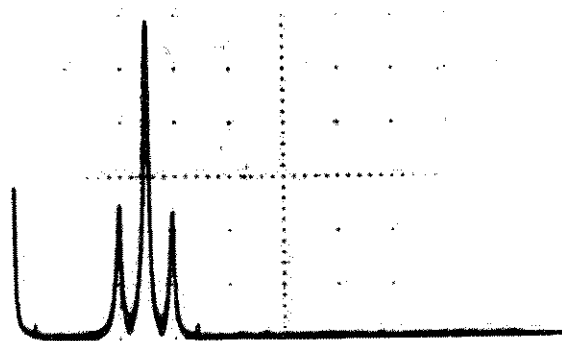
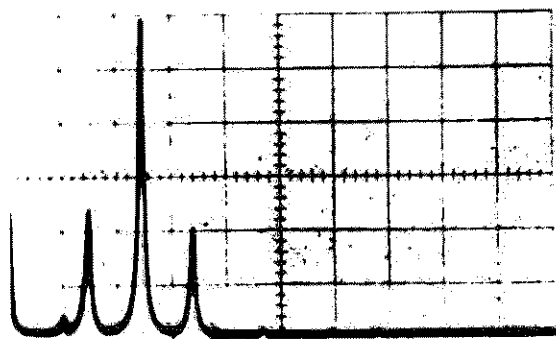


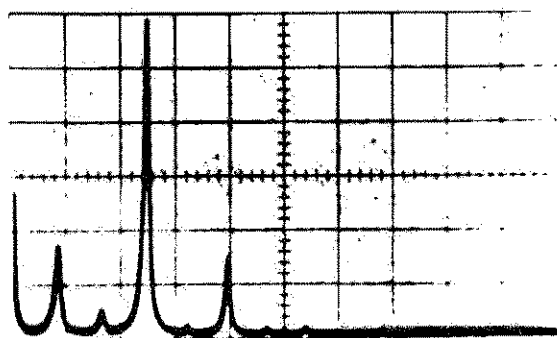
Fig 1.5 – Sinal de 2,4 KHZ modulado por 50HZ e 100HZ (espectro)



(c)

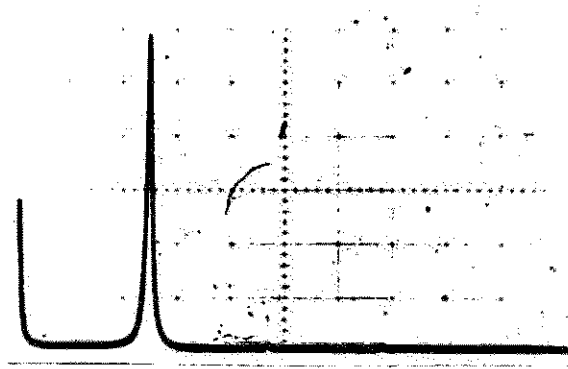


(d)

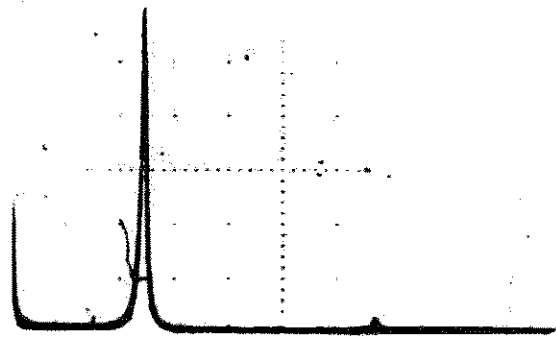


(e)

Fig. 1.5 - Sinal de 2,4 KHZ modulado por 500HZ, 1KHZ e 1,6 KHZ

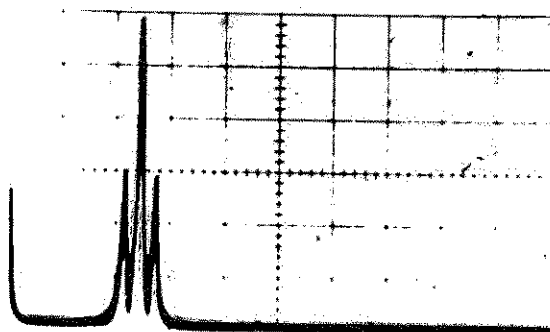


(f)

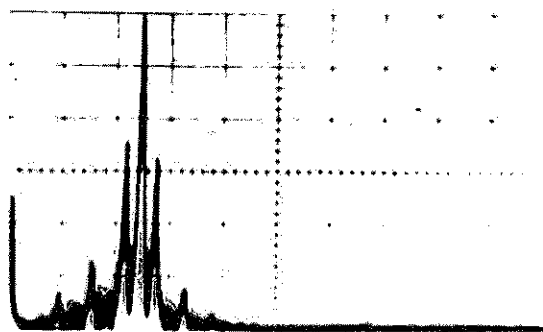


(g)

Fig. 1.5 - Subportadora de 2,4KHZ



(a)



(b)

Fig. 1.6 – Sinal de 2,4KHZ modulado 100 % por 300HZ (espectro)

(a) Gerado em terra

(b) Recehido do satélite

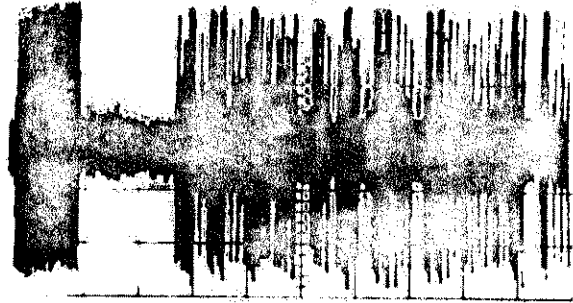


Fig. 1.7— Varredura típica do sinal reproduzido pela Fig 1.9

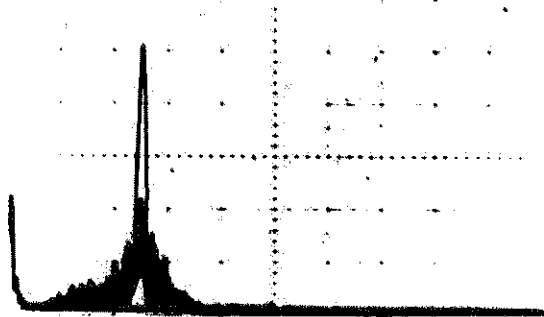


Fig 1.8— Espectro médio do sinal da Fig. 1.9

Região de Observação

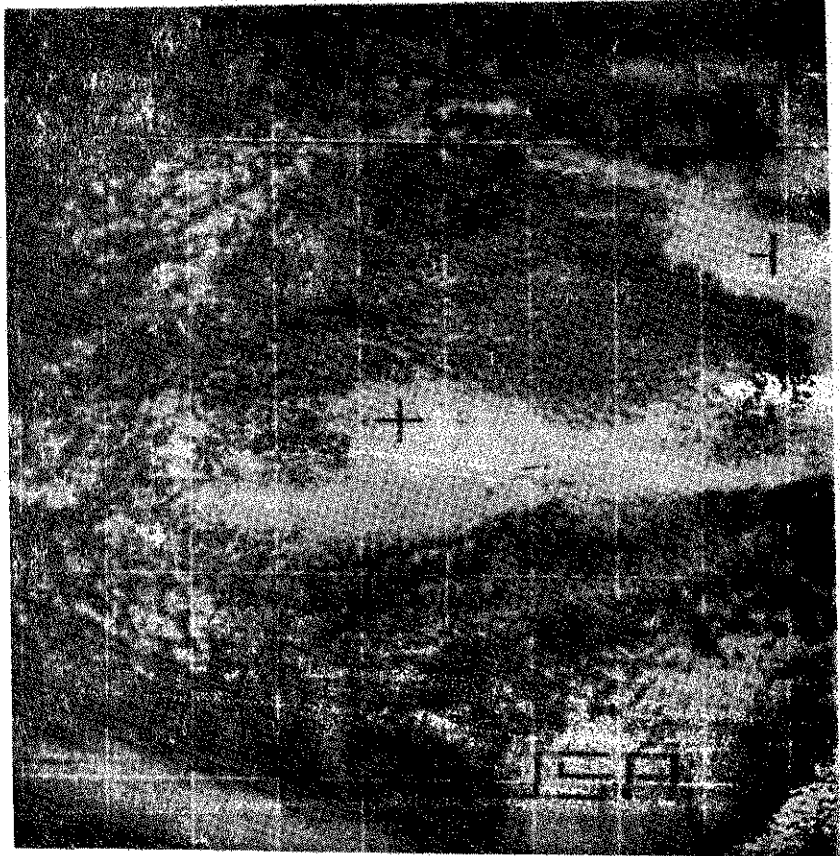
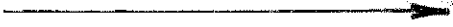


Fig. 1.10



Fig. 1.9

quase simultaneamente. Havia dificuldade em se evitar sobremodulação ao se a justar os 100% de modulação em Terra com o que se preferiu deixar um valor um pouco inferior.

A semelhança entre os dois sinais é evidente. A diferença entre os máximos das 2 componentes deve-se proválmente à não constância da resposta do analizador de espectros ao longo do eixo de frequências.

Procurou-se uma fotografia com quantidade significativa de harmônicos. Obteve-se como caso extremo, o sinal cuja varredura típica está na fig. 1.7. O espectro correspondente está na fig. 1.8 e a reprodução do sinal com o sistema que utilizamos na fig. 1.9. O espectro obtido é um espectro médio e pela análise da fig. 1.9 observamos que a região que serviu de base para a sua obtenção apresenta características de vídeo análogas ao longo das varreduras. Registrou-se vários espectros que ficaram armazenados na tela. O pico de portadora que aparece foi registrado fora da região de interêsse e não deve ser levado em conta. Pode-se encontrar frequências significativas de até 1,2 Hz modulando a subportadora de 2,4 Hz, no entanto observamos que são componentes de pequena amplitude. Procurou-se a seguir uma fotografia de cobertura de nuvens que oferesse uma quantidade elevada de conteúdo harmônico. Da experiência adquirida em três anos de recepção de fotos a fig. 1.10 foi selecionada como possuindo quantidade apreciável de conteúdo harmônico. Na fig. 1.11 obteve-se o espectro médio das varreduras situadas na região de provável conteúdo harmônico máximo. Na fig. 1.12 foram registrados os espectros levantados durante t \hat{o} da a foto em varreduras sucessivas.

Observamos que a envoltória da fig. 1.12 se ajusta bem na fig. 1.11 mostrando ser a região escolhida para máximo conteúdo harmônico realmente a mais provável em conteúdo harmônico. Com isso comprovou-se que o critério usado para selecionar as fotos é razoável. O espectro que aparece na fig. 1.11 em vol

ta dos 900 Hz é o pulso de sincronismo indevidamente misturado ao sinal, por falha do equipamento. A fig. 1.13 mostra o espectro do pulso de sincronismo, comprovando o que foi dito. A análise das figs. 1.11 e 1.12 nos mostra que não há componentes significativos no sinal acima de 500 Hz. Finalmente selecionou-se uma foto considerada média normal, ou seja, sem qualquer extremo de conteúdo harmônico. A fig. 1.14 dá o espectro médio típico de várias varreduras de uma fotografia padrão. O controle de sensibilidade do amplificador vertical foi propositadamente pôsto em alta sensibilidade para se poder observar bem as proximidades da portadora. Levando em conta esse fato ao analisarmos o espectro da fig. 1.14 concluímos que não há componentes significativas acima de 200 Hz.

Das observações efetuadas podemos concluir que o sinal que sai do receptor é composto principalmente pela subportadora de 2,4 Hz modulado por sinais de, no máximo 500 Hz para fotografias de coberturas de nuvens e, em casos excepcionais até 1,2 MHz para transmissão de informação escrita ou código. Em relação aos sinais transmitidos por informação colhida na região do infravermelho eles possuem, no máximo 350 Hz teóricos de modulação (vide ref. 7)

O sinal de 2,4 kHz modulado pelo vídeo estende-se então normalmente, no máximo, de 1,9 kHz a 2,9 kHz, variando sua amplitude de 1 para 28, aproximadamente.

1.4 - Modificações no sinal

Ocorre muitas vezes, por problemas a bordo dos satélites, que o sinal de 2,4 kHz modulado pelo vídeo sofre alterações que prejudicam a reprodução e a interpretação dos dados. Alguns casos típicos são aqui expostos:

- (a) Modificação da curva de resposta do sistema sensor de luminosidade deslocando-se paralela a si mesma. Isso se traduz num deslocamento do intervalo de variação do sinal de 2,4 kHz ou seja, se o sinal va

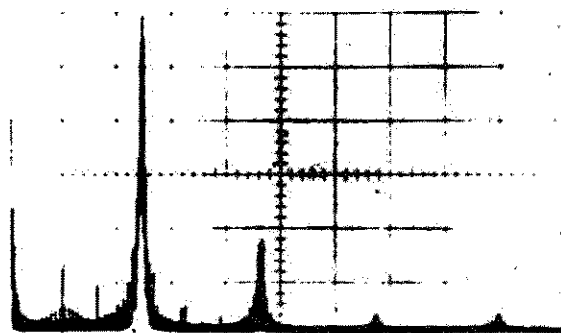


Fig. I.11 – Espectro médio das varreduras na região de observação

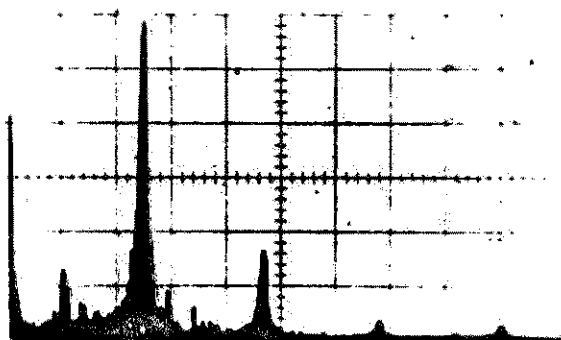


Fig. 1.12 – Espectros superpostos p/varreduras ao longo de tôda a foto da Fig. 1.10

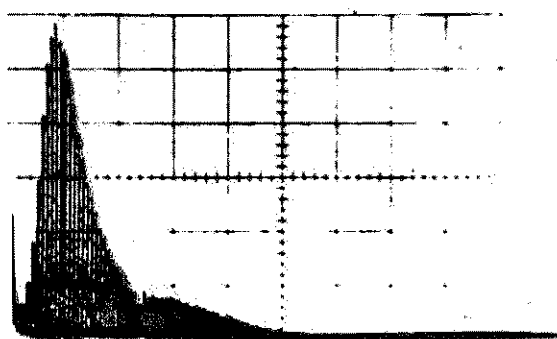


Fig. 1.13 – Espectro do pulso de sincronismo

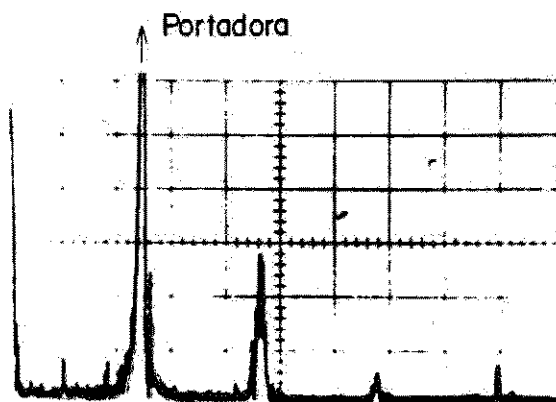


Fig. 1.14 – Espectro de um sinal normal

riava de 0,1 v a 2,8 v (pico-a-pico) passa a variar agora de 0,2 v a 2,9 v pico a pico. Em outras palavras, o sinal de vídeo adquire um nível DC.

- (b) Modificação da curva de resposta do sistema sensor de luminosidade girando em torno de um ponto, diminuindo sua inclinação. Isso se traduz numa diminuição do intervalo de variação do sinal de 2,4 KHz, ou seja o vídeo fica restrito a um $V_{\text{máximo}}-V_{\text{mínimo}}$ menor.
- (c) Perda de resposta do sistema sensor de luminosidade na região do preto ou do branco. Isto se traduz na perda de uma parte do intervalo de variação do sinal de 2,4 KHz. Agora não há uma "compressão" na variação do sinal de vídeo mas sim, a perda de uma parte da variação. Pode ocorrer que as modificações da curva de resposta do sistema ótico luminoso conforme expostos em (a) sejam tão grandes que ocorra (c) como consequência, por se atingir regiões de saturação.

Na prática os três fenômenos já foram observados. Nos casos (a) e (b) o sinal original pode ser recuperado por processamento eletrônico adequado pois a informação continua contida nele porém, sob outra forma. No caso (c) a informação está perdida porque não foi adquirida no processo de recepção. Este é o caso com o satélite ESSA⁴ (Environmental Survey Satellite-4) em que o nível DC adquirido foi tão grande que ocorreu severa saturação na região do branco. No caso concreto de ocorrência de (a) e (b) pode-se utilizar circuitos de equalização que devolvam o sinal aos seus limites originais. São os chamados "contrôles gama", que foram montados e cujas características de transferência estão nas figs. 1.15 (ver ref. 15).

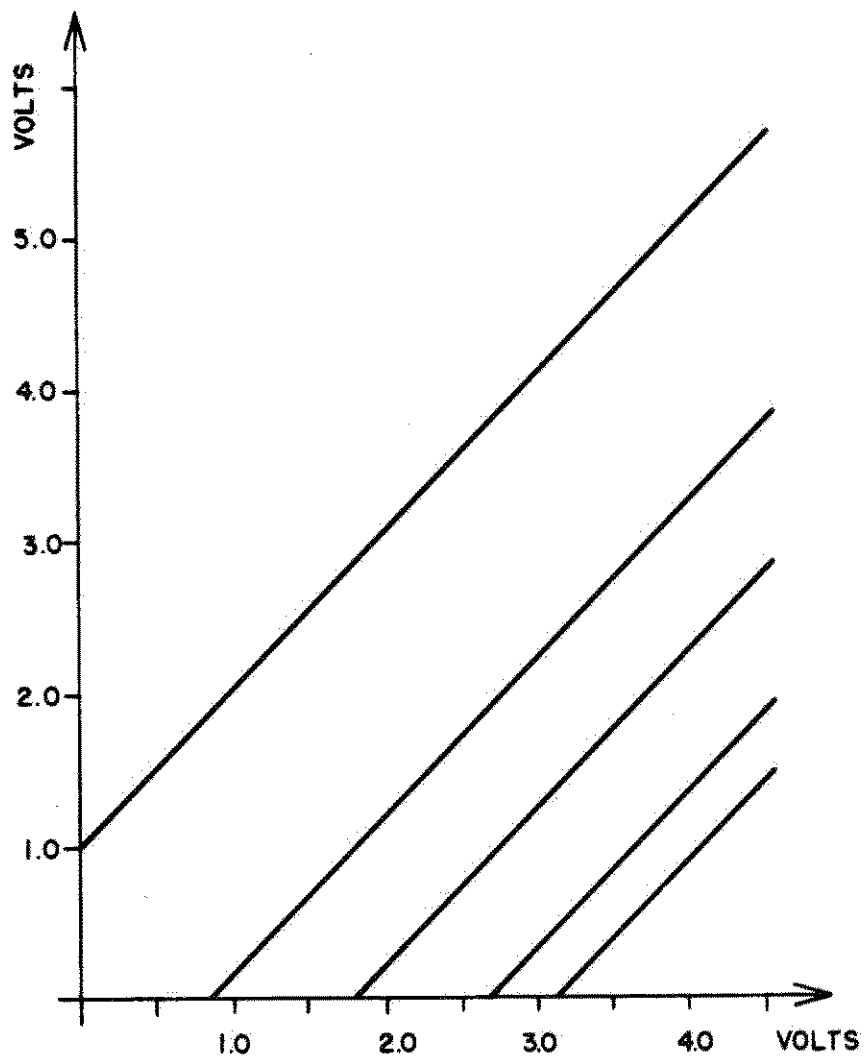


Fig. 1.15(a) - Variação do Nível DC

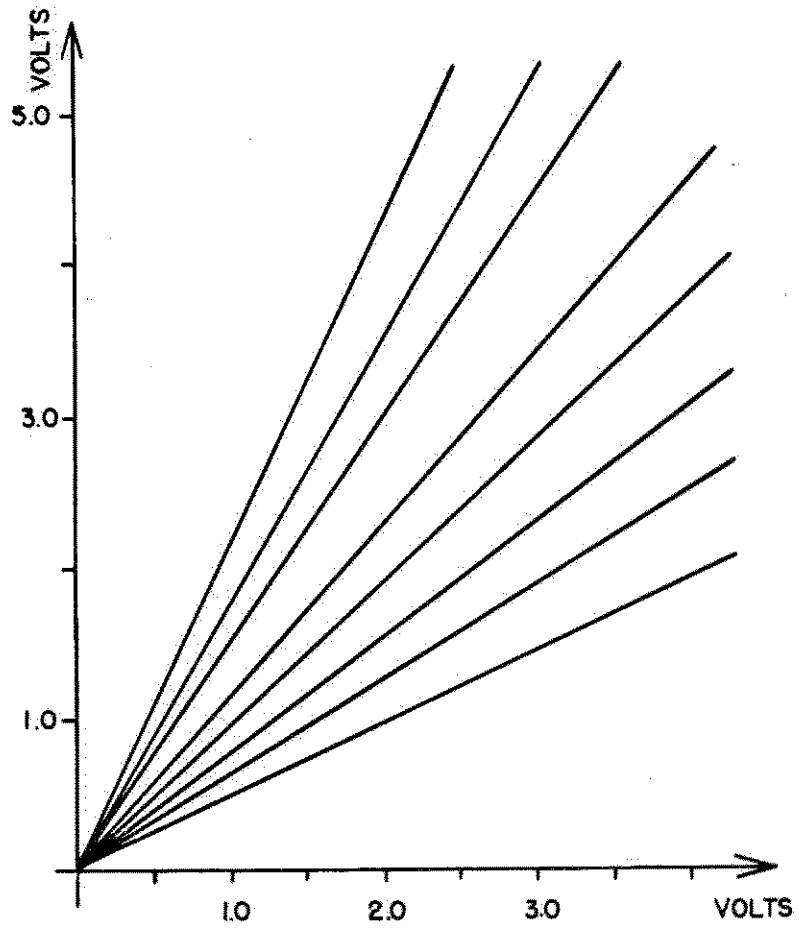


Fig. 1.15(b) - Variação do Constraste

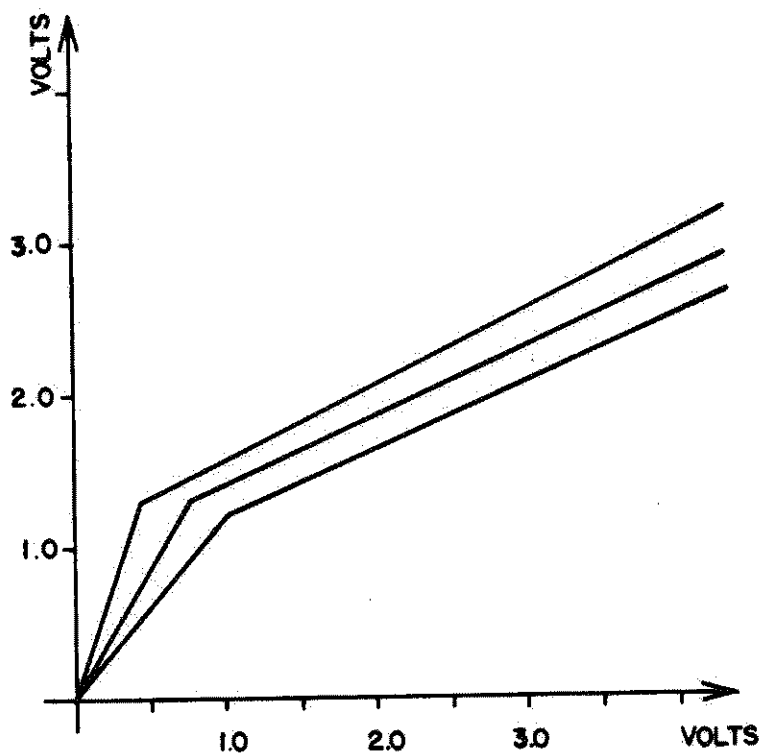


Fig. 1.15(c) - Variação do contraste de escuros

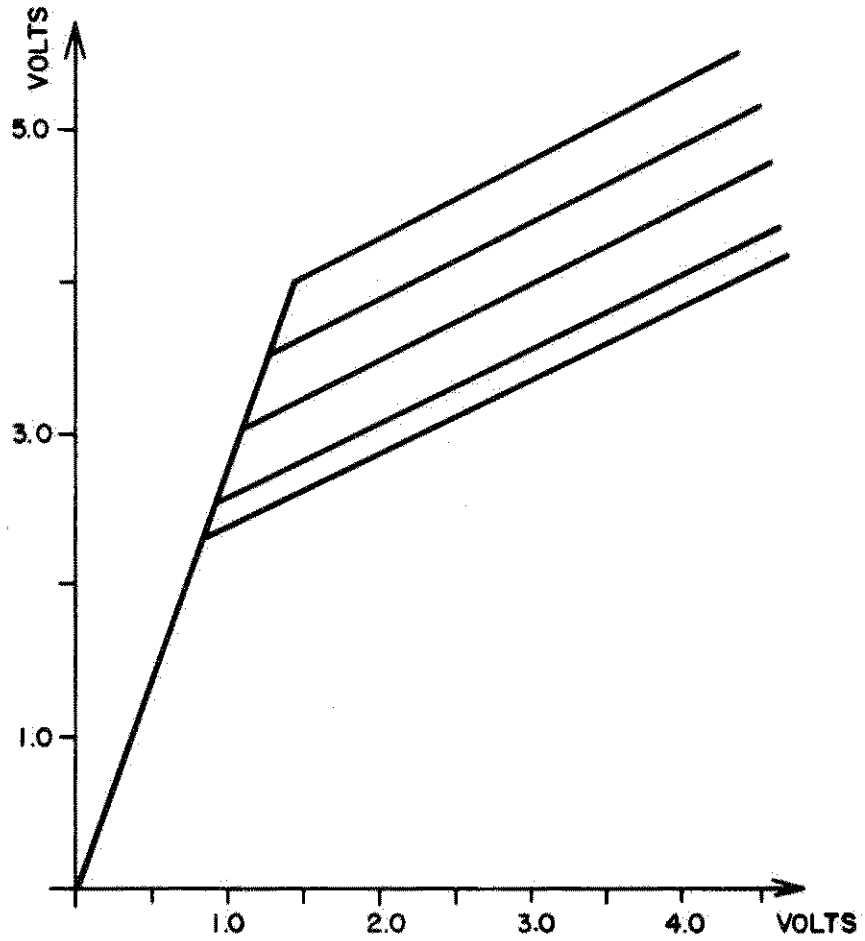


Fig. 1.15(d) - Variação do nível DC na região dos claros
- Variação da tensão de mudança de característica

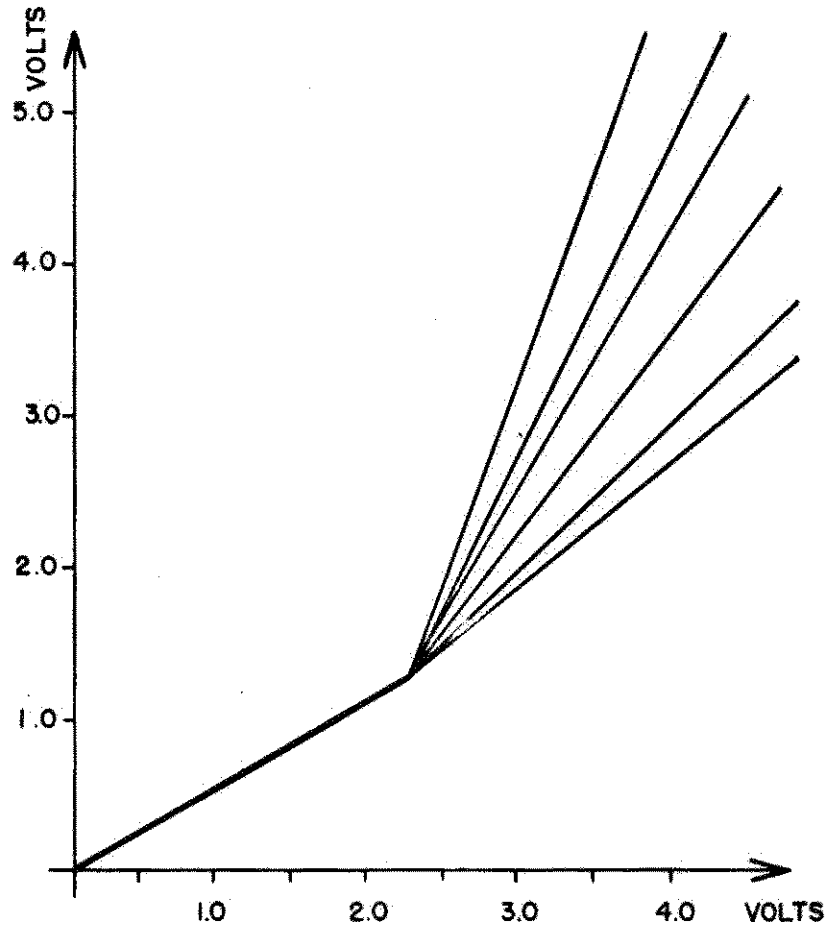


Fig. 1.15(e) - Variação do contraste de claros

CAPÍTULO II

PROCESSO DE DETEÇÃO DO SINAL - CURVAS DE DETEÇÃO

2.1 - Processamento do sinal

O sinal de que dispomos para a reprodução fotográfica é o que foi descrito no capítulo 1. Vamos analisar inicialmente alguns aspectos do processo envolvido na reprodução da imagem no sistema convencional de TV expondo, a seguir, o princípio que empregamos para reproduzir o sinal de vídeo. Sabe-se que a obtenção da imagem no cinescópio se fundamenta no fenômeno da emissão de luz por substâncias depositadas na tela, sob a incidência de elétrons a altas velocidades. A quantidade de energia luminosa emitida pela tela, num determinado tempo, é função do nº de elétrons que nela incidiram nesse tempo, ou seja, da carga que atingiu a tela nesse intervalo e, portanto, da densidade de corrente. Supomos, para facilidade de raciocínio, que o feixe eletrônico seja de secção transversal quadrada e dividimos a tela em m linhas e m colunas, de vês que a relação de aspecto é 1, constituindo m^2 elementos de tela. Consideramos que as linhas que constituem a varredura sejam contíguas, de modo que a secção transversal do feixe tenha suas dimensões exatamente coincidentes com o elemento de tela. O ângulo de deflexão máxima do feixe é, em geral, compatível com a curvatura da tela de modo que a distorção introduzida quando o feixe está fora do centro da tela é muito pequena em relação às demais dimensões envolvidas. No caso de tubos de osciloscópios o ângulo de deflexão é pequeno e a distância catodo-tela razoavelmente grande. Dêste modo a distorção é desprezível. Vamos tomar, para a análise, o elemento situado no centro da tela, o que não implicará em nenhuma restrição. De vês que a varredura se processa em tempo iguais, sendo f_q a frequência de repetição das imagens, o tempo T gasto pelo feixe para percorrer o elemento de tela considerado será $T = \frac{1}{f_q m^2}$. (ver ref. 31).

Sendo J a densidade de corrente do feixe eletrônico e ℓ o lado do elemento de tela a carga nêle incidente durante a passagem do feixe será $Q = J\ell^2 T$. Na verdade, o feixe inicia a varredura do elemento de tela, a uma velocidade \underline{v} constante e vai recobrindo-o gradualmente até as secções coincidirem passando em seguida a deixar o elemento de tela. A fig. 2.1 mostra como é feita a varredura. A função que dá a área que vai sendo coberta pelo feixe é:

$$A = 2\ell vt, \quad 0 < t < t/2$$

$$A = 2(\ell^2 - \ell vt), \quad \frac{T}{2} < t < T$$

A quantidade de carga que incidir no elemento de tela durante a passagem do feixe será, então, dada por

$$Q = \int_0^T J T A dt = J \ell^2 T \quad (1)$$

conforme havíamos dito.

Podemos considerar agora uma média, no tempo, da densidade de corrente obtendo $\bar{J}_v = J f_q T(2)$. Verificamos que $J f_q T = J \frac{1}{T} T + J \times T = \bar{J}_v \times T_q$ (ver referência 24). Então sob o ponto de vista de emissão luminosa, há uma correspondência entre o processo de se fazer incidir o feixe com densidade de corrente J durante o tempo T , de varredura do elemento de tela e o de fazer incidir, continuamente, durante o tempo de um quadro T_q o feixe, com densidade de corrente \bar{J}_v , sobre o elemento de tela considerado. Essa densidade de corrente \bar{J}_v corresponde àquela J_c que, durante o período de um quadro, incidisse continuamente sobre toda a tela. Na prática, porém, a equivalência acima é aproximada, mesmo trabalhando numa região de boa linearidade da curva de emissão luminosa em função da densidade de corrente, porque existem substâncias que apresentam diferenças na emissão de luz ao serem submetidas a uma incidência contínua de eletrons e a um processo de varredura.

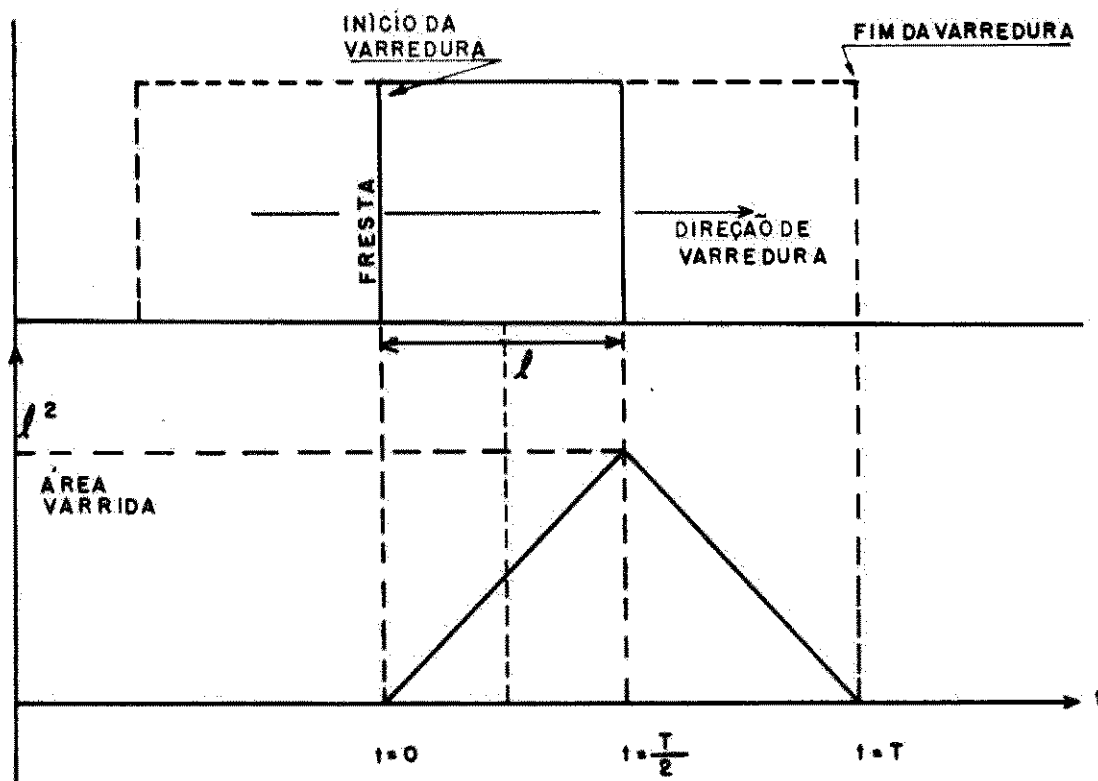


Fig. 2.1 - Varredura do elemento de tela

A fig. 2.2 nos mostra a intensidade luminosa emitida pelo fósforo silicato de zinco ativado com manganês ((1): $Zn_2SiO_4 - 0,015\% Mn_2SiO_4$) e pelo fósforo sulfeto de zinco ativado com prata ((2): $ZnS-0,010\% Ag$) em função da densidade média de corrente \bar{J}_v e da densidade de corrente total J_c respectivamente para o caso de incidência contínua 2.2(a) e incidência por varredura 2.2(b). Observamos no caso da fig. 2.2(a) que enquanto o fósforo de silicato de zinco se torna saturado para a mesma densidade de corrente que no caso de varredura, o fósforo sulfeto de zinco parece não sofrer qualquer saturação no intervalo de correntes em que se efetuaram as medidas. Já na fig. 2.2(b), caso de irradiação por varredura os dois fósforos saturam para aproximadamente a mesma densidade média de corrente. Vemos então que, quanto mais "contínua" a varredura menor a constância nas características de emissão para dadas substâncias (ver referência 31). No sistema convencional de TV a variação de emissão de luz pelo elemento de tela é obtido variando-se a densidade de corrente J, modulando-se a grade do cintoscópio com o sinal de vídeo detetado. Ao observarmos a expressão (1) vemos que uma outra possibilidade é variar o tempo T que o feixe leva para varrer o elemento de tela. Vamos supor, então que o sinal de vídeo passe a modular a amplitude da varredura, ou seja, as linhas vão ter agora largura dependente do valor do sinal de vídeo. Elimina-se a modulação de grade mantendo assim a densidade de corrente J etc.

Se selecionarmos agora uma linha vertical no centro da tela, de largura ℓ , recobrirmos toda a tela deixando apenas essa linha livre e passarmos a disparar os quadros com o pulso de sincronismo de linha verificamos que a cada quadro corresponde agora uma linha da imagem, constituída pela frequência de varredura horizontal modulada, em amplitude, pelo sinal de vídeo. Ficamos, então, sem varredura vertical. Se estamos interessados no registro fotográfico da informação no sinal de vídeo ao invés de ver imagens formadas na tela podemos deslo

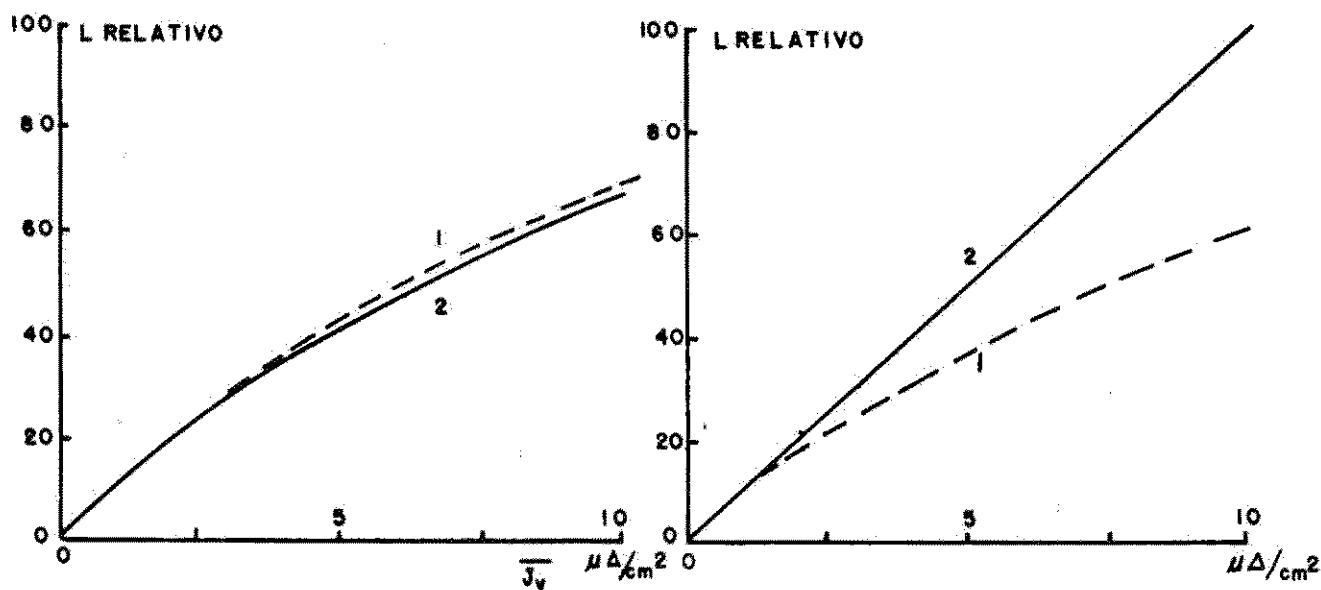


Fig. 2.2 - Emissão de luz sob condições de incidência contínua e varredura

car, mediante uso de mecanismo e sistema ótico adequados, um filme na frente da tela, com velocidade compatível com a da varredura, que agora tem por período o período de um quadro.

Como a varredura horizontal tem agora sua largura variando com a amplitude do sinal de vídeo mas seu período continua o mesmo, o tempo T com que cada elemento de tela na fresta vertical vai ser percorrido é proporcional ao sinal de vídeo naquêle instante. Estamos, agora, variando T na expressão (1) e mantendo J; em outras palavras, estamos variando a quantidade de carga que incide em cada elemento de tela na linha vertical em função do sinal do vídeo. Já vimos que ao variar a carga variará a luminosidade da tela.

Na fig. 2.3 esquematizamos o processo preconizado. Ao compararmos o sinal que estamos usando para formar a imagem no filme através da tela de TV com o sinal do satélite descrito no capítulo 1 notamos que: a frequência de varredura horizontal do sistema convencional de TV corresponde à subportadora de 2,4 KHz, a frequência dos quadros da TV corresponde à frequência de 4 Hz da varredura do sinal do satélite, ou seja cada linha da varredura do satélite está correspondendo qualitativamente a um quadro do sistema de TV. Na prática a frequência de varredura de TV é da ordem de 15 KHz e a frequência de quadros da ordem de 25 a 30 Hz, ou seja, da mesma ordem de grandeza, feita a correspondência descrita, que no caso do sinal do satélite. Baseando-nos no processo descrito reproduzimos o sinal do satélite injetando a sub-portadora de 2,4 KHz modulada no eixo y de um osciloscópio, centrando o sinal na tela e recobrimo-a com uma máscara deixando apenas uma fresta horizontal. A largura da fresta é obtida dividindo-se o comprimento da varredura horizontal pelo número de linhas.

No caso dos osciloscópios usados o comprimento L da varredura usado é da ordem de 10 cm portanto a largura da fresta é $L_f = \frac{10}{800} \approx 1,25 \times 10^{-2}$ cm. Com isso procuramos manter a mesma resolução horizontal e vertical.

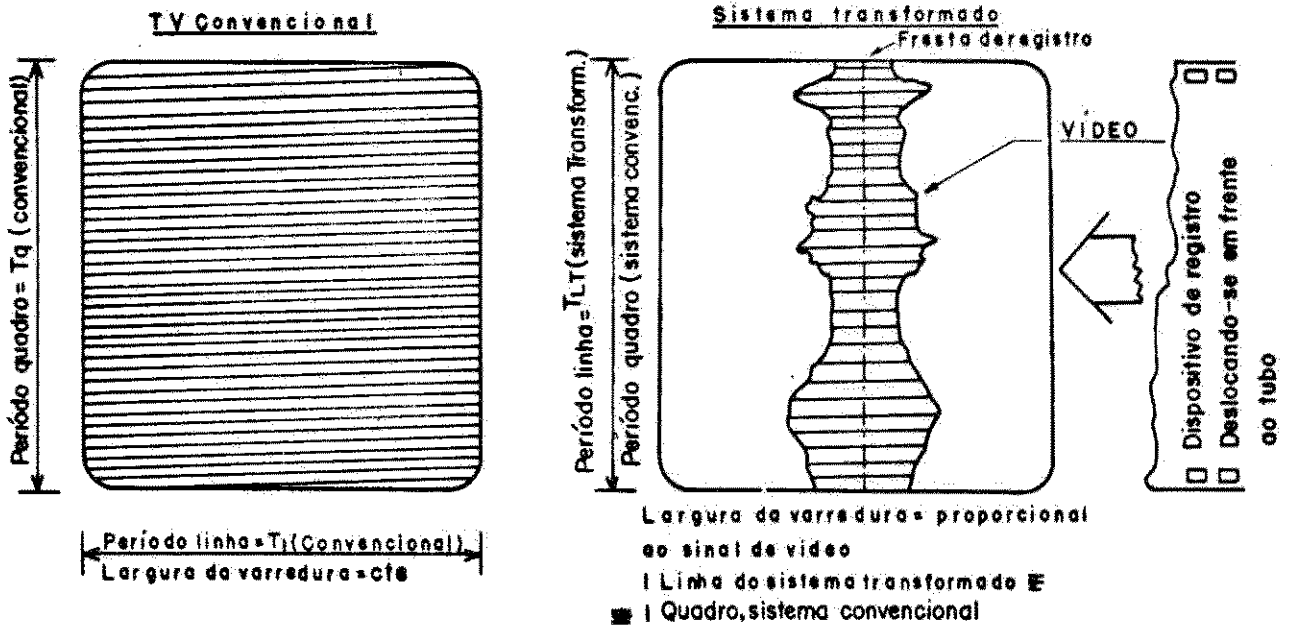


Fig. 2.3 - Princípio de composição da foto

Como a varredura é de 250 msec aparecerão na tela do osciloscópio durante cada varredura 600 ciclos da subportadora de 2,4 Hz passando 1200 vezes pela fresta, até completar uma varredura. O nosso elemento de tela, agora, tem altura ℓ e largura $\frac{2}{3} \ell$ o que não põe qualquer restrição à aplicação da análise anterior a este caso específico.

O fato de possuímos 1200 elementos de tela na linha horizontal, quando a foto é de 800 linhas nos garante a resolução. A sucessão de linhas horizontais é fotografada com um filme que se move a uma velocidade tal que as linhas são registradas contiguamente nele. Usa-se um sistema ótico com uma combinação de parâmetros tal que a relação de aspecto da foto seja mantida.

2.2 - Análise matemática do processo

O que estamos fazendo ao cobrir a tela utilizando apenas a parte central da subportadora de 2,4 KHz é uma amostragem do sinal. Como amostramos 1200 vezes os 2,4 KHz da subportadora durante uma varredura, a frequência de amostragem é $f_a = 4,8$ KHz. Sabemos que a máxima frequência teórica de modulação é 1,6 KHz portanto $f_a > 2 \times f$ modulação máxima e estamos satisfazendo o teorema da amostragem. Podemos decompor a velocidade de deslocamento do feixe nas direções horizontal e vertical. A componente vertical é $V_y = \frac{d}{dt} (A_0 \sin \omega_0 t)$ onde $\omega_0 = 2\pi \times 2,4$ rad/sec, e $V_x = \text{cte}$ = velocidade de varredura.

$$\text{Então } |\vec{V}_{\text{TOTAL}}| = \{ |\vec{V}_y|^2 + |\vec{V}_x|^2 \}^{1/2}.$$

$$c/ V_y = A_0 \omega_0 \cos \omega_0 t.$$

A velocidade máxima do sinal ocorrerá quando $|\cos \omega_0 t| = 1$, de vez que $V_x = \text{cte}$; caso em que $Y = A_0 \sin [\arccos(1)] = 0$. Então estamos amostrando o sinal na região de velocidade máxima.

Como temos 600 ciclos nos 10 cm de tela podemos dizer que $|\vec{V}_x| \ll |\vec{V}_y|_{\text{máx}}$ sempre que o sinal esteja acima de um dado nível que podemos considerar, no mínimo, igual a 10 larguras de fresta portanto 1,25 mm.

$$\text{Daí } V_{\text{TOT máx}} = V_{y \text{ máx}} = A_0 \omega_0 = 2\pi f_0 A_0 \quad (3) \quad (\text{ver ref.27})$$

Pelas dimensões relativas da fresta e amplitude mínima do sinal na tela podemos supor que a fresta é percorrida a velocidade cte durante cada passagem do feixe por ela e, ainda, que a passagem se faz na vertical à fresta. Nessas condições a passagem pela fresta se faz no tempo $T = \frac{\ell}{V_{\text{TOT máx}}} = \frac{\ell}{2\pi f A_0}$ (4) Se a amplitude mínima do sinal for de 0,25 cm portanto 20 vezes a largura da fresta, o tempo em que a fresta será percorrida

$$\text{é } T_{\text{máx}} = \frac{\ell}{2\pi f A_{\text{mínimo}}} = \frac{1,25 \times 10^{-2}}{2\pi \times 2,4 \times 10^3 \times 0,25} = 3,3 \times 10^{-6} \text{ sec}$$

Como a carga que incide na tela é diretamente proporcional ao tempo de passagem do feixe por ela, como mostra (1) e, por (4) esse tempo é inversamente proporcional à velocidade com que o feixe passa, há uma dependência inversa entre a quantidade de carga e a velocidade de passagem do feixe.

Fazemos então, uma análise das velocidades de cruzamento da fresta, de vez que, por (3) há uma relação direta entre essas velocidades e as amplitudes correspondentes do sinal na tela do osciloscópio. A subportadora de 2,4 KHz está modulada por um espectro de frequências se estendendo, teoricamente, de DC a 1,6 KHz.

O sinal modulado pode ser escrito como:

$$V_{\text{sinal}} = A_0 \text{ sen} \omega_0 t \left[1 + \sum_1^M m_k \text{ sen} \omega_k t \right] \quad (5)$$

onde A_0 = amplitude da portadora, sem modulação

ω_0 = pulsação da portadora

m_k = índice de modulação da k-ésima componente de modulação

ω_k = pulsação da k-ésima componente de modulação

A velocidade correspondente de sinal será, então:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \frac{d}{dt} \left\{ A_0 \operatorname{sen} \omega_0 t \left| 1 + \sum_1^M m_k \operatorname{sen} \omega_k t \right| \right\} = & (6) \\ &= \omega_0 A_0 \cos \omega_0 t \left| 1 + \sum_1^M m_k \operatorname{sen} \omega_k t \right| + A_0 \operatorname{sen} \omega_0 t \sum_1^M m_k \omega_k \cos \omega_k t = \\ &= \omega_0 A_0 \cos \omega_0 t + \omega_0 A_0 \cos \omega_0 t \sum_1^M m_k \operatorname{sen} \omega_k t + A_0 \operatorname{sen} \omega_0 t \sum_1^M \omega_k m_k \cos \omega_k t \end{aligned}$$

A rigor deveríamos incluir uma diferença de fase θ_k para cada componente de modulação porém, além da aleatoriedade de seu valor no sinal real ela não influi na análise que estamos efetuando.

A velocidade dada na expressão (6) é amostrada cada vez que o sinal atravessa a fresta. Observamos que, num mesmo ciclo o sinal passa 2 vezes pela fresta uma vez no sentido da parte superior da tela e, logo em seguida, no sentido contrário. Considerando esse fato usamos como função de amostragem uma função $p(t)$ que é um trem de pulsos de largura δ e período de repetição $\frac{T}{2}$ com valores alternados de +1 e -1. Note-se, no entanto, que o período da função é $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$, conforme está ilustrado na fig. 2.4

Essa função é descrita por:

$$p(t) = \begin{cases} 1 & \text{para } -\delta/2 \leq t \leq \delta/2 \\ 0 & \text{para } \delta/2 < t < T/2 - \delta/2 \\ -1 & \text{para } \frac{T}{2} - \frac{\delta}{2} < t < \delta/2 + T/2 \\ 0 & \text{para } \frac{T}{2} + \delta/2 \leq t \leq T - \delta/2 \end{cases}$$

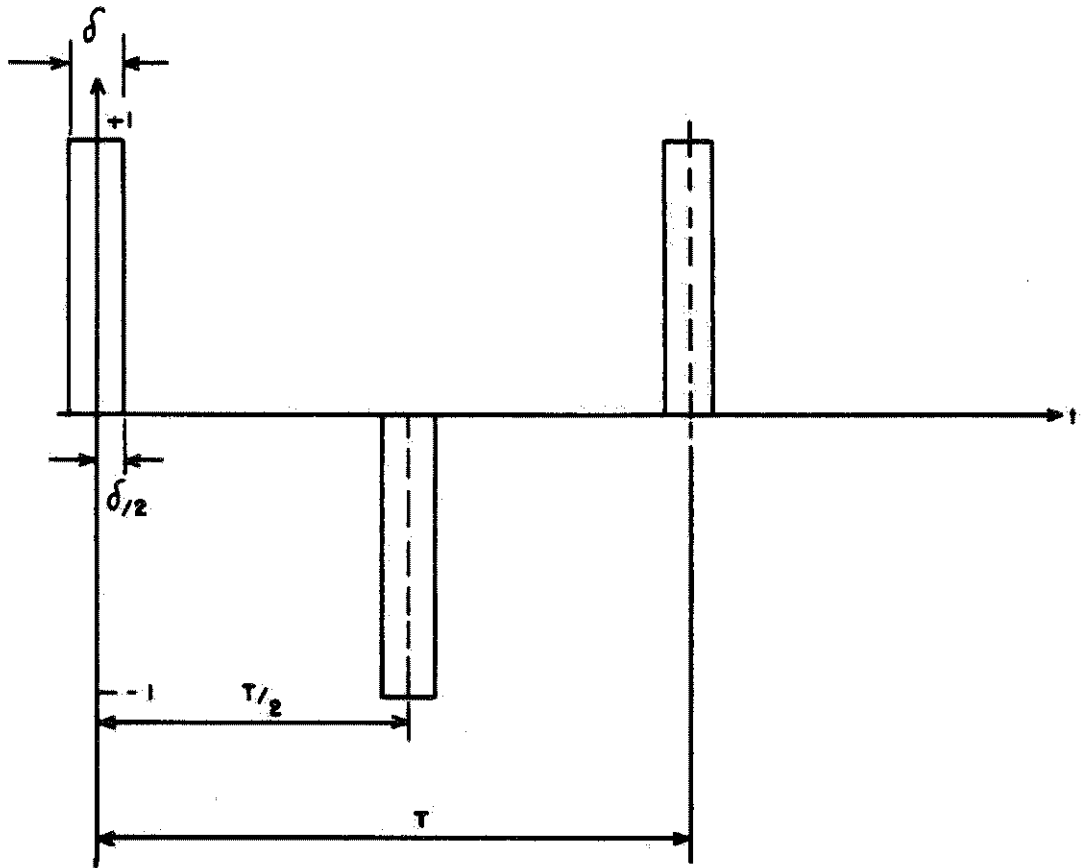


Fig. 2.4 - Função de amostragem

A representação da função considerada em série de Fourier será:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\delta/2}^{T-\delta/2} p(t) dt = \frac{1}{T} \left[\int_{-\delta/2}^{\delta/2} dt + 0 + \int_{T/2-\delta/2}^{T/2+\delta/2} (-1) dt + 0 \right] = 0$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\delta/2}^{T-\delta/2} p(t) \cos n\omega_0 t dt, \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{-\delta/2}^{T-\delta/2} p(t) \sin n\omega_0 t dt$$

com o que obtêm-se:

$$p(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\text{sen} \frac{n\pi}{2} \right) \frac{4\delta}{T} \left[\frac{\text{sen}(n\omega_0 \delta/2)}{n\omega_0 \delta/2} \right] \cos n\omega_0 t \quad (7)$$

A expressão da velocidade amostrada será, finalmente;

$$v_a(t) = \frac{d(V_{\text{sinal}})}{dt} \times p(t), \text{ ou seja:}$$

$$\begin{aligned} v_a(t) &= \omega_0 A_0 \cos \omega_0 t \sum_{n=0}^{\infty} \text{sen} \left(\frac{n\pi}{2} \right) \frac{4\delta}{T} \left[\frac{\text{sen}(n\omega_0 \delta/2)}{n\omega_0 \delta/2} \right] \cos n\omega_0 t + \\ &+ \omega_0 A_0 \cos \omega_0 t \left(\sum_{k=1}^M m_k \text{sen} \omega_k t \right) \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4\delta}{T} \left[\frac{\text{sen}(n\omega_0 \delta/2)}{n\omega_0 \delta/2} \right] \cos n\omega_0 t \right\} + \\ &+ A_0 \text{sen} \omega_0 t \left(\sum_{k=1}^M m_k \omega_k \cos \omega_k t \right) \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \text{sen} \left(\frac{n\pi}{2} \right) \frac{4\delta}{T} \left[\frac{\text{sen}(n\omega_0 \delta/2)}{n\omega_0 \delta/2} \right] \cos n\omega_0 t \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

Transformando os produtos das funções trigonométricas em somas podemos escrever:

$$v_a(t) = \frac{2\omega_0 A_0 \delta}{T} \sum_{n=0}^{\infty} \text{sen} \left(\frac{n\pi}{2} \right) \left[\frac{\text{sen}(n\omega_0 \delta/2)}{n\omega_0 \delta/2} \right] \left[\cos(n-1)\omega_0 t + \cos(n+1)\omega_0 t \right] +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\omega_0 A_0 \delta}{T} \sum_{k=1}^M \sum_{n=0}^{\infty} m_k \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi}{2} \right) \frac{\operatorname{sen}(n\omega_0 \delta/2)}{n\omega_0 \delta/2} \left[\operatorname{sen} \left[(n-1)\omega_0 + \omega_k \right] t - \right. \\
 & - \operatorname{sen} \left[(n-1)\omega_0 - \omega_k \right] t + \operatorname{sen} \left[(n+1)\omega_0 + \omega_k \right] t - \operatorname{sen} \left[(n+1)\omega_0 - \omega_k \right] t \left. \right] + \\
 & + \frac{A_0 \delta}{T} \sum_{k=1}^M \sum_{n=0}^{\infty} m_k \omega_k \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi}{2} \right) \frac{\operatorname{sen}(n\omega_0 \delta/2)}{n\omega_0 \delta/2} \left[-\operatorname{sen} \left[(n-1)\omega_0 + \omega_k \right] t - \right. \\
 & - \operatorname{sen} \left[(n-1)\omega_0 - \omega_k \right] t + \operatorname{sen} \left[(n+1)\omega_0 + \omega_k \right] t + \operatorname{sen} \left[(n+1)\omega_0 - \omega_k \right] t \left. \right]
 \end{aligned}$$

Escrevendo os 3 primeiros t\u00e9rmos da s\u00e9rie explicitamente e agrupando ob

temos:

$$\begin{aligned}
 V_a(t) = & \left(\frac{2\omega_0 A_0 \delta}{T} \frac{\operatorname{sen}(\omega_0 \delta/2)}{\omega_0 \delta/2} + \frac{2\omega_0 A_0 \delta}{T} \frac{\operatorname{sen}(\omega_0 \delta/2)}{\omega_0 \delta/2} \right. \\
 & \left. \sum_{k=1}^M m_k \operatorname{sen} \omega_k t + \frac{2\omega_0 A_0 \delta}{T} \left[\frac{\operatorname{sen}(\omega_0 \delta/2)}{\omega_0 \delta/2} - \frac{\operatorname{sen}(3\omega_0 \delta/2)}{3\omega_0 \delta/2} \right] \right) \\
 & \cdot \cos 2\omega_0 t + \sum_{k=1}^M \left\{ \left(\frac{\omega_0 A_0 \delta}{T} \left[\frac{\operatorname{sen}(\omega_0 \delta/2)}{\omega_0 \delta/2} - \frac{\operatorname{sen}(3\omega_0 \delta/2)}{3\omega_0 \delta/2} \right] + \right. \right. \\
 & + \frac{A_0 \delta}{T} \left[\frac{\operatorname{sen}(\omega_0 \delta/2)}{\omega_0 \delta/2} + \frac{\operatorname{sen}(3\omega_0 \delta/2)}{3\omega_0 \delta/2} \right] \omega_k \left. \right\} m_k \operatorname{sen} \left[(2\omega_0 + \omega_k) t \right] - \\
 & - \left(\frac{\omega_0 A_0 \delta}{T} \left[\frac{\operatorname{sen}(\omega_0 \delta/2)}{\omega_0 \delta/2} - \frac{\operatorname{sen}(3\omega_0 \delta/2)}{3\omega_0 \delta/2} \right] - \frac{A_0 \delta}{T} \left[\frac{\operatorname{sen}(\omega_0 \delta/2)}{\omega_0 \delta/2} \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{\operatorname{sen}(3\omega_0 \delta/2)}{3\omega_0 \delta/2} \right] \omega_k \right\} m_k \operatorname{sen} \left[(2\omega_0 - \omega_k) t \right] - \\
 & - \frac{2\omega_0 A_0 \delta}{T} \left[\frac{\operatorname{sen}(3\omega_0 \delta/2)}{3\omega_0 \delta/2} - \frac{\operatorname{sen}(5\omega_0 \delta/2)}{5\omega_0 \delta/2} \right] \cos 4\omega_0 t \\
 & - \sum_{k=1}^M \left\{ \left(\frac{\omega_0 A_0 \delta}{T} \left[\frac{\operatorname{sen}(3\omega_0 \delta/2)}{3\omega_0 \delta/2} - \frac{\operatorname{sen}(5\omega_0 \delta/2)}{5\omega_0 \delta/2} \right] + \right. \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{A_0 \delta}{T} \left[\frac{\text{sen}(3\omega_0 \delta/2)}{3\omega_0 \delta/2} + \frac{\text{sen}(5\omega_0 \delta/2)}{5\omega_0 \delta/2} \right] \omega_k) m_k \text{sen}[(4\omega_0 + \omega_k) t] - \\
 & - \left(\frac{\omega_0 A_0 \delta}{T} \left[\frac{\text{sen}(3\omega_0 \delta/2)}{3\omega_0 \delta/2} - \frac{\text{sen}(5\omega_0 \delta/2)}{5\omega_0 \delta/2} \right] - \right. \\
 & \left. - \frac{A_0 \delta}{T} \left[\frac{\text{sen}(3\omega_0 \delta/2)}{3\omega_0 \delta/2} + \frac{\text{sen}(5\omega_0 \delta/2)}{5\omega_0 \delta/2} \right] \omega_k) m_k \text{sen}[(4\omega_0 - \omega_k) t] + \dots \right)
 \end{aligned}$$

Tomando a Transformada de Fourier de $V_a(t)$, ou seja obtendo $V_a(\omega)$ vem:

$$\begin{aligned}
 V_a(\omega) &= 2 \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\omega_0 A_0 \delta}{T} \frac{\text{sen}(\omega_0 \delta/2)}{\omega_0 \delta/2} \delta(\omega) + j 2 \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\omega_0 A_0 \delta}{T} \left[\frac{\text{sen}(\omega_0 \delta/2)}{\omega_0 \delta/2} \right] \times \\
 & \times \sum_{k=1}^M m_k \left[\delta(\omega + \omega_k) - \delta(\omega - \omega_k) \right] + 2 \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\omega_0 A_0 \delta}{T} \left[\frac{\text{sen}(\omega_0 \delta/2)}{\omega_0 \delta/2} - \right. \\
 & \left. - \frac{\text{sen}(3\omega_0 \delta/2)}{3\omega_0 \delta/2} \right] \left[\delta(\omega + 2\omega_0) + \delta(\omega - 2\omega_0) \right] + \\
 & + j \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{k=1}^M \left\{ \left(\frac{\omega_0 A_0 \delta}{T} \left[\frac{\text{sen}(\omega_0 \delta/2)}{\omega_0 \delta/2} - \frac{\text{sen}(3\omega_0 \delta/2)}{3\omega_0 \delta/2} \right] + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{A_0 \delta}{T} \left[\frac{\text{sen}(\omega_0 \delta/2)}{\omega_0 \delta/2} + \frac{\text{sen}(3\omega_0 \delta/2)}{3\omega_0 \delta/2} \right] \omega_k) m_k \times \right. \\
 & \left. \times \left(\delta \left[\omega + (2\omega_0 + \omega_k) \right] - \delta \left[\omega - (2\omega_0 - \omega_k) \right] - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \left(\frac{\omega_0 A_0 \delta}{T} \left[\frac{\text{sen}(\omega_0 \delta/2)}{\omega_0 \delta/2} - \frac{\text{sen}(3\omega_0 \delta/2)}{3\omega_0 \delta/2} \right] - \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{A_0 \delta}{T} \left[\frac{\text{sen}(\omega_0 \delta/2)}{\omega_0 \delta/2} + \frac{\text{sen}(3\omega_0 \delta/2)}{3\omega_0 \delta/2} \right] \omega_k) m_k \right. \right. \\
 & \left. \left. \left[\delta \left[\omega + (2\omega_0 - \omega_k) \right] - \delta \left[\omega - (2\omega_0 + \omega_k) \right] \right] \right) \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - 2 \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\omega_0 A_0 \delta}{T} \left[\frac{\text{sen}(3\omega_0 \delta/2)}{3\omega_0 \delta/2} - \frac{\text{sen}(5\omega_0 \delta/2)}{5\omega_0 \delta/2} \right] \cdot \\
 & \times \left[\delta(\omega + 4\omega_0) + \delta(\omega - 4\omega_0) \right] - j \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{k=1}^M \left(\frac{\omega_0 A_0 \delta}{T} \cdot \right. \\
 & \times \left[\frac{\text{sen}(3\omega_0 \delta/2)}{3\omega_0 \delta/2} - \frac{\text{sen}(5\omega_0 \delta/2)}{5\omega_0 \delta/2} \right] + \frac{A_0 \delta}{T} \left[\frac{\text{sen}(3\omega_0 \delta/2)}{3\omega_0 \delta/2} + \right. \\
 & \left. + \frac{\text{sen}(5\omega_0 \delta/2)}{5\omega_0 \delta/2} \right] \omega_k) m_k \left(\delta \left[\omega + (4\omega_0 + \omega_k) \right] - \delta \left[\omega - (4\omega_0 + \omega_k) \right] \right) - \\
 & - \left(\frac{\omega_0 A_0 \delta}{T} \left[\frac{\text{sen}(3\omega_0 \delta/2)}{3\omega_0 \delta/2} - \frac{\text{sen}(5\omega_0 \delta/2)}{5\omega_0 \delta/2} \right] - \right. \\
 & \left. - \frac{A_0 \delta}{T} \left[\frac{\text{sen}(3\omega_0 \delta/2)}{3\omega_0 \delta/2} + \frac{\text{sen}(5\omega_0 \delta/2)}{5\omega_0 \delta/2} \right] \omega_k) m_k \left(\right. \\
 & \left. \left(\delta \left[\omega + (4\omega_0 - \omega_k) \right] - \delta \left[\omega - (4\omega_0 - \omega_k) \right] \right) + \dots + \dots \right) \} \quad \text{8(a)}
 \end{aligned}$$

Esta expressão nos dá as componentes da velocidade, em frequência. O espectro de frequência está representado na figura 2.5. A verificação dos resultados pode ser feita com facilidade através da resolução gráfica pelo emprego das propriedades das transformadas de Fourier e convolução.

Deste modo podemos escrever:

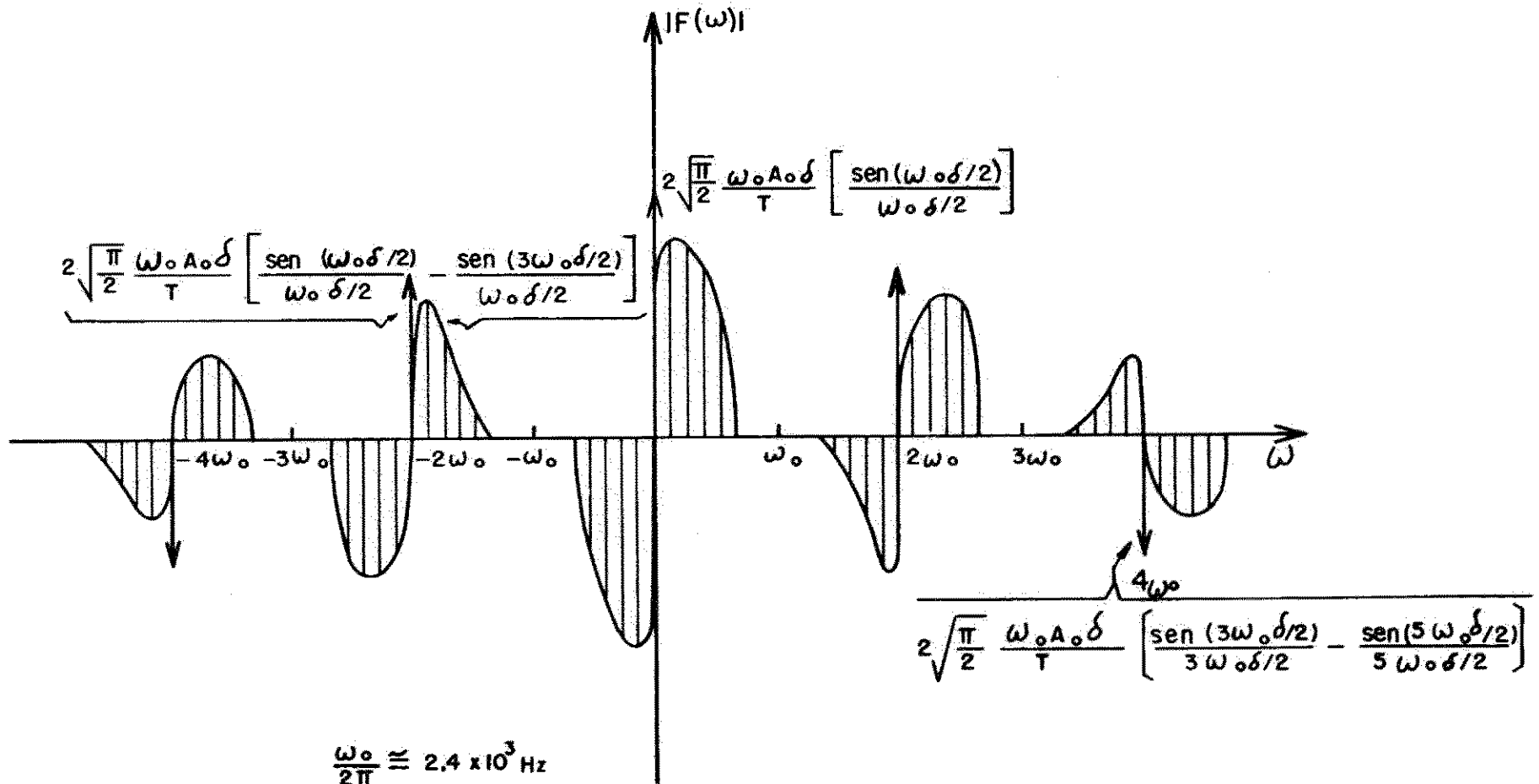
$$\begin{aligned}
 F(\omega) = & F(\omega_0 A_0 \cos \omega t) * F(p(t)) + F(\omega_0 A_0 \cos \omega_0 t) * \left[F\left(\sum_{k=1}^M m_k \text{sen} \omega_k t \right) * F(p(t)) \right] + \\
 & + F(A_0 \text{sen} \omega_0 t) * \left[F\left(\sum_{k=1}^M m_k \omega_k \cos \omega_k t \right) * F(p(t)) \right]
 \end{aligned}$$

onde o símbolo (*) indica convolução entre as funções e

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (\text{transformada de Fourier})$$

(ver referências: 17, 18, 19 e 26)

Fig. 2.5 - Espectro de $V_a(\omega)$



2.3 - Considerações sobre os processos físicos envolvidos na luminescência

No caso de televisão e osciloscópio utilizam-se as propriedades de luminescência de certas substâncias, sob o bombardeio de elétrons.

O mecanismo que redundará na luminescência dos cristais que constituem a tela dos tubos de raios catódicos varia para substâncias diferentes e para composições diversas de uma dada substância.

Exponhamos de maneira simplificada os aspectos básicos desse mecanismo. Consideremos os níveis de energia de um cristal luminescente conforme representados na figura 2.6 (ver referências 28 a 36).

O nível básico de energia é o nível 0, e os níveis 1 e 2 são estados excitados. Ao incidir sobre o cristal um feixe de elétrons com densidade de corrente J , um dado número n de elétrons do reticulado do cristal são excitados por segundo e por unidade de volume, sendo que, para as densidades normais de corrente pode-se escrever que $I = KJ$. Podem ocorrer, basicamente dois processos: 1) os elétrons excitados transferem parte de sua energia, ao retornar ao nível básico, a átomos ou grupos de átomos presentes em pequena quantidade no cristal e chamados de centros ativadores (impurezas), que se tornam excitados.

Esses centros ativadores, ao retornarem ao nível original de energia emitem luz. 2) os elétrons do reticulado, ao serem excitados, abandonam seus átomos sede, deixando íons. Há então um deslocamento de elétrons e de íons pelo cristal. Quando um elétron livre encontra um íon, nas proximidades de um centro ativador, há uma recombinação que fornece uma parte da sua energia ao centro ativador. Esse centro fica excitado e, ao voltar ao nível original emite luz. O primeiro processo é chamado monomolecular e o segundo bimolecular. Vamos analisar apenas o caso do processo monomolecular, em que as probabilidades de transição são proporcionais à 1ª potência das concentrações nos níveis de e

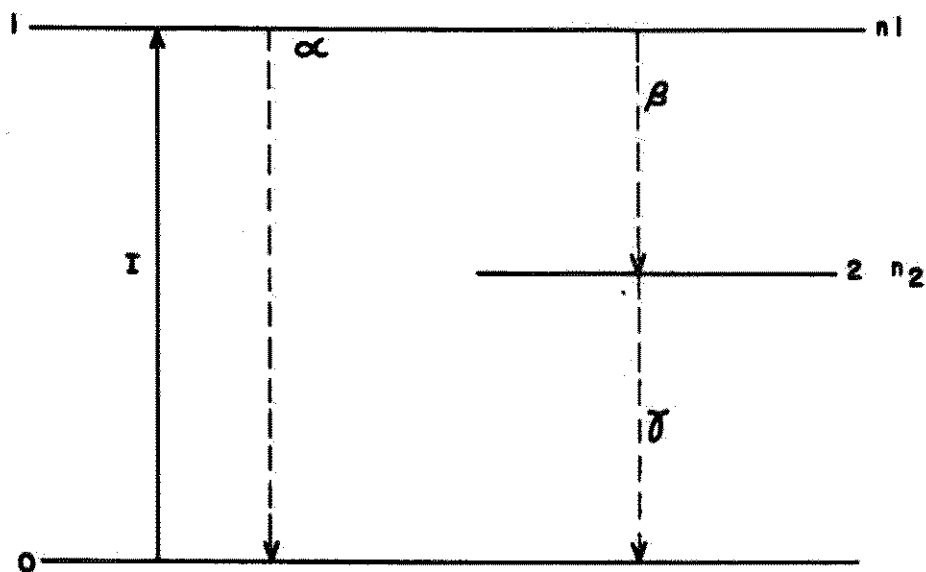


Fig. 2.6 - Níveis de energia no cristal

nergia, por ser mais simples e suficiente dentro das limitações deste trabalho. Considerando a figura 2.6, observamos que o sistema pode passar do nível 1 ao nível 0 sem que ocorra radiação. A probabilidade dessa transição no intervalo de tempo dt chamaremos αdt . Pode ocorrer também que o sistema passe do nível 1 ao 2, quando parte da energia é entregue a um centro ativador que se torna, então, excitado; a probabilidade de tal transição ocorrer no intervalo de tempo dt é proporcional ao nº de centros ativadores não excitados e pode ser representada por $\beta(N-n_2)$ com $N=n_0$ total de centros ativadores por unidade de volume, n_2 o nº de centros excitados por unidade de volume e β uma constante de proporcionalidade. O centro ativador excitado, ao voltar ao seu estado original emite luz, sendo a probabilidade dessa transição, no intervalo de tempo dt igual a γdt . Desprezamos o caso em que um centro ativador é diretamente excitado por um elétron incidente porque essa probabilidade é muito baixa. Se a densidade de corrente não for muito elevada $n_2 \ll N$ portanto podemos por $\beta(N-n_2) = \beta N$. Na prática, para os fósforos normalmente utilizados para osciloscópios α e βN são da ordem de, no mínimo 10^8 sec^{-1} e a relação $\frac{\alpha}{\beta N} > 3$. A constante γ pode variar consideravelmente para fósforos diferentes; em média seu valor vai de 10^2 a 10^6 sec^{-1} , o recíproco dessa constante é o tempo médio de vida de um centro ativador excitado denominado τ que varia, então de 10^{-6} a 10^{-2} sec .

Se a ocupação do nível de energia 1 é n_1 , como a do nível 2 já designamos por n_2 , as variações de n_1 e n_2 com o tempo são dadas por:

$$\frac{dn_1}{dt} = I - \alpha n_1 - \beta n_1 (N - n_2) \quad (9)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = \beta n_1 (N - n_2) - \gamma n_2 \quad (10)$$

Se cada centro ativador excitado emite luz ao retornar ao nível 0 de energia o termo γn_2 em (10) representa o nº de quanta de luz emitidos por segundo e

por unidade de volume. O menor tempo de vida médio para os fósforos utilizados nos osciloscópios que se prestaram à reprodução de fotos é da ordem de $2,5 \times 10^{-5}$ sec. Conforme obtivemos em (4) o máximo de tempo de varredura para o elemento de tela na fresta é de aproximadamente $3,3 \times 10^{-6}$ sec de sorte que $T_{\max} \approx 0,1\tau$. Então não é atingido um estado estacionário no fósforo, durante a passagem do feixe em qualquer caso, de modo que devemos examinar a variação de n_2 com o tempo. Se desprezamos n_2 em face de N na equação (9) podemos escrever:

$$\frac{dn_1}{dt} = I - (\alpha + \beta N) n_1 \text{ para a qual}$$

$$n_1 = \frac{I}{\alpha + \beta N} (1 - e^{-(\alpha + \beta N)t}) \quad (11)$$

Lembrando que α e βN são da ordem de 10^8 sec^{-1} vemos que n_1 atinge um valor estacionário num tempo bastante curto, ou seja, da ordem de 10^{-8} sec de modo que nesse curto período o nível 2 estará com poucos centros ativadores excitados e a aproximação feita em (9) ($N \gg n_2$) é válida. Com esse valor estacionário de n_1 em (10) obtemos:

$$\frac{dn_2}{dt} = I n_0 - \left(\frac{I n_0}{N} + \gamma \right) n_2 \quad (12) \text{ onde } n_0 = \frac{\beta N}{\alpha + \beta N}$$

para a qual:

$$n_2 = \frac{I n_0}{\frac{I n_0}{N} + \gamma} \left(1 - e^{-\left(\frac{I n_0}{N} + \gamma \right) t} \right) \quad (13)$$

que é a relação procurada entre n_2 e t . Quando o feixe acabar de varrer o elemento de tela considerado, na fresta, ou seja, quando $t=T$ teremos $n_2(T) \equiv$ número de centros ativadores excitados por unidade de volume durante a passagem do feixe. Esses centros, ao voltarem à situação não excitada emitirão um quantum de luz cada, de modo que o nº total de quanta emitidos por passagem do feixe pela

fresta é $n_2(T) + \gamma \cdot \int_0^T n_2(t) dt$ onde $\gamma \cdot \int_0^T n_2(t) dt$

representa o nº de quanta emitidos no intervalo de tempo $0 < t < T$. Mas $\gamma \int_0^T n_2(t) dt <$

$< \gamma T n_2(T)$ e, de vez que $(\gamma T)_{\text{máx}} = 1,32 \times 10^{-1}$ e $(\gamma T)_{\text{máx}} = 0,1$ então podemos desprezar o termo da integral e $L_{\text{total}} \approx n_2(T)$. Podemos escrever, como uma média por unidade de volume no tempo, o nº de quanta emitidos por unidade de tempo e por unidade de volume:

$$\overline{L}_V = f_q N_2(T) \approx \frac{f n_0 I}{\gamma + \frac{n_0 I}{N}} \left[1 - e^{-\left(\frac{n_0 I}{N} + \gamma\right) T} \right] \quad (\text{ver ref.31}) \quad (14)$$

usando a aproximação $e^{-x} \approx 1 - x + \frac{x^2}{2!} - \frac{x^3}{3!} + \dots$

vem:

$$\overline{L}_V \approx \frac{f n_0 I}{\gamma + \frac{n_0 I}{N}} \left[\left(\frac{n_0 I}{N} + \gamma\right) T - \frac{\left(\frac{n_0 I}{N} + \gamma\right)^2 T^2}{2!} + \dots \right] \quad (15)$$

Já vimos que $(\gamma T)_{\text{máx}} \approx 0,1$; para cargas normais (J_{normais})

$\frac{n_0 I}{N} \ll 1$ portanto podemos por:

$$\overline{L}_V \approx K_1 T \quad (16)$$

mas, por (4) $T = \frac{\ell}{2\pi f A}$ portanto $\overline{L}_V \approx \frac{K_2}{A}$ (17)

Chegamos, então, a uma expressão que relaciona a intensidade luminosa da tela com a amplitude do sinal, correspondente à passagem pelo elemento de tela em questão.

2.4 - Medidas de luminosidade emitida por telas de osciloscópios

Foram efetuadas medidas para levantamento das curvas de luminosidade em função da amplitude do sinal na tela.

O método de medida está descrito a seguir. Foram usados quatro osciloscópios com fósforos diferentes, a saber: HP-130C com fósforo P31, HP-132A com fósforo P2, HP-120B com fósforo P-11 e Heathkit 10-10 com fósforo P1. Nos osciloscópios HP-120B e Heathkit mod. 10-10 foram feitas medidas diretas no tubo, retirados o filtro e o reticulado que eram externos; nos demais isso não foi possível devido ao filtro e reticulado serem parte integrante do tubo e não poderem ser retirados. O aparelho para medida foi um espectroradiômetro ISCO, modelo SR série 1401 D que foi previamente calibrado com uma lâmpada padrão ajustada em fábrica e já em montagem própria constituindo o CALIBRADOR DE ESPECTRORADIÔMETRO ISCO MODELO SRC SÉRIE 160 1E. Cada elemento que constitui o fósforo da tela emite luz em aproximadamente todas as direções porém estamos interessados apenas na direção bastante próxima à normal à tela (ver ref.27 e 29). Por esse motivo utilizou-se a ponta de prova remota do espectroradiômetro, de características bastante direcionais.

A ponta de prova foi colocada diretamente sobre a tela, que é plana, de modo que, o que foi medido é o brilho da tela, ou seja, a intensidade luminosa por unidade de área da tela. As unidades em que são dados as medidas pelo espectroradiômetro são microwatts por cm^2 por milimicron de modo que mede-se a densidade espectral de potência. Para cada tela ajustou-se o controle de comprimento de onda para o máximo de emissão do fósforo correspondente, para melhor precisão, a fig.2.7 representa o que foi dito. Se, para cada medida fizermos uma varredura em comprimento de onda obteremos a curva espectral da tela; calculando a área embaixo da curva obtemos a densidade total de potência emitida. No entanto as unidades de energia luminosa, usadas em fotometria, levam em conta a curva de

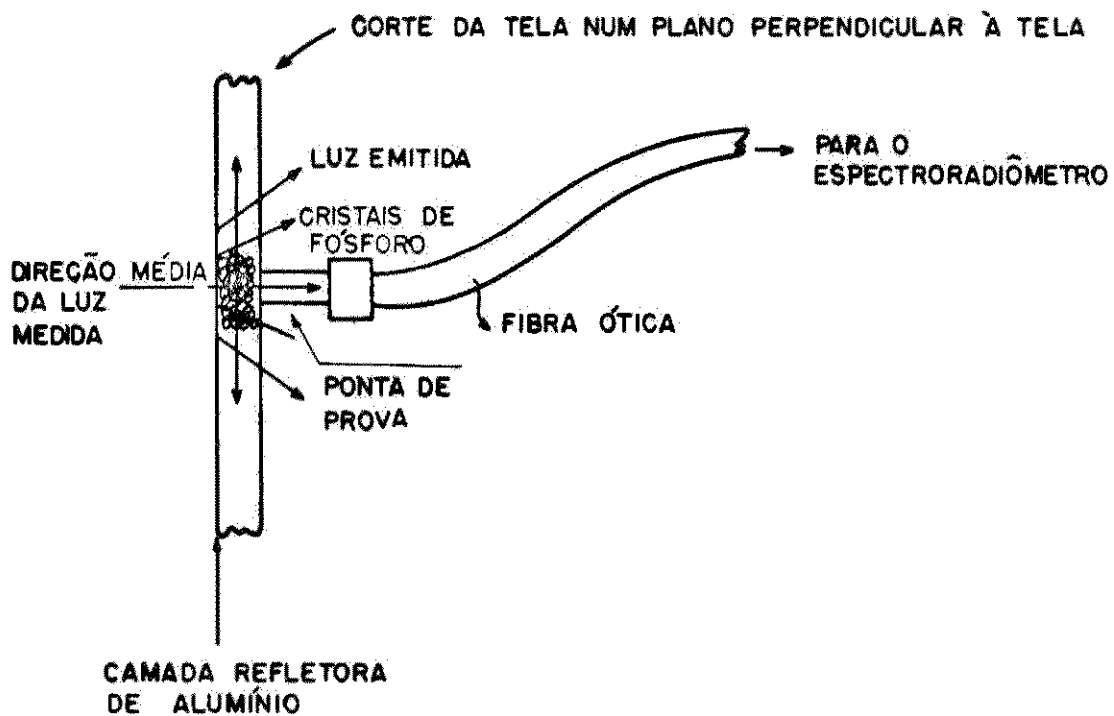


Fig. 2.7 - Processo de medida da luz

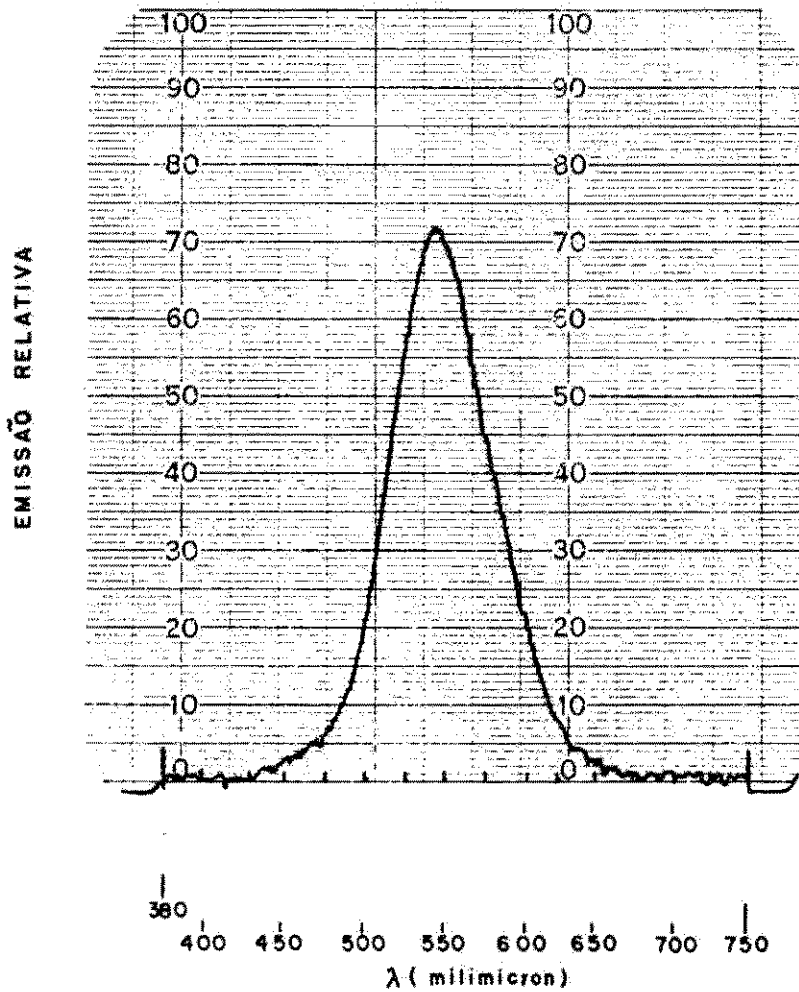


Figura 2.8 - Curva de emissão espectral para o fósforo P₂ utilizado

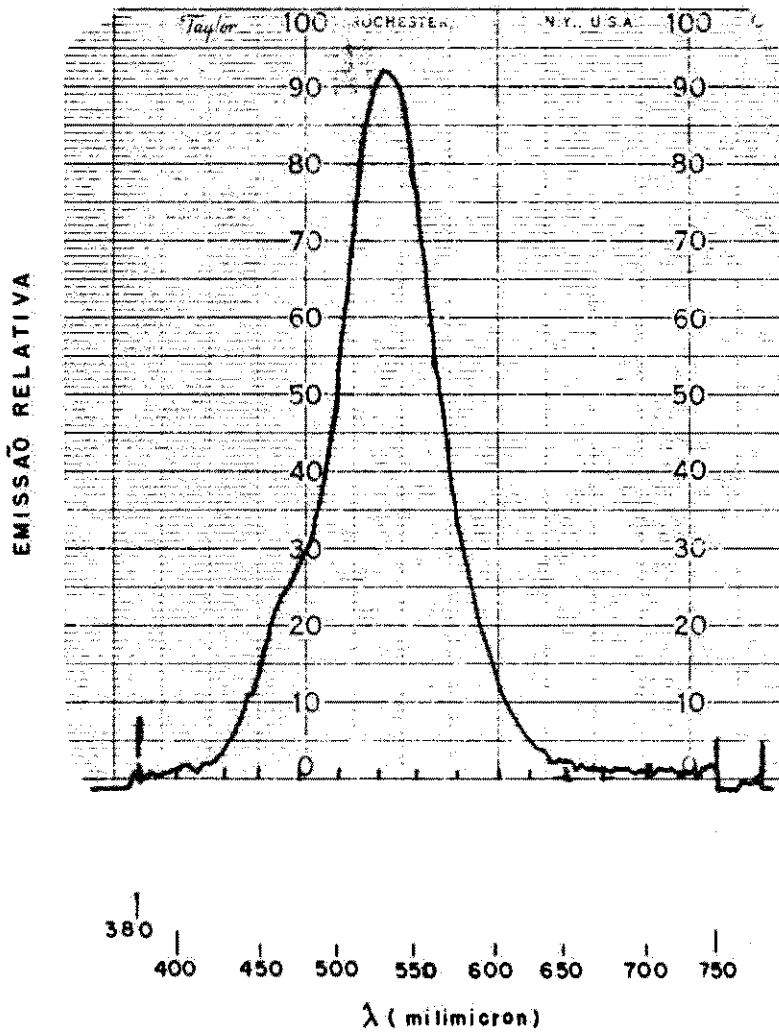


Fig. 2.9 - Curva de emissão espectral para o fósforo P31 utilizado

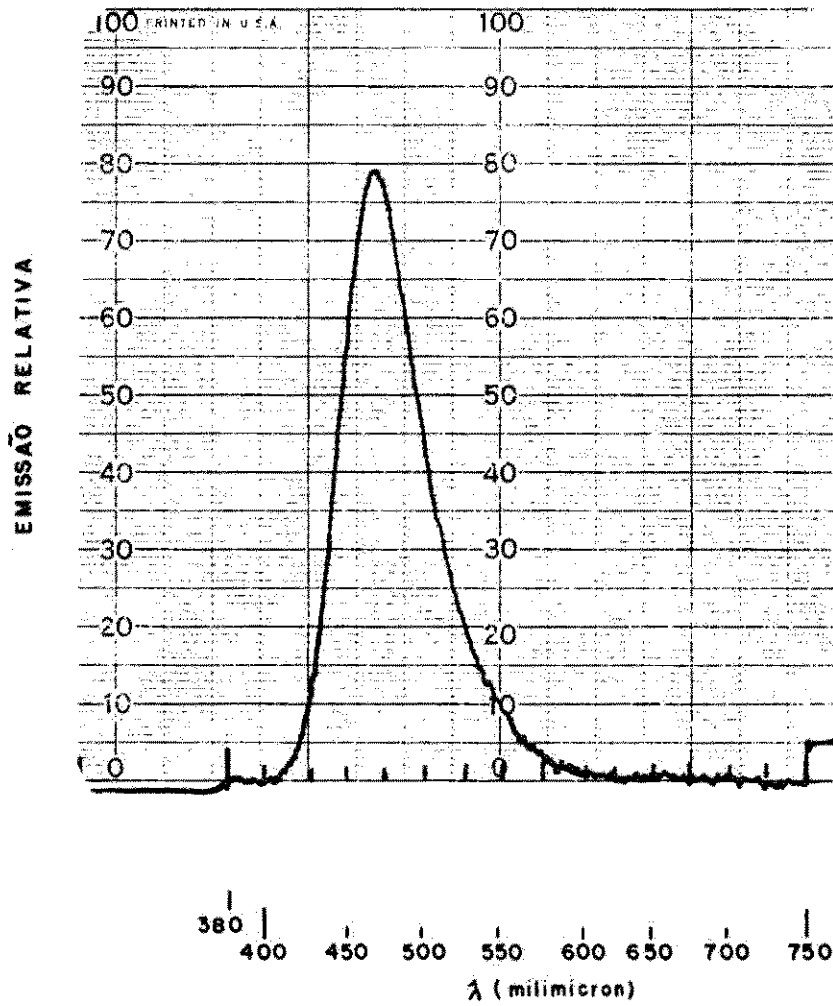


Fig.2.10 - Curva de emissão espectral para o fósforo P11 utilizado

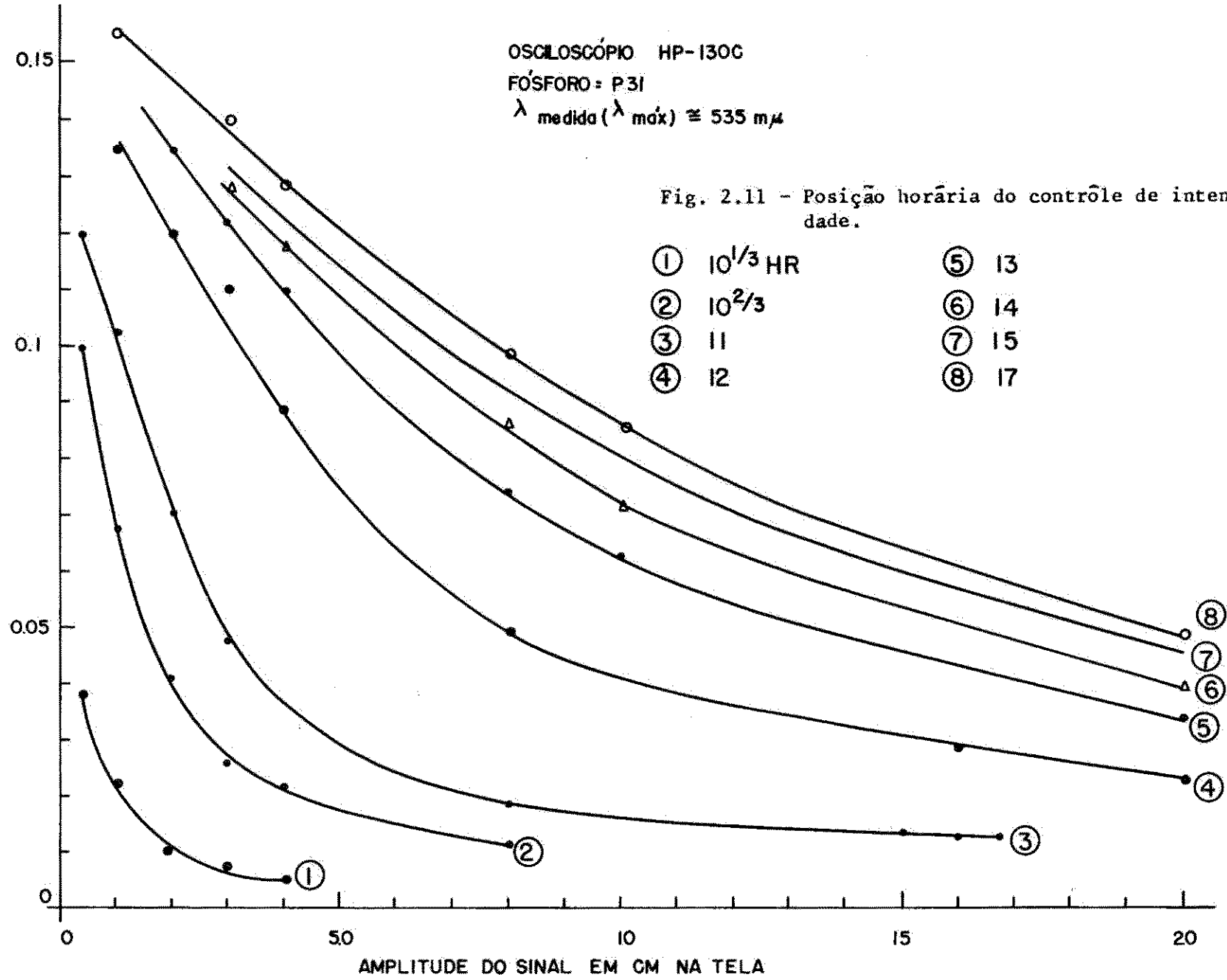
Foram obtidas com o sinal já especificado, pela utilização de uma varredura automática acoplada ao espectrorradiômetro e um registrador de papel ISCO modelo SRR série 460 1B.

A seguir foram feitas as correções para a curva de resposta da vista calculada a área embaixo da curva. Para isso foram considerados intervalos de 25 μ para o comprimento de onda.

Dêste modo obtemos o fluxo de energia luminosa emitida por unidade de área da tela. As figuras 2.11, 2.12, 2.13, e 2.14 nos dão as famílias de curvas de luminosidade em função da amplitude do sinal na tela, para diferentes posições do controle de intensidade, registrados como posição horária.

No caso da tela P31 (HP130C) observamos que ocorre saturação para voltagens de drive correspondentes à posição (4) para mais e, para as outras curvas, para amplitudes de sinal da ordem de 1cm para menos (fig.2.11). Para a tela com fósforo P2 (HP132A) há aparentemente pouca saturação para os valores da voltagem de drive usados, acima dos 2 cm de amplitude do sinal. A equação das curvas, neste caso, excluída aquela para a menor voltagem de drive seguem melhor a expressão $L = \frac{K}{A} + L_0$ onde $L_0 = 0.01\mu W.cm^{-2}.\mu^{-1}$. (fig.2.13) observou-se que esse fato ocorreu devido a uma luminosidade de fundo. O osciloscópio usado é de feixe duplo e o controle de balanço de luminosidade entre os dois canais não opera eficientemente. Com a tela P11 (HP120B) houve muito pouca saturação para todas as voltagens de drive, com exceção da última na posição de máximo de intensidade e para sinais abaixo de 1 cm. Para a posição 12 HR. da voltagem de drive mesmo abaixo de 1 cm praticamente não houve saturação e para a posição 13 HR a saturação foi pequena (fig.2.14). Para a tela P1 (Heathkit 10-10) para o controle de intensidade no máximo, não houve saturação e a expressão $L = \frac{K}{A}$ foi confirmada. As análises das curvas nos mostra, então que as telas P1 e P11 são as

FATOR DE CONVERSÃO P/ METROS - CANDLE-SEG: $3,3 \times 10^2$
 FATOR DE CONVERSÃO P/ ERGS/CM²: 4,84
 DENSIDADE ESPECTRAL DE POTENCIA: $\mu\text{Wcm}^{-2}\text{m}\mu^{-1}$
 FATOR DE CORREÇÃO: 4,3



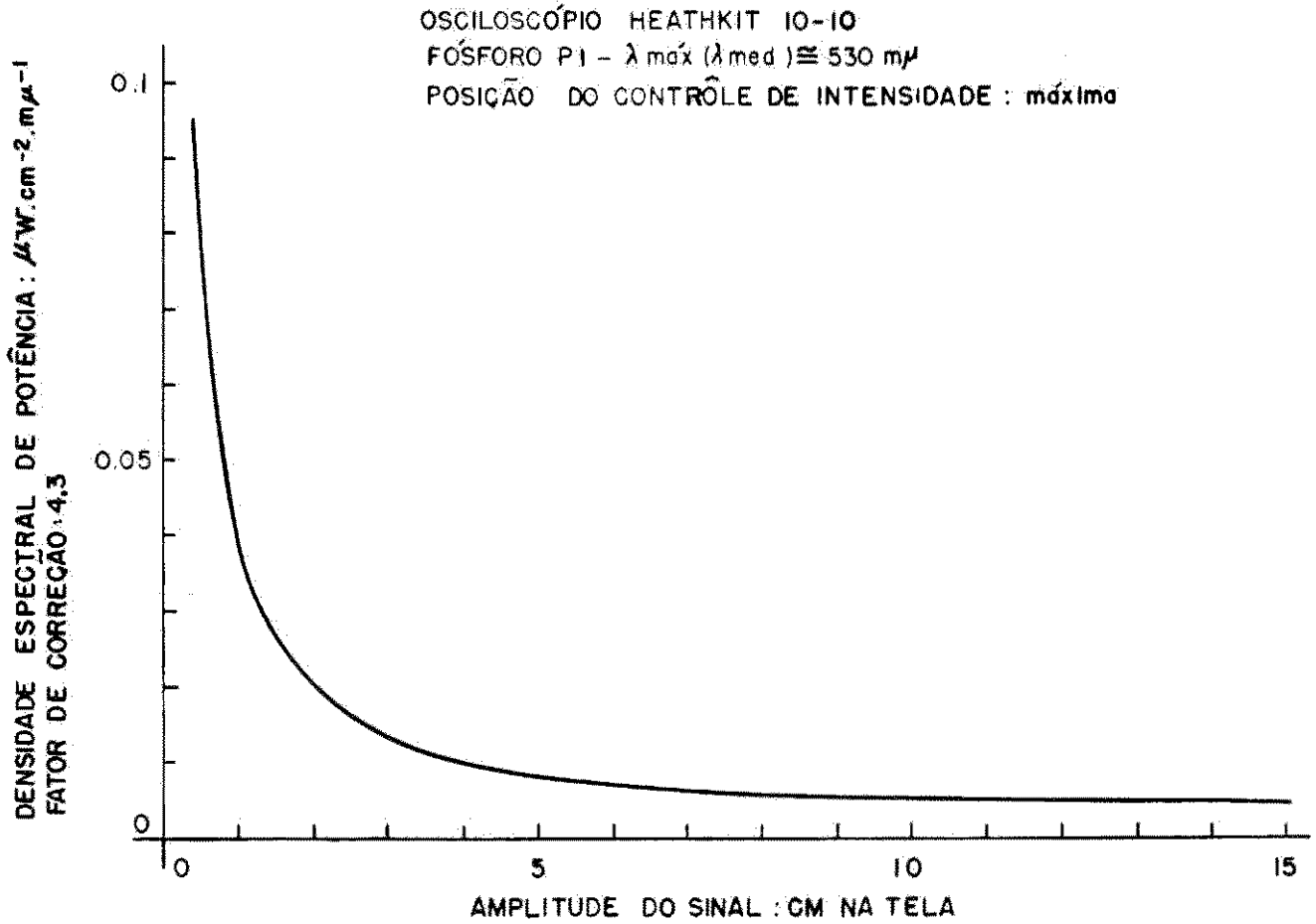


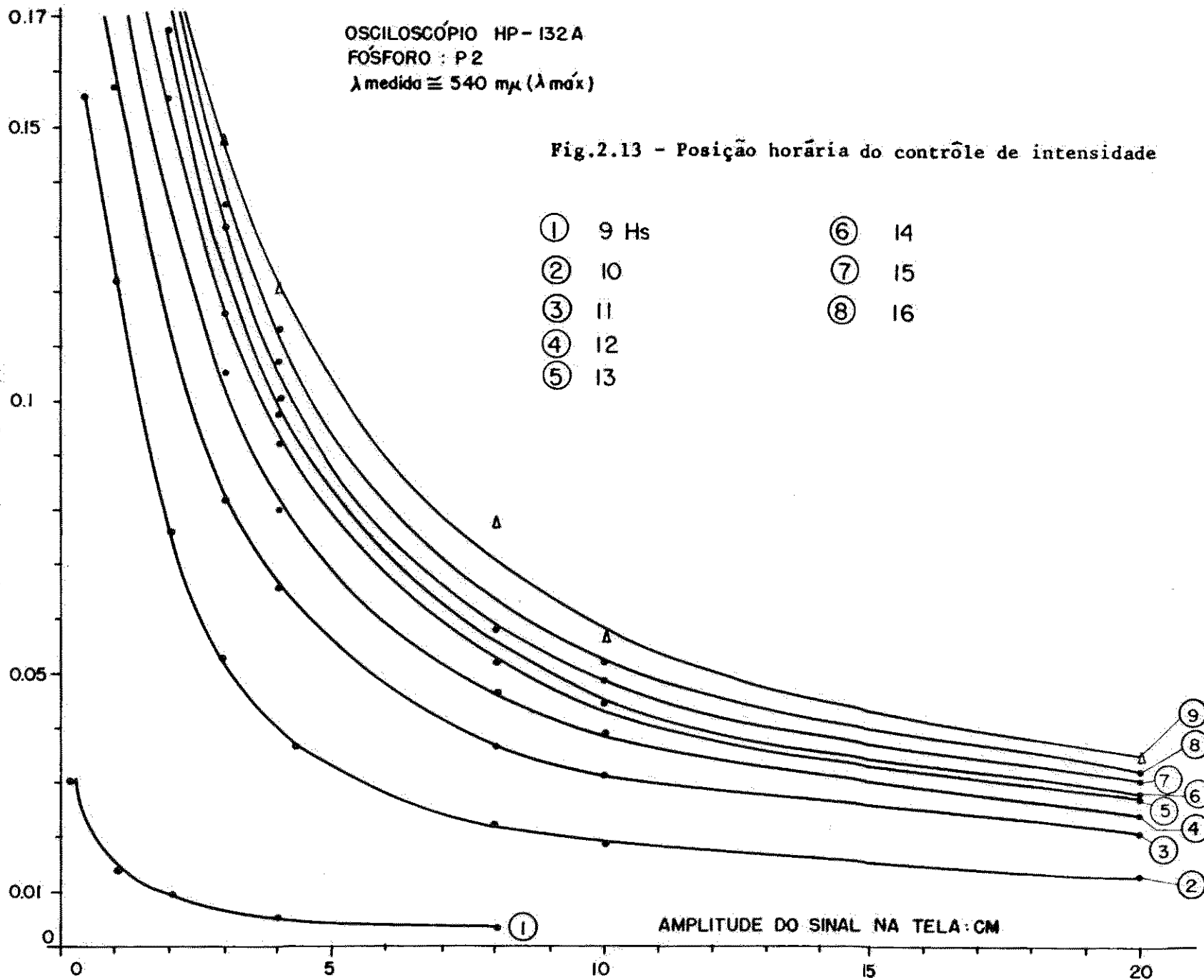
Fig. 2.12

FATOR DE CONVERSÃO P/ METROS - CANDLE-SEG: $4,55 \times 10^2$
FATOR DE CONVERSÃO P/ ERGS/CM²: 6,65
DENSIDADE DE POTÊNCIA ESPECTRAL: $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{m}\mu^{-1}$
FATOR DE CORREÇÃO: 4,2

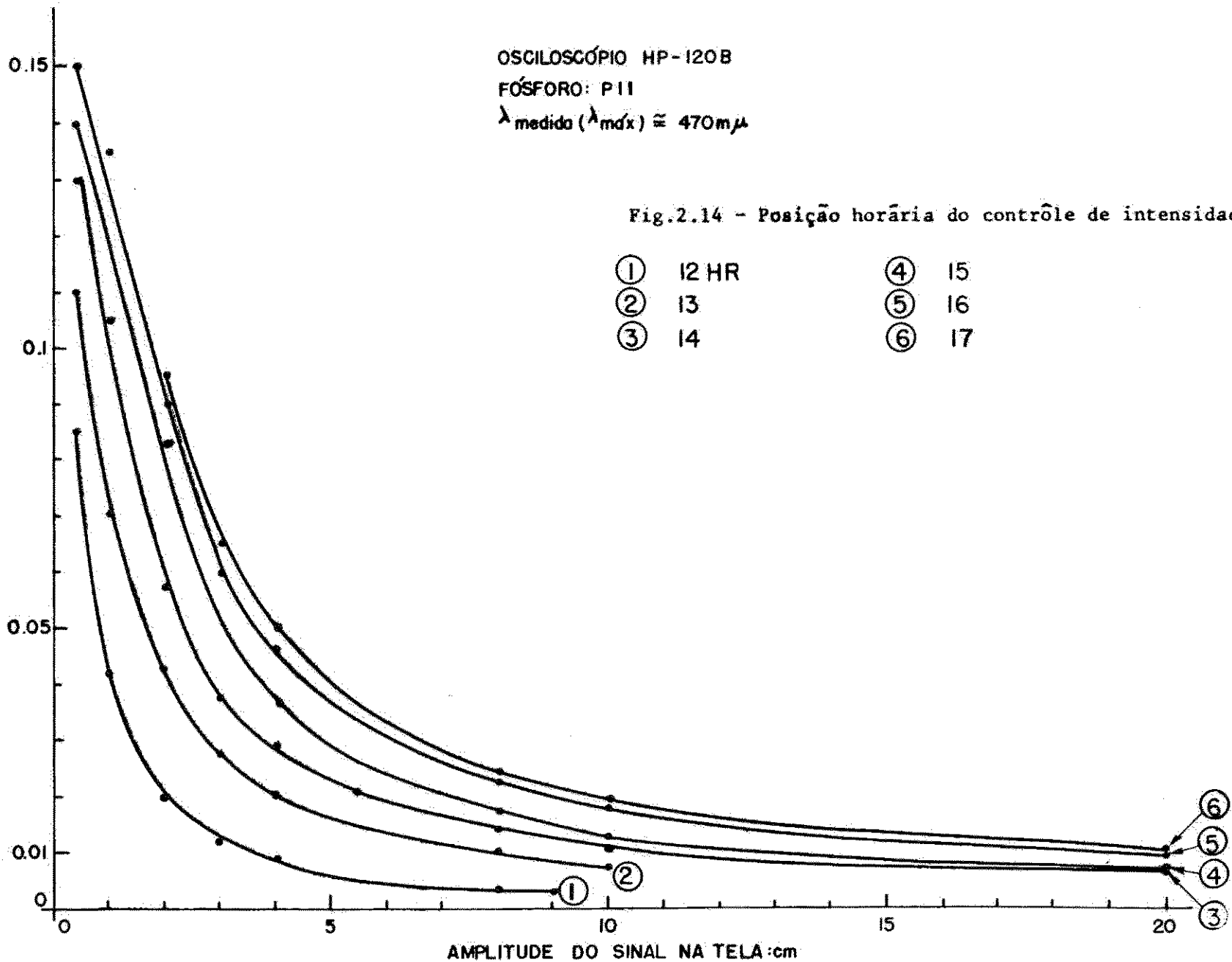
OSCILOSCÓPIO HP-132 A
FÓSFORO: P 2
 λ medida $\cong 540 \text{ m}\mu$ (λ máx)

Fig.2.13 - Posição horária do controle de intensidade

- | | | | |
|---|------|---|----|
| ① | 9 Hs | ⑥ | 14 |
| ② | 10 | ⑦ | 15 |
| ③ | 11 | ⑧ | 16 |
| ④ | 12 | | |
| ⑤ | 13 | | |



FATOR DE CONVERSÃO P/ METROS $^{-2}$ CANDLE-SEC: $1,2 \times 10^2$
 FATOR DE CONVERSÃO P/ ERGS/CM 2 : 1,75
 DENSIDADE ESPECTRAL DE POTENCIA: $\mu W \cdot cm^{-2} \cdot m\mu^{-1}$
 FATOR DE CORREÇÃO: 6,5



melhores para a reprodução fotográfica se uma relação do tipo $L = \frac{K}{A}$ deve ser mantida. A tela P 31 (HP130C) apresenta forte saturação já para baixos valores da voltagem de drive e a P2 (HP132A) tem sua região de ótima utilização limitada.

No capítulo 3 serão feitas análises levando em conta os filmes de que se dispõe para a execução das fotos. (ver ref.25).

CAPÍTULO 3

PROPRIEDADES DO SISTEMA-CARACTERÍSTICAS FOTOGRÁFICAS

3.1 - Registro Fotográfico do Sinal

A luminosidade é registrada no filme produzindo, no negativo revelado, uma certa opacidade à transmissão da luz. A transmissão é definida pela relação entre a luz transmitida e a luz incidente sobre o negativo revelado. Em prática fotográfica define-se a densidade do negativo revelado como o logaritmo do inverso da transmissão, chamado opacidade. Essa densidade é registrada, em gráfico, como função da exposição, que é o produto da intensidade luminosa pelo tempo de exposição, constituindo o que se chama de curva característica do filme. Um exemplo típico de uma curva característica está na fig.3.1. Notamos três regiões distintas na curva: região (1) cujo início, ponto A corresponde a uma densidade de base da emulsão mais uma densidade chamada de "neblina" que é inerente ao processo de revelação, esse ponto corresponde ao limiar de exposição, abaixo da qual não há gradiente sensível de densidade, de A para B o gradiente de densidade cresce com a exposição; região (2) do ponto (B) ao (C) onde o gradiente de densidades fica constante e os logaritmos da densidade e da exposição guardam uma relação linear e finalmente, a região (3), chamada de sobreexposição onde o gradiente decresce com a exposição até ficar nulo em (D), região de saturação. A inclinação da região (2) da curva denomina-se γ e depende das características da emulsão e do processo de revelação (temperatura, tempo, etc). Observamos que o valor de γ determina o contraste presente na imagem para um mesmo intervalo de exposições. Ao escolhermos um filme para o registro das fotografias devemos verificar se o intervalo de exposições está dentro da região linear da curva. Na fig. 3.2 temos as curvas características da placa pancromática KODAK TRI-X. (ver ref.44). Um dos filmes que utilizamos é o KODAK TRI-X de modo que

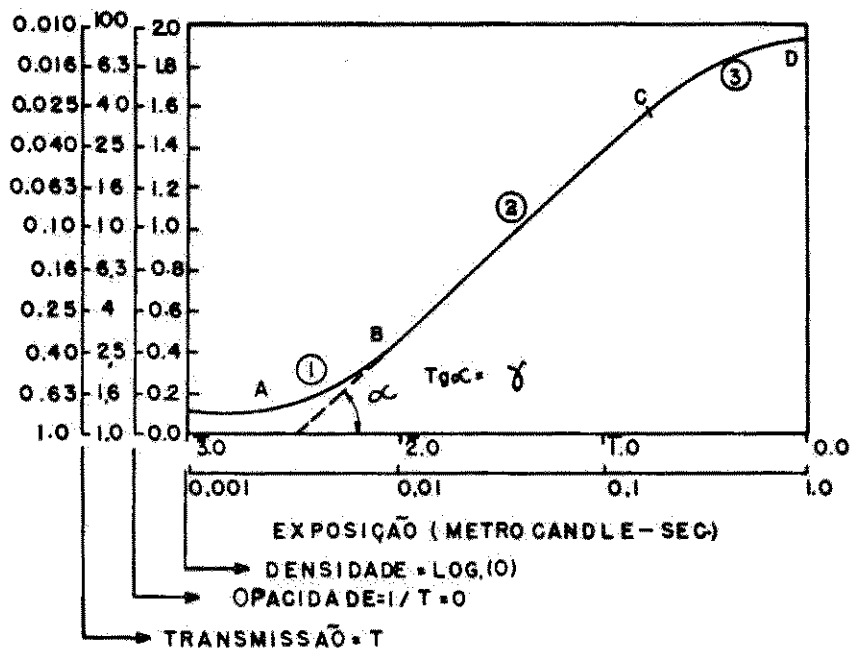


Fig. 3.1 - Curva característica típica para filmes

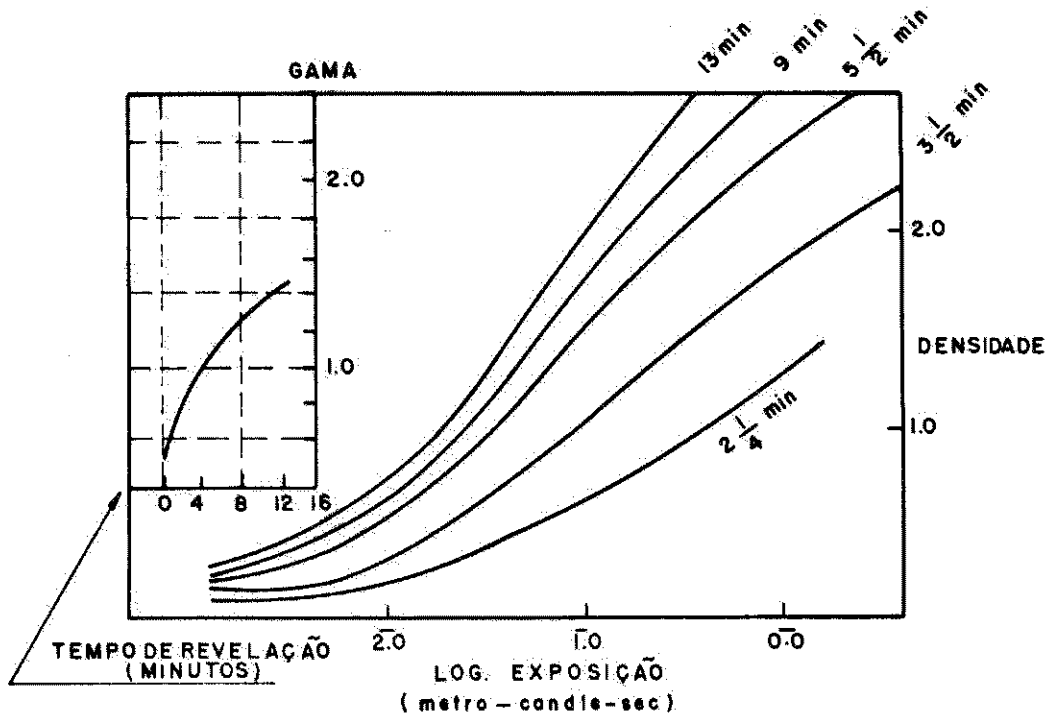


Fig. 3.2 - Curvas características para a placa pancromática TRI-X

Com o auxílio dessas curvas podemos ter uma estimativa do intervalo de exposições que devemos usar. Como não houve possibilidade de se obter as curvas características para os outros filmes que utilizamos, o KODAK PLUS-X e o FUJI NEOPAN, foram levantadas as curvas características desses filmes para condições o mais próximo possível das usadas nas reproduções fotográficas normalmente. Isso foi feito também para o filme TRI-X utilizado nas fotos, para fins de comparação.

A objetiva utilizada foi uma Leitz-Elmar com $f = 5\text{cm}$, 1:3,5.

As figuras 3.3 (a), (b) e (c) nos dão as curvas características para os filmes FUJI (3.3a), KODAK PLUS-X (3.3b) e KODAK TRI-X (3.3c). A obtenção das densidades fez-se impressionando cada filme com o sinal de 2,4 kHz, na maneira como se reproduzem as fotos. Cada amplitude foi registrada durante um certo tempo e com o controle de intensidade correspondendo a uma das curvas das figuras 2.11, 2.12, 2.13 e 2.14 de modo que as intensidades eram lidas diretamente nas curvas.

O tempo de revelação usado foi o mesmo para os três filmes, 5 minutos, e a temperatura mantida por volta dos 21°C . O revelador usado, nos 3 casos foi o EKTOL-KODAK-100%.

O intervalo de variação da luminosidade cobriu a variação normalmente apresentada pelas fotografias.

A medida das densidades foi feita usando-se uma fonte de luz de luminosidade tal que permitisse leituras boas no espectroradiômetro, mesmo para as densidades elevadas.

A análise das curvas nos mostra que o filme FUJI apresenta contraste pobre para as condições de revelação usadas e as densidades variam numa faixa da ordem de 1 para 15 para a região de luminosidades usada.

O KODAK PLUS-X, apresentou uma variação de densidades de aproximadamente 1:100 e o

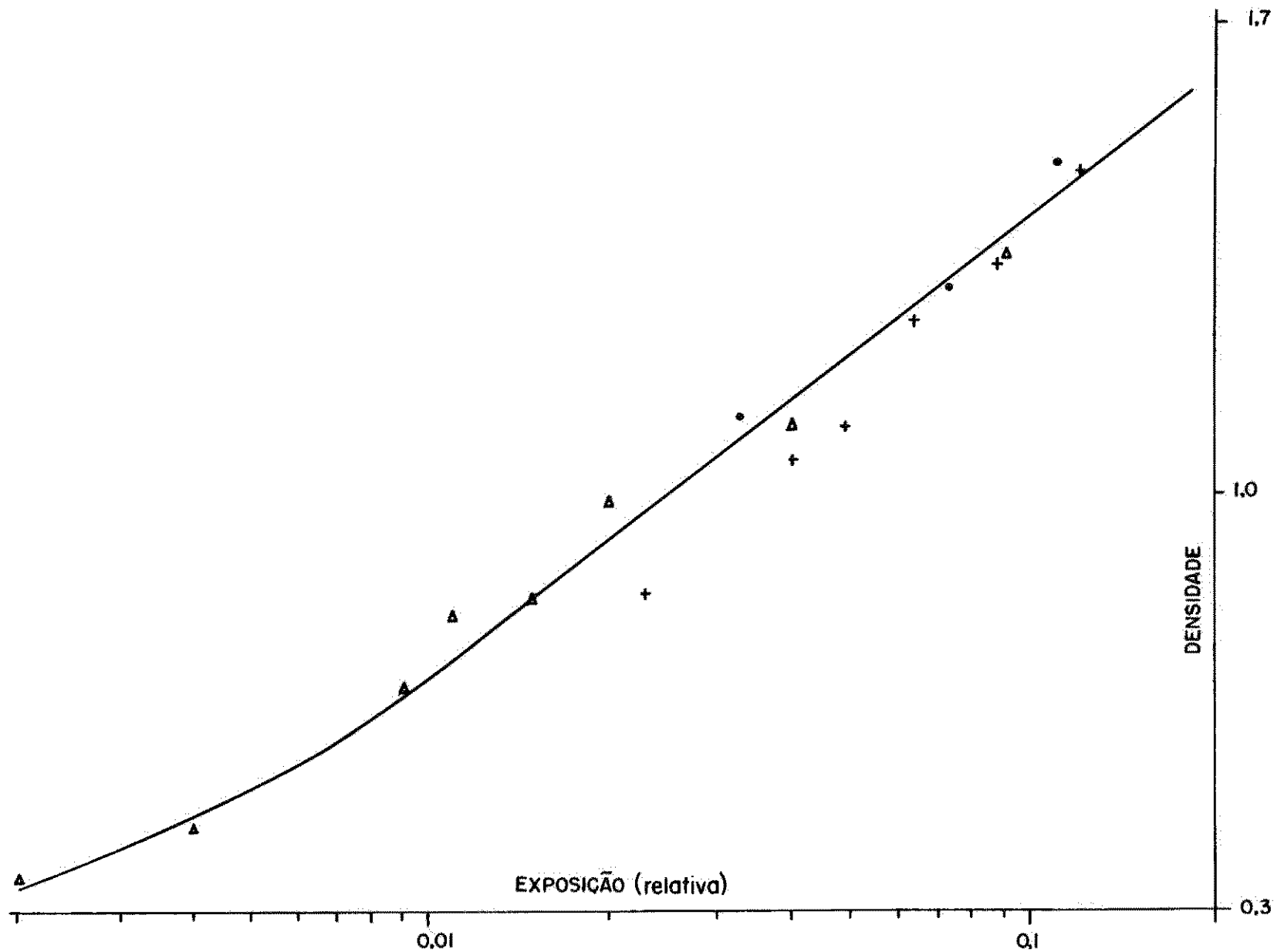


Fig. 3.3(a) - Curva característica Fuji Neopan

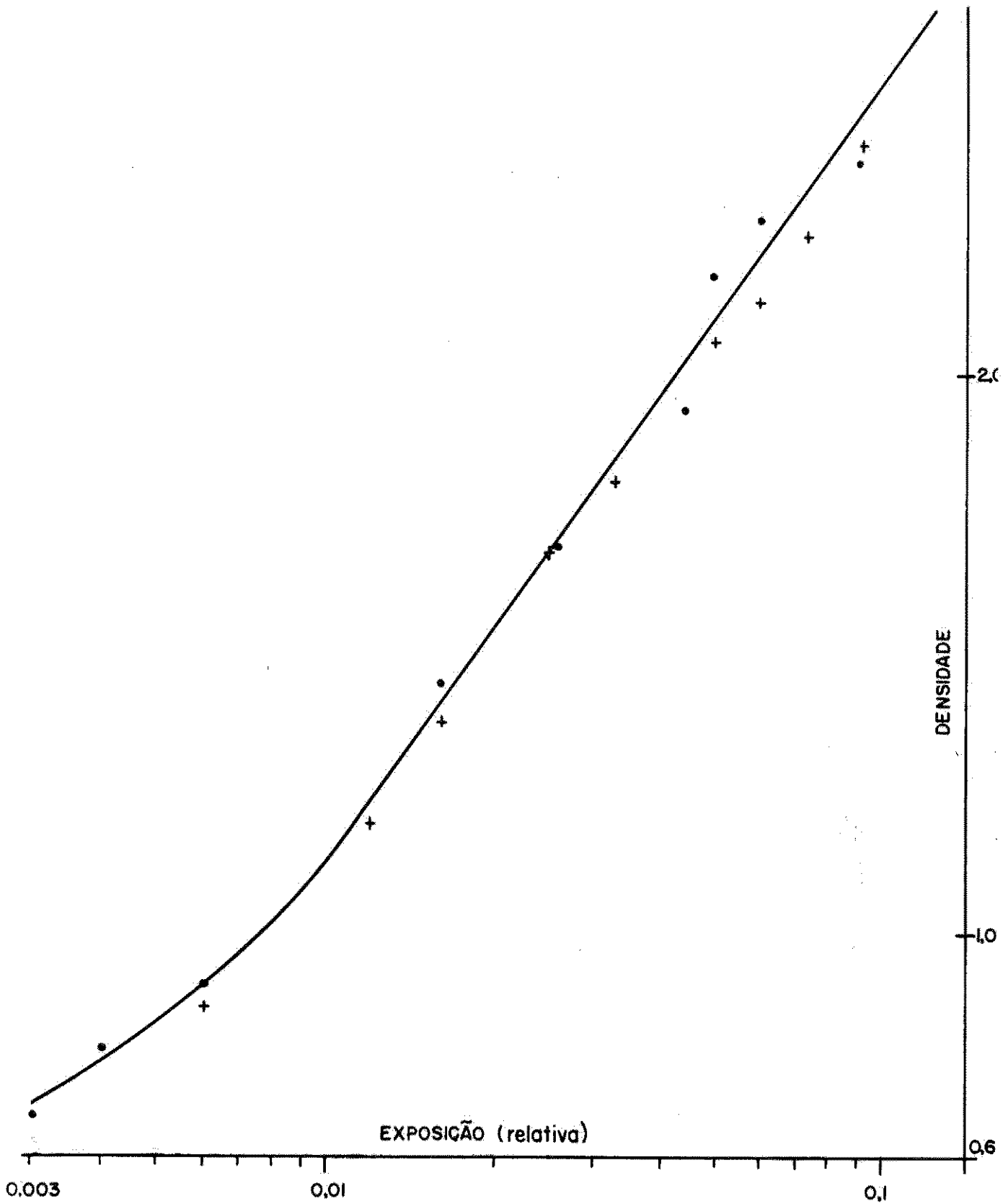
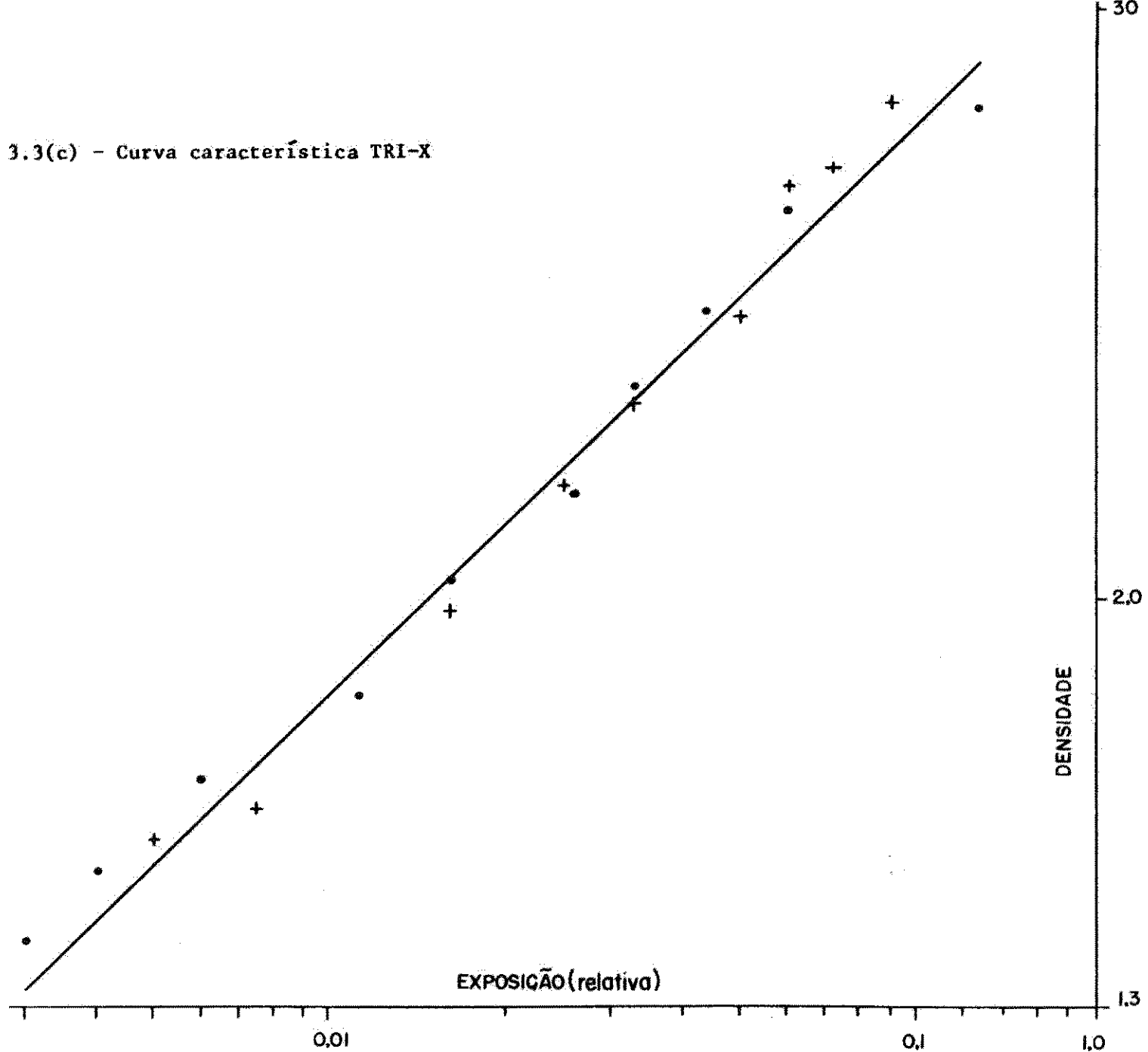


Fig. 3.3(c) - Curva característica TRI-X



TRI-X da ordem de 1 para 35. O PLUS-X foi o que apresentou maior contraste mas mostrou uma leve saturação no limite inferior de luminosidades o que também o correu com o FUJI. O TRI-X manteve boa linearidade em t \hat{o} da faixa de luminosidades. A curva para o TRI-X est \acute{a} acima da do PLUS-X e a d \hat{e} ste acima da do FUJI como era de se esperar pela sensibilidade dos filmes,

Nessas condi \tilde{c} o \tilde{e} s o filme mais indicado para a reprodu \tilde{c} o \tilde{e} m das fotos \acute{e} o KODAK PLUS-X. Outro fator a ser considerado para qualificar o filme \acute{e} , a sua sensibilidade espectral. Como os f \acute{o} sforos possuem curvas de emiss \tilde{a} o espectral diferentes e necess \acute{a} rio verificar se essas curvas est \tilde{a} o dentro da regi \tilde{a} o plana da curva de sensibilidade do filme utilizado. Na figura 3.4 temos a curva de sensibilidade espectral para o filme TRI-X (ver ref.44); observamos que ela \acute{e} aproximadamente plana para os tr \acute{e} s tipos de emiss \tilde{a} o espectral das telas estudadas. N \tilde{a} o foi poss \acute{i} vel obter as curvas de sensibilidade espectral dos filmes FUJI e PLUS-X mas como se tratam de filmes denominados "pancrom \acute{a} ticos" as curvas de emiss \tilde{a} o espectral das telas dever \tilde{a} o estar dentro da regi \tilde{a} o aproximadamente plana. De qualquer modo os filmes comuns normalmente respondem bastante bem ao azul de modo que para o f \acute{o} sforo P11, cujo pico de emiss \tilde{a} o se situa por volta dos 470m μ n \tilde{a} o h \acute{a} problema com a curva de sensibilidade espectral dos filmes.

3.2 - Caracter \acute{i} sticas \acute{O} tico-Fotografica do Sistema de Reprodu \tilde{c} o \tilde{e} m

O sistema completo que reproduz as fotos transforma o sinal de v \acute{i} deo em diferentes opacidades no negativo de 35mm que obtemos como resultado final. J \acute{a} v \acute{i} mos que h \acute{a} uma proporcionalidade inversa entre a luminosidade emitida, no centro da tela, e a correspondente amplitude de modo que para sinais de v \acute{i} deo elevados, que correspondem a luminosidades elevadas no objeto fotografado original,

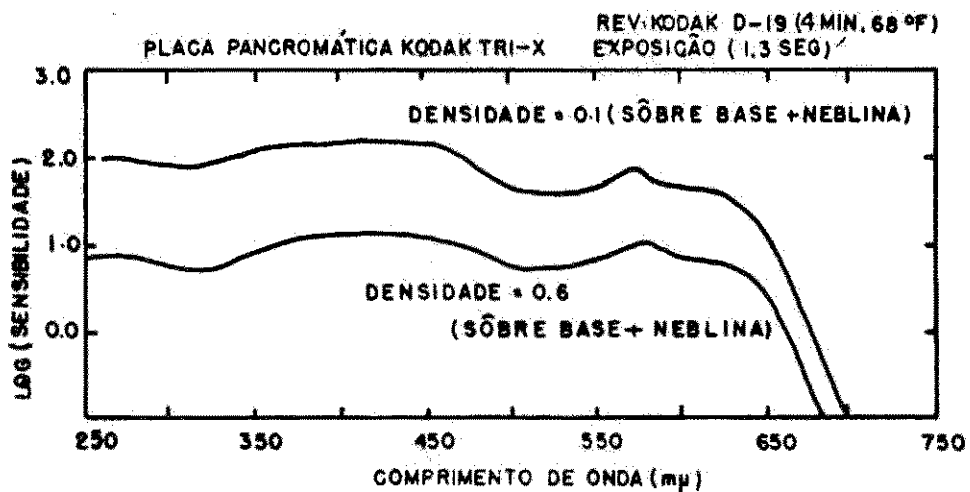


Fig. 3.4 - Curva de sensibilidade espectral da placa Pancromática TRI-X.

mente pelo satélite, resultam exposições pequenas e, portanto, baixas densidades no negativo.

Para os sinais de vídeo pequenos ocorre o inverso. Dêste modo o nosso negativo de 35mm constitui um diapositivo reproduzindo diretamente o que foi fotografado pelo satélite. O processo completo de reprodução segue a sequência: o sinal de 2,4 KHz modulado pelo vídeo varre a tela, esta emite luz que é dirigida por uma objetiva para o filme sensibilizando-o. Temos então os elementos TELA, OBJETIVA E FILME. A tela transforma uma dada amplitude do sinal em uma luminosidade correspondente, segundo uma lei que para o centro da tela, como vimos no caso, é aproximadamente hiperbólica.

Essa luminosidade, corresponde a uma dada exposição para o filme. De acordo com a expressão (17) e os resultados do item 2.4 essa exposição pode ser escrita como $E_0 = \frac{K3}{A}$ (18). Essa exposição vai impressionar o filme, registrando nele uma opacidade que corresponde a uma determinada transmissão T_2 .

A objetiva transfere a luminosidade para o filme de maneira que a exposição final que o impressionou é $E_1 = \frac{K4}{A}$ (19).

A relação entre a transmissão no negativo e a exposição a que ele é submetido é dada por: $T_1 = K_5 \cdot E_1^{-\gamma}$ (20) (ver ref.39) dentro da região linear da curva característica.

As expressões (19) e (20) nos dão $T_1 = K_5 \left(\frac{K4}{A}\right)^{-\gamma} = K_6 A^\gamma$ (21). Se controlarmos o processo de revelação de modo a que $\gamma=1$ então $T_1 = K_6 A$ (22). Como dispomos de um diapositivo estamos interessados na quantidade de luz que cada região do nosso "negativo" deixa passar, ou seja, na transmissão do negativo. A quantidade de luz que passa é proporcional à transmissão de modo que podemos escrever: Luminosidade na projeção $L_p = K_7 A$ (23). Observando as curvas características que obtivemos temos $\gamma=1$ para o TRI-X, $\gamma=1,3$ para o PLUS-X e $\gamma=0,77$ para o FUJI.

A expressão (23) nos mostra que há uma relação linear entre

a luminosidade da projeção e a amplitude do sinal. De fato há uma combinação de dois efeitos não lineares se compensando para dar uma relação final linear. A fig. 3.5 nos dá a luminosidade medida no centro da tela ao longo do ciclo de modulação. A frequência de modulação utilizada foi de 8Hz. Na fig. 3.5(a) o índice de modulação foi de 82%, na 3.5(b) 55% e na 3.5(c) 35%. A distorção diminuiu com o índice de modulação. Registrou-se a seguir esse sinal no filme, obtendo as curvas das figs. 3.6(a), (b) e (c) para modulações próximas às da figura 3.5 na ordem correspondente. As curvas são aproximadamente senoidais confirmando a relação (23). Na fig. 3.6 medimos a quantidade de luz que passa pelo diapositivo projetando-o em um anteparo e registrando a luz numa direção perpendicular ao comprimento do filme. Se a luminosidade for expressa por uma relação do tipo $L=KA^{-\alpha}$ então o processo de revelação deve ser tal que $\alpha\gamma=1$ (24).

De fato a combinação entre os dois sistemas será linear nesse caso pois: $L_p = CT_1 = C K_5 (K_4 A^{-\alpha})^{-\gamma} = K A^{\alpha\gamma}$ (25) e a expressão (25) representará uma lei linear se (24) se cumprir. A distorção nas senóides da fig. 3.6 se devem à distorção original do sinal modulador proveniente do gerador e a uma irregularidade na largura da fresta ao longo do seu comprimento.

3.3 - Curvas de Transferências de Modulação

A difusão da luz dentro da emulsão de materiais fotográficos (filmes, placas, papéis, etc.) provoca efeitos sobre a estrutura fina da imagem que está sendo registrada. Para observar esses efeitos registra-se sobre o material em questão uma imagem com variação luminosa senoidal, fazendo-se o nº de variações por unidade de comprimento aumentar para cada registro. Esse nº de variações luminosas senoidais, por unidade de comprimento, denomina-se frequência espacial. A fig. 3.7 esquematiza o processo utilizado para esse registro. O objeto teste, que apresenta um vazamento senoidal é iluminado por trás, uma lente cilíndrica

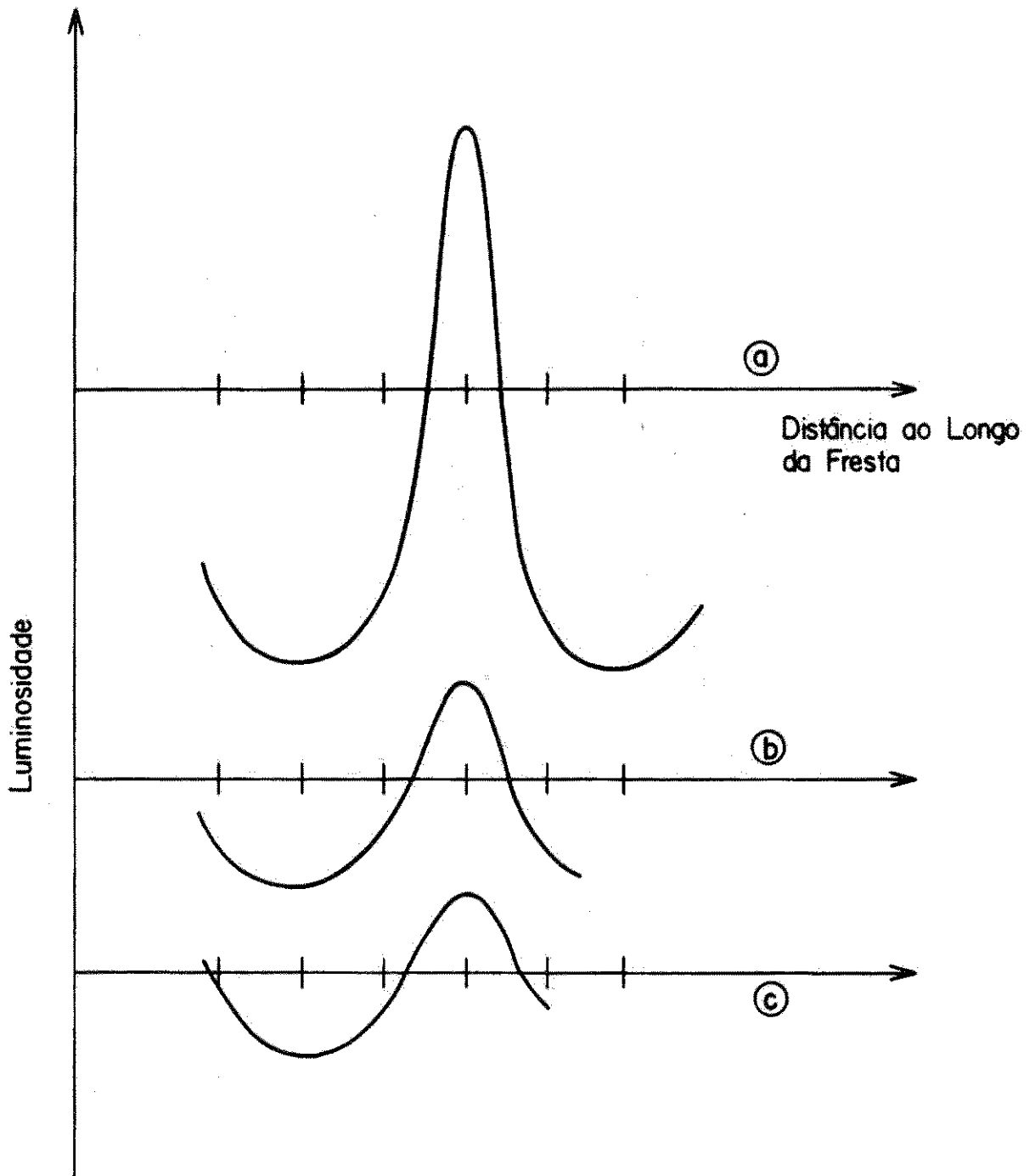


Fig. 3.5 - Curvas de luminosidade ao longo de um ciclo de modulação.

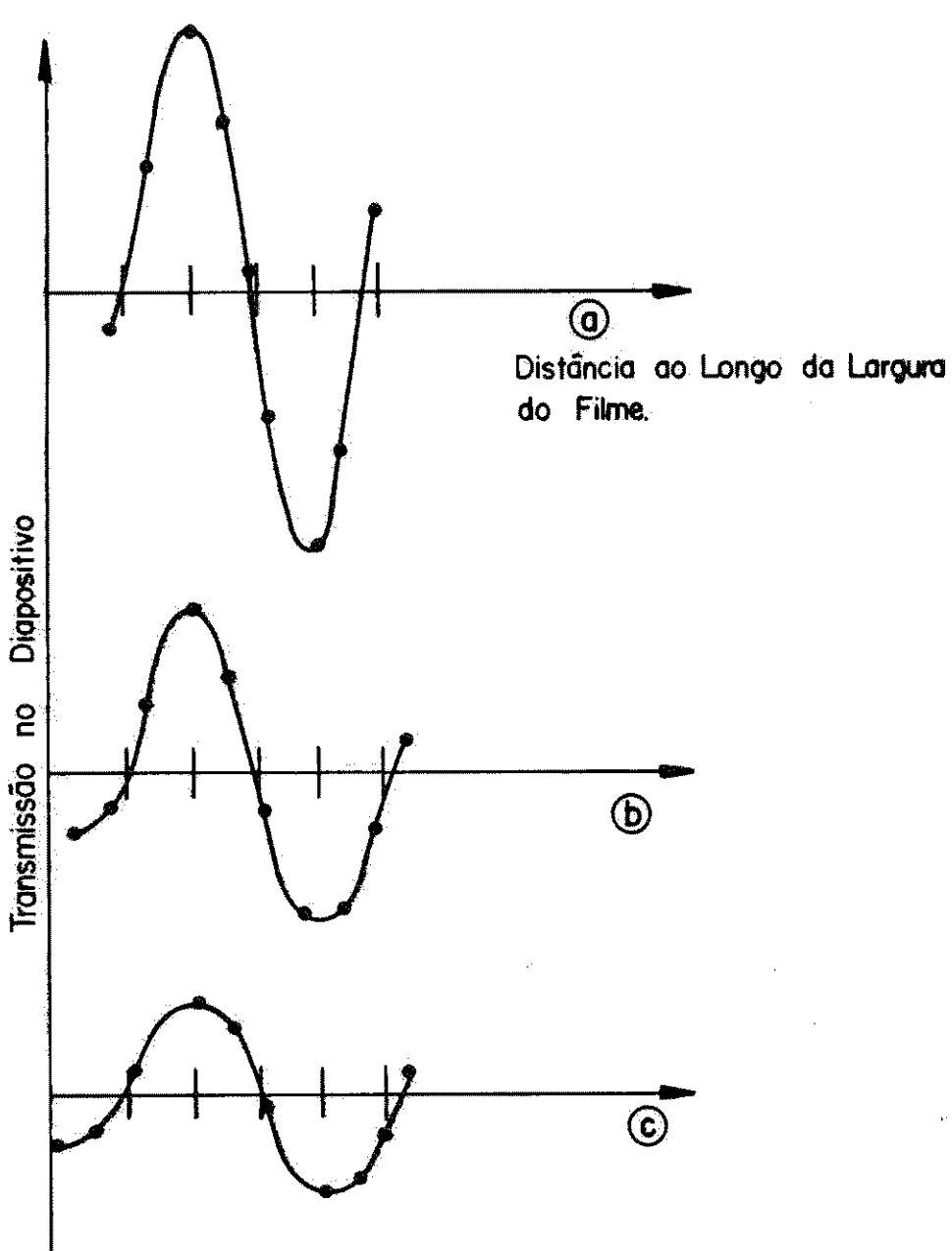


Fig. 3.6 - Transmissão registrada no diapositivo para diferentes modulações

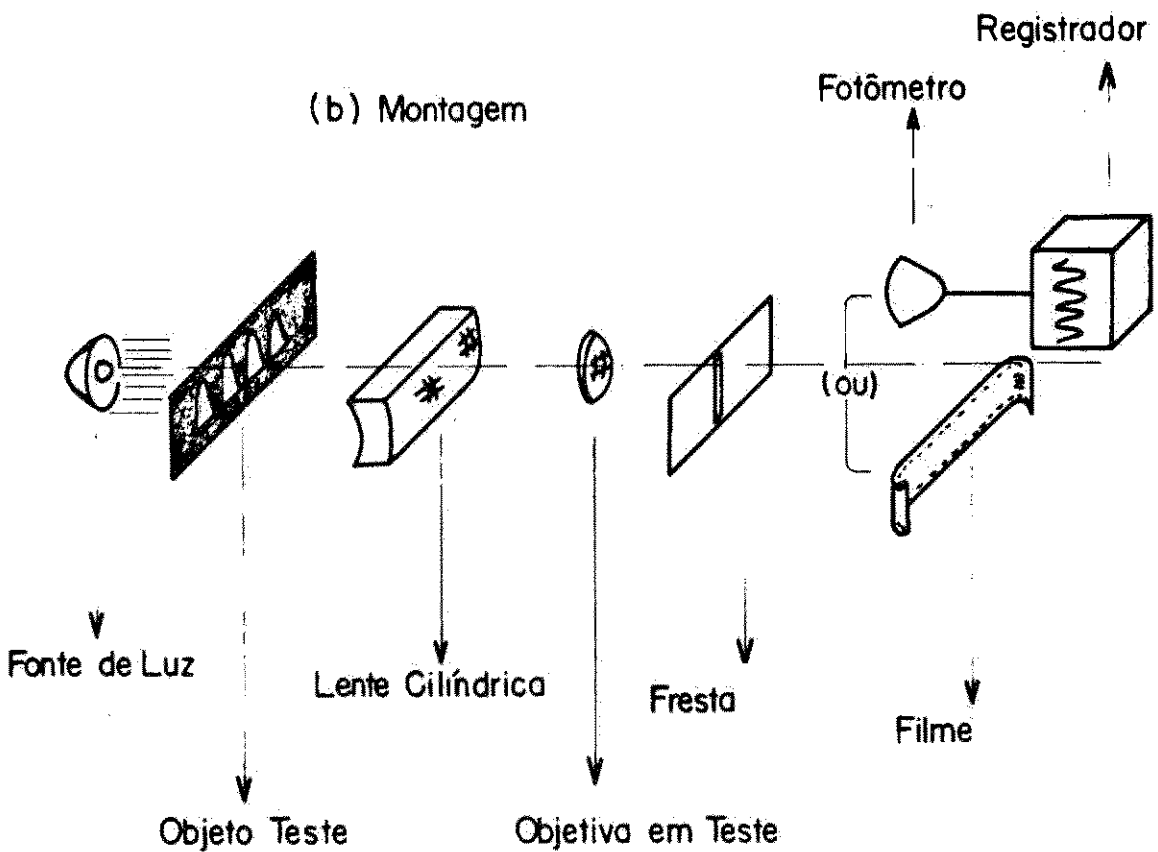
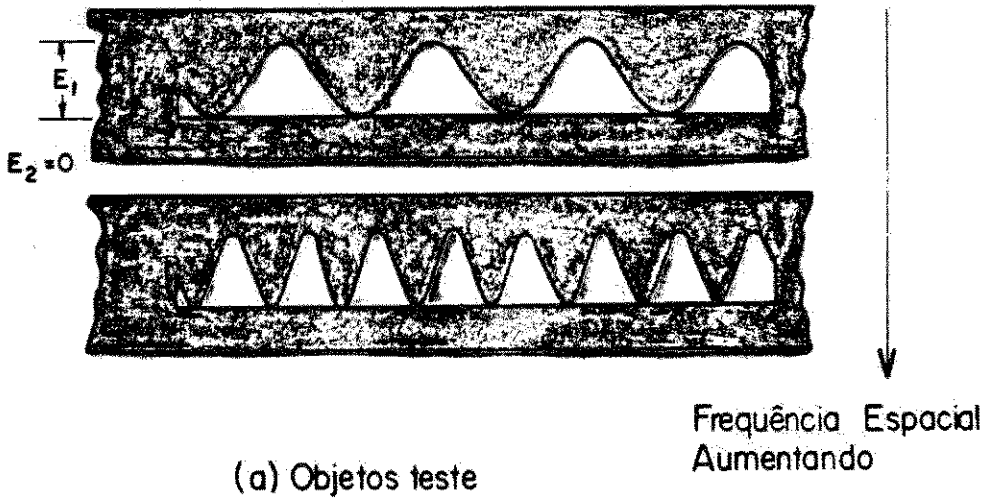


Fig. 3.7 - Método de levantamento das características de transferências de modulação.

abre a imagem na direção perpendicular e a objetiva concentra a luz no anteparo.

Uma fresta faz a varredura do anteparo, ao longo do objeto teste expondo o filme. Utilizam-se vários objetos teste, cada um com um dado número de ciclos por unidade de comprimento. A modulação da luz no objeto teste é dada por $M_0 = \frac{E_2 - E_1}{E_2 + E_1}$ e é constante para todos êles. Fica então registrada no filme uma da variação de transmissão que, pelas características do objeto aparece como um dado nº de linhas por mm de filme.

Utilizando-se um microdensitômetro determina-se, para cada frequência, a densidade máxima e mínima registrada.

Com a curva característica do filme obtêm-se as exposições E_1' e E_2' correspondentes e determina-se $M_i = \frac{E_2' - E_1'}{E_2' + E_1'}$ ou seja, a modulação realmente registrada. O quociente $\frac{M_i}{M_0} \times 100\%$ nos dá o que se chama característica de transferência de modulação que é a curva de $\frac{M_i}{M_0} \times 100\%$ em função da frequência espacial (ver referências 41, 42 e 43). Dêste modo podemos determinar quanto contraste será transmitido de uma dada imagem, decompondo-se a variação de luminosidade nela presente em componentes espectrais através da análise de Fourier. No nosso processo de reprodução verificamos que a transmissão do diapositivo obtido, e a consequente luminosidade na imagem projetada é proporcional à amplitude do sinal, pela relação (23) e, portanto, à velocidade pela relação (4). Concluimos então que, se o sistema transmitisse integralmente tôdas as componentes de velocidade então a transmissão no diapositivo conteria componentes nas frequências constituintes do espectro de velocidades, conforme mostra a figura 2.5. As curvas de transferência de modulação se referem à frequência espacial e as frequências constantes da expressão (8) são as frequências do sinal de vídeo de que dispomos.

No entanto, observamos que para cada frequência de modulação da subportadora de 2,4 KHz há uma determinada variação de luminosidade na horizontal, no centro da tela. Cada frequência de modulação fornece um dado número de ciclos numa,

varredura. Como o tempo de varredura é de 250 msec. o número de ciclos da modulação, representado na tela durante uma varredura é

$$n = \frac{T_0}{T_m} \quad (26) \quad \text{onde } T_0 = 250 \text{ msec. (período de varredura)}$$

$$T_m = \text{período da moduladora}$$

Para verificarmos como uma dada frequência de modulação é registrada no filme, modulamos o sinal com uma dada frequência constante, o injetamos no eixo Y, com a varredura de 4Hz e fazemos uma foto pelo método descrito.

A fig. 3.6, que reproduz a subportadora modulada com 8 Hz mostra que a transmissão registrada dá uma frequência espacial correspondendo, pela relação (26), aos 8 Hz de sinal de vídeo modulador, não se tendo detetado nenhuma frequência adicional. Isso significa que o sistema age como um filtro eliminando as frequências superiores contidas no espectro. A análise do espectro da figura 2.5 nos mostra que em torno da origem está contido um espectro de velocidades que corresponde exatamente ao espectro de modulação do sinal de vídeo. Repetimos a experiência da fig. 3.6 com frequência de modulação de 40 Hz, 240 Hz, 480 Hz, 960 Hz e 1,6 KHz e observamos que até 960 Hz pelo que foi registrado no filme a parecem apenas as frequências moduladoras, em cada caso. Dêste modo podemos estabelecer uma correspondência entre a frequência de modulação e o número de linhas registradas por mm de filme. O número de linhas é determinado por (26) que, dividido pela largura utilizado, de filme nos dá a frequência espacial no filme para aquela frequência de modulação. Se medimos pelo processo já descrito a modulação contida nos diapositivos com as várias frequências de modulação estaremos levantando a característica de transferência de modulação do sistema de reprodução. O sistema pode ser considerado como possuindo uma função de transferência $H(\omega)$ tal que a transmissão final registrada no filme $T_1(\omega) = H(\omega)V_a(\omega)$ (27).

Comparando com a terminologia utilizada em eletrônica o sistema age como um detetor síncrono. Foram determinadas as densidades máxima e mínima registra

das para cada frequência utilizando-se um microdensitômetro ENRAF-DELFT, do Departamento de Física da Escola de Engenharia de São Carlos - SP. Daí obtivemos as curvas de transferência de modulação para o sistema, com os três filmes diferentes. A fig. 3.8 contém os resultados obtidos.

Os pontos para 960 Hz estão abaixo do valor real de $\frac{M_i}{M_0} \times 100\%$ por limitações de resolução do microdensitômetro.

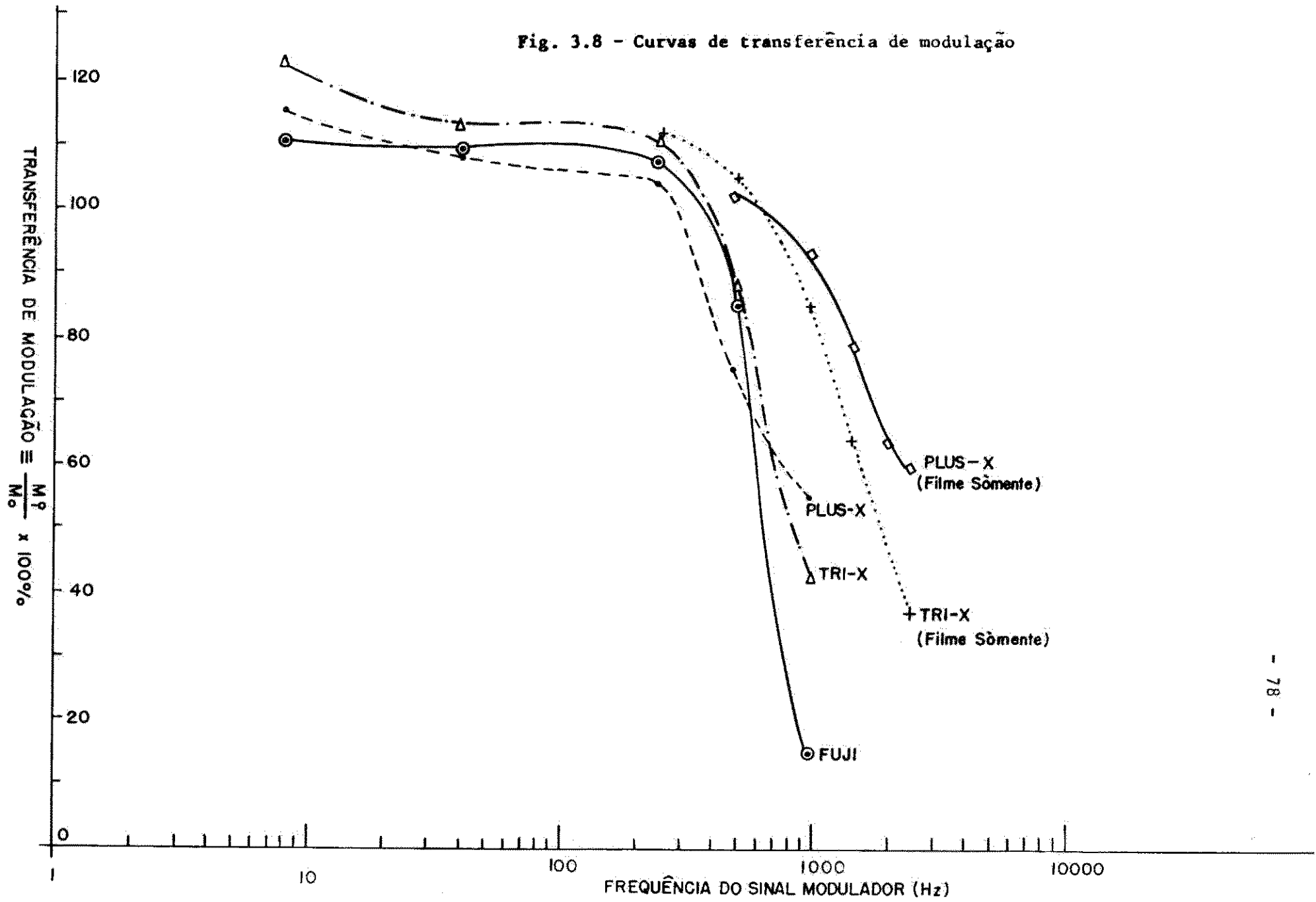
Estão registradas também, as curvas de transferência de modulação para os filmes TRI-X e PLUS-X sôzinhos, ou seja, já compensados os efeitos do sistema usado para determiná-las (ver referências 40 e 41). As condições de revelação são próximas às que utilizamos com os filmes elaborados por nós com exceção da agitação, que não usamos. Esse efeito aparece bem nas baixas frequências onde as curvas para o sistema todo, com um dado filme estão próximas daquelas apenas do filme. Isso se deve aos chamados efeitos de adjacência que aumentam bastante a modulação na ausência de agitação (ver ref.41).

Logo acima dos 500 Hz as curvas do sistema se afastam das do filme sôzinho mostrando que o efeito de filtragem do sistema propriamente dito se acentua para frequências dessa ordem e maiores. As curvas para os filmes são dados do fabricante e a maior transferência para o filme TRI-X nas baixas frequências foi plenamente confirmada. Observamos que as curvas para o sistema e para os filmes sôzinhos se cortam em frequências bem próximas. Dêsse modo o sistema deixa passar somente o espectro em torno da origem. A harmônica mais próxima, no caso teórico de uma frequência de modulação de 1,6 KHz que é o caso mais desfavorável, é a de $4,8 - 1,6 = 3,2$ KHz. Essa componente seria muito atenuada.

3.4 - Considerações sobre o sistema e conclusões

Pelos resultados obtidos na fig. 3.8 e pelo que se conhece da literatura sobre resposta de sistemas óticos a tela é o elemento responsável pela acentua

Fig. 3.8 - Curvas de transferência de modulação



da queda na curva de transferência de modulação acima dos 500 Hz. De fato, o feixe possui uma secção transversal finita o que, em conjunto com os processos de espalhamento e reflexão da luz na tela limita a máxima variação de luminosidade por unidade de comprimento que ela permite. O fósforo P11, já conhecido como especial para reprodução fotográfica mostrou-se o mais adequado para o processo que preconizamos. As outras telas também dão resultados razoáveis principalmente a com fósforo P1. No caso de desvio da lei hiperbólica deve determinar-se com boa aproximação o expoente α da expressão (24) para que se saiba que valor de γ obter na revelação a fim de que a relação (24) seja satisfeita. Na prática êsse contrôle não é difícil. O processo descrito permitindo a obtenção direta de diapositivo com filmes convencionais de 35 mm representa boa economia no processo de registro do sinal não exigindo a confecção de uma cópia fotográfica. As características de linearidade observadas podem ser atingidas sem maiores dificuldades. A posição do contrôle de intensidades no painel do osciloscópio é crítica o que nos exigiu a colocação de um voltímetro para que ela pudesse ser obtida com a precisão adequada. Para se obter constância nos resultados com êste método é imprescindível a instalação de voltímetros para a medida da voltagem de drive, ou outra qualquer no circuito, que lhe seja proporcional. Resta destacar que o sistema opera diretamente com o sinal na saída do receptor e, salvo problemas como os descritos no item 1.4 do capítulo 1, não exige qualquer equipamento adicional para a reprodução das fotos, a menos, naturalmente, da referência de sincronismo, inerente a qualquer sistema. Também não é necessário ampliador para confecção de fotos sendo o material empregado na revelação do filme bastante comum e de baixo custo.

BIBLIOGRAFIA

1. National Weather Satellite Center, ESSA, U.S. Department of Commerce - "APT USER'S GUIDE"
2. Stampfl, R.A. e Stroud W.G. - "The Automatic Picture Transmission TV Camara for Meteorological Satellites" - NASA, April, 1963, Goddard Space Flight Center.
3. Hunter, C.M. e Rich Jr., E. - "Birds Eye View of the Weather" - Electronics, July, 1964.
4. - "APT TV Camara System for Meteorological Satellites" - Journal of the SMFTE, February, 1964.
5. Anderson, W. - "Amateur Reception of Weather Satellite Picture Transmission" QST Magazine, November, 1965.
6. Sabatini, R., Editor - The Nimbus Project, GSFC, NASA - "Nimbus II User's Guide" - Allied Research Associates, Inc. Concord, Mass.
7. Idem 6 - "Nimbus III User's Guide".
8. Idem 6 - "Nimbus IV Use & Guide".
9. Technical Report, 12, March, 1970 - "Nimbus IV Real Time Transmission System" - Contract n° NAS. 5-10343.
10. "The Improved Tiros Operational Satellite" - National Environmental Satellite Center - August, 1968 - Technical Memo. NESCTM 7.
11. NASA, GSFC - "Mission Operations Plan - Nimbus C" - March, 1966.
12. NASA Staff of the GSFC e U.S. Weather Bureau - "Final Report on the Tiros I Meteorological System" - 1962.
13. Moody, John C e Weinstein, O. - "Night and Day Nimbus 2 Transmits its Cloud Pictures" - Electronics, August, 1966.
14. Cook, A.B. e Liff A.A. - "Frequency Modulation Receivers" - Prentice Hall, 1968.
15. Calheiros, R., Ferratone, R., Tokoro, M. - "Array de Yagis com 20dB de ganho sôbre fonte isotrôpica para recepção dos sinais do satélite Geo-estacionário Early-Bird" - T. I. ITA, CNAE, 1965.
16. NASA, Comunicação particular à CNAE - APT Remodulator - August, 1967.
17. Sakrison, D. - "Communication Theory" - John Wiley, 1968.
18. Lathi, B. P. - "Communication Systems" - John Wiley, 1968.
19. Seeley, S. - "Electronic Circuits" - Holt, Rinehart e Winston, 1968.

20. Jenkins, F.A. e White, H.E. - "Fundamentals of Optics" - McGraw-Hill, 1957.
21. Kings Lake - "Applied Optics and Optical Engineering" -
22. Moss, H. - "Narrow Angle Guns and Cathode Ray Tubes" - Advances in Electronics and Electron Physics - Academic Press, 1968.
23. Kirstein, Kino and Waters - "Space Charge Flow" -
24. Zworykin and Morton - "Television" - John Wiley, 1954.
25. Czech, J - "Oscilloscope Measuring Techniques" - Philips Technical Library, 1965.
26. "Probability Density Measurements - Oscilloscope Probability Density Machine" - EE 743 - Polytechnic Institute of Brooklyn.
27. "Principles of Cathode-Ray Tubes, Phosphors and High Speed Oscillography" - Hewlett Packard Application Note, 115.
28. Leverenz, H.W. - "Luminescence of Solids" - John Willey, 1950.
29. Pringshein - "Fluorescence and Phosphorescence" - Interscience, 1949.
30. Monod, G. et Herzen - "Luminescence" - Dunod, Paris, 1966.
31. Brill, A and Krüger, F.A. - "Saturation of Fluorescence in TV Tubes" - Philips Technical Review, vol. 12, nº 4.
32. Brill, A and Klasens, H.A. - "The Efficiency of Fluorescence in Cathode-Ray Tubes" - Philips Technical Review, vol. 15, nº 2, August, 1953.
33. Krüger, F.A. and de Groot, W. - "The Influence of Temperature in the Fluorescence of Solids" - Philips Technical Review - vol. 12, nº 1 - July, 1950.
34. Gisolf, J.H. and Groot, W. - "Fluorescence and Phosphorescence" - Philips Technical Review - vol. 3, nº 8 - August, 1938.
35. Brill, A e Klasens, H.A. - "Intrinsic Efficiencies of Phosphors under Cathode Ray Excitation" - Philips Research Report, 7 - 1952.
36. Brill, A e Klasens, H.A. - "New Phosphors for Flying Spot Cathode-Ray Tubes" - Philips Research Report, 7, 1952.
37. Brouwer, W. - "Sine Wave Testing" - Optical Spectra - 3rd Quarter, 1967.
38. Perrin, Fred H. - "Methods of Appraising Photographic Systems" - Journal of the SMPTE - April, 1960, vol. 69.
39. Perrin, Fred H. - "Manipulation and Significance of the Sine Wave Response Function" - Part II - Journal of the SMPTE, vol. 69, April, 1963.
40. Lamberts, R.L. - "Measurements of the Sine Wave Response of a Photographic Emulsion" - Journal of the Optical Society of America - vol. 49, nº 5, May, 1959.

41. Lamberts, R.L. - "Application of Sine Waves Techniques to Image Forming Systems" - Journal of the SMPTE, vol. 71, n^o 9, September, 1962.
42. Lamberts, R.L., Higgins G.C., and Wolfe, R.N. - "Measurements and Analysis of the Distribution of Energy in Optical Images" - Journal of the Optical Society of America - vol. 48, n^o 7.
43. Ingelstam, E. Djurle E., and Sjögren B. - "Contrast Transmission Functions Determined Experimentally for Assymetrical Images and for the Combination of Lens and Photographic Emulsion" - Journal of the Optical Society of America - vol. 46, n^o 9, September, 1946.
44. "Kodak Plates and Filmes" - Kodak Technical Data, P.9.