

FÍSICA IV

AULA 04: AS EQUAÇÕES DE MAXWELL; ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

TÓPICO 02: ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

Você sabia que a todo instante você está irradiando ondas eletromagnéticas? É a radiação infravermelha que você emite devido ao calor de seu corpo.

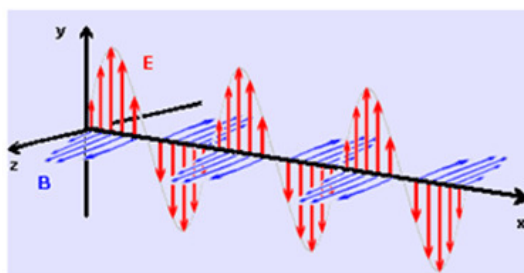
As ondas eletromagnéticas estão tão presentes em nossa vida, que vale a pena conhecer esse assunto tão interessante e de tão largas aplicações no nosso dia a dia.



PARADA OBRIGATÓRIA

Uma onda eletromagnética é uma perturbação que se propaga pelo espaço, como resultado das variações de campos elétricos e magnéticos. A variação de cada um dos campos dá origem ao outro, criando uma perturbação autossustentável.

A figura abaixo, que representa uma onda eletromagnética, nos mostra os campos elétrico e magnético perpendiculares entre si e, na simulação sugerida, vê-se a direção de propagação da onda eletromagnética perpendicular aos dois campos, uma característica de uma onda transversal.



Fonte: [1]



DICA

[Clique aqui \[2\]](#) para ver uma simulação de uma onda eletromagnética se propagando. Este aplicativo mostra as relações entre o campo elétrico e o campo magnético quando uma onda eletromagnética se propaga pelo espaço.

Qual é a conexão entre as ondas eletromagnéticas e as Equações de Maxwell, você pode estar se perguntando.

A solução das Equações de Maxwell, que está fora do escopo desta disciplina, mostra que os campos elétrico e magnético obedecem a uma equação que os caracteriza como uma onda, uma onda eletromagnética.



OLHANDO DE PERTO

A solução das equações de Maxwell descreve a radiação eletromagnética como uma onda transversal, isto é, uma onda que se propaga na direção perpendicular à vibração dos campos elétrico e magnético.

UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA PODE SE PROPAGAR NO VÁCUO

Como exemplo de ondas eletromagnéticas, podemos citar as ondas de rádio, as ondas de televisão, as ondas luminosas, as micro-ondas, os raios X e outras. Essas denominações são dadas de acordo com a fonte geradora dessas ondas e correspondem a diferentes faixas de frequências.



PARADA OBRIGATÓRIA

Todas as ondas eletromagnéticas têm a mesma velocidade no vácuo que vale aproximadamente **300.000 km/s**. Este é o maior valor de velocidade que a ciência conhece hoje.

A velocidade da onda no meio depende das propriedades elétricas e magnéticas do meio. Pode-se escrever a velocidade da onda assim:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}},$$

No vácuo temos

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$$



DICA

A velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo é representada pela letra *c*.

O símbolo *C* que representa a velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo, vem da palavra latina "celeritas", que significa "celeridade" ou "ligeireza".

$$c = 300.00 \text{ KM/S}$$



OLHANDO DE PERTO

Em uma onda eletromagnética não há partículas materiais vibrando.

As oscilações são dos campos elétrico e magnético.

Uma onda eletromagnética, como qualquer outra onda, transporta energia.

ENERGIA DA ONDA ELETROMAGNÉTICA

Quando você estava estudando os Capacitores em Física III, você foi apresentado ao conceito de densidade de energia. **APROVEITE PARA FAZER UMA REVISÃO DESSE ASSUNTO.**

Você viu que a densidade de energia, ou seja, a quantidade de energia armazenada em um volume do espaço aonde existe um campo elétrico é:

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

Se o meio for o vácuo, então teremos:

$$u_E = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2$$

onde ε_0 é a constante de permissividade elétrica do vácuo.

Se também está presente um campo magnético, como é o caso da onda eletromagnética, a energia deverá apresentar tanto a contribuição do campo elétrico quanto do magnético, portanto a densidade de energia, no vácuo é dada por:

$$u = u_E + u_B$$

$$u = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo.

Nasimulação da propagação da onda eletromagnética [3], você pode perceber que a onda se propaga pelo espaço “arrastando” os campos elétricos e magnéticos, isto é, os campos avançam se deslocando para uma região aonde antes eles não existiam. Isso significa que as energias associadas a estes campos devem se propagar pelo espaço da mesma maneira, o que implica em um fluxo de energia eletromagnética sendo transportado através de um volume qualquer.



PARADA OBRIGATÓRIA

O transporte de energia em uma onda eletromagnética é representado por uma entidade matemática denominada vetor de Poynting, \mathbf{S} , cujo módulo é igual à uma certa quantidade de energia propagada (dU) por unidade de área (A) por unidade de tempo (dt). O sentido do vetor \mathbf{S} estabelece o sentido da propagação da energia.

O vetor de Poynting pode ser interpretado com uma densidade de potência.

O vetor de Poynting :

$$S = \frac{dU}{A dt}$$

$$\frac{dU}{dt} = P \quad (\text{potência}) \quad \therefore$$

$$S = \frac{P}{A}$$

OLHANDO DE PERTO

O vetor de Poynting está relacionado com os campos elétrico e magnético e o seu módulo, considerando que os vetores campo elétrico e magnético são perpendiculares entre si, é dado por:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

O módulo do vetor de Poynting mede a intensidade de uma onda eletromagnética que passa por uma determinada área.

O nome vetor de Poynting é uma homenagem a John Henry Poynting [4] (1852 – 1914).

A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

A velocidade de propagação de uma onda eletromagnética depende das propriedades características do meio:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

No vácuo temos $c = 300.000$ km/s para todas as ondas eletromagnéticas.

Propagando-se em um meio qualquer que não o vácuo, as ondas eletromagnéticas podem interagir com os átomos e moléculas do meio. A interação da radiação eletromagnética com a matéria, por sua vez, depende da frequência da radiação incidente. Por exemplo, a luz visível que se propaga através do vidro e da água, não consegue passar através de uma folha de papelão. Já os raios X, de frequência muito mais alta, passariam com a maior facilidade através do papelão, mas seriam barrados por uma folha de chumbo. Isso significa que, ao se propagar entre diferentes meios a onda eletromagnética altera sua velocidade de propagação.

Em um meio qualquer a velocidade é dada por:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$

A relação entre a velocidade no vácuo e em um meio qualquer é dada por:

$$\left. \begin{array}{l} c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \\ v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{c}{v} = \frac{1/\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}{1/\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}$$
$$\frac{c}{v} = \frac{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = \sqrt{\frac{\epsilon \cdot \mu}{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

No estudo dos capacitores, em Física III (**NÃO DEIXE DE FAZER UMA REVISÃO**), foi definida a constante dielétrica de um meio, k :

$$k = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

A constante dielétrica, que é adimensional, também pode ser chamada de permissividade elétrica relativa: a permissividade do meio em relação ao vácuo.

Também podemos definir uma permeabilidade magnética relativa:

$$k_m = \frac{\mu}{\mu_0}$$

A velocidade da onda em um meio qualquer ficará:

$$\frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\epsilon \cdot \mu}{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = \sqrt{k \cdot k_m}$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{k \cdot k_m}}$$

Em geral a constante k_m é aproximadamente igual a 1, assim a velocidade fica dada como:

$$v = \frac{c}{\sqrt{k}}$$

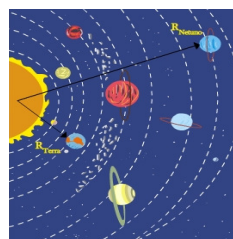
A velocidade de propagação da onda eletromagnética em um meio é **SEMPRE** menor do que c , a velocidade da onda no vácuo: constante dielétrica k é sempre maior do que 1, uma vez que a velocidade v é dada em termos de c por:

$$v = \frac{c}{\sqrt{k}}$$

Você sabe que no sistema solar, o planeta Mercúrio, por ser o mais próximo do Sol é também o mais quente, enquanto Netuno, por exemplo, que fica bem mais distante, é bem mais frio e a Terra tem a temperatura certa para abrigar a vida na forma que a conhecemos. O que as ondas eletromagnéticas têm a ver com isso?

POR QUE CHEGA MAIS ENERGIA DO SOL NA TERRA DO QUE EM NETUNO?

O vetor de Poynting explica porque a energia do Sol chega para nós na Terra com uma intensidade muito maior do que chega a Netuno, por exemplo.



INSTITUTO UNIVERSIDADE VIRTUAL

O sol emite ondas eletromagnéticas com uma potência P em todas as direções.

A intensidade (o módulo do vetor de Poynting)

é:

$$S = \frac{P}{A}$$

A área é dada por: $A = 4\pi R^2$.

As intensidades que chegam, respectivamente na Terra e em Netuno são dadas por:

$$S_{Terra} = \frac{P_{Sol}}{4\pi R_{Terra}^2} \quad e \quad S_{Netuno} = \frac{P_{Sol}}{4\pi R_{Netuno}^2}$$

Netuno está muito mais distante do Sol do que a Terra, portanto $R_{Netuno} > R_{Terra}$.

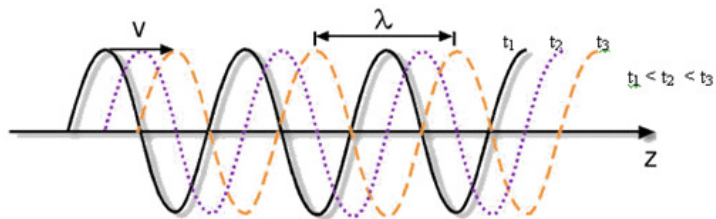
$$R_{Netuno} > R_{Terra} \Rightarrow S_{Netuno} < S_{Terra}$$

O que implica em uma menor intensidade de energia chegando em Netuno.

UMA ONDA UNIDIMENSIONAL

Uma onda se propagando em uma dimensão pode ser representada pela figura abaixo em que vemos a evolução no espaço e no tempo (três instantes diferentes) de uma onda harmônica. À medida que o tempo passa, a onda se propaga para a direita com velocidade constante v .

Se essa figura representar uma onda eletromagnética no vácuo, sua velocidade $v = c$.



Fonte [5]

Vale a pena relembrar os conceitos de amplitude, comprimento de onda, período, frequência e velocidade da onda que você aprendeu em Física II. **NÃO DEIXE DE FAZER UMA REVISÃO DESSE ASSUNTO**



CURIOSIDADE

VOCÊ SABIA?

As ondas eletromagnéticas podem vencer vários obstáculos físicos dependendo da sua frequência. A luz, por exemplo, não consegue atravessar uma parede, mas, atravessa facilmente a água, o ar atmosférico, um vidro transparente. Já uma onda de rádio pode atravessar uma parede e o raio-X atravessa o nosso corpo.



PARADA OBRIGATÓRIA

A frequência de uma onda não se altera quando ela se propaga de um meio para outro. A frequência depende apenas da fonte que deu origem à onda.

INTERFERÊNCIA DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS



Fonte [6]

POR FAVOR, DESLIGUE O SEU CELULAR.

Nos aviões uma das primeiras recomendações que recebemos é: **MANTENHA O SEU CELULAR DESLIGADO DURANTE O VOO.**

A explicação que embasa essa recomendação é o fenômeno da **INTERFERÊNCIA.**

INTERFERÊNCIA

O fenômeno de interferência é o resultado da superposição de duas ou mais ondas. A resultante é simplesmente a soma (algébrica) das amplitudes das ondas. O resultado pode ser um máximo de amplitude, o que caracteriza uma interferência construtiva, um mínimo de amplitude (pode ser inclusive zero) o que caracteriza uma interferência destrutiva ou valores intermediários de amplitude entre o máximo e o mínimo.

O estudo da interferência das ondas é muito importante para as telecomunicações, uma vez que este fenômeno é um dos responsáveis pelas limitações no tráfego de informações.

Em um avião, durante o voo, são muitas as comunicações necessárias entre os pilotos e os vários controles de aterrissagem, de tráfego aéreo, unidades de radar com informações sobre o clima, etc. Todas essas comunicações ocorrem com o uso das ondas eletromagnéticas que podem sofrer interferência com as ondas eletromagnéticas com as quais o aparelho de celular opera. Com a interferência, a recepção das mensagens entre o avião e torres de controles podem ser perturbadas de modo que as informações sejam deturpadas.



CURIOSIDADE

A partir da dissertação de mestrado desenvolvida pela tecnóloga em saúde Suzy Cristina Cabral, defendida na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da Unicamp, é bem provável que médicos e enfermeiros ou pelas pessoas que ingressam na Unidade de Terapia Intensiva (UTI) de um hospital para visitar um parente devam manter seus celulares desligados. De acordo com o estudo, pioneiro na área no Brasil, um dos poucos feitos na América Latina, as ondas eletromagnéticas emitidas pelos telefones móveis podem interferir no funcionamento dos equipamentos médicos, o que pode representar um risco aos pacientes. Para saber mais acesse:

Jornal da UNICAMP [7].

As ondas eletromagnéticas podem ser refletidas na superfície de um condutor (uma lâmina metálica polida) ou na superfície de um dielétrico (uma placa de vidro).



PARADA OBRIGATÓRIA

A superposição das ondas incidentes e refletidas forma uma onda estacionária.

Um forno de micro-ondas produz ondas estacionárias com comprimento de onda $\lambda = 12,2$ cm.

Como você aprendeu quando estudou ONDAS em Física II, uma onda estacionária tem pontos chamados nodos (ou nós), onde a amplitude é zero e pontos chamados antinodos (ou antinós), onde a amplitude é máxima. Cada nodo (antinodo) está separado do seu vizinho consecutivo por $\lambda/2$.

No caso do forno de micro-ondas, como $\lambda = 12,2$ cm, a distância entre os nodos é de 6,1. O alimento deve então girar durante a operação do forno. Se não girar, as partes do alimento que ficam sobre os nodos da onda, permanecerão frias já que nesses pontos a amplitude é zero.

DIFRAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

Difração: é o fenômeno que ocorre quando uma onda incide em um obstáculo e consegue ultrapassá-lo, contornando-o ou penetrando por alguma fenda e recompondo-se mais à frente. Esse fenômeno permite a recepção dos sinais de rádio e TV nas grandes cidades, apesar dos edifícios. As ondas eletromagnéticas podem contorná-los.



DICA

Para que você entenda bem esta aula sobre ondas eletromagnéticas é aconselhável que você reveja algumas ideias ligadas ao conceito de onda aprendidas em **FÍSICA II**.



MULTIMÍDIA

Entre neste site:

[Radio Waves & Electromagnetic Fields \[8\]](#) para ver uma simulação de uma onda de rádio, resultante da oscilação de uma carga elétrica, tal como ocorre nas antenas de TV, por exemplo. A simulação mostra as posições no transmissor e no receptor.

E neste [Microwaves \[9\]](#), você poderá ver uma simulação que mostra como o micro-ondas aquece o seu café. Ajuste a frequência e a amplitude das micro-ondas. Você verá as moléculas de água girando e saltando ao redor. A simulação exhibe o campo de micro-ondas como uma onda, uma única linha de vetores, ou todo o campo.

Procure a versão traduzida (Translated Versions).

FONTES DAS IMAGENS

1. http://to.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTGwffUobBf6Jk6zvkJEdD9mPC1t8zqdQNJ_9WHNnsSGydKOYAto_A
2. <http://www.phy.ntnu.edu.tw/oldjava/emWave/emWave-port.html>
3. <http://www.phy.ntnu.edu.tw/oldjava/emWave/emWave-port.html>
4. http://pt.wikipedia.org/wiki/John_Henry_Poynting
5. <http://cepa.if.usp.br/e-fisica/imagens/optica/universitario/cap04/figura42.gif>
6. <http://pindaibo.files.wordpress.com/2011/08/ceelular.jpg>
7. http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje/ju/julho2004/ju258pag5a.html
8. http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=Radio_Waves_and_Electromagnetic_Fields
9. <http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=Microwaves#versions>
10. <http://www.denso-wave.com/en/>

