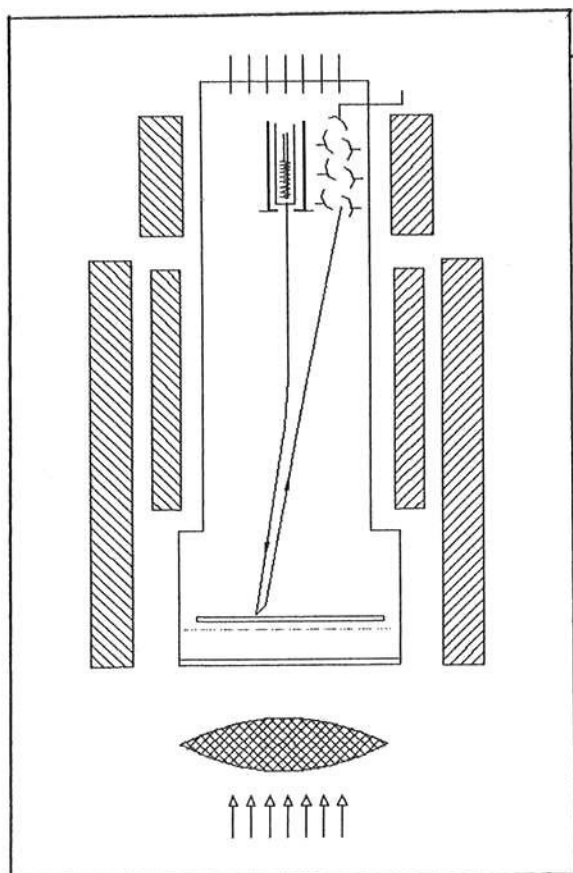




DISPOSITIVOS FORMADORES DE

IMAGENS

J. H. Vuolo

INSTITUTO DE FÍSICA

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

1996

Dispositivos formadores de imagem

1 Introdução

O esforço para registrar imagens data do tempo das cavernas, onde o homem deixou imagens gravadas nas rochas. Na antiguidade, a técnica evoluiu para esculturas, gravuras e pinturas dos mais diversos tipos, em cerâmicas, vidros, tecidos, moedas, rochas, metais e outros materiais. Até o final do século 19, as imagens, apesar de realizadas por artistas de grande sensibilidade, muitas vezes tinham o objetivo “técnico” de retratar fielmente pessoas e objetos. Imagens de monarcas e aristocratas antigos chegaram aos dias de hoje registradas em pinturas, esculturas e moedas. Com o advento da fotografia e outros recursos, a simples reprodução fiel de imagens deixou de ser uma atribuição do artista e certamente não foi por acaso que a arte mudou significativamente de rumos no final do século passado.

Na vida cotidiana moderna, os dispositivos formadores de imagens desempenham papel importante e tendem a se tornar cada dia mais importantes. Como exemplos usuais podem ser mencionados a fotografia, fotocópia, projetor de slides, retroprojetor, cinema, câmaras de vídeo e receptor de televisão, monitor de vídeo de computador e uma variedade de instrumentos que utilizam mostradores (“displays”) de *cristal líquido*, tais como relógios digitais, calculadoras, jogos eletrônicos, televisão, monitores de computador, painéis automotivos, dispositivos para recados telefônicos (“pagers”), telefones celulares e outros dispositivos. Além disso, existe uma grande variedade de dispositivos formadores de imagens, que embora não sejam instrumentos domésticos, são também bastante importantes. Podem ser mencionados a radiografia, tomografia de raio-X, fotografias de satélites, ultrasonografia, ressonância nuclear magnética, microscopia eletrônica, holografia, câmaras de vídeo, intensificadores de imagem, visores de infravermelho, osciloscópio, radar, sonar e outros.

Em todos os casos, o objetivo final é formar uma imagem suficientemente definida para o observador. No caso do computador, além da observação da imagem, pode existir uma interação bastante direta entre o observador e a própria imagem, por meio do “mouse”.

Prefácio

Este texto foi escrito para a disciplina Física Aplicada (FMT463). As informações foram bastante compactadas, a partir da bibliografia citada. O texto deve ser estudado pelos alunos da disciplina, mas dificilmente as aulas ou o esclarecimento de dúvidas com o professor serão dispensáveis.

Agradecimentos ao Prof. Hugo Franco, pelas várias sugestões relativas ao assunto e a outros tópicos da disciplina.

Agradecimentos ao Prof. Aluisio N. Fagundes, pela grande ajuda com o computador e com os programas, usados na edição da apostila.

São Paulo, 3 Setembro de 1996

José Henrique Vuolo

Revisada em 2009

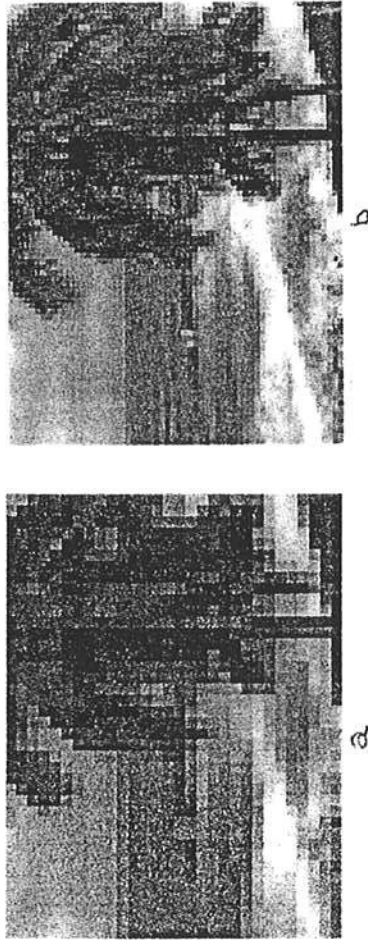


Figura 1: a. Imagem formada por 1200 pixels. b. Imagem com 4800 pixels.

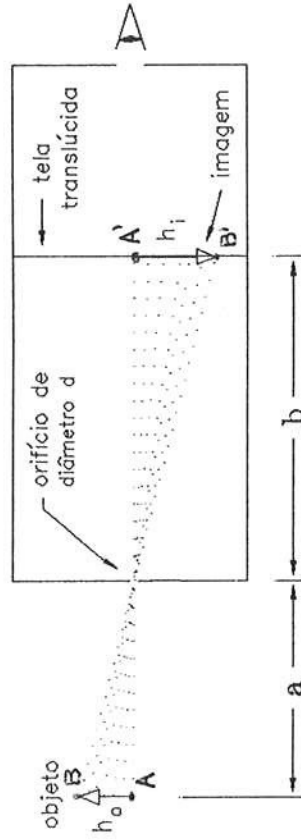


Figura 2: Formação de imagem numa câmara escura.

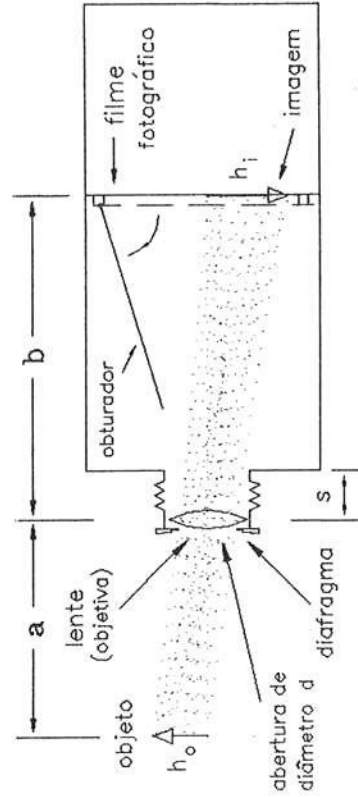


Figura 3: Princípio de funcionamento da câmara fotográfica.

No que segue, são resumidos os princípios básicos de alguns dispositivos formadores de imagem. Excetuando-se a câmara escura que é um dispositivo muito simples, cada um dos dispositivos considerados é suficientemente complicado para justificar um livro volumoso, se tratado em detalhes. Portanto, como não poderia deixar de ser em uma simples apostila, a discussão é muito resumida e omite muitos detalhes, às vezes importantes.

2 Caracterização de uma imagem

Uma imagem impressa, projetada em tela ou formada num visor ("display"), sempre é formada a partir de elementos menores chamados *pixels*¹. A Figura 1.a mostra uma imagem formada a partir de 1200 pixels. A mesma imagem é mostrada na Figura 1.b com 4800 pixels. Para imprimir esta imagem com boa qualidade, o número de pixels deveria ser da ordem de 300 000.

A qualidade de uma imagem no que se refere a definição é caracterizada pelo tamanho do pixel e pelo número de pixels. Num negativo de fotografia, o tamanho do pixel corresponde ao tamanho dos grãos de prata metálica formados no processo de revelação e o número de pixels é da ordem de milhão ou muitos milhões, dependendo do tipo de filme.

No caso de uma imagem formada por métodos "analógicos", tal como uma fotografia ou uma fotocópia, pode-se facilmente obter uma imagem com muitos milhões de pixels. Entretanto, no caso de uma imagem formada "digitalmente", a informação referente a cada pixel deve ser transmitida eletronicamente. Neste caso, podem existir sérias limitações ao número de pixels da imagem. Por exemplo, uma imagem de televisão é formada a partir de cerca de 300 000 pixels, transmitidos sequencialmente por um "sinal de vídeo", por sua vez transportados numa onda eletromagnética VHF. Este número não é muito satisfatório em termos de definição da imagem. Isto é bastante perceptível quando se tenta ver de perto a imagem de uma televisão de tela grande, no caso de transmissão pelos canais de VHF convencionais (ver Seção 11.6). Sistemas de transmissão modernos permitem definição melhor com número maior de pixels.

¹ Palavra formada a partir de "picture element" (elemento de figura).

3 Câmara escura

Um dos dispositivos mais simples para formar uma imagem é a chamada *câmara escura*, esquematizada na Figura 2. Por meio de um pequeno orifício de diâmetro d , forma-se imagem invertida na tela translúcida. Para um objeto puntiforme distante, a imagem “geométrica” não é um ponto, mas uma mancha com dimensões da ordem de d . Para um objeto distante extenso a borda da imagem é “borrada” numa largura d , aproximadamente. Assim, do ponto de vista da ótica geométrica, a imagem é tanto melhor quanto menor o diâmetro d . Por outro lado, a difração aumenta, quando se diminui o diâmetro do orifício até se tornar significativa. O diâmetro do 1º anel escuro de difração num orifício é dado por

$$D \cong 2b \times 1,22 \frac{\lambda}{d}. \quad (1)$$

Assim, a melhor definição da imagem deve ocorrer aproximadamente quando a indefinição geométrica d iguala a indefinição devido à difração ($d \approx D$):

$$d_m \sim 1,6 \sqrt{\lambda b}. \quad (2)$$

Para $\lambda \cong 550 \text{ nm}$ e $b \approx 5 \text{ cm}$, resulta $d \sim 0,2 \text{ mm}$. Para este diâmetro e objetos comuns, iluminância na tela é baixa², porque é proporcional à área do orifício. Por isso, é conveniente um certo tempo de adaptação do olho à escuridão, para observar a imagem. Para obter uma fotografia, o filme fotográfico deve ser colocado em lugar da tela e exposto durante tempo conveniente. Os primeiros testes de filmes fotográficos, no início do século passado, foram realizados com câmara escura.

4 Câmara fotográfica

Uma câmara fotográfica simples é esquematizada na Figura 3. A lente, usualmente chamada de *objetiva*, permite formar uma imagem no anteparo, onde se coloca um filme fotográfico. Um obturador permite a exposição do filme durante um tempo definido e um diafragma circular de diâmetro ajustável permite regular a quantidade de luz que atinge o filme.

²Ver Questão 1.

As principais variáveis a serem consideradas na exposição do filme são a distância do objeto à lente, a sensibilidade do filme, o tempo de exposição, a abertura do diafragma e a iluminância no filme.

A distância b da lente ao filme é relacionada com a distância a do objeto à lente por

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad (3)$$

onde f é a distância focal da objetiva, que é constante. Assim, para formar a imagem exatamente sobre o filme, a distância b deve ser ajustável. Devido a limitação de tamanho da câmara, b não pode ser muito diferente de f ($b \approx f$) e resulta que $a \gg b$, para objetivas mais simples.

Um filme fotográfico preto-e-branco (PB) comum é constituído de pequenos cristais de cloreto, brometo ou iodeto de prata, numa emulsão gelatinosa. Quando incide luz num cristal, ocorre quebra de ligação da prata com o halogênio, formando um pequeno *núcleo* de prata metálica. O revelador é um agente químico *reduzidor*, que tende a converter todo o cristal em prata metálica. O ataque químico é bem mais rápido num cristal com núcleo de prata metálica. O processo de redução da prata pelo revelador pode se entender também aos cristais que não foram sensibilizados pela luz. Por isso, a revelação é feita durante um tempo definido.

Após a revelação, usa-se um agente químico *fixador*, que dissolve e retira os cristais de prata não sensibilizados. Se isto não for feito, os cristais remanescentes continuam a ser lentamente reduzidos pela luz.

As regiões mais atingidas pela luz se tornam escuras e vice-versa, que é o oposto da luminosidade da imagem. Este tipo de filme é chamado *negativo*.

A sensibilidade do filme depende diretamente do tamanho dos cristais. Os cristais maiores são facilmente sensibilizados pela luz e reduzidos a prata metálica. Por isso, um filme sensível tem alta densidade de cristais e grande proporção de cristais grandes. Como regra geral, a resolução do filme fica comprometida para alta sensibilidade, devido à predominância de cristais grandes. A sensibilidade do filme é caracterizada por um índice ISO. Por exemplo, um filme ISO 100/21° tem índices 100 na norma ASA e 21 na norma DIN, respectivamente³.

³ISO, ASA e DIN são as siglas para International Standards Organization, American Standards Association e Deutsche Industrie Norm.

Um obturador de luz, permite ajustar o tempo de exposição do filme à luz. O tempo de exposição necessário está diretamente relacionado com a sensibilidade do filme, que é usualmente referida como a "velocidade do filme". Por exemplo, um filme ASA 200 é duas vezes mais "rápido" que um filme ASA 100, significando que exige um tempo de exposição duas vezes menor. Isto é, o tempo de exposição é inversamente proporcional à velocidade ASA do filme.

Uma outra variável importante é a abertura do diafragma, que permite modificar o fluxo luminoso no filme, para um objeto de luminância definida. A abertura do diafragma é caracterizada por um *número-F* definido por

$$\text{número-F} \equiv F = \frac{f}{d} \quad \text{ou} \quad d = \frac{f}{F}, \quad (4)$$

onde f é a distância focal da objetiva e d é o diâmetro do diafragma, chamado simplesmente de *abertura*. Assim, uma abertura $f/2$ significa que o diâmetro do diafragma é a metade da distância focal da lente. A luminância no filme é proporcional ao quadrado da abertura. Assim, quando se passa de abertura $f/2$ para $f/16$, por exemplo, a luminosidade é reduzida de um fator 64 e o tempo de exposição deve ser aumentado deste fator.

O ajuste dos diversos parâmetros depende da luminância no filme. Entretanto, pode ser mostrado que a luminância I no filme é proporcional à luminância L do objeto (ver Questão 2) :

$$I = \text{constante} \times \frac{L}{F^2}. \quad (5)$$

O tempo de exposição deve ser inversamente proporcional à luminância I . Uma vez que o tempo de exposição é inversamente proporcional à sensibilidade ASA S do filme, pode-se escrever :

$$t \cong \text{constante} \times \frac{F^2}{SL}. \quad (6)$$

Assim, a partir da luminância L do objeto, medida diretamente com um fotômetro, pode-se ajustar F ou t , conforme o valor S para o filme escolhido. Maiores detalhes sobre a equação acima podem ser obtidos na Referência 1. Discussões mais detalhadas sobre fotografia e outros importantes detalhes, inclusive fotografia a cores, são apresentadas nas Referências 1 e 2.

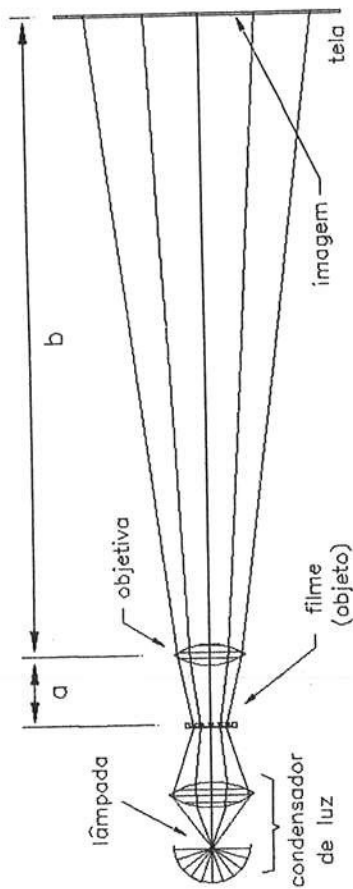


Figura 4: *Projeção de uma imagem.*

5 Imagens projetadas

A projeção de imagens numa tela é esquematizada na Figura 4. No caso de cinema, projeção de slides ou retroprojektor, um filme fotográfico "positivo"⁴ é iluminado por uma lâmpada. Uma lente objetiva permite formar imagem numa tela, conforme a Equação 3.

Na maioria dos casos, a imagem tem área muito maior que a do objeto (o filme). A luminância da imagem é inteiramente devida à luminância do objeto. Por isso, é essencial uma iluminação muito boa sobre o filme (ver Questão 3). Uma lente "condensadora" ou um "sistema condensador" com lente e espelho esférico são utilizados para concentrar a luz sobre o filme. No caso de um retroprojektor, a lente condensadora é uma lente de Fresnel, com dimensões da ordem de $30 \times 30 \text{ cm}^2$.

Imagens de instrumentos óticos tal como a de um microscópio, também podem ser projetadas, de maneira similar aos casos acima. Qualquer imagem real pode ser projetada numa tela.

No caso do cinema, as imagens de cenas sucessivas são fotografadas, sequencialmente, a uma determinada taxa. Projetados nesta mesma taxa, os movimentos são reproduzidos e parecem contínuos, para projeção de 16 *quadros por segundo* ou mais.

Os filmes comerciais são filmados a 24 q/s . Entretanto, para níveis altos de luminosidade, a visão humana consegue perceber frequências até cerca de 50 Hz , como uma "cintilação" (flickering). Por isso, o filme comercial é projetado a 48 q/s ou 72 q/s , utilizando o recurso de projetar 2 ou 3 vezes o mesmo quadro, no intervalo de tempo de $(1/24) \text{ s}$.

⁴ Ao contrário do "negativo", no filme "positivo", objetos claros aparecem claros.

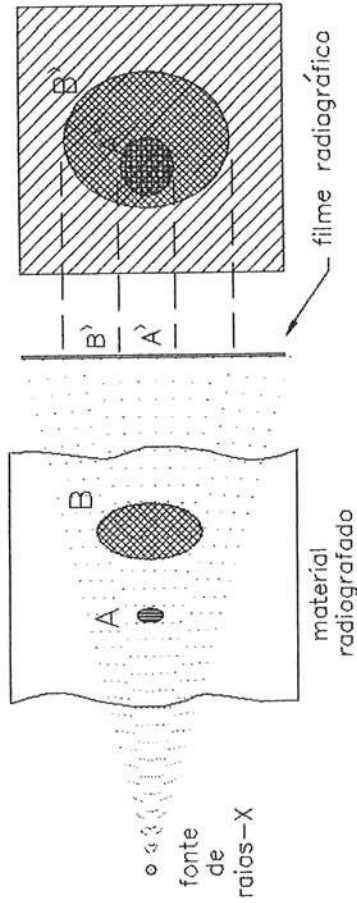


Figura 5: Radiografia com raios-X.

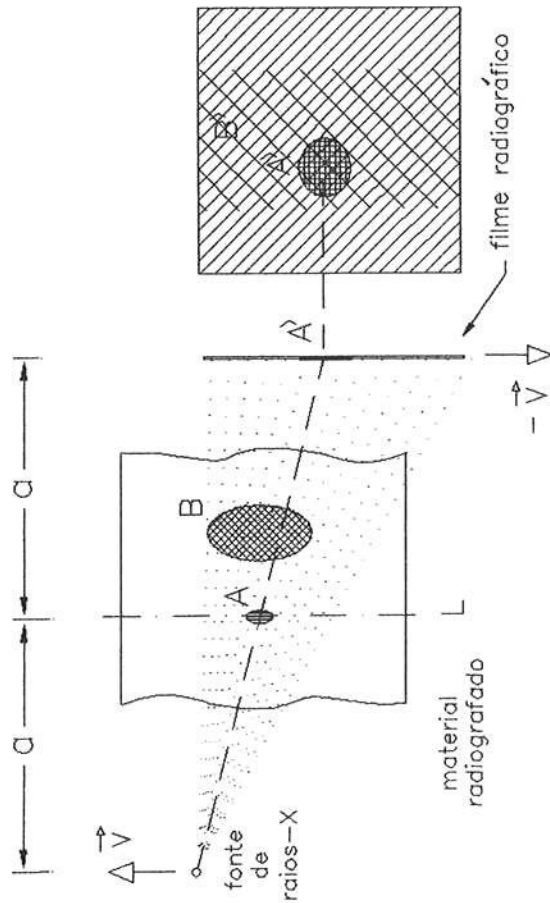


Figura 6: Tomografia de Raios-X.

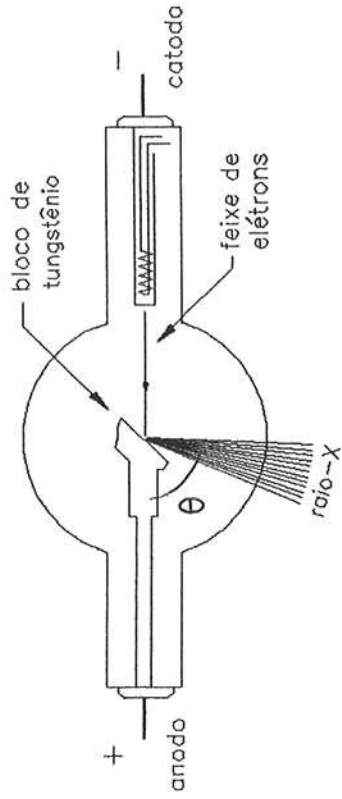


Figura 7: Desenho esquemático de um tubo de Raios-X.

No caso do cinema, a iluminação do filme no projetor é um aspecto dos mais importantes. Por exemplo, para filme de 35 mm, o quadro tem menos de 10 cm² e deve ser suficientemente iluminado para se ter uma imagem bem visível de mais de 10 m². Assim, a relação de luminâncias do filme e da imagem é muito maior que 10 000.

No chamado "projetor LCD" bastante usado em sistemas de projeção múltipla, basicamente um mostrador de cristal líquido transmissivo (Seção 14) é usado em lugar do slide fotográfico do projetor da Figura 4.

6 Radiografia e gamagrafia

Raios-X e raios-γ são radiações bastante penetrantes em meios materiais. Um feixe de irradiância I_0 ao passar por uma camada de espessura x é atenuado conforme a relação:

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (7)$$

onde μ é o *coeficiente de atenuação* do material. Os mecanismos mais importantes que contribuem para atenuação do feixe de radiação são o efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares elétron-pósitron.

O coeficiente μ , se comporta aproximadamente de acordo com a equação:

$$\mu = C \rho \lambda Z^3 \quad (8)$$

onde ρ é a densidade do material, Z é o número atômico (médio) e λ é o comprimento de onda do raio-X. Na Eq. 8, C é a grosso modo constante, mas pode ter algumas variações abruptas para certas energias definidas do raio-X. De qualquer modo a equação mostra que a atenuação da radiação num meio pode variar bastante com a composição do material.

Se um feixe de radiação atravessa um meio material não homogêneo, devido à atenuação diferenciada, ocorrem sombras que podem ser projetadas numa tela tal como mostrado na Figura 5. Um filme radiográfico⁵ colocado na posição da tela permite registrar a imagem.

A *fluoroscopia* é uma técnica semelhante à radiografia, exceto que o filme é substituído por uma tela fluorescente, que pode ser observada diretamente. Entretanto, isto expõe excessivamente o examinador (e paciente, se for o caso) a doses excessivas de radiação. Por isso, utiliza-se uma câmara de vídeo sensível, que permite registrar imagens de menor luminosidade, com a vantagem adicional de permitir a gravação das imagens. A tela fluorescente também pode ser fotografada (abreugrafia), com a grande vantagem de registrar a imagem num filme fotográfico pequeno e não num filme radiográfico grande, maior que o objeto radiografado (ver Figura 5).

A radiografia e outras técnicas com raios-X são mais utilizadas para fins médicos. O feixe de raios-X é produzido num tubo de Coolidge, esquematizado na Figura 7. Um feixe de elétrons é acelerado por uma alta tensão V e atinge um alvo de tungstênio. Os raios-X são a "radiação de freamento" (*bremsstrahlung*) e têm um espectro contínuo, com eventuais linhas. A energia máxima dos raios-X é a energia dos elétrons, que é $V\text{ keV}$, se V é dada em *kilovolts*.

Alvos de maior número atômico Z são mais eficientes para produção de raios-X. Além disso, o alvo deve suportar altas temperaturas. Por isso, o tungstênio é bastante favorável como alvo.

A máxima emissão de raios-X ocorre numa direção θ que depende da energia dos elétrons. Para raios-X *moles*, com energias máximas de 1 a 20 *keV*, a máxima emissão ocorre em ângulos θ próximos de 80° . Para raios-X *duros*, com energias máximas de 20 a 1000 *keV*, a máxima emissão ocorre em ângulos bem menores. Uma descrição geral da produção e utilização de raios-X é apresentada nas Referências 3 e 4.

A gamagrafia é similar à radiografia, mas feita com radiação- γ , utilizando fontes radioativas. A radiação- γ é muito mais penetrante, sendo ineficiente para radiografias em tecidos biológicos. Para se ter uma imagem com bom contraste, a atenuação da radiação deve ser grande. Além disso, a radiação de alta energia provoca danos biológicos bem maiores.

⁵O filme radiográfico é bastante semelhante ao filme fotográfico, com sensibilidade adequada para raios-X.

Em geral, a gamagrafia é utilizada para *ensaios não destrutivos* em peças, equipamentos ou instalações industriais. Nestes casos, as densidades e os coeficientes de atenuação são bem maiores (ver Equação 8). O controle do tempo de exposição e a proteção radiológica do operador é um problema maior neste caso, pois a fonte radioativa emite radiação continuamente.

A radiografia é um filme "negativo". Isto é, quando a radiação é bastante absorvida, o filme fica claro e inversamente. Nas Figuras 5 e 6, estão representados na realidade os "positivos" das radiografias para fins didáticos.

7 Tomografia de raios-X

A tomografia⁶ de raios-X é uma técnica engenhosa que permite radiografar apenas "fatias" de um corpo e não o corpo todo.

A tomografia de raios-X é uma radiografia obtida como na Figura 6, onde a fonte de raios-X e o filme se movem com velocidades opostas. Se as velocidades são iguais e o objeto A está exatamente a meia distância entre a fonte e o filme, a "sombra" de A no filme permanece estacionária. Entretanto, para um objeto B, a uma distância diferente, a "sombra" se move no filme e apenas deixa o filme um pouco mais claro. Em resumo, somente os objetos a uma distância a do filme aparecem na radiografia final.

Objetos a distâncias diferentes podem ser igualmente radiografados, escolhendo velocidades adequadas para o filme e para a fonte. Por exemplo, o objeto B poderia ser radiografado escolhendo as velocidades da fonte e do filme na proporção de 3 para 1, aproximadamente.

8 Tubo de Raios Catódicos (CRT)

O tubo de raios catódicos (CRT ou TRC) é um dos dispositivos formadores de imagem muito importantes. Além de imagens comuns, tal como numa televisão ou num monitor de computador, permite obter certas "imagens" bastante correlacionadas com imagens reais em equipamentos tais como sonar, radar, medição com ultrassom e outros.

O CRT foi desenvolvido essencialmente no final do século passado. Em 1858, J. Plücher descobriu que raios invisíveis eram emitidos pelo catodo, num tubo de descarga evacuado, e que estes raios podiam ser defletidos por

⁶Esta não deve ser confundida com "tomografia computadorizada".

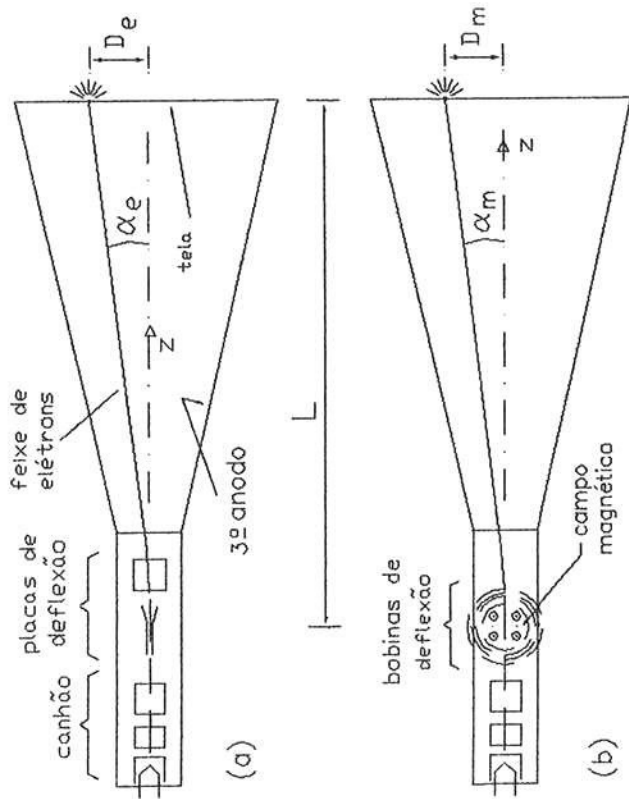


Figura 8: CRT a. Deflexão eletrostática. b. Deflexão magnética.

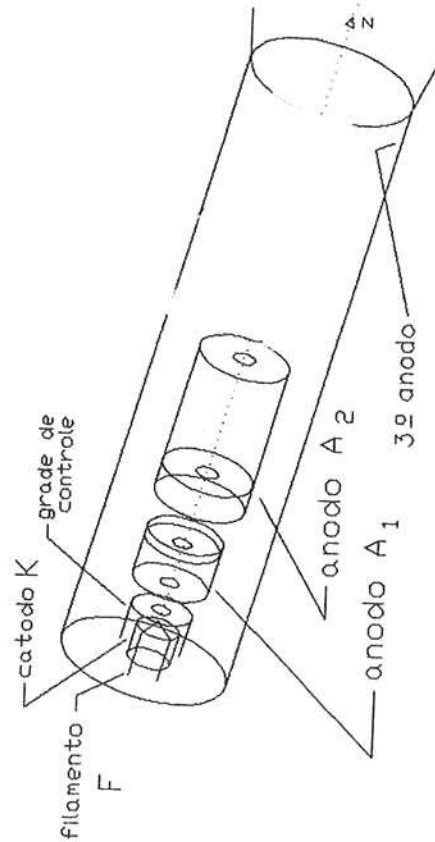


Figura 9: Canhão de elétrons.

um imã, conforme evidenciado pelo movimento de um ponto luminoso na parede de vidro do tubo. Desde então, um grande número de pesquisas foram efetuadas por A. E. Becquerel, J. P. Gasiot, J. W. Hittorf, E. Goldstein, E. Wiedemann, P. E. Lecoq de Boisbaudran, W. Crookes e P. E. A. Lenard e outros. Em 1897, J. J. Thomson mostrou que os raios catódicos eram partículas carregadas, e chamou-as de "corpúsculos". O nome "elétron" para os raios catódicos foi sugerido em 1881 por J. S. Stoney, mas só foi extensivamente adotado após 1900. Curiosamente, a expressão "tubo de raios catódicos" (CRT ou TRC) é utilizada até os dias de hoje.

Exemplos de CRT são⁷ mostrados esquematicamente nas Figuras 8.

A Figura 9 mostra um exemplo de um canhão de elétrons que gera, acelera e focaliza um feixe de elétrons. Um feixe de elétrons é gerado por *emissão termoiónica* no cátodo K , aquecido por um filamento F . Os elétrons são acelerados em direção a anodos A_1 e A_2 , em potenciais V_1 e V_{ac} . Estes anodos são desenhados de forma que a desempenhar também a função de lente eletrostática para a focalização do feixe. Neste exemplo, a posição do feixe na tela é controlada por placas defletoras horizontais e verticais. Neste exemplo de canhão, tanto a focalização do feixe quanto a deflexão são eletrostáticas, baseadas em campos elétricos. Entretanto, campos magnéticos também podem ser usados, para focalização e para a deflexão do feixe.

Em geral, existe ainda um terceiro anodo para aceleração do feixe, que é um revestimento condutor nas paredes internas do CRT, desde a região de deflexão até a tela.

A tela é revestida internamente um material catodoluminescente e desempenha papel importante no CRT. Existem diversos materiais catodoluminescentes, que permitem obter imagens com diferentes cores, diferentes graus de persistência, diferentes sensibilidade e contrastes. Além disso existem telas mais complicadas, com mais de uma camada de material catodoluminescente ou estruturas mais complicadas como na TV colorida (Seção 11.7). Uma tela bastante complicada é a dos antigos CRTs de "armazenamento de imagem" ("storage tubes"), na qual a imagem fica gravada por tempo muito longo. Neste caso, a catodoluminescência é mantida por um chuveiro de elétrons que são atraídos para as linhas da imagem, devido a uma "imagem eletrostática" formada numa tela anterior.

⁷Uma descrição detalhada de vários tipos de CRT é dada na Referência 5.

Deflexão eletrostática

Se E é o campo eléctrico numa placa de deflexão de comprimento l , o ângulo de saída do feixe é dado por

$$tg \alpha_e \cong \frac{e}{m} \frac{El}{v_z^2}, \quad (9)$$

onde e/m é a razão da carga para a massa do elétron e v_z é a velocidade do elétron ao entrar no campo eléctrico transversal, dada por

$$v_z \cong \sqrt{(2eV_{ac})/m}, \quad (10)$$

onde V_{ac} é a tensão de aceleração do elétron (do catodo até o eletrodo de saída do canhão).

O campo eléctrico pode ser admitido como $E = c_e V_d$, onde V_d é a tensão aplicada à placa de deflexão e c_e é uma constante de proporcionalidade. Assim, a deflexão do feixe na tela pode ser escrita como

$$D_e = S_e U_d \quad \text{onde} \quad S_e \cong \frac{l L c_e}{2 V_a}, \quad (11)$$

sendo L a distância da placa de deflexão à tela. A constante S_e é a sensibilidade, geralmente dada em mm/V

Deflexão magnética

A deflexão do feixe de elétrons também pode ser feita por meio de campo magnético, como mostrado na Figura 8.b. Se B é a indução magnética transversal à velocidade v_z , o ângulo de saída do feixe é dado por

$$tg \alpha_m \cong \frac{e}{m} \frac{Bl}{v_z}, \quad (12)$$

onde l é o comprimento do percurso elétron no campo magnético transversal. O campo magnético pode ser admitido como $B = c_m n i_d$, onde i_d é a corrente na bobina de deflexão e n é o número de espiras. Assim, a deflexão do feixe na tela pode ser escrita como

$$D_m = S_m i_d \quad \text{onde} \quad S_m \cong \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{n l L c_m}{\sqrt{V_a}}, \quad (13)$$

A constante S_m é a sensibilidade, geralmente dada em mm/A

Tanto para deflexão magnética, quanto para deflexão eletrostática, ocorrem “aberrações”, que são defeitos de focalização do feixe para grandes deslocamentos. Entretanto, para deflexão magnética, as aberrações são bem menores para grandes ângulos. Por isso, a deflexão magnética é utilizada para CRTs com telas grandes, tais como tela de TV ou radar. Para deflexão eletrostática, a desfocalização se torna significativa para ângulos acima de 20° , enquanto que na deflexão magnética, a focalização pode ser razoável até ângulos de deflexão próximos de 60° .

Comparando as deflexões magnética e eletrostática dadas pelas Equações 12 e 9:

$$\frac{tg \alpha_m}{tg \alpha_e} \cong \frac{B}{E} \frac{v_z}{c}. \quad (14)$$

Admitindo campos eléctrico e magnético com mesma densidade de energia:

$$\frac{1}{2\mu_o} B^2 = \frac{1}{2} \epsilon_o E^2 \quad \text{e} \quad \frac{tg \alpha_m}{tg \alpha_e} \cong \frac{v_z}{c}, \quad (15)$$

onde $c = 1/\sqrt{\mu_o \epsilon_o}$ é a velocidade da luz no vácuo. Assim, para mesma densidade de energias magnética e eléctrica, a sensibilidade é bem menor no caso de deflexão magnética. Além disso, no caso do CRT pode-se gerar uma densidade de energia eletrostática numa pequena região, entre pequenas placas de deflexão. Para se obter mesma densidade de energia magnética é necessário usar bobinas externas ao tubo, gerando campo magnético num volume muito maior. Em resumo, como regra geral, a deflexão eletrostática tem maior sensibilidade que a magnética, com menor dispêndio de energia.

Na deflexão magnética, o campo magnético é gerado por bobinas com grande número de espiras. Isto significa que as indutâncias das bobinas não podem ser muito pequenas, limitando bastante as correntes de deflexão (i_d) em altas frequências. No caso de deflexão eletrostática não existe esta limitação, pois as indutâncias das placas de deflexão podem ser bastante baixas. Na prática, a deflexão magnética pode ser empregada até dezenas de kHz , enquanto que a deflexão eletrostática pode funcionar até a ordem de grandeza de 1 GHz . Muito acima desta frequência, nenhum destes métodos é viável e outros métodos devem ser usados⁸.

⁸Ver Referência 5, por exemplo.

Tempo de resposta

Outra característica importante do CRT é a resposta em frequência. Para validade das Equações 11 ou 13, é essencial que V_d (ou i_d) seja aproximadamente constante durante o tempo τ de passagem do elétron pela placa de deflexão:

$$\frac{1}{\tau} \approx \frac{1}{T} \sqrt{\frac{2eV_a}{m}}, \quad (16)$$

Para altas frequências, a tensão de aceleração deve ser alta. Usualmente, chega a 20 kV para frequências de centenas de MHz .

Osciloscópio

O osciloscópio foi inventado por K. F. Braun em 1897 e foi o primeiro dispositivo prático usando raios catódicos e tela catodoluminescente. Entretanto, deve ser observado que o osciloscópio evoluiu continuamente ao longo do tempo até atingir um grau notável de sofisticação nos anos recentes.

Em geral, CRT do osciloscópio deve funcionar em frequências relativamente altas e a deflexão eletrostática deve ser utilizada. Para grandes deflexões, este sistema resulta em grandes aberrações na focalização. Por isso, o osciloscópio geralmente tem tela pequena.

Uma característica importante do osciloscópio é a sensibilidade S_e , que é a relação entre deflexão no feixe na tela e tensão nas placas deflexão. Outra característica importante é a resposta em frequência.

Osciloscópios convencionais comuns têm grande sensibilidade, excelente linearidade, grandes facilidades de controles de varredura, vários canais, que permitem observar vários sinais simultaneamente e outras características. Além disso, foram desenvolvidos osciloscópios convencionais especiais especiais com retenção de imagem na tela (osciloscópio de armazenamento), osciloscópios para altas frequências (alguns GHz) e outros.

Atualmente, os osciloscópios mais sofisticados estão sendo substituídos por osciloscópios digitais. Neste tipo de osciloscópio, o tubo de raios catódicos deixa de ter papel essencial, se tornando um simples monitor para reproduzir imagem. O papel mais importante passa a ser o do sistema eletrônico que faz aquisição, armazenamento e processamento dos sinais elétricos, antes de gerar um sinal de vídeo para o monitor, que pode ser um mostrador de cristal líquido (LCD) (Seção 14).

9 Radar

A palavra radar foi formada a partir de "radio detection and ranging", significando "detecção e busca pelo rádio". O radar se compara a um holofote movimentado na escuridão. Quando a luz atinge algum objeto suficientemente claro, o indivíduo que aciona o holofote detecta o objeto. Este é essencialmente o princípio do radar. A diferença é que o radar utiliza ondas de rádio, microondas, ondas milimétricas ou submilimétricas. Comparado com um holofote, tem a vantagem do sistema eletrônico de detecção, que permite medir precisamente a distância do objeto, além de permitir detecção de objetos a distâncias (alcances) muito maiores.

O radar foi desenvolvido nos anos 30, nos EUA, na Inglaterra, na França e na Alemanha. Em particular, o radar desenvolvido na Alemanha era o mais eficiente, funcionando em 600 MHz . Entretanto, o radar alemão praticamente não foi melhorado durante a 2ª Guerra, enquanto que, Inglaterra e principalmente nos EUA, aperfeiçoaram o radar usando microondas. Um grande esforço foi dedicado ao desenvolvimento do radar, envolvendo milhares de pessoas, tendo como motivação principal a detecção de aviões e navios de guerra.

O radar mais comum emite pulsos de ondas de rádio e detecta "ecopulsos" correspondentes a ondas refletidas pelo objeto, também chamado de "alvo". Usualmente, a antena para emissão é mesma para detecção e faz um varredura da região de interesse.

Se um objeto está a uma distância r , o ecopulso é detectado na posição do radar após o tempo

$$t = \frac{2r}{v} \quad (17)$$

onde v é a velocidade da luz. Para um alvo a 1 km , resulta um tempo $t \approx 6,7 \mu\text{s}$. Este tempo é facilmente mensurável com um osciloscópio comum, por exemplo.

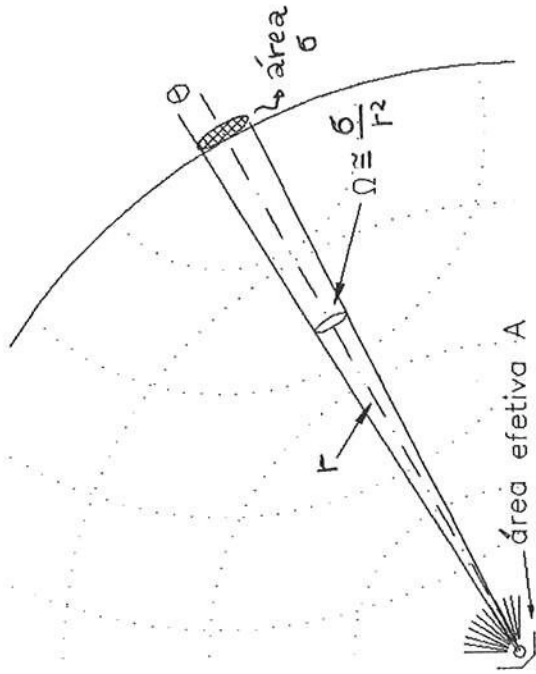


Figura 10: Redução de intensidade no pulso do radar.

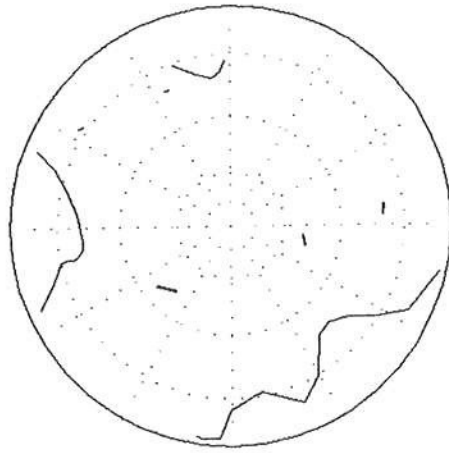


Figura 11: Desenho esquemático de uma tela de radar.

Se o radar emite um **pulso** de energia total E_t num ângulo sólido Ω , o fluxo de radiação num alvo de "área efetiva" σ , a uma distância r é $E \approx E_t \sigma / \Omega r^2$ (ver Figura 10). Como aproximação, pode-se admitir que o alvo espalha a radiação isotropicamente. Se a área efetiva de recepção do radar é a área A da antena, a energia captada pela antena é

$$S \approx \frac{EA}{4\pi r^2} \approx \frac{E_t}{4\pi \Omega} \frac{A\sigma}{r^4}. \quad (18)$$

O termo E_t/Ω mostra que, além de emitir um pulso de grande potência, é importante uma antena bastante direcional, de forma que a potência seja emitida num ângulo sólido pequeno. Além disso, um feixe de radiação se alarga por difração, de maneira semelhante à difração da luz num orifício circular. Para um feixe de radiação de diâmetro a , a divergência é da ordem de grandeza de θ , onde

$$\sin \theta \approx 1,22 \frac{\lambda}{a}. \quad (19)$$

Para ângulo θ pequeno, $\sin \theta \approx \theta$ e o ângulo sólido correspondente é dado por $\Omega \approx \pi \theta^2$. Admitindo o feixe de radiação inicial do tamanho da antena, resulta $A \approx \pi a^2/4$. Assim resulta

$$S \approx 0,02 \frac{A^2 \sigma}{\lambda^2 r^4} E_t \quad (20)$$

A análise da expressão acima permite avaliar os principais fatores que influem no alcance do radar.

O termo $\sigma A^2 / \lambda^2 r^4$ na expressão representa uma dramática redução de intensidade. Usualmente, a desproporção entre r^2 e a área A da antena ou a área σ do alvo é enorme. Por exemplo, para antena de $1 m^2$, alvo de $10 m^2$, $r = 10 km$ e $\lambda = 1 m$ tem-se $S \approx 2 \times 10^{-17} E_t$. Se a distância aumentar 20%, S diminui para metade ($1/(1,2)^4$). Como o alcance do radar é limitado pelo ruído eletrônico na medição do ecopulso, resulta que o alcance do radar é bem definido. Se a $10 km$ o nível de sinal do ecopulso está próximo do ruído eletrônico, a $12 km$ não é possível medir mais nada.

A Equação 20 mostra que um radar de longo alcance deve ter antena grande e um comprimento de onda pequeno. Por isso, radares de longo alcance devem operar na faixa de microondas.

Um caso, simples é uma antena que emite e detecta ecopulsos essencialmente na direção horizontal. Se a antena gira de maneira uniforme e em baixa rotação, pode-se construir uma "imagem" dos objetos encontrados, a partir dos ângulos e das direções em que ocorrem os ecopulsos.

Uma "imagem" pode ser obtida diretamente na tela de um CRT convenientemente adaptado, chamado PPI ("plan position indicator"). Neste CRT o feixe eletrônico realiza varredura rápida da tela do centro para a borda e o traço resultante deve girar em torno do centro com a mesma rotação da antena. Assim, a direção do traço indica em cada instante a direção da antena. Para formar a imagem pode-se modular a intensidade do feixe conforme os ecopulsos detectados. A traço tem baixa luminosidade quando não existe sinal e quando ocorre um ecopulso aparece um ponto brilhante.

Assim, se a persistência da tela é suficientemente alta, maior que o período de rotação da antena, a tela reproduz uma imagem estável dos objetos que se encontram no alcance do radar, como mostrado na Figura 11.

O caso acima é apenas um exemplo de varredura para formar imagem de objetos num plano horizontal. Vários outros modos de varredura são possíveis, tais como varredura vertical ou em planos horizontais diferentes do plano da antena. A formação de imagem num PPI é, evidentemente, sistema bem primitivo de formar imagem. Atualmente, sistemas computadorizados armazenam dados e reproduzem a imagem num monitor.

10 Ultrassonografia

Por ultrassonografia pode-se entender a obtenção de imagens utilizando ultrassons⁹. Mais exatamente, a imagem é obtida a partir da medição da intensidade de ultrassom refletido num meio material. A nomenclatura para ondas sônicas e alguns fenômenos típicos são mostrados na Figura 12.

Em líquidos e gases, a onda sônica pode ser descrita como uma onda longitudinal de perturbação da pressão p . Entretanto, em sólidos a onda também pode ser transversal.

Frequência ν e comprimento de onda λ são relacionados por

$$\nu \lambda = v, \quad (21)$$

onde v é a velocidade do som no meio.

⁹O assunto é tratado em detalhes e em nível razoavelmente simples na Referência 6.

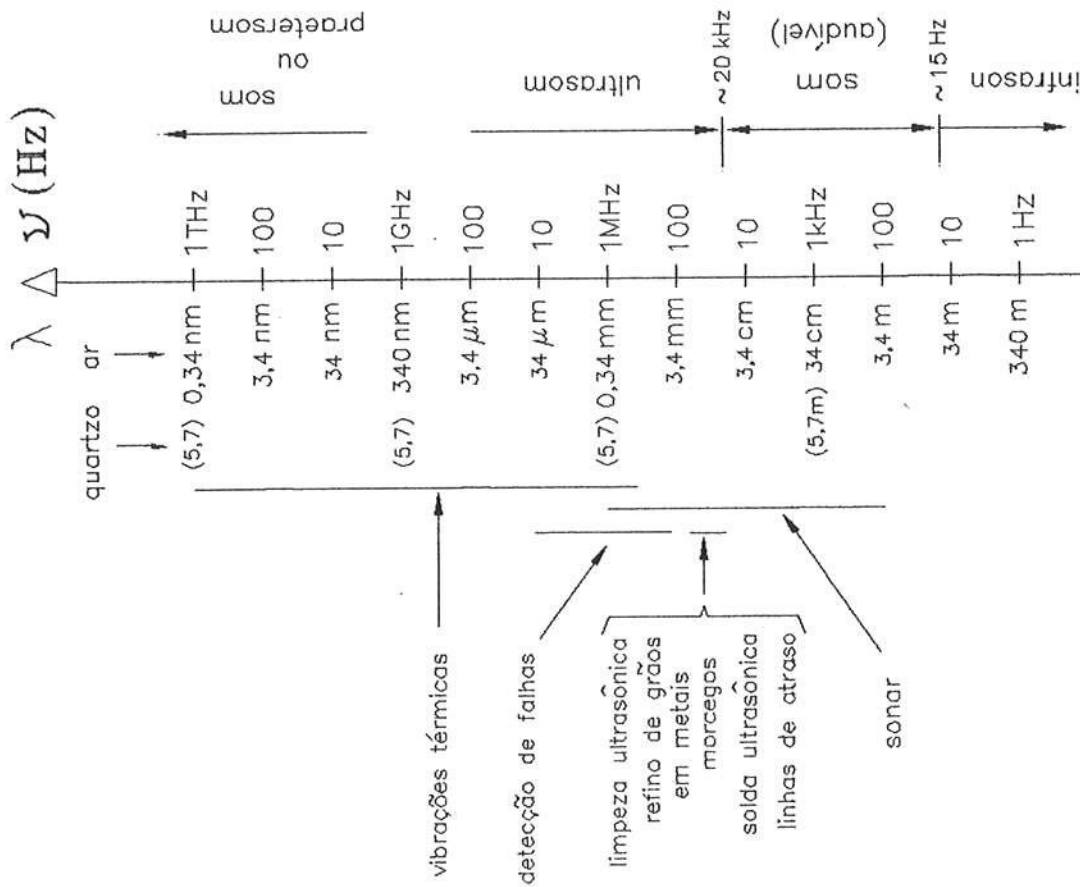


Figura 12: Ondas sônicas e alguns fenômenos típicos.

O “nível de potência” da onda é definido em *nepers* (Np) ou em *decibéis* (dB) pelas relações:

$$\text{nível de potência} = \log_e \left(\frac{p}{p_o} \right) Np = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_o} \right) dB. \quad (24)$$

Pode ser mostrado das definições que $1 Np = 8,686 dB$. A referência para “nível de potência zero” é $10^{-12} W/m^2$, que corresponde aproximadamente ao limiar de sensibilidade do ouvido humano em $1 kHz$.

Alguns índices de atenuação típicos são

$$\text{para o ar: } \alpha_p \cong 1,85 \times 10^{-11} \nu^2 \frac{Np s^2}{m},$$

$$\text{para água: } \alpha_p \cong 2,5 \times 10^{-14} \nu^2 \frac{Np s^2}{m} \quad e$$

$$\text{para alumínio em } 10 MHz: \quad \alpha_p \cong 0,40 \frac{Np}{m}.$$

No caso de líquidos e gases, α_p é proporcional ao quadrado da frequência, exceto em frequências extremamente altas.

O método mais importante de produzir ultrassom é pela vibração de um *crystal piezoelétrico*, que se deforma sob a ação de um campo elétrico. Assim, se faces paralelas do cristal têm um revestimento metálico, a aplicação de uma tensão alternada, de amplitude e frequência adequadas, permite colocar o cristal em vibração. Se acusticamente acoplado com um meio material, as ondas se propagam no meio. Podem ser construídos transdutores piezoelétricos para funcionar numa ampla faixa de frequências, desde frequências audíveis, tais como os alto-falantes piezoelétricos para agudos, até dezenas de MHz . Quartzo cristalino é um dos cristais piezoelétricos mais utilizados. Entretanto, existem outros materiais tais como $BaTiO_3$, $PbNb_2O_6$ e outros. Também existem outros métodos para gerar ultrassom, usando transdutores baseados em magnetostrução, transdutores eletromagnéticos e transdutores eletrostáticos, além de transdutores mecânicos (“apitos”).

Os transdutores elétricos também funcionam com receptores de ultrassom, com base no efeito inverso. Por exemplo, se o cristal piezoelétrico é submetido a tensão mecânica, gera uma tensão elétrica. Assim, vibrando sob efeito do ultrassom, o transdutor gera um sinal elétrico de mesma frequência.

Meio	V (m/s)	Impedância acústica $kg m^{-2} s^{-1}$	T
Ar	331,46	$0,000431 \times 10^6$	$0^\circ C$
Hidrogênio	1286	$0,000116 \times 10^6$	$0^\circ C$
Água destilada	1482,3	$1,48 \times 10^6$	$20^\circ C$
Etanol	1162	$0,917 \times 10^6$	$20^\circ C$
Alumínio	5102	17×10^6	$20^\circ C$
Chumbo	1188	24×10^6	$20^\circ C$

Tabela 1: Velocidades e impedâncias acústicas para alguns materiais

A Tabela 1 mostra alguns exemplos de velocidades de ondas sonoras. Como regra geral, as velocidades são maiores nos sólidos, menores nos líquidos e menores ainda nos gases.

Um aspecto importante na ultrassonografia é a reflexão da onda num meio material. Considerando uma onda que se propaga num meio A e incide perpendicularmente num meio B, a relação entre as intensidades transmitida e incidente é dada por¹⁰

$$T = \frac{4 w_A w_B}{(w_A + w_B)^2} \quad (22)$$

onde w_A e w_B são as *impedâncias acústicas características* dos meios A e B, exemplificadas na Tabela 1. Nos casos em que as impedâncias acústicas são muito diferentes, a onda é quase inteiramente refletida no meio B.

Um outro aspecto relevante é a atenuação das ondas sonoras em um meio material. A intensidade I é proporcional ao quadrado da amplitude p e a atenuação numa distância x é descrita por

$$\frac{I}{I_o} = \left(\frac{p}{p_o} \right)^2 = e^{-2\alpha_p x}, \quad (23)$$

onde p_o e I_o são os valores iniciais.

¹⁰Ver Referência 6, por exemplo.

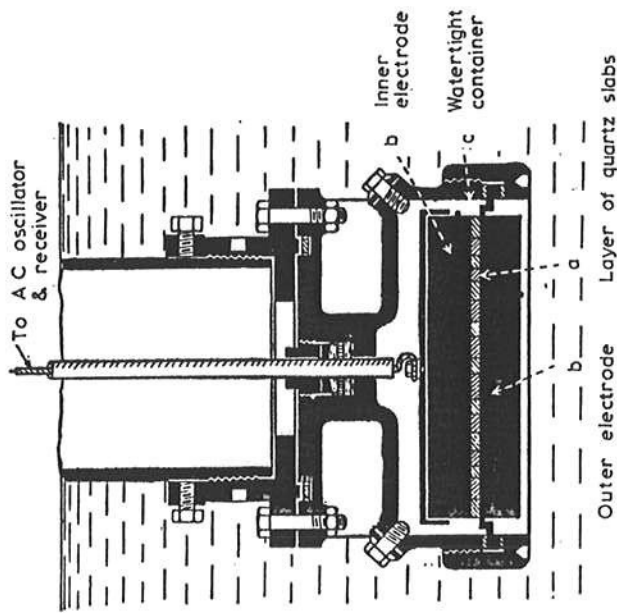


Figura 13: Sonar de Langevin.

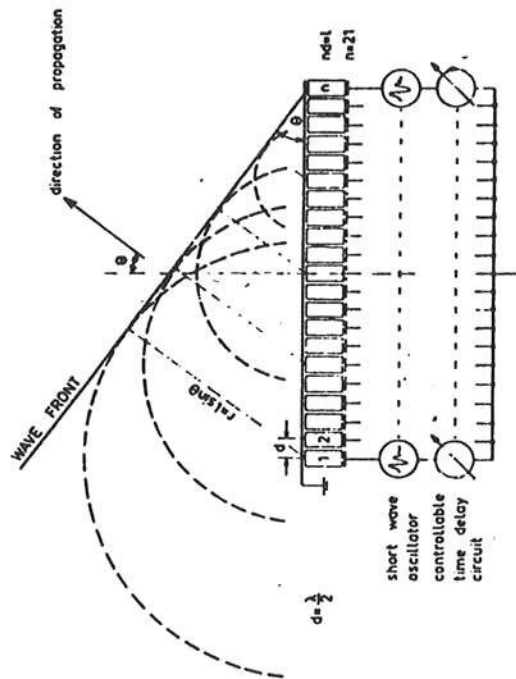


Figura 14: Esquema para gerar ultrassom numa direção arbitrária.

Em muitos casos, o mesmo transdutor é utilizado como gerador e como receptor de ultrassom.

Uma aspecto sempre problemático em ultrasonografia é o acoplamento acústico do gerador com o meio. Conforme observado antes, se existe uma diferença grande entre as impedâncias acústicas do gerador e do meio, a onda praticamente não penetra no meio. Por isso, o gerador sempre deve estar em contacto directo com o meio ou com acoplamento acústico adequado.

10.1 Sonar

A utilização de ultrassom para detecção de obstáculos no mar, submersos ou não, foi sugerida por L. F. Richardson, na época do naufrágio do Titanic, em 1912. Durante a 1ª Guerra, o assunto foi bastante pesquisado e P. Langevin conseguiu construir um sistema viável de detecção no final da guerra. O sistema foi aperfeiçoado na década de 30 e, na 2ª Guerra, era equipamento padrão de detecção de submarinos.

A palavra sonar¹¹ foi formada a partir de "sound navigation and ranging", significando "navegação e busca pelo som". Imagens do sonar podem ser obtidas de maneira semelhante ao radar, pelo método de emitir pulsos curtos e detetar os ecos correspondentes a reflexão da onda em algum "alvo", que é um meio de impedância acústica diferente.

As ondas sônicas são muito pouco atenuadas em meios sólidos e líquidos. Como pode ser observado do coeficiente de atenuação em água, o sonar pode operar com alcances bastante grandes em frequências ultrassônicas baixas. Por exemplo, em 100 kHz , resulta $\alpha_p = 0,25\text{ Np/km}$. Isto é, em 1 km , a intensidade da onda diminui a $1/e^{2 \times 0,25} \approx 0,61$ da intensidade inicial.

O sonar é muito semelhante ao radar, exceto pelo fato que opera usando ondas sonoras, principalmente ultrassom. Deve ser observado que sonar e radar são equipamentos que se complementam. Enquanto que as ondas ultrassônicas são pouco atenuadas na água, as ondas eletromagnéticas são rapidamente atenuadas em meio condutor e também em água salgada. Por outro lado, as ondas sônicas são bastante atenuadas no ar, meio onde as ondas de rádio e microondas são muito pouco atenuadas.

¹¹Na Inglaterra tem o nome "Asdic", significando Allied Submarine Detection Investigation Committee.

A distância δ ("skin depth")¹², para a qual uma onda eletromagnética diminui a $1/e^2$ da intensidade inicial em meio condutor é dada por

$$\delta \cong \sqrt{\frac{1}{\pi \nu g \mu}} \quad (25)$$

onde ν é a frequência da onda, μ é a permeabilidade e g é a condutividade do meio. Para a água do mar $\mu \cong \mu_0$ e $g \approx 4,31/ohm.m$, para ondas longas de radio. Assim, resulta

$$\delta \cong 7,7/\sqrt{f(kHz)} \quad (\text{em metros}) \quad (26)$$

Para frequência $f \cong 59 kHz$, resulta $\delta = 1 m$. Como pode-se ver, somente ondas de radio de frequências muito baixas podem se propagar na água do mar, com forte atenuação em distância da ordem de dezenas de metros.

A Figura 13 mostra o sonar construído por Langevin. Uma lâmina de cristal de quartzo é montada entre dois eletrodos metálicos, aos quais é aplicada uma tensão alternada. O campo elétrico alternante coloca a lâmina de quartzo em vibração por efeito piezoelétrico. O conjunto é colocado dentro de uma caixa com água para acoplamento acústico. O gerador de ultrassom funciona também como receptor.

Uma grande vantagem do sonar da Figura 13 é que a onda é emitida perpendicularmente ao transdutor, limitando seriamente a região de detecção do sonar.

No caso do radar, a antena pode girar com velocidade relativamente alta. Entretanto, mover o transdutor do sonar para realizar varredura angular é bem mais complicado. A Figura 14 mostra uma solução engenhosa, baseada no princípio de Huyghens, que permite gerar ultrassom numa direção θ arbitrária, sem movimentar o gerador. Uma série de transdutores pequenos é alimentada com pulsos elétricos em sequência. Em cada elemento transdutor, o pulso elétrico é atrasado em relação ao elemento anterior de um tempo δt . Se d é a distância entre elementos sucessivos, forma-se uma frente de onda inclinada de um ângulo θ em relação à normal, dado por

$$\sin \theta = \frac{c \delta t}{d} \quad (27)$$

Assim, ângulo θ pode ser controlado eletronicamente, ajustando-se o tempo de atraso δt .

¹²Ver Referência 7, por exemplo.

Morcegos

Usualmente, entende-se por sonar o dispositivo desenvolvido pelo homem. Entretanto, a maioria dos morcegos têm sonares bastante sofisticados. Os pulsos de ultrassom são produzidos pela língua ou pela laringe, dependendo da espécie. A detecção dos ecopulsos é feita pelo ouvido, evoluído de forma a detectar ultrassom.

Existem cerca de 800 espécies diferentes de morcegos, que utilizam diferentes tipos de sonares, alguns combinados com detecção de efeito Doppler, em frequências de 30 a 100 kHz. Uma descrição um pouco mais detalhada dos sistemas de detecção dos morcegos é apresentada na Referência 6. A seguir, apenas são apresentados alguns exemplos ilustrativos, devendo ser observado que são apenas exemplos. Existe uma grande variedade de tipos diferentes de sonares, inclusive morcegos que não têm sonar.

O *Myotis lucifugus* emite cerca de 10 pulsos de ultrassom quando está voando normalmente ("cruzeiro") e pode aumentar esta taxa até cerca de 200 pulsos/s, em manobras de voo complicadas. Entretanto, os pulsos são de frequência variável. Um pulso típico dura cerca de 2ms iniciando-se em $\approx 80 kHz$ e terminando em $\approx 40 kHz$. O morcego se orienta com base nos ecopulsos.

No caso do morcego *Rhinolophus ferrumequinum*, os pulsos têm uma frequência muito pura em $\approx 85 kHz$. Em "cruzeiro", cada pulso dura cerca de 50ms. Mas a duração dos pulsos pode diminuir a cerca de 5ms, com emissão de cerca de 80 pulsos/s. A finalidade de pulsos longos com frequência bem definida é determinação de velocidades com base em efeito Doppler no pulso refletido. Existem evidências de que este morcego pode detectar deslocamentos Doppler na ordem de 1%.

Para avaliar o grau de eficiência do sonar de morcego, pode-se mencionar a experiência de L. Spallanzani no final do Século 18. Cerca de 52 morcegos foram capturados, cegados cirurgicamente e devolvidos à colônia de morcegos. Alguns dias mais tarde, alguns destes morcegos foram capturados e verificou-se que estes morcegos cegos tinham caçado tantos insetos à noite, quanto os morcegos normais. Deve ser observado que a captura de insetos em voo não é nada fácil, uma vez que vários deles podem detectar ultrassom e realizar manobras evasivas de voo.

Outros animais também têm sonares bastantes eficientes, tal como o boto da Amazônia, que captura peixes em águas turvas usando sonar.

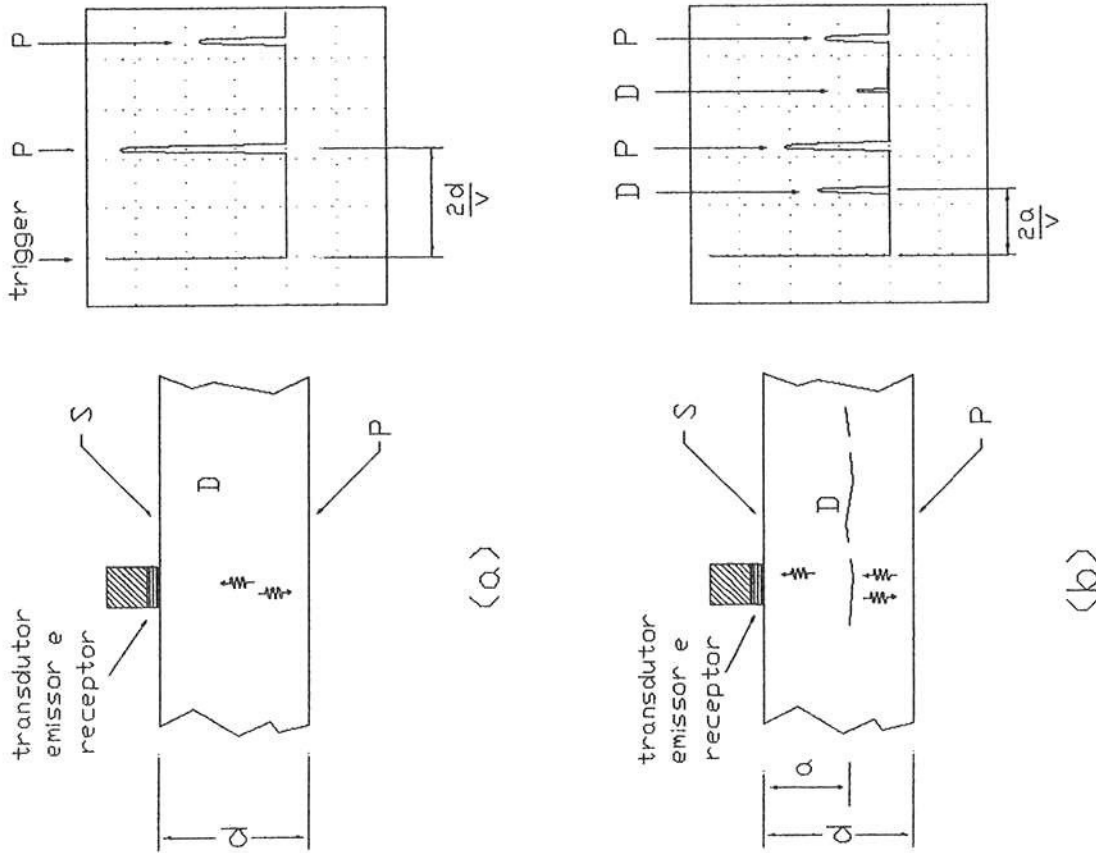


Figura 15: Teste de ultrassom numa peça. a. Sem falha. b. Com falha.

10.2 Varreduras A e B

Varredura A

Um exemplo simples de detecção de falhas utilizando ultrassom é esquematizado na Figura 15. Um corpo homogêneo é delimitado por superfícies planas S e P, separadas de uma distância d . Um pulso de ultrassom só é refletido na superfície P e detectado no transdutor após o tempo $t = 2d/c$. Qualquer defeito D na homogeneidade, reflete parte do pulso, que é detectado antes, como mostrado na Figura 15.b.

Para detecção, o sinal do transdutor é aplicado no eixo-y de um osciloscópio, com varredura temporal usual no eixo-x. Este tipo de detecção é chamado "varredura A".

Um aspecto importante é o acoplamento acústico entre o transdutor e o material. Como pode ser visto da Tabela 1, a diferença de impedâncias acústicas do ar e de sólidos é enorme. Por isso, uma simples camada de ar entre o transdutor e o material prejudica excessivamente a penetração da onda no meio. A solução consiste em fazer *acoplamento acústico*¹³ entre o transdutor e o material, utilizando um meio fluido de impedância acústica intermediária. Em geral, existem graxas especiais para acoplamento entre o transdutor e o material sob teste. Quando não existe necessidade de movimentar ou remover o transdutor, pode-se usar cola epoxi.

A técnica é usualmente empregada para detecção de trincas, bolhas ou outros defeitos em peças mecânicas. Em geral, o transdutor também pode ser utilizado formando um certo ângulo com a superfície.

Numa peça complicada, podem existir muitos ecopulsos refletidos, sendo difícil interpretar o resultado. Entretanto, deve ser observado que uma peça regular apresenta um padrão definido de ecopulsos. Assim, qualquer peça com defeito apresentará modificação em relação ao padrão regular.

Nem sempre o mesmo transdutor é utilizado como receptor. Em muitos casos, pode ser mais conveniente utilizar um segundo transdutor como receptor. Neste caso, o receptor pode detectar ecopulsos em direções diferentes, mas também pode detectar pulsos transmitidos e não os refletidos.

O método pode também ser aplicado em diagnóstico clínico de anomalias, quando o padrão de ecopulsos é bem conhecido, numa situação de normalidade.

¹³"Casamento de impedâncias acústicas".

Varredura B

A varredura A fornece uma "imagem" que de fácil interpretação, mas que não tem muita relação com o objeto sob exame.

Uma imagem propriamente pode ser obtida por meio da chamada "varredura B", esquematizada na Figura 16. O transdutor está alinhado numa determinada direção em relação a um corpo, tendo no interior um elemento de impedância acústica diferente.

Na varredura A, o osciloscópio mostra sinais tais como na Figura 16.a, correspondentes às reflexões em 4 superfícies. Se o sinal do transdutor é utilizado para modular a intensidade do feixe de elétrons no CRT, obtém-se os pontos mostrados na Figura 16.b. Neste caso, o osciloscópio é utilizado com varredura horizontal normal.

A Figura 16.c mostra o resultado quando a varredura do feixe é feita no ângulo correspondente à direção do transdutor. Isto é, o osciloscópio deve ser especialmente adaptado para que a varredura da tela seja sempre na mesma direção do transdutor.

Assim, girando o transdutor, pode-se obter uma "imagem" do corpo semelhante a de um radar, como mostrado na Figura 16.d. Como a varredura angular é lenta, pode-se utilizar um CRT de armazenamento de imagem ou tubo "skiatron" de traço escuro quase permanente que se apaga por aquecimento ou método computadorizado para gravar a imagem.

O tipo de varredura angular mostrado é apenas um exemplo. Outros modos de varredura são possíveis. Por exemplo, na Figura 16, o transdutor poderia ser apenas girar em torno de si mesmo, como uma antena de radar. Assim, seria obtida uma imagem de modo inteiramente análogo a uma antena de radar.

No caso de diagnósticos médicos a faixa de frequências utilizada é de 1 a 10 MHz.

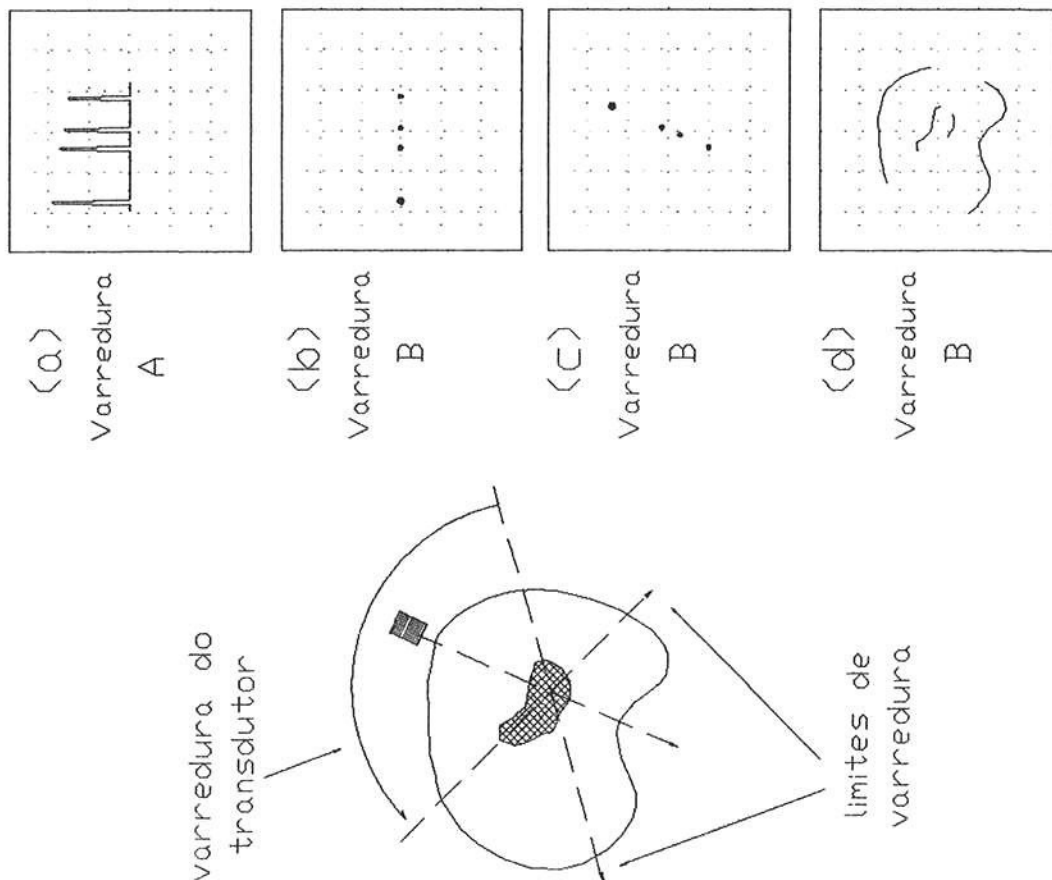


Figura 16: Varreduras A e B em ultrassonografia.

11 Televisão

11.1 Um breve histórico

Uma infinidade de fenômenos elétricos e óticos foi descoberta e pesquisada, principalmente a partir de 1800. Tais fenômenos, direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento de um sistema de transmissão de imagens¹. Entre os fenômenos mais diretamente relacionados podem ser mencionados desenvolvimento de materiais luminescentes (V. Cascariolo - 1603 e muitos outros), os efeitos eletroquímicos da luz (A. F. Becquerel - 1839), isolamento do elemento selênio (J. J. Berzelius - 1817) e descoberta de suas propriedades fotocondutivas (L. May - 1873). Particularmente importante foi o desenvolvimento do tubo de raios catódicos e a invenção do osciloscópio, em 1897 (ver Seção 8).

Um dos marcos iniciais no desenvolvimento da televisão² foi o sistema patenteado na Alemanha em 1884, por P. Nipkow. O sistema é baseado num disco girante como mostrado na Figura 17 (disco de Nipkow), que contém o princípio básico de funcionamento da televisão.

Uma contribuição notável para a televisão é devida a A. A. C. Swinton que, em 1908, idealizou o sistema de televisão moderno, baseado na varredura de um feixe de elétrons em um tubo de raios catódicos, tanto para a câmara de vídeo, quanto para o receptor. Na câmara, deveria existir uma tela com um mosaico de elementos fotoelétricos³, sobre a qual é projetada a imagem a ser transmitida. A seguir, os elementos são descarregados sequencialmente por um feixe de elétrons varrendo a tela, linha por linha. No receptor, o feixe varre a tela da mesma maneira, excitando o revestimento catodoluminescente. Swinton sugeriu que a tela deveria ter pelo menos 100 000 elementos⁴. Aparentemente, as idéias de Swinton foram muito avançadas para a época e somente se efetivaram muitos anos mais tarde.

Muitas experiências e sistemas tentativos se seguiram, usando sistemas “mecânicos”, tais como o disco de Nipkow, ou baseados varredura de elétrons.

¹ Apresentações detalhadas sobre a televisão e sistemas de transmissão podem ser obtidas nas Referências 8 e 9.

² A expressão “televisão” é utilizada aqui para todo o sistema de transmissão, desde a geração de sinal pela câmara de vídeo até a formação de imagem pelo receptor.

³ Elementos que emitem elétrons por efeito fotoelétrico.

⁴ A televisão tem de 150 000 a 400 000 pixels, conforme o sistema de transmissão.

Um dos marcos a ser destacados é a patente de V. K. Zworykin para a câmara iconoscópica, em 1923. Alguns anos mais tarde, Zworykin construiu esta câmara. A Radio Corporation of America (RCA) aperfeiçoou o cinescópio e, em 1932, exibiu um sistema completo de transmissão e recepção de imagem, inteiramente eletrônico.

A transmissão regular de televisão iniciou-se a partir de 1935, na Alemanha e a partir de 1940 nos Estados Unidos. Entretanto, a expansão generalizada da televisão pelo mundo ocorreu a partir de 1950.

A idéia da televisão colorida não é nova e existem trabalhos a respeito desde o início do século. Pode-se destacar uma demonstração prática da empresa Baird em 1928, usando o disco de Nipkow com 3 espirais, com filtros coloridos para as 3 cores primárias. O desenvolvimento da televisão colorida foi quase paralelo ao da televisão monocromática. Entretanto, uma das dificuldades sempre foi a de ter um sistema de transmissão colorido compatível com o sistema de recepção monocromático.

A transmissão de TV em cores iniciou-se em 1954 nos EUA com o sistema NTSC (National Television Systems Committee), sistema adotado também por Japão, Canadá, países da América Latina, em geral. Em 1967, Alemanha e Inglaterra iniciaram a transmissão no sistema PAL (phase alternation line), sistema também usado na maioria dos países da Europa. No mesmo ano, França e União Soviética iniciaram a transmissão no sistema SECAM (système électronique couleur avec mémoire). Em 1967, o Brasil adotou o sistema PAL-M, com base em estudos realizados na Escola Politécnica da USP. Poucos anos depois, foi iniciada a transmissão regular em cores.

11.2 Disco de Nipkow

Um exemplo de disco de Nipkow é esquematizado na Figura 17. Os 9 furos quadrados são dispostos regularmente a cada 40°, sendo cada furo deslocado radialmente do furo seguinte de uma distância u . Se o disco gira numa frequência f_g e existe uma imagem sobre o disco, num anteparo atrás do disco, a área S é varrida por um “spot” quadrado. A cada volta do disco, ocorre a varredura de 9 linhas de largura u , em sequência. Se o anteparo é um detector de luz, o sinal elétrico deste detector acompanha a intensidade luminosa ao longo da primeira linha da imagem e ao longo de cada uma das linhas seguintes, até completar o quadro. A Figura 18 mostra um exemplo de um sinal de “vídeo”, que contém as informações referentes ao quadro.

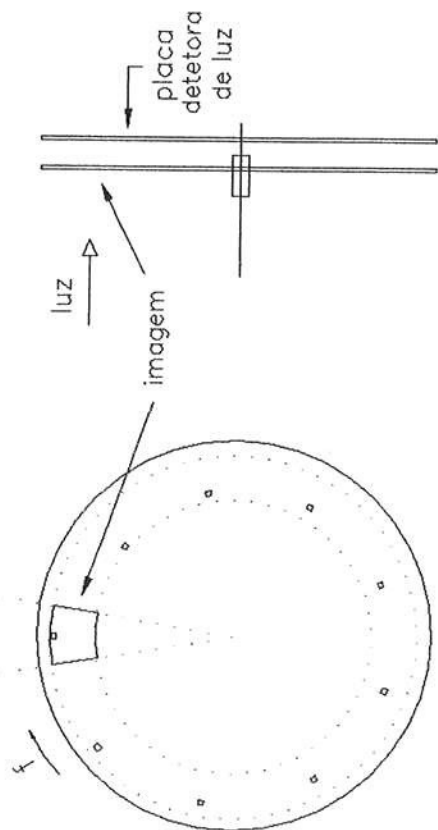


Figura 17: Disco de Nipkow.

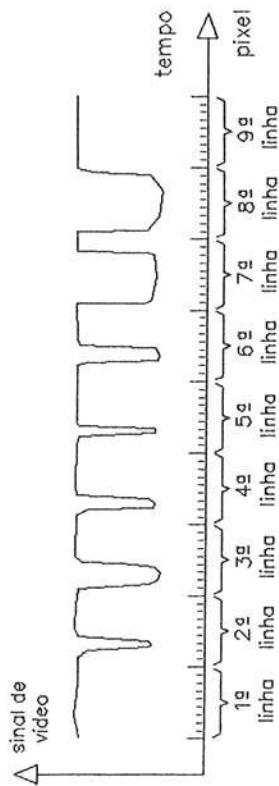


Figura 18: Sinal de “vídeo” produzido pelo disco de Nipkow.

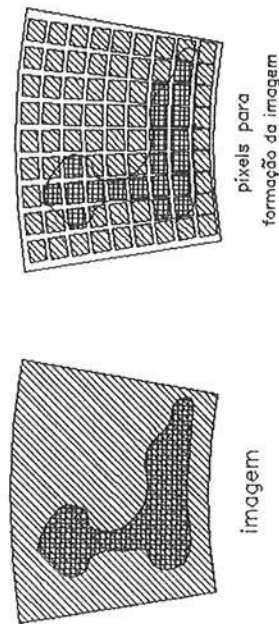


Figura 19: Pixels que formam a imagem.

	quadros/s	Nº de linhas	Nº de pixels	razão de aspecto
TV analógica convencional	25 ou 30	≈ 500	≈ 350 000	4 : 3
TV digital HDTV	24 a 240	720 a 1080	700 000 a 2 000 000	16 : 9

Tabela 2: Sistemas de televisão.

O sinal de vídeo possibilita reproduzir a imagem num sistema receptor adequado. Por exemplo, pode-se usar um disco semelhante, girando com a mesma velocidade angular, devidamente sincronizado e uniformemente iluminado com intensidade modulada pelo sinal de “vídeo”. Um anteparo atrás do disco reproduz a imagem.

Se a rotação do disco é muito lenta, será observado apenas um “spot” quadrado movendo-se lentamente no anteparo e com intensidade variável. Aumentando a rotação, as linhas começam a se tornar visíveis, devido à persistência da imagem na retina. Finalmente, se a frequência de rotação é suficientemente alta, o quadro todo se torna visível (ver Questão 4).

O disco de Nipkow contém essencialmente os ingredientes do sistema moderno de transmissão de imagem pela televisão. Entretanto, o sistema mecânico idealizado por Nipkow não é adequado e o anteparo fotossensível, tal como esquematizado resultaria num corrente muito baixa (ver Questão 9). Na televisão comum, a varredura para formação de imagem num cinescópio é feita por um feixe de elétrons. As câmaras mais antigas também funcionam por varredura de feixe de elétrons, tal como idealizado por Swinton em 1908.

No exemplo simples considerado, o quadro tem 9 linhas. Considerando cada elemento de imagem quadrado, resultam apenas 81 *pixels*, o que é muito pouco para definir uma imagem (ver Figura 19). Swinton, já em 1908, sugeriu que a tela deveria ter cerca de 200 000 *pixels*.

A Tabela 2 mostra algumas características dos sistemas de televisão modernos. Os valores são aproximados pois são diferentes para diferentes sistemas convencionais ou diferentes sistemas digitais.

A *razão de aspecto* é a razão da largura para altura do quadro.

11.3 Câmaras de TV

Princípio de armazenamento de cargas

Todas as câmaras de TV funcionam com base no chamado *princípio de armazenamento de carga*: a incidência de luz (na imagem ótica) produz cargas que são continuamente armazenadas em determinadas posições (*pixels*). Em resumo, a *imagem ótica* é convertida numa *imagem eletrostática*. As cargas armazenadas são lidas e zeradas, pixel a pixel, por meio de algum mecanismo de varredura.

O princípio de armazenamento de cargas se aplica às câmaras antigas baseadas em varredura por feixe de elétrons, mas também se aplica às modernas câmaras digitais (CCDs) de varredura eletrônica.

A corrente gerada por fotoelétrons num fotocátodo simples (sem amplificação) seria da ordem de *dezenas de picoampéres* para imagens razoavelmente iluminadas (ver Questão 9). Esta é uma corrente muito baixa e muito difícil de ser medida sem cuidados especiais. Por isto, o mecanismo de armazenamento de cargas é essencial nas câmaras de TV.

O mecanismo de varredura para leitura das cargas armazenadas gera um sinal de vídeo. Para reproduzir a imagem num cinescópio, o feixe deve varrer a tela catodoluminescente, linha por linha, com mesma velocidade e com o mesmo sincronismo. Por isso, o sinal de vídeo, além do sinal correspondente à intensidade da imagem, deve conter também os chamados *pulsos de sincronização*, que informam ao receptor, quando deve ser iniciada a varredura de uma linha e de um quadro. Além disso, deve ser considerado que existe um tempo de retorno do feixe, tanto do final de varredura de uma linha para a seguinte, quanto do final de varredura de um quadro para outro. Assim, o sinal de vídeo tem estrutura complicada, tal como no exemplo da Figura 20.

No que segue será apresentada uma descrição *muito resumida* da câmara iconoscópica e algumas similares⁵. Também deve ser observado que os detalhes são apenas esquemáticos e muitos detalhes foram omitidos.

⁵Uma descrição um pouco mais detalhada pode ser obtida nas Referências 8 e 10.

Câmaras com varredura de feixe de elétrons

Em geral, um feixe de elétrons neutraliza a carga em cada ponto, gera um sinal elétrico a partir da tela ou do próprio feixe. Assim, o sinal de vídeo é gerado conforme o feixe varre a tela, linha por linha, sequencialmente.

Câmara iconoscópica

A *câmara iconoscópica* é completamente obsoleta, mas permite entender mais facilmente o princípio de funcionamento de câmaras tais como as *orticon* e *vidicon*.

Uma *câmara iconoscópica*, tal como originalmente construída, é esquematizada na Figura 21. A placa sensível é uma lâmina de mica com depósito metálico de um lado e, do outro lado, um mosaico com centenas de milhares de elementos fotossensíveis, formados de óxidos de prata e cério. A *imagem ótica* é formada no mosaico e um *canhão de elétrons* pode varrer o mosaico, elemento por elemento e linha por linha, em sequência. Quando a luz atinge um elemento, por efeito fotoelétrico, os elétrons podem ser coletados num anel (ânodo). Uma vez que os elementos são isolados uns dos outros no substrato de mica, cada elemento fica carregado positivamente e pode ser entendido como um pequeno capacitor (carregado também com carga negativa do outro lado). Este processo é chamado de *armazenamento de carga*. Ao depositar elétrons em cada elemento, o feixe permite a descarga do capacitor. Depois de neutralizar o elemento, o feixe passa a ser repellido, de forma que o número de elétrons depositado é diretamente relacionado com a carga positiva original. Assim, na descarga rápida do elemento, ocorre um pulso de tensão no preamplificador, que é proporcional à intensidade luminosa no elemento.

Em resumo, conforme o feixe varre o mosaico, elemento por elemento e linha por linha, sequencialmente, a preamplificador fornece uma sequência de pulsos correspondentes à intensidade luminosa da imagem.

Câmaras orticon e vidicon

A câmara *orticon*, esquematizada na Figura 22, é uma evolução tecnológica da câmara iconoscópica e seu princípio de funcionamento é essencialmente o mesmo.

O mosaico de elementos fotossensíveis é muito mais preciso e evaporado num substrato transparente. Um material condutor transparente é depositado na parte frontal do substrato e funciona como placa de sinal. A imagem da objetiva deve ser formada no mosaico.

A câmara *orticon-imagem* é esquematizada na Figura 23. Na parte interna da janela de entrada de luz, existe um revestimento contínuo de material com baixa função de trabalho para fácil emissão fotoelétrica (fotocatódo). Os elétrons liberados pela incidência de luz são acelerados em direção a uma tela-alvo, arrancando elétrons por emissão secundária, que por sua vez são coletados por uma malha muito fina, com cerca de um milhão de furos. Assim, forma-se na tela-alvo uma distribuição de carga positiva que é a *imagem elétrica* da imagem luminosa. A tela-alvo é de vidro e extremamente fina, o que possibilita que esta carga positiva passe para o lado oposto. O feixe eletrônico, varrendo a tela-alvo, deposita elétrons em cada ponto, neutralizando a tela-alvo. Quando ocorre um pequeno excesso de elétrons no ponto, o feixe é refletido. O feixe de retorno formado tem intensidade diretamente correlacionada com a intensidade luminosa incidente no ponto. O feixe de retorno é coletado num *multiplicador de elétrons*, que funciona baseado em emissão secundária. O sinal de vídeo é obtido na saída do multiplicador de elétrons.

As câmaras orticon-imagem são mais complicadas e maiores que as orticon (ou vidicon), mas são muito mais sensíveis devido a amplificação obtida por emissão secundária, tanto no alvo quanto no multiplicador de elétrons.

A câmara vidicon, esquematizada na Figura 24, é bem mais simples e menor que a orticon-imagem. Um revestimento metálico transparente na parte interna da janela de entrada funciona como placa de sinal. O alvo fotocondutivo é depositado diretamente no revestimento metálico. A placa de sinal é mantida num potencial positivo. A luz incidente, reduzindo a resistência elétrica do alvo no ponto, permite o movimento de cargas positivas que, assim, se acumulam na superfície do alvo. O sinal de vídeo é gerado pela varredura do feixe, de maneira semelhante à câmara iconoscópica.

Existe uma grande variedade de tubos similares às orticons e vidicons, que diferem quanto a sensibilidade, sensibilidade espectral, detalhes construtivos, material fotossensível, telas intensificadoras e outros detalhes. Às vezes, a diferença é apenas no nome comercial. Alguns exemplos são mostrados na Figura 26.

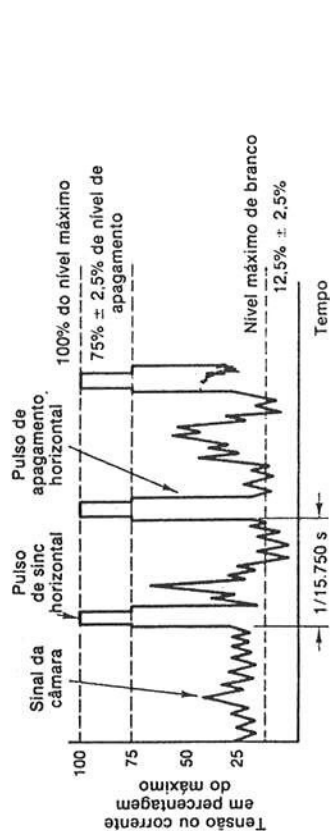


Figura 20: Sinal de vídeo com pulsos de sincronização.

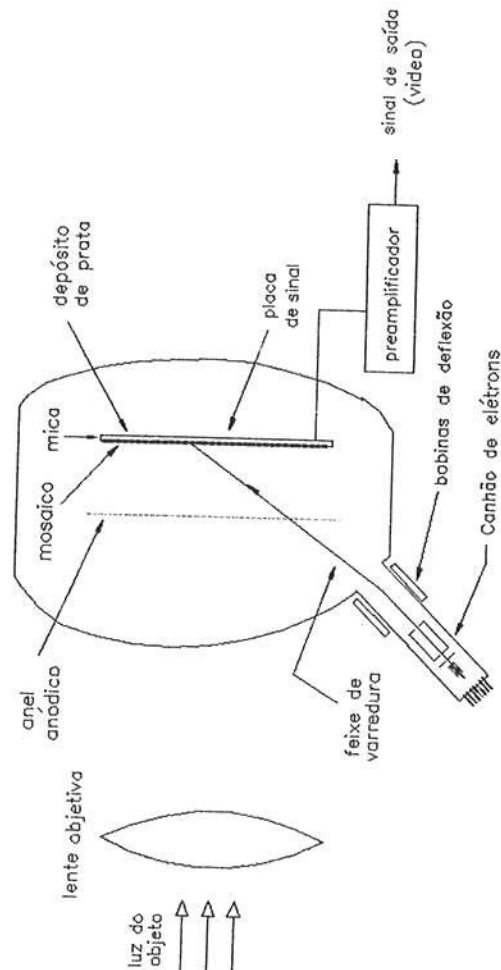


Figura 21: Desenho esquemático de uma câmara iconoscópica.

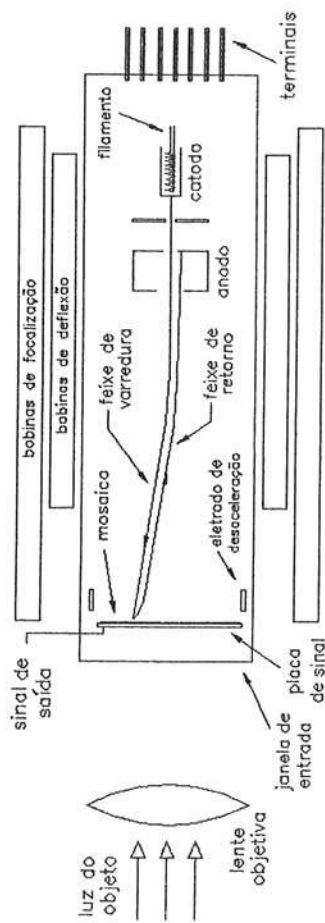


Figura 22: Desenho esquemático de uma câmara orticon.

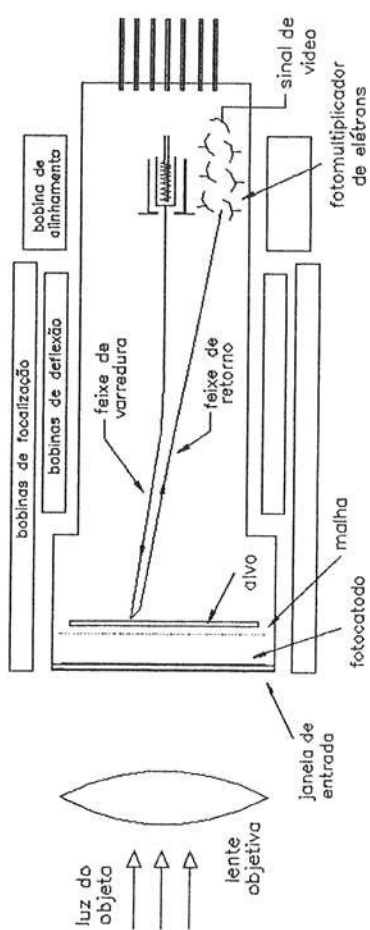


Figura 23: Desenho esquemático de uma câmara orticon-imagem.

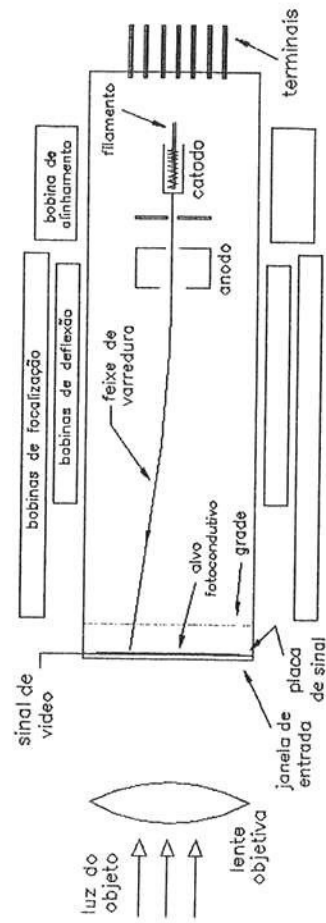


Figura 24: Desenho esquemático de uma câmara vidicon.

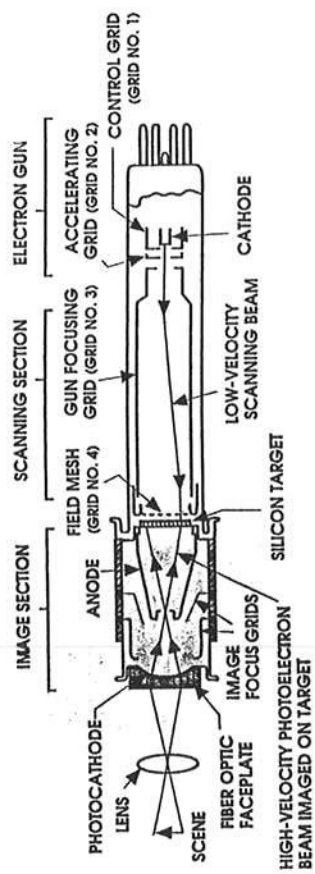


Figura 25: Câmera vidicon com intensificador de imagem.

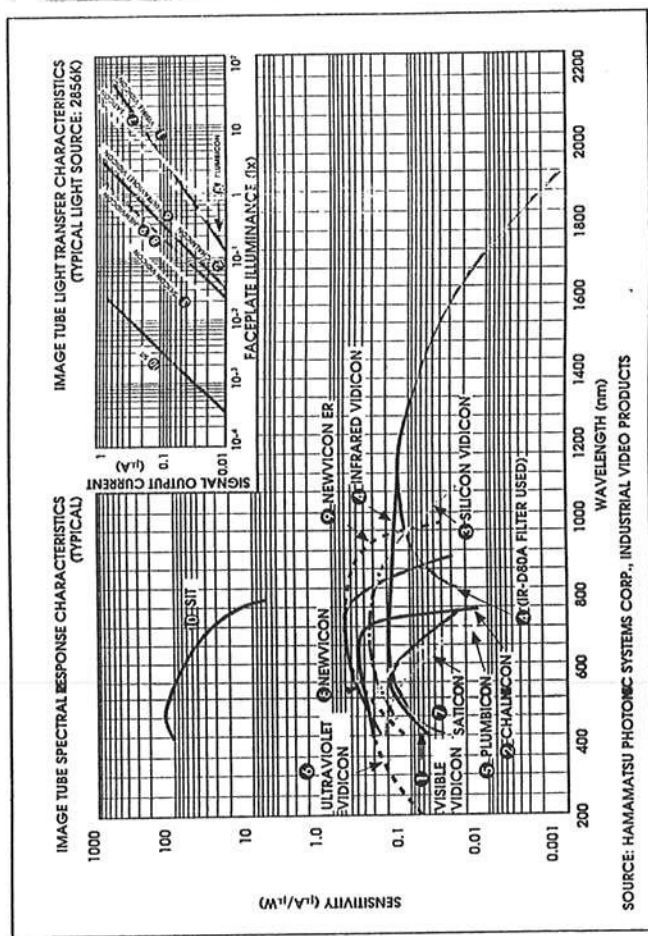


Figura 26: Exemplos de câmaras vidicons.

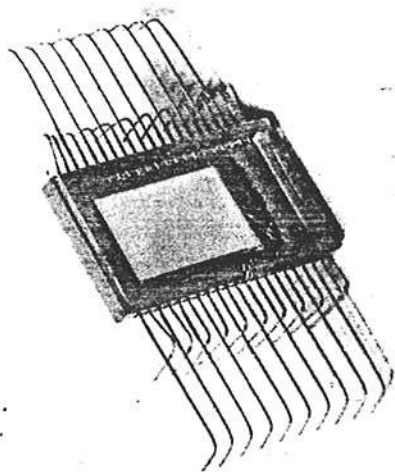


Figura 27: CCD (antigo) da RCA, com $\approx 19 \times 13 \text{ cm}^2$ e 120 000 elementos.

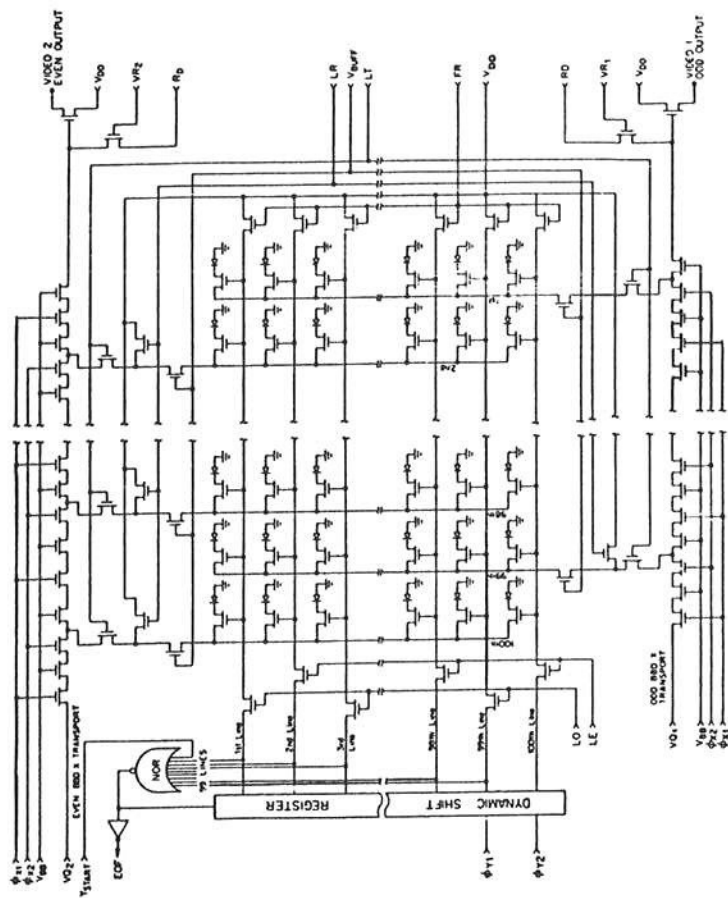


Figura 28: Exemplo de conexões (Reticon RA 100X100).

Estas câmaras também podem ser combinadas com intensificadores de imagem⁶ resultando em câmaras extremamente sensíveis. A Figura 25 mostra uma câmara vidicon com fotocátodo de silício e associada a um tubo intensificador de imagem (Silicon Intensified Target - SIT). A Figura 26 mostra a sensibilidade de vários tubos de imagem.

A câmara de vídeo mais sensível é uma ISIT (Intensified Silicon Intensified Target - SIT).

11.4 Câmaras CCD.

Câmaras CCD⁷ são baseadas numa matriz de elementos semicondutores fotossensíveis. Esta matriz é construída com tecnologia microeletrônica uma pastilha de silício, em geral.

Os princípios físicos e os mecanismos de armazenamento de carga em cada elemento não serão discutidos aqui⁸. Aqui, apenas serão brevemente resumidas algumas idéias gerais.

Os fótons incidente geram elétrons livres e lacunas. Em seguida, lacunas ou elétrons são coletados e armazenados em pontos determinados de uma malha bidimensional. Estes pontos discretos podem ser considerados os elementos da imagem (pixels). Finalmente, as cargas armazenadas são apagadas num processo de varredura que também gera o sinal de vídeo.

Neste caso, o processo de varredura da matriz não é por feixe de elétrons e o dispositivo é chamado "matriz de auto-varredura" ("self-scanned array"). O CCD221 da Fairchild para imagem de TV tem 380×488 pixels. Isto é, cerca 200 000 pixels. Um dos problemas é a descarga de cada elemento, de maneira sequencial. Evidentemente, é completamente inviável realizar ligações elétricas independentes para cada elemento, o que significaria 200 000 ligações elétricas. A idéia geral consiste em ter cada elemento ligado em comum com os demais elementos da mesma linha e da mesma coluna, como esquematizado no exemplo da Figura 28. Para cada linha de ligação, existe uma chave eletrônica. Assim, cada elemento pode ser descarregado apenas quando as chaves da linha e da coluna correspondentes são acionadas. Assim, acionando as chaves em sequência adequada pode-se descarregar cada elemento na sequência adequada, gerando o sinal de vídeo.

⁶Ver Seção 12.

⁷Charge coupled devices.

⁸Uma apresentação mais detalhada é dada na Referência 11.

Câmaras CCD são sensíveis, menores e têm menor consumo de energia. Por isso, se tornaram bastante populares como câmaras de vídeo comuns. As câmaras CCD também podem ser combinadas com intensificadores de imagem resultando em câmaras extremamente sensíveis, chamadas ICCD (Intensified Charge-Coupled Device).

11.5 Cinescópio monocromático

A Figura 29 esquematiza um tubo de TV monocromático para reprodução das imagens geradas pelas câmaras de vídeo. Conforme observado na Seção 8, a deflexão magnética é utilizada porque apresenta desfocalização menor para grandes ângulos de deflexão. A tela tem um revestimento catodoluminescente que emite mais ou menos luz conforme a intensidade do feixe. Assim, para reproduzir a imagem num cinescópio, o feixe de elétrons deve varrer a tela, linha por linha, com intensidade modulada pelo sinal de vídeo.

Se as imagens são projetadas a uma taxa de 24 quadros por segundo⁹, a visão humana tem a sensação de movimentos contínuos. Assim, em princípio, a televisão poderia funcionar projetando 24 q/s. Entretanto, para níveis de luminosidade razoavelmente altos, a visão humana percebe “cintilação”, que é uma variação de luminosidade do início do quadro para o final e vice-versa.

A frequência crítica¹⁰ para iluminância de 10 lux é $f_q = 50 \text{ Hz}$. Isto é, a visão humana consegue perceber cintilação da imagem abaixo desta frequência. O valor razoável considerado para a frequência de projeção de quadros é 50 Hz. Isto é, a projeção de quadros deve ser de da ordem de 50 q/s para níveis altos de iluminação.

É possível “enganar” a visão humana, projetando, por exemplo, 25 ou 30 q/s. Isto é, feito por uma técnica de entrelaçamento das linhas (“interlace”). A técnica de entrelaçamento consiste em projetar as linhas 1, 3, 5, ... em (1/60) s. No próximo intervalo de (1/60) s, são projetadas as linhas pares 2, 4, 6, ... Assim, o quadro completo é transmitido em (1/30) s (30 quadros/s). Entretanto, uma vez que o quadro foi essencialmente preenchido em (1/60) s, a cintilação desaparece.

O feixe deve varrer cada linha e cada quadro da tela catodoluminescente com mesma velocidade e com o mesmo sincronismo da câmara. Por isso,

⁹Isto é, a taxa de projeção de quadros do cinema.

¹⁰Ver Seção 2.5 da Referência 8.

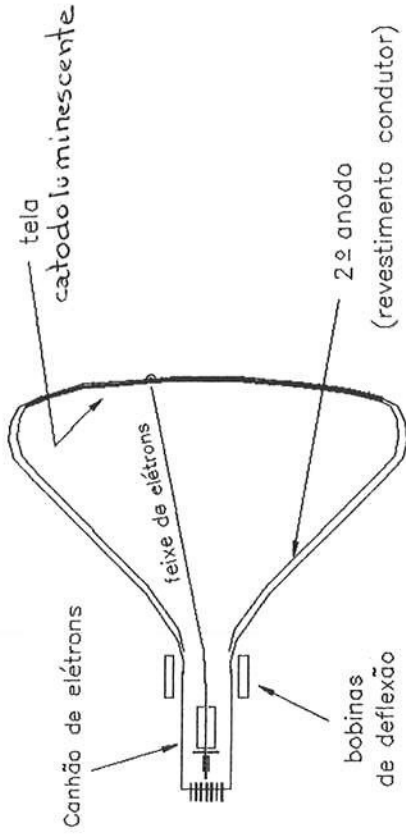


Figura 29: Cinescópio monocromático

o sinal de vídeo, além do sinal correspondente à intensidade da imagem, deve conter também os chamados *pulsos de sincronização*, que informam ao receptor, quando deve ser iniciada a varredura de uma linha e de um quadro. Além disso, deve ser considerado que existe um tempo de retorno do feixe, tanto do final de varredura de uma linha para a seguinte, quanto do final de varredura de um quadro para outro. Assim, o sinal de vídeo tem uma estrutura complicada, tal como exemplificado na Figura 20.

11.6 Frequência da portadora de vídeo

A transmissão da imagem é feita por meio de uma *onda eletromagnética portadora*, modulada pelo sinal de vídeo. Isto é, a amplitude da onda eletromagnética varia conforme o sinal de vídeo, como mostrado na Figura 30.

O grande número de pixels necessário para uma boa definição de imagem na televisão tem sérias implicações sobre a ocupação do espectro eletromagnético na faixa de ondas de rádio VHF. A seguir, são resumidas estas limitações.

Utilizando a técnica de “interlace”, as imagens devem ser transmitidas à taxa mínima de 30 q/s. Considerando cerca de 525 linhas por quadro e cerca de 525 pixels por linha, resulta que a transmissão deve ocorrer a uma taxa de $\approx 30 \times 525 \times 525 \approx 8 \times 10^6 \text{ pixels/s}$.

Pode-se considerar o caso extremo, em que uma imagem é formada de uma sequência de pixels claro e escuro alternados. Isto significa que o sinal de vídeo realizar um ciclo completo em 2 pixels, como mostra a Figura 31.

Neste caso, a frequência harmônica fundamental deste sinal de vídeo é $f_{max} = 8/2 \text{ MHz} \approx 4 \text{ MHz}$. A *onda eletromagnética portadora* deve ter

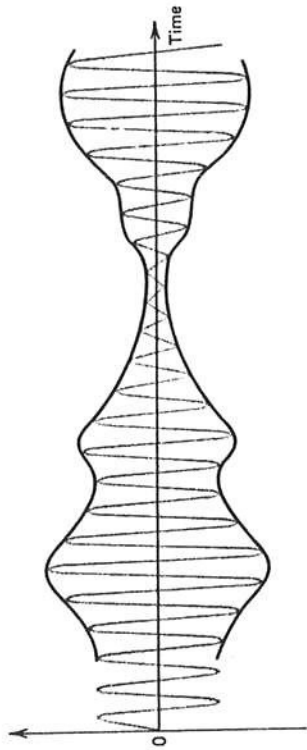


Figura 30: Onda eletromagnética portadora, modulada pelo sinal de vídeo.

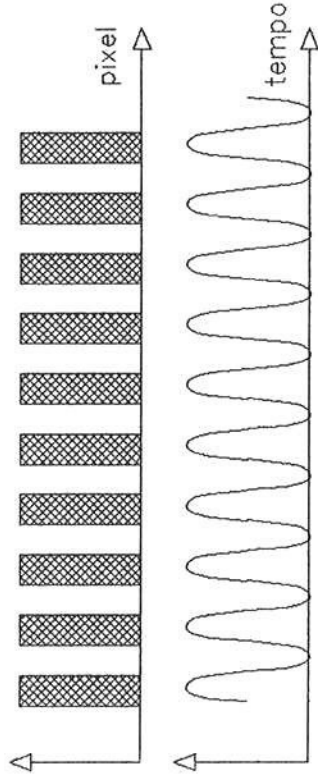


Figura 31: Sinal de vídeo correspondente pixels claro e escuros alternados.

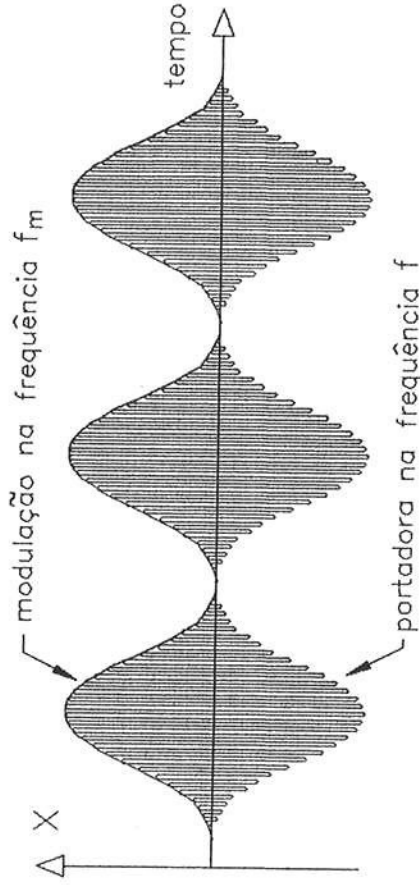


Figura 32: Portadora na frequência f modulada na frequência f_m .

frequência muito maior que a frequência da modulação. Por isso, os canais para transmissão de TV estão na faixa de VHF e UHF (acima de 54 MHz).

A largura dos canais de transmissão podem ser diferentes, como mostrado na Tabela 2. Em qualquer caso, cada canal ocupa uma faixa de frequências relativamente extensa (de 6 a 8 MHz), o que limita bastante o número de canais na faixa de VHF. No sistema adotado no Brasil (PAL-M), a largura dos canais de VHF ou UHF é de 6 MHz . A Tabela 3 mostra a ocupação do espectro de radiofrequências. Como pode ser visto, não existe muito lugar para muitos canais de VHF. Esta largura de canal é discutida a seguir.

A Figura 32 mostra uma *onda portadora* na frequência f com amplitude modulada na frequência f_m . A amplitude da onda pode ser escrita como:

$$X(t) = (A \cos 2\pi f_m t) \sin 2\pi f t \quad (29)$$

Esta amplitude pode também ser escrita como

$$X(t) = \frac{A}{2} \sin 2\pi f_1 t + \frac{A}{2} \sin 2\pi f_2 t \quad (30)$$

onde

$$f_1 = f - f_m \quad \text{e} \quad f_2 = f + f_m \quad (31)$$

Isto é, a onda portadora na frequência f , modulada na frequência f_m , equivale à superposição de duas frequências f_1 e f_2 , tais que

$$f_2 - f_1 = 2f_m \quad (32)$$

No caso geral, a modulação da amplitude pode ser entendida como uma superposição de muitas frequências. Entretanto, como aproximação, pode-se considerar que a máxima frequência é a do caso extremo de uma sequência de pixels claro e escuro alternados. Assim, a frequência máxima correspondente é $2f_{max} \approx 8\text{ MHz}$. Assim, numa transmissão simples, cada canal de VHF ocuparia cerca de 8 MHz .

Na verdade, a faixa de 8 MHz é ocupada pelas frequências f_1 abaixo da frequência f da portadora e pelas frequências f_2 acima de f . Entretanto, f_1 é simétrica à frequência f_2 , em relação f . Assim, basta transmitir a frequências f_2 , acima da frequência f . Por uma técnica chamada "transmissão com faixa lateral vestigial"¹¹, as frequências abaixo da portadora são atenuadas.

¹¹Vestigial side-band transmission.

Além do sinal de vídeo, o som também deve ser transmitido. Entretanto, o sinal sonoro ocupa uma faixa de largura bem menor ($\approx 0,02\text{ MHz}$), porque a frequência máxima de sons audíveis é 20 kHz . O sinal sonoro é transmitido em “frequência modulada” (FM), por uma portadora de frequência um pouco acima da portadora de vídeo.

A Figura 33 mostra a composição de frequências do sinal do canal 2 de VHF, com largura total de 6 MHz . A faixa inferior de $1,25\text{ MHz}$ abaixo da frequência da portadora de vídeo é a faixa lateral vestigial. O sinal de vídeo é transmitido na faixa lateral superior com $4,5\text{ MHz}$ de largura. O restante da faixa ($0,25\text{ MHz}$) é destinado à transmissão do som.

TV digital de alta definição (HDTV)

Como pode ser visto, a largura do canal de VHF ou UHF é diretamente proporcional ao número de pixels a ser transmitido pelo sinal de vídeo, no sistema convencional de transmissão. Por isso, este sistema é inviável para transmitir sinal de vídeo para TV de alta definição. Por exemplo, para aumentar de 500 000 para 2 000 000 o número de pixels, a largura do canal de VHF ou UHF deveria ser multiplicada por 4, o que é inviável, uma vez que a quantidade de canais disponíveis não é muito grande (ver Tabela 3).

Na verdade, no sistema convencional, toda informação de cada quadro é transmitida pelo sinal de vídeo. Isto é, a transmissão convencional “supõe” que cada quadro é completamente diferente do seguinte, o que não ocorre: muitos pixels de cada quadro são iguais ao do quadro seguinte. Portanto, em princípio só é necessário transmitir a informação referente aos pixels que são modificados. Existem métodos de “compressão de vídeo” que permitem reduzir a informação transmitida, transmitindo apenas as modificações dos pixels. Assim, pode-se transmitir com folga um sinal digital de alta definição usando um canal de UHF normal, tal como no caso do Sistema Brasileiro de TV Digital (SBTVD). Este sistema é basicamente o sistema de TV digital do Japão (ISDB-T), mas um pouco diferente justamente por usar um “compressor de vídeo” diferente (MPEG-4). Por isso o SBTVD é chamado ISDB-Tb.

Frequência (MHz)	Canais
30 a 535 kHz	comunicações e navegação marítima
0,535 a 1,605	radiodifusão AM
1,605 a 30	ondas curtas e radioamador
30 a 50	comunicações: polícia, bombeiros e outros
50 a 54	radioamador
54 a 72 (6 MHz/canal)	Canais VHF 2, 3 e 4
72 a 76	radiofarol aeronáutico (75 MHz) e outros
76 a 88 (6 MHz/canal)	Canais VHF 5 e 6
88 a 108	Emissoras de FM
108 a 122	navegação aeronáutica
122 a 174	comunicações: serviços, radioamador,
174 a 216 (6 MHz/canal)	Canais VHF de 7 a 13
216 a 470	meteorologia, aviação civil e outros
470 a 890 (6 MHz/canal)	Canais UHF de 14 e 83
890 a 30 000	radar, antena parabólica e outros

Tabela 3: Distribuição de canais de VHF e UHF

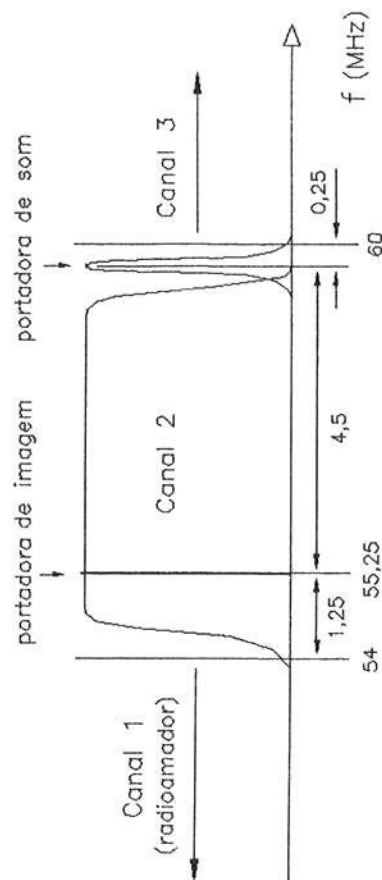


Figura 33: Utilização do canal 2.

12 Intensificadores e conversores de imagem

Um *conversor de imagem* permite converter uma imagem invisível, tal como no infravermelho, em imagem visível. Um *intensificador* permite aumentar o brilho de uma imagem. O princípio geral de um intensificador ou um conversor eletro-ótico consiste em, a partir da imagem ótica, obter uma imagem eletrônica, que é novamente convertida numa imagem ótica visível. Intensificadores de imagem são dispositivos importantes que podem ser associados a câmaras de vídeo CCD ou câmaras de varredura de feixe eletrônico aumentando bastante a sensibilidade. Conversores permitem obter imagens a partir de luz invisível, principalmente infravermelho e raios-X.

A Figura 37 esquematiza o método geral de intensificação¹³. A imagem ótica libera elétrons do fotocátodo. Estes elétrons são acelerados e focalizados num anodo luminoso, formando novamente a imagem ótica. Para um fotocátodo bastante eficiente, a corrente de fotoelétrons gerada é da ordem de grandeza de $k_f \sim 10^{-4} A/lumen$. Se os elétrons são acelerados por uma tensão V , a potência transferida aos elétrons é $K_f V W/m$. As eficiências dos "fósforos" luminiscentes são comparável às de lâmpadas e podem ser bem maiores que $\eta \approx 10 lm/W$. Assim, admitindo uma tensão de aceleração $V = 10 kV$, pode-se obter razão dos fluxos luminosos (ganho):

$$G = k_f \eta V \sim \text{de } 10 \text{ a } 100 \quad (33)$$

Assim, o intensificador simples permite obter uma intensificação razoável da imagem. Também deve ser observado que se a imagem final é reduzida, a luminância da imagem pode ser bem maior. Intensificadores podem ser associados "em cascata" e, neste caso, os ganhos dos estágios de intensificação são multiplicados. Atualmente, a amplificação da intensificação é obtida acrescentando multiplicador de elétrons por emissão secundária, utilizando as chamadas placas de microcanais (MCP), discutidas na sequência.

Os chamados *intensificadores de 1ª geração* são baseados na focalização eletrostática ou magnética dos elétrons. A Figura 38 esquematiza um intensificador deste tipo com focalização eletrostática. A Figura 25 esquematiza um intensificador deste tipo utilizado com uma câmara vidicon de silício (SIT - Silicon Intensified Target). O aumento de sensibilidade deste tubo é mostrado na Figura 26. Em geral, uma placa com fibras óticas é utilizada

¹³O assunto é discutido nas Referências 5, 13 e 14.

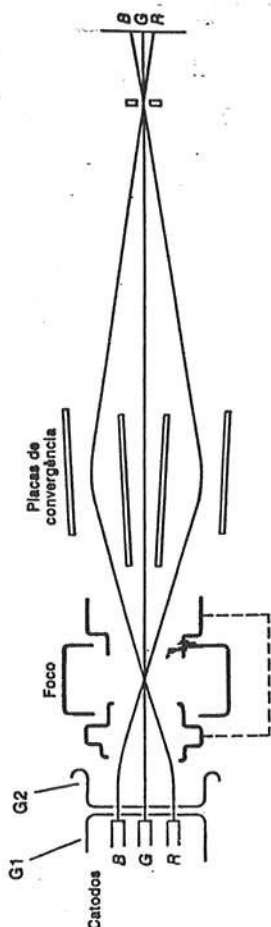


Figura 34: Cinescópio a cores.

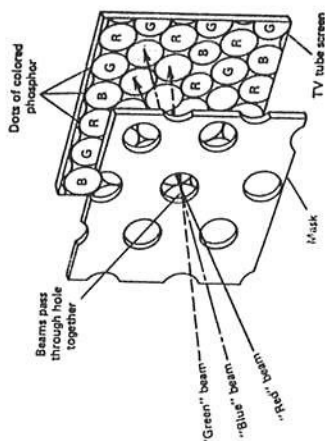


Figura 35: Máscara de sombras.

11.7 Televisão a cores

A transmissão de imagem colorida é baseada no fato que as cores podem ser reproduzidas a partir de 3 cores primárias¹². As cores utilizadas são o vermelho (R), o verde (G) e o azul (B).

O cinescópio colorido é mostrado na Figura 34. Cada pixel da tela é formado de 3 elementos luminiscentes, cada um dos quais emite uma das cores primárias (R, G e B). Os 3 feixes de elétrons são gerados independentemente por 3 canhões e têm modulação independente, conforme as cores da imagem. Cada feixe deve atingir somente o elemento da cor correspondente. A "máscara de sombras" (Figura 35) é um dispositivo engenhoso que não permite que o fósforo de uma determinada cor seja atingido por feixe correspondente a outra cor.

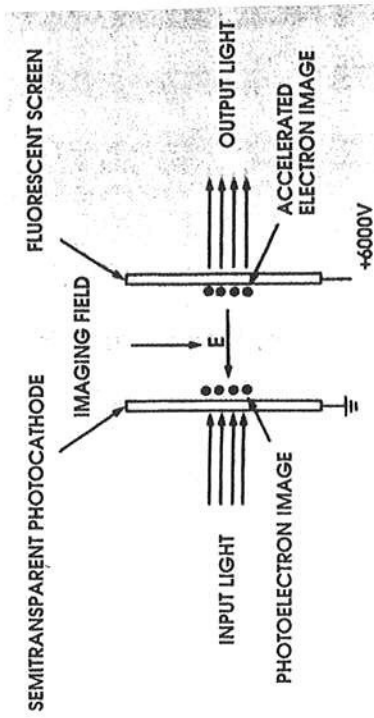


Figura 37: Princípio geral de intensificador ou conversor de imagem.

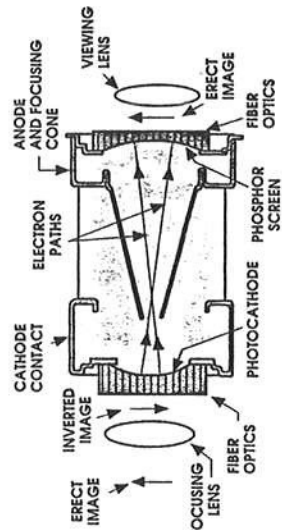


Figura 38: Intensificador de 1ª geração, com focalização eletrostática.

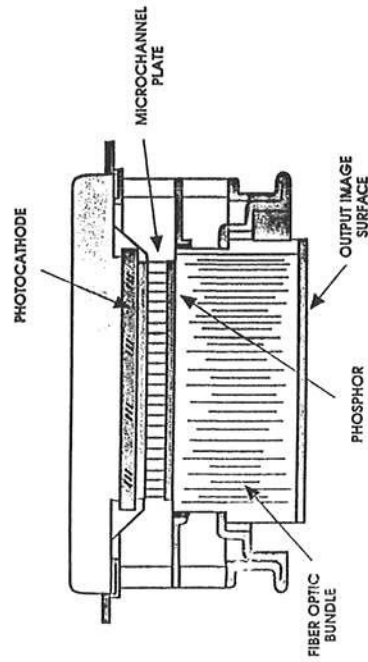


Figura 39: Exemplo de intensificador de 2ª geração.

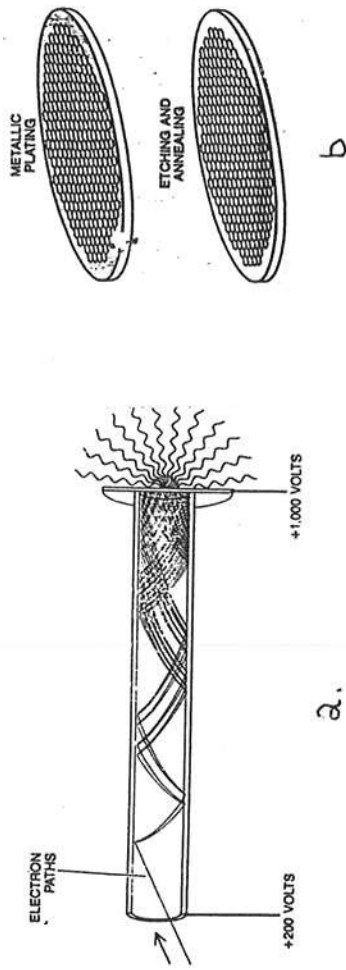


Figura 40: a. Multiplicação de elétrons no microcanal. b. Desenho esquemático da MCP.

para transferir imagem da tela até o fotocátodo. Cada fibra ótica tem dimensões da ordem de alguns microns e transfere diretamente a imagem do “pixel”, da tela para o fotocátodo. A imagem também pode ser transferida usando lentes. Entretanto, o feixe de fibras óticas melhora a resolução e torna o dispositivo mais compacto.

Nos chamados *intensificadores de 2ª geração* são utilizadas MCP, que permitem amplificação considerável do número de elétrons. A Figura 39 esquematiza um intensificador deste tipo. Neste caso, a tela de fósforo ~~cathodoluminescente~~ é montada diretamente à MCP, resultando num dispositivo muito mais compacto e leve.

Os chamados *intensificadores de 3ª geração* são essencialmente iguais aos de 2ª geração, exceto que no fotocátodo são utilizados revestimentos de GaAs e AlGaAs, que são mais eficientes.

12.1 Placa de microcanais (MCP)

O princípio de funcionamento da chamada MCP (microchannel plate) é a multiplicação de elétrons por emissão secundária em microcanais, como mostrado na Figura 40.

Em cada canal da MCP, os elétrons são acelerados e multiplicados nas colisões com as paredes internas do microcanal. Os ganhos são da ordem de 10^4 a 10^7 , dependendo de vários detalhes construtivos tais como as dimensões do micronal, inclinação, tensão aplicada e outros fatores.

A MCP é construída¹⁴ numa pastilha de vidro, contendo milhões de canais microscópicos, diâmetro típico da ordem de $10\ \mu m$, separados de poucos μm . A pastilha tem largura típica da ordem de $1\ mm$ e os canais são usualmente inclinados.

Eletrodos metálicos são depositados nas faces polidas e os canais submetidos a tratamentos processos térmicos e químicos para que os microcanais tenham as devidas características de emissão secundária de elétrons, resistividade e outros fatores.

12.2 Conversores de imagem

Essencialmente, os conversores de imagem são intensificadores. A diferença é a característica da imagem inicial. Em geral, os conversores são para imagens de infravermelho (IR) e de raios-X.

No caso de conversor para IR, a questão mais crítica é o fotocatodo. A energia do fóton IR é baixa. Por exemplo, para $\lambda = 1000\ nm$, a energia é

$$E = \frac{hc}{\lambda} \approx 1,2\ eV \quad (34)$$

Assim, a *função de trabalho* do fotocatodo deve ser muito baixa. Conversor de IR são utilizados para câmaras de infravermelho e visores de infravermelho, que têm aplicação em visão noturna de corpos aquecidos, em diagnósticos médicos e outras.

Uma outra aplicação interessante de conversor de imagem é para raios-X. Neste caso, o fotocatodo é bastante eficiente e o conversor atua também como intensificador. No caso de diagnósticos médicos, o conversor permite redução considerável na dose de raios-X aplicada ao paciente e também melhora nas condições de trabalho para o operador. Considerações semelhantes também são válidas para o caso de ensaios não-destrutivos industriais.

¹⁴O funcionamento e técnica de fabricação das MCP são explicados na Referência 14.

13 Microscópio eletrônico

13.1 Introdução

As distâncias interatômicas em sólidos¹⁵ são da ordem de grandeza de nm . Isto significa que a luz visível ($\lambda \approx 555\ nm$) é totalmente inadequada para se formar qualquer imagem de detalhes da ordem de grandeza atômica. O limite de resolução de microscópios convencionais é de aproximadamente $1000\ nm$.

Para formar imagens de detalhes bem menores que $1000\ nm$, os componentes de onda (λ) deveriam ser muitíssimo menores que isto. Isto é, imagens de objetos de dimensões comparáveis com as dimensões atômicas deveriam ser obtidas com raio-X ou raio- γ . Por exemplo, as “imagens” de uma rede cristalina podem ser construídas a partir das figuras obtidas da difração de raios-X, se λ é à distância de espaçamento da rede cristalina. Por outro lado, se λ é muito menor, em princípio poderia se fazer uma “radiografia” da estrutura cristalina. Entretanto, não há como registrar tal radiografia. Para isto, a imagem deveria ser ampliada tal como num microscópio e não existe sistema ótico para isto.

Tais considerações levantam a possibilidade de usar um feixe de elétrons para obter imagens de detalhes muito menores que $1000\ nm$, lembrando que um feixe de elétrons pode ser tratado óticamente, usando lentes eletrostáticas e magnéticas. O comprimento de onda de De Broglie do elétron pode ser escrito como¹⁶

$$\lambda = \frac{hc}{\sqrt{2mc^2 K}} \approx \frac{0,039}{\sqrt{K\ (keV)}}\ nm \quad (35)$$

onde K é a energia cinética. Esta expressão é válida para energia não relativística, significando que K deve ser muito menor que $511\ keV$. Como pode ser visto, o comprimento de onda é muito menor que $1\ nm$ para elétrons acelerados com tensões de dezenas de kilovolts.

Por outro lado, lentes eletrostáticas e magnéticas¹⁷ podem ser utilizadas para focalizar um feixe eletrônico. Isto significa que as imagens podem ser ampliadas e projetadas, tal como num microscópio de projeção, sem a limitação devida ao comprimento de onda da luz visível.

¹⁵Ver Questão 10.

¹⁶Ver Questão 11.

¹⁷Ver Referências 5 e 15, por exemplo.



Figura 41: Micrografia da rede cristalina do ouro.

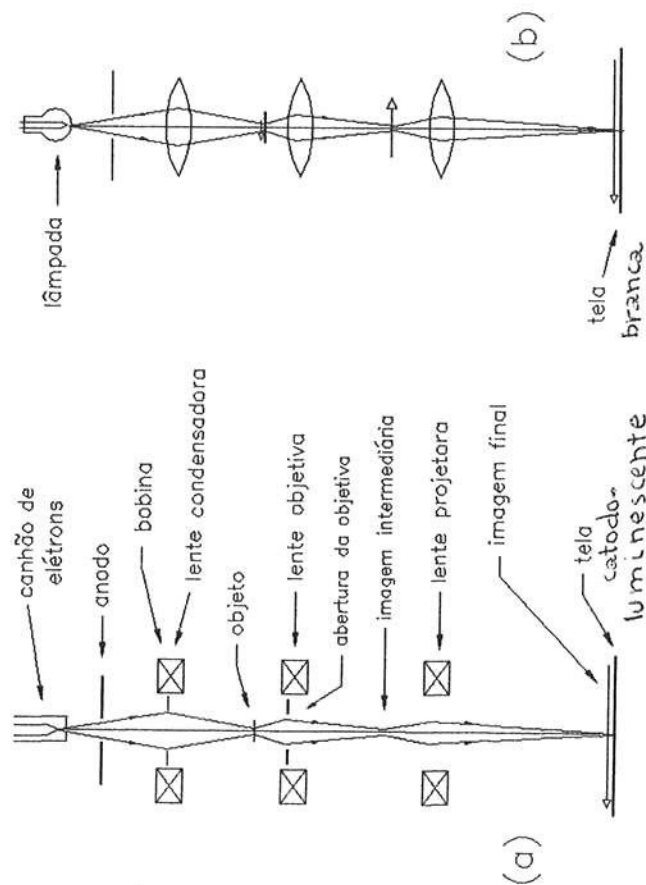


Figura 42: a. Desenho esquemático de um microscópio eletrônico. b. Microscópio simples para projeção da imagem.

Comprimentos de onda pequenos e a ótica de feixe eletrônico constituem os fundamentos físicos do microscópio eletrônico.

O microscópio eletrônico foi desenvolvido essencialmente nos anos 30, na Alemanha¹⁸. No final da década, já existiam microscópios eletrônicos comerciais feitos na Alemanha e também pela RCA nos EUA, com resolução da ordem de 2 nm . No final da década de 40, os melhores microscópios eletrônicos tinham atingido resolução da ordem de 1 nm . Os microscópios eletrônicos modernos têm resolução da ordem de $0,1\text{ nm}$, o que é suficiente para obter micrografias de redes cristalinas, tal como da Figura 41.

13.2 Microscópio eletrônico de transmissão

O microscópio eletrônico de transmissão é esquematizado na Figura 42.a. O objeto é uma fina lâmina com espessura menor ou da ordem de 100 nm .

De certo modo, a imagem-objeto é semelhante à que se forma num microscópio comum de projeção, mostrado na Figura 42.b. Uma primeira lente condensa a luz sobre a lâmina. A objetiva forma uma imagem e uma (ver Seção 5) terceira lente projeta a imagem em um anteparo translúcido. No microscópio eletrônico, estas lentes são magnéticas, porque têm aberrações¹⁹ muito menores que as eletrostáticas e podem ter distâncias focais bastante pequenas, da ordem de 1 mm . Elétrons são espalhados por núcleos atômicos pesados, formado contrastes na imagem-objeto. A objetiva eletrônica forma imagem e a lente projetora projeta a imagem eletrônica ampliada numa tela luminescente. Esta imagem ótica pode ser observada visualmente ou fotografada. Ampliações angulares podem ser da ordem de dezenas de milhares a alguns milhões.

Elementos leves, com massas moleculares pequenas, não produzem contrastes significativos num microscópio eletrônico. Por isso, micrografias de materiais com elementos leves, tais como substâncias orgânicas, são usualmente revestidas com elementos pesados para melhorar contrastes.

Um microscópio funciona em alto vácuo, com tensões de aceleração de elétrons de cerca de 30 a 300 kV , em geral. Entretanto, existem microscópios especiais com tensões de mais de 1 milhão de volts.

¹⁸Um resumo histórico mais detalhado é apresentado na Referência 15.

¹⁹Lentes eletrônicas têm essencialmente as mesmas aberrações que lentes óticas.

A resolução pode chegar à ordem de $0,1\text{ nm}$. A Figura 41 mostra uma micrografia da rede cristalina do ouro, que permite distinguir planos cristalinos separados de $0,102\text{ nm}$. Esta micrografia foi obtida com o microscópio Hitachi H-800, com tensão de aceleração até 200 kV e ampliação angular até $1\,000\,000\times$. Este microscópio tem, entre outras, 2 lentes magnéticas condensadoras, lente objetiva, 2 lentes intermediárias e 2 lentes projetoras. A utilização de 2 ou mais lentes para a mesma função permite reduzir as aberrações, recurso também utilizado em sistemas óticos com lentes comuns.

13.3 Outros microscópios eletrônicos

Existem outros tipos de microscópios, baseados em ótica de feixe eletrônico. Um *microscópio de emissão* funciona com base na emissão de elétrons pela superfície sob observação. O princípio é a ampliação e formação de imagem ótica a partir de uma imagem eletrônica. Na realidade, é essencialmente o mesmo princípio do intensificador de imagem, com a diferença que neste caso não existe necessariamente uma ampliação da imagem. A imagem eletrônica pode ser formada a partir de qualquer efeito que resulte em emissão de elétrons pela superfície, tal como emissão termoiónica, efeito fotoelétrico, emissão secundária (secondary emission - SE) ou emissão por campo elétrico (field emission - FE).

O que é considerado o primeiro microscópio eletrônico, construído em 1932 por E. Bruche e H. Johanson na Alemanha, produziu a imagem de um catodo aquecido. Essencialmente, o intensificador de imagem com feixe eletrônico produz imagem ótica a partir da imagem eletrônica formada num fotocatódo. Analogamente, podem ser obtidas imagens óticas a partir de imagens eletrônicas formadas por SE ou FE.

Deve ser observado que também existem microscópios eletrônicos de varredura (scanning electron microscope SEM).

Um dos microscópios de varredura é o baseado em um feixe eletrônico precisamente focalizado na amostra sob observação, com "spot" muito pequeno, da ordem de alguns nanómetros. A corrente de emissão secundária depende de detalhes da superfície da amostra. Assim, é possível reconstruir a "imagem" da superfície ponto a ponto.

O feixe é formado a partir de elétrons arrancados de uma ponta extremamente aguda, por efeito de campo elétrico (FE). Por isso, o microscópio é chamado de microscópio de varredura por efeito de campo (FESEM).

Exceto pelas pequenas dimensões do "spot" e da varredura do feixe, o princípio de funcionamento do FESEM é semelhante ao das câmaras de vídeo com feixe eletrônico. Este tipo de microscópio não deve ser confundido com outro, no qual os elétrons são "arrancados da amostra" por efeito de campo e formam uma imagem eletrônica.

Um outro tipo de microscópio de varredura completamente diferente é o *microscópio de varredura por tunelamento*. Neste caso, uma ponta formada de poucos átomos varre a superfície da amostra, sendo medida a corrente de emissão de elétrons que conseguem tunelar a barreira potencial superficial da amostra. Os movimentos de varredura são feitos por elementos piezoelétricos e a ponta de "um ou alguns átomos" é obtida justamente de imperfeições de uma ponta extremamente fina e polida. Uma descrição simples deste microscópio é dado na Referência 16.

14 Mostrador de cristal líquido (LCD - Liquid crystal display)

14.1 Cristais líquidos

Cristais líquidos²⁰ foram descobertos a cerca de 100 anos por F. Reinitzer e O. Lehman, estudando alguns ésteres de colesterol. Desde então, os cristais líquidos vêm sendo pesquisados. Entretanto, o maior número de descobertas e, principalmente aplicações práticas, foram obtidas nos últimos 25 anos.

A grande maioria dos sólidos cristalinos, quando aquecidos, mudam diretamente de fase passando a líquidos isotrópicos. Entretanto, alguns mudam para uma fase chamada "cristal líquido", que é um líquido com propriedades anisotrópicas.

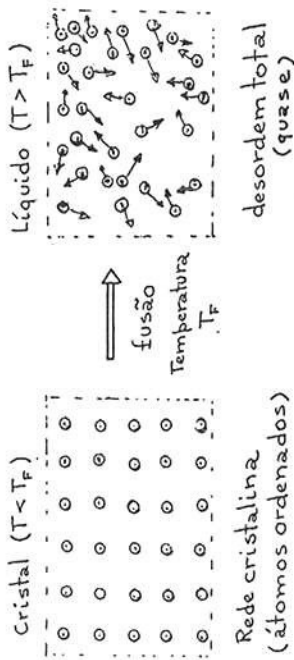
Os cristais líquidos (LC) são classificados²¹ conforme o grau de ordem (anisotropia) que ocorre. Os tipos mais simples são chamados *nemáticos*, que apenas mantêm um certo grau de alinhamento em distâncias relativamente grandes (Figura 43). No nemático, pode-se especificar um "eixo local" $\vec{n}$, que em cada ponto define a direção de alinhamento das moléculas.

A maioria dos LCDs comerciais são de nemáticos torcidos ("twisted nematic" - TN) ou supertorcidos (STN).

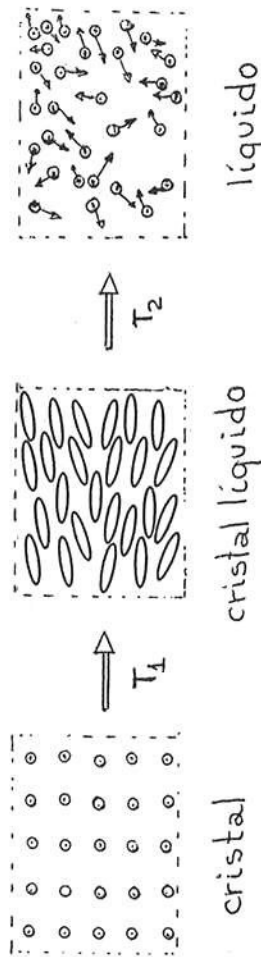
²⁰Ver Referências 17 e 18, por exemplo.

²¹Nemáticos, esméticos e colestéricos.

Cristais comuns : transição direta de cristal para líquido



Transição entre fase cristalina e fase líquida na temperatura de fusão.



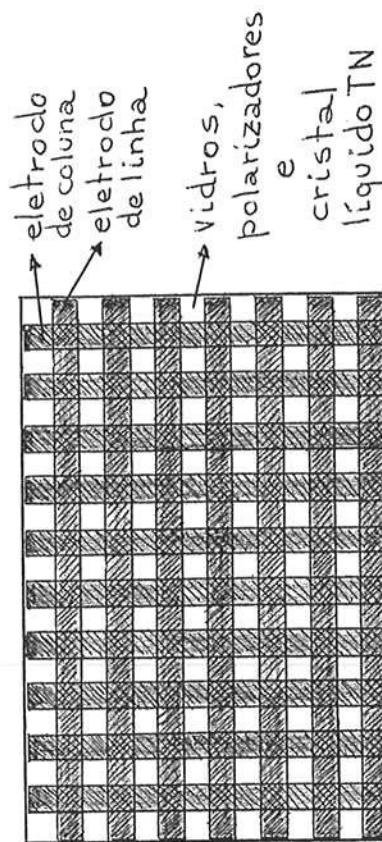
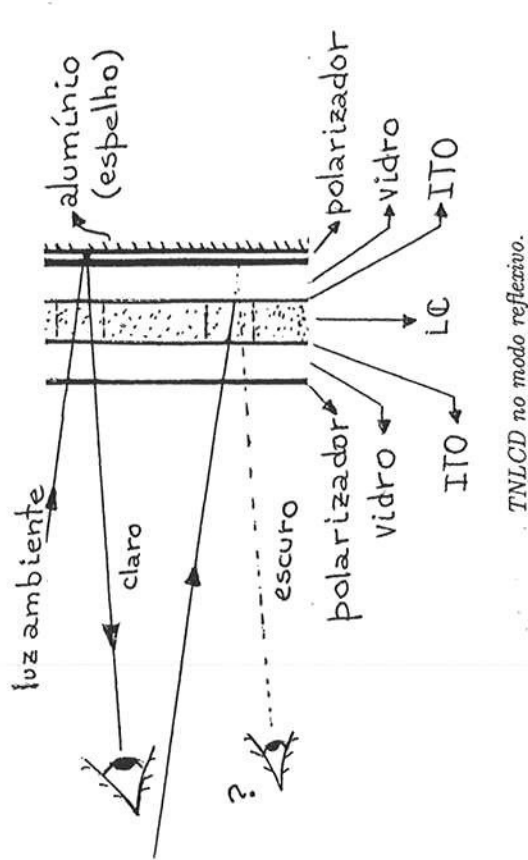
Transições entre fase cristalina, fase cristal líquido e fase líquida.

Um cristal é uma estrutura bem ordenada de átomos ou moléculas chamada rede cristalina. Aumentando a temperatura, ao se chegar na temperatura de fusão (T_F) a estrutura cristalina desmorona e a substância passa para a "fase líquida" em que se tem desordem quase total das partículas que ficam com velocidades aleatórias e se orientam aleatoriamente. A desordem só não é total porque existe alguma energia de ligação entre partículas no líquido¹⁰.

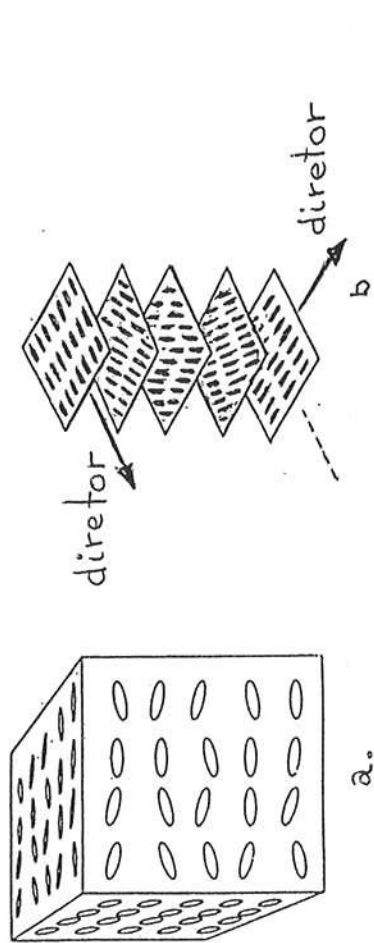
Nem sempre a transição da fase sólida para a fase líquida ocorre diretamente, como na Figura 20. Para certas substâncias pode ocorrer uma "fase intermediária" chamada "cristal líquido". Como mostrado na Figura 21, na temperatura de fusão passa-se da fase cristalina para a fase cristal líquido e depois para a fase líquida propriamente. Na fase cristal líquido uma certa ordem é mantida entre as moléculas da substâncias.

O cristal líquido mais simples é o chamado cristal líquido nemático, com moléculas simples e alongadas em forma de charuto. Na fase cristal líquido as moléculas tendem a ficar alinhadas entre si como mostrado na Figura 21. O versor da direção de alinhamento das moléculas é chamado *diretor*.

¹⁰Desordem total se tem num gás, onde além de velocidades e orientações aleatórias, a ligação entre as partículas é desprezível e o gás se expande indefinidamente quando não confinado.

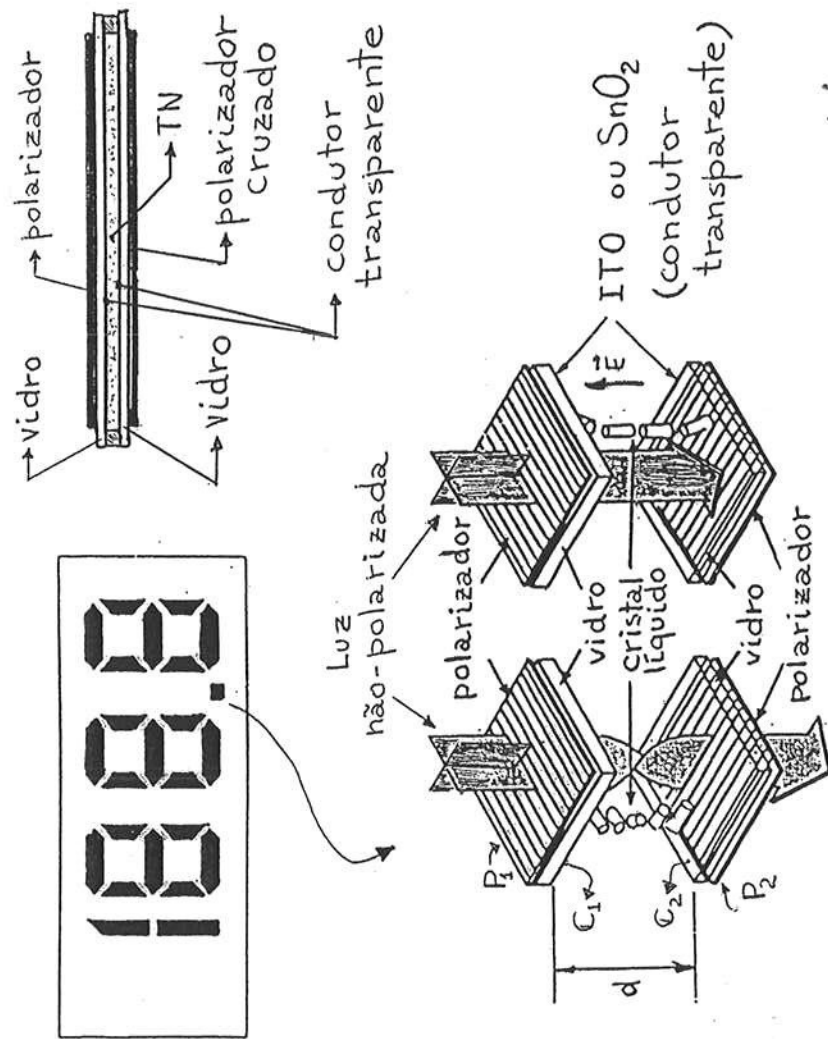


Mostrador matricial tipo matriz passiva.



a.

Figura 43: a. Cristal líquido nemático. a. Nemático torcido (TN).



Desligado

Ligado

Figura 44

Na fabricação do TNLCD, as camadas externas são torcidas em torno de um eixo-z e o eixo local $\vec{n}$ gira continuamente em torno do eixo-z ao longo das camadas adjacentes, como na Figura 43.b. Um fenômeno essencial no funcionamento do TNLCD é que se a luz polarizada entra no cristal líquido com polarização alinhada com as moléculas, a polarização gira acompanhando as moléculas. Em resumo, se a luz polarizada entra no nemático torcido 90° , a luz sai com polarização girada 90° .

14.2 Elemento de TNLCD

Um elemento de LCD pode ficar "claro" ou "escuro" conforme uma tensão elétrica aplicada. O tipo mais comum é o "normalmente claro", que fica escuro quando a tensão é ligada. Mas também pode ser "normalmente escuro", que fica claro quando ligado.

A Figura 44 esquematiza o funcionamento de um elemento de TNLCD. O cristal líquido fica entre lâminas de vidro revestidas internamente com óxido condutor transparente que funcionam como eletrodos. O óxido transparente mais usado é o ITO (óxido de IN e SN), mas o SnO_2 também é usado. Na fabricação o eletrodo é esfregado com um tecido macio num determinada direção, e isto é suficiente para que as moléculas de LC se alinhem nessa direção. Isto é, a camada adjacente de LC ficará alinhada à direção do "esfregamento". Na montagem, os eletrodos são girados 90° e tem-se a estrutura torcida (TN). Polarizadores sintéticos (polaróides) são montados externamente.

A luz transmitida pelo 1º polaróide é polarizada, gira 90° no TN "desligado" e sai normalmente pelo 2º polaróide. Quando "ligado", o campo elétrico desfaz o alinhamento do TN que, neste caso, deixa de girar o plano da luz polarizada e a luz é bloqueada no 2º polaróide. Este é um exemplo de elemento "normalmente claro", que fica escuro quando ligado. Se os polaróides fossem alinhados, o elemento seria "normalmente escuro" e ficaria claro quando ligado. O LCD normalmente claro também funciona por "reflexão", acrescentando um espelho depois do 2º polaróide.

Os chamados "nemáticos supertorcidos" (STN) são obtidos dopando o cristal líquido com uma substância opticamente ativa. O STN "desligado" gira o plano da luz polarizada de 270° e várias características óticas do elemento de LCD melhoram. A transição claro-escuro do "obturador ótico" é mais aguda, melhorando o contraste e permite um ângulo de visão maior²².

²²Ver Referência 18 e 19, por exemplo.

14.3 Displays alfanuméricos simples

Em resumo, o elemento de LCD montado tal como na Figura 44, é essencialmente um obturador de luz, que funciona com tensão elétrica. Montando alguns segmentos podem ser construídos LCDs para letras ou números, tal como mostrado na Figura 45. Estes LCDs encontram muitas aplicações, tal como relógios, calculadoras, termômetros, multímetros e instrumentos em geral. Em geral, são usados cristais líquidos TN ou STN, montados no modo normalmente claro, com espelho depois do 2º polaróide.

As tensões típicas são de 0,7 a 3 V para os TN usados em LCDs, o que torna estes dispositivos convenientes para uso em aparelhos a pilhas. Além disso, o consumo de energia é muito baixo, relacionado apenas com a pequena variação de energia do cristal no alinhamento e desalinhamento das moléculas e a pequenas fugas de corrente.

Os LCDs são extensivamente usados como mostradores em todos os dispositivos alimentados por baterias em que o baixo consumo é importante tais como relógios, calculadoras, celulares, computador portátil, multímetros e muitos outros dispositivos.

A maior vantagem do LCD é também a sua maior desvantagem, pois se consumo de energia do LCD é extremamente baixo, o LCD não emite luz. Isto significa que o LCD depende de iluminação externa. Nos mostradores mais simples pode ser a própria luz ambiente. Mesmo em alguns mostradores simples como relógios e calculadoras, usa-se iluminação traseira interna ("backlight") com placas eletroluminescentes ou iluminação lateral com LEDs.

Os LEDs de displays antigos eram os principais responsáveis pelo consumo de energia de relógios, calculadoras, multímetros e outros dispositivos. Por isso, praticamente não são mais usados em dispositivos com pilhas. Quando o dispositivo é ligado à rede elétrica, um mostrador com LED ainda pode ser usado, tal como em rádio-relógio. O consumo de energia não é muito grande e o mostrador é visível no escuro. No caso de LCD deve-se usar iluminação com LEDs ou placa eletroluminescente traseira.

No caso de LCDs mais complicados tais como tela de TV ou monitor de vídeo, deve necessariamente existir a iluminação traseira. Geralmente, são usadas lâmpadas fluorescentes, mas atualmente começam a ser usados LEDs em algumas TVs.

Fabricante	Diagonal	Resolução	Aplicação
Matsushita	3 pol.	240 × 378	TV a cores
Hitachi	5 pol.	240 × 480	TV a cores
Matsushita	12,5 pol.	480 × 640	TV a cores
NTT	14 pol.	1500 × 1680	Gráfico-cores
Matsushita	2,3 pol.	960 × 1422	Projektor

Tabela 4: Exemplos de TFT LCDs.

14.4 Matriz de elementos ativos

Para formação de imagem de alta definição, tal como texto, gráfico ou vídeo, o número de elementos de imagem (pixels) deve ser muito grande e os pixels pequenos. Para uma imagem de qualidade apenas aceitável, o número de pixels deve ser da ordem de dezenas de milhares, para TV da ordem de 300 000 e para monitores de alta definição, HDTV e projetores devem ser da ordem de 1 milhão ou mais.

Tais matrizes com grande número de pixels, vêm sendo desenvolvidas nos últimos anos²³, como mostrado na Tabela 4. Cada pixel, exceto pelo tamanho da ordem de 100 μm , funcionam essencialmente da mesma maneira que o elemento de imagem grande para LCDs alfanuméricos. A montagem é esquematizada na Figura 46. Um circuito "matriz ativa" (active matrix-AM) é incorporado ao LCD. Cada pixel é acionado a partir de componentes eletrônicos ativos situados no cruzamento da linha com a coluna do elemento. Usualmente são utilizados TNs para matrizes ativas.

No exemplo da Figura 47, a AM é feita com "transistores de filmes finos" (thin-film transistors - TFT) e o LCD é indicado por TFT LCD. A Tabela 4 mostra alguns exemplos de TFT LCD.

Os AMOLEDs funcionam por "transmissão de luz" e sistema de iluminação traseira (backlight).

²³Maiores detalhes sobre os assuntos resumidos nesta seção podem ser obtidos nas Referências 19 e 20.

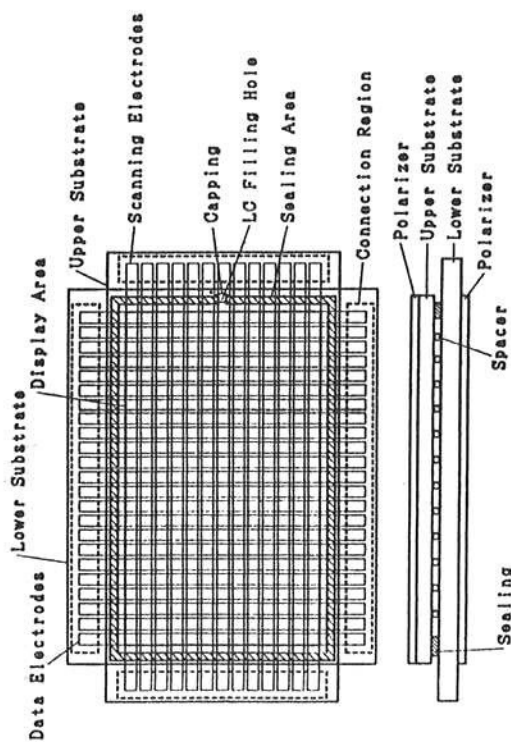


Figura 46: Matriz ativa de elementos (AMLCD).

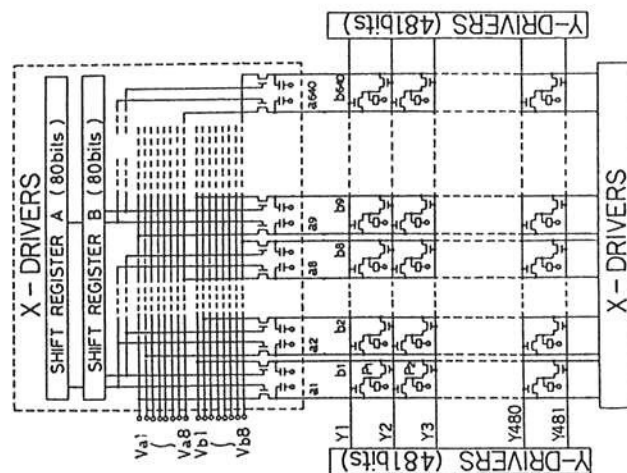


Figura 47: Exemplo de matriz de elementos ativos (AMLCD).

Os LCDs coloridos funcionam com filtros coloridos para as cores primárias RGB em cada elemento.

Atualmente, os LCDs estão substituindo os CRTs em televisão, monitores de vídeo e outros mostradores, embora o custo dos LCDs ainda seja maior que dos CRTs.

15 Endoscópios

Um endoscópio²⁴ é um instrumento ótico para observar partes internas do corpo humano, tais como estômago, esôfago, uretra e outras. Essencialmente, o endoscópio é um periscópio fino, como esquematizado na Figura 48. A luz do objeto entra por um prisma reto e a objetiva forma imagem exatamente na entrada de um feixe de fibras óticas. Na outra extremidade do feixe de fibras óticas, uma ocular permite observar a imagem.

Cada fibra do feixe de fibras óticas "transporta" um pixel da imagem. Por isso, a resolução da imagem está relacionada com o diâmetro e com o grau de compactação da fibras. O diâmetro das fibras utilizadas é da ordem de grandeza de 10 a 20 μm , o que permite uma resolução melhor que 35 linhas/mm. A fibra ótica introduz certa descolimação do feixe de luz. Para um feixe de luz paralela entrando numa fibra de um metro de comprimento, o ângulo total de divergência do feixe de saída é da ordem de 20°. Isto ocorre devido a difração da luz e imperfeições internas.

O sistema ótico é essencialmente um telescópio com objetiva e ocular, para observação de objetos próximos, como esquematizado na Figura 49. A amplificação angular usual é da ordem de grandeza de 1 e o comprimento do feixe de fibras não influi na amplificação. A imagem deve ser formada numa extremidade do feixe de fibras e é transportada diretamente para a outra extremidade independentemente do comprimento.

Um outro detalhe importante é a iluminação, que também é resolvida de maneira bastante prática usando uma fibra ou um feixe de fibras óticas. Um espelho elíptico pode ser utilizado para formar uma imagem da fonte de luz exatamente na entrada da fibra ótica, como mostrado na Figura 50.

²⁴Alguns instrumentos médicos simples são discutidos na Referência 21.

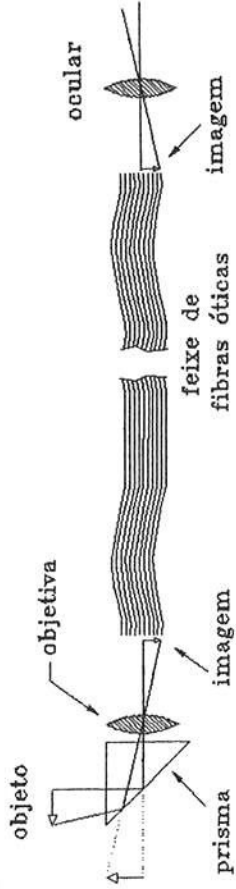


Figura 48: Endoscópio com feixe de fibras ópticas.

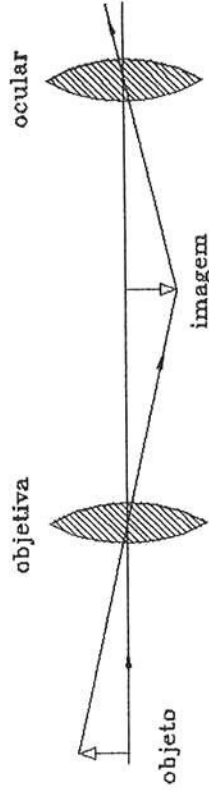


Figura 49: Desenho esquemático do sistema óptico

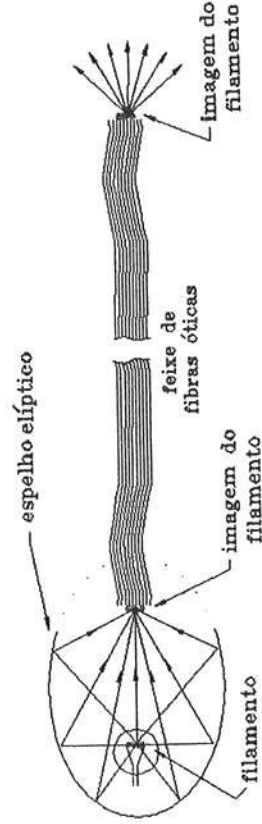


Figura 50: Fonte de luz usando fibra ótica

Endoscópios flexíveis mais antigos usam várias lentes em sequência, para transportar a imagem de uma extremidade a outra. A iluminação é feita com uma pequena lâmpada montada diretamente na extremidade do endoscópio. Barras de vidro ou quartzo já foram usadas para iluminação, usando o princípio da fibra ótica.

16 Imagens por ressonância magnética

Imagens podem ser obtidas a partir de ressonância magnética de spins nucleares (magnetic resonance imaging - MRI)²⁵.

O processo de formação de imagem por MR é bastante complicado, dos pontos de vista teórico, técnico e computacional. Por isso, o MRI não será discutido aqui, nem sequer de maneira resumida. Apenas são resumidas de maneira muito simplificada algumas idéias gerais. Discussões mais detalhadas são apresentadas nas Referências 22, 23 e 24.

O fundamento físico do MRI é a precessão de momentos magnéticos (spins) em torno de um campo magnético. A frequência angular de precessão é a frequência de Larmor dada por

$$\omega_0 = \gamma B_0 \quad (36)$$

onde B_0 é a indução magnética e γ é a razão giromagnética. Para campo magnético de 1 T, a frequência é aproximadamente 45,57 MHz para hidrogênio, caindo na região de radiofrequências (VHF) do espectro eletromagnético.

A constante γ depende essencialmente do tipo de núcleo, mas apresenta pequenas variações conforme as estruturas e ligações atômicas dos átomos. Assim, para um determinado campo magnético e um determinado núcleo, a frequência de Larmor apresenta pequenos deslocamentos chamados "deslocamentos químicos", porque dependem da estrutura química do material.

Se uma amostra é colocada num campo magnético B_0 , a precessão dos spins em torno do campo resulta numa magnetização induzida M alinhada com o campo como mostrado na Figura 51.a. Se uma tensão na frequência

²⁵O processo também é chamado ressonância nuclear magnética (NMR). Entretanto, a palavra "nuclear", estigmatizada devido à associação com radiação nuclear, tem sido omitida por fabricantes e pesquisadores.

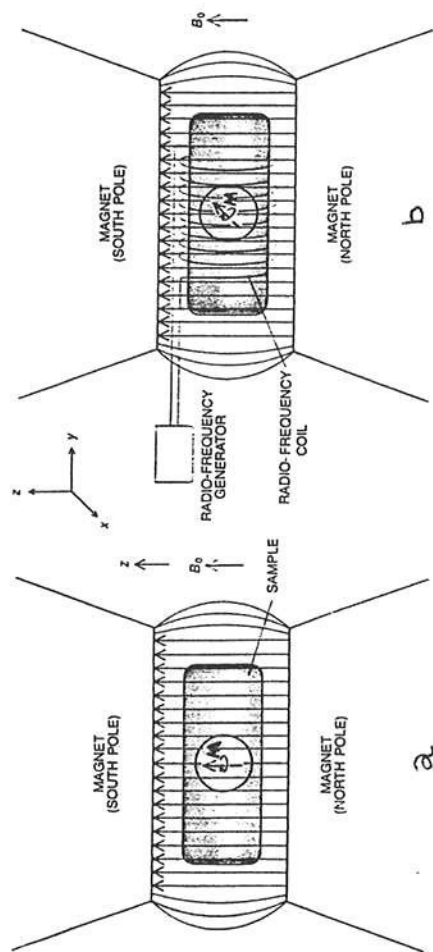


Figura 51: a. Magnetização num campo uniforme. b. Magnetização com campo de RF transversal.

angular ω_{rf} é aplicada a uma bobina transversal a $\vec{B}_0$, gera um campo magnético transversal²⁶ $\vec{B}_{rf}$. Neste caso, os spins tendem a se acoplar entre si e a magnetização $\vec{M}$ tende a girar em torno de $\vec{B}_0$, como mostrado na Figura 51.b. Se ω_{rf} coincide com a frequência de Larmor ω_0 , este processo é ressonante e ocorre com grandes amplitudes.

Quando um pulso de radiofrequência é aplicado, ocorre a ressonância magnética e o processo de desexcitação (relaxação) é bastante lento. Este processo de relaxação²⁷ é conhecido como decaimento livre da indução (free induction decay - FID). O FID pode ser detectado por meio de bobinas próximas ao corpo.

Em resumo, a partir de excitação com pulsos de radiofrequências, podem ser detectados sinais de FID, que podem ser entendidos como "ecos de spins". Um sinal típico de FID é mostrado na Figura 52.

A interpretação do sinal de FID é bastante complicada, no sentido que este sinal contém informações na amplitude, frequência e tempo de decaimento, informações estas relacionadas com a composição química, geometria e dimensões da amostra, e com a distribuição espacial e temporal do

²⁶No caso geral de MRI, este campo pode formar um ângulo qualquer com $\vec{B}_0$.

²⁷Na realidade, existem 2 processos de relaxação, que são relaxações do acoplamento spin-spin e do acoplamento spin-rede. Maiores detalhes podem ser obtidos nas Referências citadas.

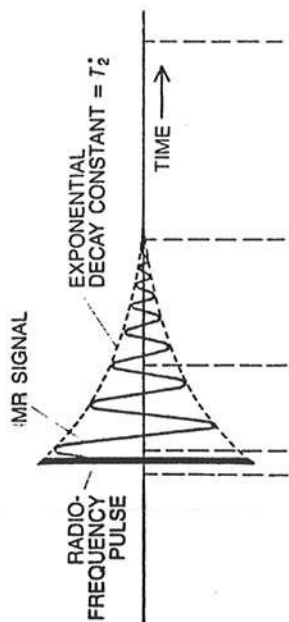


Figura 52: Sinal de FID.

campo magnético. A interpretação de um simples sinal de FID para campo magnético uniforme somente pode ser interpretada em casos extremamente simples. A seguir, é discutido um exemplo simples²⁸, utilizando a técnica de adicionar um gradiente constante ao campo magnético uniforme.

A Figura 53.a representa uma amostra com dois cilindros com água pura, num campo magnético uniforme $\vec{B}_0$ na direção-z. O sinal de FID deve conter essencialmente a frequência de Larmor correspondente ao hidrogênio da água. Isto é, uma análise de Fourier do sinal deve resultar numa distribuição estreita de frequências com pico na frequência de Larmor. Se um gradiente $\vec{G}_z$ é acrescentado ao campo magnético, a frequência de Larmor é diferente para cada z. Assim, o sinal de FID deve conter várias frequências distribuídas correspondentes aos diferentes valores de $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{G}_z$. Além disso, para cada frequência, a amplitude do sinal de FID deve ser proporcional à largura do cilindro na posição z. Em resumo, a transformada de Fourier do sinal deve reproduzir a "imagem" dos cilindros, como mostrado na Figura 53.b.

O exemplo considerado é bastante simples, uma vez que a amostra não tem substâncias diferentes e a geometria é cilíndrica e bastante simples. De qualquer modo, este exemplo permite mostrar que utilizando "gradientes" em direções diferentes podem ser obtidas "projeções" da amostra, como mostrado na Figura 54.

No caso geral, a interpretação dos sinais de FID é obtida a partir de técnicas bastante engenhosas de adicionar *gradientes adequados* ao campo magnético, inclusive com variação temporal e utilizando seqüências adequadas de pulsos de radiofrequência.

²⁸Extraído da Referência 22.

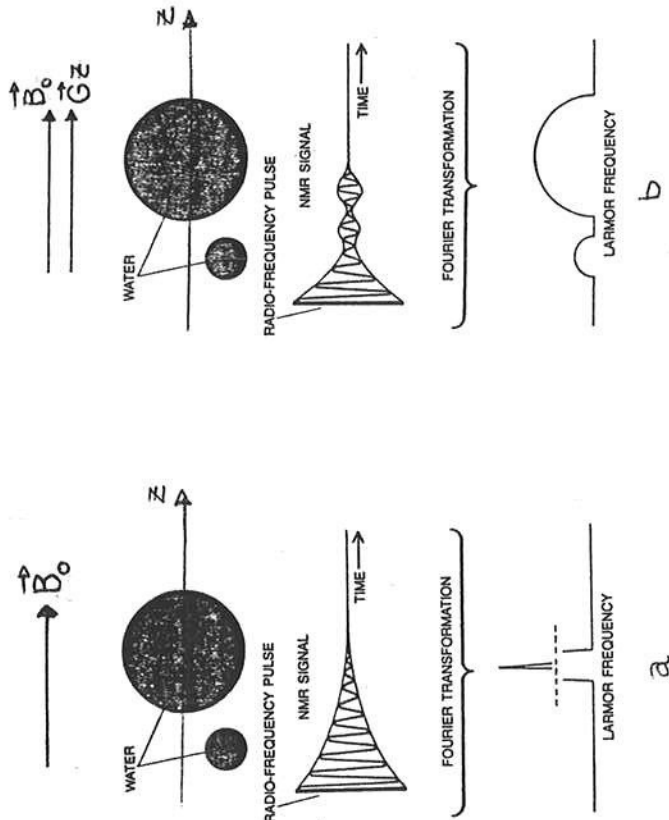


Figura 53: Técnica de MRI utilizando um gradiente no campo.

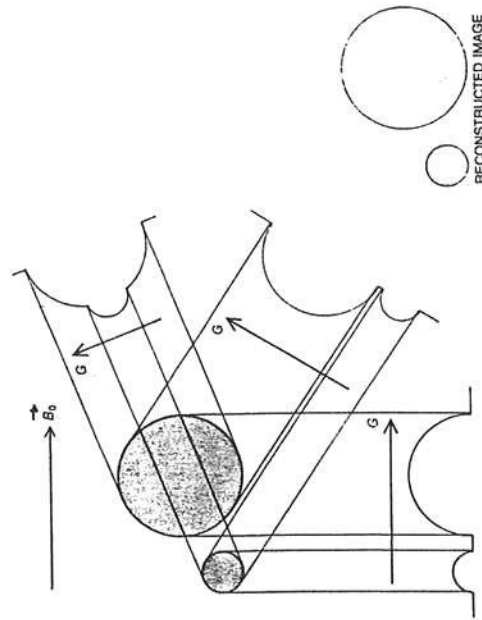


Figura 54: Projeções de uma amostra em diferentes direções.

17 Tomografia computadorizada

Tomografia é a obtenção de uma imagem de uma seção de um objeto. A tomografia de raio-X descrita na Seção 6 (Figura 6) é uma técnica engenhosa para se obter isto diretamente numa filme fotográfico para raio-X. Entretanto, este tipo de tomografia é excepcional.

A *tomografia computadorizada* (TC) é a obtenção de imagens de seções de um objeto a partir de projeções de imagens do objeto. A Figura 54 mostra um exemplo de projeções de 2 cilindros, obtidas em diferentes direções. Tais projeções podem ser obtidas com raios-X, ressonância magnética, ultrassom ou outro método. A partir de um certo número de projeções convenientes, é possível determinar qualquer seção plana do objeto real por meio de algoritmos matemáticos. Em problemas reais, os cálculos somente são viáveis por meio de computador²⁹.

Em princípio, qualquer método que permite obter "projeções planas" de um objeto em várias direções, pode ser utilizado para tomografia computadorizada. Assim, a tomografia computadorizada pode ser utilizada juntamente com métodos tais como radiografia, gamagrafia, ultrassonografia, MRI, emissão de radioisótopos distribuídos no corpo e outros. Assim, deve ser observado que CT se refere mais a um procedimento geral de computação que a um método físico de gerar uma imagem.

Entretanto, em geral, o computador também desempenha papel essencial na aquisição e análise de dados. Para compreender a extensão do problema pode-se considerar um corpo quadrado dopado com radioisótopos. Conforme as particularidades internas do corpo, a concentração de radioisótopos pode ser diferente. Assim, cada elemento de volume (voxel) emite radiação diferente conforme a concentração de radioisótopos. Usando uma matriz de detectores, podem ser obtidas diferentes projeções do corpo. Uma imagem plana aceitável deve conter cerca de 100 000 pixels, significando que a matriz deve conter cerca de 300 linhas. Assim, o volume do corpo deve conter cerca de $300 \times 300 \times 300 = 27$ milhões de voxels. Isto representa uma quantidade bastante grande de informações a serem armazenadas e processadas.

²⁹Ver Referência 24, por exemplo.

Referências

1. S. J. Williamson and H. Z. Cummins, *Light and Color in Nature and Art*, J. Wiley, New York (1983).
2. D. S. Falk, D. R. Brill and D. G. Stork, *Seeing the Ligth*, J. Wiley & Sons, New York, 1986
3. "X-rays", *Encycopaedia Britannica*, Vol. 23, 1971 Edition, W. Benton-Publisher, Chicago (1971).
4. "Radiology", *Encycopaedia Britannica*, Vol. 18, 1971 Edition, W. Benton-Publisher, Chicago (1971).
5. A. Zhigarev, "Electron Optics and Electron-beam devices", MIR Publishers, Moscow (1975).
6. A. P. Cracknell, "Ultrasonics", Wykeham Publications, London (1980).
7. J. R. Reitz, F. J. Milford e R. W. Christy, "Fundamentos da Teoria Eletromagnética", Editora Campus (1982).
8. "Television", *Encycopaedia Britannica*, Vol. 21, 1971 Edition, W. Benton-Publisher, Chicago (1971).
9. B. Grob, *Televisão Básica - Princípios e Reparação*, Guanabara Dois (1983).
10. B. H. Vine, "Electro-optical Devices" in *Applied Optics and Optical Engineering*, Vol. II, Edited by R. Kingslake, Academic Press, New York (1965).
11. J. A. Hall, "Arrays and Charge-coupled Devices" in *Applied Optics and Optical Engineering*, Vol. VIII, Edited by R. Kingslake, Academic Press, New York (1980).
12. J. H. Vuolo, *Visão Humana*, Apostila IFUSP, São Paulo (1996).
13. *The Photonics Handbook - Book 3 - Design and Applications*, 40th Edition, Laurin Publishing, Pittfield (1994).
14. M. Lampton, *The Microchannel Image Intensifier*, Scientific American, Vol. 245/5, p. 46 (1981).
15. "Microscope", *Encycopaedia Britannica*, Vol. 15, 1971 Edition, W. Benton-Publisher, Chicago (1971).
16. P. Tipler, *Física - Vol. 4 - Ótica e Física Moderna*, 3a Ed., Guanabara-Koogan (1991).
17. S. Chandrasekhar *Liquid Crystals*, Cambridge Univ. Press, Cambridge (1977).
18. T. Scheffer and J. Nehring, *TN and STN Mode LCDs*, in *Liquid Crystals, Applications and Uses*, Vol. I, B. Bahadur (Editor), World Scientific, (1990).
19. S. D. Smith, *Optoelectronic Devices*, Prentice Hall, London (1995).
20. F. C. Luo, *Active Matrix LC Displays*, in *Liquid Crystals, Applications and Uses*, Vol. I, B. Bahadur (Editor), World Scientific, (1990).
21. J. H. Hett, "Medical Optical Instruments" in *Applied Optics and Optical Engineering*, Vol. V, Edited by R. Kingslake, Academic Press, New York (1969).
22. I. L. Pykett, *NMR Imaging in Medicine*, Scientific American, Vol. 246/5, p. 54 (1982).
23. C. N. Chen and D. I. Hoult, *Biomedical Magnetic Resonance Technology*, Adam Hilger, New York (1989).
24. A. C. Kak and M. Slaney, *Principles of Computerized Tomographic Imaging*, IEEE Press (1987).

Questões

As questões devem ser resolvidas de forma bastante livre, usando argumentos razoáveis, dados conhecidos ou informações dadas no texto.

1. Um pequeno objeto é iluminado por uma lâmpada incandescente de 60 W a 1 m de distância. Uma câmara escura tem um anteparo a $b = 5 \text{ cm}$ de um orifício de 0,2 mm de diâmetro.

Estimar a ordem de grandeza da luminância da imagem, para um objeto a 20 cm da câmara escura.

Admitir que o objeto reflete de maneira difusa cerca de 30 % da luz incidente e que a tela translúcida transmite de maneira difusa, cerca de 20 % da luz incidente.

Comparar o resultados com a sensibilidade do olho humano em condições mesotópicas.

2. Se L é a luminância de um objeto distante, mostrar que a iluminância no filme da câmara da Figura 3 é dada por

$$I = 0,9 \frac{\pi}{4} \frac{L}{F^2}, \quad (37)$$

onde F é o número- f correspondente à abertura do diafragma e a perda por reflexão na lente é 10 % (valor típico para uma câmara moderna).

3. A iluminância média necessária para uma tela de cinema é da ordem de grandeza de 50 lux. Estimar a potência da lâmpada de um projetor com uma objetiva de 16 cm e abertura $f/2$, com uma tela a 10 m de distância. Admitir que o sistema de condensação de luz permite condensar cerca de 30 % da luz da lâmpada sobre o filme e que o filme transmite em média cerca de 20 % da luz incidente.

4. Determinar a frequência mínima de rotação de um disco de Nipkow com 360 furos, para que a imagem projetada não apresente cintilação.

Esquematizar um disco de Nipkow com 360 furos, usando a técnica de entrelaçamento de linhas (interlace), para que o disco possa funcionar na metade da rotação anterior.

5. Se o sistema de televisão permite transmitir 30 quadros por segundo e o cinema é feito a 24 quadros por segundo, explicar detalhadamente como pode ser transmitido um filme pela televisão.

6. A visão humana pode perceber facilmente uma modulação de intensidade num filme projetado a 24 quadros por segundo para níveis altos de iluminação. Explicar como pode ser resolvido este problema no cinema.

7. Considerar uma folha de papel branco a 3 m de uma lâmpada incandescente comum de 100 W. Cerca de 25 % da luz é refletida de maneira difusa e isotrópica no hemisfério de incidência da luz. Mostrar que a luminância da folha de papel é de aproximadamente 1 cd/m^2

8. Um excelente fotocátodo tem eficiência quântica de aproximadamente 10 %, em 555 nm. Isto é, um fotoelétron é gerado para cada 10 fótons incidentes.

Mostrar que, sem amplificação, a corrente gerada é da ordem de grandeza de $50 \mu\text{A/lm}$, em 555 nm.

9. Considerar um disco de Nipkow com um furo de 1 mm^2 e um sensor fotoelétrico simples (sem amplificação), como o da questão anterior.

Mostrar que a corrente máxima obtida é da ordem de dezenas de picoampéres, para imagens de objetos a 3 m de distância de uma lâmpada de 100 W.

10. O número de moléculas em m gramas de uma substância é

$$N = \left(\frac{m}{M} \right) N_A, \quad (38)$$

onde M é a massa molecular e $N_A = 6,022 \times 10^{23}$ é o número de Avogadro. Mostrar que, em média, a distância entre moléculas é da ordem de grandeza de

$$d \sim 0,1 \left(\frac{M}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ nm}, \quad (39)$$

onde ρ é a densidade em g/cm^3 . Estimar o valor de d para alguns sólidos, líquidos e gases típicos.