

ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

Estamos imersos num mundo inteiramente ocupado, considerando-se especialmente a atmosfera até a superfície terrestre, por ondas. Elas existem em cada canto do nosso mundo e em diversos tipos. O nosso corpo é dotado de aparelhos sensoriais que transformam as ondas sonoras (ondas mecânicas) ao nosso redor em sensações auditivas. O mesmo acontece com os órgãos da visão. Ondas eletromagnéticas, preenchendo todo o espaço ao nosso redor, são convertidas em impulsos que, ao chegarem ao cérebro são transformados em algo que associamos às cores dos objetos. Os sentidos da visão e da audição estão, assim, relacionados à habilidade do sistema nervoso do homem, e dos animais em geral, de fazer uso de algumas ondas que nos cercam. Esse uso das ondas nos propicia, por exemplo, meios de comunicação e de orientação. Existem, no entanto, muitas outras ondas, além das eletromagnéticas e sonoras.

O QUE SÃO ONDAS?

Define-se uma onda como uma perturbação que atravesse um determinado meio. As ondas mecânicas exigem um meio material (um metal, por exemplo) para se propagarem. As ondas eletromagnéticas no entanto, não requerem a existência de um tal meio para se propagarem. Ou seja, elas se propagam no vácuo.

Um pulso, ou uma perturbação, que se propague na direção do eixo x , e no sentido positivo do eixo (coordenadas crescentes com o tempo), pode ser representada por uma função f de x e t (o perfil da onda), que depende da coordenada x e do tempo, da seguinte forma:

$$f(x,t) = f(x - vt)$$

1

Onde v é uma constante que corresponde à velocidade de propagação da onda. A velocidade de propagação depende das propriedades do meio no qual esta se propaga. Por exemplo, uma onda numa corda tem uma velocidade que é dada por:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

2

Onde μ é densidade linear de massa da corda e T é a tensão (força tensora) à qual a corda está submetida.

Um pulso, ou uma perturbação, que se propague na direção do eixo x, mas no sentido negativo do eixo (coordenadas decrescentes), com um perfil descrito pela função g, é descrito pela função de x e t

$$g(x,t) = g(x+vt)$$

3

As funções f e g são aquelas adequadas para descrever o perfil da onda considerada. Um exemplo simples de uma onda é aquela que podemos produzir acionando a extremidade de uma corda presa, por uma das extremidades, a uma parede.

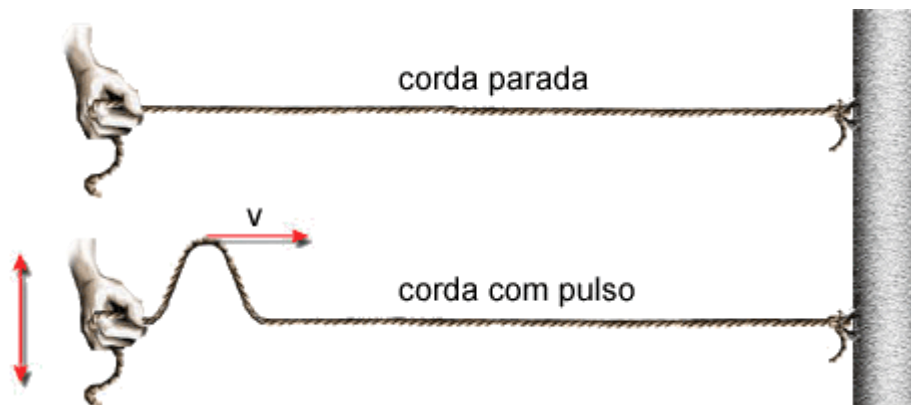


Fig. 1 - Ilustração de um pulso propagando-se numa corda.

ONDAS HARMONICAS

As ondas harmônicas se constituem num tipo mui especial de ondas. Elas são caracterizadas por uma função que descreve o perfil da onda da forma seno ou coseno. Ou seja, para uma onda harmonica escrevemos:

$$f(x-vt) = A \cos(k(x-vt)) \quad [A \sin(k(x-vt))] \quad 4$$

Onde A na equação acima é a amplitude da onda, pois é o máximo da função f, e k é uma constante que caracteriza a onda harmônica e que é conhecida pelo estranho nome de vetor de onda. Uma outra forma de escrever a expressão acima, e que é bastante comum, é:

$$f(x-vt) = A \cos(kx - \omega t) \quad [A \sin(kx - \omega t)] \quad 5$$

A expressão acima parece introduzir uma nova constante para descrever a onda (a constante ω). Esse, no entanto, não é o caso uma vez que comparando (00) e (00) concluímos que essa constante é dada por:

$$\boxed{kv = \omega} \quad 6$$

Numa onda harmônica é usual representar o seu perfil através da função exponencial com argumento puramente imaginário. Ou seja, representamos a onda pela função

$$f(x-vt) = Ae^{i(kx - \omega t)} \quad 7$$

A expressão (000) é apenas uma forma econômica de representar tanto a função seno quanto a função coseno, Isso porque a seguinte indentidade é válida para números complexos:

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta \quad 8$$

Tomando-se a parte real ou a parte imaginária de (1.7) teremos as ondas harmônicas da expressão (000).

O que é notável, observando-se (1.5) é que uma onda harmonica tem um perfil que se repete no espaço e no tempo. Isso decorre do fato de que, depois de um intervalo de tempo T conhecido como o período da onda harmônica, dado por:

$$\omega T = 2\pi$$

9

a onda se torna indistinguível da onda inicial.

Portanto, de (000) e de (000), segue que o período é dado , em função de k e v por

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{kv}$$

10

Define-se a frequência (ν) da onda como o inverso do período:

$$\nu \equiv \frac{1}{T} = \frac{kv}{2\pi}$$

11

A unidade de frequência mais utilizada para ondas em geral, é o Hertz, definido como o inverso do segundo.

Depois de percorrido um intervalo de distancia, no espaço, denominado de um comprimento de onda(aqui representado pela letra λ) a onda se torna indistinguível daquela de quando se iniciou o percurso. Isso ocorre para valores de λ tais que:

$$k\lambda = 2\pi$$

12

Assim, o comprimento do onda nada mais é do que a distancia entre, por exemplo, dois máximos da onda (vide figura).

De () e ()), nota-se que existe uma relação bem simples entre a velocidade da onda, a frequência e comprimento de onda:

$$v = \lambda \nu$$

13

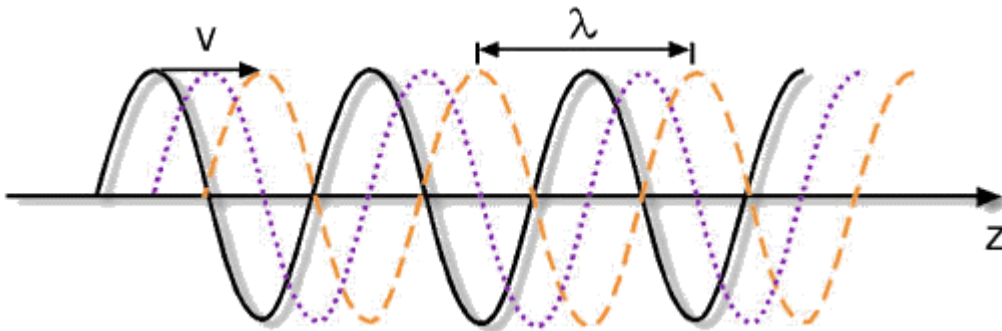


Fig 2 comprimento de onda

EQUAÇÃO DAS ONDAS

Do ponto de vista formal pode-se definir uma onda, ou melhor uma onda linear, como uma solução da equação das ondas. Essa equação é linear, e de segunda ordem nas derivadas com respeito às coordenadas do espaço e do tempo. Para ondas se propagando ao longo do eixo x , tal equação se escreve:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} \quad 14$$

Onde o parâmetro v aparecendo na equação acima é a velocidade de propagação da onda no meio.

O fato da equação das ondas ser linear, significa apenas que se u_1 e u_2 forem soluções da equação de ondas então uma combinação linear das duas soluções também o será. Isto é, a combinação de soluções :

$$u(x,t) = a_1 u_1(x,t) + a_2 u_2(x,t) \quad 15$$

Também é uma solução. Em particular a soma de duas soluções envolvendo ondas se propagando em direções opostas também é uma solução da equação de ondas, e portanto é, igualmente, um onda:

$$u(x, t) = f(x - vt) + g(x + vt) \quad 16$$

Nem todas as ondas são ondas lineares, Essas ondas são apenas as mais simples e que, além disso, são de grande interesse em várias aplicações.

Para uma onda se propagando no espaço tridimensional a equação das ondas se escreve como:

$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} \quad 17$$

As ondas acima são ditas ondas escalares. No eletromagnetismo estudaremos ondas vetoriais.

ONDAS PLANAS

O análogo, em três dimensões, de uma onda harmônica que se propaga ao longo do eixo x (vide equação (5)), è:

$$f(\vec{r}, t) = Ae^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad 18$$

Onde \vec{k} è o vetor de onda, e A è a amplitude da onda.

A expressão (18) descreve uma onda que se propaga na direção dada pelo vetor \vec{k} . Uma onda que se propague no sentido oposto será escrita como:

$$f(\vec{r}, t) = Ae^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} + \omega t)} \quad 19$$

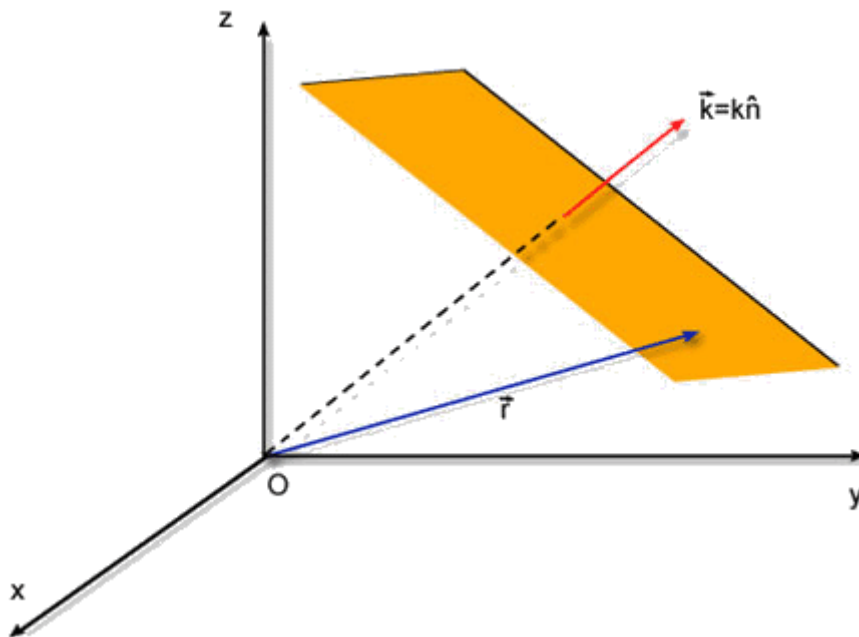
Tendo em vista que o lugar geométrico dos pontos para os quais

$$\vec{k} \cdot \vec{r} = \text{constante}$$

20

é um plano, denomina-se uma onda da forma IIIIII, como uma onda plana.

A característica mais notável de uma onda plana é que sua fase é a mesma para cada superfície plana, dada pela expressão (999) Vide figura abaixo.



Uma onda plana tem a mesma amplitude ao longo de uma superfície plana, ortogonal ao vetor de onda.

Para uma onda plana vale, substituindo-se a solução (III) em (I), a seguinte relação:

$$\vec{k}^2 = \frac{\omega^2}{v^2},$$

que é uma relação análoga a (0000), mas para 3 dimensões.

ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

James Clerk Maxwell deu a mais significativa contribuição à ciência do eletromagnetismo. Em 1864 Maxwell sugeriu que se pode encontrar a descrição de todos os fenômenos eletromagnéticos a partir das soluções de um conjunto de 4 equações a derivadas parciais de primeira ordem no tempo e no espaço. Essas equações são hoje conhecidas como as Equações de Maxwell. Elas são equações para os campos elétricos e magnéticos uma vez conhecidas as distribuições das cargas elétricas e das correntes.

Maxwell foi um pouco mais além da fenomenologia do eletromagnetismo conhecido àquela época e acrescentou um novo termo a uma das equações, termo esse conhecido como a corrente de deslocamento. Esse novo termo, a corrente de deslocamento é tal que prevê o surgimento de um campo magnético pelo mero fato do campo elétrico variar com o tempo. Ou seja, um campo elétrico variável tem o mesmo papel que uma corrente elétrica. A análise de Maxwell lhe permitiu concluir que:

The agreement of the results seems to show that light and magnetism are affections of the same substance, and that light is an electromagnetic disturbance propagated through the field according to electromagnetic laws.

Dessa forma Maxwell percebeu que a descrição dos fenômenos associados à luz podem ser entendidos a partir do eletromagnetismo. Deu-se assim o que denominamos hoje de unificação do eletromagnetismo com a óptica.

Levando-se em conta a existência da corrente de deslocamento, pode-se mostrar, utilizando-se de manipulações não muito complexas, que as equações de Maxwell no espaço podem ser escritas sob a forma:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}(x, y, z, t)}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}(x, y, z, t)}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 \vec{H}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}(x, y, z, t)}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}(x, y, z, t)}{\partial t^2}$$

e, portanto, os campos elétrico e magnético podem se propagar como ondas no espaço . Os campos são os componentes da onda. A razão para a sua propagação mesmo no vácuo tem a haver com o fenômeno da indução no eletromagnetismo. Um campo elétrico variando com o tempo induz um campo magnético variando com o tempo e esse último ao variar induz um campo elétrico variando com o tempo e assim sucessivamente ,

Tais ondas recebem o nome de ondas eletromagnéticas. Sua velocidade de propagação é dada por:

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

Onde μ e ε estão associadas a propriedades magnéticas (μ) e elétricas (ε) do meio. São as constantes denominadas de permeabilidade magnética e permitividade elétrica do meio. As ondas eletromagnéticas têm, portanto, uma velocidade de propagação que depende das propriedades eletromagnéticas do meio.

Ondas eletromagnéticas transportam energia e momento os quais são transferidos á matéria quando essas ondas interagem com ela.

Uma onda eletromagnética harmonica plana é também uma onda monocromática. Isto é uma onda com uma frequência bem definida. Uma onda eletromagnética monocromática é descrita pelos campos:

$$\vec{E}(r,t) = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r} - \omega t)}$$

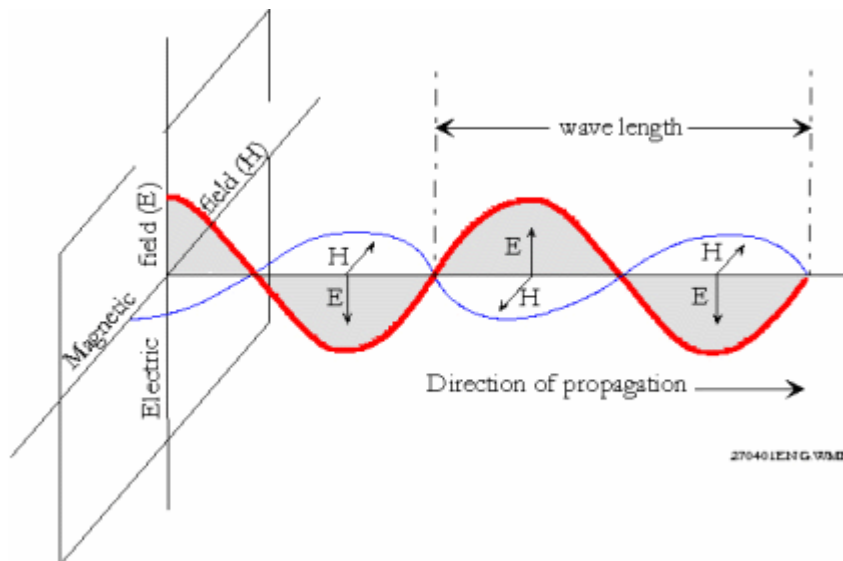
$$\vec{B}(r,t) = \vec{B}_0 e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r} - \omega t)}$$

Onde \vec{E}_0 e \vec{B}_0 são as amplitudes dos campos elétrico e magnético, respectivamente.

ONDAS TRANSVERSAIS

Considerando-se a direção de propagação em relação à direção na qual a onda oscila, pode-se classificar em dois tipos de ondas : Ondas Longitudinais e Ondas Transversais. Nas ondas longitudinais, as ondas oscilam na mesma direção de propagação da onda. As ondas Transversais são aquelas para as quais as oscilações ocorrem numa direção que é ortogonal à direção de propagação da onda.

Utilizando-nos das equações de Maxwell, podemos provar que as ondas eletromagnéticas são ondas transversais. Isto é enquanto as onda se propagam, por exemplo, ao longo do eixo x os campos elétricos e magnéticos oscilam ao longo do plano y-z que é um plano perpendicular a essa direção . Vide figura (000).



A partir das equações de Maxwell, e das soluções propostas acima, pode-se verificar que os vetores \vec{E}_0 e \vec{B}_0 e \vec{k} são perpendiculares entre si. Isto é:

$$\vec{E}_0 \cdot \vec{B}_0 = 0, \quad \vec{E}_0 \cdot \vec{k} = 0, \quad \vec{B}_0 \cdot \vec{k} = 0$$

Assim, um aspecto importante a respeito das ondas eletromagnéticas harmônicas, é que o campo elétrico oscila numa direção que é ortogonal à direção na qual oscila o campo magnético. Ou seja, as ondas eletromagnéticas são ondas transversais.

POLARIZAÇÃO

Polarização de uma onda eletromagnética diz respeito ao comportamento da direção dos campos elétricos e magnéticos quando analisado num plano perpendicular ao sentido de propagação da onda. As ondas eletromagnéticas podem ser polarizadas de três formas distintas: polarização plana, circular e elíptica.

Para ilustrarmos isso, consideremos uma onda eletromagnética se propagando na direção do eixo z. Nesse caso, podemos escrever o campo elétrico associado a uma onda plana, num determinado instante de tempo, em termos de duas componentes no plano de oscilação, o qual tomaremos como o plano x-y. Assim, sem perda de generalidade, podemos escrever o campo elétrico da seguinte forma:

$$\vec{E} = (\vec{i}E_x + \vec{j}E_y)e^{i(kz - \omega t)}$$

A figura () apresenta uma situação típica de campos elétricos e magnéticos se propagando no espaço.

Não nos preocuparemos com o Campo magnético, uma vez que ele pode ser obtido a partir do campo elétrico através da expressão:

$$\vec{B} = \frac{1}{c} \frac{\vec{k}}{\omega} \times \vec{E}$$

Na situação mais geral, e fazendo uso da representação dos campos em termos de números complexos, as componentes E_y e E_x podem ter uma parte real e uma parte imaginária.

Assim escrevemos o campo em termos de componentes complexas.

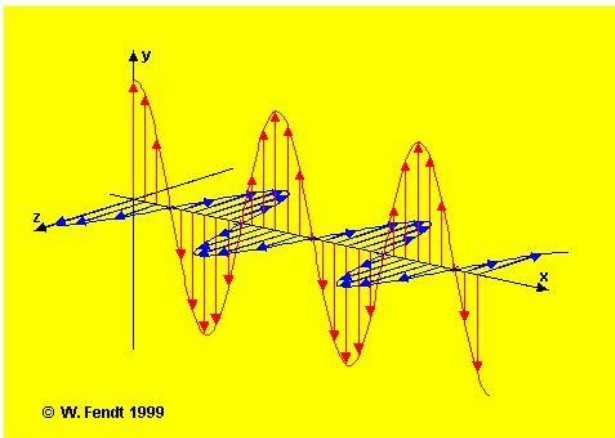
$$\vec{E} = (\vec{i}E_x e^{i\delta_x} + \vec{j}E_y e^{i\delta_y})e^{i(kz - \omega t)}$$

Como uma das fases (aquela da componente y, por exemplo) pode ser incorporada como a fase do campo como um todo,

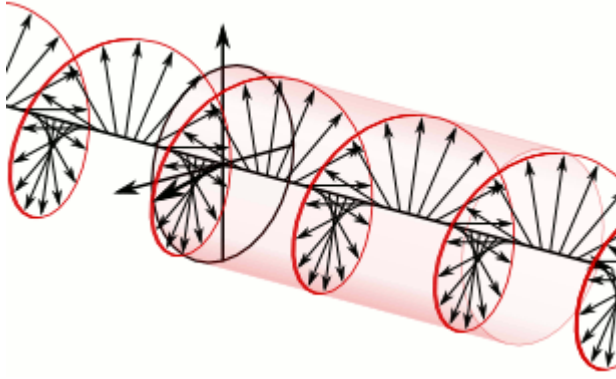
$$\vec{E} = \left(\vec{i}E_x e^{i(\delta_x - \delta_y)} + \vec{j}E_y \right) e^{i(kz - \omega t + \delta_y)}$$

De (000) vemos que o que realmente importa é a diferença de fase entre as componentes E_y e E_x .

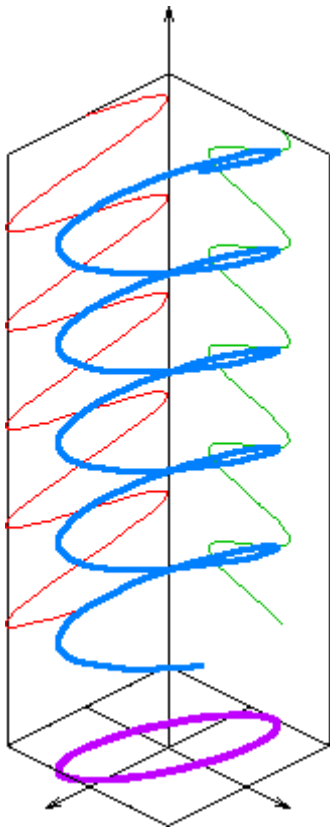
Uma onda é dita **plano polarizada**, o campo elétrico oscila sempre num plano. O mesmo ocorrerá, naturalmente, com o campo magnético. Ele oscilará nesse caso num outro plano perpendicular ao plano de oscilações do campo elétrico. Esses dois planos contém as possíveis direções do campo elétrico (e do campo magnético) e da direção de propagação da onda. A condição para que isso ocorra é que não haja diferença de fase entre as componentes do campo elétrico $(\delta_x - \delta_y) = 0$.



Se a diferença de fase for tal que $(\delta_x - \delta_y) = \pm\pi$ a onda eletromagnética é **circularmente polarizada**. Uma onda circularmente polarizada é tal que à medida em que a onda se propaga, o campo elétrico executará um movimento tal que, observando-se o seu comportamento a partir do plano perpendicular ao movimento, seu movimento será semelhante àquele do movimento circular uniforme.



Uma onda exibe uma **polarização elíptica** se a diferença de fase for diferente dos casos anteriores. O campo elétrico descreverá um movimento elíptico quando observado levando-se em conta um plano perpendicular ao movimento.



TRANSPORTE DE ENERGIA

Ondas eletromagnéticas transportam energia e momento os quais são transferidos à matéria quando essas ondas interagem com ela. A taxa com que a energia é transportada pode ser determinada por uma grandeza física denominada Vetor de Poynting vetor esse designado pela letra \vec{S} . Ele é definido por:

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

A quantidade de energia por unidade de tempo que atravessa uma superfície é dada pelo fluxo do vetor de Poynting através da mesma. Assim, a taxa com que energia eletromagnética passa por uma superfície de área A é dada por:

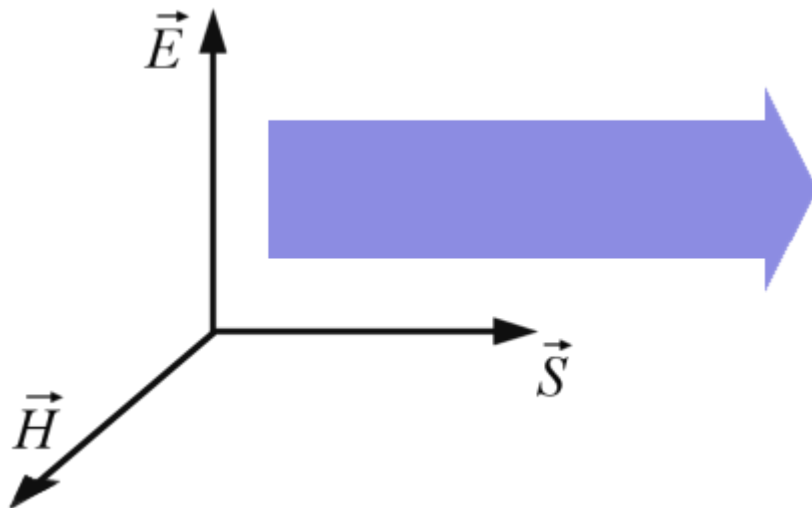
$$\frac{d}{dt}(E) = \iint_A \vec{S} \cdot d\vec{A} = \Phi_{\vec{S}}$$

O fluxo do vetor de Poynting, $\Phi_{\vec{S}}$, dá o quanto de energia, por unidade de tempo, flui através da superfície.

No caso de um volume delimitado por uma superfície fechada o fluxo se refere a quanto de energia eletromagnética, por unidade de tempo, saiu (ou entrou) pela superfície, Tanto pode ser a quantidade que sai (como estamos admitindo) como a quantidade que entra. Dessa forma escrevemos:

$$\frac{d}{dt}(E_{\text{saiu}}) = \oiint_A \vec{S} \cdot d\vec{A}$$

Se não houve dispêndio ou produção de energia eletromagnética no espaço delimitado pela superfície, então a energia eletromagnética no mesmo se mantém constante.



SUPERPOSIÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

A superposição de duas ondas gera uma nova onda. A superposição de duas ondas monocromáticas não é uma onda monocromática. Para a superposição de ondas monocromáticas escrevemos:

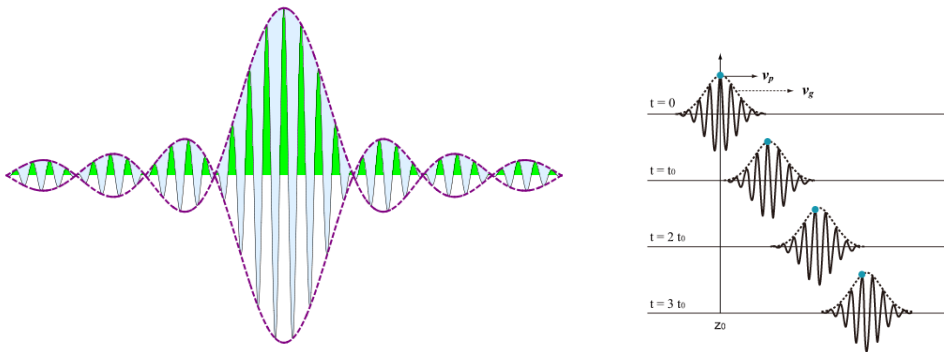
$$\vec{E}(r,t) = \sum_i \vec{E}_{i0} e^{i(\vec{k}_i \cdot \vec{r} - \omega_i t)}$$

$$\vec{B}(r,t) = \sum_i \vec{B}_{i0} e^{i(\vec{k}_i \cdot \vec{r} - \omega_i t)}$$

Para a superposição de um número muito grande de ondas, que se aproxime de um contínuo, substituímos a soma por uma integral sobre as frequências, isto é:

$$\vec{E}(r,t) = \int \vec{E}_0(\omega) e^{i(\vec{k}(\omega) \cdot \vec{r} - \omega t)} d\omega$$

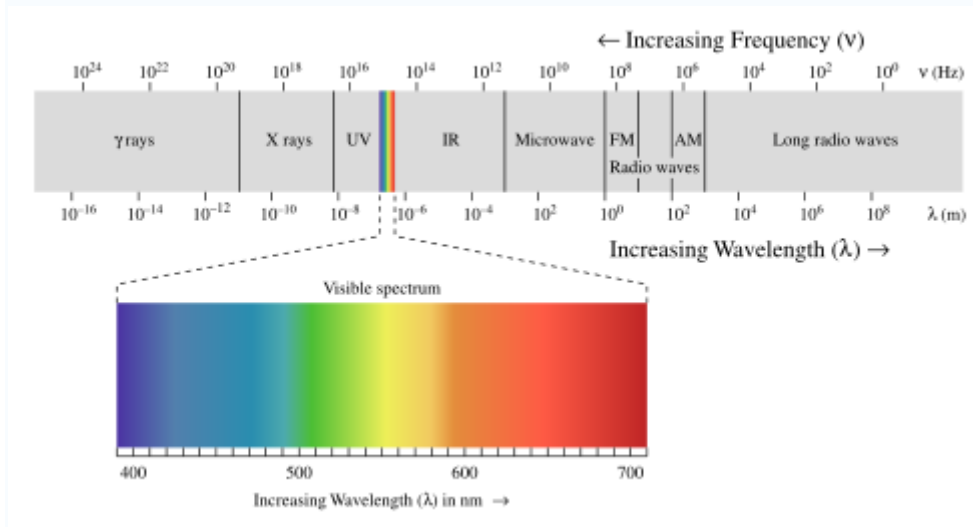
$$\vec{B}(r,t) = \int \vec{B}_0(\omega) e^{i(\vec{k}(\omega) \cdot \vec{r} - \omega t)} d\omega$$



O ESPECTRO ELETROMAGNETICO

As ondas eletromagnéticas foram previstas pela primeira vez por Maxwell e observadas por Heinrich Hertz. Como as demais ondas, as ondas eletromagnéticas podem ser caracterizadas pela frequência ou, equivalentemente, pelo seu comprimento de onda. O conjunto de frequências define o espectro da radiação.

Denominamos de luz a uma parte do espectro eletromagnético. São as ondas eletromagnéticas cujos comprimentos de onda estão compreendidos no intervalo entre 400 e 700 nm (nanômetros). A luz visível é, assim, apenas uma onda eletromagnética. Outros tipos, são igualmente importantes



Ondas de Rádio São as de menor frequência dentro do espectro eletromagnético. Parte desse espectro é utilizado para comunicações em geral (via rádio e celulares). As estações de rádio FM operam num domínio de frequências próximo de 10^8 Hz. As estações de rádio AM operam em frequências próximas de 10^6 Hz. Ondas de rádio têm frequência de até 300 MHz (megahertz).

Microondas É um subconjunto das ondas de rádio. Têm frequências compreendidas no intervalo entre 300 MHz e 300 GHz. As microondas tem três características importantes que definem a sua utilidade na fabricação de fornos de microondas: elas são absorvidas pelos alimentos em geral, elas são refletidas por metais e conseguem atravessar uma gama bem grande de materiais que usamos como embalagens de alimentos (vidro, papel, plástico, etc)

As microondas têm utilizações industriais. São utilizadas em radares da polícia rodoviária e em comunicações,

Radiação infravermelha São as ondas com frequências próximas do espectro visível. Possui frequências abaixo da luz visível de tom avermelhado. O comprimento de onda estaria no domínio entre 700 nm e 1mm.

Existem muitas aplicações para a radiação infravermelha. Mais recentemente ela tem sido utilizada em equipamentos para visão noturna, quando não há luz suficiente. Um corpo (como o corpo humano) a $37^{\circ}C$ emite radiação eletromagnética na região infravermelha. Assim basta detectar a radiação emitida e traduzi-la em termos de imagens numa tela. Objetos mais quentes aparecendo com tons diferentes de objetos mais frios

Radiação infravermelha é também utilizada em redes sem fio e aquecimento de objetos (como retirar gelo das asas de um avião antes da decolagem).

Radiação ultravioleta Também são ondas com frequências próximas do espectro visível mas na outra extremidade do espectro em relação ao vermelho. A frequência dessa radiação está acima daquela associada à luz visível de tom violeta.

A utilidade dos raios ultravioletas se faz sentir quando vamos à praia. O corpo fica bronzeado como uma reação natural, fisiológica, à exposição da pele à radiação ultravioleta proveniente do Sol. Como resposta contra a radiação ultravioleta, o corpo produz a melanina. Essa substância dá a tão apreciada coloração ao corpo humano. Desnecessário dizer que exposição excessiva à radiação UV podem acarretar consequências desastrosas do ponto de vista da saúde humana. A pele, os olhos e o sistema imune podem ter problemas agudos e às vezes crônicos..

Lampadas ultravioletas podem ser utilizadas para esterelizar ferramentas em hospitais e laboratórios. Radiação UV pode ser útil no processo de pasteurização de sucos de fruta.

Raios-x é a radiação cujos fótons que a compõem têm a energia das mais altas. Estão abaixo apenas dos raios γ . O comprimento de onda dessa radiação está dentro do domínio de valores entre 10 e 0,01 nm.

Os raios-z são parte do conjunto de radiações ditas ionizantes. Representam, portanto risco à saúde. Radiação ionizante é todo tipo de partícula (ou onda) capaz de ionizar átomos e moléculas. Radiação alfa, beta ou gama são exemplos de radiação ionizante.

Raios-x são empregados na área médica (diagnósticos), na área científica (cristalografia), e na construção civil..



Raios- γ São as ondas de maior frequência do espectro eletromagnético. Elas são compostas por fótons de maior energia. Assim, ela é capaz de ionizar quase todos os átomo e moléculas. Representam altíssimo risco para a saúde.