

INPE-220/RI-021

PROJETO: MESA

TÍTULO: FOTODETEÇÃO DE SINAIS DE VÍDEOS

AUTOR: R. V. CALHEIROS

PUBLICADO EM: Julho, 1972

Gerente do Projeto

Coordenador

REVISÃO	
DATA	REVISOR

FOTODETEÇÃO DE SINAIS DE VÍDEO

RESUMO

Apresenta-se um método de detecção fotográfica de sinais de vídeo em processos de modulação em amplitude. Formula-se um modelo matemático para a detecção e enuncia-se a relação entre a luminosidade emitida e o sinal de vídeo correspondente. Confirma-se experimentalmente essa relação e mostra-se a adequação do método para a fotodetecção descrita.

ABSTRACT

A method is presented for photodetection of video signals modulated in amplitude. A mathematical model is formulated for the detection and a relationship between emitted light and corresponding video signal is derived. This relationship is experimentally confirmed and the suitability of the method for the photodetection described is shown.

1. INTRODUÇÃO

Nos processos normais de detecção de sinais, em que se objetiva a foto-reprodução da informação que está sendo transmitida há a necessidade de uma detecção convencional no estágio final do receptor para, em seguida, se modular em intensidade um tubo de raios catódicos.

Esse é o processo usado em televisão convencional. A detecção pode, no entanto, ser efetuada diretamente da portadora modulada pelo sinal de vídeo apresentada na tela do tubo de raios catódicos, especialmente quando se deseja o registro

fotográfico da informação. No caso de modulação em amplitude as características do sinal luminoso assim detetado, combinadas com as do filme de registro fornecem ao sistema uma característica final que apresenta boa linearidade, observadas certas condições. (ver ref. 1)

2. EMIÇÃO DE LUZ PELA TELA DO TUBO DE RAIOS CATÓDICOS

A obtenção da imagem num cinescópio se fundamenta no fenómeno de emissão de luz por substâncias depositadas na tela, sob a incidência de eletrons a altas velocidades. A quantidade de energia luminosa emitida pela tela, num determinado tempo, é função do número de eletrons que nela incidiram nêsse tempo, ou seja, da carga que a atingiu nêsse intervalo e portanto, da densidade de corrente. Analisa-se o caso da emissão de luz pela tela de um tubo de raios catódicos, sob diferentes condições de varredura. Supõe-se, para facilidade de raciocínio, que o feixe eletrónico tenha uma secção transversal quadrada, coincidente com o elemento de tela, nêste caso dividida em m linhas e m colunas (relação de aspecto 1) resultando em m^2 elementos de tela. Como a varredura é de período constante o tempo T gasto pelo feixe para percorrer um elemento de tela é

$$T = \frac{1}{f_q m^2} \quad (1) \quad (\text{ver ref. 2})$$

onde f_q = frequência de repetição das imagens.

Como a área que vai sendo varrida pelo feixe é:

$$\begin{aligned} A &= 2lvt, & 0 \leq t \leq T \\ A &= 2(l^2 - lvt) & T/2 \leq t \leq T \end{aligned} \quad (2)$$

conforme esquematiza a figura 1, a quantidade de carga que incide no elemento de tela durante a passagem do feixe é:

$$Q = \int_0^T J A dt = J I^2 T \quad (3)$$

Considerando-se, agora, uma média no tempo, da densidade de corrente:

$$\bar{J}_v = J f_q T \quad (4)$$

obtem-se:

$$JT = \bar{J}_v T_q \quad (5)$$

Essa relação mostra que a obtenção de diferentes luminosidades na tela pode ser conseguida pela variação da densidade de corrente e/ou do tempo de varredura. No caso da televisão convencional o tempo de varredura é mantido constante e a diferença de luminosidade ao longo da imagem é obtida pela variação da densidade de corrente, em função do sinal de vídeo.

No processo que apresenta-se aqui, a densidade real de corrente é mantida constante, e as diferentes luminosidades obtidas pela variação do tempo de varredura.

3. MÉTODO DE OBTENÇÃO DO SINAL

Considera-se uma portadora modulada em amplitude pelo sinal de vídeo. Analisa-se a reprodução luminosa de uma linha qualquer do sinal de vídeo, na tela de um osciloscópio. Por analogia com a televisão convencional pode-se detectar inicialmente o sinal de vídeo em amplitude e, em seguida, modular o eixo de intensidade (Z) do osciloscópio. Obtem-se, assim, uma linha horizontal na tela, cuja luminosidade, em seus vários pontos, depende do valor correspondente do sinal de vídeo. Uma outra maneira de se obter essa linha é a que se descreve a seguir. Injeta-se a portadora modulada pelo vídeo diretamente no ampliador vertical do osciloscópio (eixo Y) e centra-se o sinal na tela. A densidade de cor

rente é mantida constante. Cada elemento de tela constituinte da linha horizontal será varrido em tempo diferente. Isso ocorre porque a velocidade horizontal de deslocamento do feixe é constante e ele deve percorrer espaços diferentes em tempos iguais. Em outras palavras cada ciclo da portadora é completado no mesmo tempo, mas os ciclos têm amplitudes diferentes, que são proporcionais aos valores correspondentes do sinal de vídeo. Recobre-se a tela com uma máscara opaca possuindo uma fresta de largura l coincidente com a linha central da tela. Pode-se, assim, reproduzir a linha do sinal de vídeo com resultados análogos ao caso convencional.

A expressão (5) e as discussões do item anterior garantem a possibilidade de obtenção de equivalência de emissão luminosa, num e noutro processo.

A varredura vertical para prover a formação do quadro pode ser dada, por exemplo, por um mecanismo de puxamento do filme em frente à tela, com velocidade tal que as linhas se registrem nele de modo contíguo.

A figura 2 ilustra uma maneira de se obter o registro fotográfico do sinal.

No caso dos valores normalmente utilizados em televisão para a densidade de corrente, tempo de varredura do elemento de tela, frequência de varredura e as características dos fósforos empregados, demonstra-se que o número de quantidade de luz emitido (por unidade de volume do fósforo da tela) numa varredura é dado, aproximadamente por:

$$L \cong KJT \quad (6) \quad (\text{ver ref. 2})$$

onde K = constante que depende do fósforo utilizado.

Nessas condições obtém-se uma equivalência entre a energia luminosa total emitida pelo elemento de tela nos dois processos.

Efetuarão-se medidas de emissão de luz por telas com 4 tipos diferentes de fósforo utilizando um espectroradiômetro. As figuras 3a, b, c e d apresentam os resultados obtidos. O eixo das luminosidades apresenta apenas os valores obtidos no máximo de emissão; as respectivas curvas espectrais de emissão foram levantadas posteriormente para a determinação dos fatores de conversão. No caso de unidades fotométricas a curva de emissão foi corrigida para a sensibilidade espectral da vista humana.

O eixo horizontal dá a amplitude da portadora em cm na tela. Decompondo a velocidade de deslocamento do feixe nas direções vertical e horizontal obtém-se:

$$\text{componente vertical: } v_y = \frac{d}{dt} (A_0 \text{ sen } w_0 t),$$

$$\text{componente horizontal: } v_x = \text{velocidade de varredura} = \text{constante}$$

A_0, w_0 são o valor de pico e pulsação da portadora, respectivamente.

Deste modo:

$$v_{\text{total}} = \left\{ |\vec{v}_y|^2 + |\vec{v}_x|^2 \right\}^{1/2} \quad (6)$$

Como a portadora está centrada na tela o feixe atinge o elemento de tela da linha central com máxima velocidade vertical. Se a frequência da portadora é muito maior do que a de varredura e seus valores de pico muito maiores do que a largura da fresta (1) pode-se escrever:

$$|\vec{v}_y| \gg |\vec{v}_x|$$

e

$$v_{\text{total máx}} \approx A_0 w_0 \approx 2\pi f_0 A_0 \quad (7)$$

(ver ref. 3 e 4)

Nas condições acima pode-se dizer, com boa aproximação, que o feixe
→ cruza a fresta com velocidade constante, e na direção vertical.

$$\text{Então } T \approx \frac{l}{v_{\text{total máx.}}} \approx \frac{l}{2 f_0 A_0} \quad (8)$$

$$\text{De (6) e (8) conclue-se que: } L \approx \frac{K J}{2\pi f_0 A_0} \quad (9)$$

ou seja, a luz emitida pela tela é inversamente proporcional à amplitude máxima da portadora que, por sua vez, é proporcional ao sinal de vídeo.

Os resultados experimentais mostraram boa concordância com a lei hiperbólica expressa em (9). Os desvios foram identificados como saturação no caso de baixas amplitudes de sinal e controle de intensidade próximo ao fim do curso, e luminosidade de fundo no caso de medidas em osciloscópios de feixe duplo. Os valores utilizados para a densidade de corrente, tempo de varredura do elemento de tela e frequência de varredura são compatíveis com os necessários para validade da expressão (6).

A expressão (6) foi obtida para fósforos, cujos processos físicos envolvidos na emissão de luz são chamados monomoleculares, como é o caso do tipo P 1. No entanto, a evidência experimental mostra que ela se verificou também, para os demais tipos utilizados.

4. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DETECÇÃO-REGISTRO FOTOGRÁFICO

A relação entre a transmissão de um filme negativo comum e a exposição a que ele é submetido é dada por:

$$Tr = \frac{B}{LY} \quad (10) \quad \text{onde } B = \text{constante (ver ref. 5)}$$

Dependendo das condições e tempo de revelação pode-se obter $\gamma=1$, com o que (10) se escreve como:

$$Tr = \frac{B}{L} \quad (11)$$

De (9) e (11) obtém-se

$$Tr = C A_0 \quad (12) \quad C = \text{constante}$$

Por (9) observa-se que a luminosidade emitida é inversamente proporcional à amplitude da portadora, de modo que o filme negativo dá, diretamente, um diapositivo.

A transmissão Tr do diapositivo é dada pela relação entre a luz que nele incide e a que passa. Como na observação de um diapositivo se está interessado na luz que o atravessa, pode-se colocar:

$$L_{\text{final}} = D A_0 \quad (13) \quad D = \text{constante}$$

A expressão (13) mostra que a luminosidade que se observa finalmente na projeção do diapositivo, que representa a imagem, é diretamente proporcional ao sinal de vídeo, que contém a informação original.

5. MODELO MATEMÁTICO DO PROCESSO

Ao registrar a linha central da tela se está fazendo uma amostragem do sinal. Como durante cada ciclo o feixe passa duas vezes pela linha central da tela, se está amostrando com uma frequência $f_a = 2f_0$, onde $f_0 = \omega_0/2\pi$.

Desde que a máxima frequência contida no sinal de vídeo é inferior a f_0 , a frequência de amostragem é adequada à reprodução do sinal.

Pode-se representar o processo por uma função de amostragem $p(t)$ multiplicada pela velocidade $v(t)$, de vez que por (13) e (17) a luminosidade final é

diretamente proporcional a $v(t)$, nos pontos de amostragem.

A portadora modulada pelo vídeo pode ser escrita como:

$$V_{\text{sinal}} = A_0 \text{sen}\omega_0 t \left(1 + \sum_{k=1}^M m_k \text{sen}\omega_k t \right) \quad (14)$$

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 do feixe será:

$$\begin{aligned} \frac{dv_s}{dt} &= \frac{d}{dt} \left\{ A_0 \text{sen}\omega_0 t \left(1 + \sum_{k=1}^M m_k \text{sen}\omega_k t \right) \right\} = \\ &= \omega_0 A_0 \cos\omega_0 t \left(1 + \sum_{k=1}^M m_k \text{sen}\omega_k t \right) + A_0 \text{sen}\omega_0 t \sum_{k=1}^M m_k \omega_k \cos\omega_k t = \\ &= \omega_0 A_0 \cos\omega_0 t + \omega_0 A_0 \cos\omega_0 t \sum_{k=1}^M m_k \text{sen}\omega_k t + A_0 \text{sen}\omega_0 t \sum_{k=1}^M \omega_k m_k \cos\omega_k t \quad (15) \end{aligned}$$

A rigor dever-se-ia incluir uma diferença de fase θ_k para cada componente de modulação mas, além da aleatoriedade do seu valor no sinal real, ela não influi na análise efetuada.

A velocidade dada em (15) é amostrada cada vez que o sinal atravessa a tela. Como, em cada ciclo, ele a atravessa uma vez no sentido da parte superior e em seguida no da parte inferior a função de amostragem $p(t)$ é dada como um trem de pulsos de largura δ e período de repetição T_0 , com valores alternados de amplitude $+1$ e -1 .

Deve-se notar que sob o ponto de vista de emissão de luz é irrelevante se o sinal atravessa a fresta num e noutro sentido, mas o modelo matemático deve, necessariamente, levar isso em conta. O período da função $p(t)$ é $T_0 = 2\pi/\omega_0$. A função é dada por:

$$\begin{aligned}
 p(t) &= \begin{cases} 1 & \text{para } -\delta/2 \leq t \leq \delta/2 \\ 0 & \text{para } \delta/2 < t < T/2 - \delta/2 \\ -1 & \text{para } \frac{T}{2} - \frac{\delta}{2} < t < \delta/2 + T/2 \\ 0 & \text{para } \frac{T}{2} + \delta/2 \leq t \leq T - \delta/2 \end{cases} \quad (16)
 \end{aligned}$$

conforme ilustrado na figura 4. Essa função, colocada em termos de uma série de Fourier dá:

$$p(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\text{sen } \frac{n\pi}{2} \right) \frac{4\delta}{T} \left[\frac{\text{sen}(n\omega_0 \delta/2)}{n\omega_0 \delta/2} \right] \cos n\omega_0 t \quad (17)$$

A expressão final da velocidade amostrada será:

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

$$\begin{aligned}
 v_a(t) &= \omega_0 A_0 \cos\omega_0 t \sum_{n=0}^{\infty} \text{sen}\left(\frac{n\pi}{2}\right) \frac{4\delta}{T} \left[\frac{\text{sen}(n\omega_0 \delta/2)}{n\omega_0 \delta/2} \right] \cos n\omega_0 t + \\
 &+ \omega_0 A_0 \cos\omega_0 t \left(\sum_{k=1}^M m_k \text{sen}\omega_k t \right) \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4\delta}{T} \left[\frac{\text{sen}(n\omega_0 \delta/2)}{n\omega_0 \delta/2} \right] \cos n\omega_0 t \right\} + \\
 &+ A_0 \text{sen}\omega_0 t \left(\sum_{k=1}^M m_k \omega_k \cos\omega_k t \right) \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \text{sen}\left(\frac{n\pi}{2}\right) \frac{4\delta}{T} \left[\frac{\text{sen}(n\omega_0 \delta/2)}{n\omega_0 \delta/2} \right] \cos n\omega_0 t \right\}
 \end{aligned} \quad (18)$$

Transformando os produtos das funções trigonométricas em somas, escrevendo os três primeiros termos da série explicitamente e tomando a transformada de Fourier tem-se:

$$\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 \right) m_k \times \right. \\
&\times \left(\delta \left[\omega + (2\omega_0 + \omega_k) \right] - \delta \left[\omega - (2\omega_0 - \omega_k) \right] - \right. \\
&- \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. \\
&- \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 \right) m_k \right. \\
&\left. \left. \left(\delta \left[\omega + (2\omega_0 - \omega_k) \right] - \delta \left[\omega - (2\omega_0 - \omega_k) \right] \right) \right\} - \\
&- 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\{ \left(\frac{\omega_0 A_0 \delta}{T} \right. \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. \left. + \frac{\text{sen}(5\omega_0 \delta/2)}{5\omega_0 \delta/2} \right] \omega_k \right) 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 \right) 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) \right) \} + \dots + \dots \} \quad (19)
\end{aligned}$$

Essa expressão dá as componentes da velocidade em frequência conforme mostra a figura 5. A verificação do espectro obtido por resolução gráfica pode ser feito sem dificuldades, empregando-se as propriedades da transformada de Fourier e convolução.

Como se deseja a reprodução da faixa básica do sinal de vídeo, deve-se filtrar o espectro obtido. O próprio sistema tela, objetiva e filme pode atuar como um filtro passa-baixa eliminando as componentes de ordem superior.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de detecção fotográfica aqui exposto apresenta boa linearidade além de prescindir de detecção prévia do sinal em amplitude.

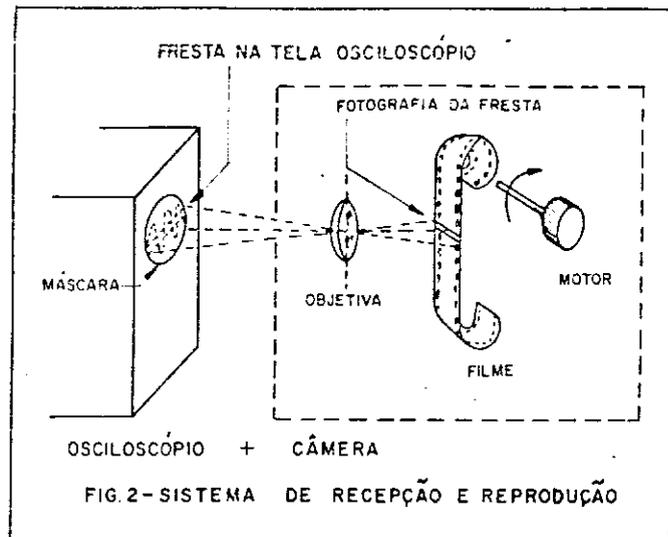
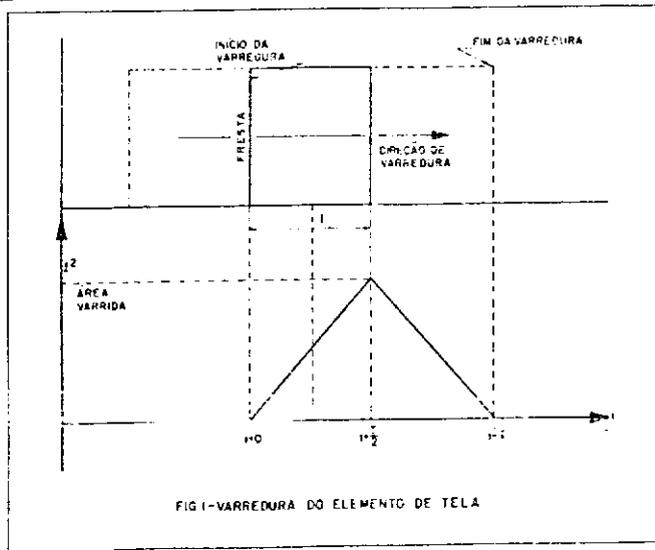
O processo de detecção poderá, eventualmente, fornecer resultados satisfatórios no caso de modulação em frequência. Nesse caso, porém, a maior ou menor luminosidade será dada por maior ou menor concentração de focos luminosos ao longo da linha, conforme a frequência da portadora.

Um modelo matemático diferente deverá ser formulado, constituindo tópico interessante para futuros trabalhos.

Apresentar-se-á em artigo posterior uma aplicação do método descrito para a reprodução de fotografias transmitidas por satélites meteorológicos. Serão então, mostrada a confirmação experimental da expressão (13) e a curva de resposta em frequência obtida para o sistema tela-objetiva-filme.

REFERÊNCIAS

- 1 - CALHEIROS, R.V. - "Um método de reprodução de fotografias de satélites meteorológicos"- LAFE-160, INPE, Fevereiro, 1971.
- 2 - BRIL, A. and KRÖGER, F.A. - "Saturation of Fluorescence in TV Tubes"- Philips Technical Review, vol. 12, nº 4.
- 3 - "Principles of Cathode-Ray Tubes, Phosphors and High Speed Oscillography" - Hewlett Packard Application Note, 115.
- 4 - CZECH, J. - "Oscilloscope Measuring Techniques" - Philips Technical Library, 1965.
- 5 - "Kodak Plates and Filmes" - Kodak Technical Data, P.9.



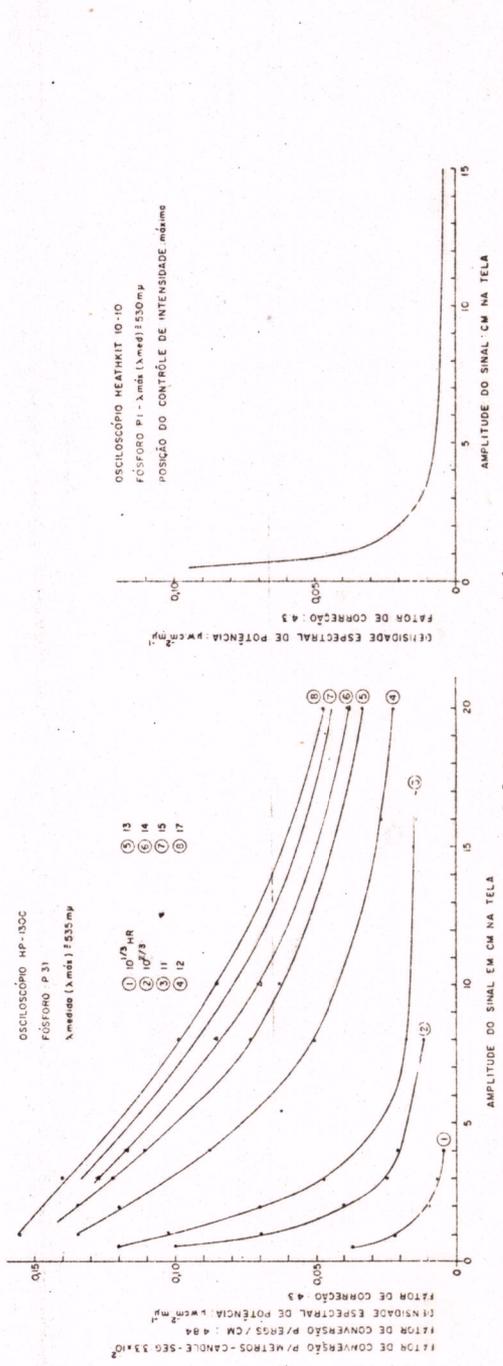
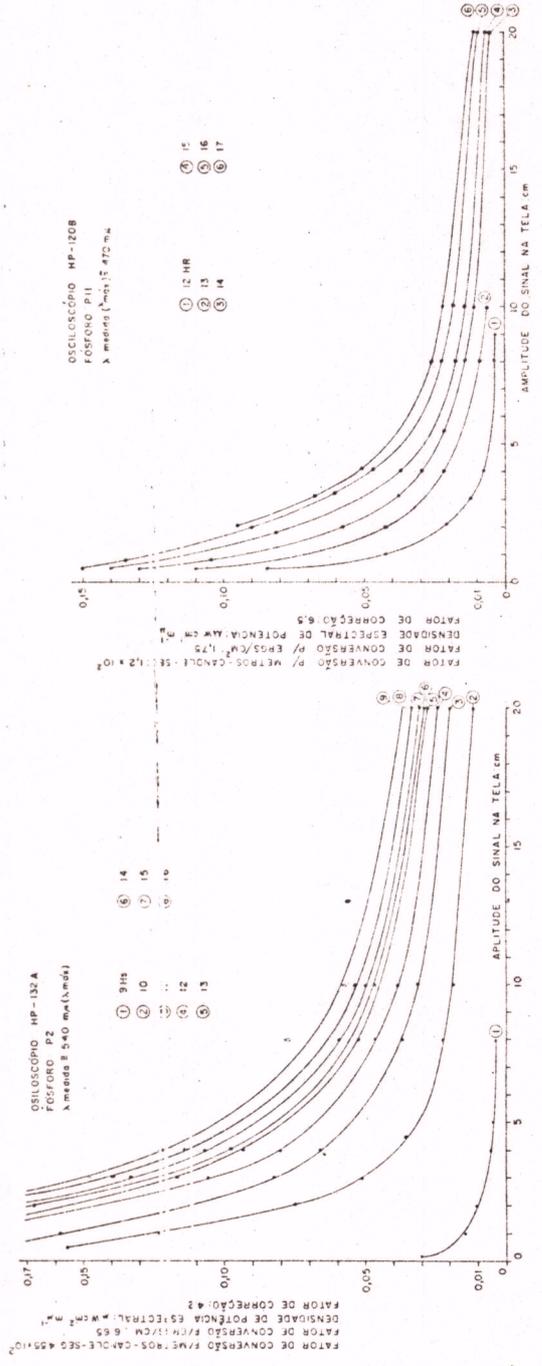


Fig. 3 - Curvas de luminosidade em função da amplitude do sinal

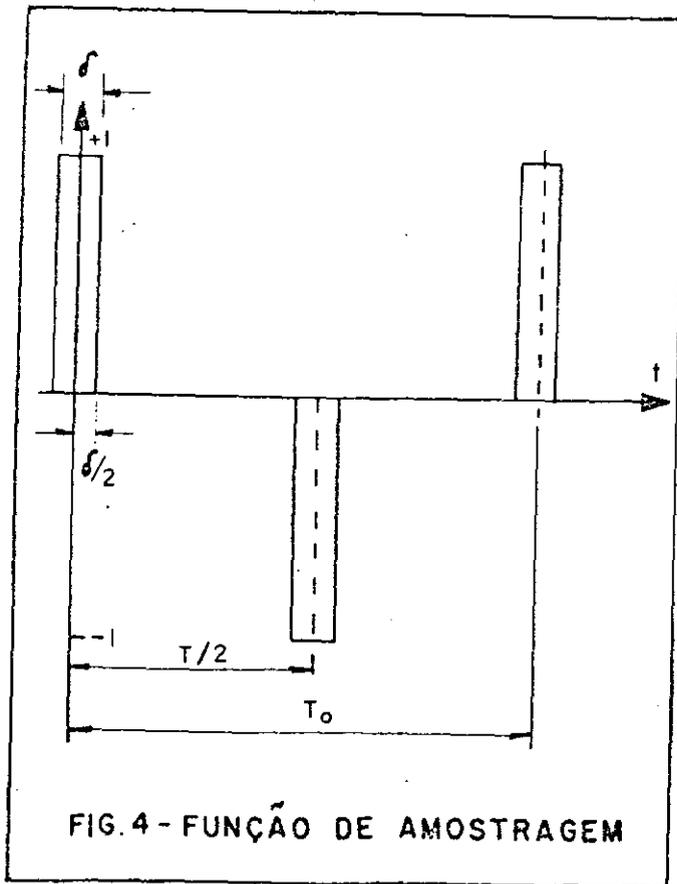


FIG. 4 - FUNÇÃO DE AMOSTRAGEM

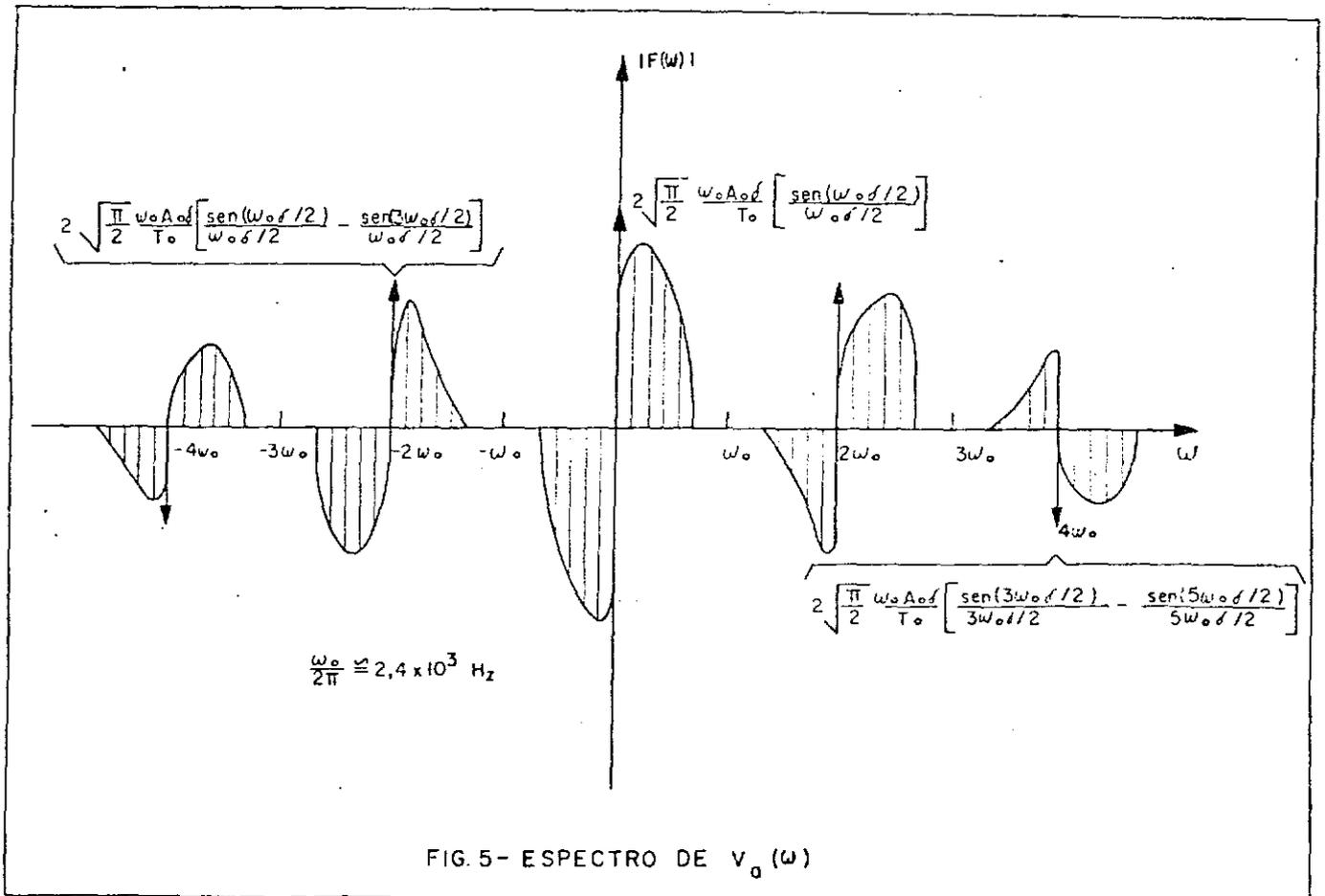


FIG. 5 - ESPECTRO DE $V_0(\omega)$