

2. Ondas Eletromagnéticas

1: [A equação de ondas](#)

A equação de ondas

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.

Num meio dielétrico livre de cargas e correntes, as equações de Maxwell são:

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{H} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

(1.1)

Maxwell foi um pouco mais além da fenomenologia do eletromagnetismo conhecido naquela época e acrescentou um novo termo a uma das equações, termo esse conhecido como a corrente de deslocamento (o termo no lado direito da última equação). 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 veremos a seguir que, utilizando-se de manipulações não muito complexas, as equações de Maxwell no espaço podem ser escritas sob a forma da equação de ondas. Tomamos primeiramente o rotacional das equações (1.1). Obtemos:

$$\begin{aligned}\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) &= -\frac{\partial (\nabla \times \vec{B})}{\partial t} \\ \nabla \times (\nabla \times \vec{H}) &= -\frac{\partial \nabla \times \vec{D}}{\partial t}\end{aligned}\tag{1.2}$$

Lembrando a identidade vetorial, válida para qualquer vetor

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\nabla^2 \vec{E} + \nabla (\nabla \cdot \vec{E})\tag{1.3}$$

E lembrando as relações:

$$\begin{aligned}\vec{B} &= \mu \vec{H} \\ \vec{D} &= \epsilon \vec{E}\end{aligned}\tag{1.4}$$

Bem como que os divergentes dos campos são nulos, concluímos que tanto o campo elétrico como o campo magnético satisfazem a equação de ondas, a saber:

$$\nabla^2 \vec{E} = \epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

(1.5)

Explicitamente, escrevemos:

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

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

(1.6)

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:

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

(1.7)

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 à matéria quando essas ondas interagem com ela.

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

$$\begin{aligned}\vec{E}(r,t) &= \vec{E}_0 e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t)} \\ \vec{B}(r,t) &= \vec{B}_0 e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t)}\end{aligned}\tag{1.8}$$

Onde \vec{E}_0 e \vec{B}_0 são as amplitudes dos campos elétrico e magnético, respectivamente. Substituindo-se as soluções propostas acima nas equações (1.6) obtemos a relação usual entre o vetor de onda e a frequência angular:

$$k^2 = v^2 \omega^2\tag{1.9}$$

2: [Ondas Transversais](#)

Ondas Transversais

Podem-se classificar as ondas em duas grandes categorias quanto à direção de propagação em relação à direção na qual a onda oscila. Quanto a esse aspecto temos dois tipos de ondas: Ondas Longitudinais e Ondas Transversais. Nas ondas longitudinais, as ondas oscilam nas mesmas direções 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.

Vamos demonstrar 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 abaixo. Para demonstramos isso substituiremos as soluções (1.8) em (1.1). Obtemos que

$$\vec{E}_0 \cdot \vec{k} = 0, \quad \vec{B}_0 \cdot \vec{k} = 0 \quad \text{e} \quad \vec{B} = \frac{\vec{k} \times \vec{E}}{\omega}$$

(1.10)

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.

Conclui-se portanto, que

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

(1.11)

Ou seja, os campos são perpendiculares entre si e perpendiculares à direção de propagação da onda.

3: [Polarização](#)

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 duas formas distintas.

No caso de uma onda 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 contêm as possíveis direções do campo elétrico (e do campo magnético) e da direção de propagação da onda.

Uma onda circularmente polarizada é tal que á 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 aquele do movimento circular uniforme.

4: [Superposição de Ondas Electromagnéticas](#)

Superposição de Ondas Electromagnéticas

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:

$$\begin{aligned}\vec{E}(r, t) &= \sum_i \vec{E}_{i0} e^{i(\vec{k}_i \cdot \vec{r} - \omega_i t)} \\ \vec{B}(r, t) &= \sum_i \vec{B}_{i0} e^{i(\vec{k}_i \cdot \vec{r} - \omega_i t)}\end{aligned}\tag{1.12}$$

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:

$$\begin{aligned}\vec{E}(r, t) &= \int \vec{E}_0(\omega) e^{i(\vec{k}(\omega) \cdot \vec{r} - \omega t)} \\ \vec{B}(r, t) &= \int \vec{B}_0(\omega) e^{i(\vec{k}(\omega) \cdot \vec{r} - \omega t)}\end{aligned}\tag{1.13}$$

5: [Conclusão](#)

Conclusão

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 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 Hz. As estações de rádio AM operam em frequências próximas de 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 têm 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 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.

Lâmpadas ultravioletas podem ser utilizadas para esterilizar 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-x são parte do conjunto de radiações ditas ionizantes. Representam, portanto risco à saúde. Radiação ionizante é todo tipo de partícula (o onda) capaz de ionizar átomos e moléculas. Radiação alfa, beta ou gama são exemplos de radiação ionizante.

Raios-x são empregados na área médica (diagnóstico, 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 átomos e moléculas. Representam altíssimo risco para a saúde.