33.5 Transporte de Energia e o Vetor de Poynting

A taxa de transporte de energia (por unidade de área) de uma onda eletromagnética é descrita pelo **vetor de Poynting**:

$$\vec{S} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu_0}. \qquad (33.19)$$

onde $\vec{E} = \vec{E}(x,t) = E_m \,\mathrm{sen}(kx - \omega t)\,\hat{y}$ e $\vec{B} = \vec{B}(x,t) = B_m \,\mathrm{sen}(kx - \omega t)\,\hat{z}$.

A direção do **vetor de Poynting** $\vec{S}$ de uma onda eletromagnética em um ponto qualquer do espaço indica a direção de propagação da onda e a direção de transporte de energia neste ponto.

Como $\vec{E}$ e $\vec{B}$ são mutuamente perpendiculares em uma onda eletromagnética, o módulo de $\vec{E} \times \vec{B}$ é $EB \,\mathrm{sen}\, 90° = EB$. Assim,

$$S = \frac{EB}{\mu_0}. \qquad (33.21)$$

Usando a relação $B = E/c$ [equação (33.5)], podemos escrever a equação (33.21) como

$$S = \frac{E^2}{c\mu_0}. \qquad (33.22)$$

A energia média (em um período) transportada por uma onda eletromagnética é conhecida como **intensidade** I da onda. Tal grandeza pode ser expressa em termos do valor médio do vetor de Poynting em um período:

$$I = S_{méd} = \frac{1}{c\mu_0}[E^2]_{méd} = \frac{1}{c\mu_0}[E_m^2 \text{sen}^2(kx - \omega t)]_{méd} = \frac{1}{c\mu_0}\left[\frac{E_m^2}{2}\right] = \frac{1}{c\mu_0}E_{rms}^2, \qquad (33.26)$$

onde

$$E_{rms} \equiv \frac{E_m}{\sqrt{2}}. \quad (33.25)$$

A densidade de energia associada ao campo elétrico de uma onda eletromagnética plana é dada por

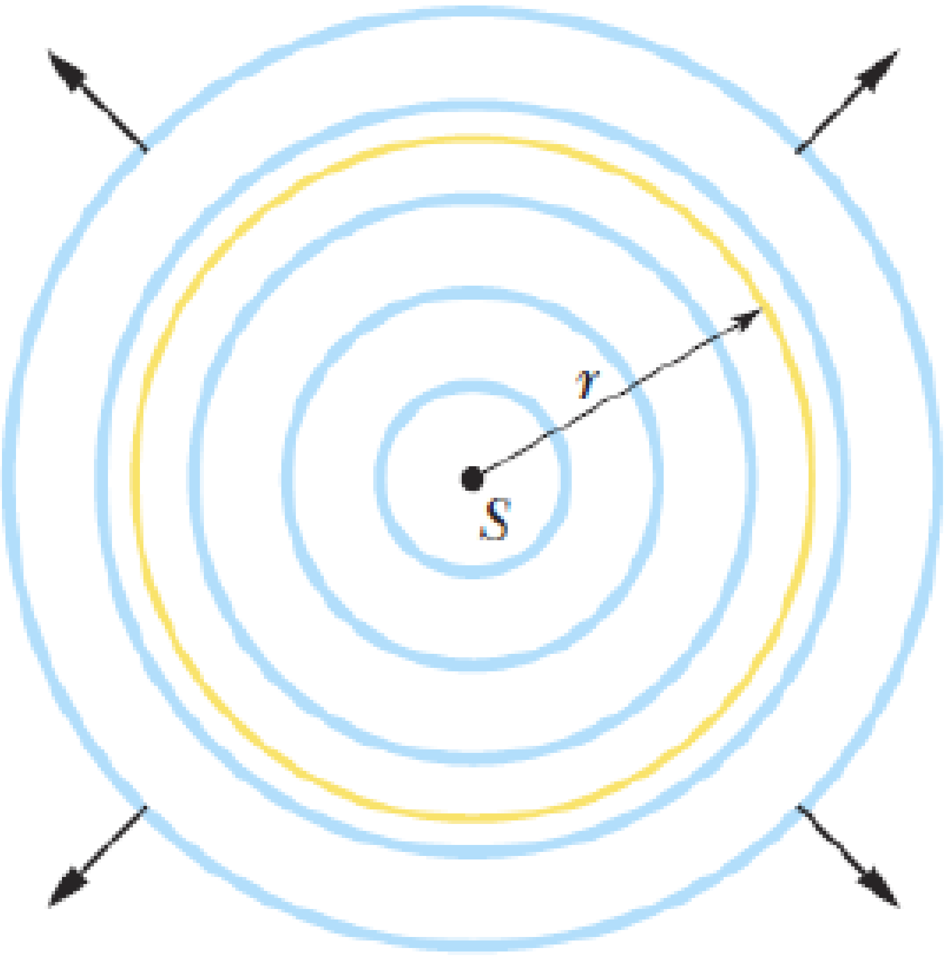
$$u_E = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2$$

Similarmente, a densidade de energia associada ao campo magnético de uma onda eletromagnética plana pode ser escrita como

$$u_B = \frac{1}{2\mu_0}B^2 = \frac{1}{2\mu_0}\left(\frac{E}{c}\right)^2 = \frac{1}{2\mu_0 c^2}E^2 = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2 = u_E$$

Variação da Intensidade com a Distância

A figura ao lado mostra, de forma esquemática, as frentes de ondas esféricas emitidas por uma **fonte pontual isotrópica** S.



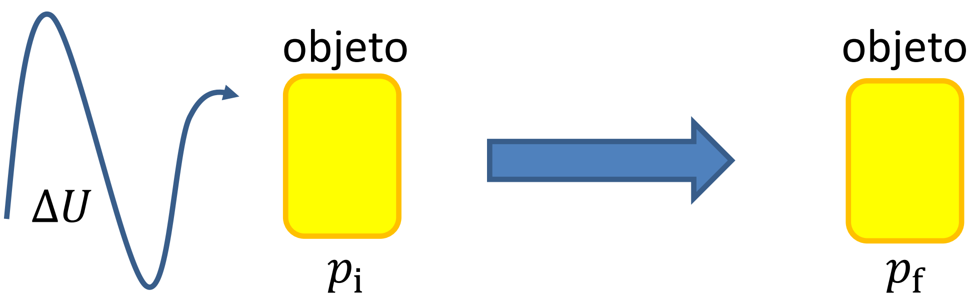
Como a energia emitida pela fonte S é conservada enquanto se afasta da fonte, a taxa com a qual a energia atravessa uma superfície esférica (imaginária) é igual à taxa com a qual a energia é emitida pela fonte, ou seja, é igual à potência P_s da fonte. Dessa forma, a intensidade I da onda eletromagnética em qualquer ponto sobre a superfície de uma esfera de raio r é dada por

$$I = \frac{P_s}{4\pi r^2}. \qquad (33.27)$$

33.6 Pressão de Radiação

Além de energia, as ondas eletromagnéticas também possuem momento linear. Isso significa que podemos exercer uma pressão sobre um objeto (a **pressão de radiação**) simplesmente iluminando o objeto.

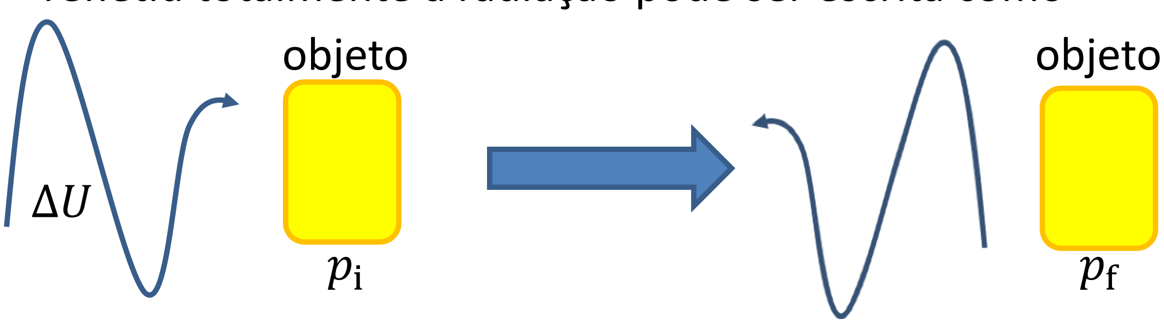
- Suponha que um objeto que está livre para se mover seja submetido a um feixe de radiação eletromagnética durante um intervalo de tempo Δt e que a energia da radiação ΔU seja **totalmente absorvida** pelo objeto.



A variação do momento linear Δp do objeto que absorveu totalmente a radiação eletromagnética é dada por

$$\Delta p = p_f - p_i = \frac{\Delta U}{c}. \quad (33.28)$$

- Por outro lado, se a radiação eletromagnética incidente for **totalmente refletida** pelo objeto e a incidência da radiação for perpendicular, a variação do momento linear Δp do objeto que refletiu totalmente a radiação pode ser escrita como



$$\Delta p = p_f - p_i = 2\frac{\Delta U}{c}. \quad (33.29)$$

De acordo com a Segunda Lei de Newton,

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}. \qquad (33.30)$$

Além disso,

$$I = \frac{\text{energia}}{\text{área tempo}} = \frac{\Delta U}{\text{A}\,\Delta t} \Rightarrow \Delta U = I\ \text{A}\,\Delta t. \qquad (33.31)$$

- Se a radiação é **totalmente absorvida** pelo objeto, então

pressão de radiação

$$\Delta p = \frac{\Delta U}{c} = \frac{I\ A\ \Delta t}{c} \Rightarrow \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{I\ A}{c} \Rightarrow F = \frac{I\ A}{c}. \quad (33.32) \qquad p_r = \frac{F}{A} \Rightarrow \boxed{p_r} = \frac{I}{c}. \quad (33.34)$$

- Se a radiação é **totalmente refletida** pelo objeto e a **incidência é perpendicular**, então

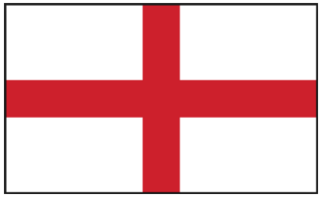
pressão de radiação

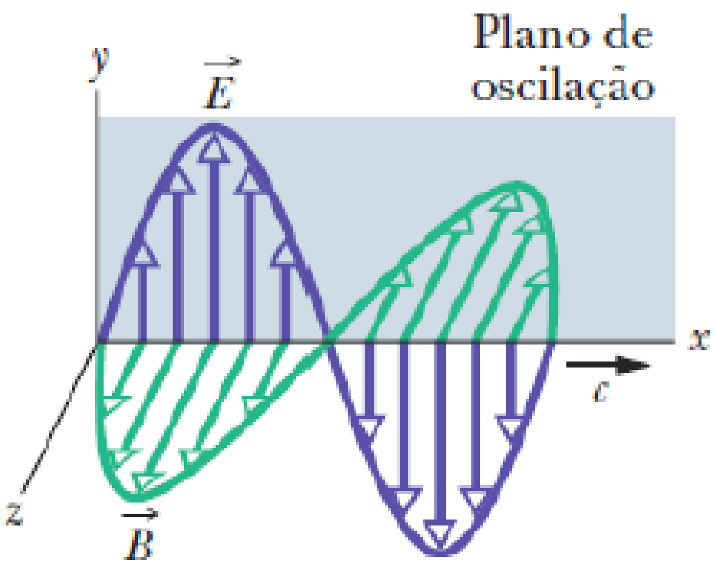
$$\Delta p = \frac{2\ \Delta U}{c} = \frac{2\ I\ A\ \Delta t}{c} \Rightarrow \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{2\ I\ A}{c} \Rightarrow F = \frac{2\ I\ A}{c}. \quad (33.33) \qquad \boxed{p_r} = \frac{2\ I}{c}. \quad (33.35)$$

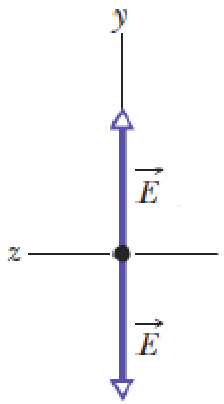
33.7 Polarização

As antenas de TV inglesas são orientadas na vertical e as brasileiras (e americanas) são orientadas na horizontal. A diferença se deve à direção de oscilação das ondas eletromagnéticas que transportam o sinal de TV. Na Inglaterra o equipamento de transmissão é projetado para gerar ondas **polarizadas** verticalmente, ou seja, cujo campo elétrico oscila na vertical. Assim, para que o campo elétrico das ondas eletromagnéticas de TV produza uma corrente na antena (e, portanto, forneça um sinal ao receptor de TV), é preciso que a antena esteja na vertical. No Brasil, as ondas são polarizadas horizontalmente.

Inglaterra



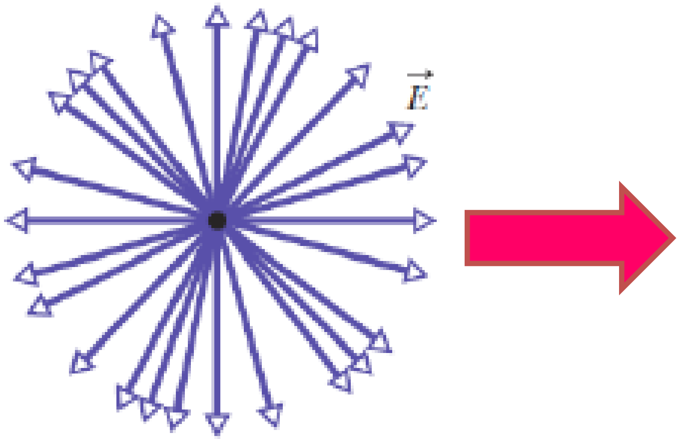


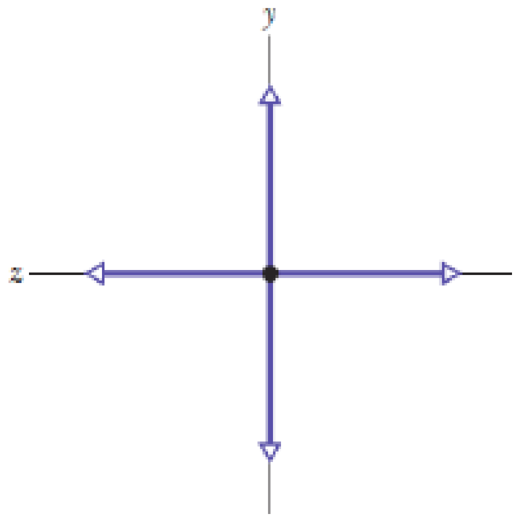


Luz polarizada verticalmente (na direção y) orientada para fora do quadro. O vetor campo elétrico $\vec{E}$ aponta sempre na direção vertical. O **plano de polarização** da onda é o plano que contém o vetor $\vec{E}$ em instantes sucessivos de tempo; nesse caso, o **plano de polarização** da onda é o plano xy.

Luz Polarizada

As ondas eletromagnéticas geradas por um canal de TV têm sempre a mesma polarização, mas as ondas eletromagnéticas emitidas por uma fonte de luz comum (como o Sol ou uma lâmpada elétrica) são **polarizadas aleatoriamente** ou **não-polarizadas**. Isso quer dizer que a direção do $\vec{E}$ muda aleatoriamente com o tempo, embora se mantenha perpendicular à direção de propagação da onda.





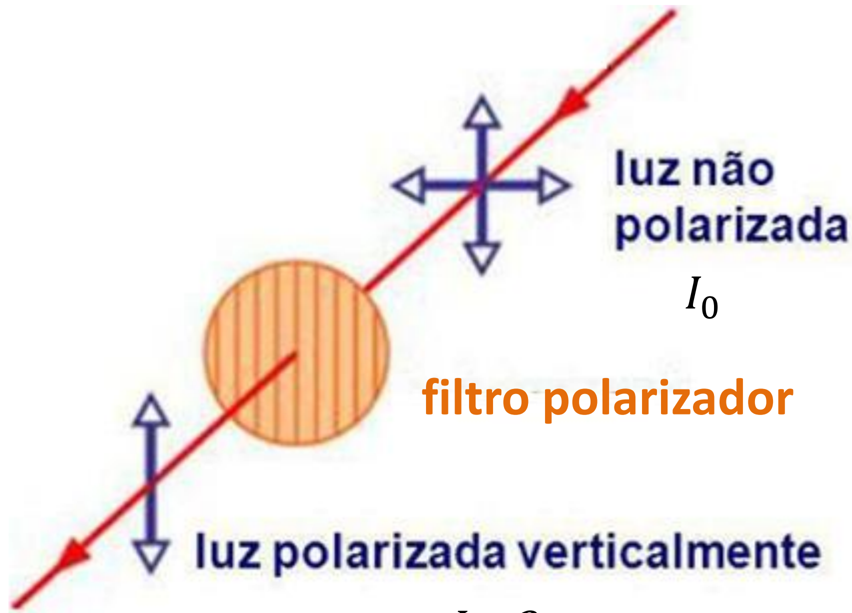
Feixe de luz **não-polarizada** orientada para fora do papel.

Forma compacta de representar um feixe de luz **não-polarizado.**

É possível transformar a luz não-polarizada em polarizada fazendo-a passar por um **filtro polarizador** (comercialmente, tais filtros são conhecidos como filtros *Polaroid*).

- A componente do campo elétrico paralela à **direção de polarização** é transmitida por um filtro polarizador; a componente perpendicular é absorvida.

- A luz que passa através do filtro polarizador da figura ao lado está polarizada verticalmente.



I_0

$I = ?$

Intensidade da Luz Polarizada Transmitida

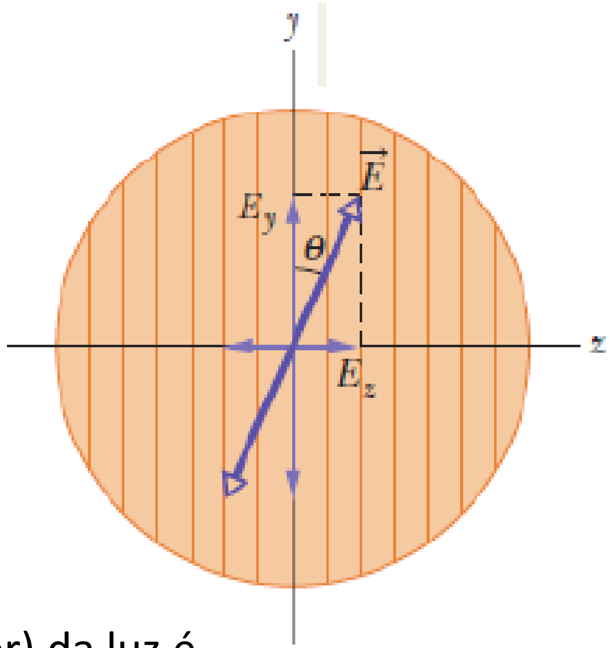
Quando um feixe de **luz não-polarizada** de intensidade inicial I_0 passa através de um filtro polarizador a intensidade da luz que emerge do filtro é

$$I = \frac{1}{2} I_0. \qquad (33.36)$$

Regra da Metade

Suponha agora que a luz que incide em um filtro polarizador seja **polarizada** e que o campo elétrico da luz antes de passar pelo filtro polarizador seja

$$\vec{E} = E_z\,\hat{z} + E_y\,\hat{y} = E\cos\theta\,\hat{y} + E\,\text{sen}\,\theta\,\hat{z}\,.$$



Ao atravessar o filtro polarizador, a componente transmitida do campo elétrico da luz é dada por

$$E_y = E\cos\theta. \qquad (33.37)$$

Como a intensidade inicial (antes de passar pelo filtro polarizador) da luz é

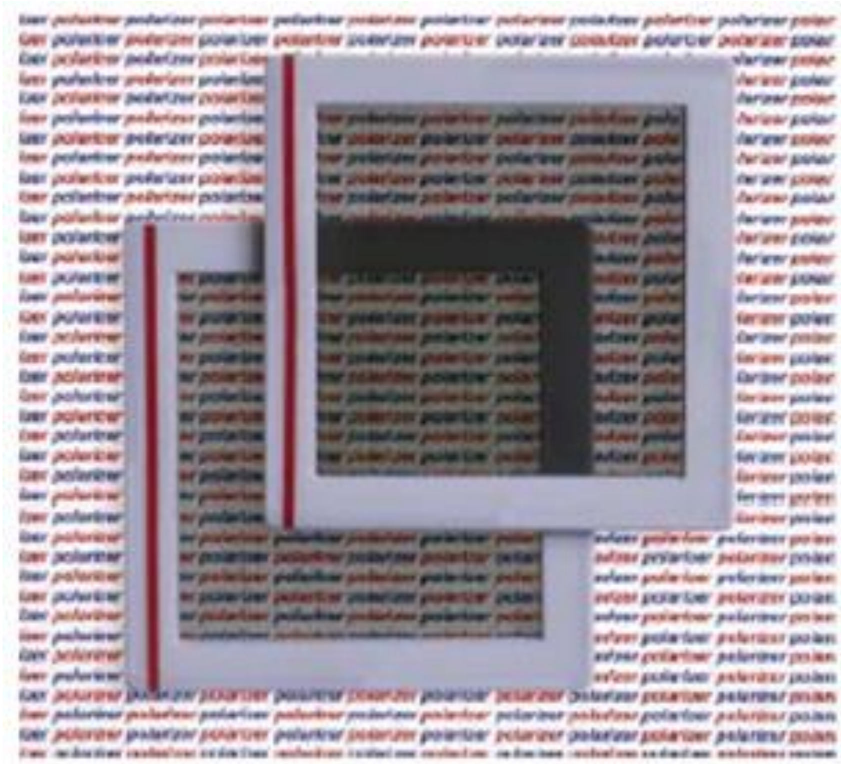
$$I_0 = \frac{1}{c\mu_0}\frac{E^2}{2} \quad \Rightarrow \quad I = \frac{1}{c\mu_0}\frac{E_y^2}{2} = \frac{1}{c\mu_0}\frac{E^2}{2}\cos^2\theta = I_0\cos^2\theta$$

Intensidade da luz depois de passar pelo filtro polarizador

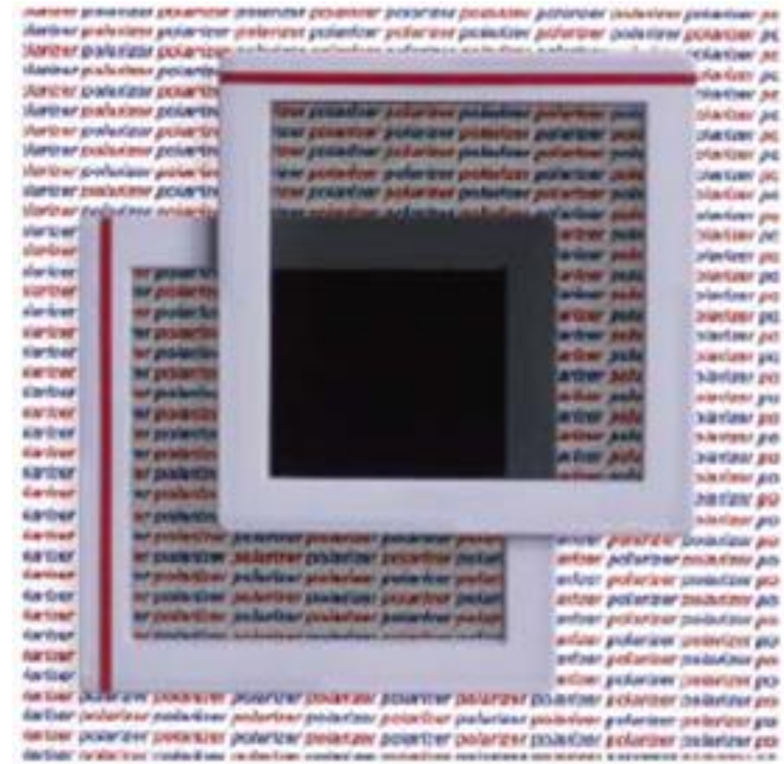
Em suma: quando um feixe de **luz polarizada** com intensidade inicial I_0 passa através de um filtro polarizador a intensidade da luz que emerge do filtro é

$$I = I_0\cos^2\theta\,. \qquad (33.38)$$

Regra do co-seno ao quadrado



Se as direções de polarização de dois filtros polarizadores são paralelas, toda luz que passa pelo primeiro filtro passa também pelo segundo.



Se as direções de polarização de dois filtros polarizadores são perpendiculares, não passa nenhuma luz pelo segundo filtro.

Exercícios sugeridos das seções 33.5, 33.6 e 33.7: 7, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43 e 44.

32) Na figura abaixo um feixe de luz **não-polarizada**, com uma intensidade de $43\,W/m^2$, atravessa um sistema composto por dois filtros polarizadores cujas direções fazem ângulos $\theta_1 = 70°$ e $\theta_2 = 90°$ com o eixo y. Qual é a intensidade da luz transmitida pelo sistema?

[Dica: $I = \frac{1}{2}I_0$ e $I = I_0\, cos^2\theta$]

Resposta: $I_2 = 19\,W/m^2$.