

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

Profa. Dra. Cynthia Ditchfield



PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

- ✓ CONCEITOS
- ✓ EQUIPAMENTOS
- ✓ APLICAÇÕES

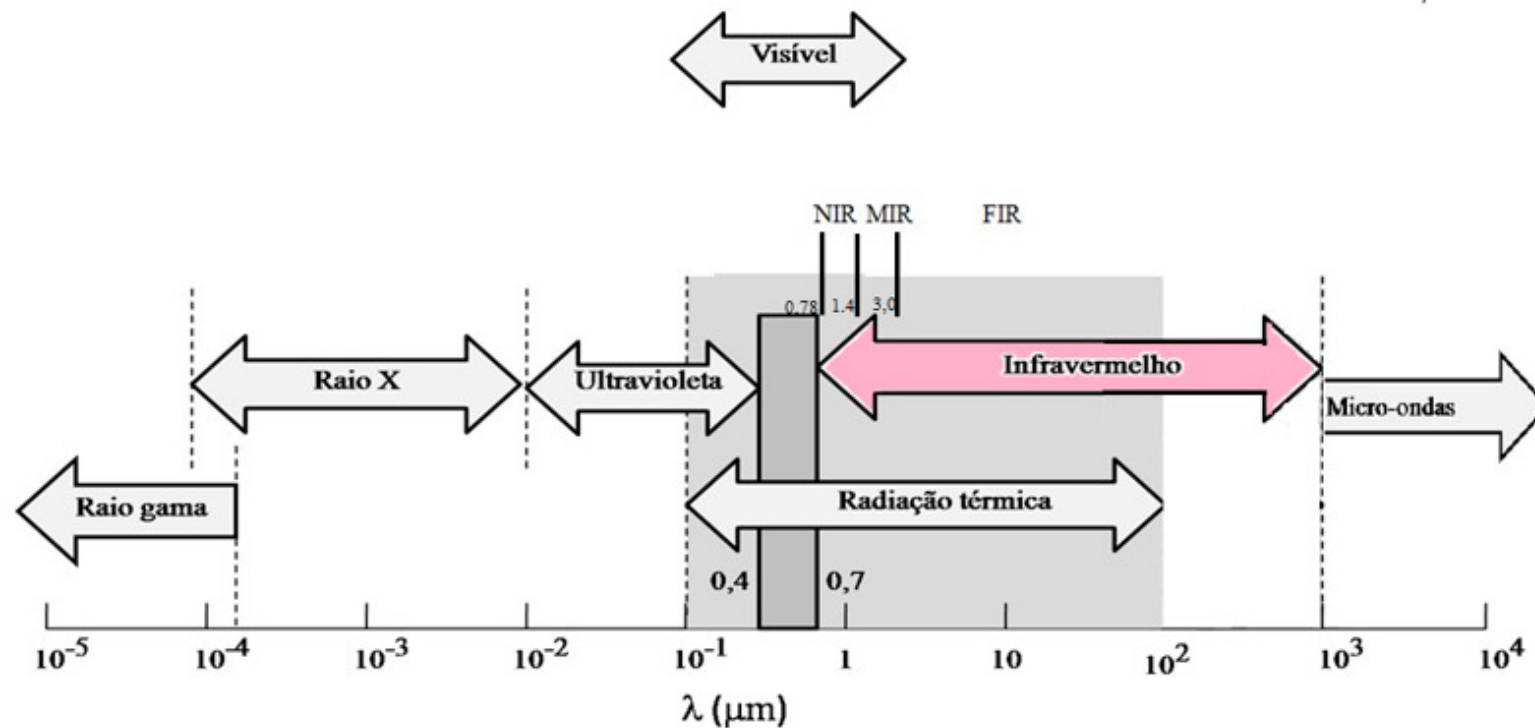
PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

- ✓ FORMA DE ENERGIA ELETROMAGNÉTICA
- ✓ ONDA PENETRA NO ALIMENTO E SE CONVERTE EM CALOR
- ✓ RADIAÇÃO INFRAVERMELHA COMPRIMENTO DE ONDA
ENTRE O VISÍVEL E O MICRO-ONDAS: (0,78-1.000) μM

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

- DIVIDIDA EM TRÊS CLASSES:
 - ✓ INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR)
 - ✓ INFRAVERMELHO MÉDIO (MIR)
 - ✓ INFRAVERMELHO DISTANTE (FIR)

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO



PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

➤ LEIS FUNDAMENTAIS:

✓ ENERGIA DAS MOLÉCULAS EM ESTADOS

QUÂNTICOS:

- VIBRACIONAL
- ROTACIONAL
- TRANSLACIONAL
- ELETRÔNICA

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

➤ LEIS FUNDAMENTAIS:

- ✓ PASSAGEM ENTRE ESTADOS QUÂNTICOS POR ABSORÇÃO OU EMISSÃO DE ENERGIA RADIANTE

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

- ✓ A ENERGIA RADIANTE É TRANSPORTADA POR FÓTONS
- ✓ FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA DA ONDA

$$Q = h_p f$$

- EM QUE: Q É A ENERGIA RADIANTE [J]; h_p É A CONSTANTE DE *PLANCK* [$6,6261 \times 10^{-34}$ J·S] E f É A FREQUÊNCIA DA ONDA [HZ OU S^{-1}]

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

✓ RELAÇÃO DA FREQUÊNCIA COM O COMPRIMENTO DA ONDA

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

- EM QUE: c É A VELOCIDADE DA LUZ NO VÁCUO [$2,9979 \times 10^8 \text{ M.S}^{-1}$] E
 λ É O COMPRIMENTO DE ONDA [μM]

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

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 INFRAVERMELHO

➤ 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 INFRAVERMELHO

➤ 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 INFRAVERMELHO

- 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 INFRAVERMELHO

➤ 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 [$W \cdot M^{-3}$]; λ É O COMPRIMENTO DE ONDA [m]; T É A TEMPERATURA ABSOLUTA [K]; n É O ÍNDICE DE REFRAÇÃO DO MEIO E C1 E C2

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

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

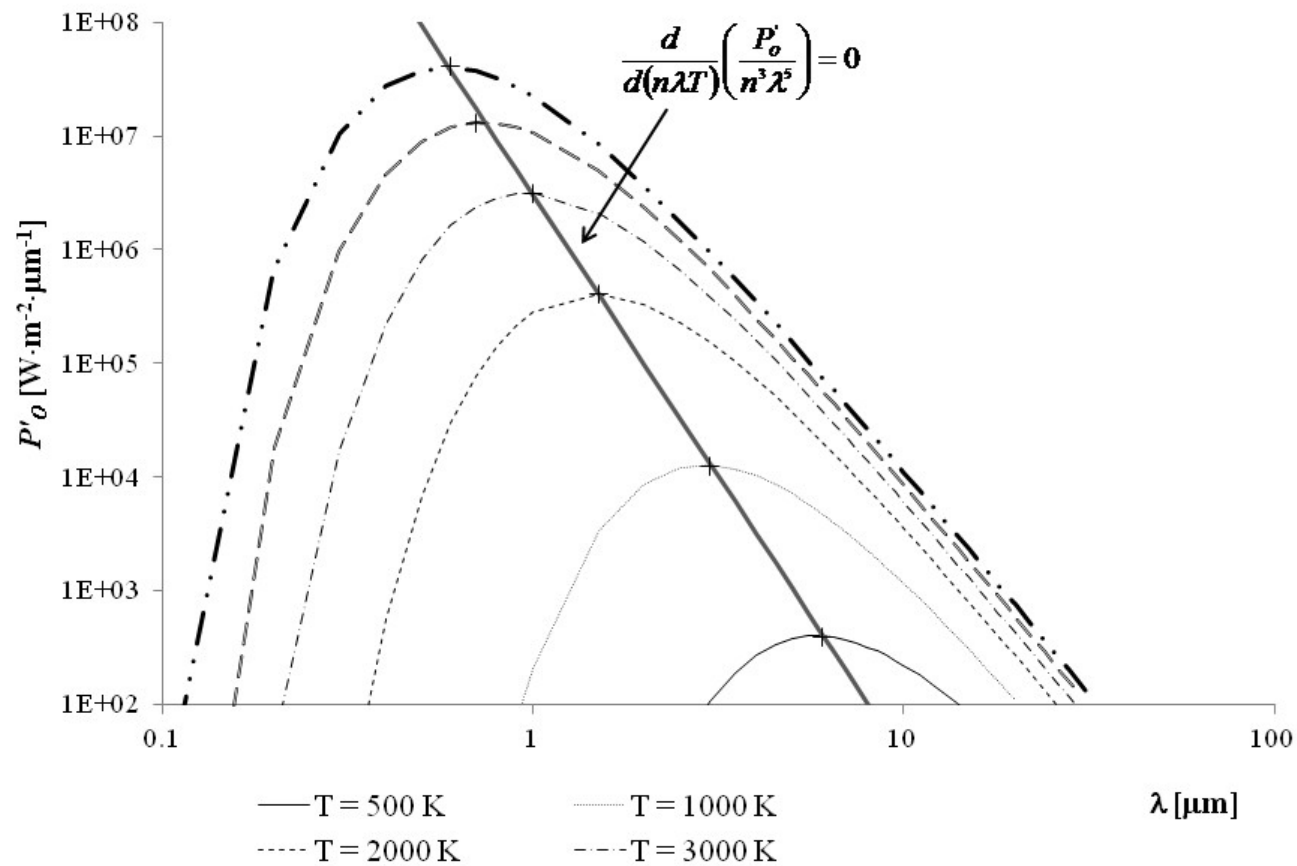
$$C_1 = 3,742 \times 10^{-16} (\text{W} \cdot \text{m}^2)$$

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

$$C_2 = 1,438 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K} = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

EM QUE: k_B É A CONSTANTE DE *BOLTZMANN*

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO



PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

➤ 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 INFRAVERMELHO

➤ 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 INFRAVERMELHO

➤ 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 INFRAVERMELHO

➤ LEI DE *STEFAN-BOLTZMANN*

- ✓ ENERGIA EMITIDA POR UM CORPO REAL (AQUECEDOR POR INFRAVERMELHO) É MENOR QUE A DO CORPO NEGRO DE ACORDO COM A EMISSIVIDADE (ϵ) DO MATERIAL

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

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

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

➤ FATOR DE ATENUAÇÃO E PERMEABILIDADE

- ✓ ENERGIA INCIDENTE NO ALIMENTO É PARCIALMENTE REFLETIDA E TRANSMITIDA
- ✓ ENERGIA TRANSMITIDA É ATENUADA DE ACORDO COM A LEI DE LAMBERT

$$I_{\lambda} = I_{\lambda 0} \exp(-\alpha_{\lambda} x)$$

- EM QUE: I_{λ} É A O FLUXO DE ENERGIA DE COMPRIMENTO DE ONDA λ E α_{λ} É O FATOR DE ATENUAÇÃO ESPECTRAL QUE DEPENDE DO COMPRIMENTO DE ONDA E DO MATERIAL

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

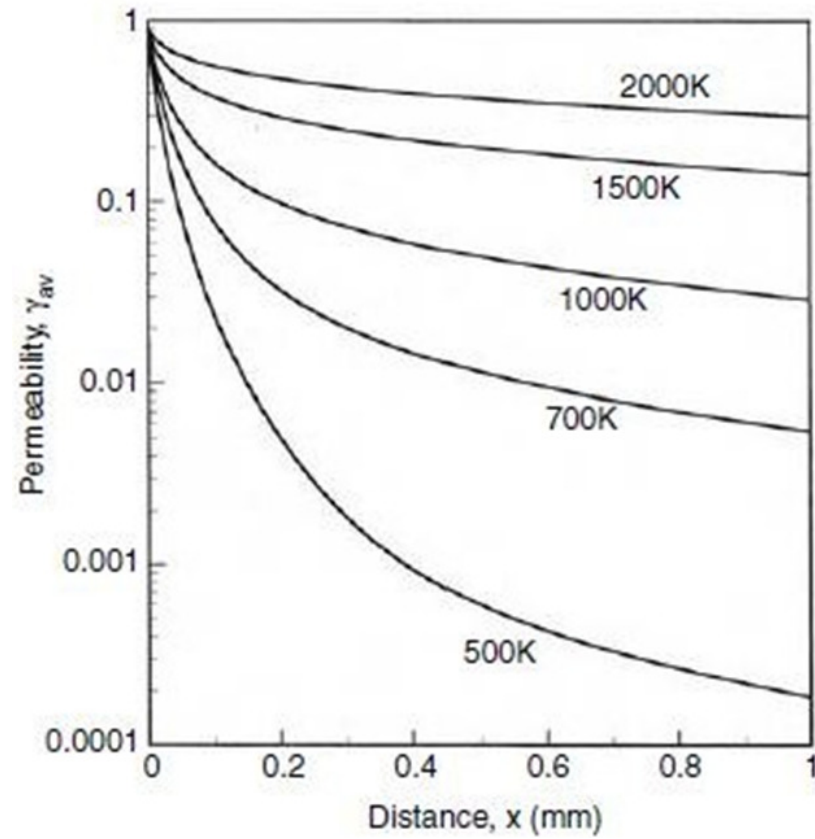
➤ TRANSMITÂNCIA ESPECTRAL

$$\gamma_{\lambda}(x) = \frac{I_{\lambda}}{I_{\lambda 0}} = \exp(-\alpha_{\lambda} x)$$

✓ ENERGIA IRRADIADA PELO AQUECEDOR APRESENTA DISTRIBUIÇÃO

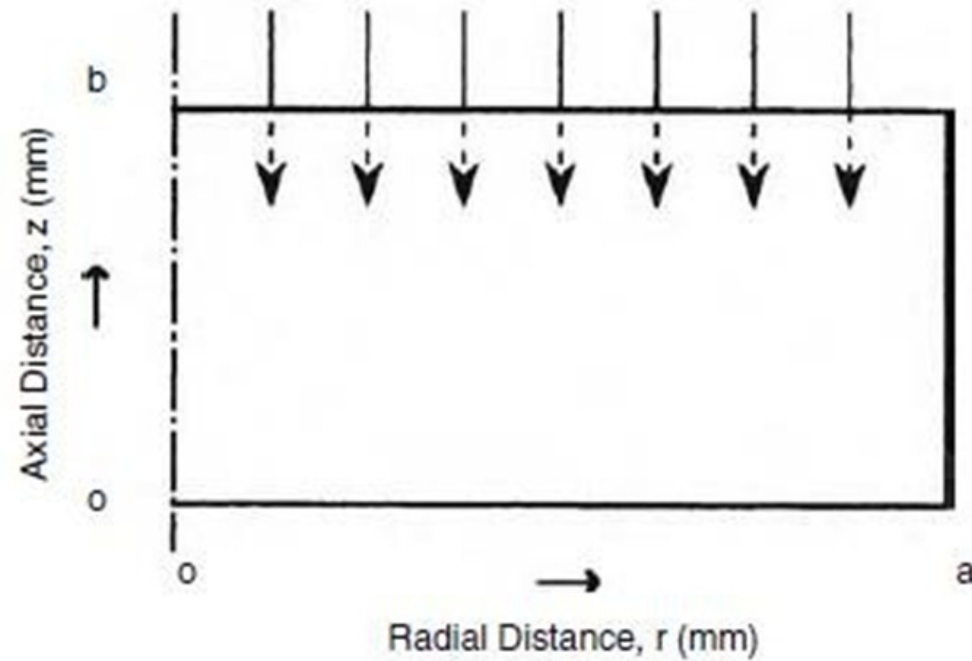
$$\gamma_{av}(x) = \frac{\int_0^{\infty} I_{\lambda}}{\int_0^{\infty} I_{\lambda 0}} = \frac{\int_0^{\infty} \exp(-\alpha_{\lambda} x) d\lambda}{\sigma_{SB} T^4}$$

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO



PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

✓ MODELO DE PENETRAÇÃO DE ENERGIA



PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

✓ MODELO DE PENETRAÇÃO DE ENERGIA

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + Q$$

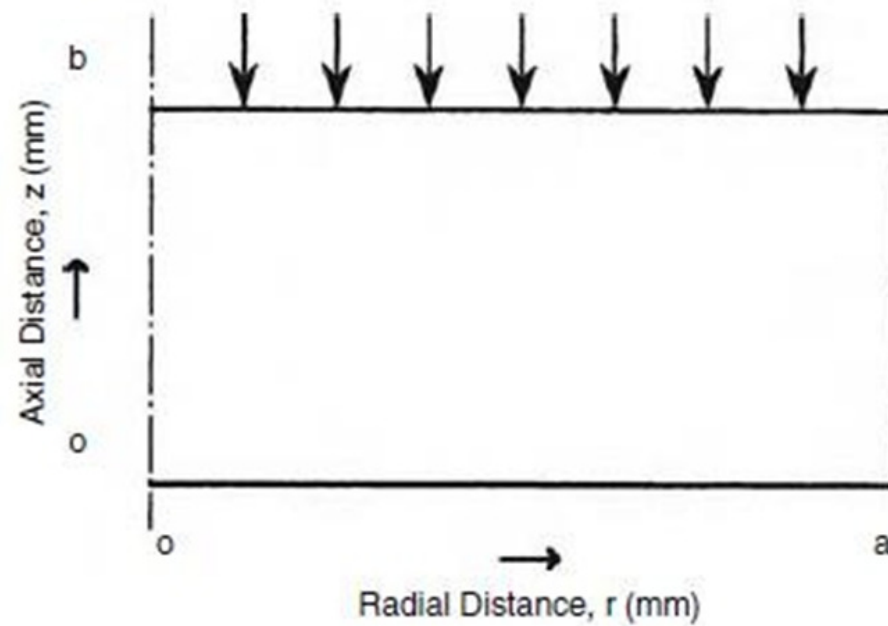
PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

- MODELO DE PENETRAÇÃO DE ENERGIA
 - ✓ EM QUE Q É O TERMO DE GERAÇÃO DE CALOR INTERNO

$$Q = -\frac{dI}{dx} = \int_0^{\infty} \alpha_{\lambda} I_{\lambda 0} \exp(-\alpha_{\lambda} x) d\lambda$$

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

- ✓ MODELO DE ABSORÇÃO DE ENERGIA NA SUPERFÍCIE



PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

- ✓ MODELO DE ABSORÇÃO DE ENERGIA NA SUPERFÍCIE

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]$$

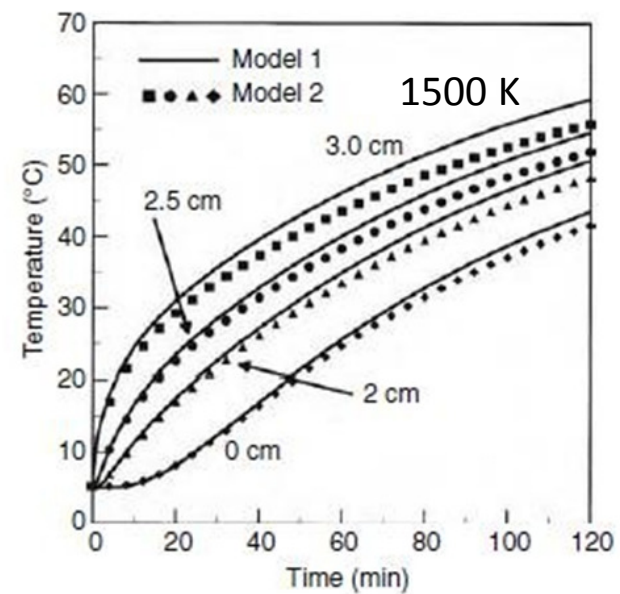
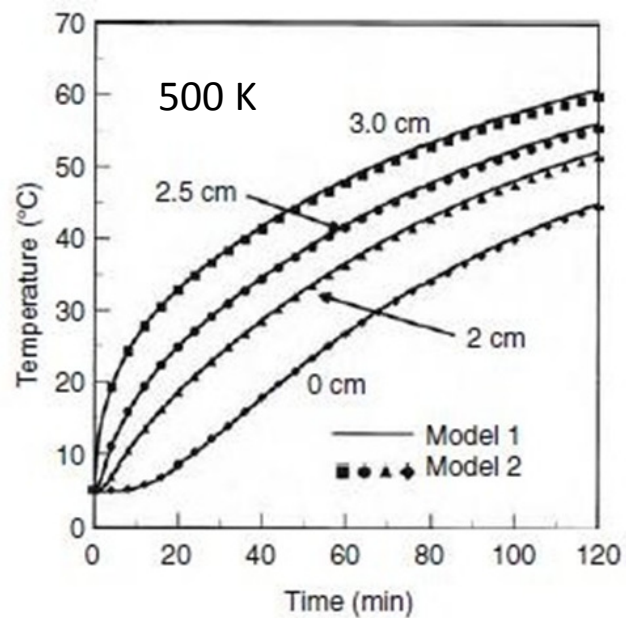
PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

- MODELO DE ABSORÇÃO DE ENERGIA NA SUPERFÍCIE
- ✓ TERMO DE GERAÇÃO DE CALOR NA CONDIÇÃO DE CONTORNO

$$\text{Em } z = Z \quad k \frac{\partial T}{\partial z} = -h(T - T_a) + \sigma_{SB} \phi (T_h^4 - T^4)$$
$$\phi = \varepsilon_1 \varepsilon_2 F_{21}$$

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

✓ COMPARAÇÃO DOS MODELOS



PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

➤ EQUIPAMENTOS DE PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

✓ RADIADOR:

- A GÁS (ONDAS LONGAS)
- ELÉTRICOS:
 - METÁLICOS TUBULARES/PLANOS (ONDAS LONGAS)
 - CERÂMICOS (ONDAS LONGAS)
 - TUBOS DE QUARTZO (ONDAS MÉDIAS OU CURTAS)
 - TUBOS HALÓGENOS (ONDAS ULTRA CURTAS)



PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

- DIMENSIONAMENTO DO EQUIPAMENTO
 - ✓ TIPO DE ALIMENTO AQUECIDO
 - ✓ FINALIDADE DO PROCESSO
 - ✓ TEMPERATURA DO GERADOR

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

- DIMENSIONAMENTO DO EQUIPAMENTO
 - ✓ DISTÂNCIA ENTRE ALIMENTO E GERADOR
 - ✓ TEMPO DE RESIDÊNCIA DO MATERIAL
 - ✓ CONTEÚDO DE UMIDADE INICIAL DO PRODUTO

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

➤ APLICAÇÕES

- ✓ ASSAMENTO/TORREFAÇÃO
- ✓ SECAGEM
- ✓ DESCONGELAMENTO

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

➤ APLICAÇÕES

- ✓ PASTEURIZAÇÃO
- ✓ DESCASCAMENTO
- ✓ BRANQUEAMENTO

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

Equipamento	Tipo de Processamento	Aplicação
	<u>Assamento/Aquecimento</u>	
Forno a gás	Batelada	Pães
Forno de túnel	Contínuo	Pastas em geral
Forno giratório	Contínuo	Café
Cozedor	Batelada	Batata doce e castanhas

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

Equipamento	Tipo de Processamento	Aplicação
	<u>Secagem</u>	
Secador de túnel	Contínuo	Vegetais, massas grãos; malte
Secador rotativo	Batelada	Chás, farinhas, cacau
Liofilizador	Contínuo	Alimentos líquidos
Secador pneumático	Contínuo	Alimentos particulados

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

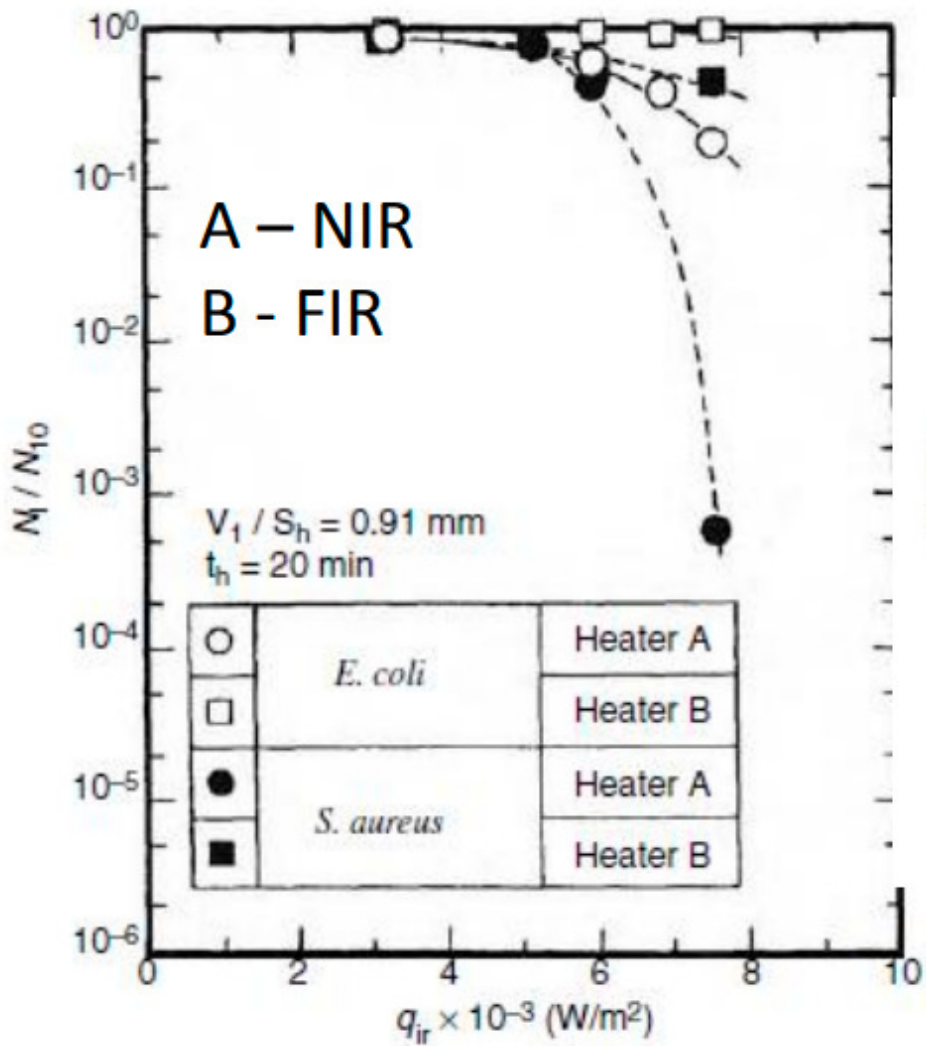
Equipamento	Tipo de Processamento	Aplicação
	<u>Descongelamento</u>	
Túnel de descongelamento	Contínuo	Pastas de peixe congelado
Dispositivo de descongelamento	Batelada	Sushi congelado, atum

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

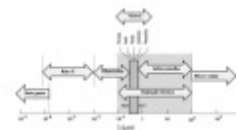
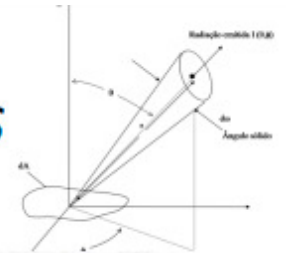
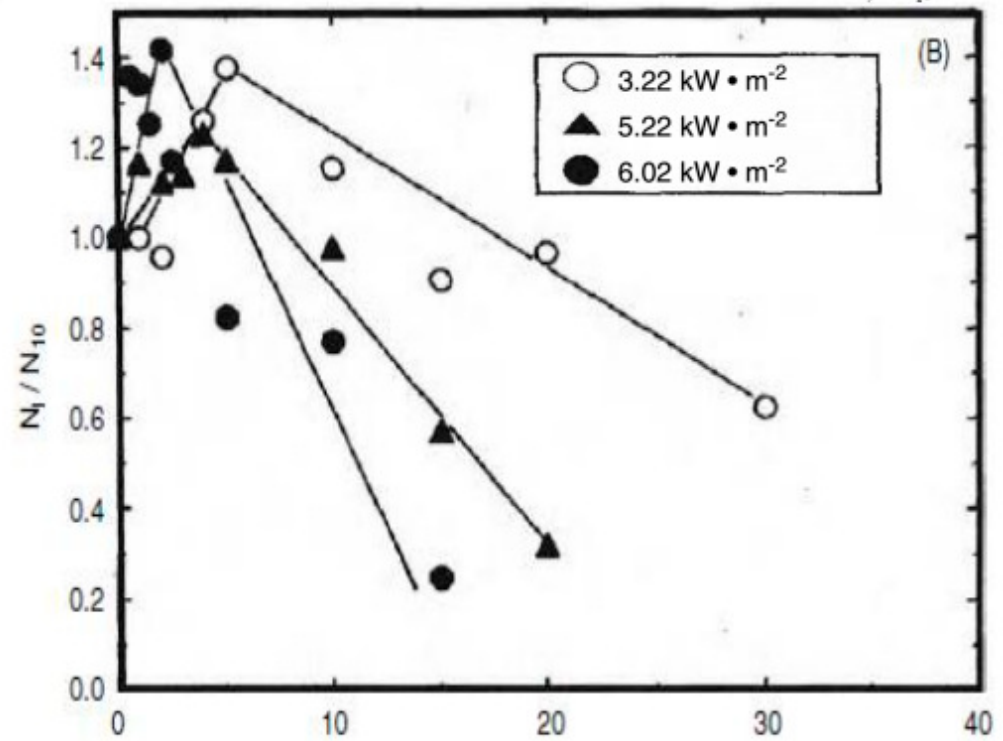
Equipamento	Tipo de Processamento	Aplicação
<u>Pasteurização Superficial</u>		
Pasteurizador	Contínuo	Alimentos envasados
Pasteurizador	Contínuo	Grãos e sementes oleaginosas
Pasteurizador	Batelada	Queijo cottage, ostras, morangos

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

Equipamento	Tipo de Processamento	Aplicação
	<u>Descascamento</u>	
Descascador	Contínuo e batelada	Batata, tomate
	<u>Branqueamento</u>	
Branqueador	Contínuo e batelada	Frutas, legumes e hortaliças



Esporos *Bacillus Subtilis* _FIR



PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

➤ VANTAGENS

- ✓ ALTA EFICIÊNCIA NA CONVERSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM CALOR (AQUECIMENTO ELÉTRICO)
- ✓ EXCELENTE TRANSFERÊNCIA DE CALOR REDUZ O TEMPO DE PROCESSO E O CUSTO DE ENERGIA
- ✓ AR AO REDOR DO EQUIPAMENTO É MANTIDO EM TEMPERATURA AMBIENTE

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

➤ VANTAGENS

- ✓ IRREGULARIDADES NA SUPERFÍCIE DO ALIMENTO NÃO AFETAM A UNIFORMIDADE DO AQUECIMENTO
- ✓ CAPACIDADE DE MODIFICAR AS CARACTERÍSTICAS SENSORIAIS DA SUPERFÍCIE DO ALIMENTO COMO COR, TEXTURA E SABOR

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO

➤ VANTAGENS

- ✓ RÁPIDO AQUECIMENTO DA SUPERFÍCIE DO ALIMENTO MANTÉM EM SUA PARTE INTERNA A UMIDADE E OS COMPOSTOS RESPONSÁVEIS PELAS CARACTERÍSTICAS SENSORIAIS E NUTRICIONAIS DO ALIMENTO

➤ LIMITAÇÕES

- ✓ BAIXA PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO X MICRO-ONDAS

Diferenças	Processamento por infravermelho	Processamento por micro-ondas
Método de aquecimento	Indireto	Direto
Mecanismos de absorção de energia	Vibracional É simplesmente absorvida e convertida em calor pela superfície	Rotacional Induz a rotação de dipolo e a condução iônica que gera fricção entre moléculas e íons produzindo calor em todo o volume

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO X MICRO-ONDAS

Diferenças	Processamento por infravermelho	Processamento por micro-ondas
Fatores do alimento que interferem no aquecimento	Características da superfície e da cor do alimento	Teores de umidade, sais, composição do alimento em geral
Frequência	Maior amplitude na variação de frequência	Menor amplitude, energia produzida em bandas específicas de frequência para evitar interferência com as transmissões de rádio

PROCESSAMENTO POR INFRAVERMELHO X MICRO-ONDAS

Diferenças	Processamento por infravermelho	Processamento por micro-ondas
Profundidade de penetração	Baixa	Alta
Influência da condutividade térmica no aquecimento	Alta	Baixa
Custo operacional	Menor	Maior