

5 Ondas

5.1 Conceitos fundamentais

Uma onda é uma perturbação que se propaga transportando energia. A energia que a onda transporta é fornecida pelo agente causador da perturbação e o movimento ondulatório pode transmitir energia a longas distâncias.

As *ondas mecânicas* são aquelas que necessitam de um meio material para se propagarem. São exemplos de ondas mecânicas: as ondas na água, as ondas sonoras, as ondas produzidas ao se fazer uma corda vibrar e as ondas sísmicas. Elas se propagam devido à vibração das partículas que constituem o meio material. Convém destacar que o próprio meio não se move como um todo junto com a onda; as várias partes do meio apenas oscilam em relação às suas posições normais de equilíbrio. A onda transporta energia, mas não transporta matéria.

A onda mecânica produzida ao se deslocar para cima e para baixo uma das extremidades de uma corda esticada é um exemplo de uma *onda transversal*, cuja direção de propagação é perpendicular à direção em que as partículas vibram.

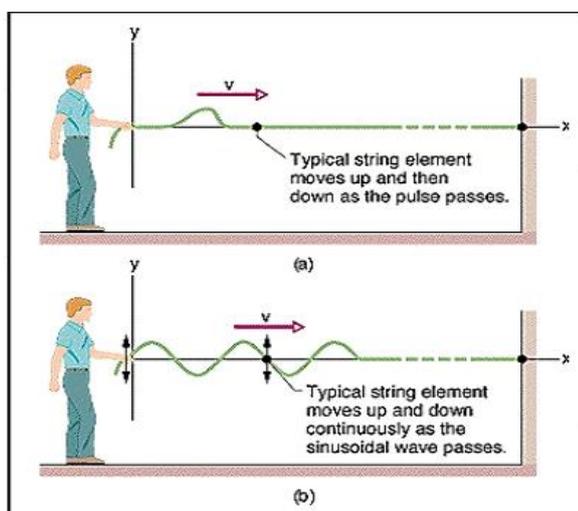


Figura 1: Ondas transversais em uma corda vibrante: (a) um pulso (b) uma onda senoidal.

A amplitude “ y_M ” (ou “A”) da onda é igual ao módulo do deslocamento máximo dos elementos da corda a partir de suas posições de equilíbrio, enquanto a onda passa através deles. O comprimento de onda “ λ ” é a distância paralela à direção de propagação da onda medida entre repetições da forma da onda, ou seja, corresponde à distância entre duas cristas (ou dois vales) consecutivos.

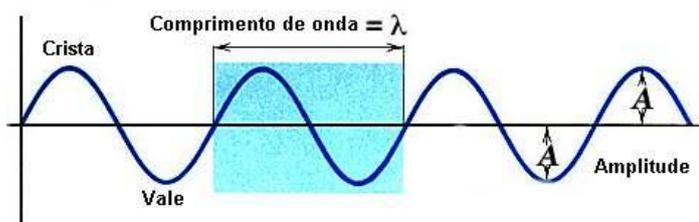


Figura 2: Esquema ilustrando as definições de amplitude e comprimento de onda.

O período “T” corresponde ao intervalo de tempo para a onda se propagar por uma distância equivalente ao seu comprimento de onda, isto é, para que as partículas do meio material executem um ciclo completo de oscilação. A frequência “f” é igual ao inverso do período, correspondendo ao número de ciclos completos por intervalo de tempo. A frequência da onda é característica da fonte que a emite. No SI, a unidade de medida da frequência é o hertz (Hz), cuja dimensão é inverso de tempo (s^{-1}).

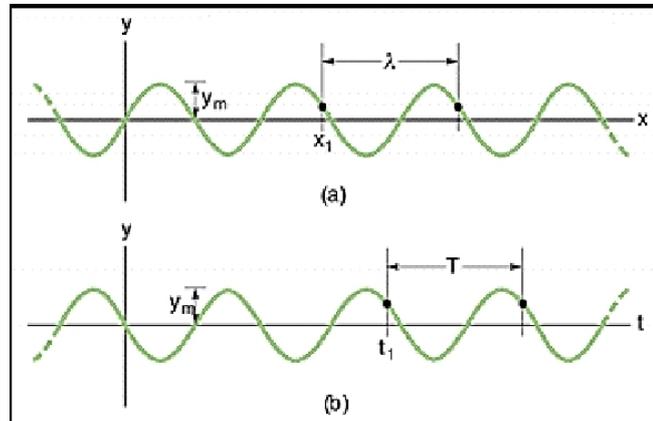


Figura 3: Esquema da propagação de uma onda transversal: (a) em função da posição; (b) em função do tempo.

Em uma onda sonora se propagando pelo ar, o movimento oscilatório das moléculas de ar é paralelo à direção em que o som se propaga, o que caracteriza uma *onda longitudinal*.

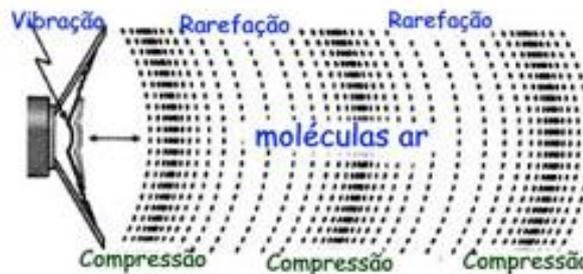


Figura 4: Esquema das regiões de rarefação e compressão do ar em uma onda sonora.

O movimento oscilatório da membrana do alto-falante da figura 4 faz as moléculas do ar vibrarem, provocando variações de pressão no ar (compressões e rarefações), que se propagam sob a forma de uma onda longitudinal.

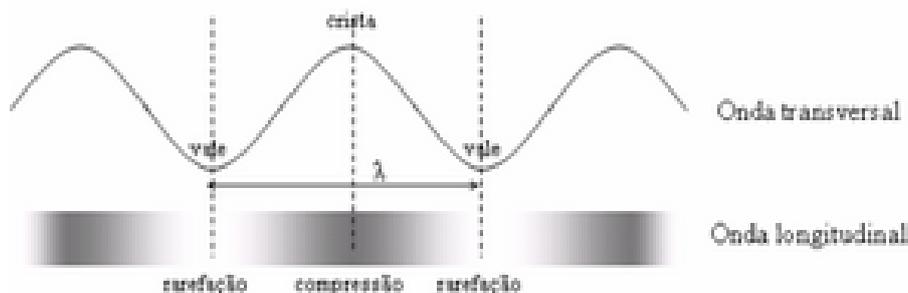


Figura 5: Comparação entre uma onda transversal e uma onda sonora (longitudinal).

As ondas nos líquidos são classificadas como *ondas mistas*, pois são ao mesmo tempo transversais e longitudinais. Na água, pequenos objetos flutuantes, tais como rolhas de cortiça ou barquinhos de papel, mostram que o movimento da água é ligeiramente para cima e para baixo, assim como para frente e para trás.

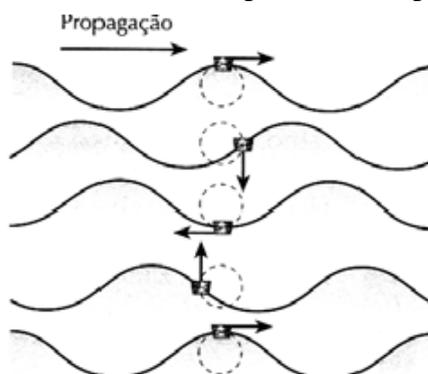


Figura 6: Esquema do movimento oscilatório em uma onda mista na água.

Há um tipo de onda transversal que, além de se propagar em meios materiais, também se propaga no vácuo. Trata-se das *ondas eletromagnéticas*, resultantes das oscilações de campos elétricos e magnéticos no espaço e no tempo. Todas as ondas eletromagnéticas se propagam no vácuo com a mesma velocidade: $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

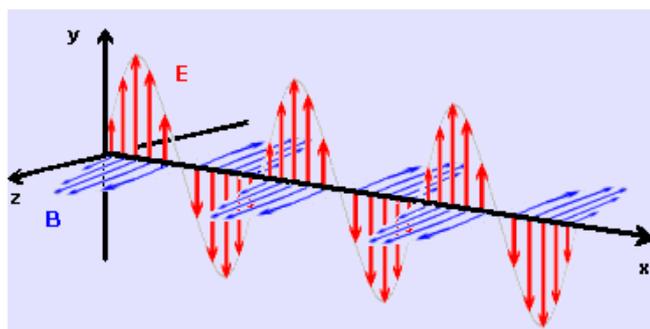


Figura 7: Esquema da propagação de uma onda eletromagnética: o fluxo de energia é perpendicular às direções das oscilações dos campos elétrico e magnético.

A eletricidade e o magnetismo estão diretamente relacionados: um campo elétrico variável no tempo e no espaço produz um campo magnético também variável, e vice-versa. As ondas eletromagnéticas são emitidas por partículas eletricamente carregadas quando são aceleradas ou desaceleradas. Por exemplo, elétrons oscilando em uma antena de rádio emitem energia sob a forma de ondas de rádio. As lâmpadas comuns emitem ondas eletromagnéticas de diversos comprimentos de onda, caracterizando-se como fontes de luz incoerentes e policromáticas. Por outro lado, as fontes de luz laser emitem ondas com um comprimento de onda bem definido, sendo classificadas como fontes coerentes e monocromáticas.

As ondas eletromagnéticas são classificadas quanto à frequência ou o comprimento de onda, constituindo o *espectro eletromagnético*. Note que a luz visível constitui apenas uma pequena parte do espectro. As ondas podem ainda ser classificadas como uni, bi ou tridimensionais conforme o número de direções em que se propagam. Uma onda transversal propagando-se em uma corda é uma onda unidimensional. As ondas sonoras e eletromagnéticas emitidas radialmente por pequenas fontes são tridimensionais.

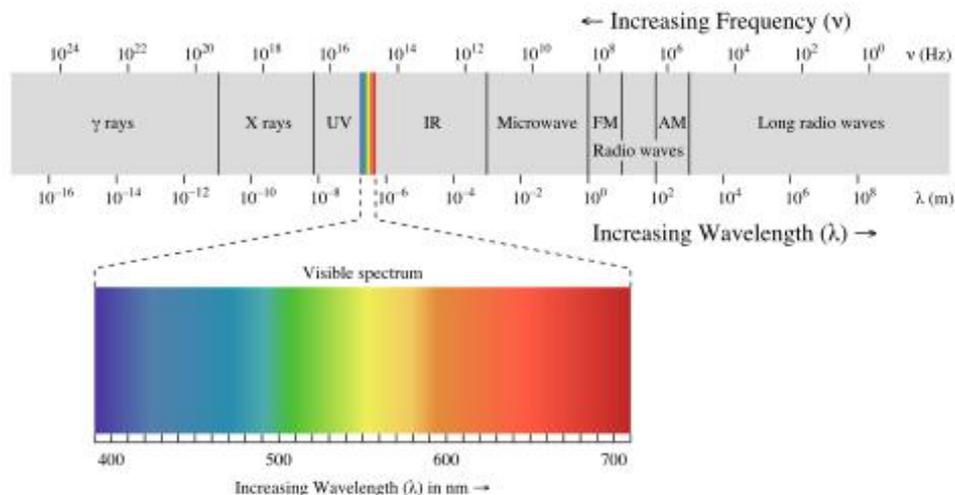


Figura 8: Representação do espectro eletromagnético.

5.2 Ondas progressivas senoidais

São ondas que podem ser descritas matematicamente por funções de onda da forma:

$$y = y_M \text{sen}(kx - \omega t)$$

O argumento da função seno é chamado *fase* da onda. O denominado número de onda “k” (em rad/m) é definido pela relação:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

As relações entre a frequência “f” (em Hz), o período “T” (em segundos) e a frequência angular “ω” (em rad/s) são dadas por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \qquad f = \frac{1}{T} \qquad \omega = 2\pi f$$

A velocidade de propagação da onda (ou velocidade de fase) é a velocidade com a qual temos que nos deslocar ao longo da direção de propagação da onda para que a fase de um ponto qualquer, tomado como referência na onda, permaneça constante. Em um período, tal ponto percorre uma distância equivalente a um comprimento de onda. Logo:

$$v = \lambda f = \frac{\omega}{k}$$

Exemplo 1: Uma onda se propagando ao longo de uma corda é descrita pela equação

$$y(x,t) = 0,00327\text{sen}(72,1x - 2,72t)$$

na qual as constantes numéricas estão em unidades do SI.

- Quais são o comprimento de onda, o período e a frequência desta onda?
- Qual a velocidade de propagação (velocidade de fase) da onda?
- Qual o deslocamento y em $x = 22,5\text{cm}$ e $t = 18,9\text{s}$?

5.3 Interferência de ondas

Ondas que se superpõem no espaço e no tempo podem ser adicionadas algebricamente para produzir uma onda resultante: $y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t)$.

Em uma superposição, as ondas componentes não alteram de modo algum a propagação uma da outra.

Estes enunciados constituem uma versão do princípio de superposição, segundo o qual, quando vários efeitos ocorrem simultaneamente, o efeito total é a soma dos efeitos individuais.

Na figura 9, está ilustrada a superposição de dois pulsos que se propagam em sentidos contrários em uma corda esticada. O princípio de superposição se aplica quando os pulsos passam um pelo outro.

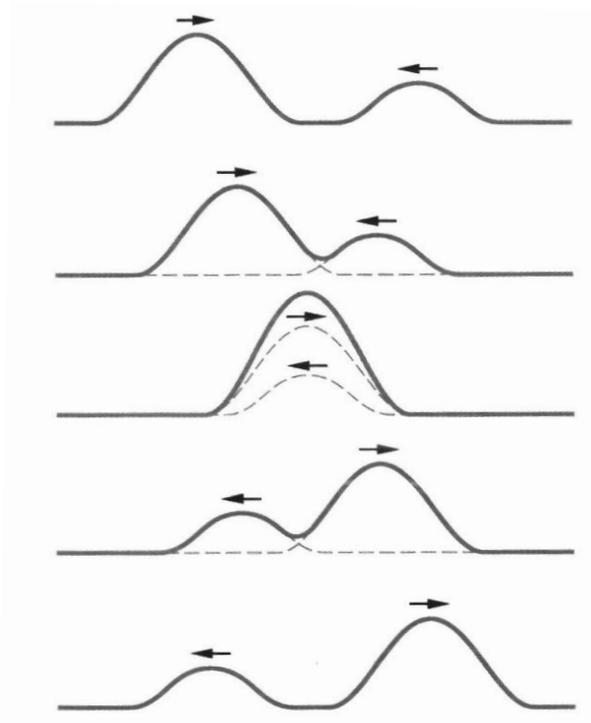


Figura 9: Representação da superposição de dois pulsos em uma corda.

Quando duas ou mais ondas se propagam simultaneamente pela mesma região, elas irão se combinar de acordo com o princípio de superposição, em um fenômeno que recebe o nome de *interferência*.

Na interferência de duas ondas senoidais de mesma amplitude, frequência e comprimento de onda, mas com uma diferença de fase ϕ entre elas, a onda resultante é dada por:

$$y = 2y_M \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \text{sen}\left(kx - \omega t - \frac{\phi}{2}\right)$$

A diferença de fase ϕ indica o quanto a forma espacial de uma onda está deslocada em relação à outra.

Se $\phi = 0$ rad, a interferência é *construtiva*: as ondas estão exatamente em fase e a amplitude da onda resultante será o dobro da amplitude das ondas individuais.

Se $\phi = \pi$ rad, a interferência é *destrutiva*: as ondas estão completamente fora de fase e a amplitude da onda resultante será nula.

Na figura 10, duas ondas senoidais y_1 e y_2 se propagam em uma corda no sentido positivo do eixo x . Elas interferem para produzir uma onda resultante y' , que é a onda observada na corda. A diferença de fase entre as duas ondas é 0 rad ou 0° em (a), π rad ou 180° em (b) e $2\pi/3$ rad ou 120° em (c). As ondas resultantes correspondentes são mostradas em (d), (e), (f). Em (d) ocorre interferência totalmente construtiva, em (e) interferência totalmente destrutiva e em (f) interferência intermediária.

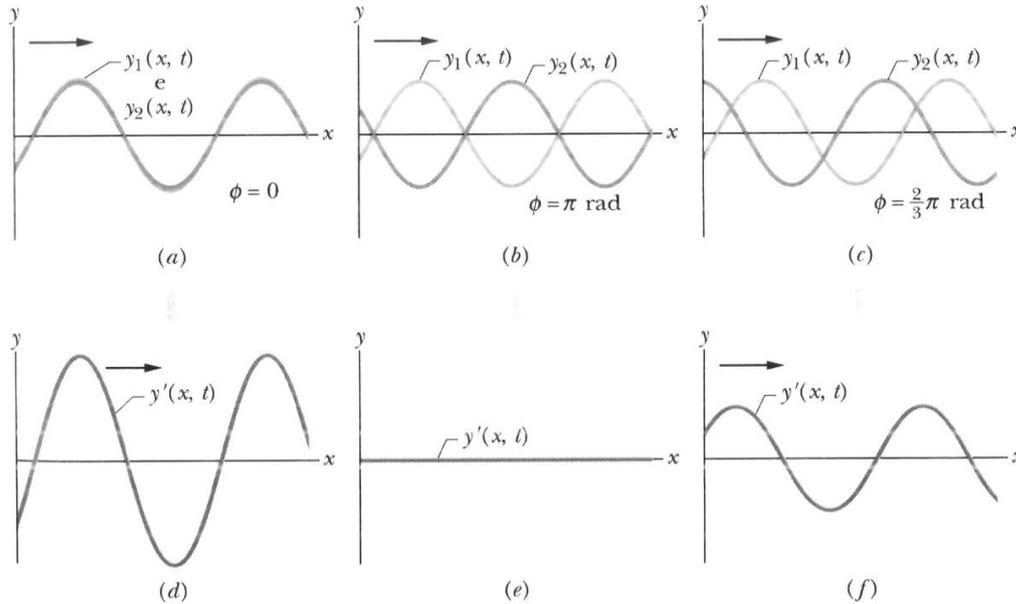


Figura 10: Esquemas de interferência entre ondas progressivas em uma corda.

Considere ondas criadas na água por duas hastes colocadas lado a lado, vibrando na mesma frequência. O que se vê sobre a superfície da água é um padrão de interferência, conforme ilustrado na figura 11. Na superfície da água, cada haste produz ondas que irão interferir. Quando uma crista se superpõe a outra crista, ou um vale se superpõe a outro vale, ocorre uma interferência construtiva. Nessas regiões, há uma oscilação mais intensa na superfície da água. Quando temos uma crista se superpondo a um vale, observa-se uma interferência destrutiva. Nas regiões onde ocorre interferência destrutiva, nota-se que a superfície da água fica praticamente parada.

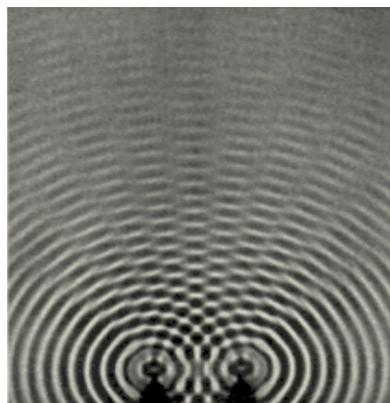


Figura 11: Padrão de interferência bidimensional para ondas na superfície da água.

O fenômeno da interferência pode ocorrer com qualquer tipo de onda, seja mecânica ou eletromagnética.

5.4 Ondas estacionárias e ressonância

Considere duas ondas senoidais propagando-se em sentidos contrários em uma corda. Na corda, haverá a formação de:

- Nós (N): pontos onde a corda não se move (não oscila).
- Ventres (V) ou anti-nós: pontos onde a amplitude da onda resultante é um máximo, localizados no ponto médio entre nós consecutivos.

A forma da onda resultante não se move para nenhum sentido; as posições dos nós e ventres não variam, originando uma onda estacionária, dada pela equação:

$$y = 2y_M \cdot \text{sen}kx \cdot \text{cos} \omega t$$

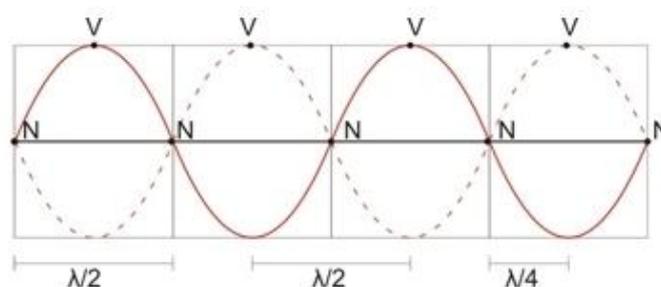


Figura 12: Padrão de onda estacionária resultante da interferência de duas ondas senoidais que se propagam em sentidos opostos.

Ao atingirem um anteparo ou uma interface entre dois meios diferentes, as ondas podem ser refletidas. Na reflexão, a fase da onda pode ser invertida. No caso de um pulso se propagando em uma corda, se a extremidade da corda estiver fixa, ocorre inversão de fase na reflexão do pulso quando este atinge o anteparo. Com a extremidade da corda livre, não há inversão de fase na reflexão do pulso.

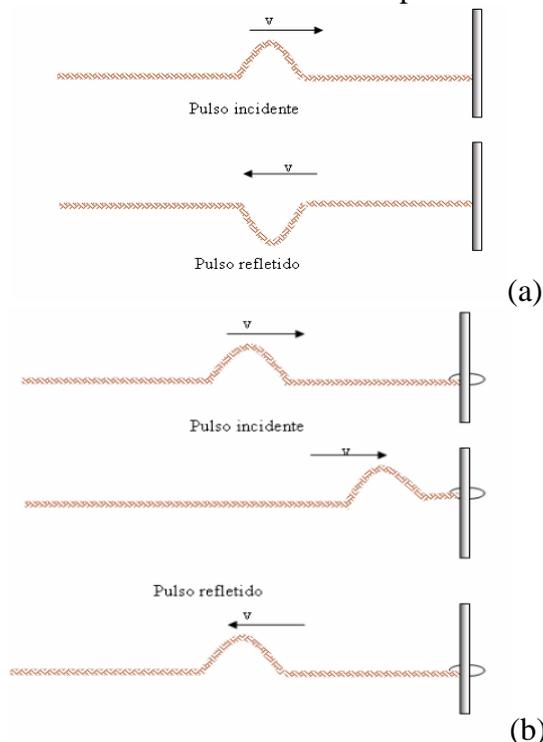
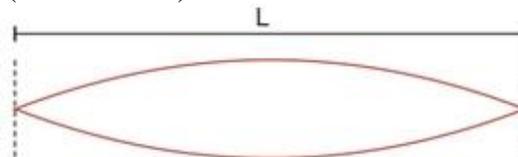


Figura 13: Reflexão de pulsos: (a) extremidade da corda fixa, com inversão de fase. (b) extremidade livre, sem inversão de fase.

Considere agora uma corda esticada, com ambas as extremidades fixas, como as cordas de um violão. Quando se dedilha a corda, as reflexões sucessivas das ondas nas extremidades e as conseqüentes superposições de diversas ondas na corda resultam na interferência entre elas. Para certas frequências, a interferência produz um padrão de onda estacionária (ou modo de oscilação). Tais frequências são chamadas *freqüências de ressonância*. Se a corda for excitada em alguma frequência diferente de uma frequência de ressonância, não ocorre a formação de ondas estacionárias.

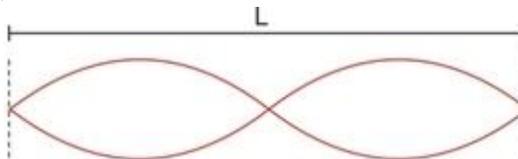
As ondas estacionárias produzidas na corda apresentam um nó em cada extremidade fixa. Entre os nós extremos pode haver qualquer número de nós intermediários, de modo que o comprimento de onda da onda estacionária pode assumir diversos valores. Como a distância entre nós adjacentes é de meio comprimento de onda, em uma corda de comprimento “L” haverá um número inteiro de meios comprimentos de onda. A chamada *série harmônica* é o conjunto de todos os modos estacionários de oscilação possíveis da corda.

Primeiro harmônico (fundamental):



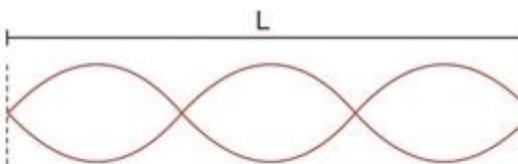
$$\lambda_1 = 2L, \quad f_1 = \frac{V}{\lambda_1} = \frac{V}{2L}$$

Segundo harmônico:



$$\lambda_2 = L = \frac{2L}{2}, \quad f_2 = \frac{V}{\lambda_2} = \frac{2V}{2L} = \frac{V}{L}$$

Terceiro harmônico:



$$\lambda_3 = \frac{2L}{3}, \quad f_3 = \frac{3V}{2L}$$

Figura 14: Os primeiros três harmônicos produzidos em uma corda esticada com extremidades fixas.

Apesar dos exemplos ilustrados se referirem a ondas mecânicas se propagando em cordas, a formação de ondas estacionárias e as ressonâncias podem ocorrer para

qualquer outro tipo de onda, como as eletromagnéticas ou ondas mecânicas sonoras. Para as ondas sonoras, as ressonâncias são observadas em instrumentos que consistem em tubos abertos ou fechados, chamados genericamente de tubos sonoros.

5.5 Difração

Uma propriedade interessante das ondas consiste na sua capacidade em contornar obstáculos. Este fenômeno é denominado *difração*. A figura 15 mostra um trem de ondas com frente de onda reta chegando a uma única fenda existente em uma barreira. A fenda é muito estreita, de modo que sua largura é menor que o comprimento de onda das ondas. Por isso, a fenda age como se fosse uma fonte puntiforme, emitindo ondas com frentes de onda praticamente circulares, que se espalham uniformemente numa ampla faixa de direções na região além da barreira.

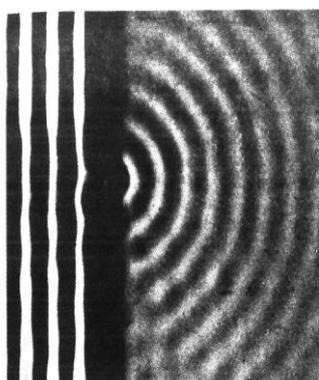


Figura 15: Fotografia mostrando a difração de um trem de ondas plana por uma fenda em uma barreira.

Quando existem duas fendas estreitas na barreira, é como se houvessem duas fontes puntiformes emitindo ondas com frentes circulares, que se sobrepõem além da barreira produzindo uma onda resultante. Quanto mais próximas estiverem as fendas, maior será o efeito da superposição das ondas difratadas através das fendas. A configuração complexa na região além da barreira resulta da formação de um padrão de interferência entre as ondas que se originam em uma fenda com as ondas que se originam da outra fenda. A figura 16 ilustra como se forma o padrão de interferência na chamada difração por fenda dupla.

Como cada frente de onda incidente chega simultaneamente nas fendas, estas fontes oscilam em fase. Por consequência, o raio mais interno dos dois conjuntos de ondas de frentes de onda circulares é λ , o raio das frentes de onda seguintes é 2λ e assim por diante. Os vales das ondas estão à meia distância entre quaisquer duas frentes de onda consecutivas que representam as cristas.

Nas posições marcadas por círculos, uma crista de um conjunto de ondas se superpõe construtivamente com uma crista do outro conjunto para produzir uma crista resultante mais alta, ou um vale de um conjunto se superpõe construtivamente com um vale do outro conjunto para formar um vale resultante mais baixo. Na região intermediária, nos pontos marcados com cruzes, os vales se superpõem destrutivamente às cristas.

Com o decorrer do tempo, as ondas de cada conjunto se afastam de suas fontes nas fendas, com os vales seguindo as cristas e vice-versa. Na posição onde a interferência construtiva produziu uma crista alta logo aparecerá uma depressão profunda. Isto é, a posição estará sujeita a uma onda resultante de grande amplitude

porque ela é composta pela combinação de duas ondas que sempre chegam em fase. Nas posições intermediárias, as ondas provenientes das duas fendas sempre interferem destrutivamente, pois elas sempre chegam defasadas. Portanto, nessas posições a onda resultante da combinação das duas tem amplitude nula.

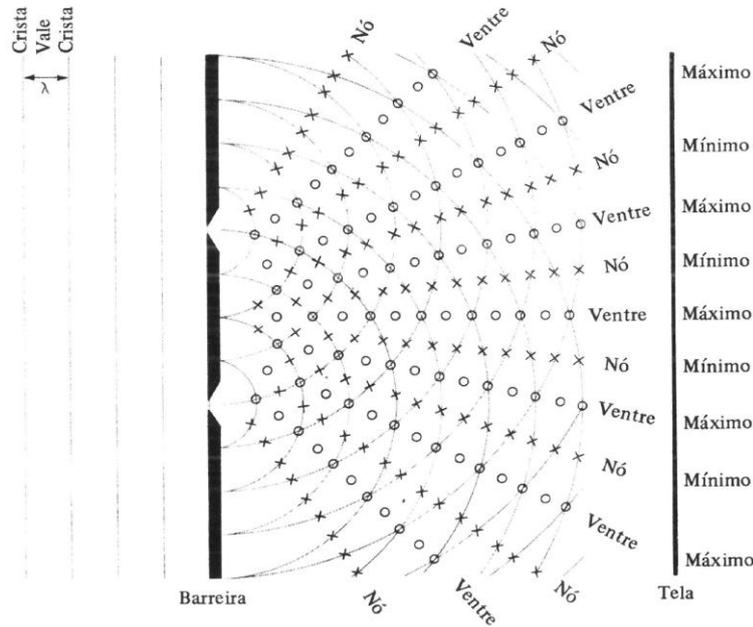


Figura 16: Padrão de interferência na difração por fenda dupla.

Ao se colocar uma tela adiante da barreira e paralelamente a esta, aparecerão sobre a tela “listas” alternadas de linhas de ventres e de nós. Onde uma linha de ventre incide sobre a tela, a onda resultante tem amplitude máxima e a ação da onda é maior. Forma-se um máximo de difração e, com a amplitude da onda resultante sendo máxima, haverá liberação de grande fluxo de energia sobre a tela. Onde a tela é interceptada por uma linha de nós, a onda resultante tem amplitude zero, forma-se um mínimo de difração e não há liberação de energia na tela.

Para uma análise quantitativa do fenômeno, supõe-se que a largura de cada fenda é pequena em comparação com a distância “D” entre elas. Então, a distância de qualquer ponto sobre a fenda 1 a um ponto P na tela é aproximadamente igual a “ l_1 ”, que é a distância do centro da fenda ao ponto P. Duas cristas emitidas a partir das fendas iniciam a trajetória para P no mesmo instante. Se P coincidissem com O, de modo que os trajetos l_1 e l_2 fossem iguais, os intervalos de tempo necessários para essas “caminhadas” seriam iguais, uma vez que ambas as frentes de onda deslocam-se para a direita com a mesma velocidade “v”. Neste caso elas interfeririam construtivamente em P. O mesmo se aplicaria para dois vales.

Se a diferença Δl entre l_2 e l_1 for um número ímpar de meios comprimentos de onda, ocorrerá uma interferência destrutiva. Isto é verdade, pois uma onda leva um número ímpar de meios períodos a mais do que a outra para se propagar até P. A condição para interferência destrutiva poder ser escrita como:

$$\Delta l = l_2 - l_1 = \left(n + \frac{1}{2} \right) \lambda$$

com $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

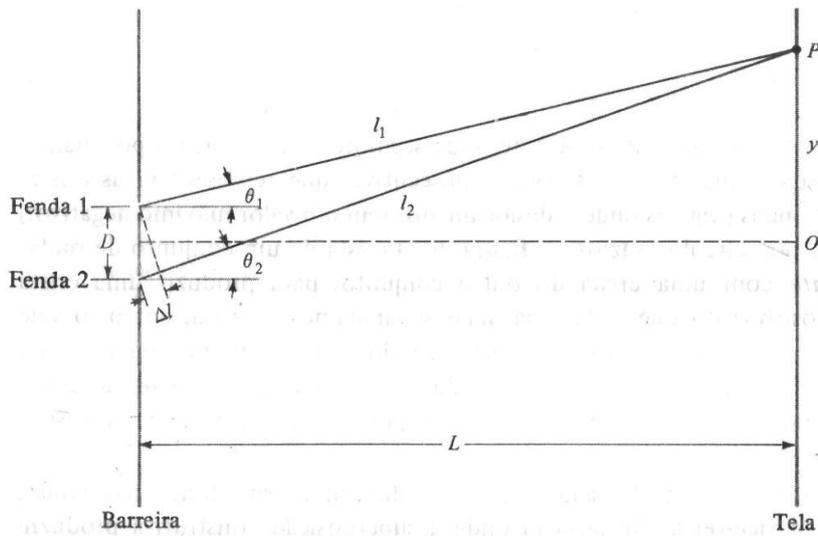


Figura 17: Geometria para a análise quantitativa da difração por fenda dupla.

Por outro lado, a interferência construtiva ocorre em qualquer ponto P no qual os comprimentos dos trajetos diferem de um número inteiro de comprimentos de onda, pois nesse caso as ondas chegam em fase em P. A condição para superposição construtiva é dada por:

$$\Delta l = l_2 - l_1 = n\lambda$$

com $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

As posições dos máximos e mínimos sobre a tela podem ser determinadas em função do ângulo entre os trajetos e a normal à barreira que contém as fendas. Para tanto, supõe-se que a distância L das fendas a tela seja grande em comparação com a distância D entre as fendas. Com isso, os percursos de comprimentos l_1 e l_2 são praticamente paralelos de modo que os ângulos θ_1 e θ_2 são praticamente iguais, conforme ilustra a figura 18.

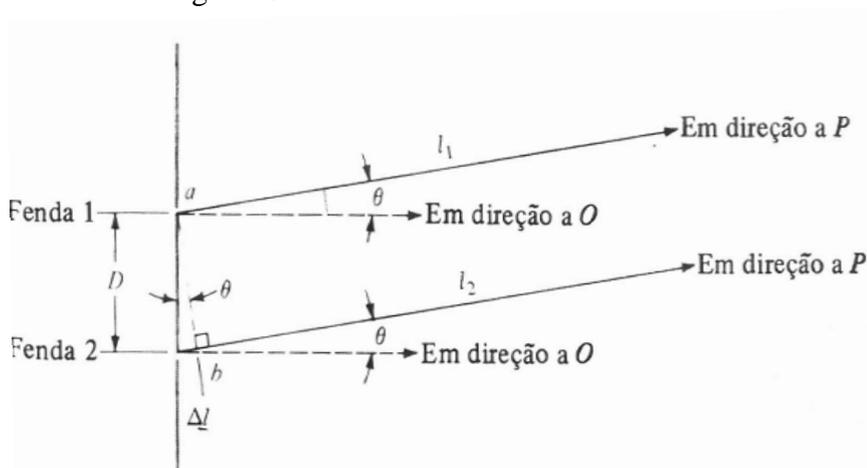


Figura 18: Esquema para determinação das posições dos máximos e mínimos na difração por fenda dupla.

Partindo de P, marca-se um comprimento igual a l_1 sobre l_2 , descendo-se uma perpendicular ab ao trajeto l_2 , a partir da fenda 1. A diferença Δl no comprimento dos trajetos forma o lado de um triângulo retângulo, que é completado pelos lados ab e D . O ângulo no vértice mais agudo desse triângulo é θ . Assim sendo:

$$\Delta l = D \operatorname{sen} \theta$$

Esta relação pode ser combinada com as condições de interferência destrutiva ou construtiva, a fim de fornecer os ângulos para os quais se observam os mínimos e máximos de difração, dados respectivamente por:

Mínimos para a fenda dupla:
$$\left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda = D \operatorname{sen} \theta$$

Máximos para a fenda dupla:
$$n\lambda = D \operatorname{sen} \theta$$

Seja “ y ” a distância entre o ponto central sobre a tela e o ponto arbitrário P. Considerando valores de “ y ” muito menores que a distância “ L ” entre a barreira e a tela e o ângulo θ pequeno ($< 15^\circ$):

$$\operatorname{sen} \theta \cong \operatorname{tg} \theta \cong \frac{y}{L}$$

Portanto, obtém-se:

Posições dos mínimos:
$$y = \frac{L(n + 1/2)\lambda}{D}$$

Posições dos máximos:
$$y = \frac{Ln\lambda}{D}$$

A separação entre máximos adjacentes é uma forma de se caracterizar uma figura de difração por fenda dupla:

$$\Delta y = \frac{L(n+1)\lambda}{D} - \frac{Ln\lambda}{D} \Rightarrow \Delta y = \frac{L}{D} \lambda$$

O mesmo resultado seria obtido para a separação entre mínimos adjacentes.

A análise experimental da difração da luz por uma fenda dupla foi realizada pela primeira vez por Thomas Young (1773-1829), em torno de 1800. Augustin-Jean Fresnel (1788-1827), por volta de 1820, desenvolveu as bases teóricas para a compreensão desse tipo de experimento. Na figura 19, à direita, observa-se o padrão de difração obtido num experimento de difração da luz por fenda dupla, revelado por um filme fotográfico colocado sobre a tela.

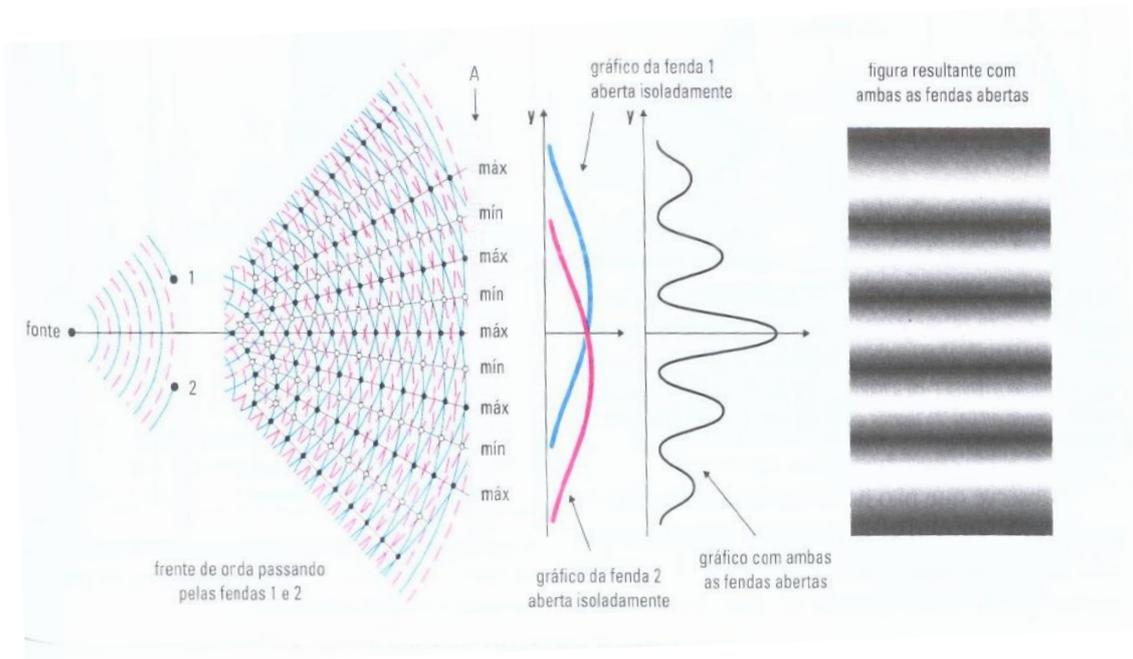


Figura 19: Padrão de difração da luz por fenda dupla.

Exemplo 2: A montagem da figura 20 é usada para se determinar o comprimento de onda da luz amarela emitida pelo vapor de sódio aquecido. Um filtro amarelo, que consiste em uma folha de plástico transparente amarelo colocado na frente da lâmpada, absorve toda a luz emitida por ela exceto a que se situa na faixa de comprimento de onda do amarelo. A separação entre as fendas é $0,204\text{ mm}$ e a distância entre a barreira e a tela na qual há uma chapa fotográfica é $1,24\text{ m}$. Utilizando a escala junto à foto do padrão de difração obtido, calcule o comprimento de onda da luz amarela.

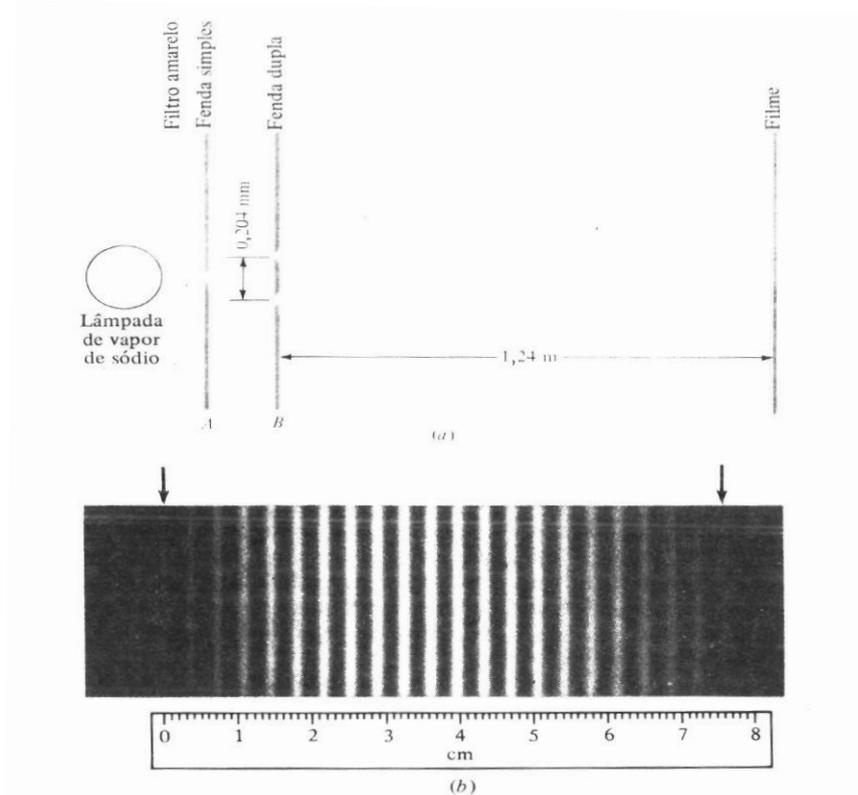


Figura 20: Esquema referente ao exemplo 2.

Referências

Halliday, D; Resnick, R. Fundamentos de física, volume 2, 8ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2009. Capítulo 16, itens 16.1, 16.2, 16.3, 16.4, 16.5, 16.9, 16.10, 16.12, 16.13.

Serway, R.A; Jewett, J.W. Princípios de física, volume 4, 1ª edição. São Paulo: Thomson Learning, 2007. Capítulo 27, itens 27.1, 27.2, 27.3, 27.6.

Exercícios

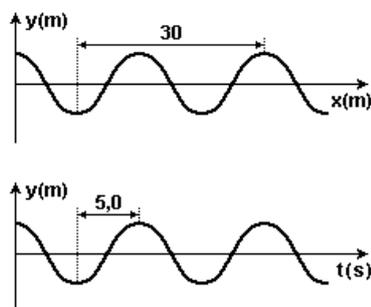
1) As ondas podem ser classificadas em mecânicas ou eletromagnéticas; transversais, longitudinais ou mistas. Quais as características destes tipos de onda?

2) A função de onda para uma onda progressiva em uma corda esticada é (em unidades do SI):

$$y(x, t) = 0,350 \text{ sen}(3\pi x - 10\pi t + \pi/4)$$

(a) Qual a amplitude da onda? (b) Quais são a velocidade e a direção de propagação da onda? (c) Qual é o deslocamento vertical da corda em $t=0$ e $x=0,100$ m? (d) Quais são o comprimento de onda e a frequência da onda?

3) Uma onda transversal é representada abaixo pelos gráficos $y-x$ e $y-t$, nos quais “ y ” representa o deslocamento vertical, “ x ” a posição e “ t ” o tempo. Determine o comprimento de onda, o período, a frequência e a velocidade de propagação dessa onda.



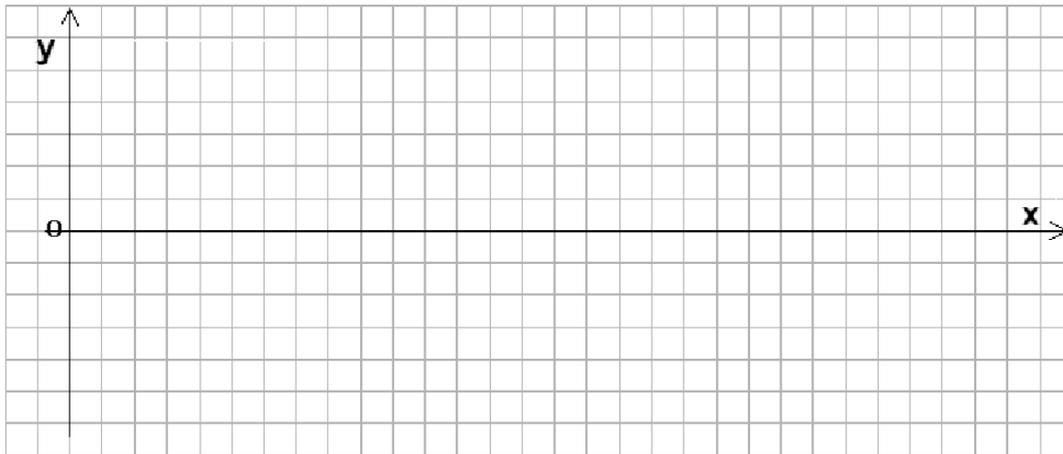
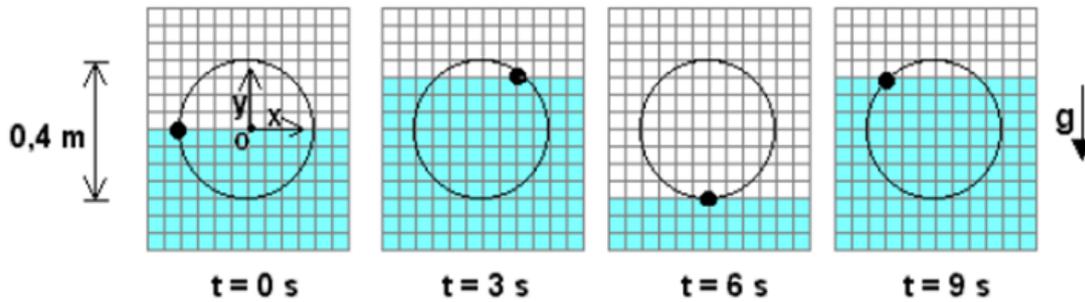
4) A velocidade de propagação da radiação eletromagnética no vácuo é cerca de $3,0 \cdot 10^5$ km/s. (a) O intervalo visível do espectro se estende desde o vermelho ($\lambda = 700$ nm) até o violeta ($\lambda = 400$ nm). Determine o intervalo de frequências correspondente para a luz visível. (b) O intervalo de frequências das ondas curtas (por exemplo, FM de rádio e VHF de televisão) vai de 1,5 MHz até a faixa das microondas de 300 MHz. Qual o intervalo de comprimentos de onda correspondentes?

5) Escreva a equação de uma onda transversal com amplitude 1,5cm, período 0,4s e velocidade de fase 80cm/s que se propaga através de uma corda no sentido positivo do eixo x .

6) Um sensor, montado em uma plataforma da Petrobrás, com posição fixa em relação ao fundo do mar, registra as sucessivas posições de uma pequena bola que flutua sobre a superfície da água, à medida em que uma onda do mar passa por esse bola continuamente. A bola descreve um movimento aproximadamente circular, no plano

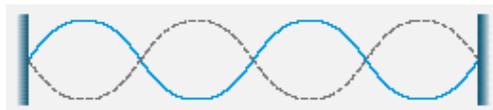
vertical, mantendo-se em torno da mesma posição média, tal como reproduzido na seqüência de registros abaixo, nos instantes indicados. O intervalo de tempo entre os registros mostrados é menor que o período da onda. A velocidade de propagação dessa onda senoidal é 1,5m/s.

- Determine o período e o comprimento de onda dessa onda do mar.
- Represente no quadriculado seguinte um esquema do perfil dessa onda para o instante 14s, tal como visto da plataforma fixa. Marque os valores apropriados nos eixos vertical e horizontal da escala da figura.



7) Explique qualitativamente como se formam os harmônicos em um corda esticada com suas extremidades fixas.

8) Numa corda homogênea de comprimento $L = 15,0\text{cm}$ cujas extremidades são fixas, se estabelece uma onda estacionária. Nesta situação, a corda vibra entre duas posições extremas, indicadas pelas linhas tracejada e contínua da figura.



Sabendo que a corda se alterna entre estas duas posições a cada 0,50s, calcule a velocidade de propagação das ondas ao longo da corda.

9) Uma corda vibra de acordo com a equação $y = 5.\text{sen}(\pi x/3).\text{cos}(40\pi t)$, sendo x e y medidos em centímetros e t em segundos. (a) Quais são a amplitude e a velocidade das ondas cuja superposição origina esta vibração? (b) Qual a distância entre nós consecutivos?

10) Em um forno de microondas, as moléculas de água contidas nos alimentos interagem com as microondas que as fazem oscilar com uma frequência de $2,4.10^9$ Hz. Ao oscilar, as moléculas de água colidem inelasticamente entre si convertendo a energia radiante em calor. Se a velocidade de propagação das microondas é $3,0.10^8$ m/s, (a) calcule seu comprimento de onda. (b) Considere que o forno é uma cavidade ressonante na qual a intensidade das microondas é nula nas paredes. Determine a distância entre as paredes do forno, na faixa de 25cm a 40cm, para que a intensidade da radiação seja máxima em seu centro.

11) Descreva qualitativamente como se dá a formação do padrão de interferência em um experimento de difração da luz por fenda dupla.

12) Um aparato para difração por fenda dupla tem como fonte de luz uma lâmpada de vapor de mercúrio filtrada por uma folha de plástico verde. O comprimento de onda dessa luz é 546nm (546 nanômetros). A distância entre as duas fendas é 0,150mm e a distância da barreira que contém as fendas até a tela onde se forma o padrão de difração é 25,0cm. Qual a distância, em milímetros, entre máximos adjacentes na figura de difração?

Respostas:

2) (a) 0,350m (b) 3,33m/s (c) 0,346m (d) 0,66m e 5Hz

3) 20m; 10s; 0,1Hz; 2,0m/s

4) (a) de $4,3.10^4$ Hz a $7,5.10^4$ Hz (b) de 200m a 1m

5) $y = 1,5.\text{sen}(0,196.x - 15,708.t)$ com “x” em centímetros e “t” em segundos

6) (a) 8s e 12m

8) 7,5cm/s

9) (a) 0,25cm e 120cm/s

10) (a) 12,5cm (b) 31,25cm

12) 0,910mm