

## CAPÍTULO 1 – ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

(\*) Capítulo 32 do Livro Texto

### 1ª LISTA DE EXERCÍCIOS

#### 1- Exercícios

##### 1.1 – Ondas Eletromagnéticas Planas e velocidade da Luz

1- (Exercício 4 – Livro Texto) Considere cada uma das seguintes orientações dos campos elétricos e magnéticos. Em cada caso, qual é a direção de propagação das ondas? (a)  $\vec{E} = -E\hat{i}$ ,  $\vec{B} = -B\hat{j}$ ; (b)  $\vec{E} = E\hat{j}$ ,  $\vec{B} = B\hat{i}$ ; (c)  $\vec{E} = -E\hat{k}$ ,  $\vec{B} = -B\hat{i}$ ; (d)  $\vec{E} = E\hat{i}$ ,  $\vec{B} = -B\hat{k}$ .

##### 1.2 – Ondas Eletromagnéticas Senoidais

2- (Exercício 7 – Livro Texto) Uma onda eletromagnética senoidal com campo de amplitude  $1,25 \text{ mT}$  e um comprimento de onda de  $432 \text{ nm}$  está viajando na direção  $+x$  através do espaço vazio. (a) Qual é a frequência desta onda? (b) Qual é a amplitude do campo elétrico? (c) Escreva as equações para os campos elétrico e magnético como funções de  $x$  e  $t$  na forma das equações:  $\vec{E}(x, t) = \hat{j}E_{\text{máx}}\cos(kx - \omega t)$  e  $\vec{B}(x, t) = \hat{k}B_{\text{máx}}\cos(kx - \omega t)$ .

3- (Exercício 10 – Livro Texto) O campo elétrico de uma onda eletromagnética senoidal obedece a equação  $E = (375 \text{ V/m})\cos[(1,99 \times 10^7 \text{ rad/m})x + (5,97 \times 10^{15} \text{ rad/s})t]$  (a) Qual é a velocidade da onda? (b) Quais são as amplitudes dos campos elétrico e magnético dessa onda? (c) Quais são a frequência, comprimento de onda e período da onda? É esta luz visível para os humanos?

4- (Exercício 11 – Livro Texto) Uma onda eletromagnética tem um campo elétrico dado por  $E(y, t) = (3,10 \times 10^5 \text{ V/m})\hat{k}\cos[ky - (12,65 \times 10^{12} \text{ rad/s})t]$ . (a) Em que direção a onda está viajando? (b) Qual é o comprimento de onda da onda? (c) Escreva a equação vetorial para  $\vec{B}(y, t)$ .

##### 1.3 – Energia e impulso em Ondas Eletromagnéticas

5- (Exercício 16 – Livro Texto) *Tratamento de câncer de alta energia.* Cientistas estão trabalhando em uma nova técnica para matar células cancerosas com pulsos de ultra alta energia (na faixa de  $10^{12} \text{ W}$ ) de luz que dura um tempo extremamente curto (alguns nanossegundos). Esses pulsos curtos embaralham o interior de uma célula sem destruí-la, como ocorreriam com pulsos longos. Podemos modelar uma tal célula típica como um disco de  $5,0 \text{ mm}$  de diâmetro, com o pulso durando  $4,0 \text{ ns}$  com uma potência média de  $2,0 \times 10^{12} \text{ W}$ . Vamos supor que a energia é espalhada uniformemente sobre as faces de  $100$  células para cada pulso. (a) Quanta energia é dada à célula durante este pulso? (b) Qual é a intensidade (em  $\text{W/m}^2$ ) entregue à célula? (c) Quais são os valores máximos dos campos elétrico e magnético no pulso?

6- (Exercício 18 – Livro Texto) Onda eletromagnética senoidal de uma estação de rádio passa perpendicularmente por uma janela aberta que tem área  $0,500 \text{ m}^2$ . Na janela, o valor *rms* do campo

elétrico da onda é  $0,0400 \text{ V/m}$ . Sabendo que  $E_{rms} = E_{m\acute{a}x}/\sqrt{2}$ , quanta energia essa onda carrega pela janela durante  $30,0 \text{ s}$ ?

7- (Exercício 19 – Livro Texto) Uma sonda espacial a  $2,0 \times 10^{10} \text{ m}$  de uma estrela mede a intensidade total da radiação eletromagnética da estrela como sendo  $5,0 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ . Se a estrela irradia uniformemente em todas as direções, qual é a sua potência média total?

8- (Exercício 21 – Livro Texto) A intensidade de um feixe de laser cilíndrico é  $0,800 \text{ W/m}^2$ . A área da seção transversal do feixe é de  $3,0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  e a intensidade é uniforme em toda a seção transversal do feixe. (a) Qual é a potência média de saída do laser? (b) Sabendo que  $E_{rms} = E_{m\acute{a}x}/\sqrt{2}$ , qual é o valor *rms* do campo elétrico no feixe?

9- (Exercício 22 – Livro Texto) Uma onda eletromagnética senoidal emitida por um telefone celular tem um comprimento de onda de  $35,4 \text{ cm}$  e uma amplitude de campo elétrico de  $5,40 \times 10^{-2} \text{ V/m}$  a uma distância de  $250 \text{ m}$  do telefone. Calcule (a) a frequência da onda; (b) A amplitude do campo magnético; (c) a intensidade da onda.

10- (Exercício 23 – Livro Texto) Uma fonte de luz monocromática com potência de  $60,0 \text{ W}$  irradia luz de comprimento de onda de  $700 \text{ nm}$  uniformemente em todas as direções. Calcule  $E_{m\acute{a}x}$  e  $B_{m\acute{a}x}$  para a luz de  $700 \text{ nm}$  a uma distância de  $5,00 \text{ m}$  da fonte.

11- (Exercício 24 – Livro Texto) **Transmissão de Televisão.** Estação de televisão pública **KQED** em São Francisco transmite um sinal de rádio senoidal em uma potência de  $777 \text{ kW}$ . Suponha que a onda se espalhe uniformemente em um hemisfério acima do solo. Em uma casa a  $5,00 \text{ km}$  de distância da antena, (a) que pressão média essa onda exerce em uma superfície totalmente refletora, (b) quais são as amplitudes dos campos elétricos e magnéticos da onda, e (c) qual é a densidade média da energia que esta onda carrega? (d) Para a densidade de energia na parte (c), que porcentagem é devida ao campo elétrico e que porcentagem se deve ao campo magnético?

12- (Exercício 25 – Livro Texto) Uma fonte de luz intensa irradia uniformemente em todas as direções. A uma distância de  $5,0 \text{ m}$  da fonte, a pressão de radiação em uma superfície perfeitamente absorvente é de  $9,0 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ . Qual é a potência média total da fonte?

13- (Exercício 26 – Livro Texto) Nas instalações do Simulador Espacial de  $25 \text{ pés}$  no Laboratório de Propulsão à Jato da NASA, um banco de lâmpadas de arco elétrico pode produzir luz de intensidade  $2500 \text{ W/m}^2$  na superfície de baixo da instalação. (Esse banco de lâmpadas simula a intensidade da luz solar perto do planeta Vênus.) Encontre a pressão de radiação média (em *Pa* e em *atm*) em (a) uma seção da superfície de baixo da instalação totalmente absorvedora e (b) uma seção da superfície de baixo da instalação totalmente refletora. (c) Encontre a densidade de momento média (momento por unidade de volume) na luz no chão.

14- (Exercício 28 – Livro Texto) Um feixe de laser tem diâmetro de  $1,20 \text{ mm}$ . Qual é amplitude do campo elétrico da radiação eletromagnética neste feixe se o feixe exercer uma força de  $3,8 \times 10^{-9} \text{ N}$  em uma superfície refletora?

## 2 - Problemas

15- (Exercício 33 – Livro Texto) *Cirurgia a laser*. Pulsos muito curtos com feixes de laser de alta intensidade são usados para reparar porções descoladas da retina do olho. Os breves pulsos de energia absorvidos pela retina soldam a partes destacadas de volta no lugar. Em um desses procedimentos, um feixe laser tem um comprimento de onda de  $810 \text{ nm}$  e fornece  $250 \text{ mW}$  de potência espalhada sobre um ponto circular de  $510 \text{ mm}$  de diâmetro. O humor vítreo (o fluido transparente que preenche a maior parte do olho) tem um índice de refração de  $1,35$ . (a) Se os pulsos de laser têm, cada um,  $1,50 \text{ ms}$  de duração, quanto de energia é entregue à retina a cada pulso? (b) Qual a pressão média que o pulso do feixe de laser exerceria na condição de incidência normal em uma superfície no ar se o feixe for totalmente absorvido? (c) Quais são o comprimento de onda e a frequência da luz do laser dentro do humor vítreo dos olhos? (d) Quais são os valores máximos dos campos elétricos e magnéticos no feixe de laser?

16- (Exercício 34 – Livro Texto) Considere uma onda eletromagnética senoidal tal que os campos sejam dados pelas equações  $\vec{E} = E_{\text{máx}}\hat{j}\cos(kx - \omega t)$  e  $\vec{B} = B_{\text{máx}}\hat{k}\cos(kx - \omega t + \varphi)$ , com  $-\pi \leq \varphi \leq \pi$ . Mostre que se  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  satisfazem as equações:

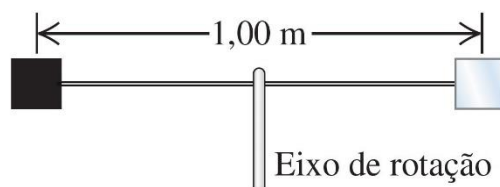
$$\frac{\partial E_y(x, t)}{\partial x} = -\frac{\partial B_z(x, t)}{\partial t} \quad \text{e} \quad -\frac{\partial B_z(x, t)}{\partial x} = \epsilon_0\mu_0 \frac{\partial E_y(x, t)}{\partial t}$$

então deve-se concluir que  $E_{\text{máx}} = cB_{\text{máx}}$  e  $\varphi = 0$ . (O resultado  $\varphi = 0$  significa que os campos  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  oscilam em fase.)

17- (Exercício 35 – Livro Texto) Um satélite a  $575 \text{ km}$  acima da superfície terrestre transmite ondas eletromagnéticas senoidais com frequência de  $92,4 \text{ MHz}$  uniformemente em todas as direções, com uma potência de  $25,0 \text{ kW}$ . (a) Qual é a intensidade dessas ondas, quando elas atingem um receptor na superfície terrestre diretamente abaixo do satélite? (b) Quais são as amplitudes dos campos elétrico e magnético no receptor? (c) Se o receptor possui um painel totalmente absorvedor que mede  $15,0 \text{ cm}$  por  $40,0 \text{ cm}$  orientado com seu plano perpendicular ao sentido percorrido pelas ondas, qual é a força média que essas ondas exercem sobre o painel? Essa força é grande o suficiente para causar efeitos significativos?

18- (Exercício 37 – Livro Texto) O Sol emite energia sob forma de ondas eletromagnéticas a uma taxa de  $3,9 \times 10^{26} \text{ W}$ . Essa energia é produzida por reações nucleares que ocorrem próximas ao centro do Sol. (a) Calcule a intensidade da radiação eletromagnética e a pressão da radiação sobre um objeto absorvedor na superfície do Sol (raio  $r = R = 6,96 \times 10^5 \text{ km}$ ) e a uma distância  $r = R/2$  no interior do Sol. Despreze os efeitos de espalhamento das ondas quando elas se propagam radialmente a partir do centro do Sol. Compare o resultado aos valores  $I = 1400 \text{ W/m}^2$  e  $p_{\text{rad}} = 5,0 \times 10^{-6} \text{ Pa}$  para a luz solar imediatamente antes de ela penetrar na atmosfera terrestre. (b) A pressão do gás na superfície do Sol é aproximadamente igual a  $1,0 \times 10^4 \text{ Pa}$ ; para  $r = R/2$ , a pressão do gás é de cerca de  $4,7 \times 10^{13} \text{ Pa}$ . Comparando esses dados aos resultados que você obteve no item (a), a pressão da radiação é um fator importante para determinar a estrutura do Sol? Por quê?

19- (Exercício 39 – Livro Texto) Dois refletores quadrados, cada qual com 1,50 cm de lado e 4,00 g de massa, estão localizados em extremidades opostas de uma haste delgada, extremamente leve, de 1,00 m e que pode girar sem atrito e no vácuo em torno de um eixo perpendicular a ele em seu centro, como mostra a Figura ao lado. Esses refletores são suficientemente pequenos para serem tratados como massas puntiformes em cálculos de momento de inércia. Ambos os refletores são iluminados em uma face por uma onda de luz senoidal com um campo elétrico de amplitude 1,25 N/C, que recai uniformemente sobre ambas as superfícies e sempre os atinge perpendicularmente ao plano de suas superfícies. Um refletor é coberto com um revestimento perfeitamente absorvedor e o outro, com um revestimento perfeitamente refletor. Qual é a aceleração angular desse dispositivo?



20- (Exercício 41 – Livro Texto) Um condutor cilíndrico com seção reta circular de raio  $a$  e resistividade  $\rho$  conduz uma corrente constante  $i$ . (a) Determine o módulo, a direção e o sentido do vetor  $\vec{E}$  em um ponto imediatamente abaixo da superfície do fio situado a uma distância  $a$  do eixo central. (b) Determine o módulo, a direção e o sentido do vetor  $\vec{B}$  nesse mesmo ponto. (c) Calcule o módulo, a direção e o sentido do vetor de Poynting  $\vec{S}$  nesse mesmo ponto. (O sentido de  $\vec{S}$  indica o sentido em que a energia eletromagnética flui para o interior ou para o exterior do condutor.) (d) Use o resultado do item (c) para calcular a taxa de escoamento de energia para o interior do volume ocupado por um comprimento  $l$  do condutor. (Dica: integre sobre a superfície do volume considerado.) Compare o resultado à taxa da geração de energia térmica no mesmo volume. Explique por que a energia dissipada na resistência de um condutor que conduz uma corrente pode ser interpretada em termos de uma energia que penetra no solenoide através de suas paredes cilíndricas.

21- (Exercício 42 – Livro Texto) Uma espira de fio circular tem um raio de 7,50 cm. Uma onda no plano eletromagnético senoidal trafegando no ar passa pela espira, com a direção do campo magnético da onda perpendicular ao plano da espira. A intensidade da onda no local da espira é de  $0,0275 \text{ W/m}^2$ , e o comprimento de onda é de 6,90 m. Qual é a  $fem$  máxima induzida na espira?

22- (Exercício 45 – Livro Texto) Sistema de posicionamento global (GPS). A rede GPS consiste em 24 satélites, e cada um realiza duas órbitas em torno da Terra por dia. Cada satélite transmite um sinal eletromagnético senoidal de 50,0 W (ou até menos) em duas frequências, e uma delas é de 1.575,42 MHz. Suponha que um satélite transmita metade de sua potência em cada frequência e que as ondas se propaguem uniformemente em um hemisfério de cima para baixo. (a) Qual é a intensidade média que um receptor de GPS no solo, diretamente abaixo do satélite, recebe? (Dica: primeiro use as leis de Newton para determinar a altitude do satélite.) (b) Quais são as amplitudes dos campos elétrico e magnético do receptor de GPS no item (a), e quanto tempo leva para o sinal atingir o receptor? (c) Se o receptor for um painel quadrado de 1,50 cm de lado que absorve todo o feixe de luz, qual é a pressão média exercida pelo sinal sobre ele? (d) Qual é o comprimento de onda com o qual o receptor deve estar sintonizado?