

2. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

2.1. O que são microondas?

Chamamos de microondas as ondas eletromagnéticas com frequências desde 300 MHz (300×10^6 Hz) até 300 GHz (300×10^9 Hz) e comprimentos de onda desde 1 m até 1 mm. São, portanto, ondas que estão entre a região de ondas de TV e a região do infravermelho no espectro das ondas eletromagnéticas. Inicialmente as microondas foram utilizadas para a telecomunicação, como em radares e telefone. 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.

A existência de ondas eletromagnéticas foi proposta por James Clerk Maxwell em 1864, através de suas famosas equações. Em 1888 Heinrich Hertz foi o primeiro a demonstrar, experimentalmente, a existência de ondas eletromagnéticas ao construir um dispositivo capaz de produzir ondas de rádio.

2.2. Mas como são geradas essas ondas?

Para entender melhor esse fenômeno, vamos analisar três situações em que ocorre a formação de ondas.

1º) Uma barra de madeira colocada sobre a superfície da água de maneira que flutue. Ao agitá-la para cima e para baixo da superfície surgem ondas na água. Estas são **ondas mecânicas**.

2º) Um bastão isolante carregado eletricamente gera um campo elétrico em sua volta. Agitando-o de um lado para o outro, o campo elétrico será variável. Segundo a previsão feita por Maxwell, essa variação gera um campo magnético e, como consequência, uma **onda eletromagnética**.

3º) Através de um circuito elétrico formado por uma bateria, uma bobina e um capacitor interligados por condutores, como mostra a figura 1.11, temos um circuito oscilante. A variação do campo elétrico é obtida através de sucessivos processos de carga e descarga do capacitor. O capacitor carregado tem um campo elétrico entre suas placas; durante o processo de descarga, o campo elétrico diminui de intensidade e surge um campo magnético induzido e uma corrente elétrica que atravessa a bobina, gerando um campo magnético crescente. Com o capacitor totalmente descarregado, o campo elétrico é nulo e o campo magnético da bobina atinge valor máximo. Os campos elétrico e magnético oscilantes com as periódicas cargas e descargas do capacitor regeneram um ao outro, gerando **ondas eletromagnéticas**.

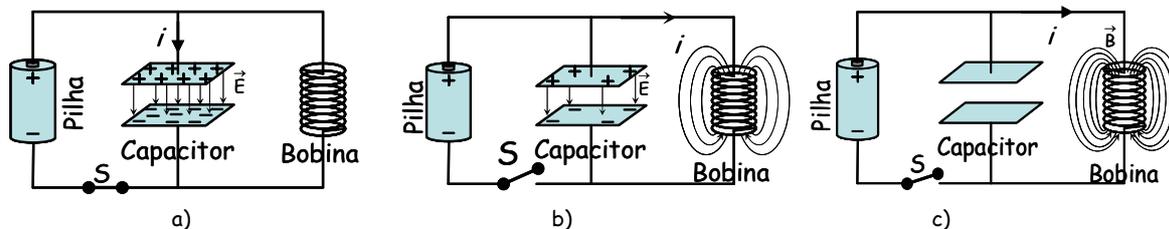


Fig. 1.11- a) circuito oscilante capacitor, bobina, fonte, com o capacitor carregado com campo elétrico máximo e o campo magnético na bobina é nulo. b) capacitor descarregando gera uma corrente, o campo elétrico decresce e o campo magnético na bobina cresce. c) capacitor descarregado, campo elétrico nulo e campo magnético máximo.

Resumindo podemos dizer: Maxwell descobriu que cargas elétricas oscilantes ou aceleradas geram ondas eletromagnéticas.

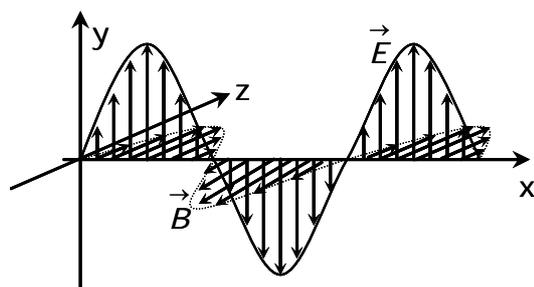


Fig. 1.12 - O campo elétrico \vec{E} oscilando no plano xy e o campo magnético \vec{B} oscilando no plano xz de uma onda eletromagnética no espaço livre. Os campos estão em planos mutuamente perpendiculares e perpendiculares à direção de propagação x da onda.

Maxwell conseguiu descrever matematicamente os problemas dos campos elétrico e magnético, descrevendo-os como ondas conforme mostra a figura 1.12. Elas são oscilações periódicas emitidas por cargas oscilantes e são capazes de transportar energia de um lugar para outro.

A frequência das ondas geradas pelo circuito mostrado na figura 1.11 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.

Circuitos ressonantes deste tipo não são apropriados para geração de ondas com frequências elevadas, na faixa de GHz, como é o caso dos fornos de microondas, que utilizam ondas com frequência de 2,45 GHz. Neste caso, as ondas são geradas por um magnetron.

A tabela abaixo mostra a denominação das bandas para a faixa de microondas.

Designação	Frequência	Designação	Frequência
Banda L	1 a 2 GHz	Banda Q	30 a 50 GHz
Banda S	2 a 4 GHz	Banda U	40 a 60 GHz
Banda C	4 a 8 GHz	Banda V	50 a 75 GHz
Banda X	8 a 12 GHz	Banda E	60 a 90 GHz
Banda K_u	12 a 18 GHz	Banda W	75 a 110 GHz
Banda K	18 a 26 GHz	Banda F	90 a 140 GHz
Banda K_a	26 a 40 GHz	Banda D	110 a 170 GHz

Fonte: http://es.wikipedia.org/wiki/Microonda#Bandas_de_frecuencia_de_microondas

2.3. Como funciona o magnetron?

O princípio de funcionamento do magnetron está baseado no efeito de circuitos ressonantes, conforme descrito a seguir.

O circuito ressonante tem a capacidade de gerar ondas e é formado pela ligação em paralelo de uma bobina e um capacitor. 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".

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 eléctrica. Quando ligadas a uma fonte de alimentação, uma das duas placas se carregará negativamente e a outra positivamente, como mostra a figura 1.13. 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.

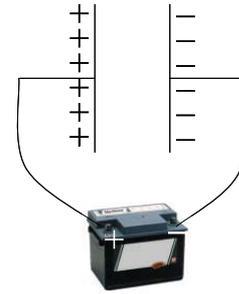


Figura 1.13 - Capacitor de placas paralelas.

A estrutura básica do magnetron utilizado para gerar a frequência de 2,45 GHz, utilizada nos fornos de microondas, é constituída por ânodo, cátodo, antena e ímãs permanentes, conforme representado na figura 1.14. O princípio de funcionamento é semelhante ao do circuito oscilante descrito acima. O ânodo é uma peça metálica oca, geralmente feita de cobre ou ferro, contendo um número par de aletas na sua cavidade, apontando para o cátodo. O cátodo é um filamento que é o emissor de elétrons e fica localizado no centro da cavidade do magnetron. A antena fica ligada a uma aleta do anodo e é responsável por conduzir as microondas para a parte externa do magnetron.

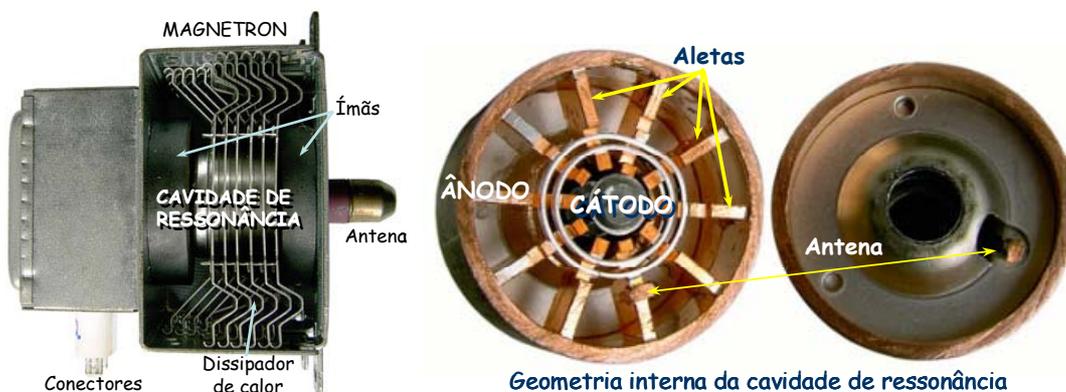


Figura 1.14 - A) Fotografia de um magnetron e as principais partes. B) É uma fotografia que mostra a geometria interna da cavidade de ressonância aberta, e suas principais partes.

A parede da cavidade ressonante em conjunto com as aletas se comportam como uma série bobinas e as aletas como um conjunto capacitores. Enquanto uma corrente eléctrica circula na parede da cavidade e nas aletas, gerando campos magnéticos variáveis, formam-se campos eléctricos variáveis nos

espaços que separam as aletas. Assim o conjunto se comporta como um circuito ressonante com os valores de indutância e capacitância muito pequenos, emitindo oscilações com alta frequência.

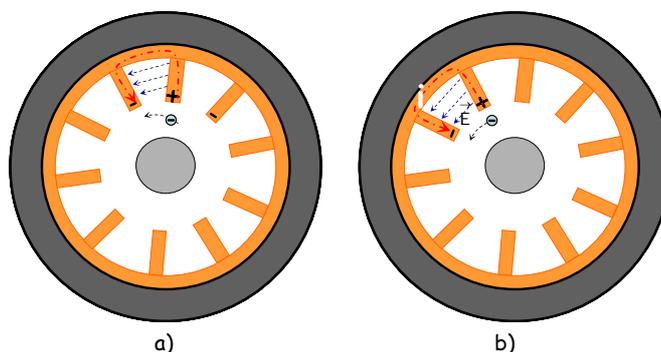


Figura 1,15- Dois instantes diferentes de um elétron se movendo na cavidade de um magnetron.

Uma análise detalhada do funcionamento do magnetron revela que o cátodo quando aquecido emite elétrons. Ele está ligado ao pólo negativo submetido a uma voltagem de 4.000 V em relação ao ânodo. Os elétrons são emitidos em direção ao ânodo, porém o campo magnético criado pelos dois ímãs circulares posicionados entre o cátodo e o ânodo, aplica uma força magnética sobre estes elétrons, obrigando-os a descreverem uma trajetória circular antes de, eventualmente, alcançarem o ânodo (ver figura 1.15). A passagem dos elétrons nas proximidades de uma aleta induz uma carga positiva, repelindo os elétrons gerando uma corrente nas aletas e na parede do ânodo. Isso ocorre porque um elétron, enquanto se aproxima de uma aleta, induz nesta uma carga positiva que aumenta de intensidade e diminui à medida que ele segue em frente gerando uma corrente alternada. "Quando a cavidade conduz uma corrente, a parede da cavidade comporta-se como uma bobina e a abertura da cavidade como um capacitor, criando assim um circuito ressonante".¹ Esta corrente gera, na cavidade do ânodo, campos magnéticos e elétricos variáveis e por sua vez emite microondas. Uma analogia entre o circuito ressonante formado por capacitor e indutor e o magnetron é mostrado na figura 1.16.

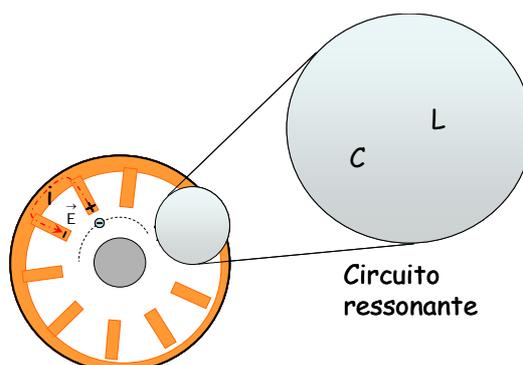


Figura 1.16 - A figura mostra em detalhes uma das cavidades do magnetron funcionando como um circuito ressonante LC (indutor-capacitor) em paralelo.

Na realidade não é apenas um elétron emitido que se move na cavidade do magnetron, mas um aglomerado deles que giram juntos, ejetados a partir do cátodo devido à diferença de potencial existente, movendo-se na forma de roda raiada e influenciados pelo campo magnético dos ímãs permanentes. Essa aglomeração de elétrons de alta energia gira no espaço da cavidade, localizado entre o cátodo e o ânodo, e eventualmente alcançam o ânodo, como podemos observar na figura 1.16. Enquanto os elétrons giram na cavidade e passam próximos das aletas, eles vão alternando as cargas elétricas positivas e negativas, conforme mostra a figura 1.17. Essa oscilação produzida pela

¹ Manual: Princípios de Microondas Brastemp.

alternância entre cargas positivas e negativas nas aletas funciona como circuito ressonante, que é repetido 2.450.000 vezes por segundo e gera microondas de alta frequência (2,45 GHz). A antena capta e irradia a energia dessas ondas para a câmara de cozimento do forno através do guia de ondas, que nada mais é do que um tubo de metal retangular ou cilíndrico.



Figura 1.17 - Nuvem de elétrons raiada sendo emitida pelo catodo do magnetron.

2.4. Como as ondas são irradiadas até o interior da câmara de cozimento?

O magnetron possui uma antena que se estende até o topo do tubo que capta e irradia a energia dessas ondas para a câmara de cozimento do forno através do guia de ondas. O guia de onda nada mais é do que um tubo oco de metal retangular ou elíptico de dimensões comparáveis ao comprimento de onda utilizado. Esses tubos são fabricados em metais que tenham a capacidade de refletir e direcionar as microondas até o interior da câmara de cozimento. Os modos de vibração das microondas caracterizam-



Figura 1.18- A primeira foto mostra a vista externa do guia de onda, ou seja, no local onde o magnetron é preso; a segunda foto mostra o guia de onda chegando na câmara de cozimento.

se pela formação de ondas estacionárias tendo as paredes como condições de contorno, pois as microondas devem ficar confinadas no interior do tubo. Para evitar o surgimento de corrente elétrica nas paredes dos guias, os nodos das ondas estacionárias devem coincidir com as paredes do tubo. Para satisfazer essa condição, a seção do guia de ondas deve ter dimensão igual ou um múltiplo à $\lambda/2$. A figura 1.17 mostra um exemplo de guia de onda utilizado num forno de microondas.

2.5. Como as microondas aquecem os 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, conforme mostra a figura 1.19.

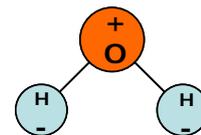


Figura 1.19 - A molécula de água é polar. Tem pólo positivo e pólo negativo.

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 e, como consequência, também ocorre o aumento da temperatura. A figura 1.20 mostra uma seqüência de variações de um campo elétrico e a tendência de uma molécula de água em acompanhar essa variação.

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.

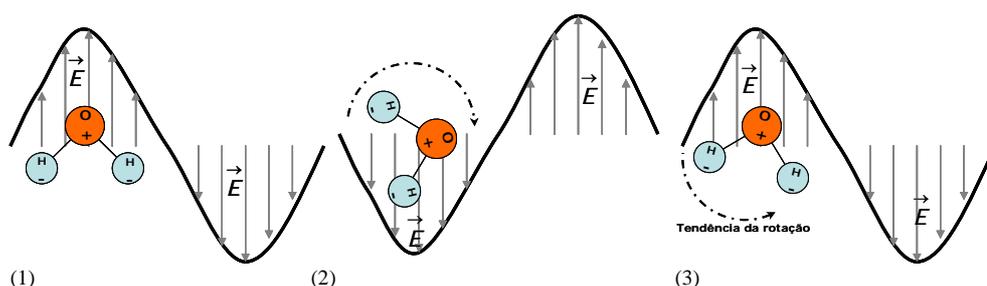


Fig. 1.20 - No instante (1) a molécula da água está alinhada com o campo elétrico da onda; No instante (2) o campo inverteu seu sentido e a molécula tende a girar; No instante (3) a onda muda de sentido novamente e a molécula tende a acompanhar o campo. O processo se repete $2,45 \cdot 10^9$ vezes por segundo, acompanhando a frequência da onda.

2.6. Tamanho do forno de microondas

Um bom projeto de forno de microondas leva em consideração quatro aspectos importantes, que são:

- 1 - o tamanho compatível com as cozinhas e espaço sobre balcões;
- 2 - o tamanho da cavidade interna compatível com as necessidades da cozinha e principalmente o comprimento de onda utilizado no processo;
- 3 - a distribuição uniforme de energia de microondas, para todos os tipos e quantidades de alimentos;
- 4 - o nível ótimo de potência no interior da cavidade do forno.

Ondas confinadas entre duas paredes, como as microondas na câmara de cozimento ou uma corda presa pelas duas extremidades e posta a vibrar, sofrem reflexões que fazem com que haja ondas deslocando-se em sentidos opostos. Essas ondas de mesma frequência, mesma amplitude, mesma velocidade, mesma direção e sentidos opostos, se sobrepõem. A superposição pode formar **ondas estacionárias**, dependendo da relação entre o comprimento de onda e da distância entre as extremidades.

Na figura 1.21 vemos frentes de ondas estacionárias formadas por uma corda fixa nas duas extremidades. Se a corda for excitada por um movimento harmônico simples com pequena amplitude, podemos verificar que, para certas frequências, aparecem configurações de ondas estacionárias.

Uma onda estacionária se caracteriza pelo fato de que pontos da corda realizam MHS com diferentes amplitudes. O ponto da corda que realiza um movimento harmônico com amplitude máxima é chamado ventre, e o ponto que não vibra é um **nó** ou nodo. Os pontos intermediários entre um **ventre** (V)

e um nó (N) realizam movimento harmônico com a mesma frequência, mas com amplitudes menores que o valor máximo encontrado num ventre. Observe que as duas pontas da corda estão fixas e não vibram. Portanto, esses pontos também formam nodos.

É importante lembrar que onda transporta energia, mas no caso das ondas estacionárias isso não ocorre, pois os nodos não vibram, ou seja, eles não transportam energia. Nesse caso a energia fica confinada nas regiões de vibração ocorrendo, periodicamente, conversões de energia cinética em energia potencial elástica e vice-versa. Nesse caso se mantém o termo "onda" por se tratar de uma superposição de duas ondas que se propagam em sentidos opostos.

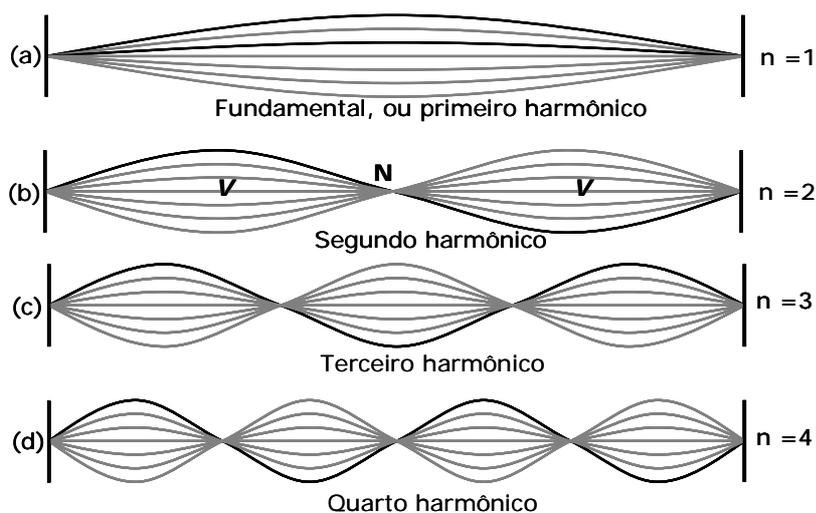


Figura 1.21 - Ondas estacionárias numa corda com as duas extremidades fixas. Vemos quatro modos de vibração de uma mesma corda ou quatro harmônicos. As regiões que apresentam vibração (V) são os ventres, e as regiões sem vibração (N) são os nodos.

A formação de ondas estacionárias não é uma exclusividade para cordas ou ondas sonoras. O fenômeno ocorre com qualquer tipo de onda confinada, inclusive ondas eletromagnéticas. Num forno de microondas, a câmara de cozimento é dimensionada de maneira que as suas paredes sempre coincidam com nós das microondas, como vemos na figura 1.22. Assim, praticamente não haverá absorção de energia das ondas pelas paredes do forno, proporcionando reflexões próximas à condição ideal de formação de onda estacionária. O alimento é colocado sobre um **prato giratório** para garantir uma distribuição uniforme de energia, pois se o alimento permanecesse estático, teríamos pontos frios em locais que coincidissem com os nodos das ondas estacionárias.

A distância entre as paredes da câmara de cozimento deve, então, ser um múltiplo inteiro de meio

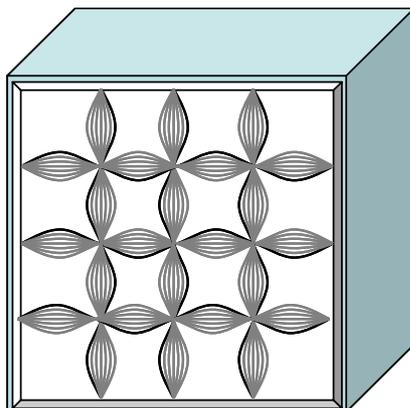


Figura 1.22 - Ondas estacionárias no interior de um forno de microondas.

comprimento de onda das microondas utilizadas no processo. Como as microondas utilizadas têm uma frequência de 2,45 GHz, um comprimento de onda corresponde à: $\lambda = \frac{v}{f} \rightarrow$

$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2,45 \times 10^9 \text{ Hz}} = 0,1224 \text{ m}$ e meio comprimento de onda vale $\frac{\lambda}{2} = \frac{12,24 \text{ cm}}{2} = 6,12 \text{ cm}$. Portanto, as dimensões internas da câmara de cozimento deverão ser múltiplos inteiros de 6,12 cm.

O forno de microondas é um aparelho relativamente simples, mas o seu funcionamento, como pode ser visto, exige uma cuidadosa integração de todos os componentes. Vamos considerar, em maiores detalhes, o funcionamento dos demais componentes.

2.7. De que é constituído e como funciona o circuito de alta tensão?

O circuito de alta tensão, também conhecido como "circuito dobrador de meia onda", é constituído por um transformador elevador de tensão, por um capacitor de alta tensão e um diodo. A figura 1.23 mostra o esquema desse circuito².

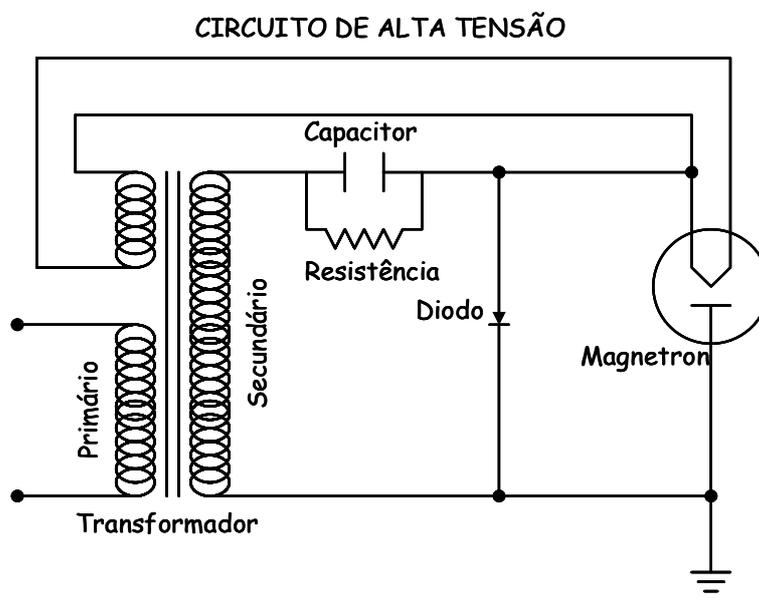


Figura 1. 23 - Circuito de alta tensão constituído por um transformador, um capacitor, um diodo e uma resistência de drenagem.

O cabo de força liga a tomada de 220 V ou 110 V ao primário do transformador. O secundário gera uma tensão alternada de aproximadamente 2.000 V. Durante o semiciclo positivo da tensão em corrente alternada, o capacitor se carrega e fica submetido a uma tensão de 2000 V, enquanto o magnetron permanece desligado, pois a corrente passa pelo diodo que causa um curto circuito. Durante o semiciclo negativo o capacitor se descarrega e a sua tensão é somada à tensão da bobina secundária do transformador. Eles funcionam como uma associação em série de geradores e geram uma tensão total de aproximadamente 4.000 V, que é aplicada diretamente no magnetron. Note que em cada ciclo completo da corrente alternada, o magnetron está ligado durante meio ciclo e está desligado durante o outro meio ciclo. Como a frequência de rede utilizada no Brasil é de 60 Hz, o magnetron liga e desliga sessenta vezes por segundo. A figura 1.24 mostra o esquema.³

² Figura 1.23 adaptada do Manual de Treinamento da Brastemp.

³ Figura 1.24 adaptada do Manual de Treinamento da Brastemp.

O circuito também possui uma resistência de $9\text{ M}\Omega$ ou $10\text{ M}\Omega$, ligada em paralelo com o capacitor. Esse resistor de drenagem descarrega o capacitor quando o forno é desligado. O tempo necessário para a descarga completa é de aproximadamente 30 segundos.

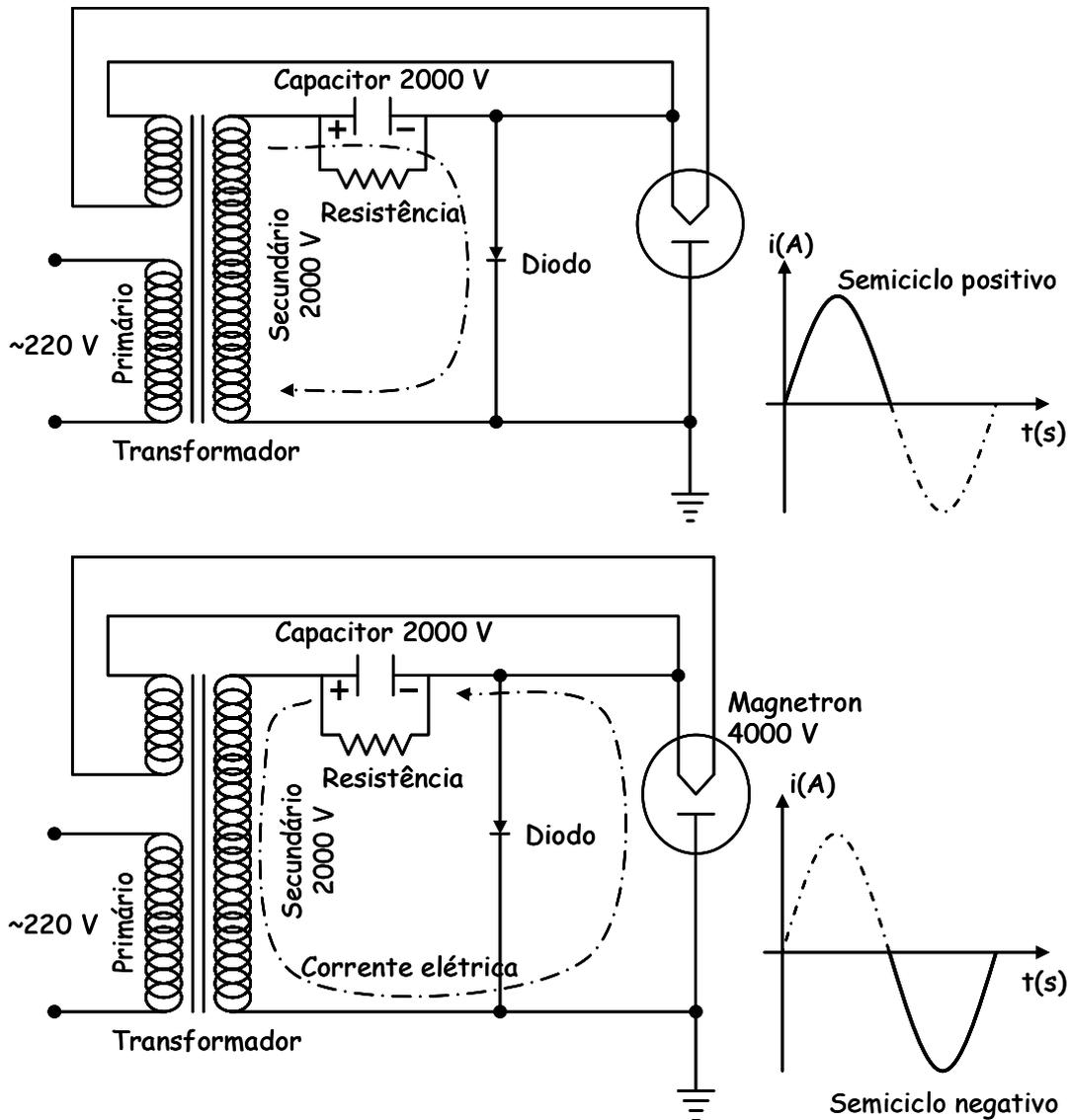


Figura 1.24 - Circuito de alta tensão em operação. O primeiro esquema (a) mostra o circuito em operação durante o semiciclo positivo da corrente alternada. O segundo esquema (b) mostra o circuito em operação durante o semiciclo negativo da corrente.

2.8. Que materiais são utilizados na fabricação e que vasilhames podem ser utilizados no forno de microondas?

As microondas são ondas eletromagnéticas e têm características semelhantes às ondas utilizadas na comunicação, luz, raios x... Para entender o que acontece com as microondas no interior da câmara de cozimento de um forno, devemos conhecer três características importantes das microondas:

1ª) elas são refletidas pelos metais, tal como a luz é refletida por um espelho;

2ª) elas atravessam a maioria dos vidros, plásticos, porcelanas e papéis, sofrendo os mesmos efeitos que a luz sofre quando passa por meios transparentes como o ar ou o vidro. Ou seja, sofrem refração, mas praticamente não sofrem absorção da sua energia;

3ª) as microondas são absorvidas pelo efeito da ressonância apenas por algumas substâncias presentes nos alimentos, como água, açúcares e/ou gorduras, sendo convertidas em calor.

Os metais, vidro, porcelanas e o próprio ar não são aquecidos diretamente pelas microondas porque esses materiais não absorvem a energia das microondas, porém os metais têm a capacidade de refleti-las, enquanto materiais como vidro, porcelanas e papéis são transparentes para essa banda de frequências.

Portanto, os vasilhames que serão utilizados e o prato giratório devem ser fabricados com materiais transparentes para as microondas, permitindo que elas cheguem até os alimentos que desejamos cozer ou aquecer. As paredes da cavidade de cozimento são feitas de metal, pois, assim, as microondas sofrem múltiplas reflexões até que sejam absorvidas pelos alimentos. Mas devemos lembrar que as microondas são formadas por uma combinação de campos elétrico e magnético que se propagam pelo espaço carregando energia. Um metal exposto a estas ondas poderá apresentar correntes elétricas que acompanham as variações do campo elétrico. Isso não causará problemas enquanto o objeto puder suportar a passagem dessas correntes sem causar superaquecimento e enquanto as cargas não escaparem para o ar causando faíscas. Por isso as paredes da cavidade devem ser pintadas com tinta esmalte, de maneira que nenhuma parte fique descoberta, evitando a formação de faíscas elétricas. Também não é aconselhável introduzir objetos metálicos pontiagudos, como garfos, ou cobrir os alimentos com papel alumínio que formam pontas, pois podem emitir faíscas elétricas, danificando o aparelho. Além disso, o papel alumínio reflete as microondas dificultando que elas sejam absorvidas pelos alimentos.

2.9. As microondas fazem mal à saúde?

Existem muitos mitos que desaconselham o uso de fornos de microondas para preparar alimentos. Esses mitos são grandes equívocos, pois o pouco conhecimento sobre o tema leva muitas pessoas a acreditarem que os alimentos podem ficar contaminados por algum tipo de radiação causadora de doenças como o câncer. Além disso, pensam que os alimentos perdem seu valor nutritivo pela "degradação" causada pelas radiações.

As microondas são radiação de baixa energia, tanto que são insuficientes para ionizar as moléculas ou átomos dos alimentos. Radiações ionizantes são aquelas que têm energia suficiente para arrancar elétrons dos átomos, como é o caso dos raios ultra-violeta C , raios x e raios γ . A energia que um fóton da radiação deve transferir para arrancar um elétron de um átomo depende do elemento e varia de 2,5 a 25 eV ($1\text{eV} = 1,9 \cdot 10^{-19}\text{J}$). As microondas não têm energia suficiente para provocar esse efeito, portanto não são ionizantes. A energia que carregam, porém, é suficiente para provocar o aumento da energia cinética de certas moléculas e, como consequência, o aumento da temperatura. Assim, o único problema que podem causar são queimaduras profundas em caso de acidentes. Portanto, não devemos entrar em contato direto com as microondas, pois elas danificam células vivas por aumentar a energia cinética e causar queimaduras graves.

Apesar da conveniência e necessidade de tomar medidas de segurança e prevenção contra queimaduras com microondas, não existe nenhum perigo de os alimentos preparados num forno de microondas ficarem contaminados com radiação. A única coisa que permanece nos alimentos é o aumento de sua energia interna (temperatura). As microondas deixam de existir tão logo o aparelho for desligado, não permanecendo nem nos alimentos, nem no forno.

Leia mais sobre radiações não ionizantes no seguinte endereço eletrônico:

<http://www.prorad.com.br/pro/rni.pdf>

2.10. Dispositivos de segurança do forno de microondas.

Enquanto os raios ultravioleta C, raios x e os raios γ são radiações ionizantes, podendo causar alterações moleculares com efeitos cumulativos e danos permanentes aos tecidos, as demais radiações do espectro eletromagnético, localizadas abaixo do ultravioleta C, incluindo as ondas de comunicação, microondas até a luz visível, não causam alteração na estrutura molecular nos tecidos. O único problema que as microondas podem causar são queimaduras e, para evitá-las, são adotadas medidas de segurança em duas áreas: as microondas propriamente ditas e o projeto do forno.

Os órgãos competentes, como a ANVISA, estabelecem padrões de segurança para a operação de aparelhos que utilizam radiações no seu funcionamento. Para os fornos de microondas, os padrões obrigatórios, relativos a vazamentos permissíveis em 5 cm, partindo da vedação da porta, não podem ultrapassar 1 miliwatt por centímetro quadrado (1 mW/cm^2) para um forno recém produzido, e 5 mW/cm^2 durante a sua vida útil. Esses padrões são muito baixos quando comparados com doses administradas durante tratamento médico de diatermia, por exemplo, que são de 100 mW/cm^2 .

As microondas respeitam a lei do inverso do quadrado com a distância tal como um campo elétrico. Isto é, se duplicarmos a distância à fonte geradora, a potência das microondas é reduzida a um quarto; e se triplicarmos a distância, a potência é reduzida nove vezes. Assim, podemos dizer que se houver vazamento de microondas do forno, e este vazamento a 5 cm do forno apresentar uma intensidade de 5 mW/cm^2 a 10 cm, o nível de energia será de $1,25 \text{ mW/cm}^2$; e a 15 cm haverá uma potência de $0,56$

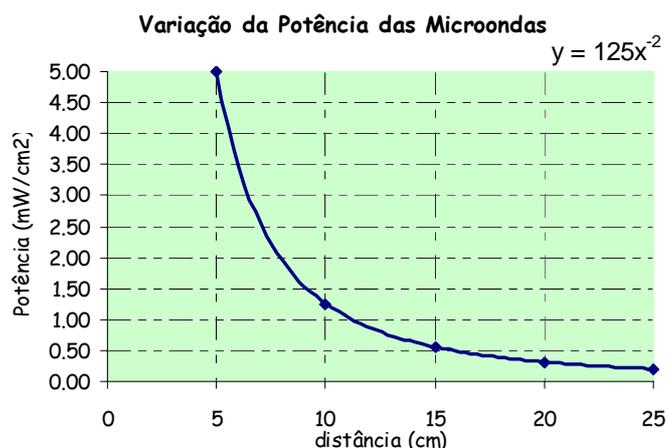


Figura 1.25 - Gráfico representando a variação da potência das microondas com a distância.

mW/cm^2 . O gráfico que representa essa variação está representado na figura 1.25,

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; a cavidade de choque; e a vedação de absorção, que praticamente elimina toda a possibilidade de vazamento.

O mecanismo de travamento pressiona a porta contra a moldura metálica do forno, formando o primeiro dispositivo de segurança conhecido como **selo capacitivo**. Esse ajuste da porta contra a moldura metálica mediada por um material isolante garante a reflexão da maior parte das ondas de volta para a cavidade de cozimento, evitando vazamento e formação de faíscas elétricas. A janela da porta é fabricada em três camadas: uma de vidro temperado ou plástico externo, uma grade metálica intermediária e um filme plástico translúcido interno. O vidro tem a função de permitir a passagem da luz e a camada de filme plástico interno, além de permitir a passagem da luz, protege a grade metálica contra o acúmulo de sujeiras e contra a corrosão. A grade metálica é projetada de maneira que as

perfurações tenham um diâmetro muito maior que o comprimento de onda da luz, de forma a permitir a visibilidade, porém com diâmetro muito menor que o comprimento de onda, bloqueando e refletindo as microondas de volta para o interior da cavidade de cozimento.

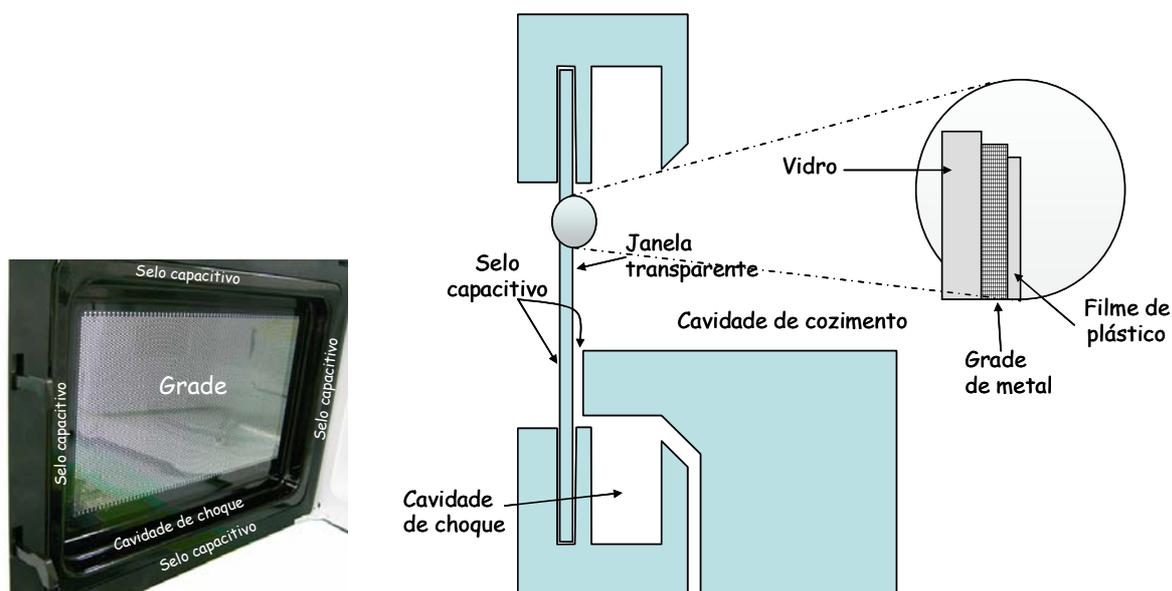


Figura 1.26 - A figura (A) mostra a fotografia de uma porta de um forno de microondas indicando os dispositivos de segurança: a janela com a grade metálica, o selo capacitivo e a cavidade de choque. Em (B) mostra estes dispositivos esquematicamente.

Caso houver a passagem de ondas pelo **selo capacitivo**, existe outro dispositivo que bloqueia a sua passagem denominada "**cavidade de choque**". As dimensões da "cavidade de choque" correspondem a $\frac{1}{4}$ de comprimento de onda. A onda que vaza pelo selo capacitivo incide no fundo da cavidade de choque, é refletida retornando até o ponto de vazamento com uma defasagem que resulta no cancelamento. Assim é eliminada qualquer possibilidade da onda escapar para fora do forno.

Por último temos a **vedação de absorção**, fabricada em ferrite emborrachada, que tem a capacidade de absorver qualquer onda com frequência próxima de 2,45 GHz que possa ultrapassar a "cavidade de choque". As tiras de ferrite são projetadas para absorver frequências próximas de 2,45 GHz de baixa energia e são colocadas ao redor da borda da porta garantido um ajuste perfeito entre a porta e a borda do forno.

Além do sistema de proteção contra vazamentos, também existe um sistema de três chaves de segurança chamadas de "primária", "secundária" e "de segurança" que são acionadas pelo movimento da porta. As chaves "primária" e "secundária" desligam a fonte de energia quando a porta for aberta; a terceira, que é a chave "de segurança", inspeciona as outras duas e, caso aquelas não funcionem adequadamente, queimando o fusível, acaba por desligar a fonte de energia.

2.11. O forno de microondas aquece os alimentos de fora para dentro

Muitas pessoas pensam que o forno de microondas produz um cozimento uniforme. As microondas penetram no alimento até uma determinada profundidade, dependendo da densidade deste. Em alimentos menos densos como um pão, as microondas penetram de 5 a 7 cm, enquanto que em alimentos mais densos, como a carne, elas penetram entre 2 a 3 cm. À medida que as microondas penetram no alimento, sua energia é absorvida por ressonância e sua potência diminui, pois a energia da onda é absorvida e transformada em calor. Assim, alimentos mais grossos serão cozidos por microondas apenas

até a profundidade em que elas conseguem penetrar, ou seja, as primeiras camadas externas. As camadas internas serão cozidas por condução do calor, da mesma forma que em um fogão convencional.

Também é importante destacar que a frequência de radiação emitida pelo magnetron não é igual à frequência natural de oscilação das moléculas da água, açúcares ou gorduras. Isso faria com que a energia das microondas fosse totalmente absorvida nas primeiras camadas do alimento e levaria a situações em que, em pouco tempo, o alimento estaria totalmente cozido nas camadas externas, enquanto que as camadas internas permaneceriam cruas. Se a frequência fosse muito baixa, a penetração seria maior, porém a energia seria muito fracamente absorvida e não seria capaz de promover o aquecimento. Portanto, frequências elevadas penetram menos e, como consequência, não aquecem os alimentos internamente; por outro lado, frequências mais baixas penetrariam mais, mas não aqueceriam o suficiente para cozer os alimentos. Por isso escolheu-se um meio termo, ou seja, uma frequência de 2,45 GHz.

2.12. Controle de potência.

Quanto maior for a potência do forno de microondas, mais rápido será o cozimento dos alimentos. Os primeiros fornos eram projetados para trabalhar com uma única potência de saída, que normalmente ficava entre 600 a 700 Watts. Para alguns alimentos esta potência era muito elevada, deixando-os duros ou com aspectos irregulares. Por exemplo, a carne e omeletes ficavam duros e os bolos coziam tão rápido que a superfície ficava irregular. A densidade e as estruturas moleculares dos alimentos são características importantes que devem ser consideradas na escolha do ciclo de funcionamento e da potência de um forno de microondas.

Por causa desses problemas foram desenvolvidos sistemas de controle de potência de saída. A potência pode ser variada de duas maneiras:

- 1 - variando o potencial de alta voltagem aplicada ao magnetron;
- 2 - através do uso de um interruptor intermitente de oscilações do magnetron.

O primeiro sistema consiste na seleção entre potência "alta" e "baixa", mudando a voltagem aplicada no magnetron para variar a potência emitida. A variação da voltagem aplicada ao magnetron é feita através de um sistema de capacitores ligados em paralelo ao circuito de alta tensão, que podem ser colocados antes ou depois do transformador.

INDICAÇÃO	% POTÊNCIA TOTAL	TEMPO			
		Ligado		Desligado	
Alta	100%	22"		22"	
Média	68%	15"	7"	15"	7"
Baixa	41%	9"	13"	9"	13"
Aquecer	10%	2"	20"	2"	20"
Descongela	45%	10"	12"	10"	12"

Figura 1.27 - A tabela mostra os ciclos de 22 segundo normalmente utilizados pela maioria dos fornos de microondas, as respectivas potências e o tempo que fica ligado e desligado nesse ciclo.

O segundo sistema consiste na interrupção das emissões, ligando e desligando o magnetron, intermitentemente, em ciclos específicos e de acordo com uma potência média que se deseja atingir. Esse método é o mais utilizado e necessita de um circuito de controle que ofereça mais opções de potência. A potência média desejada é obtida mediante interrupções de energia fornecida ao magnetron através de um dispositivo de chaveamento, que pode ser um relé ou um TRIAC. O tempo em que o magnetron permanece ligado e desligado determina a potência média e, na maioria dos fornos de

microondas, esse ciclo tem uma duração de 22 s. A tabela da figura 1.26, mostra a potência média do forno em função do tempo que permanece ligado e desligado.⁴

2.13. Que aparelhos utilizam as microondas no seu funcionamento? E na medicina?

O forno de microondas com algumas alterações, principalmente na potência e na frequência utilizadas, também passou a ser usado em processos químicos assistidos por microondas, como aquecimento de substâncias formadas por moléculas polares. Esse é um recurso que traz algumas vantagens quando comparado com métodos de aquecimento que utilizam o fogo ou resistências elétricas. O aquecimento ocorre da mesma forma como nos alimentos. Assim, as paredes dos recipientes apolares ficam mais frias, emitindo menor quantidade de energia para o ambiente, enquanto que o interior da amostra polar permanece aquecido.

Vulcanização de borracha foi a primeira aplicação industrial para os fornos de microondas a partir da década de 1960. Uma combinação entre os métodos de aquecimento que utilizam fontes térmicas (resistências) e microondas leva a uma maior eficiência do processo. Enquanto no sistema que utiliza fontes térmicas o aquecimento da borracha é superficial e externo, o aquecimento gerado pelas microondas é mais profundo, garantindo um aquecimento mais uniforme e, como consequência, uma melhoria na qualidade do produto.

A partir da década de 1980, as microondas tiveram aplicações diversas na indústria como: secagem e cura de polímeros e cerâmicas, geração de plasma para corrosão na indústria da microeletrônica, recuperação de metais em indústrias de reciclagem, pois as microondas são capazes de derreter materiais polares.

O **radar** (**R**adio **D**etection **A**nd **R**anging ou detecção e localização por rádio) foi a primeira aplicação tecnológica para as microondas. O sistema foi desenvolvido durante a Segunda Guerra Mundial, com o objetivo de melhorar a navegação aérea e a localização de aeronaves inimigas. As frequências utilizadas nos radares estão entre 3 GHz e 3,7 GHz, estando inseridas numa classe de frequências conhecidas como SHF (*Super High Frequencies*, frequências super altas). Essa classe de frequências também é utilizada na comunicação de satélites, como o Intelsat IV com a Terra, em rádio-altímetros. Elas apresentam menos efeitos de difração, permitindo uma melhor propagação, inclusive em situações de má visibilidade como na presença de nuvens, nevoeiros ou poeiras.

Pesquisas realizadas na década de 1940, utilizando radiação na faixa das microondas para obter a emissão estimulada em sistemas quânticos, levou ao desenvolvimento de MASERS (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, Amplificação de Microondas por Emissão Estimulada de Radiação).

Na medicina, após verificar que tumores cancerígenos aquecem com maior facilidade quando comparados com outros tecidos, as microondas foram utilizadas por alguns pesquisadores nas cirurgias de câncer de mama. Além disso, microondas de baixa potência são utilizadas no tratamento de artrite e reumatismo. É importante, porém, ressaltar que tais aplicações ainda estão no campo da experimentação, pois ainda não existe uma definição clara e segura da utilização desse tipo de radiação nos tratamentos de saúde.

Outra aplicação tecnológica importante das microondas é na telefonia celular que opera na faixa de 800 MHz a 1 GHz estando inseridas numa classe de frequências conhecidas como UHF (*Ultra High Frequencies*, frequências ultra altas). Essa classe de frequência também incorpora canais utilizados nas operações espaciais, satélites meteorológicos, radioamadorismo, televisão em UHF e radares de aeroportos.

⁴ A tabela foi retirada do Manual de Treinamento BRASTEMP.

Bibliografia

HEWITT, Paul G.; trad. Trieste Freire Ricci e Maria Helena Gravina. Física Conceitual. 9.ed. - Porto Alegre: Editora Bookman, 2002.

TIPLER, Paul A. (Tradução: Horácio Macedo). Física, Volume 1, Editora LTC, 2000.

CARVALHO, Regina Pinto de. Microondas - Temas Atuais de Física. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.

GOMES, Alcides T. Telecomunicações: transmissão e recepção. São Paulo: Ed. Érica, 1985.

FAGUNDES, V., Ondas Polêmicas, Ciência Hoje 31 (181): 54-55, 2002.

Manual BRASTEMP. Princípios de Microondas

ENDEREÇOS ELETRÔNICOS CONSULTADOS

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/waves/magnetron.html>

http://myspace.eng.br/tec/for_mic1.asp#comp_princ

www.itnu.de/radargrundlagen/roehren/tu05-en.html

www.gallawa.com/microtech/magnetron.html

<http://paginas.terra.com.br/informatica/burgoseletronica/magnetron.htm>

<http://www.letronet.com.br/psist/ppesq/ppesqlivcap/ppesqfm/ppesqfmd5/ppesqfm5d2.htm>

<http://www.tpub.com/neets/book11/45i.htm&prev=/search%3Fq%3Dmagn>