

Processamento por micro-ondas

Prof^a Dra. Cynthia Ditchfield

Processamento por micro-ondas

- ✓ Conceitos
- ✓ Equipamentos
- ✓ Aplicações

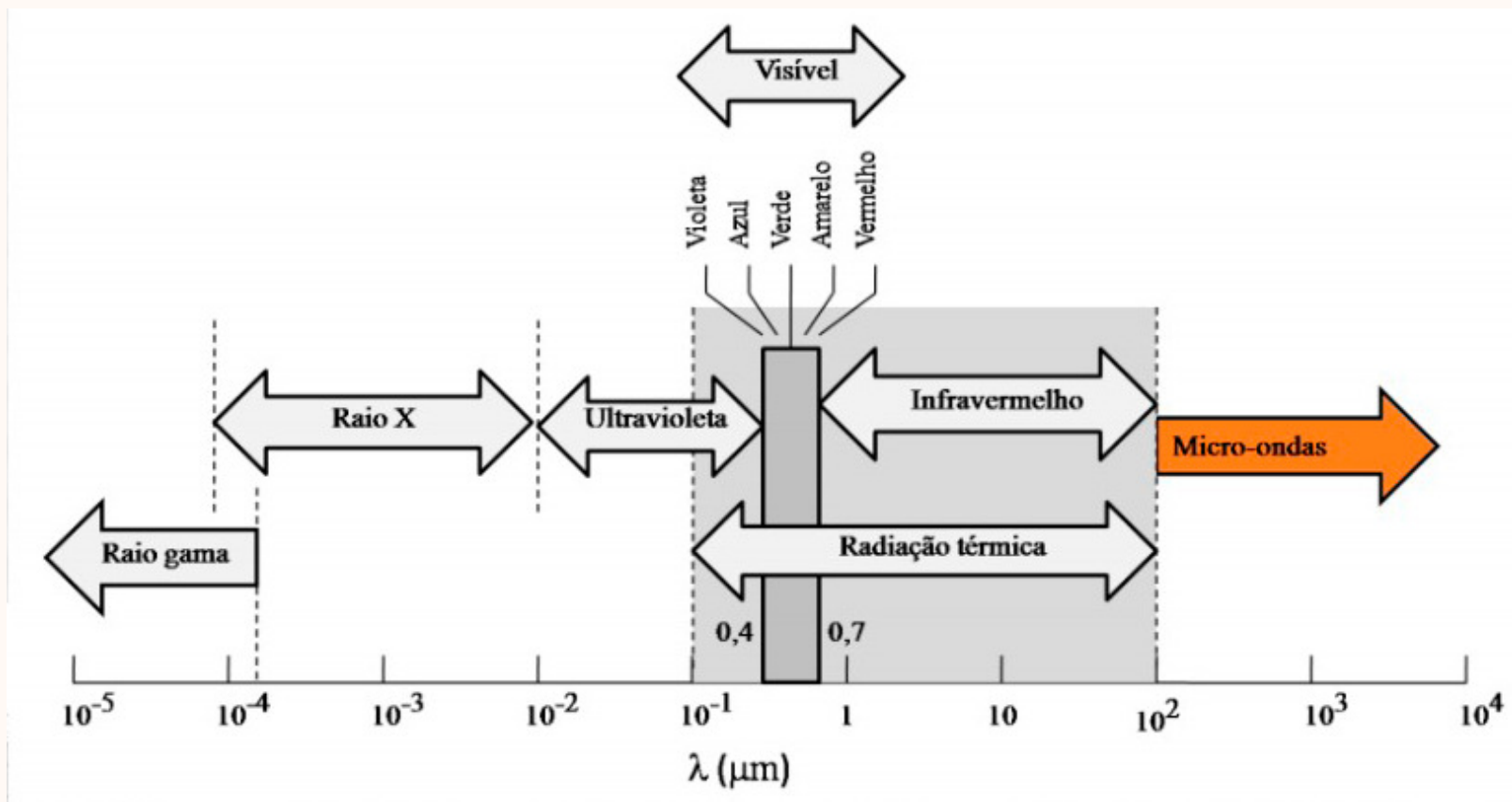
Processamento por micro-ondas

- ✓ Forma de energia eletromagnética
- ✓ Onda penetra no alimento e se converte em calor
- ✓ Comprimento de onda maior que o infravermelho:
(100-10⁶)μm

Processamento por micro-ondas

Frequências estipuladas: (915 ± 13) MHz (Industrial); (2450 ± 50) MHz (Doméstico e científico); (5800 ± 75) MHz e (24125 ± 125) MHz (Médica)

Processamento por micro-ondas



Processamento por micro-ondas

Leis fundamentais

Energia das moléculas em estados quânticos:

- ✓ Vibracional
- ✓ Rotacional
- ✓ Translacional
- ✓ Eletrônica

Processamento por micro-ondas

Leis fundamentais

- ✓ Passagem entre os estados quânticos por absorção ou emissão de energia radiante
- ✓ A energia radiante é transportada por fótons

Processamento por micro-ondas

Função da frequência da onda

$$Q = h_p f$$

- ✓ em que: Q é a energia radiante [J]; h_p é a constante de *Planck* [$6,6261 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$] e f é a frequência da onda [Hz ou s^{-1}]

Processamento por micro-ondas

Relação da frequência (f) com o comprimento da onda

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

- ✓ em que: c é a velocidade da luz no vácuo [$2,9979 \times 10^8$ m.s⁻¹] e λ é o comprimento de onda [μm]

Processamento por micro-ondas

Relação entre cada intervalo de comprimento de onda (λ) e os mecanismos de absorção de energia

Intervalo do λ [μm]	Espectro	Mecanismo de absorção de energia
0,2 - 0,7	Ultravioleta e luz visível	Alteração no estado eletrônico
2,5 - 100	Parte da região infravermelha	Alteração no estado vibracional
>100	Região das micro-ondas	Alteração no estado rotacional

Processamento por micro-ondas

Definição de corpo negro

- ✓ Corpos emitem ou absorvem energia radiante
- ✓ Corpo negro é uma superfície ideal que absorve toda a radiação incidente
- ✓ Não existe superfície que emita mais energia que um corpo negro

Processamento por micro-ondas

Definição de corpo negro

- ✓ A radiação emitida é função do comprimento de onda e da temperatura, independente da direção: emissor difuso
- ✓ O corpo negro emite e absorve toda a radiação possível numa determinada temperatura, é o padrão de comparação das superfícies reais

Processamento por micro-ondas

- ✓ O comprimento de onda (λ) no qual a máxima radiação ocorre é determinado pela temperatura do aquecedor
- ✓ Relação descrita por leis básicas para o corpo negro:
 - Lei de *Planck*
 - Lei de Deslocamento de *Wien*
 - Lei de *Stefan-Boltzmann*

Processamento por micro-ondas

Lei de *Planck*

Distribuição de potência emissiva do espectro do corpo negro

$$P_o(\lambda, T) = \frac{C_1}{n^2 \lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{n\lambda T}\right) - 1 \right]}$$

- ✓ Em que: $P_o(\lambda, T)$ é a potência emissiva do corpo negro por unidade de volume [$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$]; λ é o comprimento de onda [m]; T é a temperatura absoluta [K]; n é o índice de refração do meio e C_1 e C_2

Processamento por micro-ondas

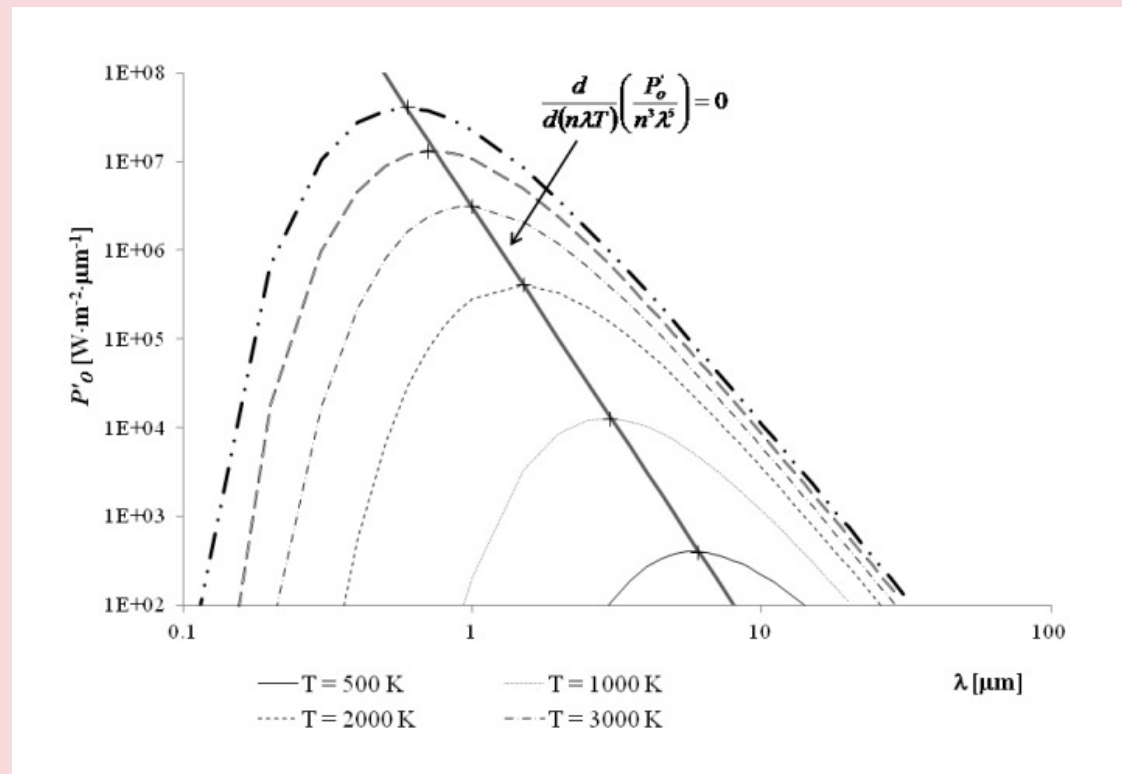
$$C_1 = 2\pi c^2 h_p = 2 \times 3,1416 \times (2,9979 \times 10^8)^2 \times 6,6261 \times 10^{-34} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right) (\text{J} \cdot \text{s})$$

$$C_1 = 3,742 \times 10^{-16} (\text{W} \cdot \text{m}^2)$$

$$C_2 = \frac{h_p c}{k_B} = \frac{(6,6261 \times 10^{-34}) \times (2,9979 \times 10^8)}{1,3806 \times 10^{-23}} \left(\frac{(\text{J} \cdot \text{s}) \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)}{(\text{J} \cdot \text{K}^{-1}) \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)} \right)$$

✓ Em que: k_B é a constante de Boltzmann

Processamento por micro-ondas



Processamento por micro-ondas

Lei de deslocamento de *Wien*

- ✓ Comprimento de onda pico no qual a distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro atinge uma potência emissiva máxima

$$\lambda_{\max} = \frac{C_3}{T} = \frac{2898 [\mu\text{m.K}]}{T [\text{K}]}$$

Processamento por micro-ondas

Lei de *Stefan-Boltzmann*

- ✓ Potência total irradiada de uma fonte a uma dada temperatura obtido pela integração da quantidade de fluxo de calor estimado usando a Lei de Planck para todos os comprimentos de onda

$$P_o''(T) = \int_0^{\infty} P_o''(T, \lambda) d\lambda = n^2 T^4 \int_0^{\infty} \frac{C_1 d(n\lambda T)}{(n\lambda T)^5 \left[e^{\frac{C_2}{n\lambda T}} - 1 \right]} = n^2 \sigma_{SB} T^4$$

Processamento por micro-ondas

Lei de *Stefan-Boltzmann*

- ✓ Em que: P''_0 é a potência total emitida por um corpo negro ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) e σ_{SB} é a constante de *Stefan-Boltzmann*

$$\sigma_{SB} = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2 h_p^3} = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

Processamento por micro-ondas

Lei de *Stefan-Boltzmann*

- ✓ Energia emitida por um corpo real é menor que a do corpo negro de acordo com a emissividade (ε) do material

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} = \frac{E}{\sigma_{SB} T^4}$$

$$E = \varepsilon \sigma_{SB} T^4$$

Processamento por micro-ondas

Mecanismos de aquecimento por
micro-ondas

Rotação dipolar

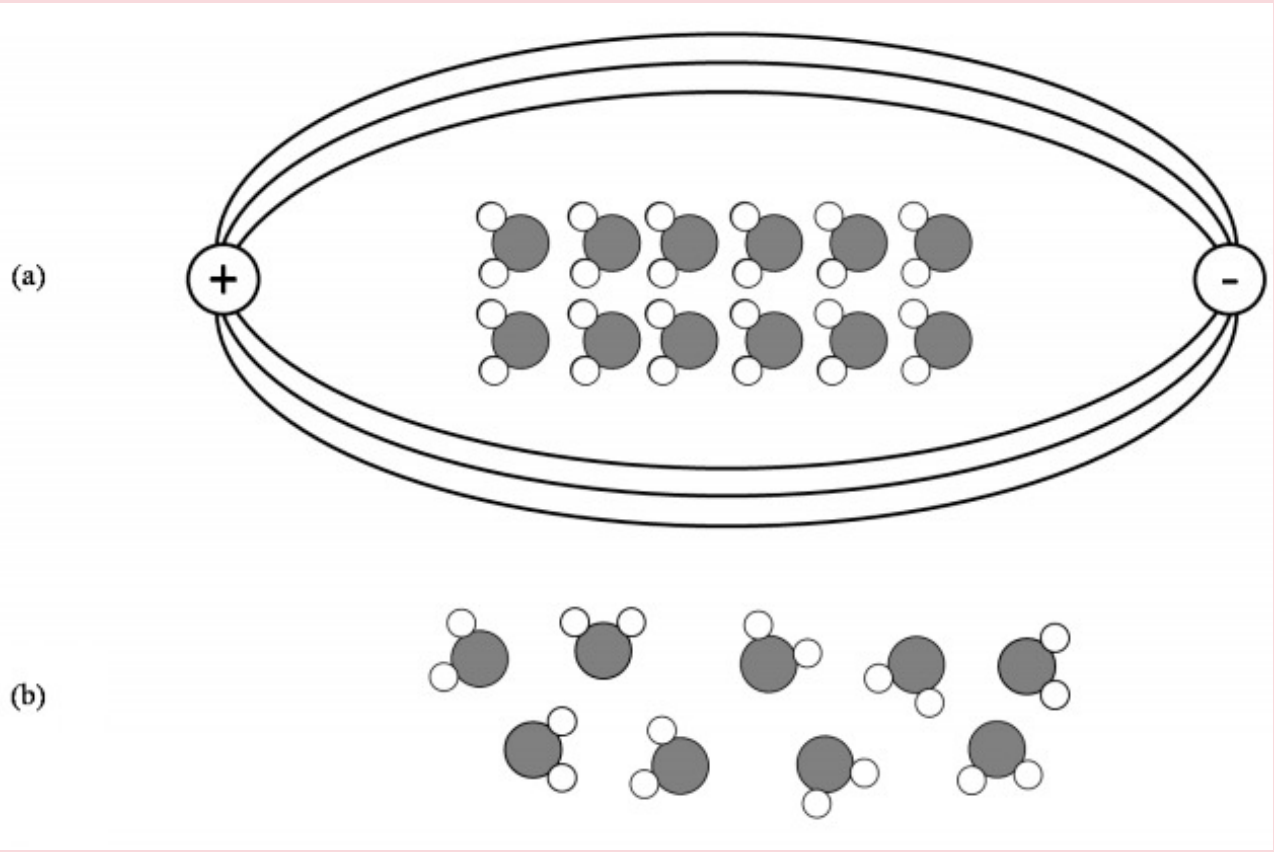
- ✓ Alinhamento das moléculas com momento de dipolo ao campo elétrico aplicado
- ✓ Relaxação dielétrica após remoção do campo com energia dissipada na forma de calor

Processamento por micro-ondas

Mecanismos de aquecimento por micro-ondas

Rotação dipolar

- ✓ Campo alterna bilhões de vezes por segundo
- ✓ Geração de calor por atrito e ruptura de ligações



Processamento por micro-ondas

Mecanismos de aquecimento por
micro-ondas

Condução Iônica

- ✓ Campo eletromagnético promove a separação dos íons que são atraídos pelos pólos de sinais opostos

Processamento por micro-ondas

Mecanismos de aquecimento por
micro-ondas

Condução Iônica

- ✓ Alternância dos pólos os íons colidem aleatoriamente entre si e com moléculas não ionizadas, gerando calor por atrito

Processamento por micro-ondas

Propriedades Dielétricas

- ✓ Aquecimento por micro-ondas
- ✓ Ondas eletromagnéticas propagam dentro dos materiais dielétricos a amplitude diminui e a energia perdida é convertida em calor dentro do material

Processamento por micro-ondas

Propriedades Dielétricas

Permissividade relativa complexa

- ✓ ϵ^* consiste de duas partes: uma parte real e uma imaginária

Processamento por micro-ondas

Propriedades Dielétricas

Permissividade relativa complexa

- ✓ Parte real ϵ' constante dielétrica
quantidade de energia que é transmitida ou refletida pelo material e a habilidade para armazenar energia eletromagnética

Processamento por micro-ondas

Propriedades Dielétricas

Permissividade relativa complexa

- ✓ Parte imaginária ϵ'' fator de perda dielétrica habilidade do material converter energia eletromagnética em calor

Processamento por micro-ondas

Propriedades Dielétricas

Fator de perda dielétrica

$$\varepsilon'' = \varepsilon_d'' + \varepsilon_{\sigma_i}'' = \varepsilon_d'' + \frac{\sigma_i}{\varepsilon_0 2\pi f}$$

- ✓ Em que: ε_d'' contribuição ao fator de perda dielétrico devido a rotação dipolar [adimensional]
- ✓ ε_{σ_i}'' contribuição devido a condução iônica [adimensional]

Processamento por micro-ondas

Propriedades Dielétricas

- Fator de perda dielétrica
- ✓ σ_i condutividade iônica do material
[S·m⁻¹]
- ✓ ϵ_0 permissividade do espaço livre

Processamento por micro-ondas

Transferência de Calor e Massa

Geração de calor volumétrica pela interação direta entre microondas e alimento

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{Q}{\rho C_p}$$

Processamento por micro-ondas

Transferência de Calor e Massa

Geração de calor volumétrica pela interação direta entre microondas e alimento

Em que:

- ✓ α difusividade térmica
- ✓ ρ densidade do alimento
- ✓ C_p calor específico

Processamento por micro-ondas

Transferência de Calor e Massa

Geração de calor volumétrica pela interação direta entre microondas e alimento

$$Q = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' F_{CE}^2$$

➤ F_{CE} Intensidade do campo elétrico

Processamento por micro-ondas

Transferência de Calor e Massa

Condição de contorno superficial:

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = \underbrace{h(T - T_{\infty})}_{\text{conveccao}} + \underbrace{\varepsilon \sigma_{SB} (T^4 - T_s^4)}_{\text{radiacao}} + \underbrace{m_w \lambda}_{\text{evaporacao}}$$

Processamento por micro-ondas

Transferência de Calor e Massa

Profundidade de penetração das micro-ondas

- ✓ Perda de $1/e = 36,8\%$ da energia transmitida

$$d_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{\epsilon'}}{2\pi\epsilon''}$$

- d_p varia entre (0,3 e 0,7) cm

Processamento por micro-ondas

Transferência de Calor e Massa

Umidade evapora e é removida na superfície do alimento

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \alpha_m \nabla^2 M + \alpha_m \delta_p \nabla^2 P + \alpha_m \delta_t \nabla^2 T$$

Processamento por micro-ondas

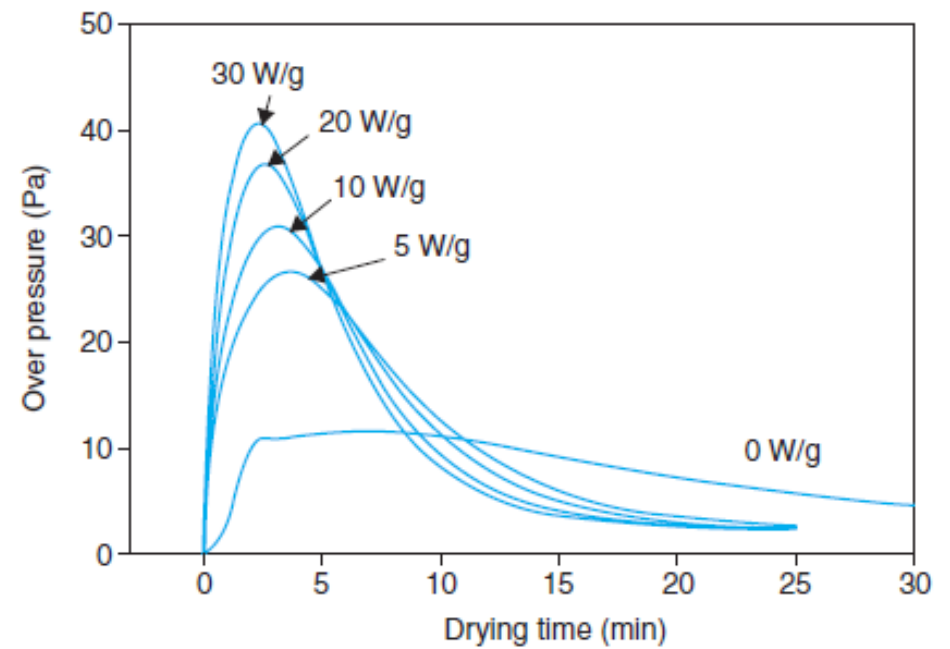
Transferência de Calor e Massa

Umidade evapora e é removida na superfície do alimento

- ✓ M umidade em base seca
- ✓ α_m difusividade mássica
- ✓ δ_p coeficiente do gradiente de pressão (P)
- ✓ δ_t coeficiente do gradiente de temperatura (T)

Processamento por micro-ondas

Transferência de Calor e Massa



Processamento por micro-ondas

Equipamentos de Processamento por Microondas

- Fonte e controlador de potência:
- ✓ Alimentação do gerador de micro-ondas
 - ✓ Controle do tempo de processo

Processamento por micro-ondas

Equipamentos de Processamento por Microondas

Gerador de micro-ondas:

- ✓ Válvula termiônica (magnétron) converte energia elétrica em micro-ondas
- ✓ Tubo isolado sob vácuo na parte interna composta por placas de cobre direcionadas ao centro (ânodo) e filamento em espiral no centro do tubo (cátodo)

Processamento por micro-ondas

Equipamentos de Processamento por Microondas

Gerador de micro-ondas:

- ✓ Diferença de potencial constante é aplicada e o cátodo produz elétrons livres acelerados
- ✓ Forte campo magnético os elétrons descrevem trajetória curva e seguem caminho em espiral promovendo geração das ondas eletromagnéticas

Processamento por micro-ondas

Equipamentos de Processamento por Microondas

Guia de ondas:

- ✓ Tubo de metal retangular que direciona as micro-ondas para a cavidade que contém o material a ser aquecido
- ✓ Previne a exposição direta do magnétron com o alimento

Processamento por micro-ondas

Equipamentos de Processamento por Microondas

Espalhador de ondas:

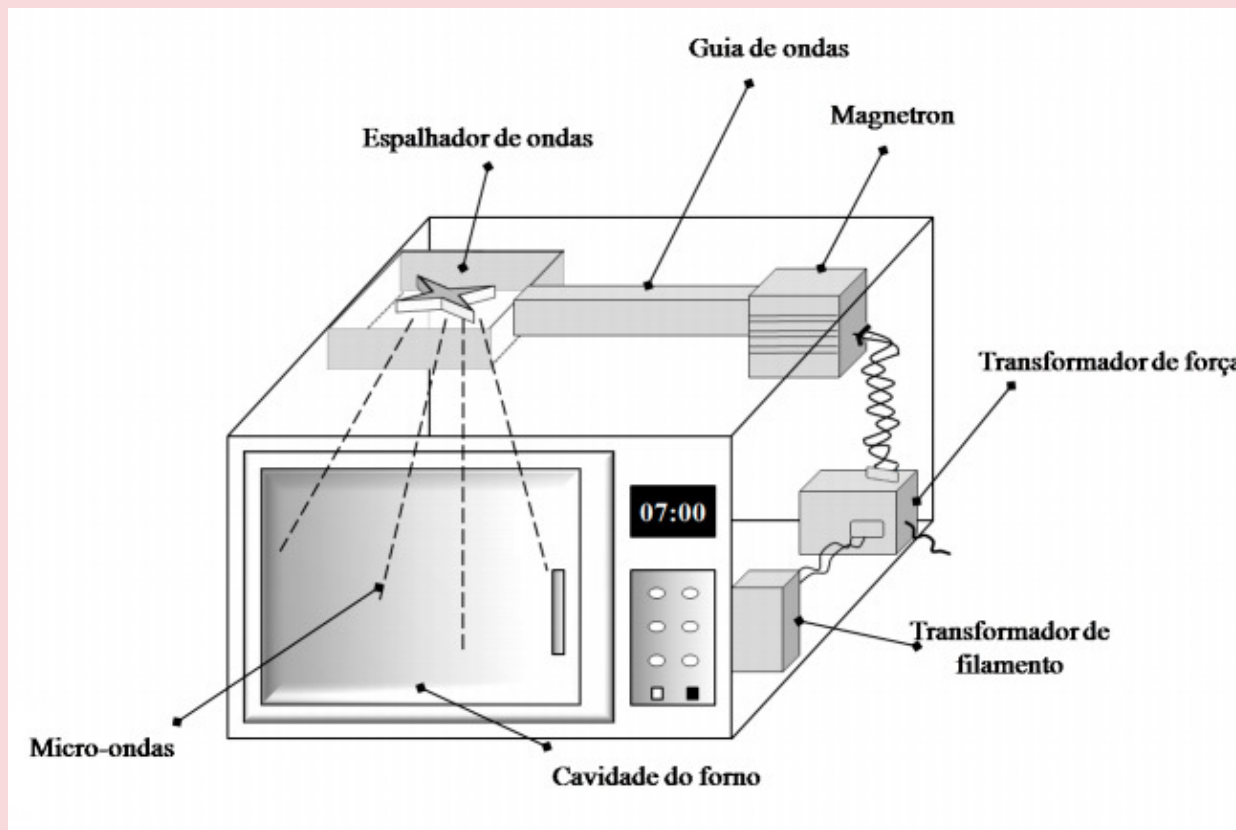
- ✓ Distribuição das micro-ondas na cavidade
- ✓ Maior uniformidade no aquecimento

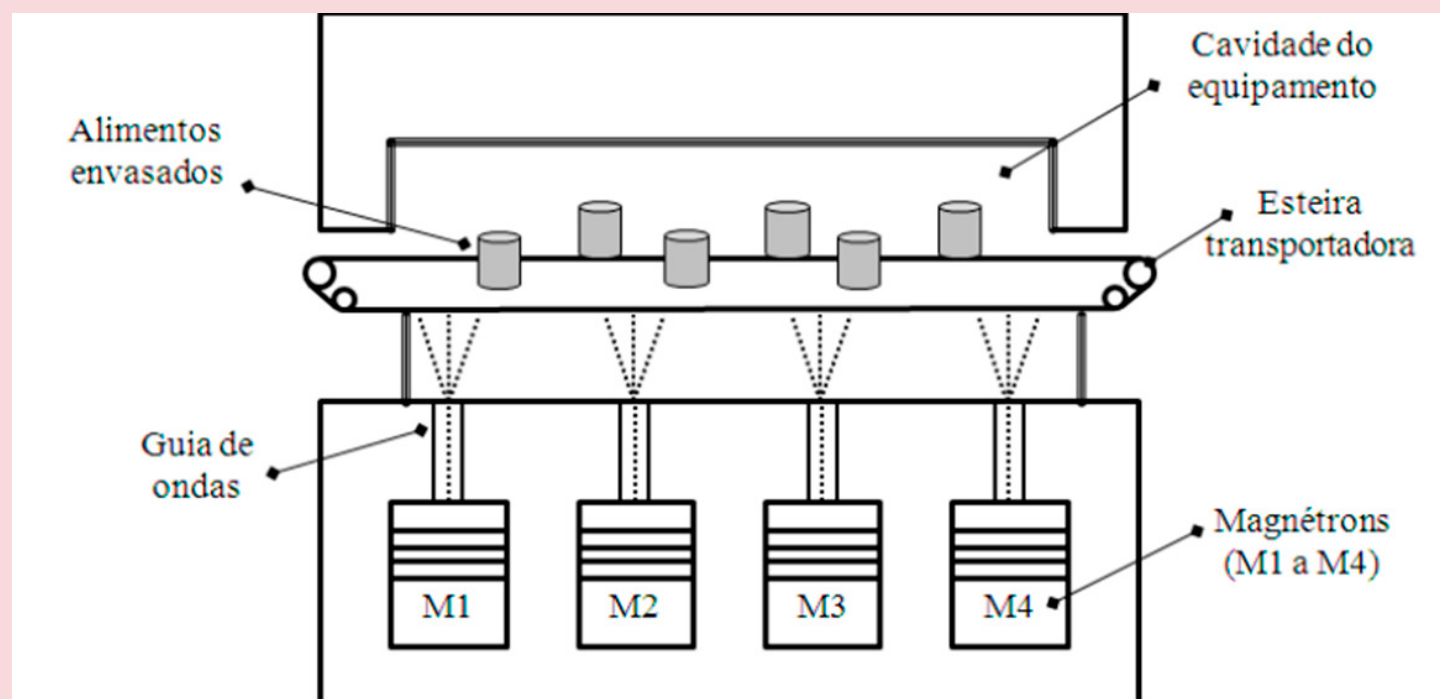
Processamento por micro-ondas

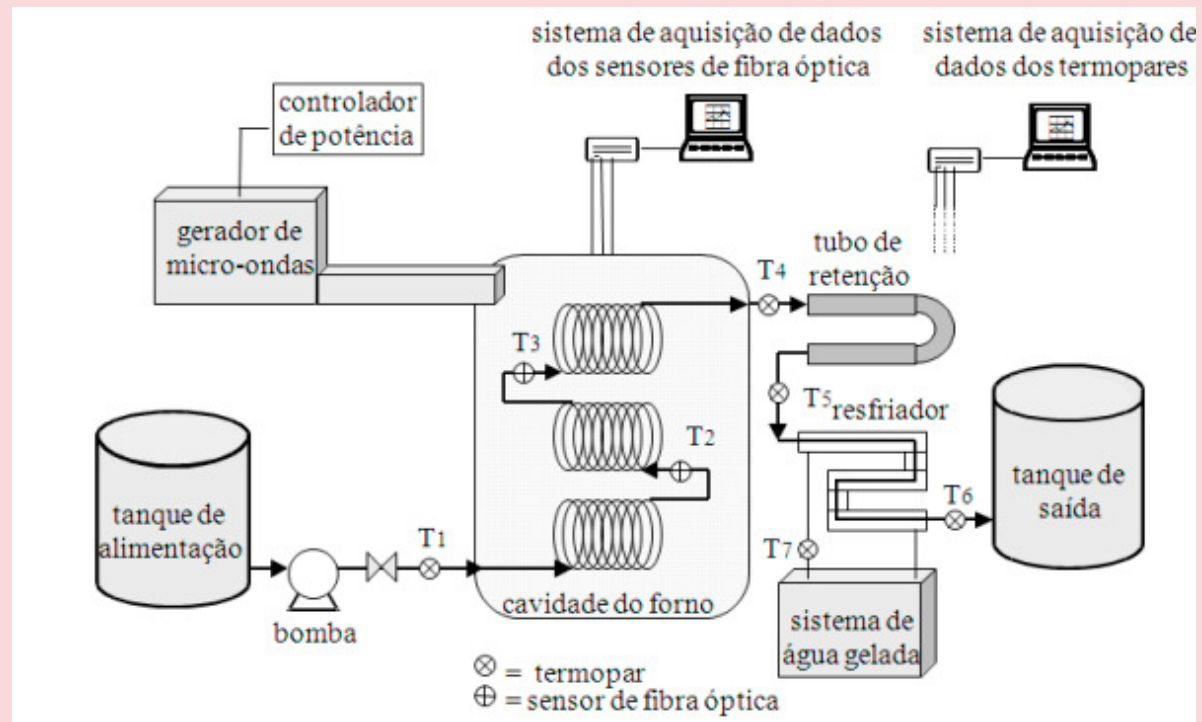
Equipamentos de Processamento por Microondas

Cavidade:

- ✓ Local onde o alimento ficará exposto à incidência das microondas







Processamento por micro-ondas

Aplicações

- ✓ Assamento
- ✓ Secagem
- ✓ Descongelamento e Têmpera
- ✓ Pasteurização e Esterilização
- ✓ Branqueamento

Processamento por micro-ondas

Assamento

- ✓ Textura firme e dura
- ✓ Produto seco
- ✓ Falta de formação de casca e cor característica
- ✓ Envelhecimento rápido
- ✓ Superfície mole

Processamento por micro-ondas

Assamento

- ✓ Redução do conteúdo de glúten
- ✓ Emulsificantes, gomas e gorduras
- ✓ Uso de suscetores
- ✓ Combinação com outras tecnologias
- ✓ Pães, bolos, biscoitos

Processamento por micro-ondas

Secagem

- ✓ Remoção rápida da umidade
- ✓ Alto conteúdo de umidade (até 20%)
- ✓ Sem “case hardening”
- ✓ Melhor qualidade sensorial e nutricional

Processamento por micro-ondas

Secagem

- ✓ Alto investimento inicial e não uniformidade no aquecimento
- ✓ Combinação com outras tecnologias
- ✓ Processamento intermitente
- ✓ Frutas, verduras, cogumelo, soja

Processamento por micro-ondas

Descongelamento e Têmpera

- ✓ Aplicação mais utilizada comercialmente
- ✓ Tempo curto de processo
- ✓ Menor crescimento microbiano, deterioração química, desidratação

Processamento por micro-ondas

Descongelamento e Têmpera

- ✓ Uniformidade do aquecimento
- ✓ Baixa potência e processamento intermitente
- ✓ Produtos cárneos, pescados, gorduras

Processamento por micro-ondas

Pasteurização e Esterilização

Tempo curto de processo

- ✓ Melhor qualidade sensorial e nutricional do produto
- ✓ Distribuição de temperaturas não uniforme
- ✓ Alimentos líquidos
- ✓ Combinação de processos

Processamento por micro-ondas

Branqueamento

- ✓ Tempo curto de processo
- ✓ Melhor qualidade sensorial e nutricional do produto
- ✓ Evita geração de efluentes

Processamento por micro-ondas

Branqueamento

- ✓ Aquecimento não uniforme
- ✓ Processamento Intermitente
- ✓ Frutas, verduras

Processamento por micro-ondas

Fatores	Processamento por micro-ondas	Processamento convencional
Tempo de processo	Rápido	Lento
Transferência de calor	Conversão de energia eletromagnética em térmica	Gradiente de temperatura

Processamento por micro-ondas

Fatores	Processamento por micro-ondas	Processamento convencional
Mecanismos de transferência de calor	Calor é gerado no interior do alimento pela interação de suas moléculas com o campo eletromagnético	Calor é transferido para a superfície do alimento pelos mecanismos de condução, convecção e radiação
Aquecimento	Seletivo	Não seletivo

Processamento por micro-ondas

Fatores	Processamento por micro-ondas	Processamento convencional
Características do aquecimento	<p>Maior capacidade de penetração de energia. O calor é gerado através do volume do alimento o que favorece a uniformidade no aquecimento.</p> <p>Dependendo da aplicação, pode-se trabalhar em condições mais brandas de temperatura.</p>	<p>Predomina o mecanismo de difusão do calor da superfície para o interior do alimento. Não existe uniformidade no aquecimento e a temperatura de processo normalmente é mais elevada quando comparada ao aquecimento por micro-ondas.</p>

Processamento por micro-ondas

Fatores	Processamento por micro-ondas	Processamento convencional
Efeito sobre o alimento	A redução no tempo de processo auxilia na manutenção das características sensoriais e nutricionais do produto.	Existe o risco de formação de uma camada mais seca e escura na superfície do alimento, e a elevada temperatura pode promover perdas nutricionais e sensoriais ao produto.
Área de ocupação do equipamento	Menor	Maior