

AMOSTRAGEM ESPACIAL E TEMPORAL

PTC3547 – CODIFICAÇÃO E TRANSMISSÃO MULTIMÍDIA

Guido Stolfi – EPUSP – 03/2025

1. Amostragem de uma Imagem em Movimento

Matematicamente, uma imagem pode ser entendida como a projeção óptica de uma região do espaço sobre um plano, cujo iluminamento pode ser descrito por uma função bidimensional $u = f(x,y)$. Da mesma maneira, uma imagem em movimento pode então ser descrita como um sinal (ou evento) contínuo, ocorrendo em um espaço tridimensional:

$$u = f(x, y, t) \quad (\text{iluminamento} \times \text{dimensões horizontal, vertical e temporal}).$$

No entanto, um sinal elétrico, na forma pela qual pode ser transmitido por um canal de comunicação convencional, é unidimensional (voltage \times tempo). Para que uma imagem em movimento possa ser transmitida, precisamos reduzir a sua dimensionalidade. Em geral, utilizamos para isso um processo de amostragem que consiste de duas etapas:

1. *Amostragem temporal*: é a divisão da imagem em *fotogramas* ou *quadros* (“frames”) sucessivos, como ocorre no cinema;
2. *Amostragem Espacial (Varredura ou "Raster Scan")*: a divisão da imagem em linhas paralelas, ao longo das quais é feita a medida da luminosidade. O sinal temporal resultante é denominado *sinal de vídeo*.

Em uma câmara de TV convencional, a imagem é projetada por um sistema de lentes sobre uma superfície foto-sensível, na qual o iluminamento resultante gera uma distribuição de cargas elétricas. Dentro do intervalo de tempo correspondente a um *quadro*, estas cargas são acumuladas e coletadas sequencialmente por um processo adequado (por exemplo, pela leitura através de um feixe de elétrons, ou por transferência de cargas entre células capacitivas), produzindo um sinal elétrico sequencial correspondente ao iluminamento em cada ponto dessa superfície.

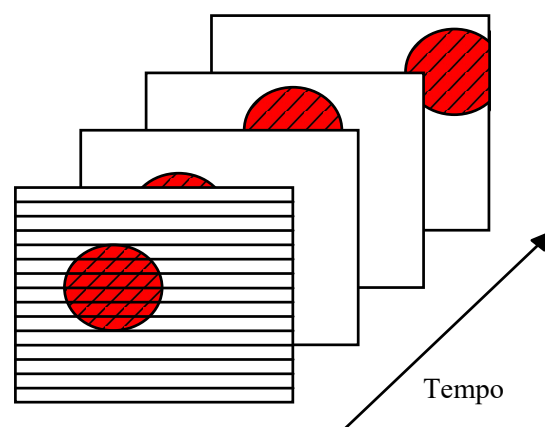


Fig. 1.1 - Varredura e Amostragem Temporal

2. Critérios de Amostragem Temporal

Há 3 critérios importantes que influenciam a escolha da taxa de amostragem temporal, e que devem ser considerados na padronização de um sistema de televisão:

- *Remanência da visão*: a ilusão de movimento contínuo é obtida quando temos sequências sucessivas com mais do que 15 a 20 quadros por segundo (O cinema usava inicialmente 12 a 16 fotogramas por segundo; atualmente usa 24). Abaixo dessa taxa, a visão percebe as imagens individualmente;
- *Cintilação*: a frequência acima da qual nossa visão deixa de perceber cintilação na imagem depende de vários fatores, entre os quais a luminosidade e a extensão visual do objeto luminoso. A tabela 2.1, por exemplo, mostra a relação entre a luminância da tela de um monitor de vídeo e as correspondentes frequências críticas de cintilação, válidas para 95% da população (ISO/TC159/1987), referentes a campos de visão de 10 e 70 graus. No caso da projeção de cinema, operando em baixos níveis de luminância, 48 imagens por segundo são suficientes, e são obtidas por dupla exposição de cada fotograma. A luminância típica de uma tela de televisão exige pelo menos 50 a 60 Hz.
- *Batimentos e interferências com a rede de distribuição de energia elétrica*: seja na iluminação do estúdio ou nos circuitos do receptor de TV, interferências com a frequência da rede elétrica causariam flutuações de luminosidade ou padrões não estacionários na imagem, caso a frequência de amostragem temporal seja diferente da ciclagem da rede elétrica.

Os dois primeiros fatores derivam do processo de captura de imagens pelo sistema visual humano, principalmente devidos à velocidade dos movimentos sacádicos. O terceiro fator é tecnológico, embora também relacionado à percepção de cintilação das lâmpadas.

Esses fatores levaram à adoção da taxa de 60 imagens por segundo nos países em que a energia elétrica é distribuída em 60 Hz (América do Norte, Japão e Brasil, entre outros), e de 50 imagens por segundo na Europa e na maioria dos demais países. Alguns monitores de TV modernos podem trabalhar com múltiplos dessas frequências (100 ou 120 Hz), para eliminar a percepção de cintilação e melhorar a percepção de movimentos.

Luminância da Tela (Nits)	Área da Pupila (mm ²)	Iluminamento Retinal (Trolands)	Freq. Crítica p/ 10° (Hz)	Freq. Crítica p/ 70° (Hz)
10	10.75 ~ 19.63	215 ~ 392	48.4 ~ 54.4	60.6 ~ 66.9
30	9.08 ~ 15.21	544 ~ 912	57.6 ~ 62.8	70.2 ~ 75.5
100	8.04 ~ 11.34	1608 ~ 2268	68.9 ~ 71.9	81.8 ~ 84.9
300	7.07 ~ 9.62	4242 ~ 5772	78.2 ~ 81.3	91.4 ~ 94.6
1000	6.16	12320	88.9	102.4
3000	4.52	27120	96.7	110.5
10000	3.14	62800	105.1	119.2

Tabela 2.1 - frequências Críticas de Cintilação

3. Resolução Espacial de um Sistema de Reprodução de Imagens

Para podermos definir a quantidade de linhas em que devemos subdividir cada quadro, precisamos analisar a relação entre o tamanho aparente da imagem de TV (ou seja, o ângulo subtendido pela imagem, observada a uma distância padrão de visualização) e as características de acuidade visual do observador, necessárias para garantir qualidade aceitável de imagem.

3.1 Televisão Convencional (*Standard Definition*)

Uma vez que o cinema adotava originalmente uma relação de aspecto de 4:3 (largura x altura), a TV estabeleceu a mesma proporção da imagem, garantindo compatibilidade tanto com o material disponível para exibição quanto com os equipamentos existentes (especialmente lentes).

Por outro lado, critérios de aceitação do produto determinaram que um sistema de TV deveria contemplar a reprodução de imagens abrangendo um ângulo de visão de cerca de 10 graus no sentido horizontal e 7,5 graus na vertical. Isto corresponde a uma tela de 40 x 30 cm a uma distância aproximada de 2 metros do observador. Esta dimensão é suficiente para exibir a fisionomia de uma pessoa, à distância na qual costumamos conversar com pessoas (vide figura abaixo).

Considerando então o limite de resolução visual como sendo 1 minuto de grau, teríamos necessidade de cerca de 450 linhas de varredura para reproduzir texturas com frequências espaciais no limite da percepção visual.

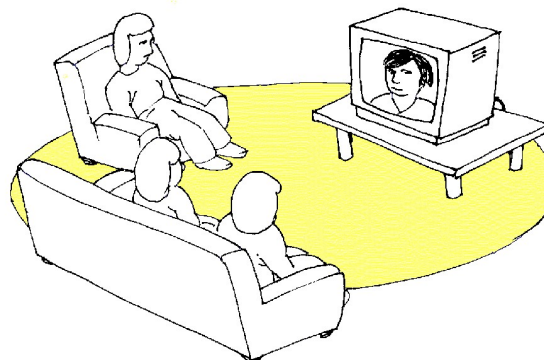
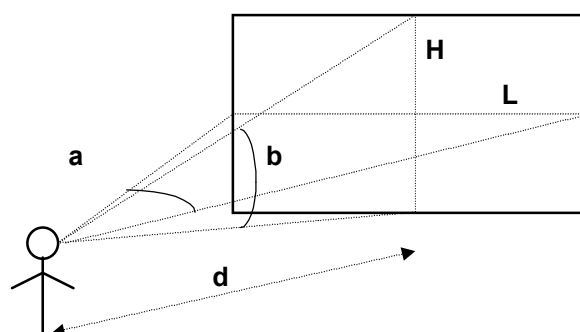


Fig. 3.1 – Condições de Visualização da TV

Sabe-se que, na prática, a condição preferida de visualização de uma imagem de TV convencional corresponde a uma distância d entre o observador e a tela igual a 7 vezes a altura H da imagem.

Isto significa que os ângulos a e b são respectivamente 8 e 11 graus, nas condições típicas de visualização, ou seja, bastante próximas das condições assumidas originalmente no desenvolvimento da TV convencional.

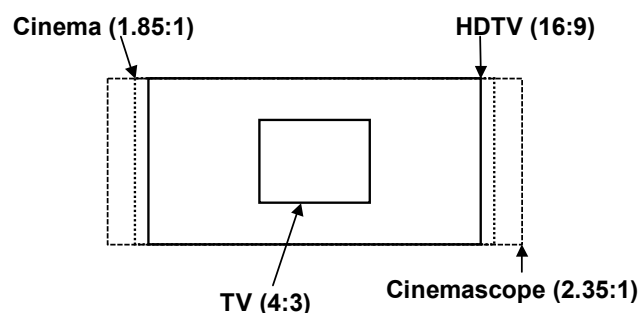


3.2 TV de Alta Definição

Pesquisas feitas no Japão pela NHK, na década de 1970, apontaram a viabilidade de um formato de TV capaz de proporcionar “uma nova experiência visual” ao espectador, similar à sensação conferida pelo cinema de tela larga. Estas pesquisas culminaram com a adoção de uma tela com proporções de 16:9, dimensionada para visualização sob um ângulo horizontal de 30 graus, num formato denominado *Hi-Vision*.

Além de aproveitar melhor o material cinematográfico disponível, este formato (atualmente denominado de HDTV ou TV de Alta Definição) abrange parte do campo de visão periférica do observador. Isto proporciona um nível mais intenso de ilusão de realidade, através da manipulação da sensação de movimento e das referências espaciais do espectador.

A figura a seguir mostra as proporções relativas dos formatos de TV convencional e HDTV, bem como formatos correntes de filmes cinematográficos de tela larga.



3.3 Aspectos Relacionados à Qualidade de uma Imagem

Alguns dos fatores que caracterizam a qualidade de uma imagem (fotografia, cinema, televisão etc.) são o *brilho*, *contraste* e *nitidez*:

Brilho é a percepção subjetiva de luminosidade correspondente à região de maior luminância de uma imagem; equivale à luminância corrigida pelo fator Gama.

Contraste é a relação entre as luminâncias correspondentes às regiões mais claras e as mais escuras de uma imagem ou de uma textura.

Já a **nitidez** de uma imagem pode ser definida como a resposta espacial a transições ou contornos entre regiões claras e escuras da imagem; pode ser associada ao conteúdo espectral em altas frequências espaciais (numa analogia com o "tempo de subida" do sinal de luminosidade, ou a "resposta em frequência" do sistema de transmissão).

Um critério objetivo para definirmos a *nitidez* de um processo de reprodução de imagens é dado pela curva de resposta em frequência espacial do sistema, que recebe o nome de "resposta de abertura" ou *Função de Transferência de Modulação* (MTF).

A figura 3.1 mostra o que ocorre, por exemplo, em uma câmara de TV, ao ser focalizado um padrão de barras alternadas com contraste máximo (preto/branco). A câmara não realiza a amostragem da luminância da imagem em um ponto de dimensões infinitesimais, mas sim dentro de uma região definida como "abertura equivalente de captura".

A resposta da câmara será então proporcional à luminância *média* dentro dessa abertura. Enquanto a largura das barras da imagem for maior que o diâmetro da abertura equivalente, o sinal gerado pela câmara preservará o contraste total da imagem (ponto A na figura). À medida que as barras tornam-se mais estreitas, a resposta diminui em amplitude (pontos B e C).

Quando o contraste reproduzido atingir a amplitude do nível de ruído da imagem, tornando-se imperceptível, dizemos que foi alcançada a *resolução limite* do sistema.

Quando a luminância das barras possui forma de onda retangular (como exemplificado na figura 3.1), a curva de resposta obtida é denominada *função de transferência de contraste* (CTF). Quando as barras possuem variação senoidal de luminância, a resposta obtida é a MTF do sistema.

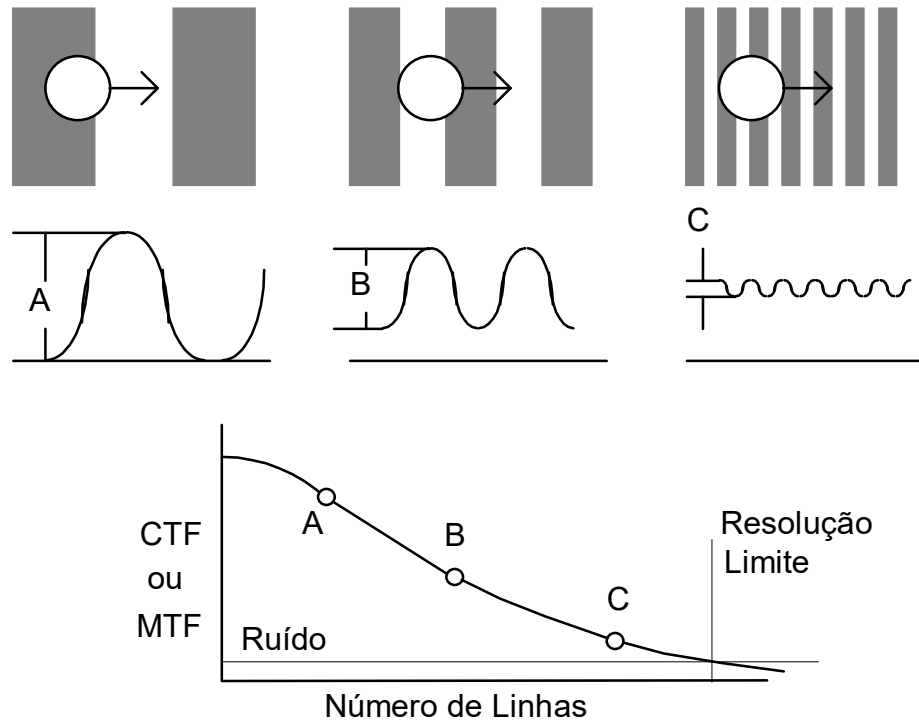


Fig. 3.1 - Função de Transferência de Contraste

Podemos notar que a resposta de abertura equivale a uma *convolução* da imagem original por uma *resposta ao impulso* bidimensional, correspondente à abertura equivalente do sistema. No domínio das frequências espaciais, isso é equivalente a dizer que o espectro da imagem resultante é o produto do espectro (bidimensional) da imagem original pela resposta em frequência espacial do sistema, que é dada pela própria MTF.

A MTF total de uma associação série de dois ou mais elementos (por exemplo: lente + câmara + canal de comunicação + monitor + visão humana) é o produto das MTF individuais de cada elemento.

Usualmente, a curva de resposta em frequência é dada em função do *número de linhas* (brancas + pretas) que cabem na dimensão *vertical* da imagem. Cada 2 linhas (1 preta e 1 branca) correspondem a um ciclo de frequência espacial.

Na definição dos parâmetros de um sistema de televisão, é importante dimensionarmos a MTF global de modo que a nitidez da imagem final seja compatível com a percepção de detalhes proporcionada pela acuidade da visão humana (Figura 3.2).

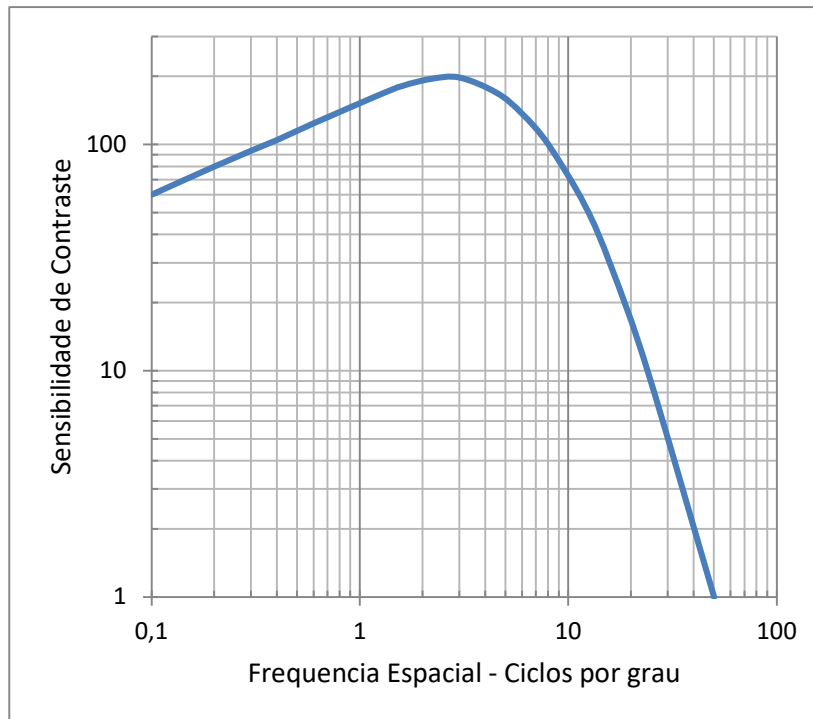


Fig. 3.2 - Função de Transferência de Modulação da Visão Humana

O primeiro sistema de TV comercial (Padrão “M” para TV preto-e-branco) adotou uma resolução vertical máxima de 340 linhas para o conteúdo da imagem, sendo que são necessárias na prática 480 linhas de varredura para reproduzir adequadamente imagens com essa frequência espacial.

3.4 Sobreamostragem – fator de Kell

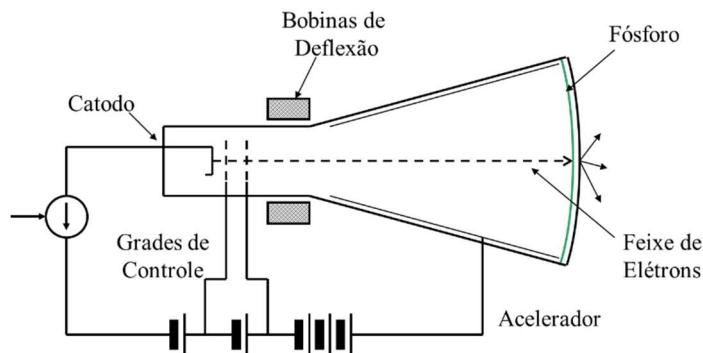
A relação entre a resolução vertical efetiva e o número de linhas de varredura recebe o nome de *Fator de Kell*, que nada mais é que a margem de segurança entre a máxima frequência espacial do sinal (= número de linhas ÷ 2) e a frequência de Nyquist do processo de amostragem vertical (= número de linhas da varredura ÷ 2). Um valor experimentalmente adequado para o Fator de Kell é da ordem de 0,7.

4. Requisitos de Banda Passante para Transmissão de TV Analógica

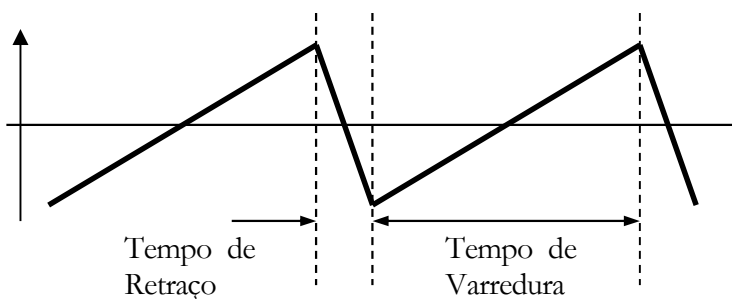
Se considerarmos que a resolução no sentido horizontal deve ser equivalente à vertical, a TV deve ser capaz de reproduzir $4/3 \times 340 = 453$ linhas verticais alternadas dentro da largura da imagem; isso equivale a 453 semiciclos de um sinal senoidal. O sinal de vídeo a ser transmitido (considerando 480 linhas de amostragem e 60 quadros de varredura) ocuparia assim uma banda de:

$$B_w = \frac{1}{2} \times 453 \times 480 \times 60 = 6,52 \text{ MHz}$$

Por outro lado, originalmente os receptores utilizavam cinescópios (tubos de raios catódicos - TRC), nos quais um feixe de elétrons, com intensidade modulada pelo sinal de vídeo, varre uma tela foto-emissora (chamada de “fósforo”). A deflexão do feixe de elétrons no TRC era feita através de campos magnéticos, produzidos por *bobinas de deflexão*, nas quais injetam-se correntes com forma de onda semelhante a um dente-de-serra.



A indutância dessas bobinas impede que a corrente de deflexão inverta a polaridade instantaneamente ao final de cada linha de varredura; tornou-se necessário admitir um tempo de *retraço*, durante o qual o sinal de vídeo deve manter-se em *apagamento*.



O retraço horizontal (para televisão convencional) foi adotado como sendo da ordem de 20% do tempo de varredura, enquanto que o retraço da varredura vertical é de cerca de 9%. Este tempo é desperdiçado pelo sistema de transmissão.

Considerando a necessidade desta margem de segurança devida ao retraço, a banda B_w ocupada pelo sinal de vídeo seria de

$$B_w = \left(\left(\frac{1}{2} \times 453 \right) \times 1,2 \right) \times (480 \times 1,09) \times 60 = 8,5 \text{ MHz}$$

Este valor é excessivamente alto, especialmente considerando a tecnologia de radiodifusão disponível na década de 1940 (mesmo usando modulação AM-VSB). Assim sendo, para proporcionar uma redução nos requisitos de banda passante, adotou-se o processo de *entrelaçamento* (figura 5.1).

5. Entrelaçamento

Reproduzindo alternadamente apenas as linhas ímpares e depois as pares de uma estrutura de varredura, separadas assim em *campo ímpar* e *campo par*, consegue-se reduzir a taxa de imagens para 30 *quadros* completos por segundo, mantendo no entanto uma amostragem temporal de 60 campos por segundo (Figura 5.1). Uma vez que o olho humano não é sensível à cintilação de detalhes de pequenas dimensões, o entrelaçamento não é perceptível para imagens "normais", que são caracterizadas por contornos suaves e não alinhados com a estrutura de varredura. Evidentemente este argumento não é válido para imagens sintéticas, como em monitores de computador, que podem ser fortemente alinhadas com a estrutura de varredura. Neste caso, demanda-se varredura *progressiva* (não entrelaçada).

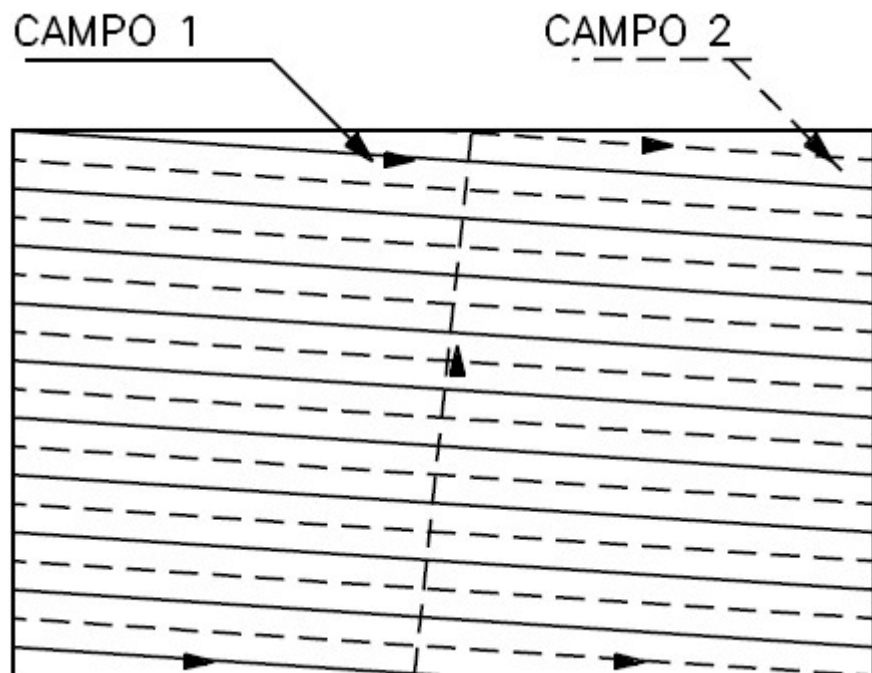


Fig. 5.1 - Entrelaçamento

O entrelaçamento é obtido, na prática, fazendo com que a frequência da varredura horizontal seja um múltiplo ímpar da metade da frequência vertical. Considerando 480 linhas ativas e um período de retraço vertical de 9%, o padrão "M" adotou 525 linhas por quadro, ou seja, 262,5 linhas por campo. (Figura 5.2)

Com o entrelaçamento, a ocupação de banda do sinal de vídeo passa a ser de

$$B_w = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \times 453 + 20\% \right) \times (525) \times 60 = 4,2 \text{ MHz}$$

Na figura 5.3 temos curvas típicas de MTF vertical e horizontal para um sistema de TV completo. No sentido vertical, os fatores que determinam a MTF são principalmente o sistema óptico (lentes) da câmara e a abertura equivalente dos feixes de elétrons no sensor de imagem e no cinescópio. No sentido horizontal, há ainda a influência da resposta em frequência completa (banda passante) do canal de comunicação.

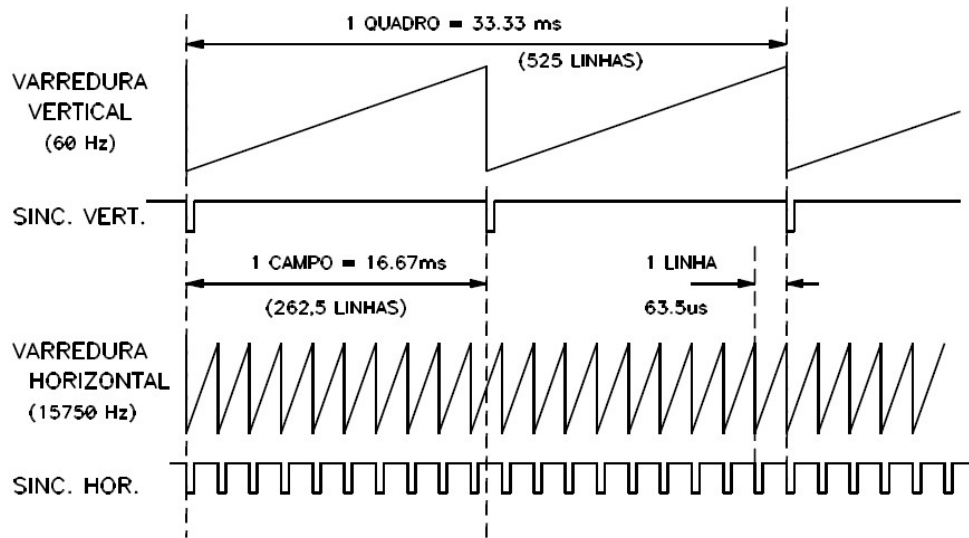


Fig. 5.2 - Varredura com Entrelaçamento

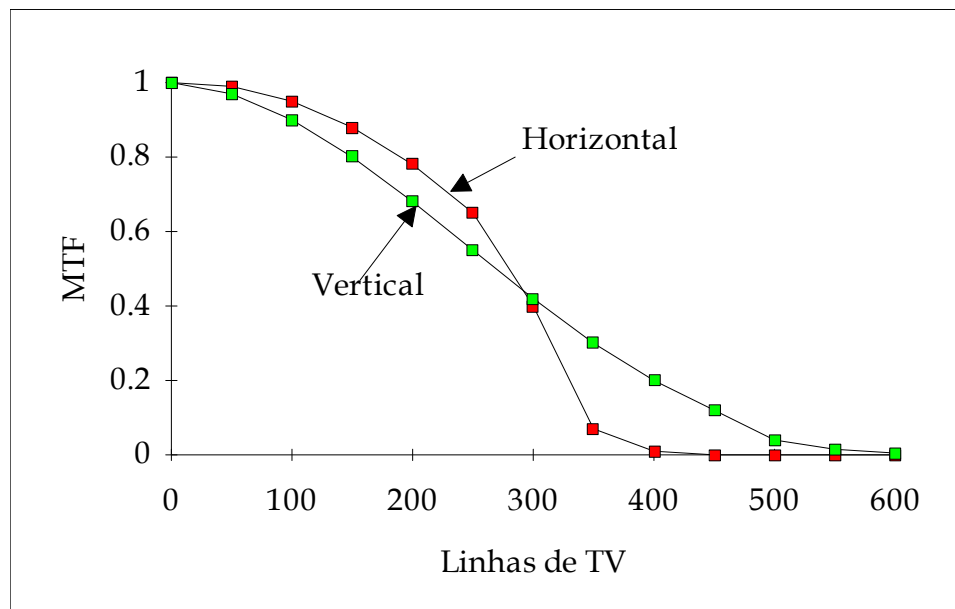


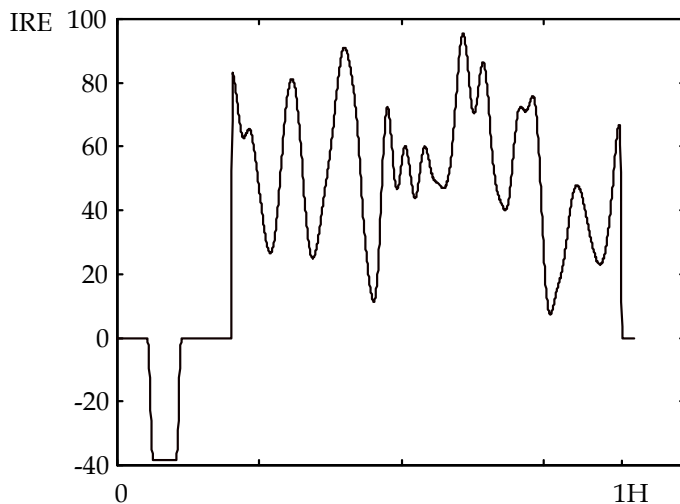
Fig. 5.3 - Função de Transferência de Modulação para TV

6. Estrutura do Sinal de Vídeo Composto Analógico

A recomendação EIA RS-170 da *Electronic Industries Association* definiu um padrão para interconexões de sinais analógicos de vídeo, correspondentes à varredura de imagens monocromáticas, denominado *signal de vídeo composto*. Este sinal carrega ao mesmo tempo a informação de luminância da imagem (corrigida pelo fator *gama*) e sinais de sincronismo para acionamento da varredura (horizontal e vertical) no receptor. Sua amplitude é de 1 Volt pico-a-pico, sobre impedância de carga de 75 Ohms, onde a tensão de 0,3V corresponde ao nível de preto e 1,0V corresponde ao branco máximo.

O *sincronismo* é transmitido por pulsos em 0 Volts (abaixo do nível de preto) durante o período de *apagamento* ou *retraço horizontal* (ver fig. 6.1)

Para uniformizar medidas tomadas em diversos pontos de um sistema de TV, o IRE (*Institute of Radio Engineers*) introduziu uma unidade arbitrária de medida, definida como 1/140 da amplitude pico-a-pico do sinal de vídeo monocromático. Nominalmente, 1 unidade IRE equivale a 7,14 mV; nesta escala, o nível de branco corresponde a 100 IRE, o preto a 0 IRE e o pulso de sincronismo está em -40 IRE (excursão total: 1 Vpp)



Período Horizontal: $1H = 63,56 \mu s$

Apagamento Horizontal: $10,9 \pm 0,2 \mu s$

Pulso de Sincronismo: $4,7 \pm 0,1 \mu s$

Pórtico Frontal: $0,02H = 1,3 \mu s$

Amplitude do Sinc.: 40 IRE (286 mV)

Amplitude Total do Sinal de Vídeo : 140 IRE
(1 Volt)

(1 unidade IRE = 7,14 mV)

Fig. 6.1 - Sinal de Vídeo Composto (RS-170)

7. Sincronismo

A transmissão de TV analógica depende do perfeito sincronismo entre as varreduras da imagem efetuadas pela câmara e pelo dispositivo de visualização no receptor. Para isso é necessário transmitir sinais de sincronismo vertical e horizontal (ver fig. 5.1) juntamente com o sinal de vídeo, aproveitando os períodos de apagamento. Na fig. 7.1 temos a composição desses sinais; a informação de sincronismo horizontal está contida nas transições negativas do *sincronismo composto*, enquanto que o sincronismo vertical está contido no valor médio (definido pela largura dos pulsos) do sinal. A intenção é que o receptor detecte o sincronismo horizontal utilizando um filtro passa-altas (diferenciador), e o vertical por um passa-baixas (integrador).

Para garantir o correto entrelaçamento, o sincronismo vertical ocorre alternadamente em fase com o sincronismo horizontal (campos ímpares) ou defasado de meia linha (campos pares).

A figura 7.2 mostra a separação do sincronismo horizontal, a partir do sincronismo composto, por um filtro passa-altas. Os pulsos negativos disparam a varredura horizontal no receptor.

7.1 Pulsos de Equalização

Durante uma certa parte do tempo de retraço vertical, são introduzidos *pulsos de equalização* no meio de cada linha. Estes pulsos têm a finalidade de evitar assimetrias na detecção do sincronismo vertical entre os dois campos, o que poderia prejudicar o entrelaçamento no receptor.

A figura 7.3 mostra a separação do sincronismo vertical através de um filtro passa-baixas. Observa-se que pode ocorrer instabilidade na detecção do sincronismo, devido ao fato de que as formas de onda são diferentes para os campos par e ímpar.

Na figura 7.4, pode-se observar que a introdução dos pulsos de equalização elimina a instabilidade, deixando ambos os campos com a mesma forma de onda.

A ocorrência de pulsos espúrios no meio de uma linha não afeta a varredura, pois estes pulsos são rejeitados pelo oscilador horizontal.

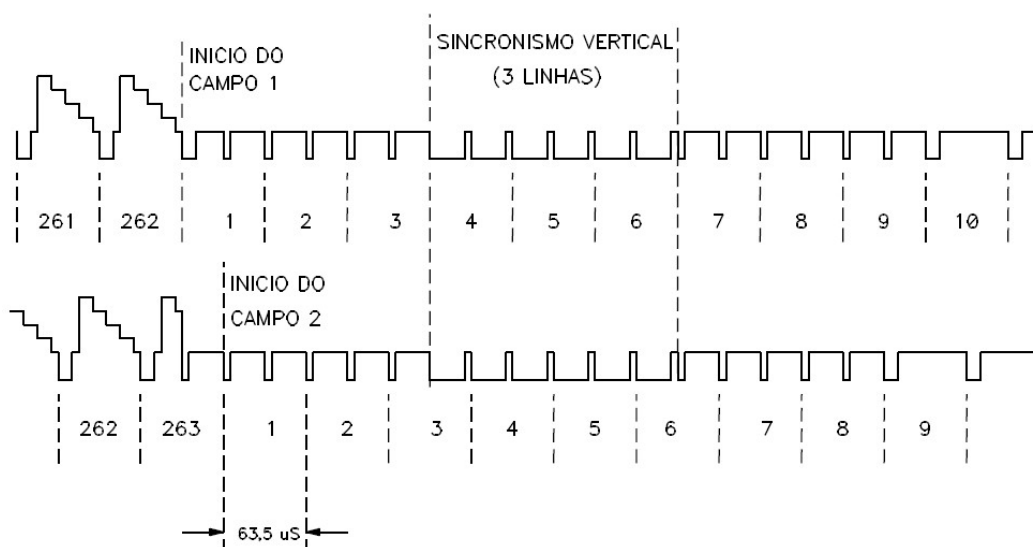


Fig. 7.1 - Sincronismo Composto com Entrelaçamento

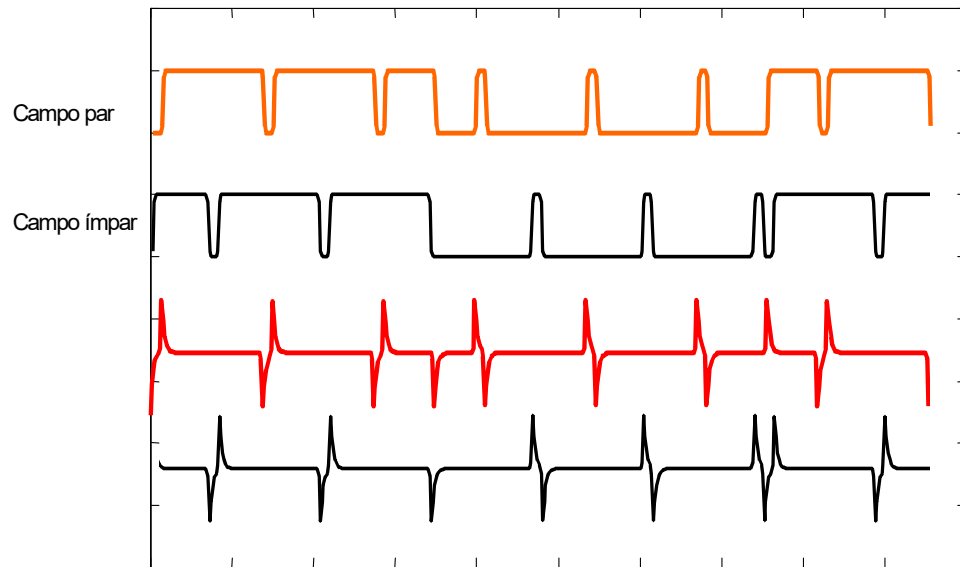


Fig. 7.2 – Separação do Sincronismo Horizontal

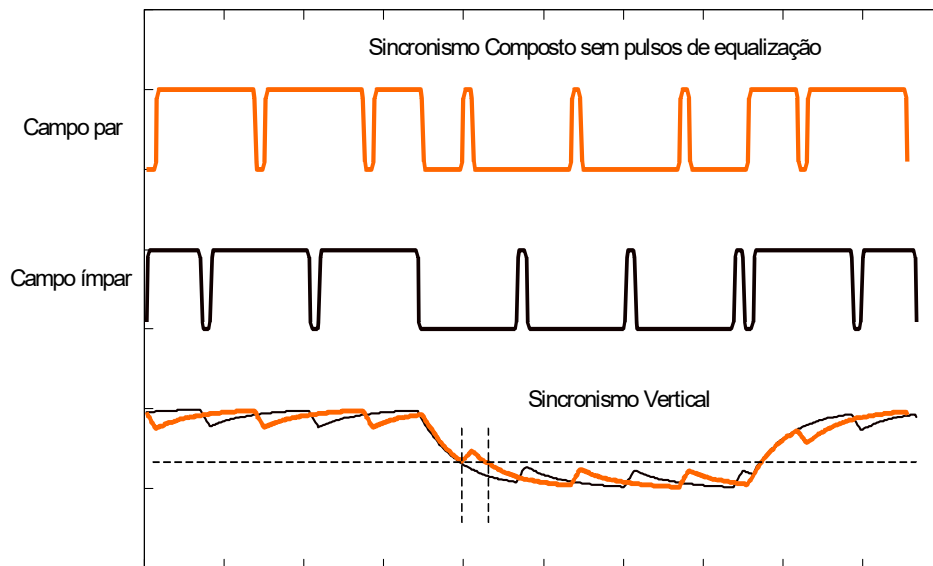


Fig. 7.3 – Separação do Sincronismo Vertical (sem Pulsos de Equalização)

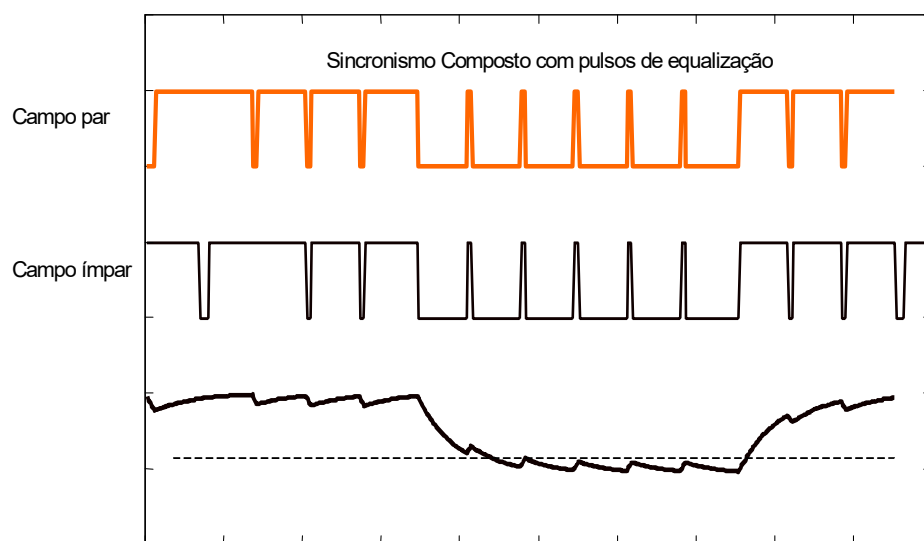


Fig. 7.4 – Separação do Sincronismo Vertical (com Pulsos de Equalização)

7.2 Pórticos no Pulso de Sincronismo Horizontal

O pulso de sincronismo horizontal é ladeado por dois trechos de sinal em nível de preto (0 IRE), denominados *pórtico frontal* (“*front porch*”) e *pórtico posterior* (“*back porch*”). A função do pórtico frontal é evitar a influência do nível de luminosidade da imagem no instante de detecção do sincronismo horizontal, especialmente quando o canal de comunicação provoca limitação de banda (ver fig. 7.5).

O pórtico posterior é utilizado como referência de nível de preto da imagem. O sinal de vídeo composto RS-170 usualmente é acoplado em AC, o que acarreta perda da componente DC e consequente oscilação do nível de referência do sincronismo. Os receptores possuem um circuito, denominado *grampeador* (“*clamp*”), cuja função é manter o intervalo correspondente ao pórtico posterior numa tensão de referência constante, correspondente ao nível de preto, conforme ilustrado na figura 7.6.

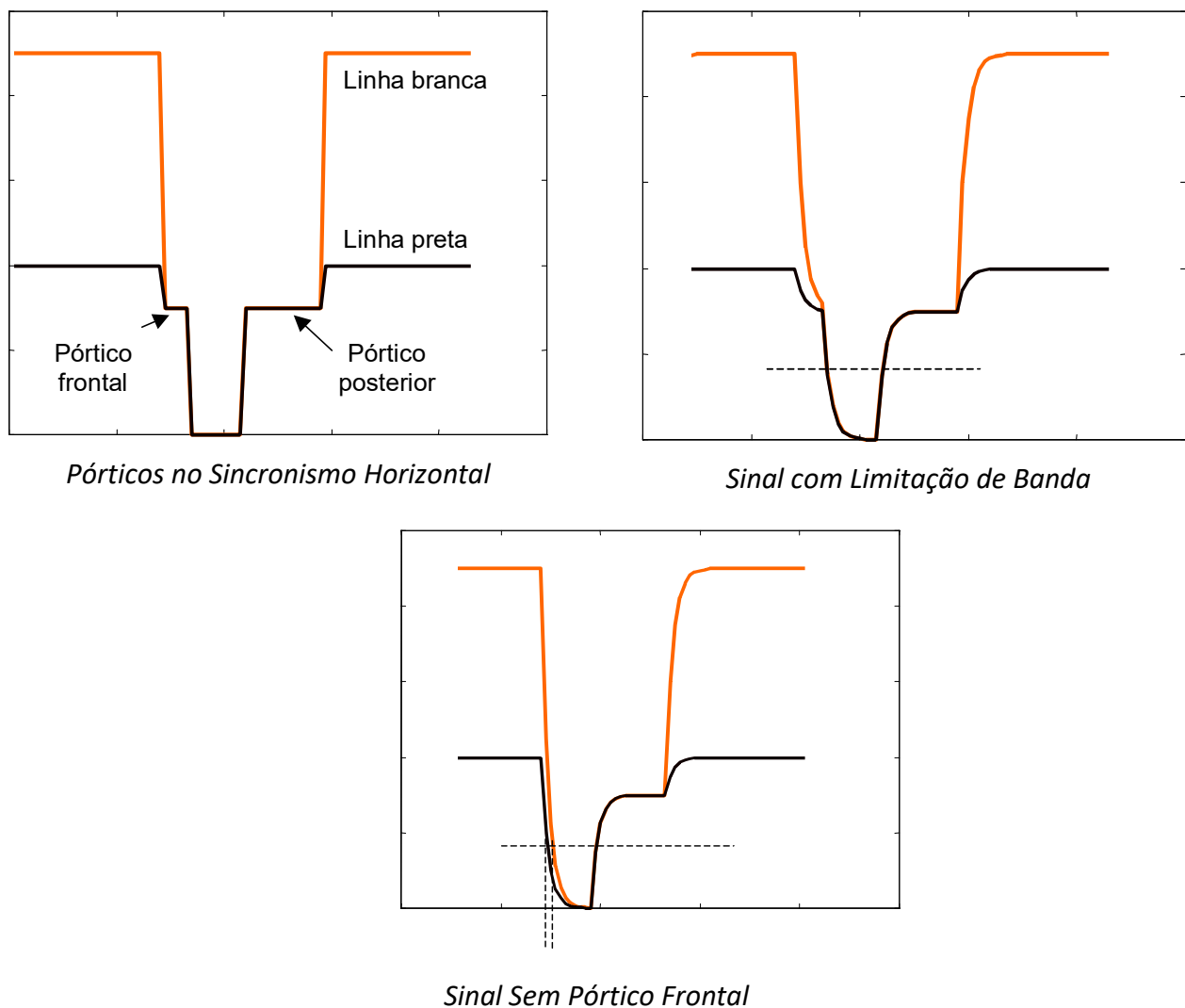


Fig. 7.5 – Pórticos no Sincronismo Horizontal

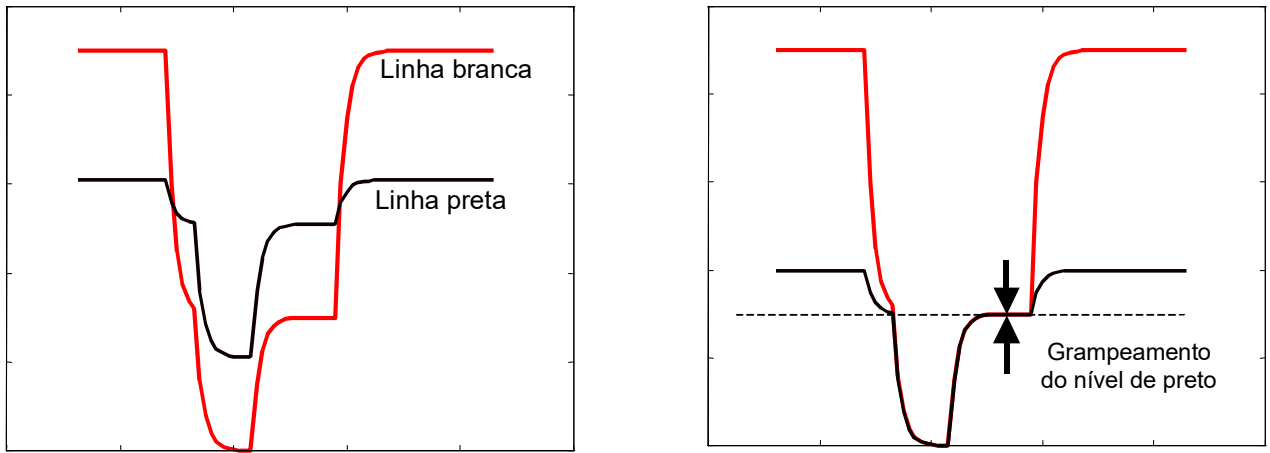


Fig. 7.6 – Acoplamento AC e Grampeamento no Pórtico Posterior

8. Amostragem Temporal

A estrutura de amostragem temporal da varredura entrelaçada pode ser representada pela figura 8.1, onde cada ponto corresponde a uma linha de varredura. Para simplificação, estamos analisando apenas uma coordenada espacial (y) e a coordenada temporal (t).

A amostragem de um objeto em movimento se dará em posições diferentes a cada campo e a cada linha, de modo que um quadro completo, obtido pela superposição de dois campos, se apresentará como na fig. 8.2.

Pela observação da figura 8.2, podemos prever que um objeto que se mova *verticalmente* com velocidade equivalente a uma linha por campo será representado sempre com metade da resolução vertical; a estrutura de linhas de varredura será visível. Esta velocidade corresponde à *velocidade vertical crítica* para essa amostragem.

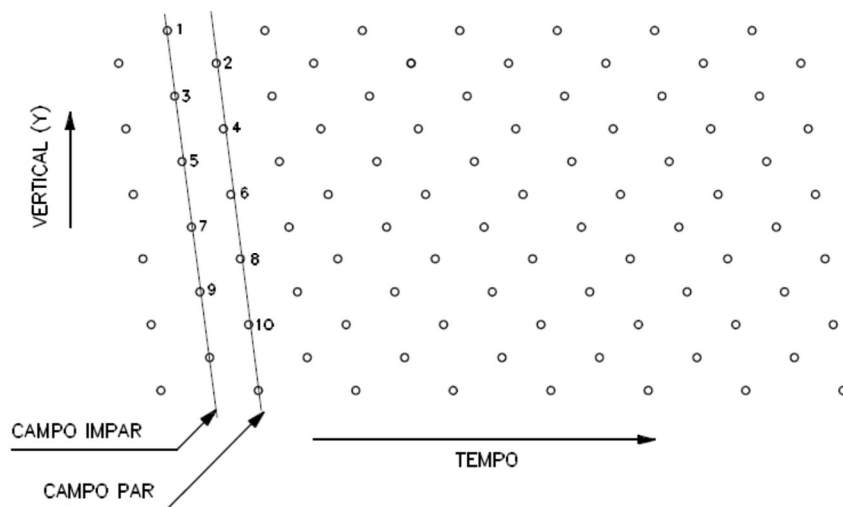


Fig. 8.1 - Estrutura de Amostragem Temporal com Entrelaçamento

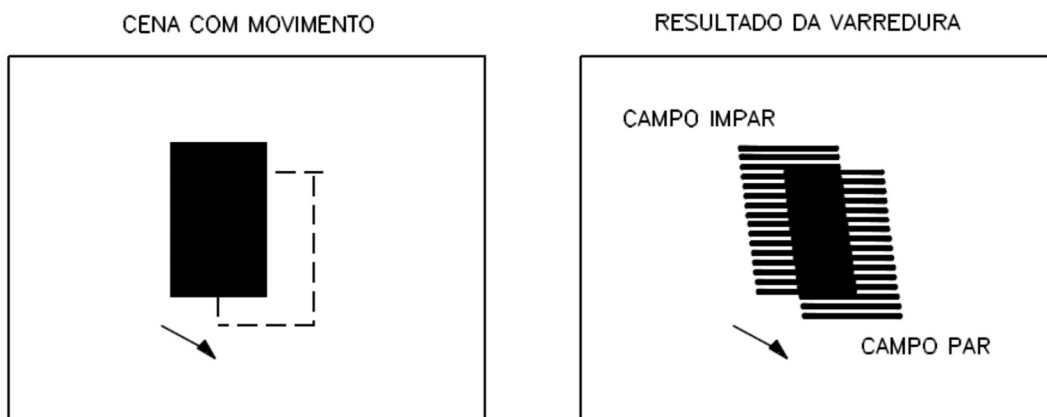


Fig. 8.2 - Amostragem Entrelaçada de Objeto em Movimento

9. Análise Espectral do Processo de Amostragem

Vamos inicialmente analisar o processo de amostragem através de uma projeção simplificada (uma coordenada espacial e uma temporal, e desprezando a inclinação percebida na fig. 8.1). A figura 9.1-a representa um padrão de amostragem não entrelaçado, enquanto que na fig. 9.1-b temos uma varredura entrelaçada, obtida pela remoção alternada de metade das linhas verticais.

A amostragem regular da fig. 9.1-a faz com que o espectro (no caso, bidimensional) do sinal amostrado seja replicado em torno de uma matriz retangular de frequências espaciotemporais (Fig. 9.2-a). Por outro lado, a varredura entrelaçada corresponde a um espectro com estrutura losangular (Fig. 9.2-b), onde as distâncias entre as frequências de amostragem são menores do que no caso da varredura progressiva. Percebe-se então que a chance de ocorrer *aliasing* (rebatimento espectral) é maior no sistema entrelaçado.

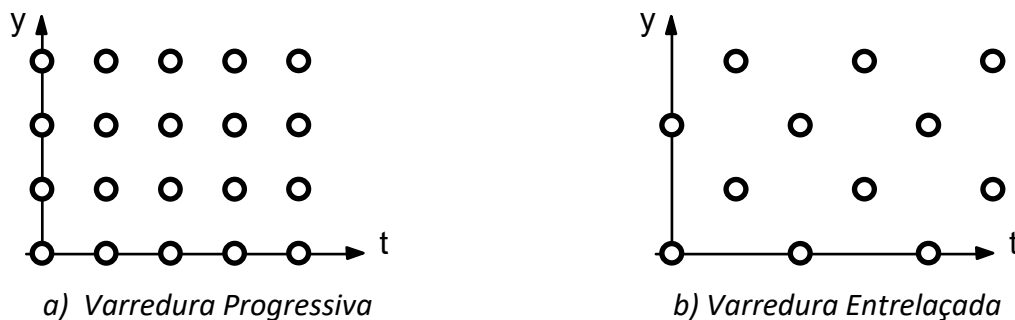


Fig. 9.1 - Estruturas de Varredura

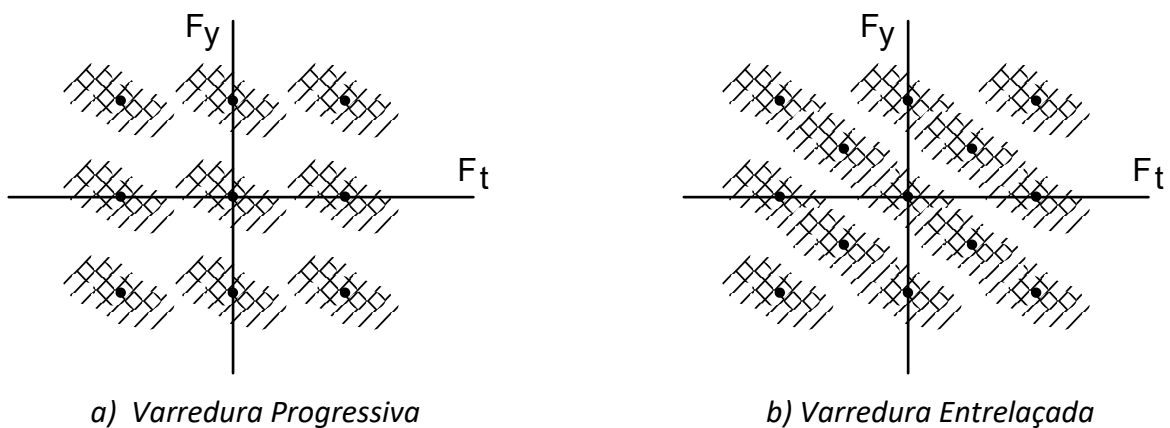


Fig. 9.2 - Espectro bi-dimensional de uma imagem amostrada

O efeito do *aliasing* no domínio das frequências espaciais corresponde ao que se conhece como figuras de *Moirée*, ou “batimento” da estrutura de amostragem espacial com a imagem. Já no domínio das frequências temporais, o *aliasing* pode ser exemplificado com efeitos estroboscópicos percebidos em movimentos periódicos, ou na inversão do sentido aparente de movimento em estruturas espacialmente periódicas dotadas de movimento uniforme (efeito “roda de carroça” - figura 9.3).

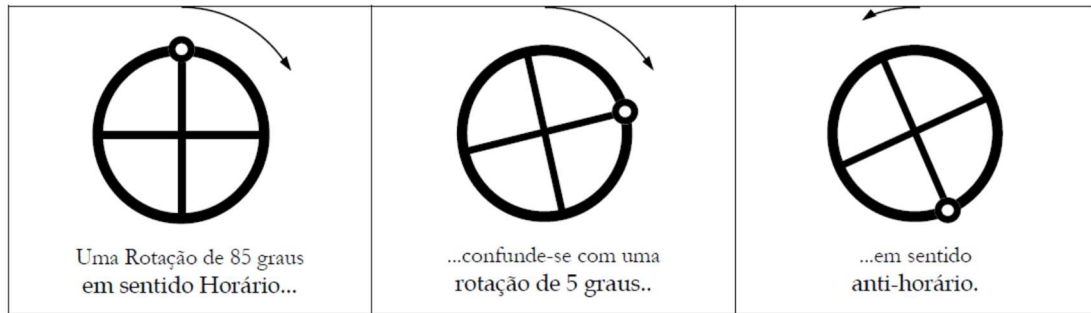


Fig. 9.3 - Efeito "roda de carroça" (sub-amostragem temporal)

O *aliasing* espacial pode ser evitado através de filtragem bi-dimensional (x-y) da imagem (fig. 9.5), com frequência de corte menor que metade da frequência de amostragem espacial. A forma mais elementar de controlar a resposta em frequência espacial de um sistema é obviamente dimensionar de forma correta a *abertura equivalente* (ou seja, a MTF) do sistema de aquisição.

Já a limitação do conteúdo de frequência temporal de uma imagem em movimento pode em parte ser obtida controlando-se o tempo de exposição de cada quadro (velocidade do obturador ou *abertura temporal* do sistema). Um sistema de aquisição que faça a amostragem instantânea da luminosidade em cada ponto da imagem irá manter o conteúdo espectral até altas frequências, estando mais sujeito ao *aliasing* temporal do que um sistema que responda pela luminosidade *média* em cada ponto dentro de um intervalo de tempo igual ao período de varredura (fig. 9.4). Neste caso, a uma abertura temporal retangular corresponde uma resposta em frequência da forma $\text{sen}(x)/x$.

No entanto, a filtragem temporal prejudica a resolução espacial de objetos em movimento, o que pode ser percebido quando o observador tenta acompanhar visualmente a trajetória destes objetos.

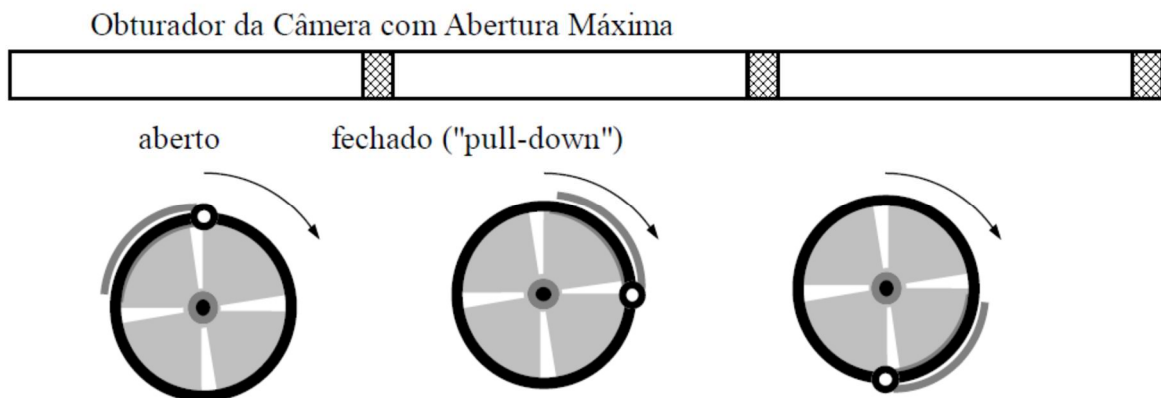
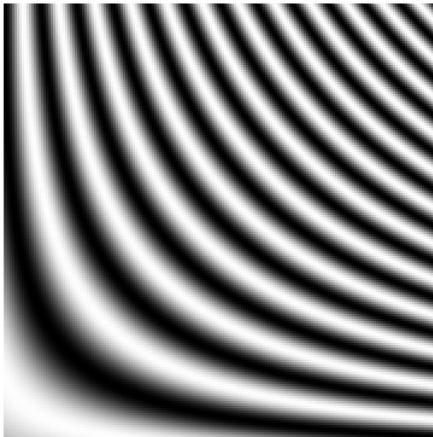
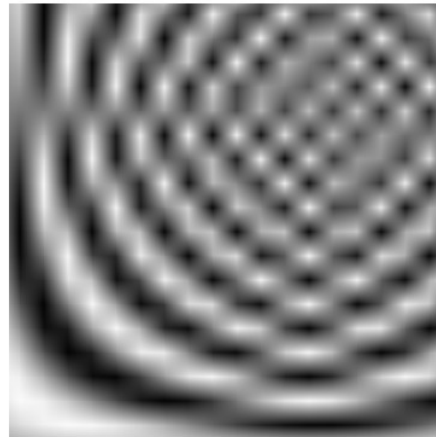


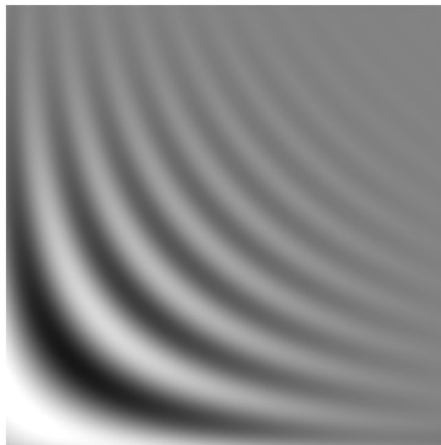
Fig. 9.4 - Redução de *aliasing* temporal pelo controle do tempo de exposição



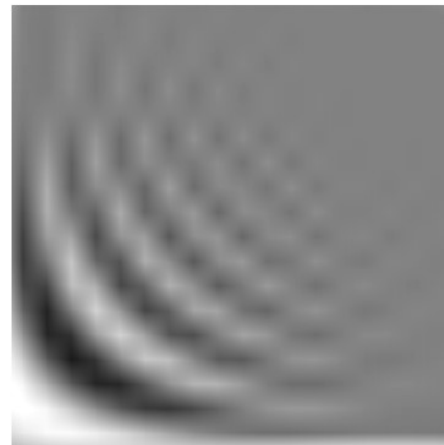
a) Imagem Original



b) Amostrada sem filtragem



c) Com filtragem passa-baixas



d) Amostrada após filtragem

Fig. 9.5 - Efeito "Moirée" e controle do "aliasing" espacial por filtragem bi-dimensional

10. Persistência Temporal

Quando a imagem é apresentada no cinescópio na forma de impulsos luminosos de curta duração, o fenômeno de remanência faz com que tenhamos a impressão de movimento contínuo. Se a percepção de movimento é feita pelo mecanismo visual de *Movimento Ocular*, essa sensação ocorre na medida em que o olho acompanha a *trajetória média* de um objeto, recebendo estímulos visuais consistentes com a idéia de movimento. Isto vale para estímulos instantâneos; caso a imagem na tela apresente *persistência* elevada, iremos obter um movimento relativo entre a imagem (que permanece estática na tela) e a trajetória média do olho (em movimento linear), refletindo-se numa perda de definição espacial (figura 10.1).

Nos cinescópios usados em TV adotavam-se fósforos com persistência de 0,1 a 1 ms no máximo. Monitores de computador para artes gráficas podiam usar persistências maiores para minimizar cintilação, porém perdendo definição com imagens em movimento.

Monitores de Cristal Líquido (LCD) possuem também persistência elevada (a imagem permanece estática na tela pela duração completa de um quadro). Para melhorar a exibição de imagens com movimento, alguns monitores fazem interpolação de imagens para aumentar a frequência (de 60 Hz para 120 ou 240 Hz).

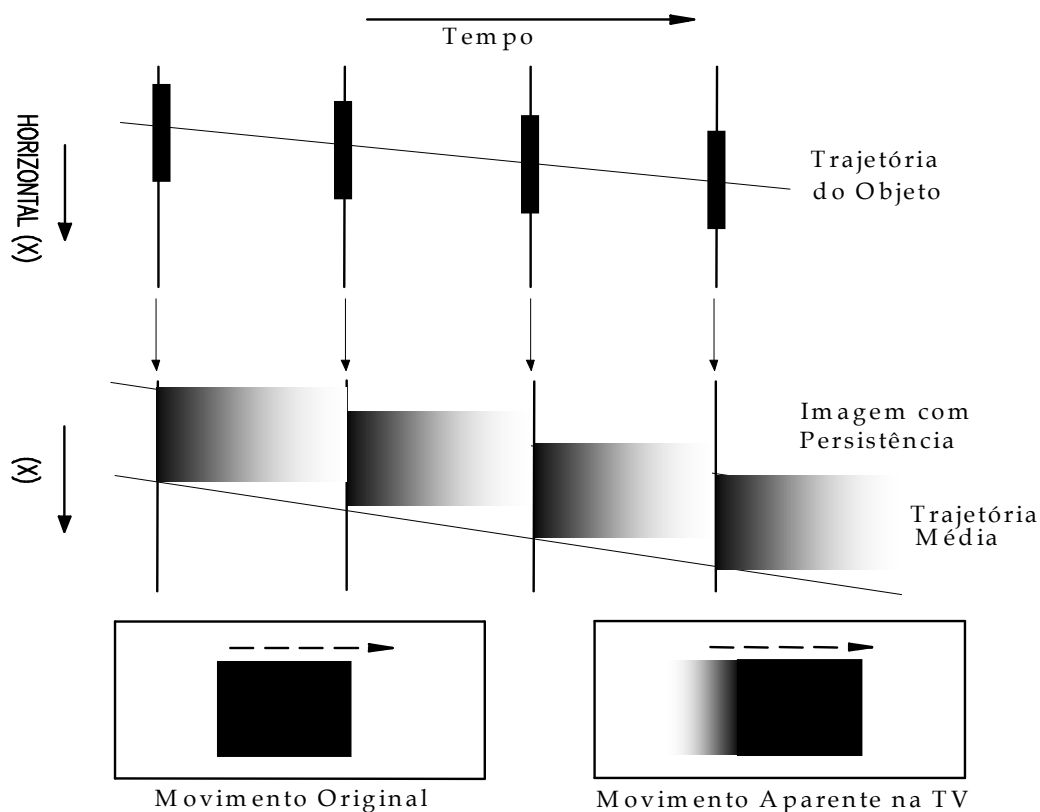


Fig. 10.1 - Imagem com Persistência

Um problema semelhante, que ocorre na transcrição de formatos diferentes de amostragem temporal, pode ser exemplificado pela telecinagem, que consiste na apresentação de filmes cinematográficos através de um sistema de TV. Como o cinema é produzido a 24 quadros por segundo, usa-se normalmente o esquema da figura 10.2 para efetuar a reamostragem para 60 Hz. Neste processo, denominado “Pull-down 3:2”, um fotograma é reproduzido em 3 campos consecutivos; o fotograma seguinte ocupa 2 campos; e assim por diante. Dessa forma, a taxa *média* de fotogramas permanece em 24 imagens por segundo.

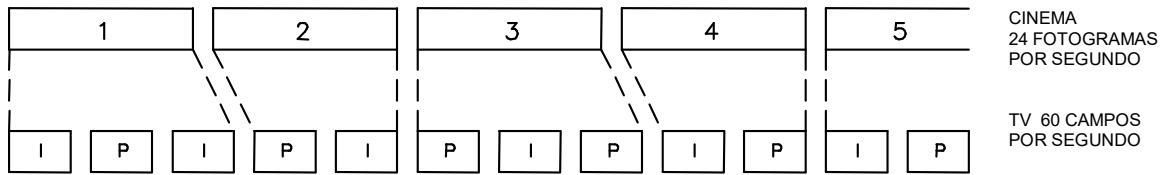


Fig. 10.2 - Telecinagem com "Pull-Down" 3:2

No entanto, ao exibir um objeto em movimento, a imagem percebida apresentará oscilações em relação à trajetória média, provocando perda de resolução espacial (ver figura 10.3).

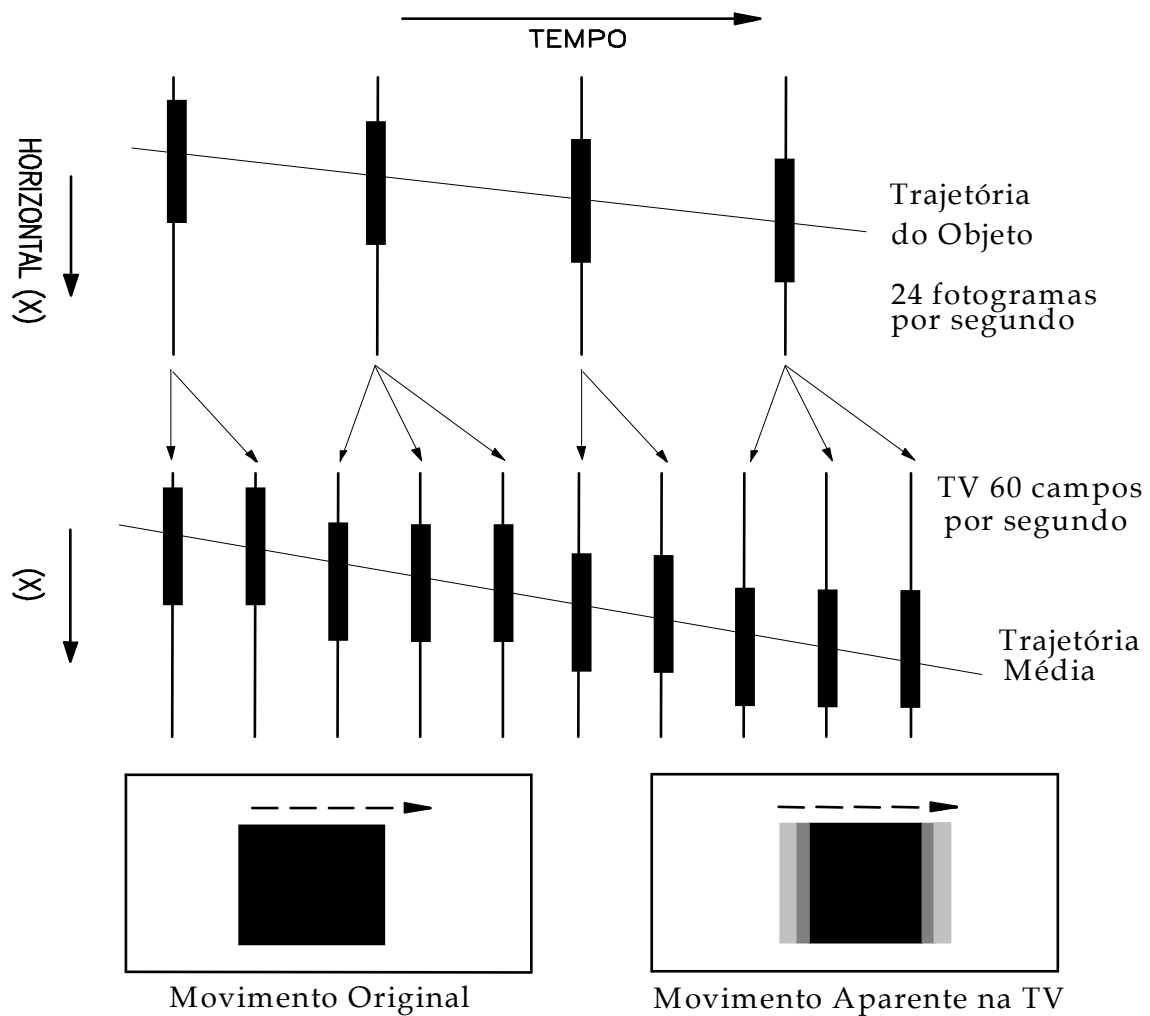
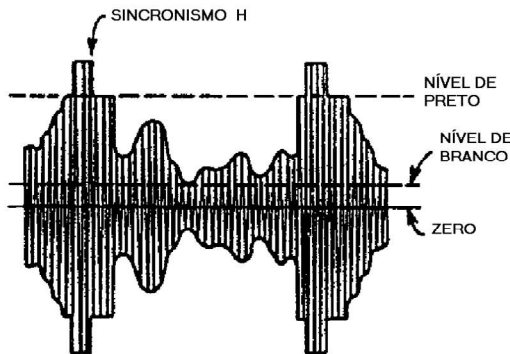


Fig. 10.3 - Perda de Resolução na Telecinagem

11. Radiodifusão de TV Monocromática

A transmissão analógica de um sinal de vídeo composto é feita utilizando modulação em amplitude negativa; isto é, o pico de amplitude da portadora (potência máxima) corresponde ao nível de sincronismo (-40 IRE), enquanto que a potência mínima corresponde ao nível de branco (100 IRE). Deste modo, a potência de pico do transmissor é constante, independente do conteúdo da imagem. Além disso, a influência do ruído no sincronismo do receptor é menor.



A modulação AM de um sinal RS-170 exigiria mais de 8,4 MHz de banda total. Para reduzir a banda ocupada, o sinal modulado sofre uma filtragem vestigial, pela qual a banda lateral inferior é limitada em 750 kHz abaixo da portadora (fig. 11.1). Considerando bandas de guarda entre os canais adjacentes, e considerando que o sinal de áudio é transmitido por uma portadora independente (modulada em FM numa frequência 4,5 MHz acima da portadora de vídeo), a programação de TV no padrão "M" pode ser veiculada através de um canal de 6 MHz de banda total.

Em situações normais, a maior parte da energia irradiada concentra-se em frequências próximas à da portadora de vídeo (até ~ 100 kHz, veja fig. 11.3). Para essas frequências, a modulação é essencialmente AM.

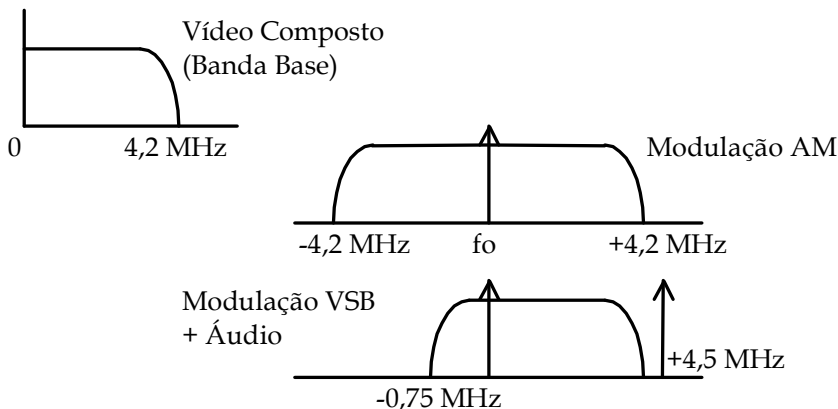


Fig. 11.1 - Modulação AM-VSB para Radiodifusão de TV

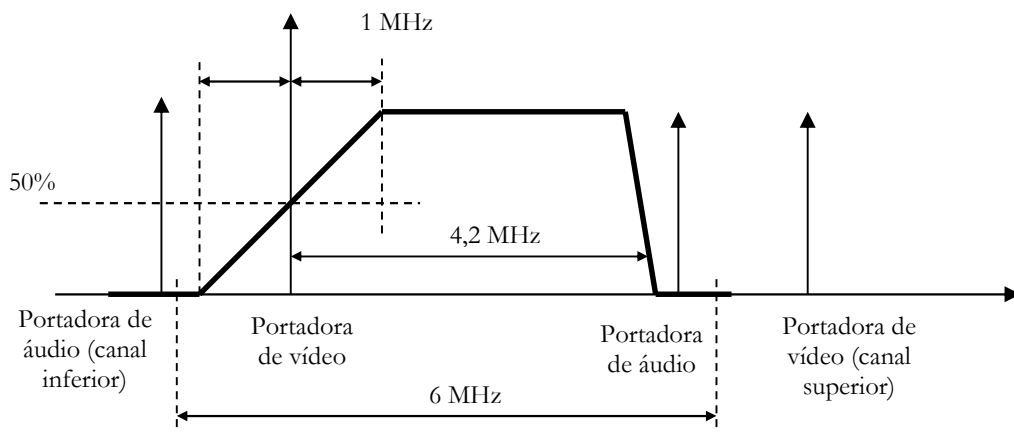


Fig. 11.2 – Resposta em Frequência Ideal do Canal de RF de um Receptor de TV

A resposta em frequência ideal do receptor deve apresentar característica vestigial simétrica em relação à portadora de vídeo, de modo que o rebatimento da banda lateral inferior proporcione uma resposta final plana de 0 a 4,2 MHz. Como na prática os filtros dos receptores não conseguem rejeitar completamente os canais adjacentes, a alocação de canais é feita normalmente de forma alternada para cada localidade (ex.: canais 7-9-11-13).

A alocação de canais foi feita, historicamente, em bandas não contíguas. Os canais baixos (2 a 6) ocupam frequências de 54 a 88 MHz (há um espaço adicional de 4 MHz entre os canais 4 e 5). A seguir, os canais altos (7 a 13) ocupam frequências de 174 a 216 MHz. Este esquema evita a ocorrência de interferências devido à baixa rejeição da frequência imagem (para receptores superheteródinos), desde que a frequência intermediária seja adequadamente escolhida.

Posteriormente foi alocada uma banda de UHF, para os canais 14 a 83, entre 470 e 890 MHz. No final da década de 1970, os canais 70 a 83 foram realocados para implantação do serviço de telefonia móvel celular. Atualmente, devido à expansão da telefonia celular em UHF, os canais 52 a 69 também foram realocados; a banda de UHF para TV está alocada de 470 a 698 MHz (canais 14 a 51).

Em outros países, as faixas de frequência podem ser diferentes, considerando que os canais podem ocupar bandas de 6, 7 ou 8 MHz.

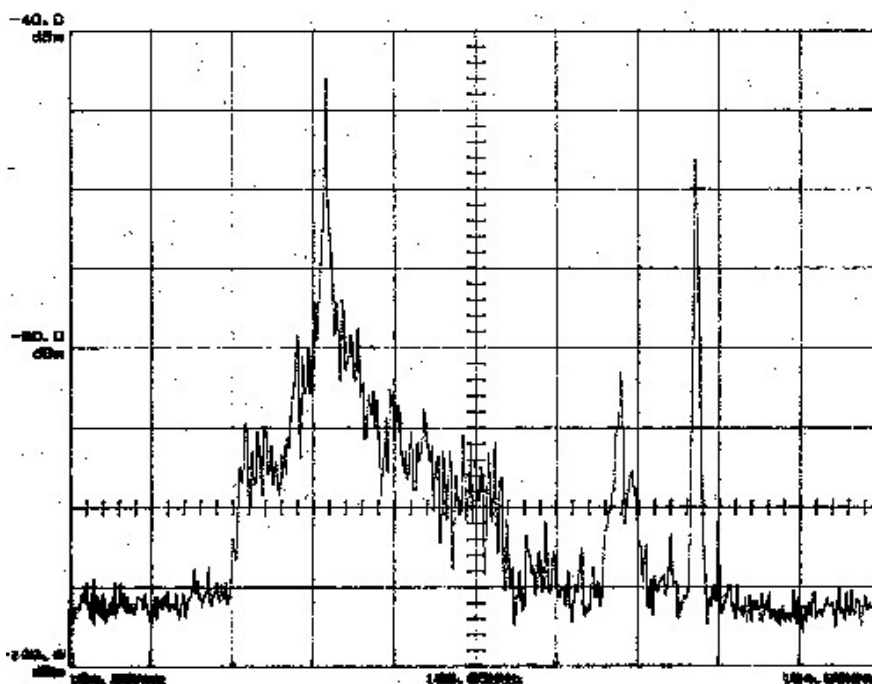


Fig. 11.3 - Espectro típico de um sinal da TV analógica

12. Outros Formatos de Varredura

Fatores técnicos, mercadológicos e políticos provocaram o surgimento de diversos padrões de varredura e modulação. Na Europa, onde a energia elétrica é distribuída em 50 Hz, adotou-se esta frequência para a varredura vertical (50 campos ou 25 quadros por segundo). Esta resolução temporal menor foi compensada com maior resolução espacial (625 linhas de varredura), o que implica maior ocupação espectral, demandando canais de 7 ou 8 MHz de banda.

A Tabela 12.1 abaixo resume as características de vários padrões de varredura criados para a televisão analógica, que deixaram legados até após a digitalização. Para comparação, na Tabela 12.2 temos alguns padrões de varredura utilizados em monitores para computadores.

Padrão	Países	fv (Hz)	linhas de varredura	Bw (MHz)	canal (MHz)	fator Gama
A	Inglaterra (obsoleto)	50	405	3	-	2,8
M	EUA, Brasil, Japão, Canadá, México, Chile	59.94	525	4.2	6	2,2
N	Argentina, Paraguai, Uruguai	50	625	4.2	6	2,2
B	Europa, Austrália, Índia	50	625	5	7	2,8
D,K,L	Rússia, China	50	625	6	8	2,8
G,H	Europa (UHF)	50	625	5	8	2,8
I	Inglaterra, Angola, África do Sul	50	625	5.5	8	2,8
E	França (obsoleto)	50	819	10	14	2,8
Hi-Vision	Japão (satélite), HDTV	59.94	1125	≈ 24	≈ 30	2,2
1080 i	HDTV entrelaçado	59.94	1125	30	6 (digital)	2,22
720 p	HDTV progressivo	59.94	750	30	6 (digital)	2,22
“4k”	Super Alta Definição, progr.	59.94	2160	250	6 (digital)	2,22
UHDV	Japão (experimental)	120	4320	2000	24(digital)	2,22

Tabela 12.1 - Padrões de Varredura de TV

Padrão	Resolução visível h x v	Freq. Vert. (Hz)	Freq. Hor. (kHz)	varredura	Bw (MHz)
CGA	320 × 200	60	15.75	progress.	3.2
VGA	640 × 480	60	31.5	progr.	13
VESA	640 × 480	72	37.8	progr.	16
SVGA	800 × 600	75	46.8	progr.	25
XGA	1024 × 768	87	35.5	entrelac.	23
SVGA	1280 × 1024	71	76.0	progr.	63
SVGA	1280 × 1024	86	45.8	entrelac.	40
Mac II	1152 × 870	75	68.7	progr.	50
UXGA	1600 × 1200	75	93,6	progr.	100
Full HD	1920 x 1080	60	67,5	Progr.	75

Tabela 12.2 - Alguns Padrões de Adaptadores de Vídeo para Computadores

13. TV de Alta Definição

O sistema atual de TV, denominado “Alta Definição” (*High Definition Television - HDTV*) é baseado no sistema “Hi-Vision”, desenvolvido pela NHK entre 1970 e 1985 no Japão.

Basicamente, 3 fatores foram considerados para o dimensionamento deste sistema:

1. Relação de aspecto mais próxima da relação usada no cinema, para proporcionar compatibilidade com o material cinematográfico (tela larga);
2. Maior resolução espacial, necessária especialmente para a reprodução detalhada de textos em ideogramas da língua japonesa;
3. Maior ângulo de visualização, para abranger parte da visão periférica do observador e proporcionar uma experiência sensorial mais completa (vide fig. 13.1).

O sistema evoluiu para um formato básico de 1080 linhas visíveis e 1920 elementos de imagem por linha, com relação de aspecto 16:9, e com entrelaçamento (padrão 1080i). Para imagens com alto conteúdo de movimento, como eventos esportivos, há a opção de um formato sem entrelaçamento, com 720 linhas visíveis e 1440 elementos por linha (padrão 720p).

13.1 Cinema Digital

Por outro lado, a indústria cinematográfica adotou gradualmente as técnicas da Televisão, no intuito de eliminar a película fotográfica do processo de produção. Atualmente, a maioria dos “filmes” é produzida na forma digital, em formato HDTV ou, preferencialmente, em um padrão com 2160 linhas, 4096 elementos por linha, e relação e aspecto próximo a 1,9 : 1. A amostragem temporal normalmente continua em 24 quadros por segundo.

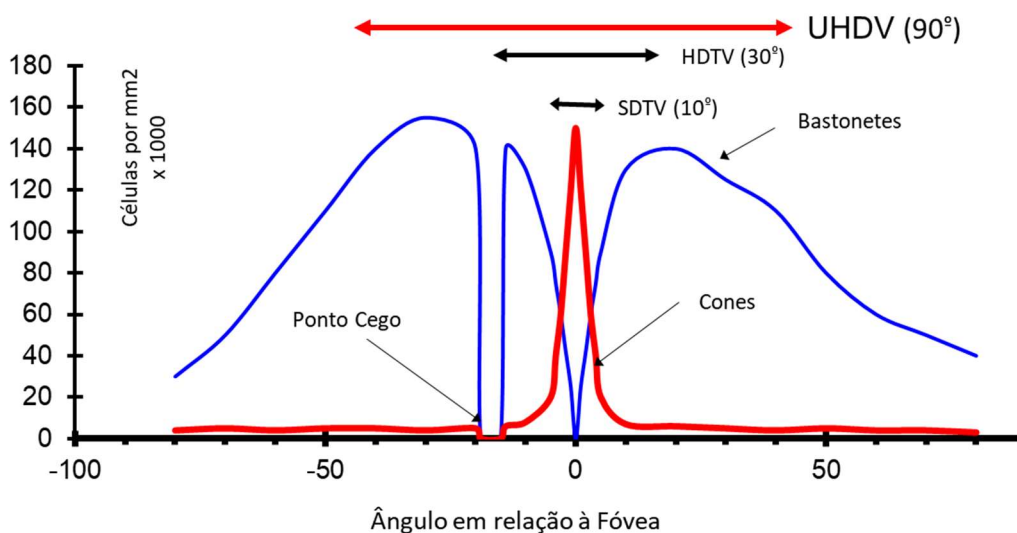


Fig. 13.1 – ângulos de visualização da TV convencional, TV de Alta Definição e UHDV

13.2 Televisor “4k”

Atualmente, a indústria de TV está oferecendo televisores com resolução de 2160 x 3840, denominados “4k”. Como a ideia é substituir os televisores HDTV nas residências, a intenção é principalmente aumentar a resolução espacial, já que não é viável dobrar o tamanho das telas. O atrativo principal, então, é reduzir os artefatos da amostragem espacial, proporcionando uma

imagem nítida e relativamente livre de figuras de “Moiree”, “pixelizações” e serrilhado nos contornos de alto contraste.

13.3 Televisão UHDTV – “8k”

Em menor escala, já existe um sistema desenvolvido em 2005 pela NHK, denominado “8k” ou UHDV (*Ultra High Definition Video*), com resolução de 4320 x 7680, até 120 quadros por segundo (sem entrelaçamento), objetivando ângulo de visualização maior que 90 graus e reprodução mais fiel de movimentos rápidos. A intenção deste formato é conseguir reproduzir uma pessoa em tamanho natural, como se estivesse dentro da sala, além de tomar o controle da sensação espacial do espectador, cobrindo grande parte da visão periférica.

14. Referências

- K. Blair Benson: *Television Engineers Handbook* - McGraw-Hill, 1985
M. Robin, M. Poulin: *Digital Television Fundamentals* - McGraw-Hill, 1997
Jerry Whitaker: *DTV Handbook* – McGraw-Hill, 2001
NAB Engineering Handbook - National Association of Broadcasters, 1999
Andrew F. Inglis, Arch C. Luther: *Video Engineering* - Mc Graw-Hill, 1996
Brian Evans: *Understanding Digital TV* – IEEE Press, 1995