

**Instituto de Física**

**Licenciatura Noturna de Física**



**PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO DE FINAL DE CURSO**

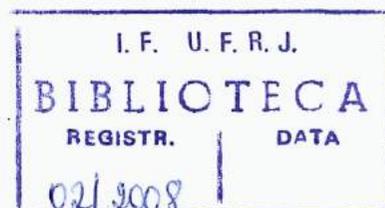
**MEDIDA DA VELOCIDADE DA LUZ USANDO  
UM FORNO DE MICROONDAS**

**Aluno: Artur Nogueira Gomes**

**Orientador: Prof. Adir Moysés Luiz**

**ABRIL DE 2008**

**02/2008**



## RESUMO

Ensinar ondas eletromagnéticas, e seu vasto espectro, no Ensino Médio sempre foi uma tarefa difícil para a maioria dos professores, devido à grande dificuldade de experimentá-las em sala de aula. Quando possível experimentá-las com um circuito ressonante, fica muito complicado fazer com que o aluno aceite que a luz visível se comporta como uma onda eletromagnética, já que ela não pode ser gerada por este circuito. Os aspectos históricos sempre são importantes para uma compreensão mais abrangente do assunto, assim como a análise superficial das equações de Maxwell e a equação de onda, mas neste nível, é de extrema necessidade para o aluno uma forma menos abstrata e de matemática mais simples para a compreensão. O objetivo deste trabalho é demonstrar experimentalmente, utilizando um forno de microondas, que podemos marcar, numa barra de chocolates, a metade do comprimento de onda da microonda que fica confinada na cavidade do forno. Utilizando a equação fundamental do movimento de ondas harmônicas é possível chegar a um resultado aproximado da velocidade de propagação desta microonda, pois sua frequência é conhecida e obtida através da especificação do forno. O aluno pode assim perceber a relação entre a luz e uma onda eletromagnética comparando o valor da velocidade de propagação de ambas. O texto pode ser útil também para alunos de licenciatura em física, pois abrange, de modo superficial, as equações de Maxwell, o processo de geração de ondas eletromagnéticas e, em particular, as microondas.

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO 2: BASES TEÓRICAS DO ELETROMAGNETISMO PARA O ENSINO MÉDIO .....	3
2.1. Resumo Histórico .....	3
2.2. Lei de Gauss – Caso Eletrostático .....	10
2.3. Lei de Gauss – Caso Magnetostático .....	11
2.4. Lei de Faraday .....	11
2.5. Lei de Ampère .....	12
CAPÍTULO 3: ONDAS ELETROMAGNÉTICAS .....	13
3.1. Microondas .....	17
3.2. Geração de Ondas Eletromagnéticas .....	18
3.3. Geração de Microondas .....	20
3.4. O Magnetron .....	22
3.5. O Forno de Microondas .....	23
3.6. Aquecimento de Alimentos .....	24
CAPÍTULO 4: MEDIDA DA VELOCIDADE DA LUZ USANDO UM FORNO DE MICROONDAS .....	26
4.1. Câmara de Ressonância .....	27
4.2. A Barra de Chocolate .....	28
4.3. Análise de Dados .....	30
CAPÍTULO 5: COMENTÁRIOS FINAIS .....	32
APÊNDICE: AS EQUAÇÕES DE MAXWELL E A EQUAÇÃO DE ONDA .....	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	44

## CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

As ondas eletromagnéticas foram descobertas teoricamente através das grandiosas equações de James Maxwell, por volta de 1861. Elas foram experimentalmente comprovadas, em torno de 1887, por Heirinch Hertz. As aplicações tecnológicas modernas do espectro eletromagnético são hoje fruto do trabalho de inúmeros cientistas que colaboraram com a grande descoberta de Maxwell. As ondas de rádio, TV, telefonia móvel, os radares, GPS, os raios X, os raios gama, o forno de microondas são apenas alguns exemplos da variedade de aparelhos que possuem em seu funcionamento básico ondas eletromagnéticas.

A proposta deste trabalho é apresentar de uma maneira alternativa, para alunos do terceiro ano do Ensino Médio, a obtenção da velocidade de propagação da luz através de um experimento com um forno de microondas. A idéia surgiu quando fui abordado por um aluno desta série. Ele indagou sobre a existência de ondas eletromagnéticas e após toda exposição da teoria, dos fatos históricos, experimentos realizados, o mesmo não conseguiu perceber esta ligação entre onda e luz. De acordo com os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio [1], no ensino de Física não se trata de elaborar novas listas de conteúdo e sim de dar novas dimensões de modo a promover um conhecimento contextualizado e integrado à vida de cada jovem apresentando-o, por exemplo, as radiações presentes no dia-a-dia.

Sabe-se que a luz visível está presente numa pequena faixa do espectro eletromagnético e que toda onda possui velocidade de propagação dependente apenas do meio onde propaga. Através do experimento podemos vincular o resultado obtido com a velocidade da luz visível possibilitando um caminho para a compreensão do aluno. As microondas geradas no forno serão utilizadas para obtenção do valor da velocidade de propagação da onda eletromagnética, pois estas irão marcar uma barra de chocolate colocada na câmara do forno, que funciona como câmara ressonante. Este experimento é bastante simples e de fácil compreensão, que facilita sua aplicação no ensino médio.

Não faremos uma demonstração das fórmulas básicas do eletromagnetismo. Elas serão tratadas inicialmente de uma maneira descritiva, buscando uma possível compreensão das mesmas pelos alunos do Ensino Médio. Embora algumas dessas

fórmulas não estejam adaptadas a este nível, é interessante apresentá-las para que o texto desta monografia possa ser útil aos alunos da licenciatura em Física.

O primeiro capítulo trata, de um modo geral, das aplicações das ondas eletromagnéticas e uma proposta para introdução do assunto no terceiro ano do Ensino Médio. No capítulo 2 apresentaremos uma base teórica para desenvolvermos o eletromagnetismo. Será feito um breve histórico da origem do eletromagnetismo e, a seguir, serão tratados fenômenos elétricos e magnéticos verificados na Grécia antiga e as contribuições dos cientistas. As leis de Gauss, Faraday e Ampère são enunciadas de um modo compatível com o Ensino Médio. No capítulo 3 serão descritas teoricamente as ondas eletromagnéticas, a sua geração até o caso particular das microondas. A geração das microondas pelo magnetron e o aquecimento dos alimentos também serão apresentados neste capítulo. No capítulo 4 descreveremos explicitamente o experimento em si. Nele será possível verificar como medir a velocidade da luz no forno e como será feita a análise de dados. Os comentários finais serão discutidos no capítulo 5. No apêndice apresentaremos as equações de Maxwell e a dedução da equação de uma onda eletromagnética se propagando no vácuo. Embora essas equações não estejam no alcance de um aluno do ensino médio, achamos importante apresentá-las, pois elas podem auxiliar colegas da Licenciatura em Física no eletromagnetismo. Por outro lado, para medir a velocidade da luz usando um forno de microondas precisamos mostrar que a velocidade da luz no vácuo é a mesma para todas as ondas eletromagnéticas e, portanto, para fazer esta demonstração é necessário deduzir a equação de uma onda eletromagnética.

## CAPÍTULO 2: BASES TEÓRICAS DO ELETROMAGNETISMO

O Eletromagnetismo é a área da Física que estuda os fenômenos elétricos e magnéticos da natureza, assim como a relação entre eles. Graças a esses estudos desenvolveram-se diversas tecnologias que permeiam nosso cotidiano atual. Desde as observações dos gregos ao desenvolvimento das leis de Gauss, Ampère e Faraday e às incríveis equações de Maxwell, diversos nomes contribuíram para a consolidação das idéias do eletromagnetismo, ao nível experimental e teórico. Através do desenvolvimento das equações de Maxwell, foi possível demonstrar teoricamente e, posteriormente, experimentalmente a existência de ondas eletromagnéticas. É importante citarmos neste trabalho as leis básicas do eletromagnetismo, pois sem as mesmas não seria possível o desenvolvimento teórico necessário para a descoberta das ondas eletromagnéticas.

### 2.1 RESUMO HISTÓRICO

Os fenômenos da eletricidade e do magnetismo eram conhecidos pelos gregos antigos e, provavelmente, pelo resto do mundo antigo [2]. Mas apenas no início da Renascença foram iniciados estudos sistemáticos dos fenômenos. Cuidadosos estudos das interações magnéticas foram realizados e publicados por Willian Gilbert em *De Magnete*. Nele há descrições das propriedades qualitativas essenciais dos ímas. Gilbert estudou o campo magnético de pequenas esferas de magnetita e constatou, com o auxílio de diminutas bússolas, a existência dos pólos magnéticos. Descobriu também, através do comportamento similar das agulhas da bússola, que a Terra pode ser considerado um grande ímã.

Otto Von Guericke descobriu que, enquanto o âmbar atritado era capaz de atrair pequenos objetos leves, os mesmos, após tocar o âmbar atritado, se repeliam mutuamente. Descobriu também que a eletricidade de um corpo pode ser transferida, além do contato direto com outro corpo, por meio de um cordão úmido ou fio metálico que liga os corpos. Du Fay, por volta do século XVIII, descobriu dois tipos de eletricidade. A denominada eletricidade resinosa e a eletricidade vítrea. Foi estabelecido que tipos iguais se repeliam e tipos diferentes se atraíam. Supunham que os corpos neutros

continham quantidades iguais dos dois tipos de eletricidade. Assim os fenômenos observados por Otto Von Guericke puderam ser explicados como sendo a interação desses dois tipos de eletricidade. Benjamin Franklin, que colheu eletricidade das nuvens empinando papagaios e com auxílio de garrafas de Leyden, interpretou erroneamente que existia apenas um tipo de eletricidade. Esta seria a eletricidade vítrea e que o excesso de eletricidade vítrea caracterizava um corpo carregado com carga positiva, enquanto a carência caracterizava um corpo carregado com eletricidade negativa. A terminologia moderna foi baseada na idéias de Franklin, segundo a qual a corrente elétrica flui do eletrodo positivo (anodo) para o eletrodo negativo (catodo). Du Fay estava mais próximo da realidade, embora a situação seja muito mais complexa do que foi visualizada por ele e por Franklin.

Durante a segunda metade do século XVIII, físicos de diversos países se empenharam no estudo quantitativo das forças de interação elétrica e magnética. Uma das descobertas mais importantes foi a de Charles Augustin Coulomb, que construiu uma balança de torção (figura 1) capaz de medir forças pequenas como as forças de interação elétrica. Através da balança de torção foi possível descobrir a lei que tem seu nome, segundo a qual forças de atração e repulsão elétricas são diretamente proporcionais ao produto das duas cargas e inversamente proporcionais ao quadrado da distância entre elas. Foi definida uma unidade eletrostática de carga como uma carga que age com força de 1 dina sobre carga igual colocada a 1 cm. Utilizando a mesma balança de torção, mas substituindo as esferas carregadas por ímãs, Coulomb provou que a mesma lei se aplica à interação magnética.

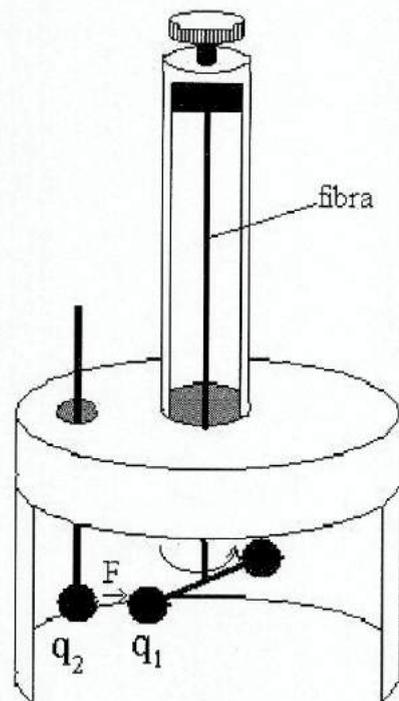


Figura 1 – Balança de Torção [3]

Os primeiros investigadores dos fenômenos elétricos e magnéticos provavelmente sentiram que eles tinham uma profunda relação, mas não conseguiram determiná-la. As cargas elétricas não influíam de modo algum sobre os ímãs e vice-versa. Quem descobriu a ponte entre a eletricidade e o magnetismo foi o físico dinamarquês Hans Christian Oersted, que construiu uma pilha elétrica de Volta e fez com ela inúmeras experiências. Tudo indica que pelo menos três séculos antes de Oersted já se sabia, por observação, que as bússolas eram perturbadas durante tempestades e que por ação de raios sua polaridade podia ser invertida. No início do século XVIII, a imantação de objetos de ferro pela ação de raios (sem que estes atingissem os citados objetos) já merecia registro na revista "Philosophical Transactions of the Royal Society", de Londres. Em um dia do ano de 1820, Oersted teve uma idéia ao se dirigir às suas preleções na Universidade de Copenhague. Como a eletricidade estática não influenciava em nada os ímãs, talvez a eletricidade deslocando por um fio de platina ligando os dois pólos da pilha de Volta mostrasse alguma influência. Ele, em sala de aula, aproximou do fio uma agulha magnética, que deveria orientar-se na direção Norte-Sul. Oersted ficou impressionado quando a agulha girou e parou

perpendicularmente ao fio. Inicialmente pensou que o movimento da agulha magnética fosse ocasionado pela corrente de ar proveniente do fio aquecido pela corrente elétrica. Assim, colocou um pedaço de papelão entre o fio e a agulha, a fim de barrar a corrente de ar. Não houve diferença. A seguir, girou a pilha de Volta 180 graus, para que a corrente elétrica fluísse no sentido oposto pelo fio. A agulha magnética também girou 180 graus em relação à posição anterior. Evidenciou-se então que havia uma relação entre a eletricidade em movimento e os ímãs e que a orientação de uma agulha magnética dependia do fluxo da corrente elétrica que passava através da secção reta do fio.

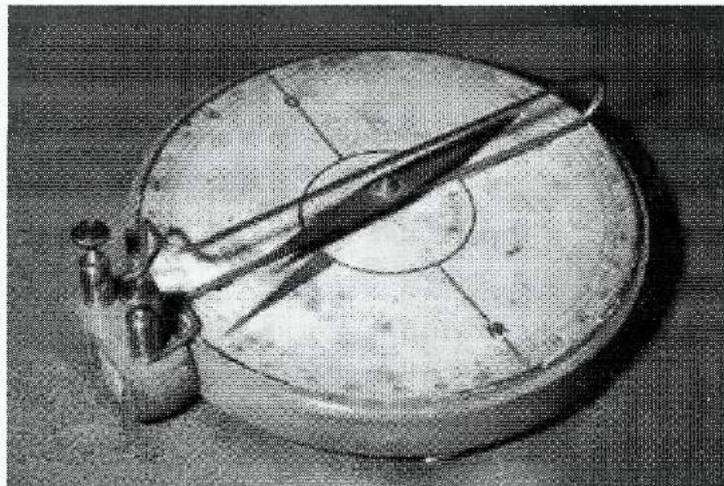


Figura 2 – Experiência de Oersted [4]

Quando a descoberta de Oersted atingiu Paris, André Marie Ampère, matemático e físico francês, descobriu que não apenas uma corrente elétrica age sobre uma agulha magnética, mas também duas correntes elétricas agem entre si. Ocorre atração entre fios paralelos transportando correntes elétricas de mesmo sentido e repulsão quando as correntes elétricas possuem sentidos opostos. Ao analisar a orientação de uma bobina de fio de cobre transportando corrente elétrica, como ocorrido na agulha magnética, Oersted teve a idéia de que o magnetismo natural fosse consequência da corrente fluindo no interior dos corpos magnetizados. Imaginou que cada molécula dos materiais magnéticos contém dentro de si uma corrente circular, que representa um diminuto eletroímã. Se o material não for

imantado, os diminutos eletroímãs estão orientados a esmo em todas as direções e o resultado líquido é zero. Caso contrário, os diminutos eletroímãs moleculares estariam orientados, pelo menos parcialmente, numa única direção, ocasionando a magnetização.

Mas foi Michael Faraday quem levou à apoteose as pesquisas clássicas sobre fenômenos elétricos e magnéticos. Oriundo de uma família pobre, começou a trabalhar com 13 anos numa livraria como encadernador, por um período de sete anos, onde teve despertado o interesse pela ciência. Durante o último ano de seu aprendizado, quando tinha pouco mais de 20 anos e as descobertas de Galvani e Volta ainda eram notícias recentes, descobriu a decomposição química por meio da corrente elétrica ou eletrólise, como ele a chamou. Durante os anos seguintes de trabalho com esse fenômeno, descobriu duas leis básicas que agora têm seu nome. Após o término do contrato na livraria, Faraday foi trabalhar com Sir Humphry Davy na Real Instituição de Ciência da Grã-Bretanha como assistente, depois como colaborador e, após a morte de Davy, como seu sucessor. Apesar de inúmeras publicações científicas, o mais notável documento relativo aos seus estudos é o seu diário, que foi publicado pela Real Instituição em 1932. Nele há a descrição, nas palavras do próprio Faraday, da descoberta da indução eletromagnética. Assim, Faraday descobriu que a corrente elétrica em uma bobina pode induzir uma corrente elétrica em outra bobina colocada nas suas proximidades, da mesma forma como uma carga elétrica em um corpo induz polarização elétrica em outro vizinho. Mas, enquanto no caso da polarização elétrica o efeito é estático e dura enquanto os dois corpos permanecem próximos um do outro, a indução de corrente elétrica é um processo dinâmico e a corrente só continua existindo na segunda bobina durante os períodos em que a corrente da primeira bobina aumenta de zero até o seu valor normal ou diminui desse valor para zero. Três meses depois, descobriu que um ímã introduzido numa bobina induzia uma corrente elétrica no momento que estava sendo introduzido ou retirado, caracterizando novamente um fenômeno dinâmico. Pairava no ar a idéia de que o magnetismo devia produzir corrente elétrica na medida em que a corrente elétrica produzia magnetismo e muitos físicos estavam tentando observar este efeito.

Antes de Faraday, as forças elétricas e magnéticas, bem como as gravitacionais, eram normalmente consideradas como atuando no espaço vazio entre os objetos que se interagiam. Para ele, esta ação à distância não havia sentido. Imaginou que o espaço entre as cargas e os ímãs que se interagem deviam estar preenchido por algo que pudesse puxar ou empurrar. Falou de algo semelhante a tubos finos de borracha que esticam entre cargas elétricas ou ímãs empurrando-os ou puxando-os, dependendo da configuração. Essa idéia de Faraday de que as forças misteriosas foram substituídas por algo continuamente distribuído pelo espaço, introduziu na física a idéia de campo de forças. As forças entre objetos separados pelo espaço vazio podiam ser consideradas como o resultado de interações a curta distância entre os campos que os envolvem.

Alguns anos depois, James Clerk Maxwell deu às idéias de Faraday uma formulação matemática. Embora tenha se interessado inicialmente puramente pela matemática, passou a se interessar na aplicação de métodos matemáticos nos vários fenômenos da Física. Maxwell contribuiu bastante para a teoria cinética do calor, mas a formulação das idéias de Faraday, concernentes às leis do Eletromagnetismo, foi seu trabalho mais importante. Generalizando os fatos empíricos de que os campos magnéticos variantes induzem forças eletromotrizes e correntes elétricas nos condutores, enquanto os campos elétricos variáveis no tempo e as correntes elétricas fluindo produzem campos magnéticos, ele escreveu equações relacionando o ritmo da alteração do campo magnético com a distribuição do campo elétrico no espaço e vice-versa. Para Maxwell, seus trabalhos são uma tradução matemática do que ele considera ser as idéias de Faraday. Mas sua obra é de um alcance inimaginável. Após escrever na sua forma matemática a lei de Biot-Savart-Ampère, ele percebeu que havia uma inconsistência lógica com a equação de continuidade da corrente elétrica, quando deduzida daquela lei. Sabendo ainda, através de Faraday, que a variação temporal do campo magnético produzia campo elétrico, Maxwell passou a especular, então, a situação inversa, isto é, se seria possível a variação temporal do campo elétrico produzir campo magnético. O resultado foi positivamente surpreendente.

Esse resultado permitiu sintetizar, em quatro equações, todas as leis experimentais do eletromagnetismo. À variação temporal do campo elétrico, Maxwell chamou de corrente de deslocamento e a corrente total passou a ser constituída por duas parcelas: a corrente de condução (devido às cargas reais) e a corrente de deslocamento. A primeira e mais importante consequência da unificação do Eletromagnetismo foi que, a partir das equações de Maxwell, pôde se notar que tanto o campo elétrico, como o campo magnético, satisfaziam a uma equação análoga à equação de D'Alembert para ondas elásticas. Utilizando essa equação, Maxwell demonstrou que a velocidade de suas ondas eletromagnéticas - ondas essas desconhecidas até então - coincidiam com a velocidade da luz, a qual já era conhecida, na época, como de aproximadamente 300.000 km/s, o que lhe indicou que a luz é de natureza eletromagnética. Vale recordar que, àquela época, a velocidade da luz já havia sido medida por diversos cientistas: Olaus Roemer, astrônomo dinamarquês, obteve, em 1676, o valor de 227.000 km/s; Hippolyte L. Fizeau, físico francês, mediu, em 1849, 314.000 km/s; Jean B. L. Foucault, físico francês, obteve, em 1850, o valor de 298.360 km/s. Fazendo a comparação de tais medidas com seus próprios resultados experimentais e teóricos, Maxwell pôde afirmar que a luz era um distúrbio eletromagnético, e também que deveria haver radiações eletromagnéticas para além da região do visível. Em 1880, a Academia de Ciências de Berlin ofereceu um prêmio a quem conseguisse produzir luz por meios puramente elétricos, o que seria uma prova da teoria de Maxwell. A confirmação seria obtida pela primeira vez, sete anos depois, por Hertz. Para isso, ele usou um circuito oscilante de pequenas dimensões, produzindo ondas de pequeno comprimento de onda. Hertz mostrou também que essas ondas possuíam todas as propriedades das ondas de luz, isto é, podiam ser refletidas, refratadas, focalizadas por uma lente, polarizadas, da mesma forma que as ondas de luz. E por terem sido produzidas por um circuito oscilante, sua origem é evidentemente eletromagnética.

## 2.2. LEI DE GAUSS – CASO ELETROSTÁTICO

Ao ser iniciado o estudo de campos elétricos no ensino médio, nos deparamos com a dificuldade que o aluno possui em visualizar no espaço este campo vetorial. Em alguns casos, recorre-se às linhas de força para tal visualização, identificando nos pontos próximos a esta linha a possível direção e sentido do campo elétrico. Utilizando uma carga elétrica de prova  $q_0$  neste ponto e sabendo a força elétrica que atua na mesma, é possível identificar a intensidade do campo elétrico neste ponto. Atribuem-se linhas divergentes à carga positiva e convergentes à carga negativa. Após é demonstrado, a partir da Lei de Coulomb, a expressão do campo elétrico próximo a uma carga elétrica, substituindo a definição  $E = F/q_0$  na referida lei.

Uma alternativa para determinar o campo elétrico num ponto do espaço seria a lei de Gauss. No ensino médio não é utilizado cálculo diferencial e integral, mas é possível citarmos essa lei de uma forma alternativa. O aluno do terceiro ano do Ensino Médio já é capaz de trabalhar com o conceito de fluxo. Utilizando novamente as linhas de força, basta idealizar o fluxo destas linhas geradas por uma carga elétrica, na superfície de uma esfera concêntrica à esta carga. É interessante frisar que as linhas devem ser sempre ortogonais à área da superfície desta esfera. A Lei de Gauss nos diz que o fluxo total do campo elétrico através de uma superfície fechada é igual à carga elétrica total no interior da superfície, sobre uma constante de permissividade elétrica do meio onde se encontra a carga.

A lei de Gauss essencialmente diz que a divergência do campo elétrico, ou seja, o fluxo do campo elétrico através de uma superfície fechada nos dá diretamente a totalidade de carga elétrica que a superfície encerra no seu interior [5]. Esta equação nos diz que as linhas de força do campo elétrico, que nos permitem visualizar o campo, são abertas, começando e terminando em cargas elétricas. Ela é conhecida como a primeira equação de Maxwell e relaciona carga elétrica e campo elétrico em situações estáticas.

### **2.3. LEI DE GAUSS – CASO MAGNETOSTÁTICO**

A magnetostática, ou simplesmente magnetismo, é vista no Ensino Médio inicialmente com fenômenos físicos relacionados a ímãs. Como não existem (ou nunca foram descobertas) cargas magnéticas, sempre encontramos na natureza dipolos magnéticos. Assim associamos ao pólo norte de um ímã linhas divergentes e ao pólo sul linhas convergentes. Se, de uma maneira análoga ao caso eletrostático, formos aplicar a lei de Gauss num ímã, será simples verificar que o fluxo de linhas de força numa superfície fechada que o envolve é nulo, pois as linhas iniciam num pólo e terminam no outro. Por outras palavras, as linhas de força do campo magnético são fechadas, ou seja, são arcos fechados. A lei de Gauss neste caso só afirma a não existência de monopólos magnéticos para o aluno do Ensino Médio.

### **2.4. LEI DE FARADAY**

A lei de Faraday está relacionada com a força eletromotriz induzida numa espira condutora fechada, ao se fazer variar temporalmente o fluxo de campo magnético por esta espira [5]. Ela quantifica a indução eletromagnética, que é o efeito da produção de corrente elétrica em um circuito colocado sob efeito de um campo magnético variável ou por um circuito em movimento em um campo magnético constante. É a base do funcionamento dos alternadores, dínamos e transformadores. Ela nos diz que a taxa de variação do fluxo das linhas do campo elétrico numa área delimitada por um espira condutora fechada é, em módulo, igual à força eletromotriz induzida nesta espira. A lei de Faraday nos dá o primeiro indício da existência de uma onda eletromagnética, pois propõe que um campo magnético variável no tempo produz um campo elétrico também variável no tempo.

## 2.5. LEI DE AMPÈRE

A lei de Ampère trata da relação entre a distribuição de corrente elétrica e o campo magnético que ela gera. Pode-se, através desta lei, determinar a intensidade do vetor indução magnética num ponto próximo a um fio portador de corrente elétrica. Nas bibliografias para o Ensino Médio é lançada para o aluno, somente as fórmulas matemáticas da obtenção do campo magnético num ponto próximo a um fio retilíneo, no centro de uma espira e no interior de um solenóide. Desenvolvendo a Lei de Ampère é possível chegar às fórmulas, principalmente naqueles casos com simetria cilíndrica no campo magnético considerado, permitindo assim ao aluno observar o porquê da existência daquela fórmula. A grande dificuldade ainda é o cálculo diferencial e integral, mas, de forma alternativa, podemos utilizar a lei no Ensino Médio. No caso do fio retilíneo e de um solenóide, temos a simetria cilíndrica necessária. Ampère verificou que a circulação do vetor  $B$  ao longo de uma curva fechada que contém o fio portador de corrente elétrica é proporcional à esta corrente.

### CAPÍTULO 3: ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

Na seção 2.4 desta monografia vimos que um campo magnético variável cria um campo elétrico. Maxwell suspeitou que uma outra indução eletromagnética deveria existir a partir de uma variação de um campo elétrico. Assim foi introduzido na lei de ampère (seção 2.5) o termo intitulado corrente de deslocamento. Num caso particular, quando a corrente é constante ocorre apenas uma indução magnética. Mas quando a corrente é alternada, o campo magnético produzido pela corrente variável gera um campo elétrico. É com este raciocínio que explicaremos a existência de ondas eletromagnéticas.

De acordo com a lei de Ampère, a indução magnética é diretamente proporcional à corrente [6]. Assim, numa corrente alternada o campo magnético gerado pela corrente alternada é um campo oscilante. Este campo magnético oscilante gera um campo elétrico oscilante, que, por sua vez, gera um campo magnético oscilante. Essas oscilações acopladas constituem uma onda eletromagnética.

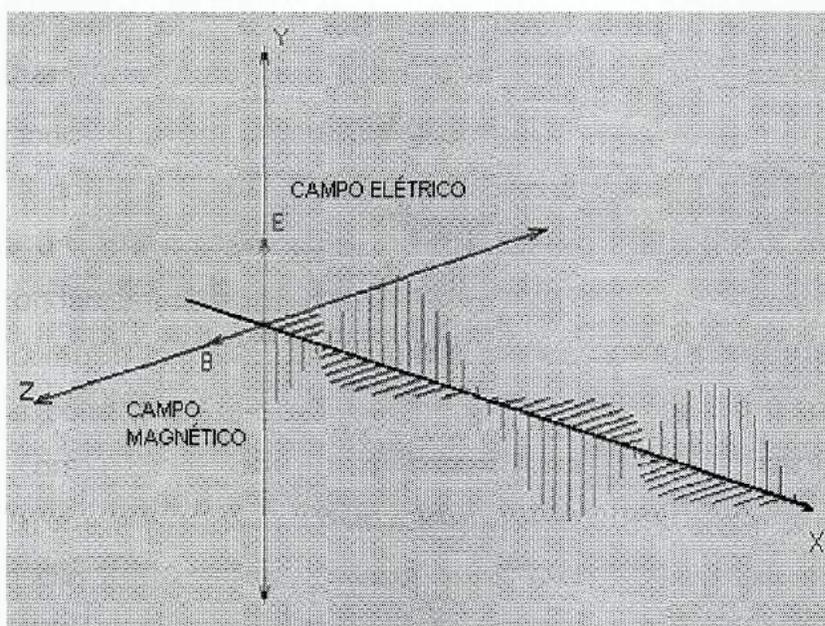


Figura 3 – Onda eletromagnética polarizada verticalmente

Em torno de 1861, Maxwell previu teoricamente a existência de ondas eletromagnéticas, a partir de suas equações básicas [6]. Buscando uma solução no

vácuo, onde não há corrente elétrica nem carga elétrica, obteve uma equação de onda na qual a velocidade de propagação desta onda eletromagnética é dada por:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (1)$$

No apêndice faremos a dedução da equação de uma onda eletromagnética a partir das equações de Maxwell, onde fica óbvio o resultado (1). Este resultado mostra claramente que a velocidade da luz  $c$  não depende nem do movimento da fonte emissora nem do receptor. Além disso, mostra também que a velocidade  $c$  não depende do comprimento de onda, sendo assim possível medi-la a partir de qualquer onda eletromagnética. Neste trabalho ela será medida utilizando uma microonda de um forno de microondas, conforme será proposto no capítulo 4. Maxwell concluiu que a luz é uma onda eletromagnética e que se propaga com velocidade  $c$  comum a todas as ondas eletromagnéticas. A luz é a principal onda eletromagnética, que é produzida por elétrons durante a transição entre dois estados estacionários no interior de átomos ou moléculas. No geral é obtida a partir de processos físicos que envolvem movimento de elétrons ou íons. Utiliza-se o termo espectro eletromagnético para designar os diversos tipos de ondas eletromagnéticas que existem na natureza. Este espectro abrange ondas eletromagnéticas de comprimentos de onda que variam do zero até o infinito [6]. Dentro do espectro eletromagnético podemos citar as ondas de rádio, que possui comprimento de onda na faixa de 10 m a 10 km, as ondas de TV, na faixa de 30 cm a 1m, as ondas de radar, na faixa de 10 cm a 1 m, as microondas, na faixa de 10 cm a 1 mm, as ondas infravermelho, na faixa de 0,1 mm e 1  $\mu\text{m}$ , a luz visível, na faixa de 0,7  $\mu\text{m}$  a 0,4  $\mu\text{m}$ , as ondas ultravioletas, na faixa de 0,1  $\mu\text{m}$  a 0,01  $\mu\text{m}$ , os raios X, na faixa de 0,01  $\mu\text{m}$  a 1 pm e os raios gama, na faixa de 1 pm a 0,1 pm. Os prefixos micro( $\mu$ ) e pico(p) equivalem a  $10^{-6}$  e a  $10^{-12}$ , respectivamente.

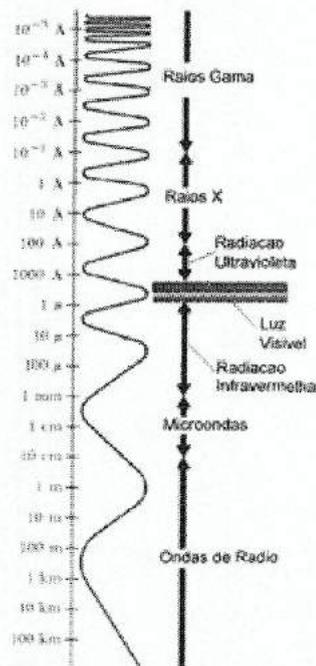


Figura 4 – O espectro eletromagnético [7]

Uma carga elétrica acelerada produz no espaço ondas eletromagnéticas. Na prática, basta usar um dipolo oscilante ou uma corrente elétrica oscilante. Uma antena é um dispositivo prático para a produção e a recepção de ondas eletromagnéticas, que consiste em duas hastes metálicas de mesmo comprimento  $l$  de valor aproximado a  $\frac{1}{4}$  do comprimento de onda eletromagnética que deve ser transmitida.

Vinte anos depois, Hertz mostrou um dos modos de produzir e detectar ondas eletromagnéticas. Hertz utilizou uma bobina de indução, que carregava duas esferas com cargas iguais e de sinais contrários. O sistema se comportava como um circuito LC produzindo oscilações eletromagnéticas. Um circuito LC, conhecido como circuito oscilante, é constituído por um capacitor de capacitância  $C$  em série com um indutor de indutância  $L$ . Supondo o capacitor inicialmente carregado com carga elétrica  $q$ , percebe-se que em sua descarga o campo elétrico entre as placas decai no tempo e é gerada uma corrente elétrica crescente no circuito. A medida que  $q$  diminui, a energia potencial elétrica armazenada no capacitor também diminui. Esta corrente elétrica percorre o indutor gerando um campo magnético variável no tempo. A energia potencial elétrica do capacitor vai se transferindo para o campo magnético no indutor por causa da corrente elétrica que está aumentando. Quando a carga do capacitor desaparece, o campo elétrico entre as placas é nulo e a corrente elétrica

no indutor é máxima. Esta corrente máxima faz com que o capacitor recarregue com polaridade oposta à anterior. A energia flui agora do indutor para o capacitor, enquanto crescem a carga  $q$  e o campo elétrico (de sentido contrário ao anterior) entre as placas. Após, o capacitor descarregará novamente, gerando uma nova corrente elétrica, mas de sentido contrário à anterior. O circuito retornará à sua situação inicial e o processo se repetirá com uma frequência definida. A frequência das ondas eletromagnéticas obtidas é a mesma do circuito oscilante.

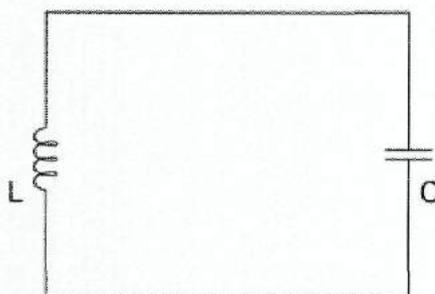


Figura 5 – Circuito LC

Para detectar as ondas eletromagnéticas, Hertz criou outro circuito constituído por uma bobina e por duas pequenas esferas funcionando como eletrodos. Abaixo temos uma figura do oscilador criado por Hertz. O transformador carrega as placas C e C' que se descarregam no dipolo de abertura P. Fios formando círculos com pequenas aberturas, chamados de ressoador, são colocados de modo que seu plano é ortogonal ao plano de propagação do campo magnético. O diâmetro do ressoador deve ser muito pequeno em relação ao comprimento de onda da onda gerada. O campo magnético variável induz uma fem no ressoador, provocando centelhas em suas extremidades. Se o ressoador é colocado num plano paralelo ao campo magnético, nenhuma centelha é gerada. Para produzir ondas eletromagnéticas estacionárias, Hertz colocou uma superfície refletora no ponto Q. Assim pode-se observar que em determinados pontos não ocorre a centelha no ressoador, pois o mesmo está no nó da onda estacionária gerada. Movimentando o ressoador ao longo do segmento PQ, foi possível identificar os nós e antinós da onda estacionária. Deste modo, Hertz identificou o comprimento de onda da onda eletromagnética gerada pelo dipolo. Como ele conhecia a frequência do oscilador,

foi obtida a primeira medida experimental da velocidade de propagação de um onda eletromagnética utilizando a equação  $c = \lambda \cdot f$ . [8]

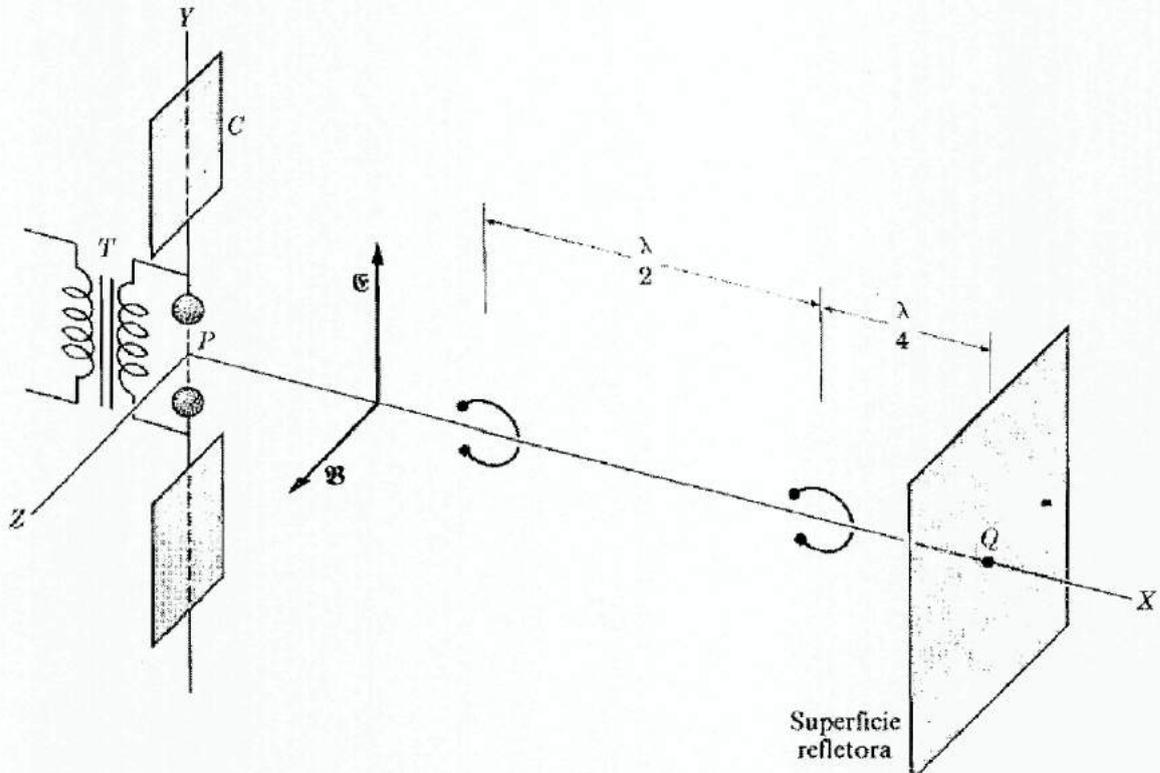


Figura 6 – Esquema da experiência de Hertz [8]

### 3.1. MICROONDAS

O espectro eletromagnético abrange ondas eletromagnéticas cujos comprimentos de onda variam desde zero até o infinito. Chamamos de microondas as ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda desde 10 cm até 1 mm [6]. São, portanto, ondas que estão entre a região de ondas de radar e a região do infravermelho no espectro das ondas eletromagnéticas. Inicialmente as microondas foram utilizadas para a telecomunicação, como em radares e telefone.

As microondas não podem ser geradas por um circuito oscilador devido à relação desta frequência com os valores da capacitância do capacitor e da indutância do indutor, conforme será visto no item 3.3. Elas

são comumente geradas por magnetrons, que permitem que a frequência de vibração seja da ordem de grandeza da frequência das microondas.

Durante a segunda Guerra Mundial, Percy Spencer, trabalhando com radares, percebeu que uma barra de chocolate havia se derretido no seu bolso. Descobriu, assim, que as microondas têm a capacidade de aquecer alimentos, pois a energia das ondas nessa região do espectro eletromagnético corresponde à energia do movimento rotacional de algumas moléculas dipolares presentes nos alimentos, como as de água, gorduras e açúcares.

### **3.2. GERAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS**

As ondas eletromagnéticas, em geral, podem ser criadas de diversas maneiras. Uma maneira simples de criar ondas eletromagnéticas é através de um circuito ressonante. O circuito ressonante tem a capacidade de gerar ondas e é formado pela ligação em paralelo de uma bobina e um capacitor (ver figura 4). Quando uma bobina é percorrida por uma corrente elétrica, um campo magnético é gerado ao seu redor. Esse campo possuirá um pólo norte e um pólo sul nas extremidades da bobina, exatamente como em um ímã permanente. Se o sentido da corrente que circula pela bobina for invertido, o sentido do campo magnético também inverterá e, no caso da fonte de alimentação da bobina ser desligada, o campo magnético diminuirá, gerando uma tensão na bobina a qual, durante um certo intervalo de tempo, manterá a corrente fluindo no mesmo sentido, na tentativa de impedir a diminuição do campo, preservando a energia armazenada no circuito. Esta habilidade das bobinas de armazenar energia é chamada de indutância, denominada  $L$ , que pode ser medida por ser uma característica da bobina.

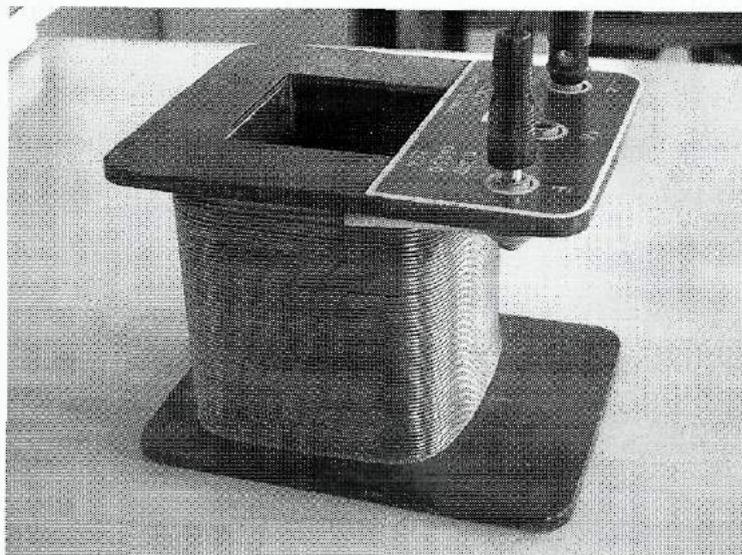


Figura 7 – Bobina [9]

No caso de um capacitor, que é constituído por duas placas metálicas separadas por ar, papel, óleo, mica ou outro tipo de isolante, ocorre o armazenamento de energia elétrica. O capacitor tem uma capacidade de armazenar energia, denominada capacitância  $C$ . Quando ligadas a uma fonte de alimentação, uma das duas placas se carregará negativamente e a outra positivamente. Existirá corrente no circuito apenas durante a carga e a descarga do capacitor. Quando ligamos uma bobina e um capacitor em paralelo, e tomando como ponto de partida um instante em que o capacitor está totalmente carregado, a corrente no circuito é nula. Imediatamente os elétrons da placa negativa do capacitor começam a fluir pela bobina, para atingir a placa positiva. Neste ponto, a corrente na bobina é máxima e a energia é armazenada na forma de energia magnética, até que a carga do capacitor seja reduzida a zero. Como o capacitor não pode fornecer elétrons durante muito tempo, o fluxo de elétrons diminui. A queda da corrente resulta na redução do campo magnético, iniciando o fluxo de elétrons para carregar o capacitor com polaridade oposta à inicial. Quando o capacitor é carregado, a placa negativa do capacitor torna-se positiva e novamente a corrente se torna nula. Assim sendo, o capacitor recebe carga novamente, mas, agora, através da bobina forçando um fluxo de elétrons no sentido contrário ao anterior. O campo magnético da bobina novamente aumenta, mas em sentido oposto, pois, como já sabemos, conforme

mudamos o sentido da corrente, alteramos também o do campo magnético. Novamente o sentido do fluxo de elétrons inverte, enquanto a intensidade do campo magnético da bobina diminui gradativamente, porém mantendo-o o tempo suficiente até recarregar o capacitor. No instante seguinte, voltamos à situação inicial, onde o fluxo de corrente é nulo e o capacitor está carregado. A partir daí o ciclo é repetido, produzindo uma corrente alternada no circuito. Dessa maneira a carga e descarga de um capacitor e de uma bobina geram oscilações eletromagnéticas.

Considerando uma bobina de indução ou uma fonte de alta frequência de corrente alternada alimentando um capacitor num circuito LC oscilante, podemos identificar ondas eletromagnéticas num outro circuito que possui uma lâmpada e um indutor de indutância  $L'$  (ver figura 8)[6]. Embora não exista o contato entre os dois circuitos podemos observar que a lâmpada se acende. Caso seja utilizada uma lâmpada fluorescente, podemos aproximar do circuito oscilante LC sem a necessidade de um indutor que ela se acende. Este fenômeno pode ser verificado facilmente próximo de uma estação emissora de ondas de rádio utilizando um circuito LC em série com a lâmpada.

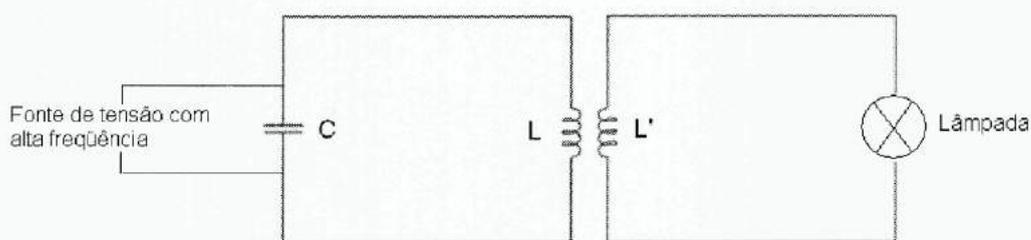


Figura 8- Circuito simples para mostrar uma versão moderna da experiência de Hertz

### 3.3. GERAÇÃO DE MICROONDAS

A frequência das ondas geradas pelo circuito ressonante depende das propriedades do capacitor e da bobina. O tempo de carga e descarga de um capacitor é diretamente proporcional à sua capacitância. Da mesma

maneira, a quantidade de energia armazenada em uma bobina depende de sua indutância. As oscilações eletromagnéticas num circuito LC são oscilações harmônicas [6]. A partir da análise das relações constitutivas para os elementos do circuito LC, demonstra-se que as oscilações possuem uma frequência dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

Assim, para que este circuito oscile na frequência de oscilação de uma microonda, os valores da indutância do indutor e da capacitância do capacitor, baseados na menor frequência de microonda ( $3,0 \times 10^9$  Hz) substituída na relação (2), devem obter:

$$3,0 \times 10^9 \text{ Hz} = \frac{1}{2 \times 3,14 \times \sqrt{LC}} \quad (3)$$

Da equação (3) resulta aproximadamente:

$$LC = 2,8 \times 10^{-21} \text{ s}^2 \quad (4)$$

Para que o produto entre a indutância do indutor e a capacitância do capacitor tenha o valor indicado na relação (4), seus valores devem ser menores que os valores encontrados por indutores (ordem de microhenry) e capacitores (ordem de picofarad) comerciais, impossibilitando assim a construção de circuitos oscilantes para a geração de microondas. Outro aspecto importantíssimo é que em altas frequências não podemos desprezar o comportamento diverso de L e C em comparação com baixas frequências. Isto porque em altas frequências o efeito pelicular e as perdas por radiação tornam-se importantes. O efeito pelicular é o fenômeno responsável pelo aumento da resistência aparente de um condutor elétrico em função do aumento da frequência da corrente elétrica que o percorre. Logo, circuitos ressonantes deste tipo não são apropriados para geração de ondas com

freqüências elevadas, na faixa de GHz, como é o caso dos fornos de microondas, que utilizam ondas com freqüência de 2,45 GHz. Para a faixa de freqüência das microondas são utilizadas cavidades ressonantes, nas quais as ondas eletromagnéticas geradas possuem comprimentos de onda da ordem do tamanho do dispositivo.

### **3.4. O MAGNETRON**

O magnetron (ver figura 9) utilizado para gerar a freqüência de 2,45 GHz, utilizada nos fornos de microondas, possui em sua estrutura um anodo, peça metálica oca, geralmente feita de cobre ou ferro, contendo um número par de aletas na sua cavidade, apontando para o catodo. O catodo é um filamento emissor de elétrons e fica localizado no centro da cavidade do magnetron, uma antena ligada a uma das aletas do anodo transmite as microondas para a cavidade do forno e ímãs permanentes, responsáveis por gerar um campo magnético no interior do anodo, paralelo ao catodo [10].

Aplicando uma tensão de 3 V no filamento, este aquece o catodo (que está ligado no próprio filamento). O catodo aquecido libera os elétrons que são atraídos com força pela placa através de uma alta tensão (0 V na placa e - 4.000 V no filamento-catodo). O campo magnético dos dois ímãs colocados em volta do magnetron faz os elétrons girarem em alta velocidade em volta das pequenas cavidades da placa. Cada cavidade funciona como uma bobina e um capacitor em paralelo, assim como num circuito ressonante, alternando em 2.450 MHz. Desta forma, as ondas são induzidas nestas cavidades, se somam e saem pela antena com grande intensidade.

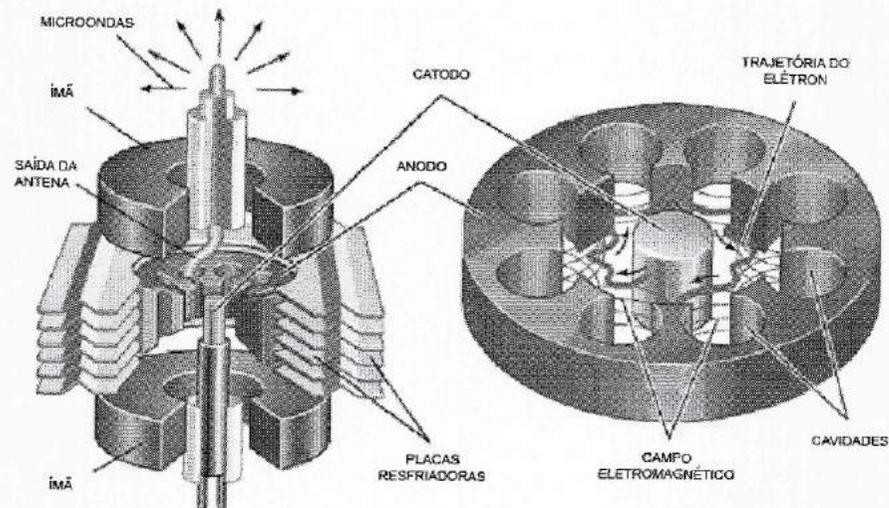


Figura 9 – Magnetron

### 3.5. FORNO DE MICROONDAS

Há pelo menos 500 mil anos, o homem passou a usar o fogo no preparo de alimentos. Preparar alimentos sem o uso do fogo já é possível há quase meio século, graças ao forno de microondas. Nenhum elemento incandescente é aplicado, direta ou indiretamente, aos alimentos. Laboratórios ingleses e americanos desenvolveram um dispositivo eletrônico chamado magnetron, em 1939, peça fundamental para radares de longo alcance.

A idéia de usar microondas na cozinha, porém, apareceu por mero acaso em 1946, nos Estados Unidos, com o engenheiro eletrônico Percy Lebaron Spencer (1894-1970). Certo dia, Spencer saiu de casa, em Waltham, Massachusetts, com uma barra de chocolate no bolso da calça. Diretor de uma indústria de sistemas eletrônicos militares, horas depois ele estava em seu laboratório testando um magnetron. Em dado momento, resolveu comer o chocolate que trouxera de casa. Ao colocar a mão no bolso, porém, percebeu que a barra havia se derretido.

Desenvolver um forno que tirasse o máximo proveito das microondas, não foi uma tarefa muito difícil, já que o magnetron estava bastante aperfeiçoado àquela época. Assim surgiu, em 1952, o primeiro forno de microondas. Por seu tamanho, mais parecia uma geladeira: a

profusão de fios e válvulas deixava apenas um diminuto espaço para o forno propriamente dito.

Inicialmente, a venda ficou restrita a alguns restaurantes e empresas fornecedoras de refeições prontas, que acreditavam no Radar Range, nome com o qual Spencer patenteou o invento.

O forno não tinha muito apelo comercial devido ao seu aspecto de artefato bélico - talvez pelo fato de a Raytheon, a empresa de Spencer, ser fornecedora do Exército americano, no setor de defesa antiaérea. Por isso, as primeiras remessas encaharam nas lojas. Só a partir de 1953, o forno começou a fazer sucesso. Já então, fabricado também por outras empresas, o equipamento se parecia com um verdadeiro eletrodoméstico e tinha proporções compatíveis com o espaço disponível numa cozinha normal.

As microondas são radiações de baixa energia, logo não ionizam os átomos ou moléculas contidas nos alimentos. A energia que as microondas carregam são suficiente para aumentar a energia cinética de vibração das moléculas de água, açúcares e gorduras. No caso de acidentes, ocorrerão queimaduras pelo corpo, que é constituído basicamente por água. O forno de microondas gera ondas de potência relativamente alta (cerca de 1KW), mas caso ocorra algum tipo de vazamento, esta potência se reduz com o quadrado da distância [6]. O projeto de um forno de microondas é feito de forma a garantir que não haja vazamento, principalmente pela porta. A porta é projetada de maneira que tenha três dispositivos de segurança: o selo capacitivo, que é responsável pela reflexão da microonda de volta para a cavidade, a cavidade de choque, que possui dimensão de  $\frac{1}{4}$  do comprimento de onda da microonda para interferi-la destrutivamente, e a vedação de absorção feita de ferrite emborrachada, que praticamente elimina toda a possibilidade de vazamento. A janela do microondas é composta de três camadas. Uma de externa de vidro, uma grade de metal com orifícios de dimensões maiores que os comprimentos de onda da luz visível, mas de dimensões menores que os comprimentos de onda da microonda. A grade funciona como um duplo polarizador, que polariza primeiro a onda numa direção e posteriormente numa direção ortogonal a primeira, anulando completamente a onda incidente. Uma camada de película plástica protege esta grade.

### 3.6. AQUECIMENTO DE ALIMENTOS

Os alimentos geralmente contêm uma certa porcentagem de água. A água é formada por moléculas polares, isto é, possuem pólos nos seus extremos, um positivo e outro negativo.

As microondas na frequência de 2,45 GHz carregam energia que pode ser fracamente absorvida por moléculas polares como da água, gorduras e açúcares, utilizando o fenômeno da ressonância. Moléculas polares são capazes de se alinhar com o campo elétrico das ondas. Como o campo muda de direção de acordo com a frequência, cada molécula tende a acompanhar essas mudanças, arrastando moléculas vizinhas. Essa agitação resulta no aumento da energia cinética das moléculas, ou seja, ocorre o aumento da temperatura.

Somente moléculas de água, gordura e açúcar entram em ressonância com as microondas. Isso significa que apenas os alimentos que contêm essas moléculas são aquecidos pelo forno. Então, o ar, os vasilhames de vidro, plástico ou outros materiais não são aquecidos, o que representa uma grande economia de energia. O ar e os vasilhames colocados no interior da câmara de cozimento se aquecem apenas por condução ou convecção através do alimento aquecido.

## CAPÍTULO 4: MEDIDA DA VELOCIDADE DA LUZ USANDO UM FORNO DE MICROONDAS

Vimos que num forno de microondas existem ondas eletromagnéticas da faixa de frequência de 2,45 GHz e que estas se confinam na câmara do forno. Estas ondas entram na câmara a partir da antena do magnetron e configuram ondas estacionárias nesta cavidade do forno. Para aquecer os alimentos de uma maneira mais uniforme, os fornos de microondas possuem pratos giratórios, que fazem com que os alimentos variem a posição dentro da cavidade, permitindo percorrer pontos onde a intensidade é máxima. Caso não houvesse o prato giratório, regiões frias, correspondentes aos nós das ondas estacionárias, iriam existir nos alimentos.

### *Dados Técnicos*

Características	ME185
Tensão (V)	127V* / 220V*
Capacidade (litros)	17
Frequência (Hz)	60
Potência de saída (W)	700
Frequência das microondas (MHz)	2450
Potência de consumo (W)	1050 / 1150
Corrente (A)	8,3 / 5,2
Peso (Kg)	12,2
Altura (mm)	280
Largura (mm)	461
Profundidade (mm)	373
Diâmetro do prato (mm)	245

\* Nosso produto está em conformidade com os níveis de tensão estabelecidos na resolução número 505, de 26 de novembro de 2001 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

127 V	220 V
Mínima: 106 V	Mínima: 196 V
Máxima: 132 V	Máxima: 242 V

Figura 10 – Especificações Técnicas do forno de microondas

Neste trabalho será medida a velocidade de propagação de uma microonda confinada na câmara de um forno de microondas. Uma barra de chocolate será marcada pelos ventres das ondas estacionárias formadas no interior da câmara e assim teremos uma possibilidade para medir meio comprimento de onda e determinarmos experimentalmente a velocidade de propagação da microonda, pois sua frequência é conhecida.

#### **4.1. CÂMARA DE RESSONÂNCIA**

As dimensões da câmara de um forno de microondas devem possuir tamanho de um múltiplo inteiro de meio comprimento de onda da microonda gerada pelo magnetron. Isto porque devem ser configuradas ondas estacionárias na câmara do forno.

Ondas estacionárias surgem quando ondas harmônicas refletem numa parede e estas ondas refletidas interferem com ondas incidentes de mesma frequência e mesma amplitude, de modo que criam no espaço pontos de interferência construtiva e destrutiva. Para ocorrer este sincronismo, a onda deve estar confinada num local onde as dimensões sejam múltiplo inteiro do comprimento de onda da onda gerada. Estes pontos não variam de posição e são denominados de ventre, para o máximo de interferência, e de nó ou nodo para o de mínimo. É interessante ressaltar que a energia não é transportada nesta configuração de onda estacionária, tendo esta, valores definidos no espaço, que variam entre o máximo e o mínimo. Quando isto ocorre dizemos que o sistema está em ressonância. Na ressonância verificamos uma troca máxima de energia.

Na cavidade do forno de microondas encontramos então uma configuração de ondas eletromagnéticas, de frequência 2,45 GHz, estacionárias nesta cavidade. Os nós coincidem com as paredes do forno. Fato importantíssimo para a existência das ondas estacionárias e para a não existência de correntes elétricas nas paredes do forno, que são feitas de metal.

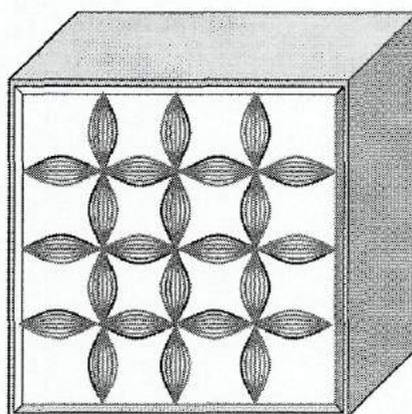


Figura 11 – Ondas estacionárias no interior de um forno de microondas [8]

Os alimentos serão aquecidos pelos pontos de maior energia (ventre). Um prato giratório é utilizado na base da câmara para que diversas partes do alimento percorram estes ventres. Em determinados cozimentos é recomendada até mesmo uma inversão na posição do alimento, para que esta energia alcance uma maior região do mesmo. É possível então demarcarmos estes pontos de maior energia pela temperatura do alimento, quando exposto às ondas sem o prato giratório. A grande dificuldade está em descobrir estes pontos de maior temperatura.

#### 4.2. A BARRA DE CHOCOLATE

O chocolate é um alimento que possui em sua composição açúcares e gorduras. Com isso, ao sofrer incidência de microondas de frequência 2,45 GHz, suas moléculas dipolares vibram nesta frequência, aumentando a temperatura e fazendo o chocolate derreter. Graças a esta característica, uma barra de chocolate pode ser facilmente derretida com um forno de microondas. O chocolate começa a derreter com temperatura em torno de 35°C e 45°C. Após esta temperatura observam-se variações no paladar e na textura.

Para este experimento, foi escolhida a barra de chocolates por alguns fatores relevantes: Uma barra de chocolates possui dimensões da ordem de grandeza do comprimento de onda da microonda gerada no forno;

Podemos identificar com facilidade pontos na barra de maior temperatura, pois estarão derretidos; É um alimento fácil de ser encontrado; Pode ser considerado como um incentivo didático, pois, após a experiência, o aluno poderá se deliciar com a barra de chocolate.

O sucesso desta experiência está relacionado com a marcação na barra de chocolates devido ao aquecimento da mesma pelas microondas do forno. Como na cavidade do forno há uma configuração de ondas estacionadas, os ventres dessas ondas, por possuírem mais energia, derretem a barra de chocolate, permitindo assim uma possível leitura da distância entre dois ventres, que corresponde a meio comprimento de onda. A grande dificuldade está no momento da medida, pois a região marcada é relativamente grande, que proporcionará uma grande margem de erro para a medida. O calor gerado pela vibração das moléculas propaga por condução no chocolate e com isso uma grande área derrete. Procurou-se utilizar um ponto bem no centro da região marcada, que se aproxima de uma circunferência. Uma outra opção é espalhar pequenos pedaços de chocolate num tabuleiro de dimensões maiores e, após o aquecimento, procurar regiões derretidas e medir a distância entre elas.

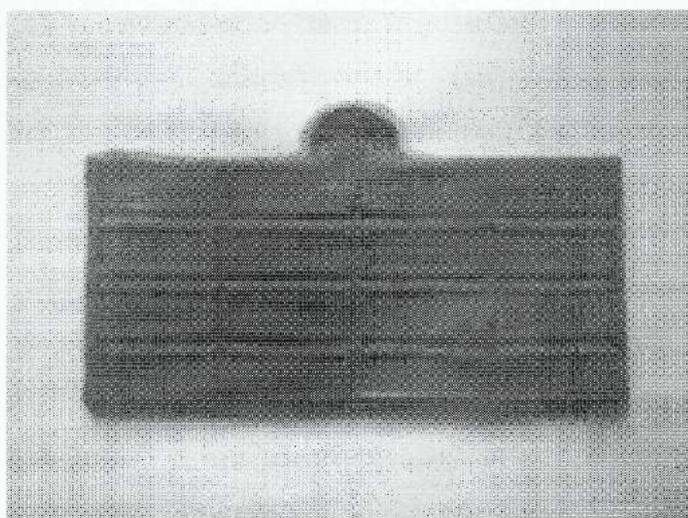


Figura 12 – Barra de chocolate marcada pelos ventres das microondas estacionárias na cavidade do forno de microondas.

A barra de chocolates utilizada nesta experiência é da marca Hershey's e foi exposta às microondas de um forno da marca Electrolux,

modelo ME18S. A potência utilizada foi a de valor 100 e o tempo de exposição foi de 35 segundos. O prato giratório foi removido e a barra ficou suspensa cerca de 4 cm da base da cavidade do forno. Após o aquecimento a barra apresentou duas regiões de derretimento, que identificam dois ventres da configuração das ondas estacionárias na cavidade do forno.

### 4.3. ANÁLISE DE DADOS

De acordo com a marcação obtida na barra de chocolates, podemos medir a distância entre dois ventres consecutivos das ondas estacionárias formadas na cavidade do forno. Esta distância é equivalente a meio comprimento de onda. As figuras abaixo mostram as medidas realizadas em 3 barras de chocolates utilizadas na experiência. Cada barra foi colocada numa região diferente da cavidade do forno.

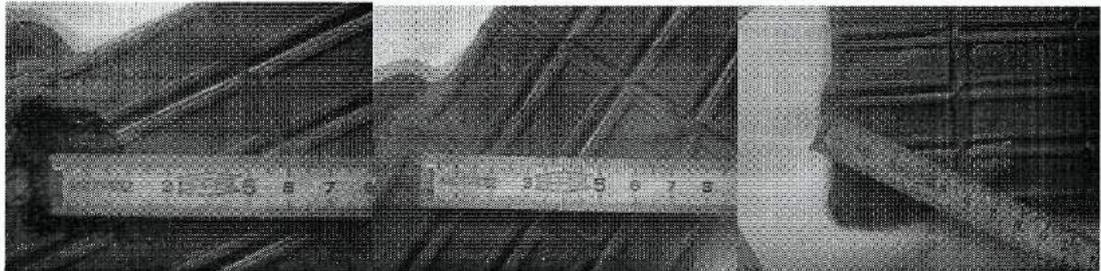


Figura 13 – Três medidas realizadas na experiência

Sabendo que ondas harmônicas possuem velocidade de propagação que obedecem a relação:

$$c = \lambda \cdot f$$

Podemos determinar experimentalmente a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética ao obter o valor do comprimento de onda desta onda de frequência conhecida.

Para este experimento obtivemos uma distância entre ventres de valores:

$$d_1 = (6,3 \pm 0,1) \text{ cm}$$

$$d_2 = (6,5 \pm 0,1) \text{ cm}$$

$$d_3 = (6,1 \pm 0,1) \text{ cm}$$

Calculando o valor médio e propagando os erros, temos:

$$d = (6,3 \pm 0,1) \text{ cm}$$

Que nos fornece o seguinte valor de comprimento de onda:

$$\lambda = (12,6 \pm 0,2) \text{ cm}$$

Sabendo que a frequência da microonda gerada pelo magnetron no forno é de:

$$f = 2,45 \times 10^9 \text{ Hz}$$

Teremos para o valor da velocidade de propagação da microonda:

$$c = (3,09 \pm 0,07) \times 10^{10} \text{ cm/s}$$

O valor da velocidade de propagação da luz no ar é de aproximadamente:

$$c = 3,0 \times 10^{10} \text{ cm/s}$$

Sendo assim o valor obtido experimentalmente está bem próximo do valor esperado.

## CAPÍTULO 5: COMENTÁRIOS FINAIS

De acordo com o resultado obtido da velocidade da luz podemos dizer que o experimento foi bem sucedido, pois o valor se encontra dentro do esperado. A experiência possui suas limitações técnicas, pois a medida do comprimento de onda está longe de ser uma medida exata. A região marcada na barra de chocolate é muito grande em relação ao que se quer medir, aumentando assim a incerteza. Também podemos observar nas figuras, que as marcações diferem uma das outras. Em dois dos três casos ocorreu uma erupção na barra devido ao aquecimento. Para a medida foi escolhido um ponto no centro da erupção. Mas, em nível de ensino médio, as medidas se tornam enormemente válidas, por ser acessível aos alunos. Creio que é a única alternativa experimental de fácil acesso para obtemos um valor estimado para a velocidade da luz. É comum encontrarmos em instituições particulares um forno de microondas destinado ao aquecimento das refeições dos funcionários e, até mesmo, dos alunos. Em instituições públicas, se torna mais difícil o acesso, mas nada que torne impossível a prática da experiência.

Como a principal idéia por detrás deste experimento é procurar entender a relação entre a velocidade de propagação da luz e a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética, encontrada num eletrodoméstico comum nas casas dos alunos, foi possível envolver e aproximar o conteúdo de física ao cotidiano dos alunos e, dessa forma, fazer com que esta disciplina preste-se, não só para a compreensão e uma visão da natureza, como também seja útil para entender os princípios que se encontram por detrás dos artefatos tecnológicos que o aluno convive ou interage no seu dia-a-dia.

Após a análise de todo o problema o aluno tem uma maneira de relacionar os diversos tipos de radiação presentes no espectro eletromagnético, aceitando assim, com menos dúvidas, que a luz é uma radiação eletromagnética.

## APÊNDICE: AS EQUAÇÕES DE MAXWELL

Quando Maxwell formulou matematicamente as idéias de Faraday, existiam 20 equações de 20 variáveis [3]. Dentre essas equações estão incluídas equações que são consideradas hoje auxiliares - a Lei de Ampère corrigida, Lei de Gauss para carga, a relação entre densidade de corrente total e de deslocamento, a relação entre campo magnético e o vetor potencial, o relacionamento entre campo elétrico e os potenciais escalar e vetorial, o relacionamento entre campos elétrico e de deslocamento, Lei de Ohm relacionando intensidade de corrente e campo elétrico, e a equação de continuidade relacionando intensidade de corrente e densidade de carga.

Oliver Heaviside e Willard Gibbs reformularam o sistema de equações original em uma representação mais simples utilizando cálculo vetorial, utilizando notação matemática moderna nas equações de Maxwell. (Em 1873 Maxwell também publicou notação de base de quatérnicas que acabou se tornando impopular.) A mudança para notação vetorial produziu uma representação matemática simétrica que reforçava a percepção das simetrias físicas entre os vários campos. Esta notação, altamente simétrica, inspiraria diretamente o desenvolvimento posterior da física fundamental.

As equações de Maxwell possuem finalidades bastante notáveis. A orientação da agulha de uma bússola, o desvio de um raio de luz ao penetrar na água, o princípio fundamental de dispositivos eletromagnéticos e ópticos, como motores elétricos, telescópios, cíclotrons, transmissores e receptores de TV, telefones celulares, radares e fornos de microondas, estão contidos nestas equações.

Neste apêndice serão mostradas as equações de Maxwell na forma integral e na forma diferencial, que foram deduzidas a partir da Lei de Gauss, da Lei de Faraday e da Lei de Ampère, expressas no capítulo 2. Aqui será corrigida também a quarta equação, com o acréscimo da corrente de deslocamento. Será demonstrada também a equação de onda eletromagnética, a partir da solução das equações no caso particular do vácuo. Para melhor compreensão destacaremos na tabela abaixo algumas grandezas e relações importantes.

$\vec{E}$ : Vetor intensidade de campo elétrico;	
$\vec{B}$ : Vetor indução magnética;	
$\vec{D}$ : Vetor densidade superficial de campo elétrico ou campo elétrico de deslocamento;	
$\vec{H}$ : Vetor intensidade do campo magnético;	
$\vec{J}$ : Vetor densidade superficial de corrente elétrica;	
$I$ : Intensidade de corrente elétrica;	
$\epsilon$ : Permissividade elétrica;	
$\mu$ : Permeabilidade magnética;	
$\rho$ : Densidade de carga elétrica;	
$q$ : carga elétrica;	
$I = \frac{\partial q}{\partial t}$	(1)
$I = \int \vec{J} \cdot d\vec{S}$	(2)
$q = \int_V \rho dV$	(3)
$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$	(4)
$\vec{B} = \mu \vec{H}$	(5)

### LEI DE GAUSS:

De acordo com a Lei de Gauss, temos:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon} \quad (6)$$

Substituindo (3) em (6), temos:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \int_V \frac{\rho}{\epsilon} dV \quad (7)$$

Podemos verificar pelo teorema da divergência que:

$$\oint_V \vec{\nabla} \cdot \vec{E} dV = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (8)$$

Substituindo (7) em (8), temos:

$$\oint_V \vec{\nabla} \cdot \vec{E} dV = \int_V \frac{\rho}{\epsilon} dV$$

Donde se conclui que:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (9)$$

Ou substituindo pela definição dada pela equação (4), obtemos:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (10)$$

A equação (10) representa a forma diferencial da primeira equação de Maxwell.

A lei de Gauss também pode ser utilizada para problemas magnetostáticos:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (11)$$

Aplicando o teorema da divergência, obteremos facilmente a forma diferencial desta equação:

$$\oint_V \vec{\nabla} \cdot \vec{B} dV = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

logo:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (12)$$

A equação (12) representa a forma diferencial da segunda equação de Maxwell.

### LEI DE FARADAY:

A Lei de Faraday pode ser descrita por:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (13)$$

Onde:

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (14)$$

Substituindo (14) em (13), temos:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{d \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}}{dt} = \oint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad (15)$$

De acordo com o Teorema de Stokes:

$$\oint_S \vec{\nabla} \times \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (16)$$

Substituindo (15) em (16), temos:

$$\oint_S \vec{\nabla} \times \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

Donde se conclui que:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (17)$$

A equação (17) é a forma diferencial da 3ª equação de Maxwell.

### LEI DE AMPÈRE:

De acordo com a Lei de Ampère temos assim:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu I \quad (18)$$

Pode-se escrever a mesma relação da forma diferencial utilizando o teorema de Stokes, que nos diz:

$$\int_S \vec{\nabla} \times \vec{B} \cdot d\vec{S} = \oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} \quad (19)$$

Substituindo (19) e (2) em (18), teremos:

$$\int_S \vec{\nabla} \times \vec{B} \cdot d\vec{S} = \mu \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S}$$

Logo:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{J} \quad (20)$$

Ou simplesmente:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$$

A equação acima apresenta um erro. Quando aplicarmos o divergente em ambos os lados, observaremos:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu \vec{\nabla} \cdot \vec{J}$$

Onde:

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

Que implica num resultado fisicamente incorreto:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \tag{21}$$

Substituindo as equações (2) e (3) na equação (1), teremos:

$$\int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = - \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV$$

Aplicando o teorema da divergência, obteremos a forma diferencial:

$$\int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{J} dV = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = - \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = - \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \tag{22}$$

A equação (22) equivale à equação de continuidade, que expressa a conservação de carga elétrica. A equação (21) está em desacordo com a equação da continuidade. Maxwell corrigiu este erro acrescentando mais um termo na equação, relativo à geração do campo elétrico pela variação do campo magnético, tendo em vista uma simetria com a lei de Faraday. Se derivarmos no tempo a lei de Gauss em ambos os lados, teremos a

comprovação de uma corrente elétrica, resultado da variação do fluxo de campo elétrico numa superfície Gaussiana. Esta corrente comprova a continuidade da corrente elétrica num circuito que alimenta um capacitor. Existe uma corrente elétrica na fase de carregamento e descarregamento do capacitor, mesmo não existindo transporte de carga elétrica. Esta corrente foi denominada corrente de deslocamento. A lei de Ampère acrescida da corrente de deslocamento obedece à equação (22), que pode ser verificado facilmente aplicando o divergente em ambos os lados da equação (28) da tabela, onde esta lei está devidamente corrigida.

Definimos o fluxo do campo elétrico numa superfície gaussiana como:

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (23)$$

Derivando ambos os lados da lei de Gauss temos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left( \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \right) &= \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{q}{\epsilon} \right) \\ \frac{\partial}{\partial t} \left( \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \right) &= \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial q}{\partial t} \end{aligned} \quad (24)$$

Substituindo (23) e (1) em (24) temos:

$$\frac{\partial \Phi_E}{\partial t} = \frac{I}{\epsilon}$$

Onde definimos a corrente de deslocamento:

$$I_d = \epsilon \frac{\partial \Phi_E}{\partial t} \quad (25)$$

A seguir nas tabelas 1 e 2 mostramos as equações de Maxwell na forma integral e diferencial. Foi acrescentada a equação (25) nas equações (18) e (20) dando origem às equações (27) e (28) da tabela:

Lei de Gauss – Caso eletrostático	$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon}$ (6)
Lei de Gauss – Caso Magnetostático	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$ (11)
Lei de Faraday	$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ (13)
Lei de Ampère	$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu(I + I_d)$ (26)
	$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu I + \mu\epsilon \frac{\partial\Phi_E}{\partial t}$ (27)

Tabela 1 – Equações de Maxwell na forma integral

Lei de Gauss – Caso eletrostático	$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$ (10)
Lei de Gauss – Caso Magnetostático	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$ (12)
Lei de Faraday	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ (17)
Lei de Ampère	$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ (28)

Tabela 2 – Equações de Maxwell na forma diferencial

### EQUAÇÃO DE ONDA ELETROMAGNÉTICA:

A seguir, mostraremos que campos magnéticos e elétricos variáveis no tempo, podem gerar ondas eletromagnéticas. Para demonstrar que as equações de Maxwell levam, inevitavelmente, a ondas eletromagnéticas, é necessário fazer uso das equações de Maxwell na forma diferencial. Será demonstrada a equação de

onda para o caso particular de propagação no vácuo, onde não há carga elétrica nem corrente elétrica. Neste caso, as equações assumem a seguinte forma:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (29)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (30)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (31)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (32)$$

Aplicando o operador rotacional em ambos os lados das equações (31), teremos:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \vec{\nabla} \times \left( -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right)$$

Que equivale a:

$$\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \vec{\nabla}^2 \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{B}) \quad (33)$$

Substituindo (29) e (32) em (33), temos:

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (34)$$

Aplicando o operador rotacional em ambos os lados das equações (32), teremos:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{B}) = \mu_0 \epsilon_0 \vec{\nabla} \times \left( \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

Que resulta em:

$$\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) - \vec{\nabla}^2 \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{E}) \quad (35)$$

Substituindo (30) e (31) em (35), temos:

$$\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (36)$$

As equações (34) e (36) são conhecidas como equações de propagação de ondas eletromagnéticas.

Propondo uma onda eletromagnética onde o campo elétrico possui somente componente y e o campo magnético somente componente z, teremos:

$$\vec{E} = (0, \vec{E}_y, 0)$$

$$\vec{B} = (0, 0, \vec{B}_z)$$

É importante frisar que a proposta não influencia no resultado final, pois as soluções valem para cada caso.

Substituindo estes campos nas equações (34) e (36), temos:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad (37)$$

$$\frac{\partial^2 B_z}{\partial t^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 B_z}{\partial t^2} \quad (38)$$

As soluções dessas equações são:

$$E_y = E_0 \text{sen}(kx - \omega t)$$

$$B_z = B_0 \text{sen}(kx - \omega t)$$

Onde:

$$k = 2\pi/\lambda$$

$$\omega = 2\pi f$$

$k$ : número de onda;

$\lambda$ : comprimento da onda eletromagnética;

$f$ : frequência

$\omega$ : frequência angular.

A velocidade de propagação da onda eletromagnética é então obtida a partir da equação geral de propagação de uma onda:

$$\nabla^2 u = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

Onde  $c$  é a velocidade de propagação nesta onda.

Temos então para a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (39)$$

A equação (39) mostra que a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética não depende nem da velocidade relativa do meio na qual ela se propaga, nem do comprimento de onda da onda eletromagnética considerada. Portanto, a velocidade da luz pode ser determinada usando microondas, luz ou qualquer onda eletromagnética.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MEC, *Parâmetros curriculares Nacionais para o Ensino Médio*, 1999.
- [2] GAMOW, GEORGE, *Biografia da Física*, Editora Zahar, Rio de Janeiro, 1963.
- [3] <<http://pt.wikipedia.org>> Fevereiro de 2008
- [4] <<http://br.geocities.com>> Fevereiro de 2008
- [5] HALLIDAY, DAVID et al. *Fundamentos da Física 3 – Eletromagnetismo*, Quarta Edição, LCT editora, Rio de Janeiro, 1996.
- [6] LUIS, ADIR M. e GOUVEIA, SERGIO, *Eletricidade, Magnetismo e Eletromagnetismo*, Francisco Alves Editora, Rio de Janeiro, 1989.
- [7] <<http://www.on.br>> Fevereiro de 2008
- [8] ALONSO, MARCELO e FINN, EDWARD J., *Física: um curso universitário*, Edgard Blücher, São Paulo, 1972.
- [9] <<http://www.fmboschetto.it/images/esperienze/bobina.jpg>> Março de 2008
- [10] <<http://www.if.ufrgs.br/~ivomai>> Fevereiro de 2008