

Caracterização Térmica de Meios Semi-Transparentes

Zaqueu E. da Silva ⁽¹⁾, Olivier Wellele ⁽²⁾, Helcio
R.B. Orlande ⁽²⁾, Marcelo J. Colaço ⁽³⁾ e
Nerbe J. Ruperti Jr. ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ UFPb, ⁽²⁾ COPPE/UFRJ, ⁽³⁾ IME, ⁽⁴⁾ CNEN

Junho - 2005



A radiação que atravessa um meio semi-transparente guarda importantes informações sobre o meio e sobre a fonte de radiação



- Medidas direcionais ou espectrais desta radiação podem ser utilizadas para estimar as propriedades termofísicas do MST ou condições de contorno desconhecidas;
- O campo de temperaturas no MST será obtido simultaneamente às estimativas realizadas;
- Medidas de temperatura também podem ser utilizadas para estimar propriedades e condições de contorno \Rightarrow Método Flash



Caracterização Térmica de Meios Semi-Transparentes

PARTE I

*APLICAÇÃO DO MÉTODO FLASH
PARA IDENTIFICAÇÃO DE PROPRIEDADES
TERMOFÍSICAS*



Plano

- Introdução
- Modelagem da transferência de calor em meios semitransparentes
- Métodos de resolução da ETR
- Acoplamento condução-radiação (método Flash)
- Estudo de sensibilidade aos parâmetros que intervêm no método Flash
- Identificabilidade dos Parâmetros
- Resultados experimentais
- Conclusões



Transferência de calor acoplada

Aplicações : técnicas e industriais

Acoplamento = Condução + Radiação

☹ *Radiação pode ser dominante.*

Necessita de um modelo radiativo:

1 – Avaliação correta da transferência radiativa

2 – Compatível com outros modos de transferência de calor.

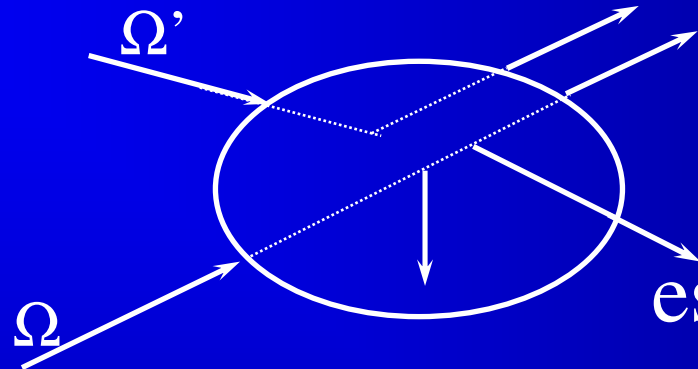


Equação de transferência de calor em meios semitransparentes

Atenuação

absorção

espalhamento



Reforço

emissão

espalhamento

Equação do tipo integral - diferencial

$$\nabla \cdot [\Omega L(s, \Omega)] + \beta L(s, \Omega) = S(s, \Omega)$$

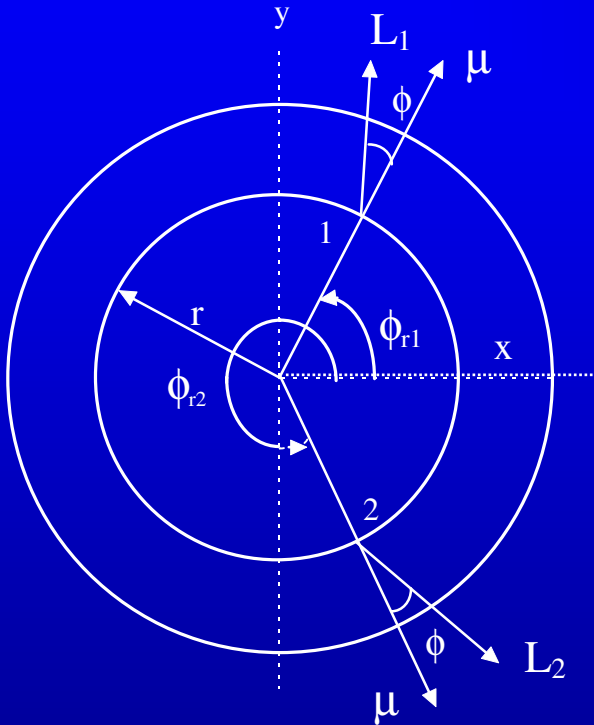
☹️ O Termo fonte :

$$S(s, \Omega) = \kappa L^0(T) + \frac{\sigma}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} L(s, \Omega') p(\Omega' \cdot \Omega) d\Omega'$$



ETR : Caso simetria axial cilíndrica

ETR Coordenadas cilíndricas



$$\left(\frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\eta}{r} \frac{\partial}{\partial \phi_r} + \xi \frac{\partial}{\partial z} - \frac{\eta}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} \right) L(r, \phi_r, z, \theta, \phi) +$$

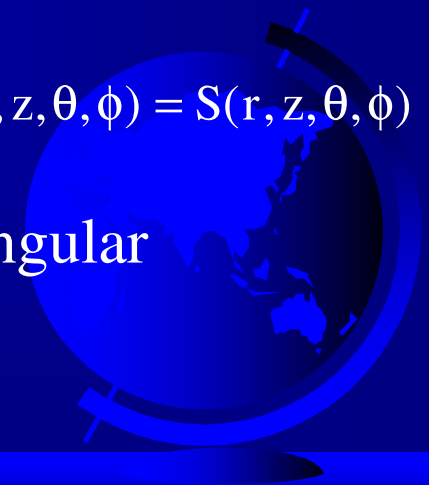
$$\beta L(r, \phi_r, z, \theta, \phi) = S(r, \phi_r, z, \theta, \phi)$$

Hipótese: distribuição da intensidade é invariável com ϕ_r

$$\left(\frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \xi \frac{\partial}{\partial z} - \frac{\eta}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} \right) L(r, z, \theta, \phi) + \beta L(r, z, \theta, \phi) = S(r, z, \theta, \phi)$$

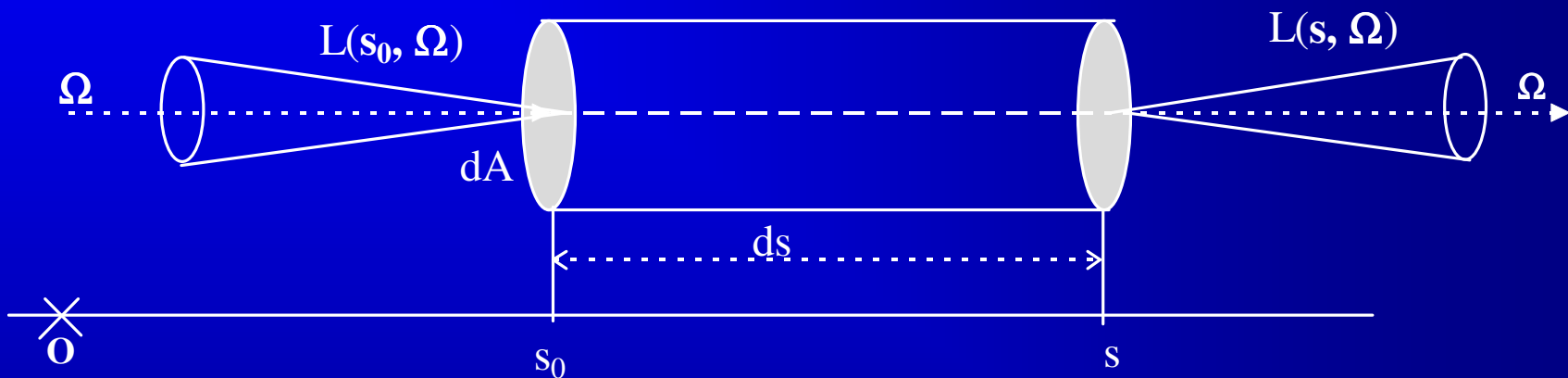
⊗ O termo de distribuição angular

$$\left(-\frac{\eta}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} \right)$$



Solução formal da ETR

$$\frac{dL(s, \Omega)}{ds} + \beta L(s, \Omega) = S(s, \Omega)$$



$$L(s, \Omega) = L(s_0, \Omega) \exp[-\beta(s - s_0)] + \int_{s_0}^s S(s') \exp[-\beta(s - s')] \beta ds'$$

Solução da ETR para simetria axial cilíndrica

Hipóteses

M S T

- cinza e homogêneo
- Emissivo
- Absorvedor
- difusor
- Estacionário

Condições de contornos

- Superfície opaca
- Difusão na emissão e reflexão



Calculo do campo de intensidade

Etapas :

- Discretização angular (Método das ordenadas discretas)
- Discretização espacial
- Leis de variação da propagação da intensidade no V.C para cada direção discreta.
- Intensidade média é calculada para cada face do volume de controle
- Intensidade médio no centro do V.C



1 – Discretização angular

termo fonte

$$\int_{\Omega'=4\pi} L(s, \Omega) p(\Omega', \Omega) d\Omega' = \sum_{m'=1}^N L_{m'} p_{m',m} W_m$$

condições de contorno

$$\int_{\mathbf{n} \cdot \Omega' < 0} |\mathbf{n} \cdot \Omega'| L(s, \Omega') d\Omega' = \sum_{m'=1}^{N/2} L_{m'} |\mathbf{n} \cdot \Omega'| w_m$$



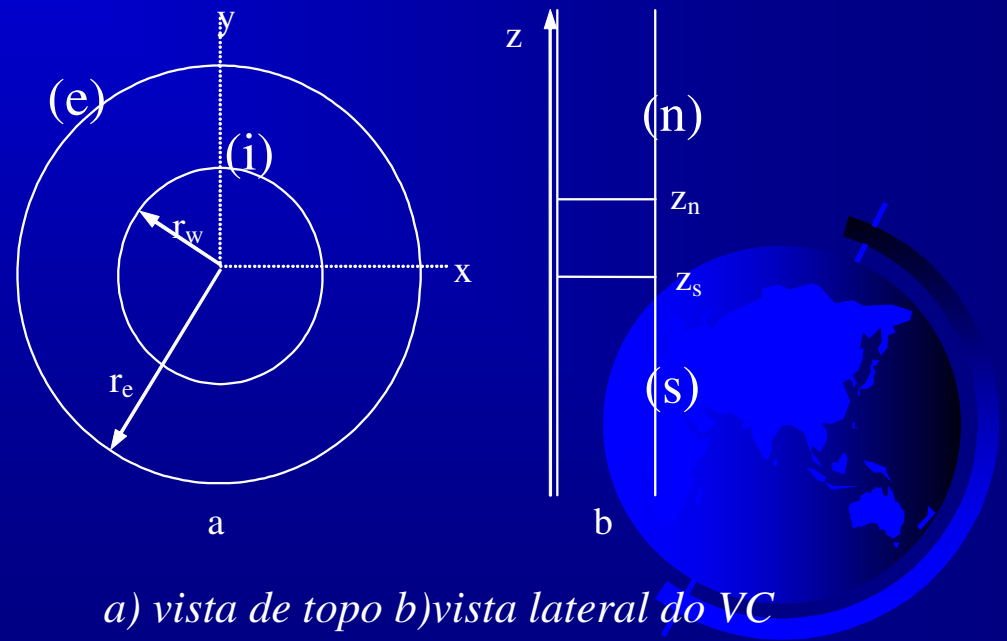
2 – Discretização espacial

(e) - Face lateral externa

(w) - Face lateral interna

(n) - Base superior

(s) - Base inferior



Lei de Variação da Intensidade

Hipóteses

a - V.C. isotérmico

b – Intensidade uniforme sobre as faces do V.C
para uma direção discreta m

c – Termo fonte constante

Superfície lateral - base

$$L_m^r = L_m^l \exp[-\beta \Delta s(r)] + S_m \{1 - \exp[-\beta \Delta s(r)]\}$$

Base - Superfície lateral

$$L_m^z = L_m^b \exp[-\beta \Delta s(z)] + S_m \{1 - \exp[-\beta \Delta s(z)]\}$$

Avaliação das incógnitas

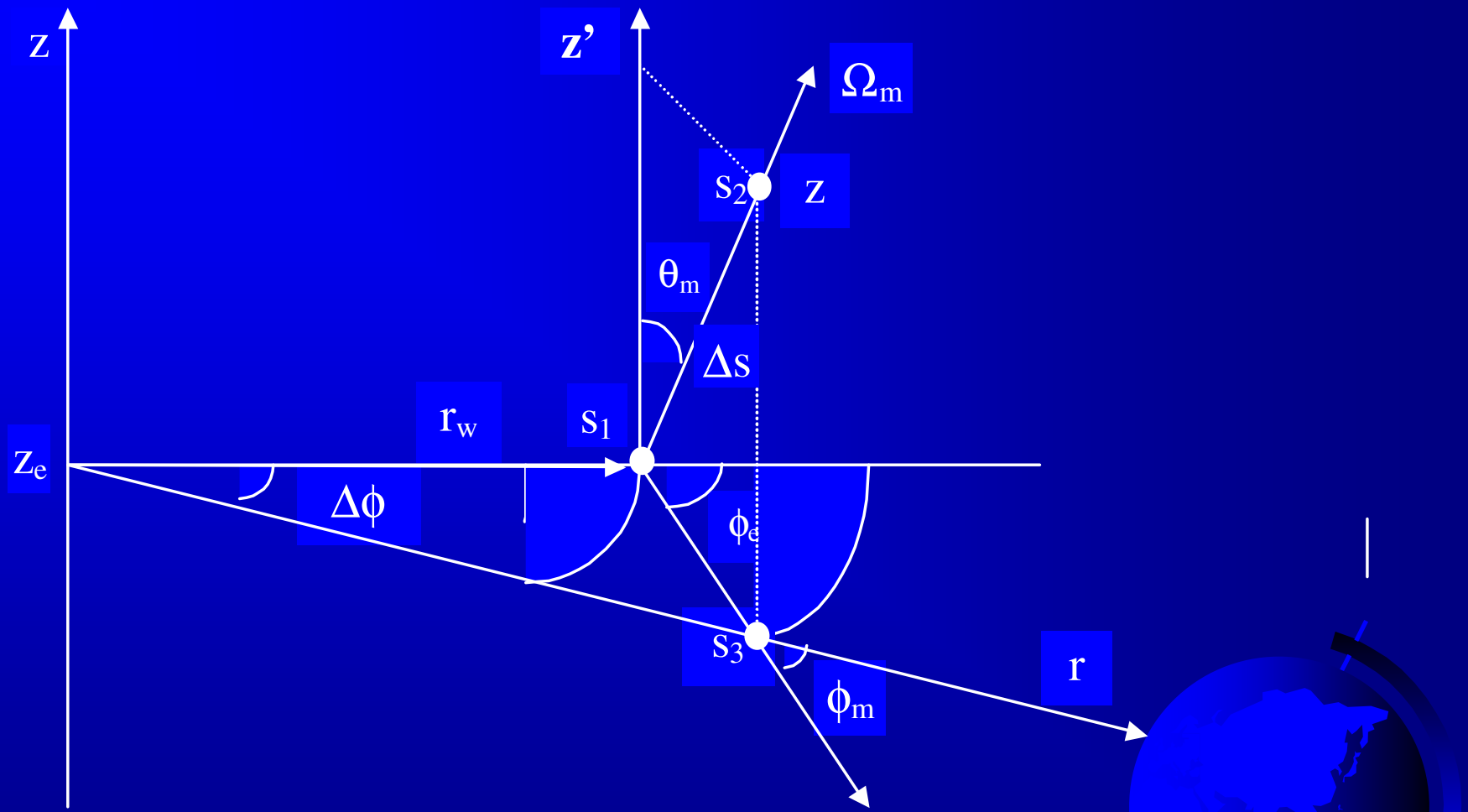
Termo fonte – O termo fonte depende da intensidade nodal. O cálculo é feito de maneira iterativa.

Distância - solução por considerações geométricas

L_m^b , L_m^l

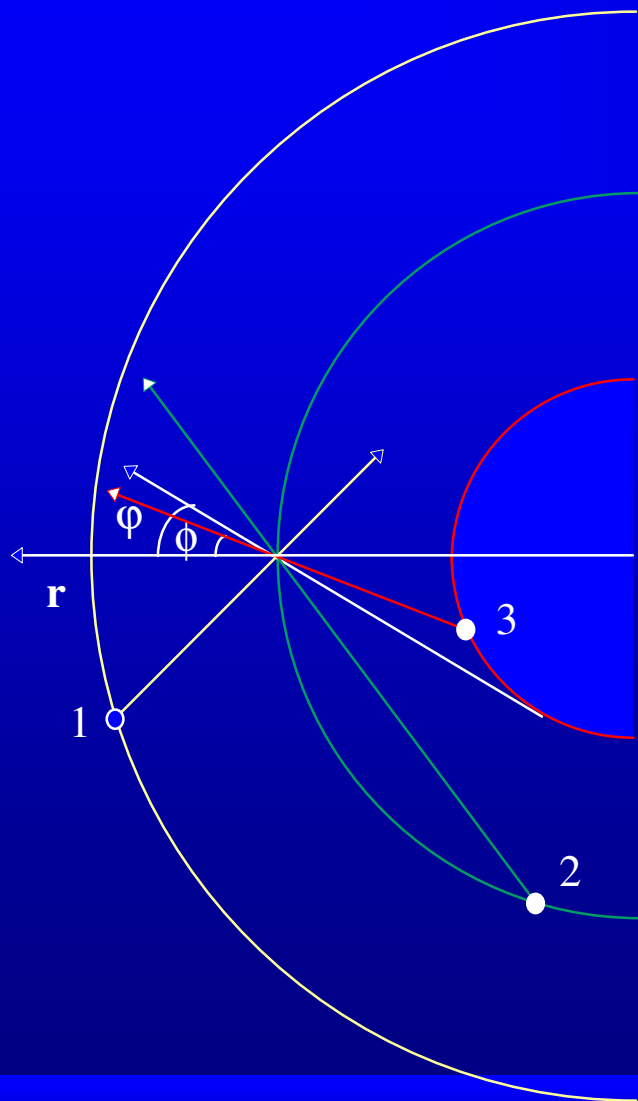
- Devido ao efeito da curvatura, são necessárias interpolações





Esquema para determinação das distâncias

Distâncias percorridas



1 -

$$\Delta s(r, \theta_m, \phi_m) = \frac{r \cos(\phi_m) + \sqrt{r_e^2 - r^2 \sin^2(\phi_m)}}{\sin(\theta_m)}$$

$$\pi/2 < \phi_m < \pi$$

2 -

$$\Delta s(r, \theta_m, \phi_m) = \frac{r \cos(\phi_m) - \sqrt{r_w^2 - r^2 \sin^2(\phi_m)}}{\sin(\theta_m)}$$

$$0 < \phi_m < \phi$$

3 -

$$\Delta s(r, \theta_m, \phi_m) = \frac{r \cos(\phi_m) - \sqrt{r_w^2 - r^2 \sin^2(\phi_m)}}{\sin(\theta_m)}$$

$$0 < \phi_m < \phi$$

Interpolação das intensidades

1 - $\phi_m < \phi_e < \phi_{m'}$

2 - Lei de interpolação linear :

$$L_{in} = cL_{m'} + (1 - c)L_m$$

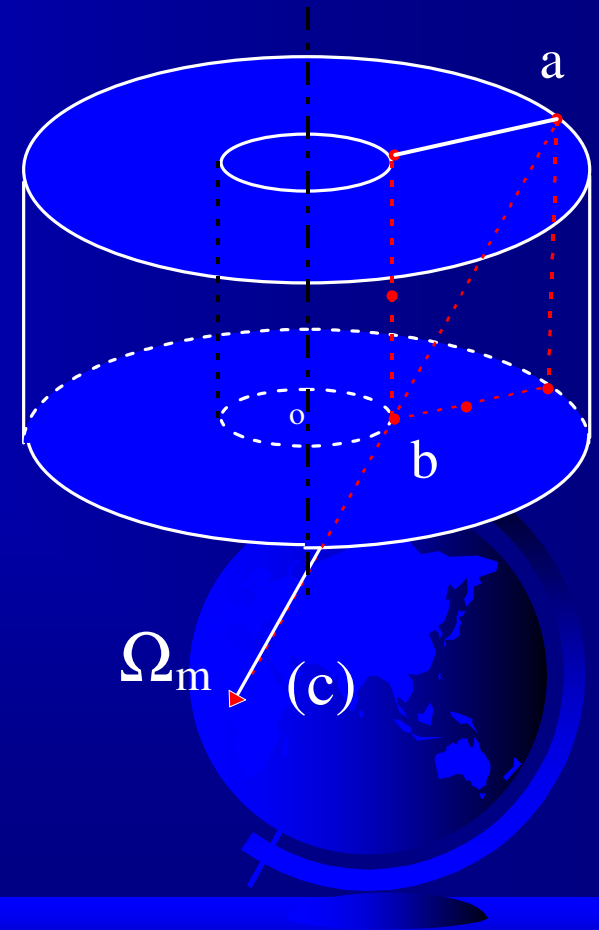
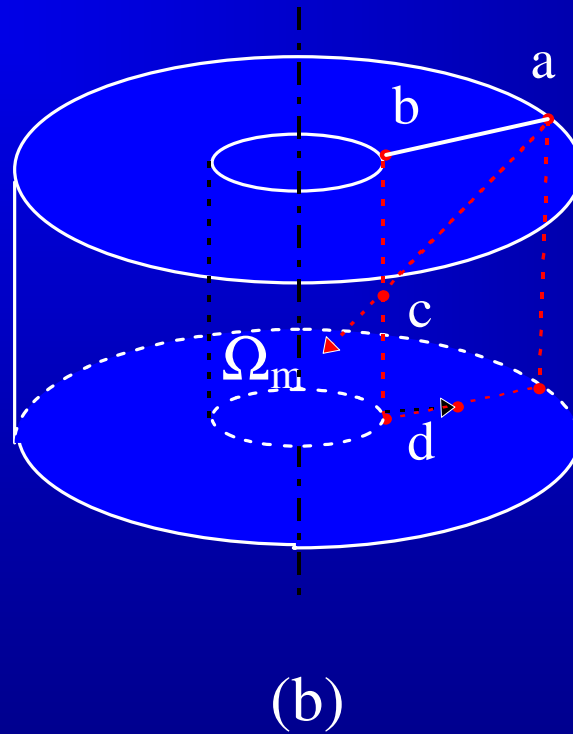
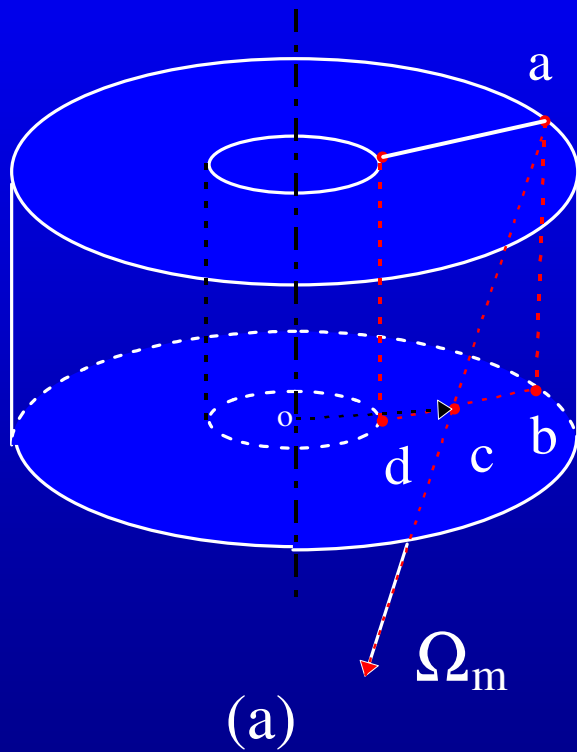
com : $c = \frac{\phi_e - \phi_m}{\phi_{m'} - \phi_m}$

3 - Ângulo de entrada

$$\phi_e = \sin^{-1} \left(\frac{r \sin(\phi_m)}{r_w} \right)$$



Intensidades sobre as faces V.C



Solução

- ☞ Discretização espacial
- ☞ Os co-senos diretores determinam as configurações.
- ☞ As leis de variações são utilizadas para o cálculos das intensidades médias sobre as faces.
- ☞ Conhecendo as intensidades que saem de cada face. Faz-se o cálculo da intensidade média nodal.
- ☞ O cálculo é feito da seguinte maneira :
 - ☞ Progressiva - Passando de um VC para outro. A direção da varredura ocorre dos contornos onde as intensidades são conhecidas
 - ☞ Iterativo - O termo fonte e as CC dependem da intensidades nos nós.



Validação

Exemplo 1 (bidimensional)

MST

cinzento

emissor

absorvedor

espalhamento isotropico

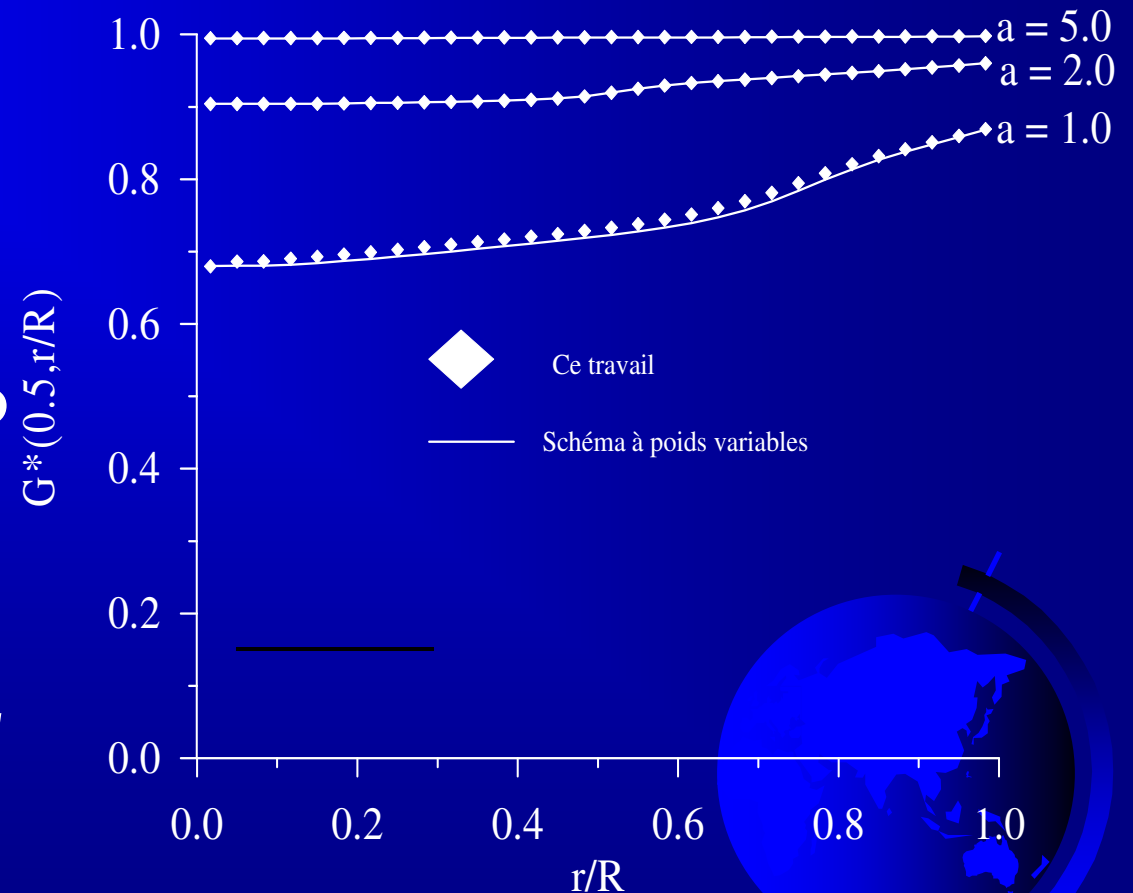
Equilíbrio radiativo

$\beta R = 1$

Condições de contornos

Superfície negra

Superfície lateral quente



Validação

Exemplo 2 (teste de simetria)

MST Cinzento

Emissor

Absorvedor

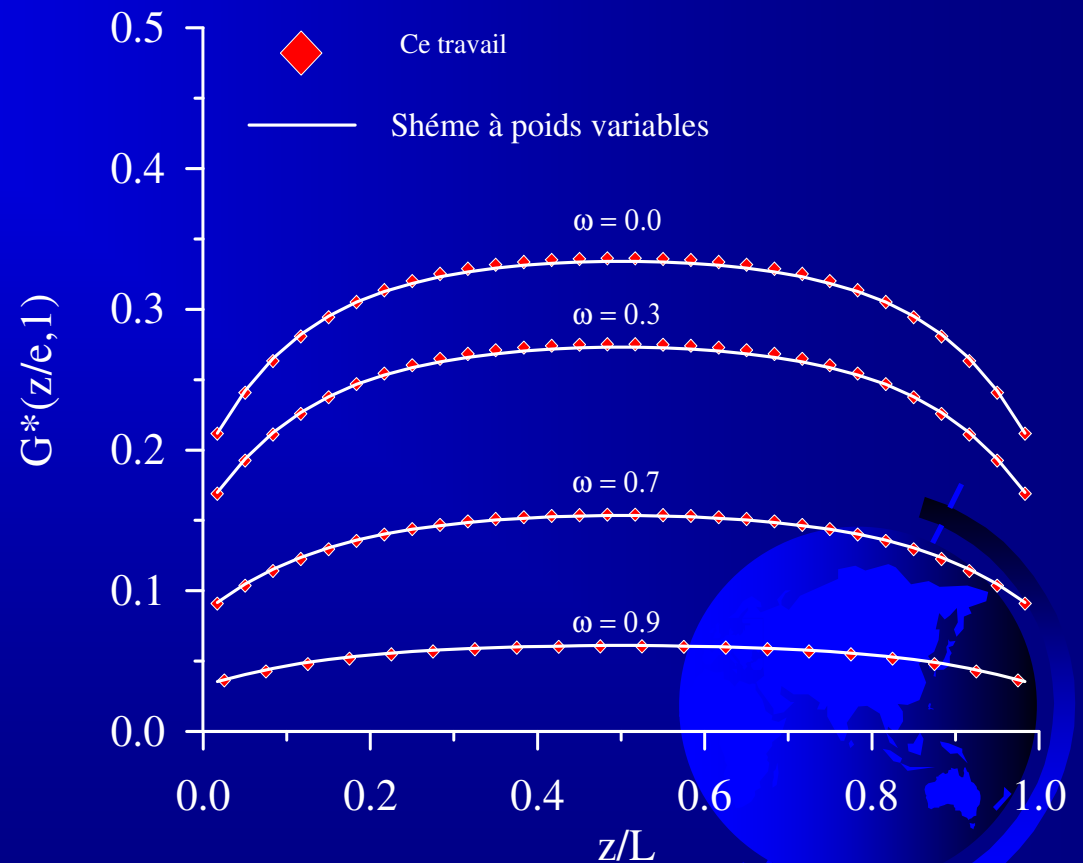
Difusão isotrópica

Isotérmico

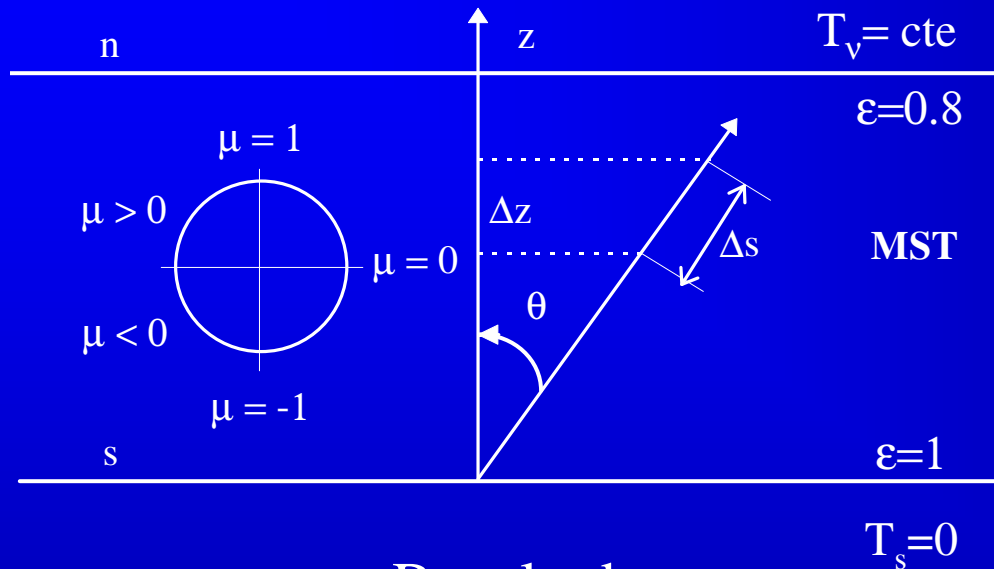
$\beta R = 1$

Condições de contornos

Sup. Negras e frias



Modelo parede plana (1D)



Resultado

τ	$q^r = \sum_{\mu_m > 0} L_m \mu_m w_m$			$G = \sum_m L_m w_m$		
	S_6	Exacte	Erreur(%)	S_6	Exact	Erreur(%)
0.1	0.742881	0.74512	0.3	1.43054	1.3965	2.78
1.0	0.482058	0.48599	0.81	0.84303	0.8499	0.8
3.0	0.280248	0.28045	0.07	0.48675	0.4961	0.13

MST : puramente difusar

Lei de Variação da Intensidade

$$L_{s,m} = L_{n,m} \exp\left[-\beta\left(\frac{z-z_0}{\mu_m}\right)\right] + S_m \left(1 - \exp\left[-\beta\left(\frac{z-z_0}{\mu_m}\right)\right]\right)$$

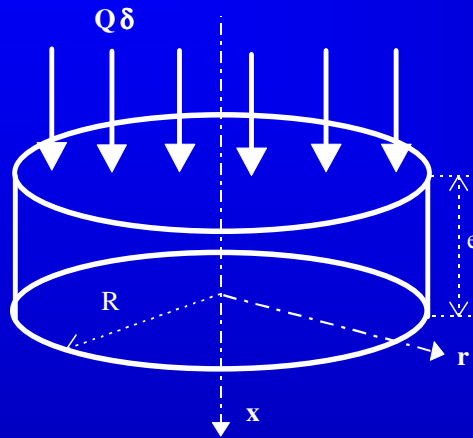
Intensidade média V.C

$$L_{P,m} = (L_{1,m} - S_m) \left(1 - \text{Exp}\left[-\beta\left(\frac{z-z_0}{\mu_m}\right)\right]\right) \left(\frac{\mu_m}{\beta(z-z_0)}\right) + S_m$$



Acoplamento condução - radiação

Problema Físico



Equação da energia (Hipóteses)

- ☞ Simetria cilíndrica
- ☞ Isotrópico e Homogêneo
- ☞ Transiente

Condições de Contornos

- ☞ Perdas por radiação e convecção

Condição Inicial

- ☞ Temperatura imposta



Formulação Matemática

Equação da Energia

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{\lambda} \nabla \cdot \mathbf{q}^r = \frac{\rho c_p}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t}$$

$\nabla \cdot \mathbf{q}^r$, - divergente do fluxo radiativo

Condições de contornos

$$(1 - \rho_i) q_z^r + h_r T_s + h T_\infty = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} + h T + h_r T + \varepsilon_i n^2 \bar{\sigma} T^4$$

Condição Inicial

$$T_i - T_e = \frac{q_{\text{flash}}}{\rho c_p \varepsilon}$$

$$T_i = T_e$$



Solução Numérica

Metodologia de Cálculo

1- Aproximação Volume de controle \longrightarrow Equações em diferenças finitas

2 – Campo de temperatura inicial uniforme

3 – Solução da ETR – Método das Ordenadas discretas

4 – Cálculo das grandezas radiativas: radiação incidente, fluxos nas superfícies e divergente do fluxo radiativo.

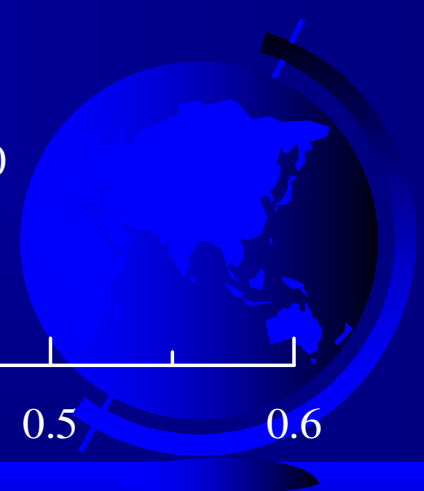
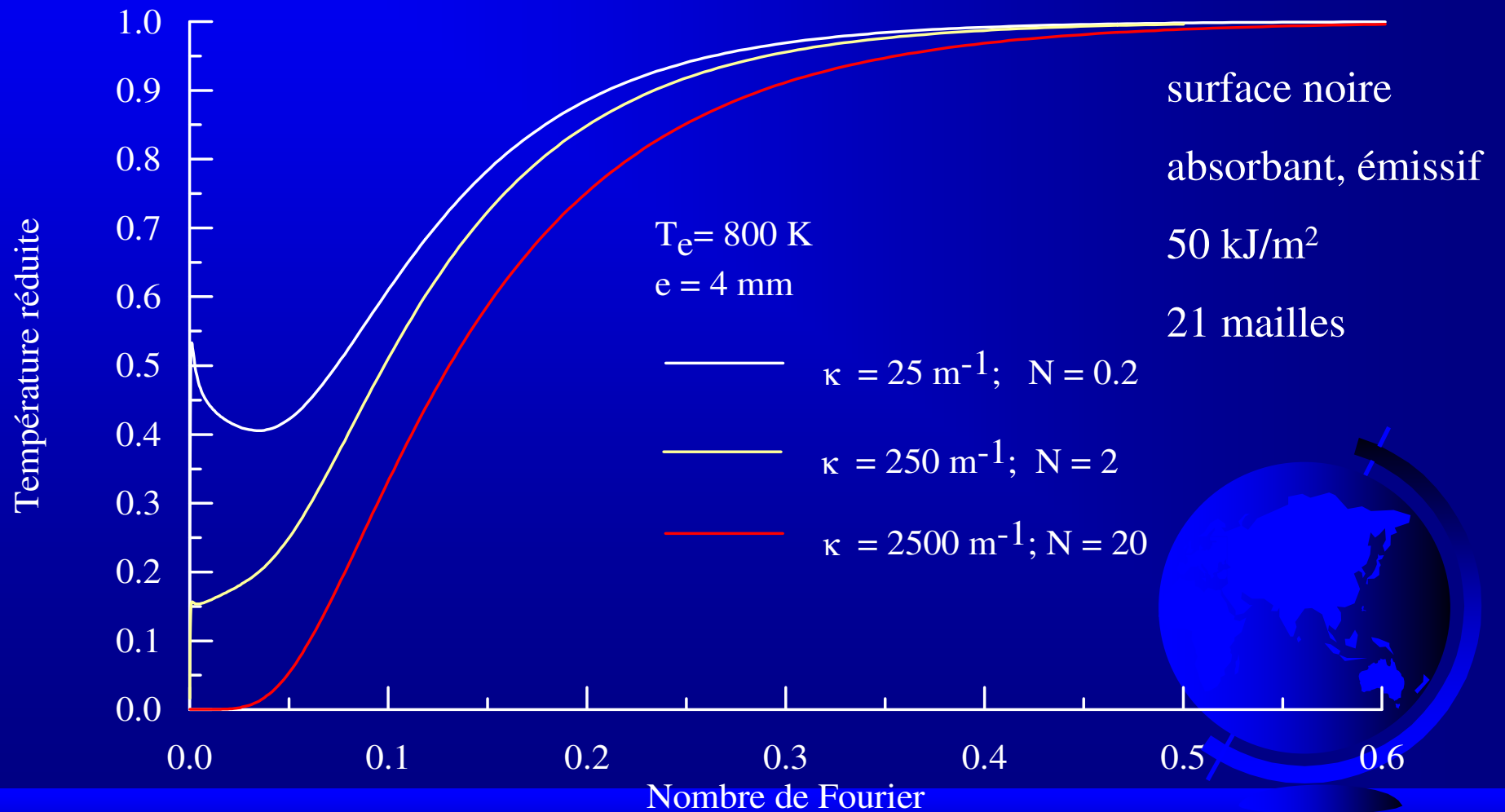
5 – Solução da equação da energia - Método iterativo de Newton-Raphson

As etapas 3 à 5 são repetidas até alcançar o critério de convergência.

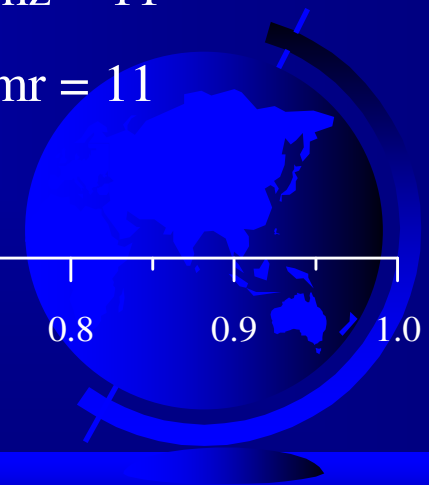
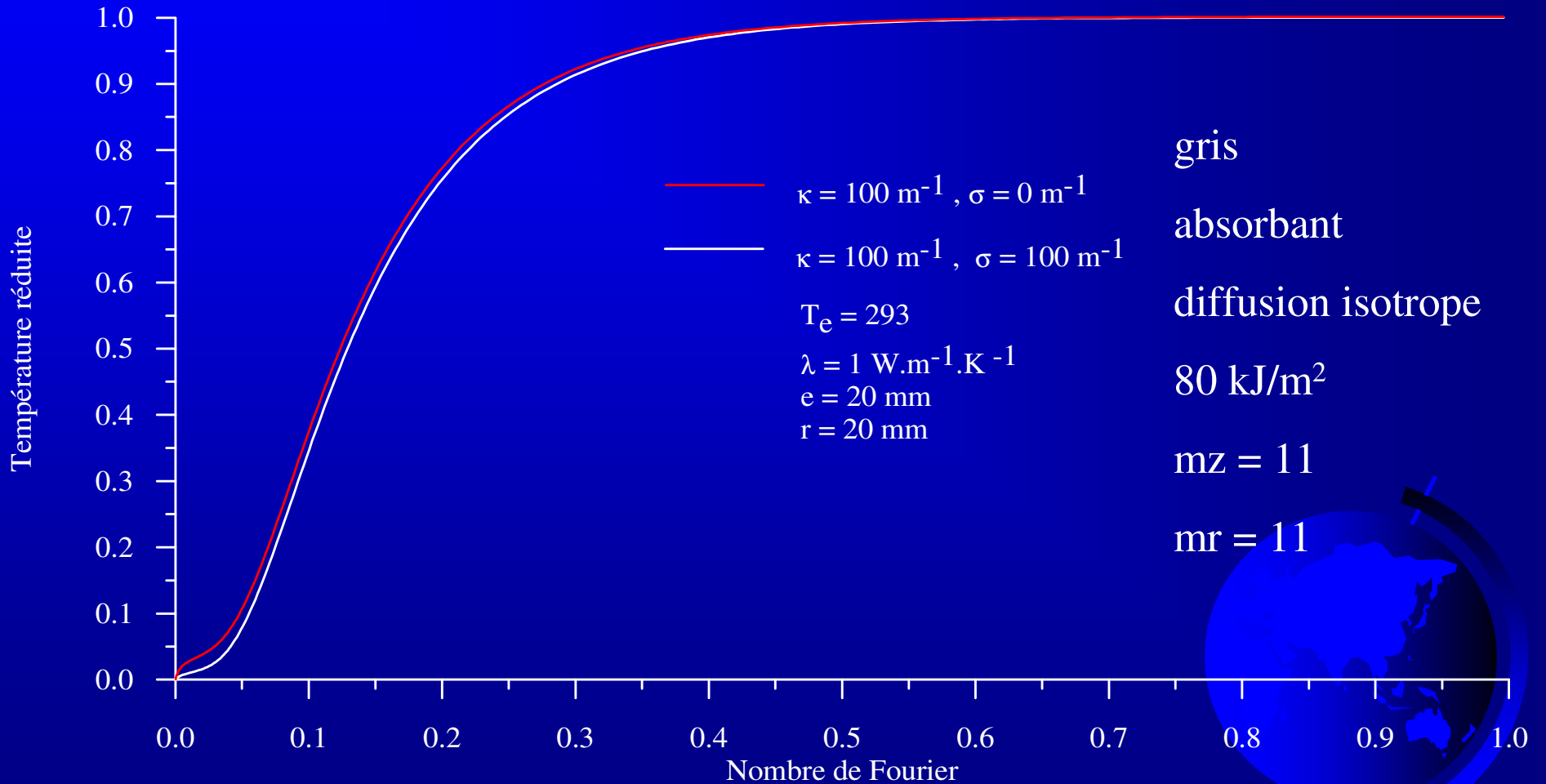


Validação

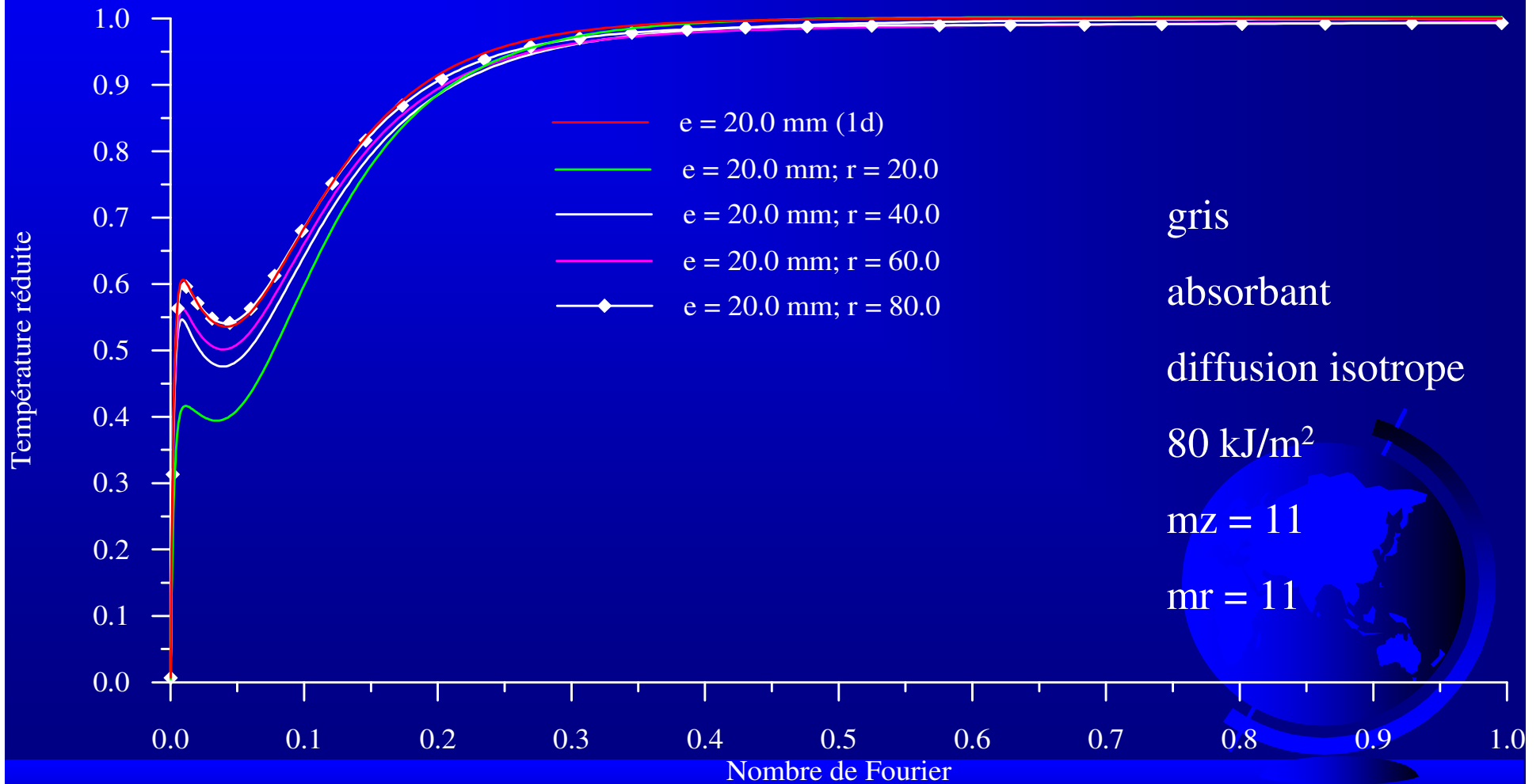
Caso 1D



Simetria Cilindrica

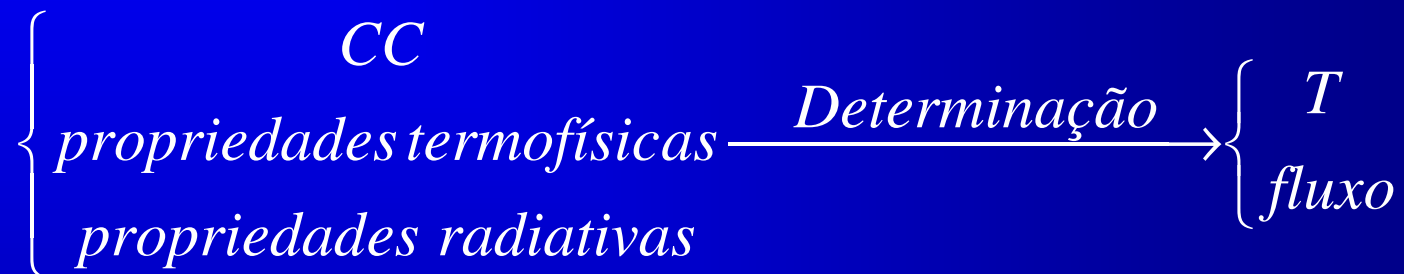


Bidimensional \longrightarrow Unidimensional

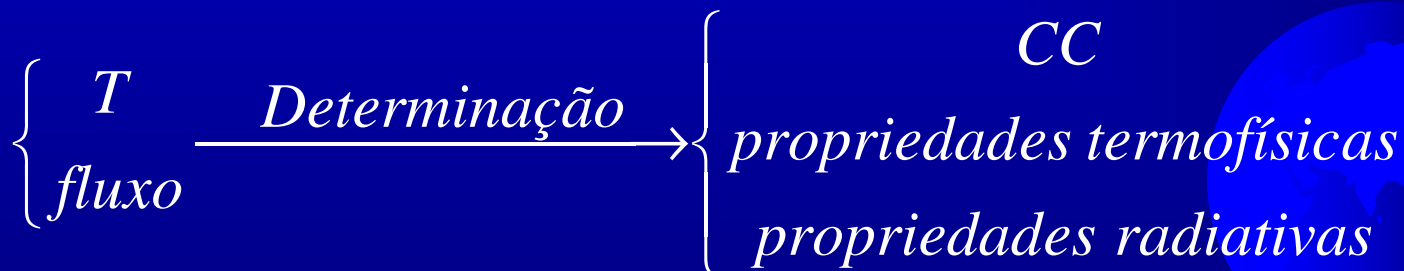


Identificação dos parâmetros

Problema direto



Problema Inverso



Análise de sensibilidade

Objetivo → determinar as condições mais favoráveis para determinar os parâmetros desconhecidos

1 – Coeficientes de sensibilidade aos parâmetros

$$\Psi_i^* = p_i \frac{\partial \theta(z^*, r^*, t, p_i)}{\partial p_i}$$

2 – Análises dos coeficientes de sensibilidade

- qualitativo

- quantitativo (ncm)

3 – parâmetros identificáveis



Parametrização

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad ; \quad N = \frac{\beta \lambda}{4n^2 \sigma T_e^3} \quad ; \quad Bi_i = \frac{h e}{\lambda} \quad ; \quad T_r = \frac{q_{\text{flash}}}{\rho c_p} \quad ; \quad Fo = \frac{a t}{e^2} \quad ; \quad \tau_z = \beta e$$

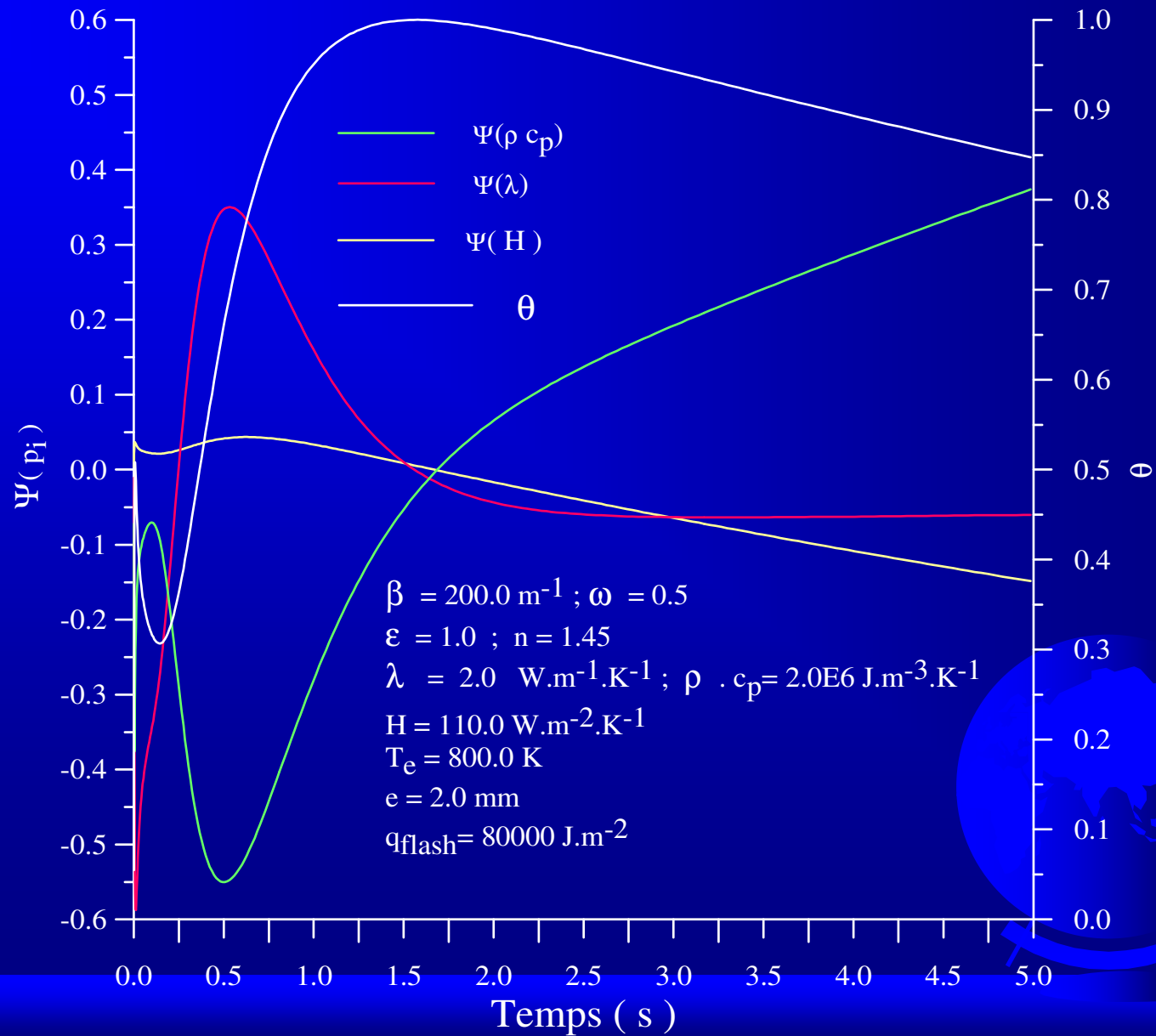


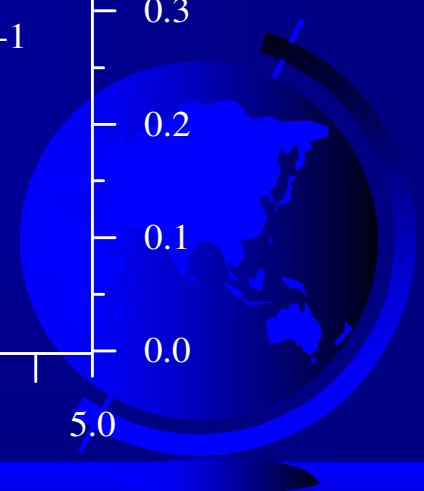
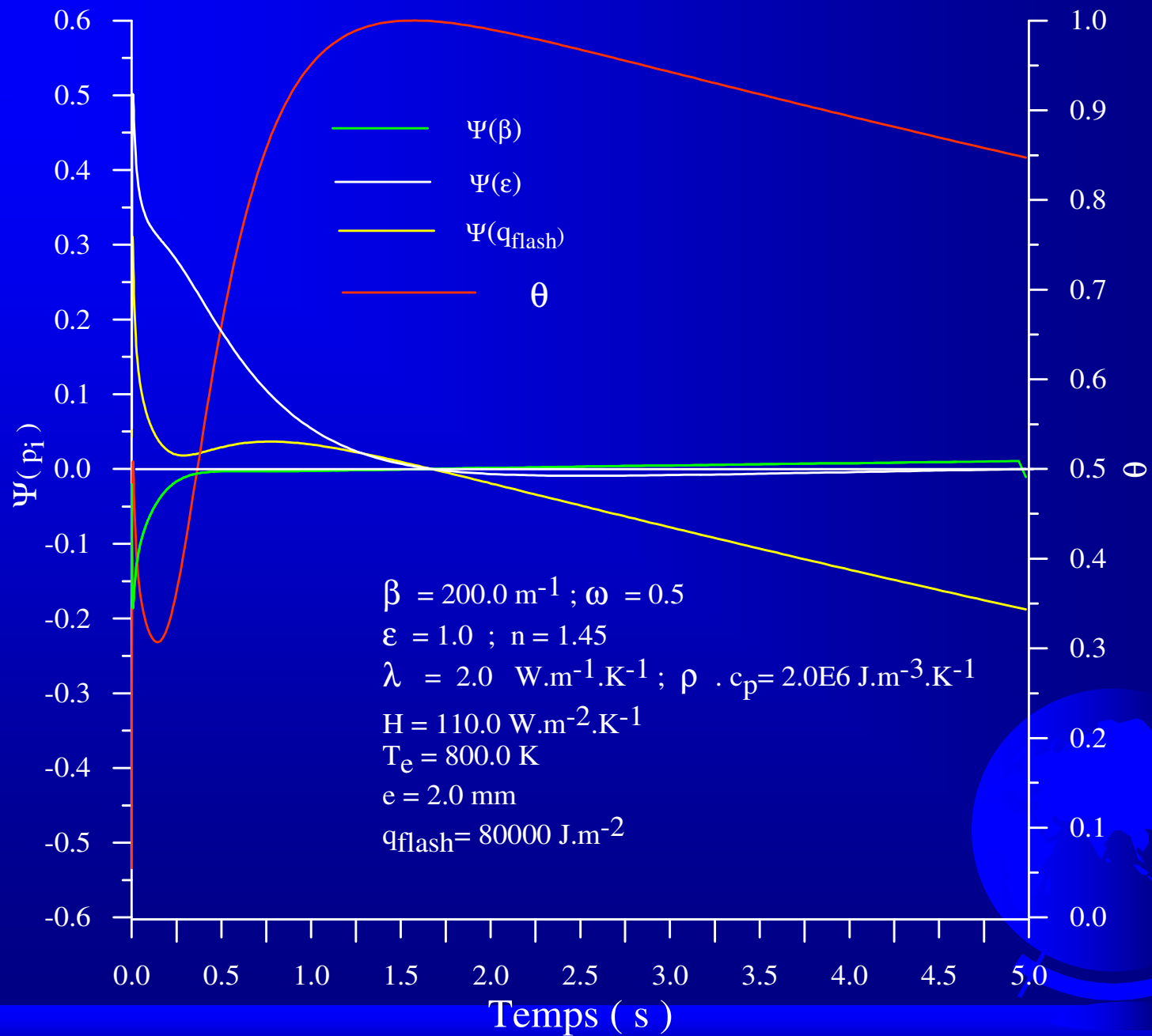
$$\theta^* \xrightarrow{f} \left\{ \begin{array}{c} Fo \\ Bi \\ N \\ T_r \\ \tau_z \\ \omega \\ \varepsilon \end{array} \right.$$

$$\theta^* \xrightarrow{f} \left\{ \begin{array}{c} t \\ h \\ \lambda \\ \rho c_p \\ e \\ q_{\text{flash}} \\ \beta \\ \omega \\ \varepsilon \end{array} \right.$$



Coeficientes de sensibilidade (Superficie Negra)





Identificação – Experiência simulada

Método de Levenberg - Marquardt

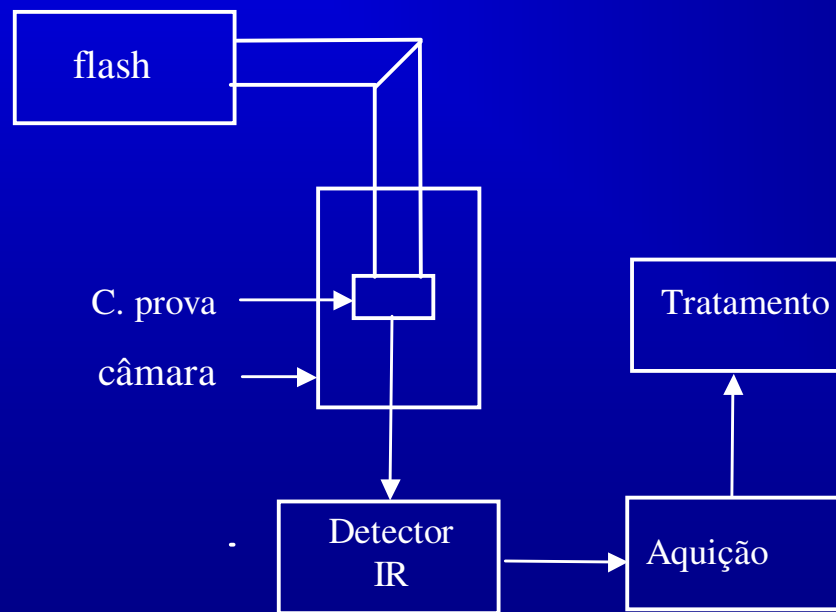
Résultats d'identification simulés

Paramètres		Valeurs	
Connus	Inconnus	Réelles	Identifiées
$\varepsilon=1, H=110,$ $\beta=200$ $q_{flash}=8.10^5$	λ ρc_p	$\lambda = 2.0$ $\rho c_p = 2.10^6$ $a = 10^{-6}$	$\lambda = 1,95 \pm 0,26.10^{-1}$ $\rho c_p = 2,054.10^6 \pm 0,24.10^5$ $a = 9,5.10^{-7} \pm 1,4.10^{-8}$
$\beta=200$ $\varepsilon=1.0$ $q_{flash}=8.10^5$	$H, \lambda, \rho c_p$	$H = 110.0$ $\lambda = 2.0$ $\rho c_p = 2.10^6$ $a = 10^{-6}$	$H = 117.8 \pm 11.4$ $\lambda = 1.99 \pm 0,29.10^{-1}$ $\rho c_p = 2,02.10^6 \pm 0,82.10^5$ $a = 0,98.10^{-7} \pm 2,08.10^{-8}$
$H=110$ $\varepsilon=1.0$ $q_{flash}=8.10^5$	$\beta, \lambda, \rho c_p$	$\beta = 200.0$ $\lambda = 2.0$ $\rho c_p = 2.10^6$ $a = 10^{-6}$	$\beta = 196.0 \pm 26.4$ $\lambda = 1.995 \pm 0.196$ $\rho c_p = 1,97.10^6 \pm 0,192.10^6$ $a = 1.013.10^{-6} \pm 7,8.10^{-9}$
Données de simulation : $\Delta t = 1.0 - \text{Exp}(-i.2.23^{-5})$; $\delta = 0.05T_{max}$.			
Intervalle d'identification : $0 \leq t \leq 0.53$; maillage : 21 noeuds			



RESULTADOS EXPERIMENTAIS

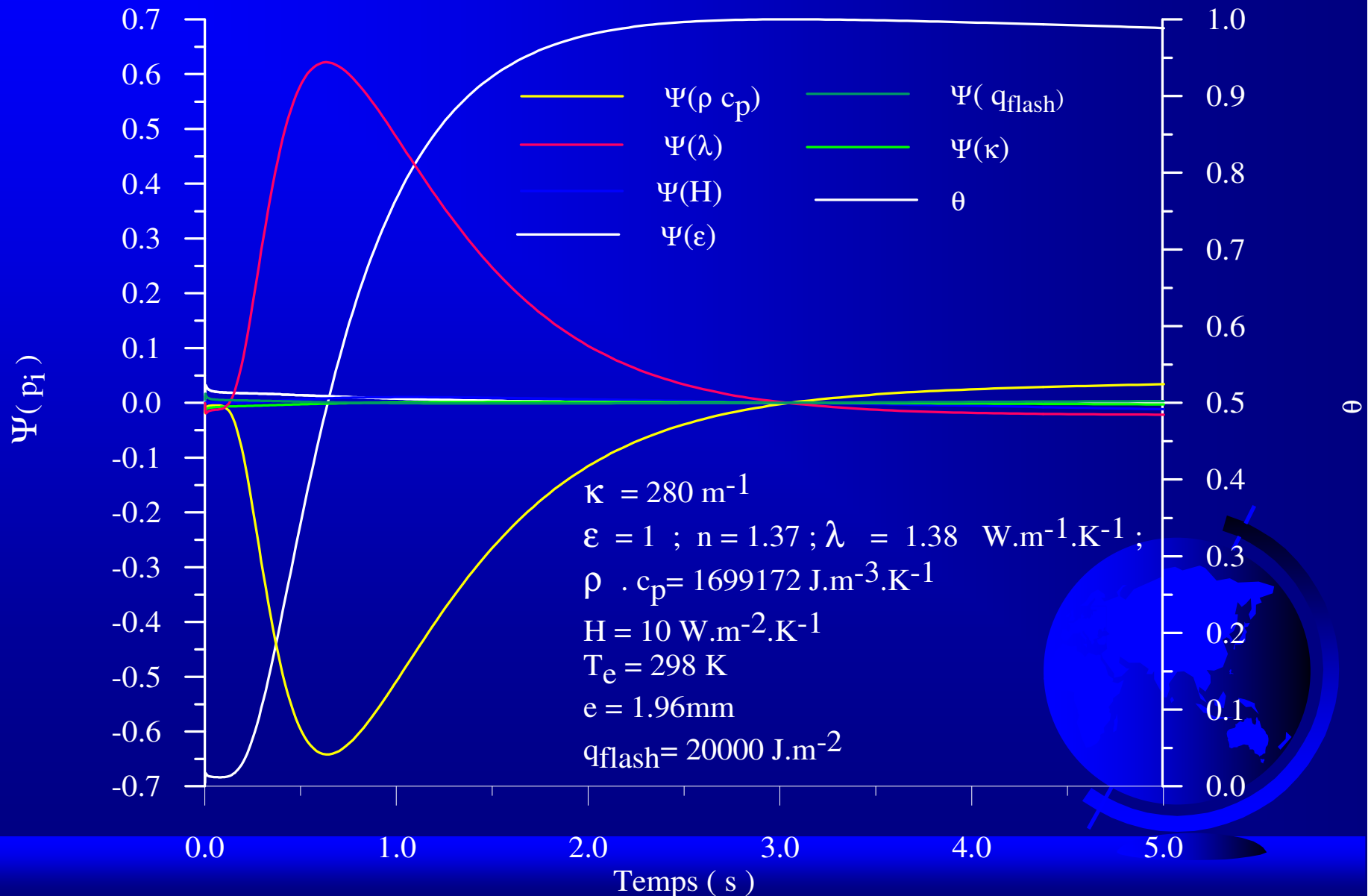
Thermogramas → $\left\{ \begin{array}{l} \text{CEACESTA} \Rightarrow \text{Vidro de silício} \\ \text{LEMTA} \Rightarrow \text{Irtran2} \end{array} \right.$



Dispositivo Experimental



Análise de sensibilidade



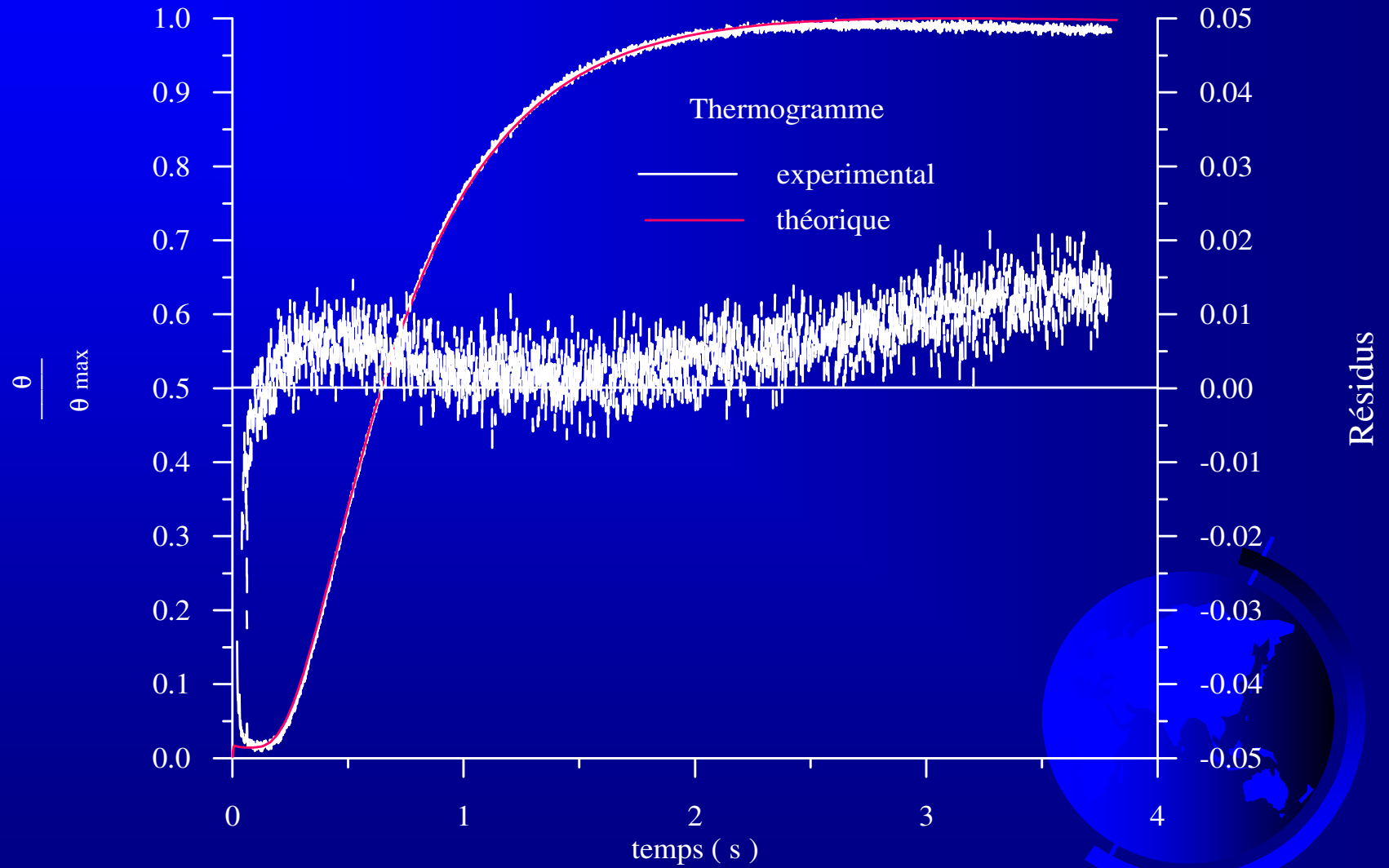
Resultados

SUPRASIL (R=20 mm, e = 1.96 mm, T_e=298 K).

Paramètres (SI)			
Connus	Inconnus	Estimées	Fabricant
H=10	$\lambda, \rho c_p,$	$\lambda = 1.18$	1.38
$q_{\text{flash}}=20000$		$\rho c_p = 1,47 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^6$
$\varepsilon=1.0$		$a = 8,05 \cdot 10^{-7}$	$8,1 \cdot 10^{-7}$
$\beta=280$			
pas du temps : $\Delta t = 0.001$ s maillage : 21 noeuds			
Intervalle d'identification : $0.009 \leq t \leq 0.6;$			



Resíduos



Resultados

SUPRASIL (R=20 mm, e = 1.96 mm, T_e=723 K).

Paramètres (SI)			
Connus	Inconnus	Estimées	Fabricant
H=85	$\lambda, \rho c_p,$	$\lambda = 1.91$	$\lambda = 1.93$
$q_{\text{flash}}=20000$		$\rho c_p = 2,9 \cdot 10^6$	$\rho c_p = 2,4 \cdot 10^6$
$\varepsilon=1.0$		$a = 6,54 \cdot 10^{-7}$	$a = 7,79 \cdot 10^{-7}$
$\beta=280$			
pas du temps : $\Delta t = 0.001$ s : maillage : 21 noeuds			
Intervalle d'identification : $0.009 \leq t \leq 0.6$;			



Difusividade Térmica - IRTRAN 2 (ZnS)

température (K)	ce travail	LEMMA
298*	$8,46 \cdot 10^{-6}$	$8,3 \cdot 10^{-6}$
633	$3,08 \cdot 10^{-6}$	$3,01 \cdot 10^{-6}$
783	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$2,46 \cdot 10^{-6}$

pas du temps : $\Delta t = 0.001$; * $\Delta t = 0.0005$ s ; 21 noeuds
Intervalle d'identification : $0.001 \leq t \leq 0.6$



Conclusões

- ✈ Estudo de transferência de calor acoplada condução-radiação
- ✈ Método de predição de TC para geometria cilíndrica e 1D foi apresentado
- ✈ A eficiência do método e compatibilidade com a equação da energia foi testada.
- ✈ Estudo de sensibilidade aos parâmetros – Experiência flash foi realizado.
- ✈ É possível identificar a difusividade térmica
- ✈ A identificação dos parâmetros radiativos é delicada



Caracterização Térmica de Meios Semi-Transparentes

PARTE II

*IDENTIFICAÇÃO DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS
DE MATERIAIS SEMITRANSSPARENTES
A ALTAS TEMPERATURAS*

Materiais Semi-Transparentes (MST) com aplicações em altas temperaturas:

CERÂMICAS

ÓXIDOS METÁLICOS

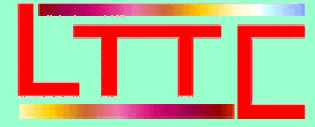
Aluminas (Al_2O_3),
Sílicas (SiO_2),
Magnesias (Mg_2O_3)...

NÃO ÓXIDOS

Aplicações:

Refratários: revestimento de fornos, fôrmas, isolantes

Indústria Aeroespacial: Proteção

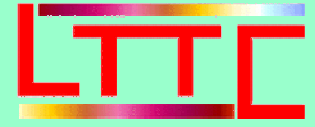


Características gerais das cerâmicas:

- Excelente resistência mecânica a $T > 1500\text{ °C}$
- Isolante térmico
- Comportamento radiativo mal conhecido e extremamente variável



Transferência de calor por condução e radiação acopladas



Objetivo deste trabalho:

→ **Estimativa das Propriedades Termofísicas**

Propriedades condutivas:

C

$k \rightarrow k_x, k_y, k_z$

h

Função da temperatura T

Propriedades radiativas:

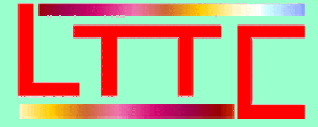
K_a

σ_s

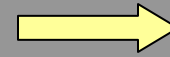
$p(\vec{s}' \rightarrow \vec{s})$

Função da temperatura T e do comprimento de onda λ

→ **Estimativa simultânea impossível**



Problema Inverso



2 etapas

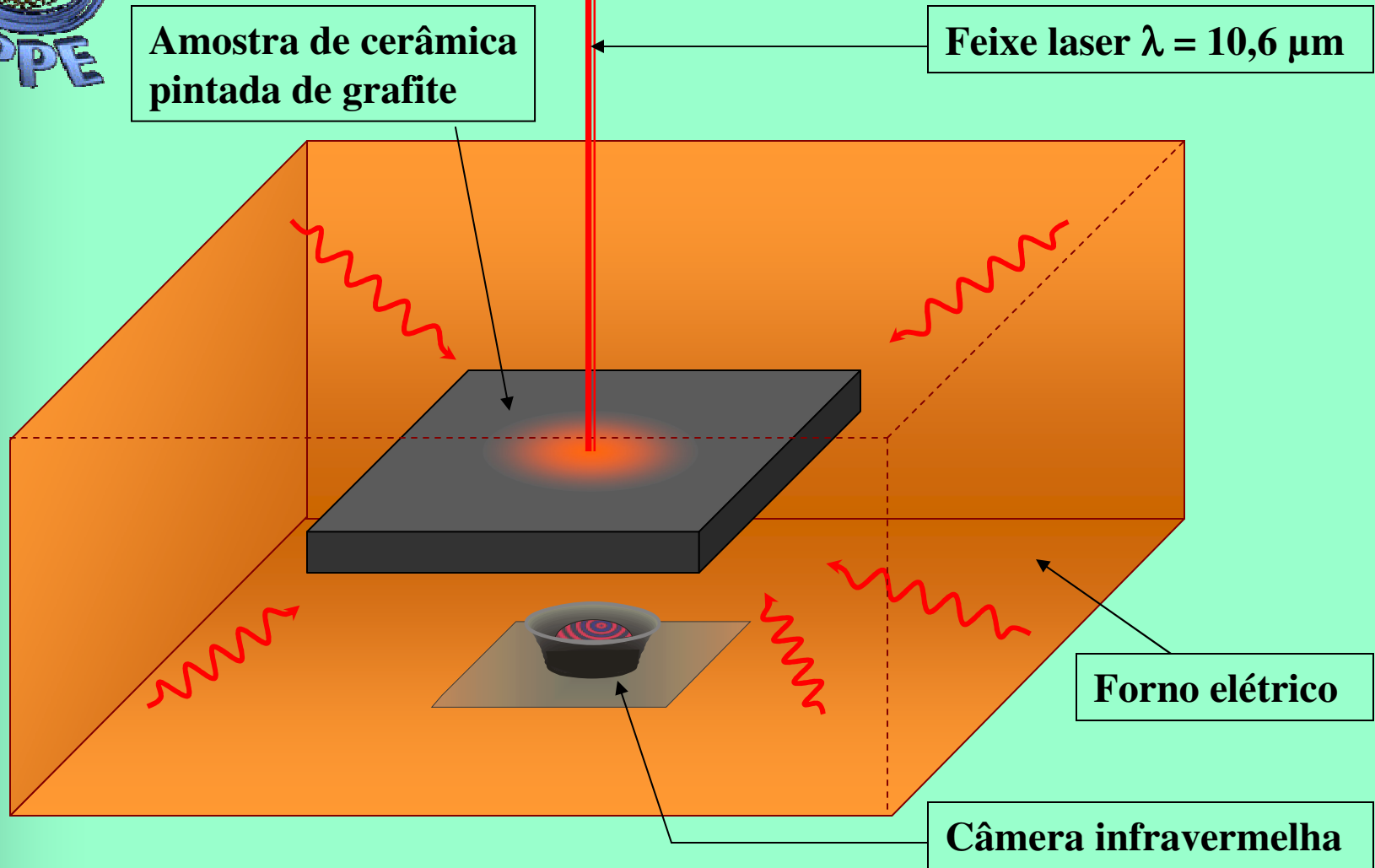
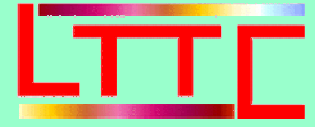
1ª etapa: Estimativa das propriedades condutivas

Parâmetros: C, k_x, k_y, k_z, h

Medidas: $T(x, y, z, t)$



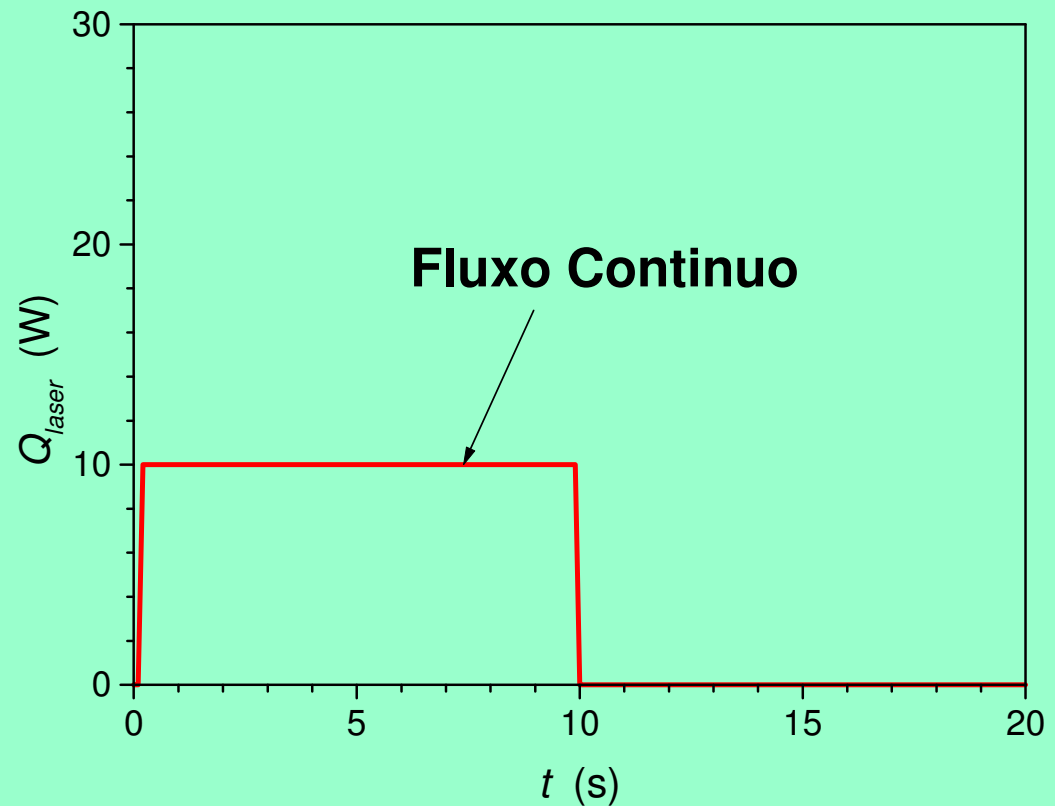
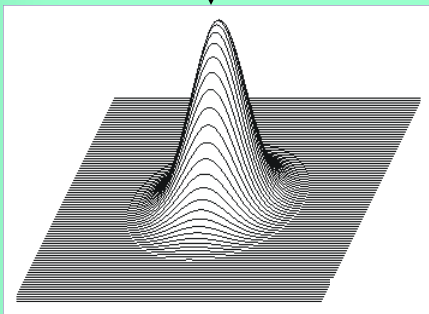
Experimento 1:



Experimento 1:

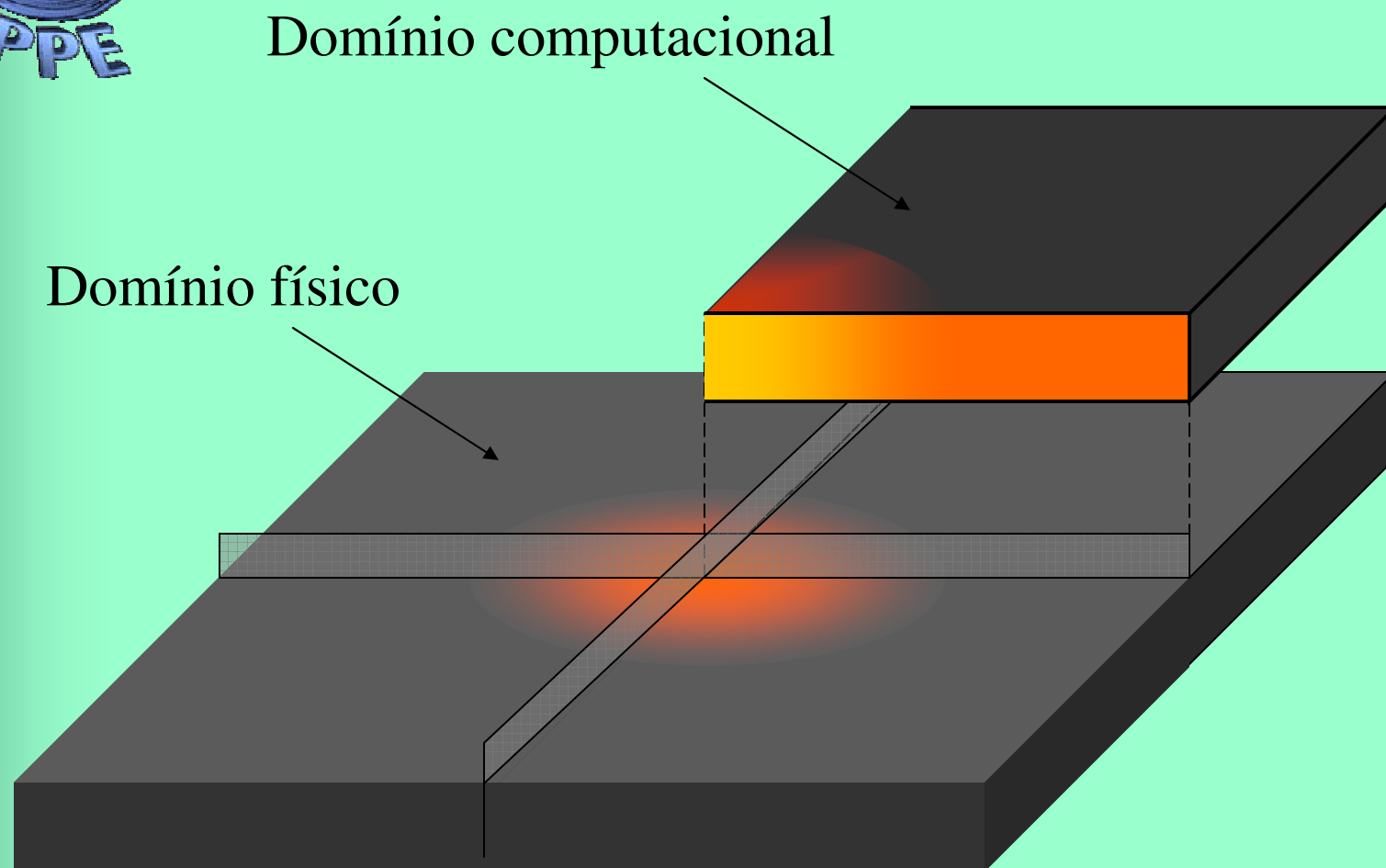
Fluxo $Q_{laser}(x, y, t) = \text{função "degrau"}$

Repartição
Gaussiana



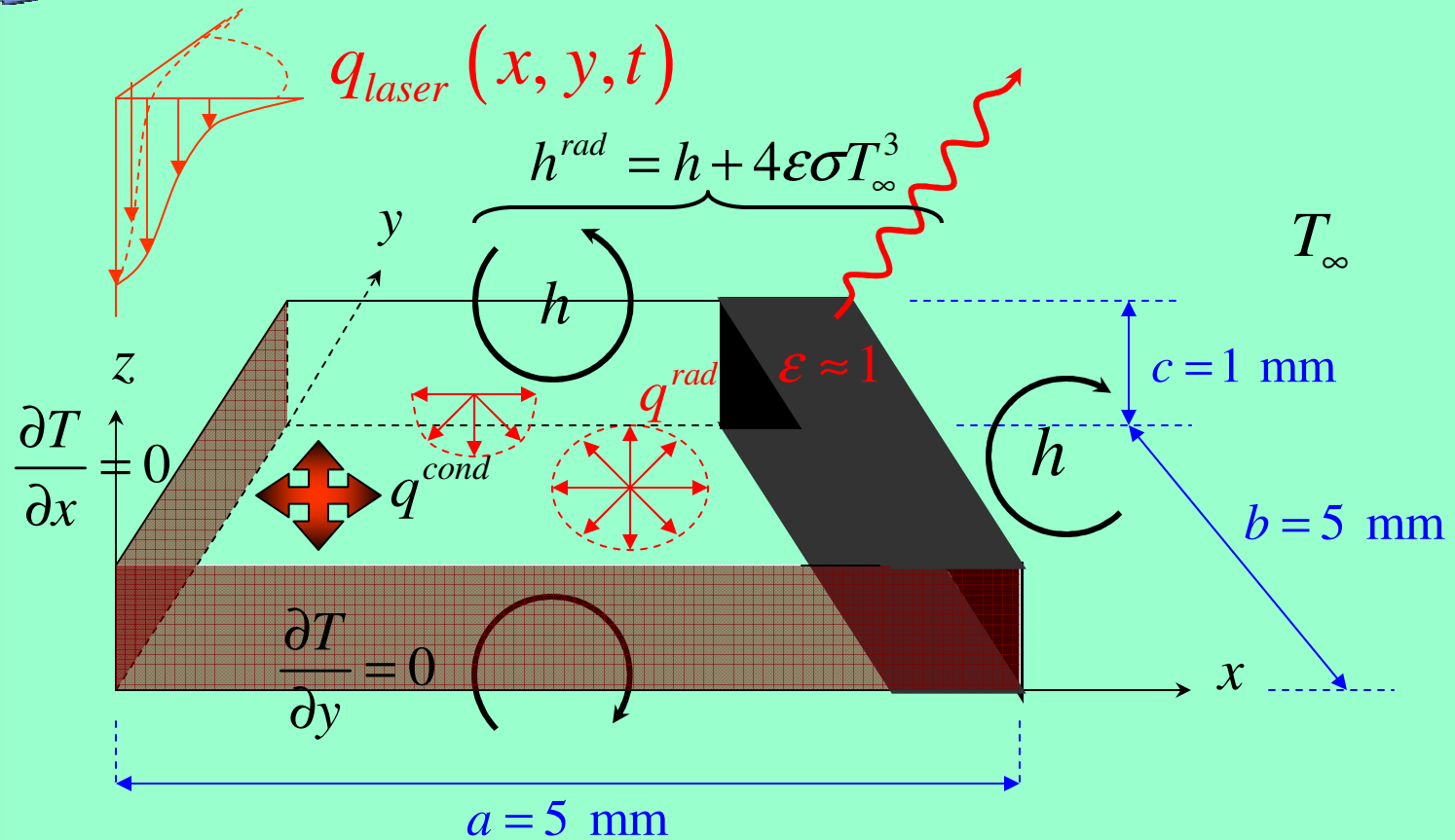
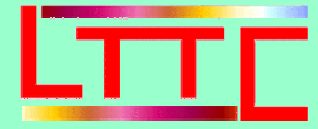


Formulação do problema direto:



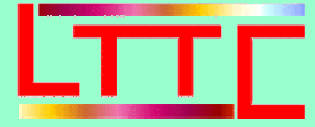


Formulação do problema direto:





Formulação do problema direto:



Acoplamento Condução-Radiação

Resolução simultânea da

- Equação de condução do calor

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \nabla \cdot q^{rad}$$

onde
$$\nabla \cdot q^{rad} = \int_{\lambda=0}^{\infty} \kappa_{a\lambda} \left[4\pi I_{b\lambda}(\mathbf{r}, T) - \int_{\Omega=4\pi} I_{\lambda}(\mathbf{r}, \vec{s}) d\Omega \right] d\lambda$$

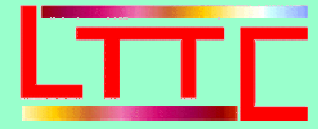
- Equação de Transferência Radiativa (meio cinza equivalente)

$$\xi \frac{\partial I_{\lambda}}{\partial x} + \eta \frac{\partial I_{\lambda}}{\partial y} + \mu \frac{\partial I_{\lambda}}{\partial z} = -(\kappa_{a\lambda} + \sigma_{s\lambda}) I_{\lambda} + S_{\lambda}$$

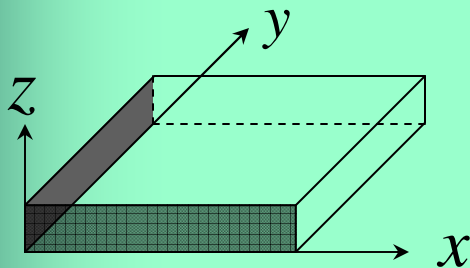
onde
$$S_{\lambda} = \kappa_{a\lambda} n_r^2 I_{b\lambda}(T) + \frac{\sigma_{s\lambda}}{4\pi} \int_{\Omega=4\pi} I_{\lambda} p(\vec{s}' \rightarrow \vec{s}) d\Omega$$



Formulação do problema direto:

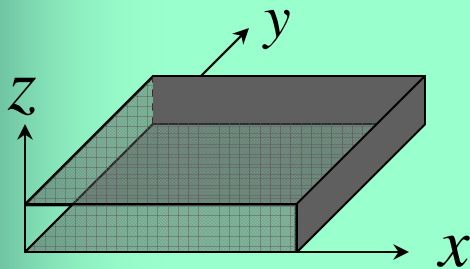
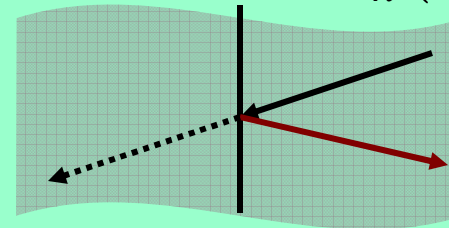


Condições de contorno radiativas:

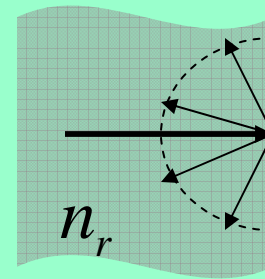


Plano de simetria:

$$I_\lambda(\mathbf{r}, \vec{s}) = I_\lambda(\mathbf{r}, \vec{s}^*)$$



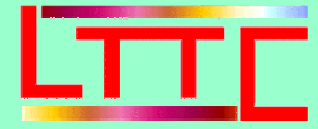
Fronteira opaca difusa em reflexão e emissão:



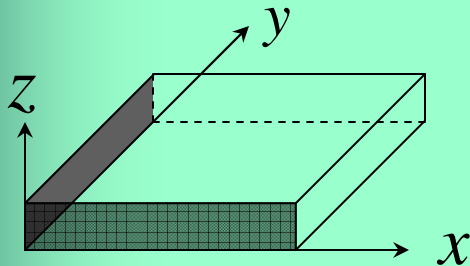
$$I_\lambda(\mathbf{r}, \vec{s}) = \varepsilon_\lambda I_{b\lambda}(\mathbf{r}, T) + \frac{1 - \varepsilon_\lambda}{\pi} \int_{\vec{n} \cdot \vec{s}^* < 0} I_\lambda(\mathbf{r}, \vec{s}^*) |\vec{n} \cdot \vec{s}^*| d\Omega^*$$



Formulação do problema direto:

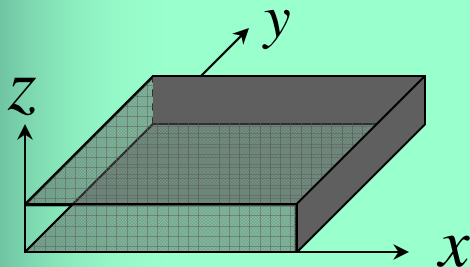


Condições de contorno condutivas:

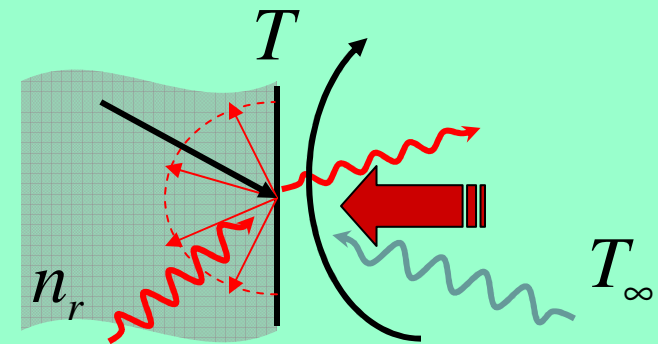


Planos de simetria:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$$



Contorno físico:

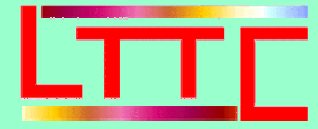


$$k \frac{\partial T}{\partial n} + hT + \varepsilon \sigma T^4 = \varepsilon \left[\int_{\vec{n} \cdot \vec{s} > 0} I(\mathbf{r}, \vec{s}) \vec{n} \cdot \vec{s} d\Omega - n_r^2 \pi I_b(T) \right] +$$

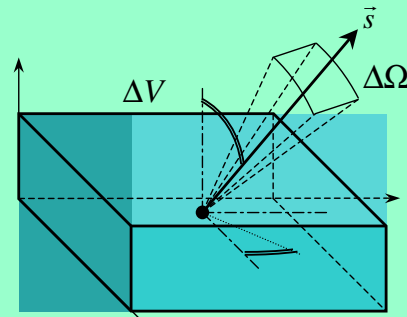
$$hT_\infty + \varepsilon \sigma T_\infty^4 + \varepsilon_{10.6 \mu\text{m}} \cdot q_{laser}$$



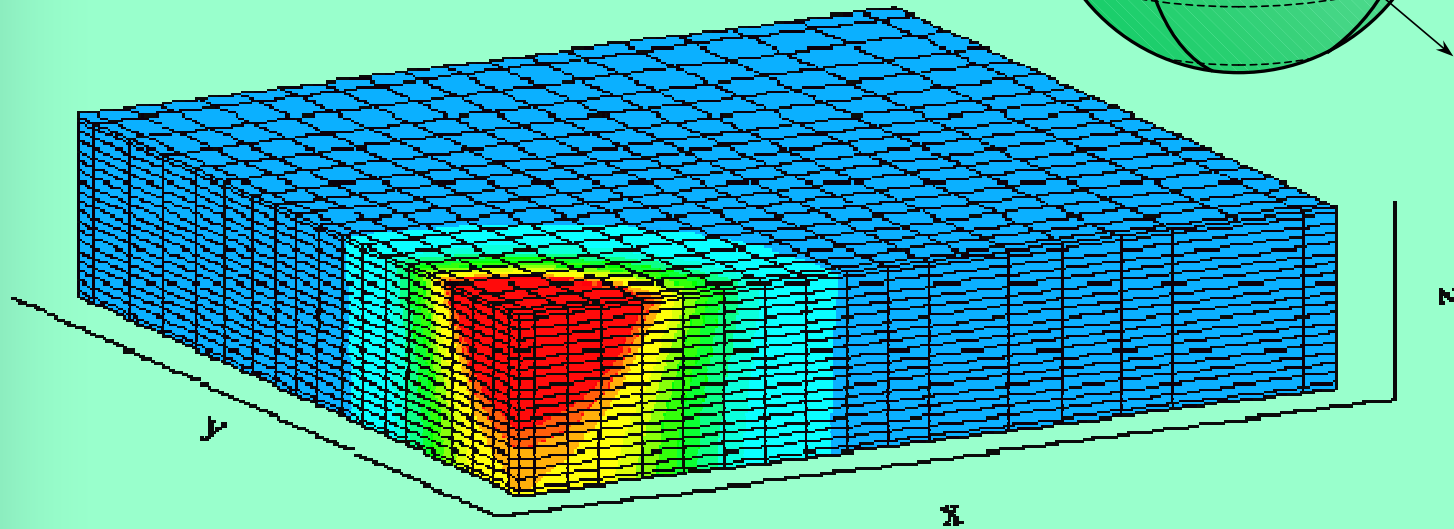
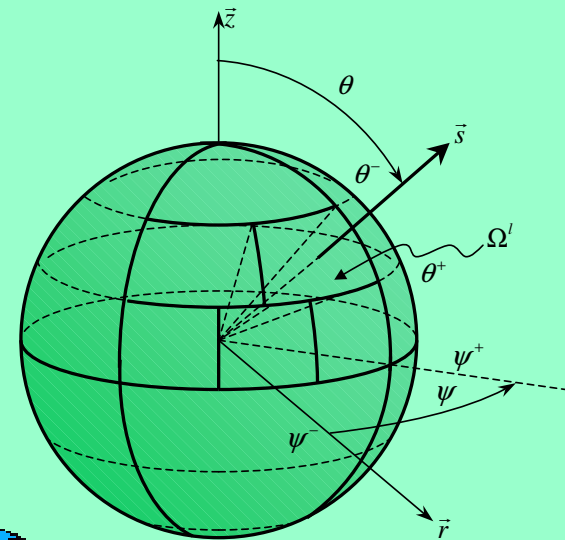
Método de Volumes Finitos:



Volume de controle :

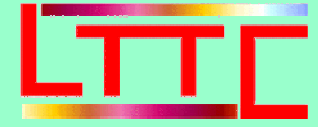


Discretização espacial e angular :





Método de Volumes Finitos:



Solução do problema condutivo:

→ Algoritmo implícito de brian integrado

Passo 1: $(a_e + a_w + a_p^0)T_p^* = a_e T_E^* + a_w T_W^* + S^n$

onde
$$S^n = a_n (T_N^n - T_P^n) + a_s (T_S^n - T_P^n) + a_t (T_T^n - T_P^n) + a_b (T_B^n - T_P^n) + a_p^0 T_P^n - (\nabla \cdot q^{rad^n}) \cdot \Delta V$$

Passo 2: $(a_N + a_S + a_p^0)T_p^{**} = a_N T_N^{**} + a_S T_S^{**} + S^*$

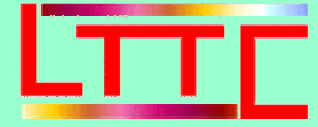
onde
$$S^* = a_e (T_E^* - T_P^*) + a_w (T_W^* - T_P^*) + a_t (T_T^n - T_P^n) + a_b (T_B^n - T_P^n) + a_p^0 T_P^n - (\nabla \cdot q^{rad^n}) \cdot \Delta V$$

Passo 3: $(a_T + a_B + a_p^0)T_p^{n+1} = a_T T_T^{n+1} + a_B T_B^{n+1} + S^{**}$

onde
$$S^{**} = a_e (T_E^* - T_P^*) + a_w (T_W^* - T_P^*) + a_n (T_N^{**} - T_P^{**}) + a_s (T_S^{**} - T_P^{**}) + a_p^0 T_P^{**} - (\nabla \cdot q^{rad^n}) \cdot \Delta V$$



Método de Volumes Finitos:



Solução do problema radiativo:

$$a_P^l I_P^l = \sum_{e,w,s,n,t,b} a_i^l I_i^l + b_P^l \quad \rightarrow \quad \text{Algoritmo explícito}$$

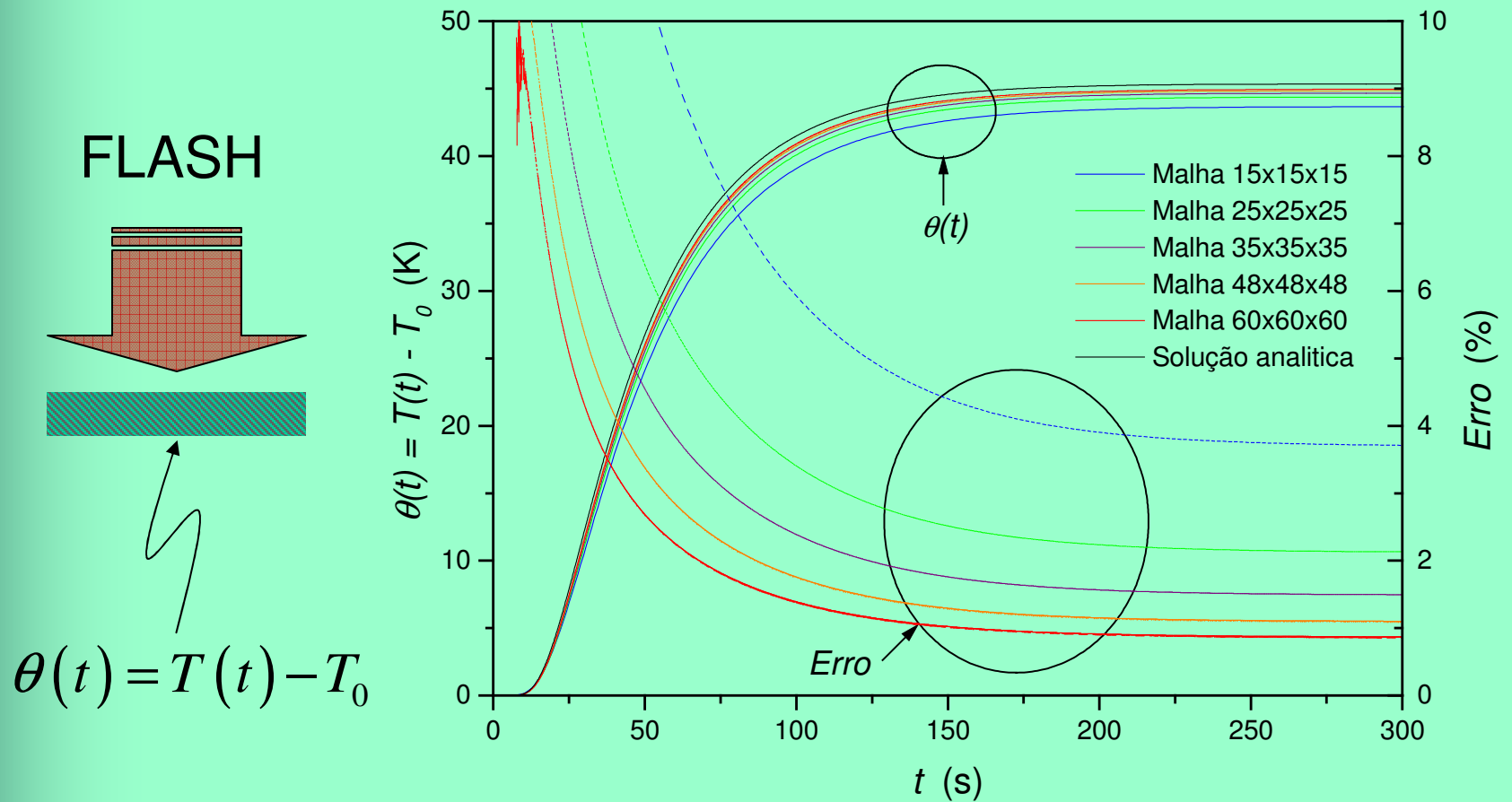
$$a_P^l = \sum_{e,w,s,n,t,b} \max\left(-\frac{A_i D_i^l}{f_{x_i}^l}, 0\right) + \tilde{\beta}_m^l \Delta V \Omega^l \quad ; \quad 0,5 < f_{x_i}^l < 1$$

$$a_i^l = \max\left(-\frac{A_i D_i^l}{f_{x_i}^l}, 0\right) \quad ; \quad b_P^l = \tilde{S}_m^l \Delta V \Omega^l$$

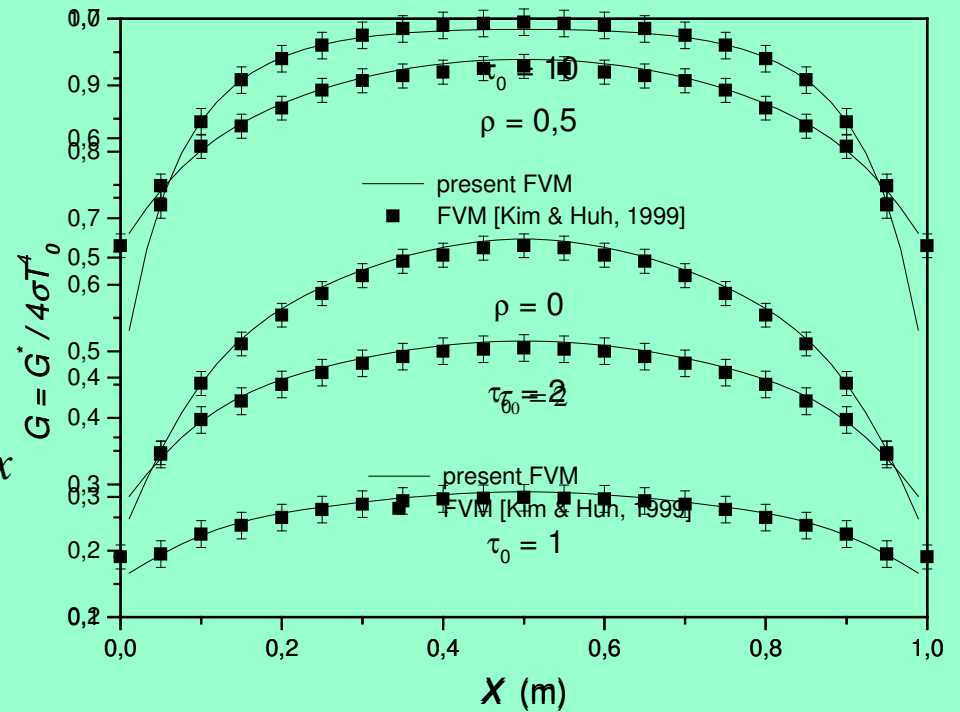
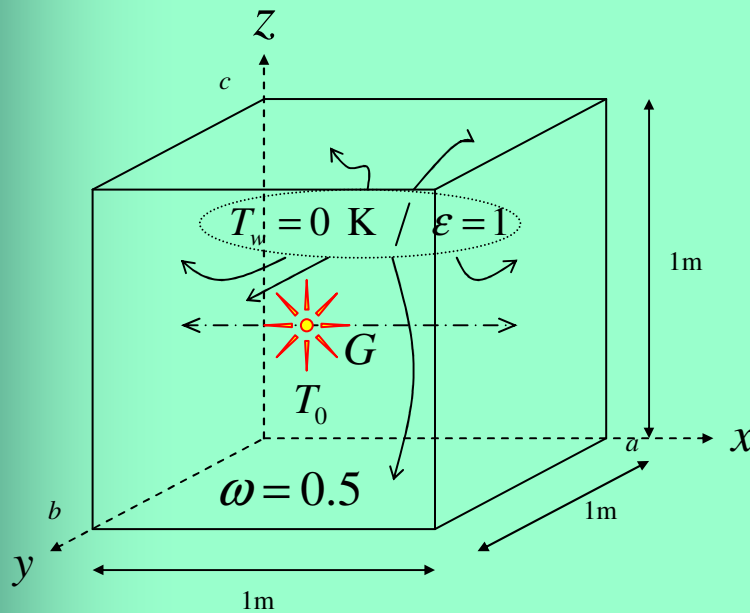
$$\tilde{\beta}_m^l = \beta_m - \frac{\sigma_{sm}}{4\pi} \overline{p_m^{ll}} \Omega^l \quad ; \quad \overline{p_m^{l'l}} = \frac{1}{\Omega^l \Omega^{l'}} \int_{\Omega^l} \int_{\Omega^{l'}} p_m(\vec{s}' \rightarrow \vec{s}) d\Omega d\Omega'$$

$$\tilde{S}_m^l = \kappa_{am} I_{bm} + \frac{\sigma_{sm}}{4\pi} \sum_{l' \neq l} I_P^{l'} \overline{p_m^{l'l}} \Omega^{l'}$$

Comparação com solução analítica

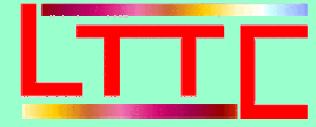


Comparação com solução numérica 3D





Validação do problema acoplado C/R:



Comparação com soluções numéricas 1D
de problema Flash condução-radiação

$$L = 1 \text{ cm}$$

$$C = 2.2 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$$

$$k = 0.7 \text{ W/m.K}$$

$$h = 7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$n_r = 1.5$$

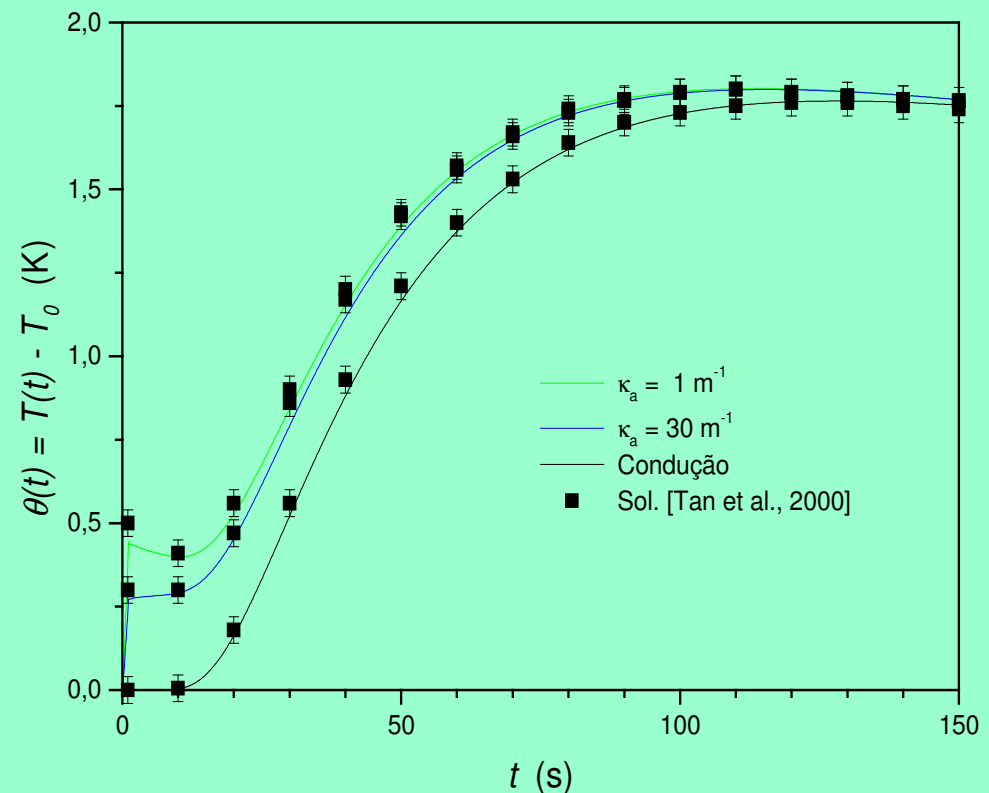
$$\sigma_s = 0$$

$$\varepsilon = 1$$

$$q_{laser} = 50 \text{ KW/m}^2$$

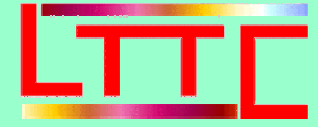
$$\Delta t_{laser} = 1 \text{ s}$$

$$T_0 = T_\infty = 300 \text{ K}$$





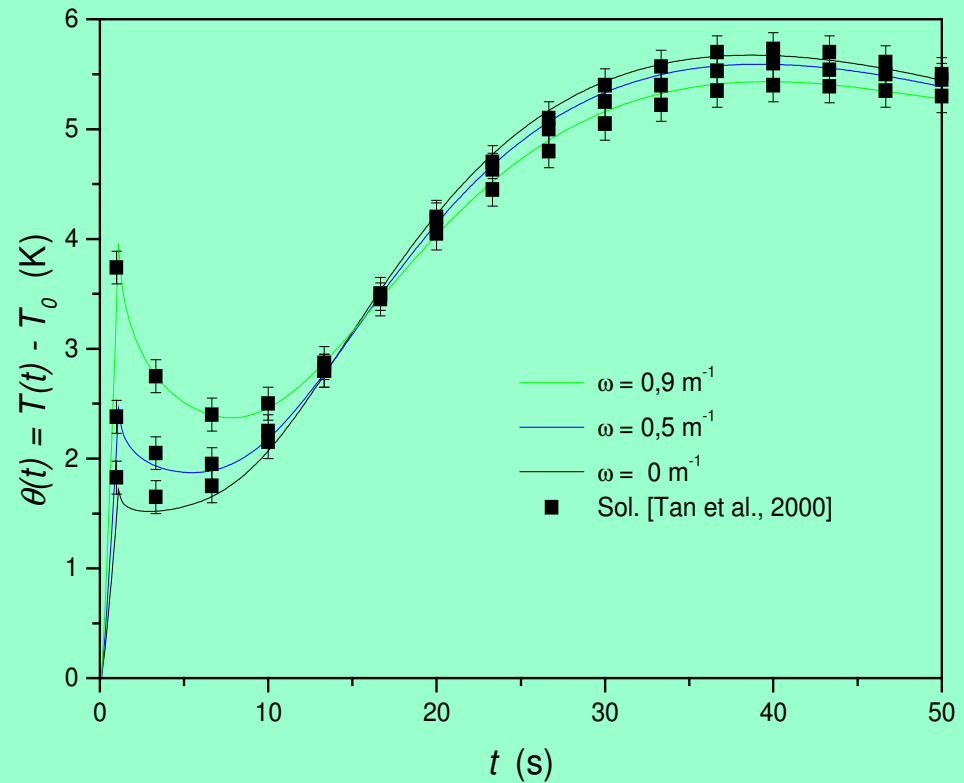
Validação do problema acoplado C/R:



Comparação com soluções numéricas 1D de problema Flash condução-radiação

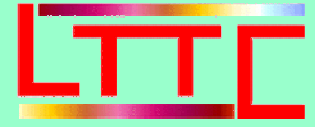
$L = 1 \text{ cm}$ $q_{laser} = 300 \text{ KW/m}^2$
 $C = 2.2 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$ $\Delta t_{laser} = 1 \text{ s}$
 $k = 1 \text{ W/m.K}$ $T_0 = T_\infty = 800 \text{ K}$
 $h = 5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

λ (μm)	n_r	ρ_λ	β_λ (m^{-1})
0.5-1.0	1.5	0.04	10
1.0-2.7	1.5	0.04	100
2.7-4.3	1.5	0.04	1000
4.3-10.3	1.5	0.06	10000
10.3-50	1.8	0.15	10000





Formulação do problema inverso:



Procedimentos iterativos para problemas não lineares:

- Método de Levenberg-Marquardt:

$$\mathbf{P}^{k+1} = \mathbf{P}^k + \left(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mu^k \mathbf{\Omega}^k \right)^{-1} \mathbf{J}^T \left[\mathbf{Y} - \mathbf{X}(\mathbf{P}^k) \right]$$

- Método de estimativa seqüencial:

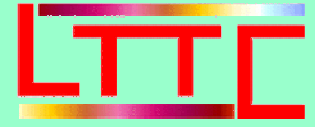
$$\mathbf{P}_{i+1}^{k+1} = \mathbf{P}_{i+1}^k + \left[\left(\mathbf{J}_{i+1}^k \right)^T \mathbf{W}_{i+1} \mathbf{J}_{i+1}^k + \mathbf{V}_i^{-1} \right]^{-1} \times \\ \left\{ \left(\mathbf{J}_{i+1}^k \right)^T \mathbf{W}_{i+1} \left[\mathbf{Y}_{i+1} - \mathbf{X}_{i+1} \left(\mathbf{P}_{i+1}^k \right) \right] + \mathbf{V}_i^{-1} \left(\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_{i+1}^k \right) \right\}$$

i = informações prévias

$i+1$ = estimativa atual

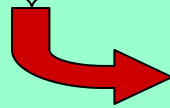


Formulação do problema inverso:



Quando a estimativa inicial é longe do vetor de parâmetros reais

- Método de Levenberg-Marquardt
- Método de estimativa sequencial



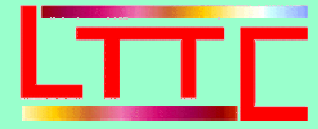
Não convergem

Solução: recorrer aos métodos estocásticos

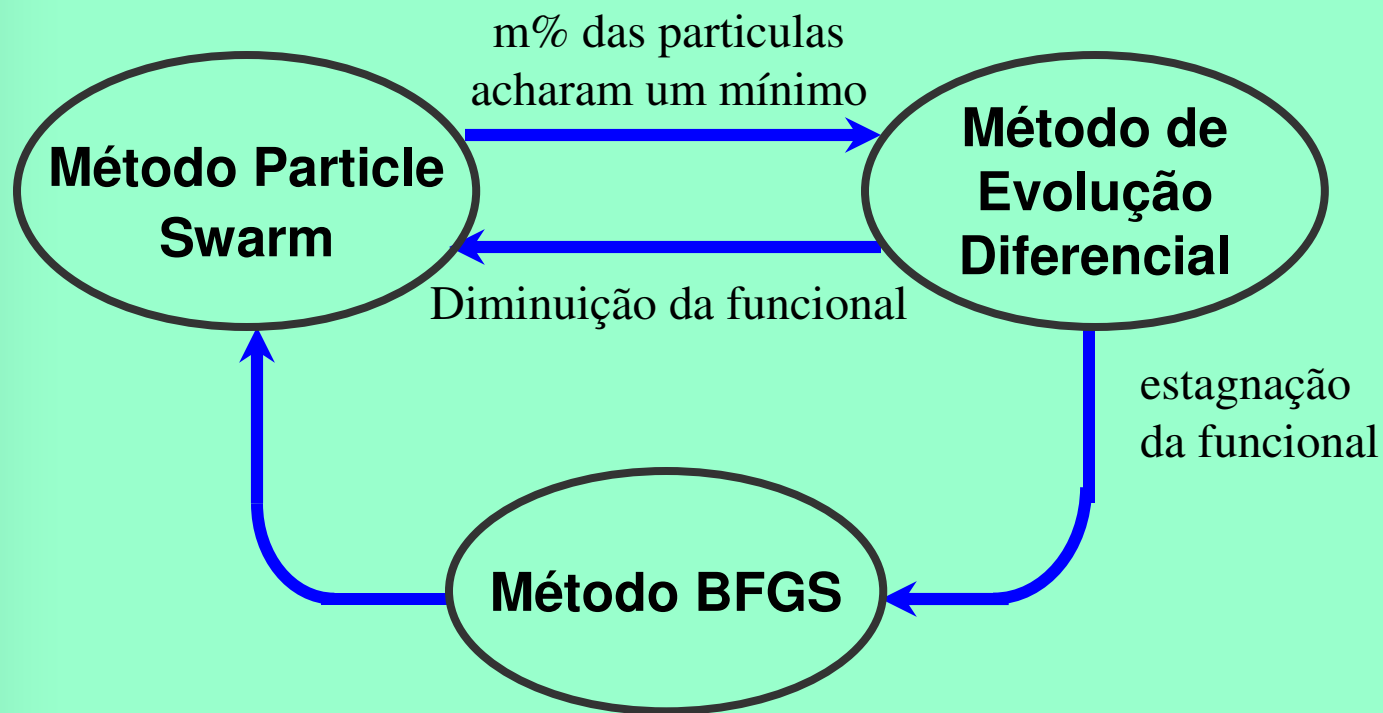
- Algoritmo Genético
- Método de evolução diferencial
- Método Particle Swarm



Formulação do problema inverso:

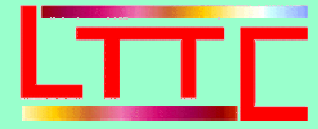


Algoritmo Híbrido



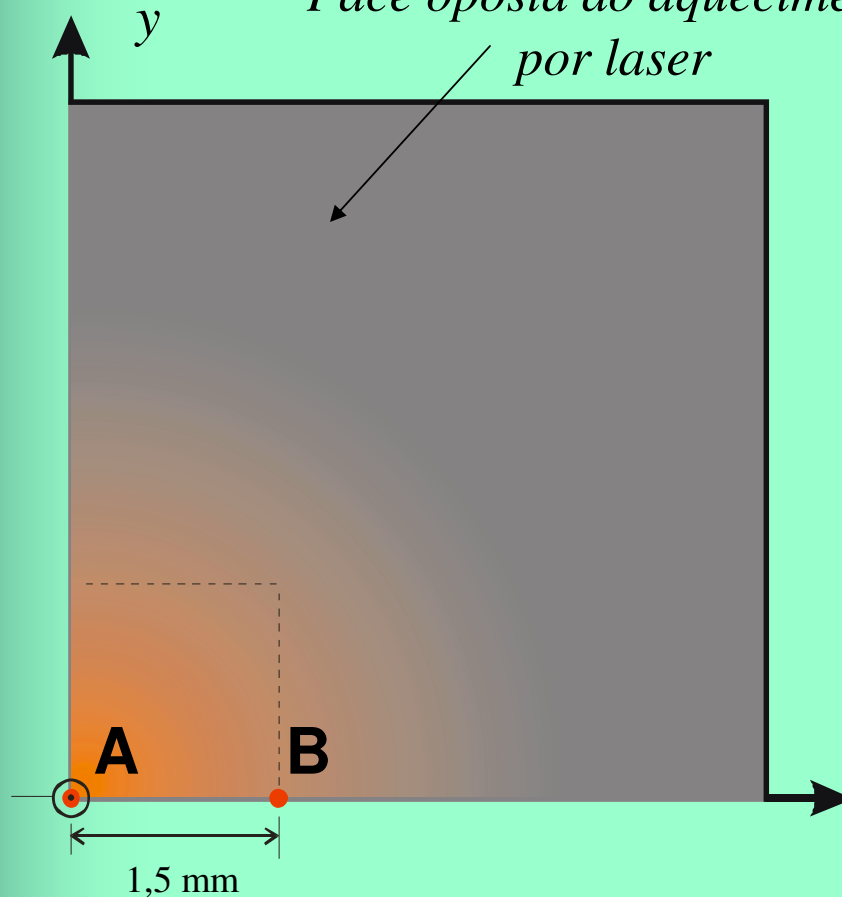


Otimização do experimento:



Análise dos coeficientes de sensibilidade

Face oposta ao aquecimento



Dados:

$$a = b = 5 \text{ mm}$$

$$c = 1 \text{ mm}$$

$$C = 2.5 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$$

$$k_x = k_y = k_z = 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$h = 5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$T_0 = T_\infty = 2000 \text{ K}$$

$$\kappa_a = 2 \text{ mm}^{-1}$$

$$\sigma_s = 0.5 \text{ mm}^{-1}$$

$$n_r = 1.8$$

$$\varepsilon = 0.9$$

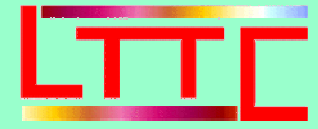
$$h^{rad} = h + 4\varepsilon\sigma T_\infty^3$$

$$A: \{ x = 0, y = 0, z = 0 \}$$

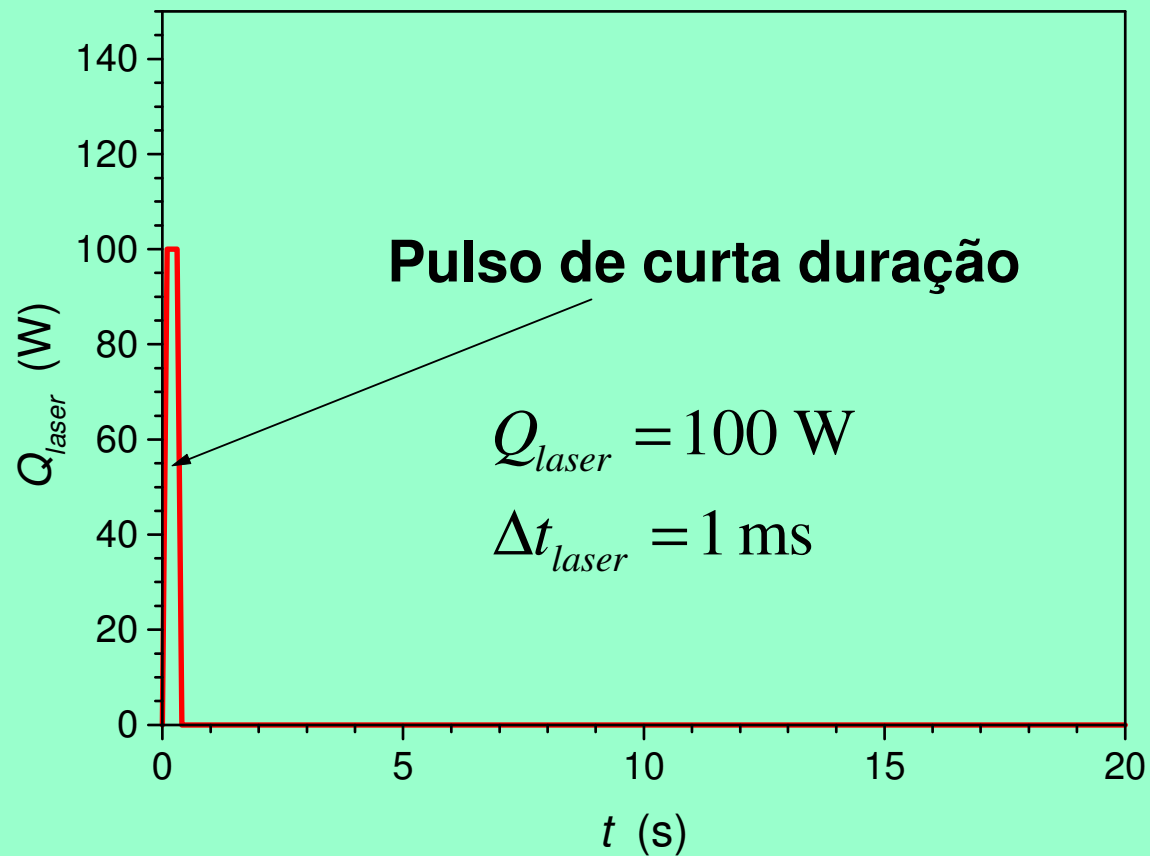
$$B: \{ x = 1.5, y = 0, z = 0 \}$$



Otimização do experimento:

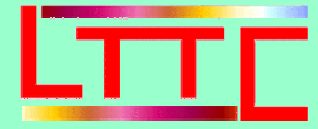


Análise dos coeficientes de sensibilidade

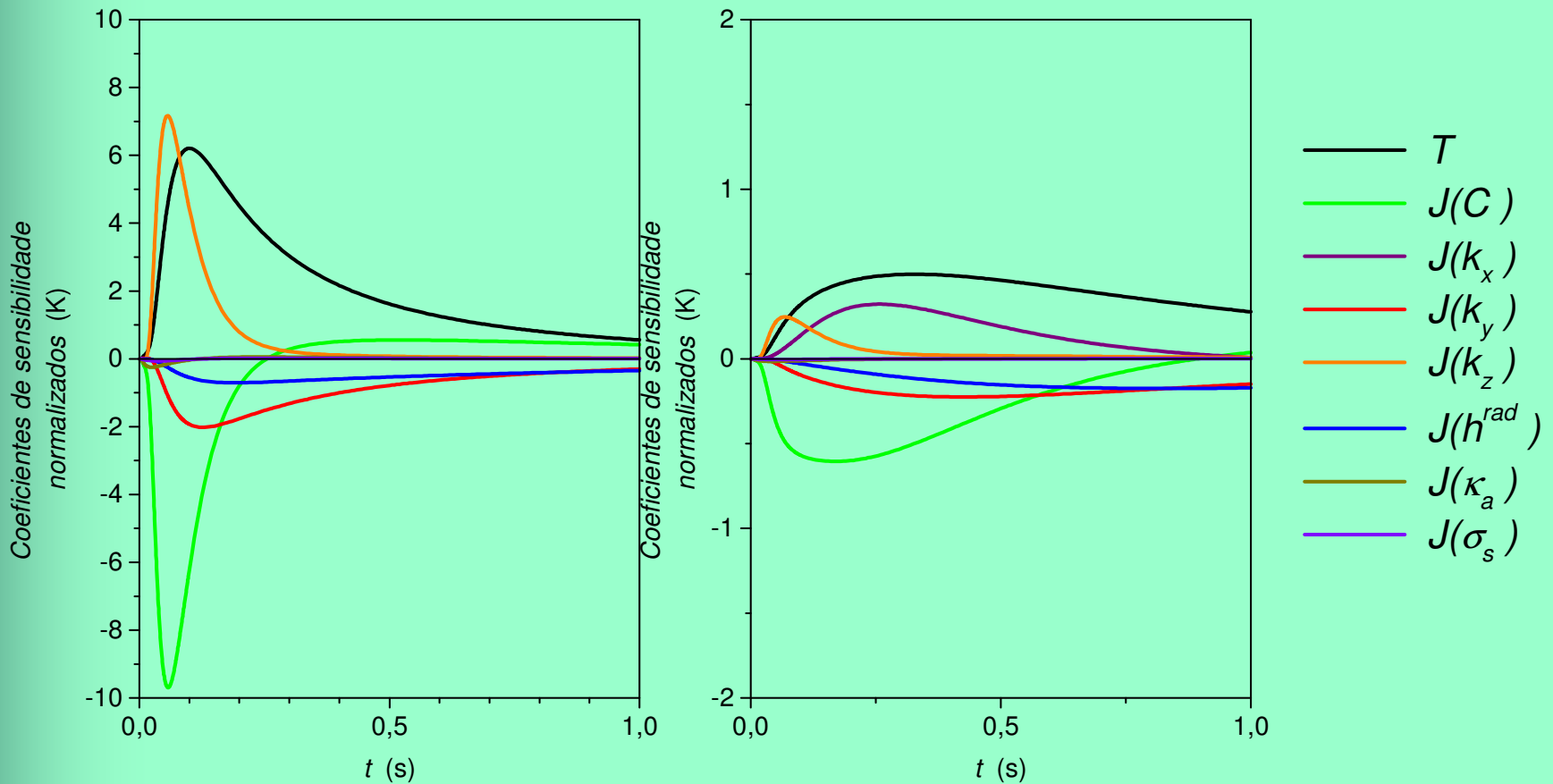




Otimização do experimento:

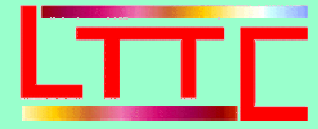


Análise dos coeficientes de sensibilidade

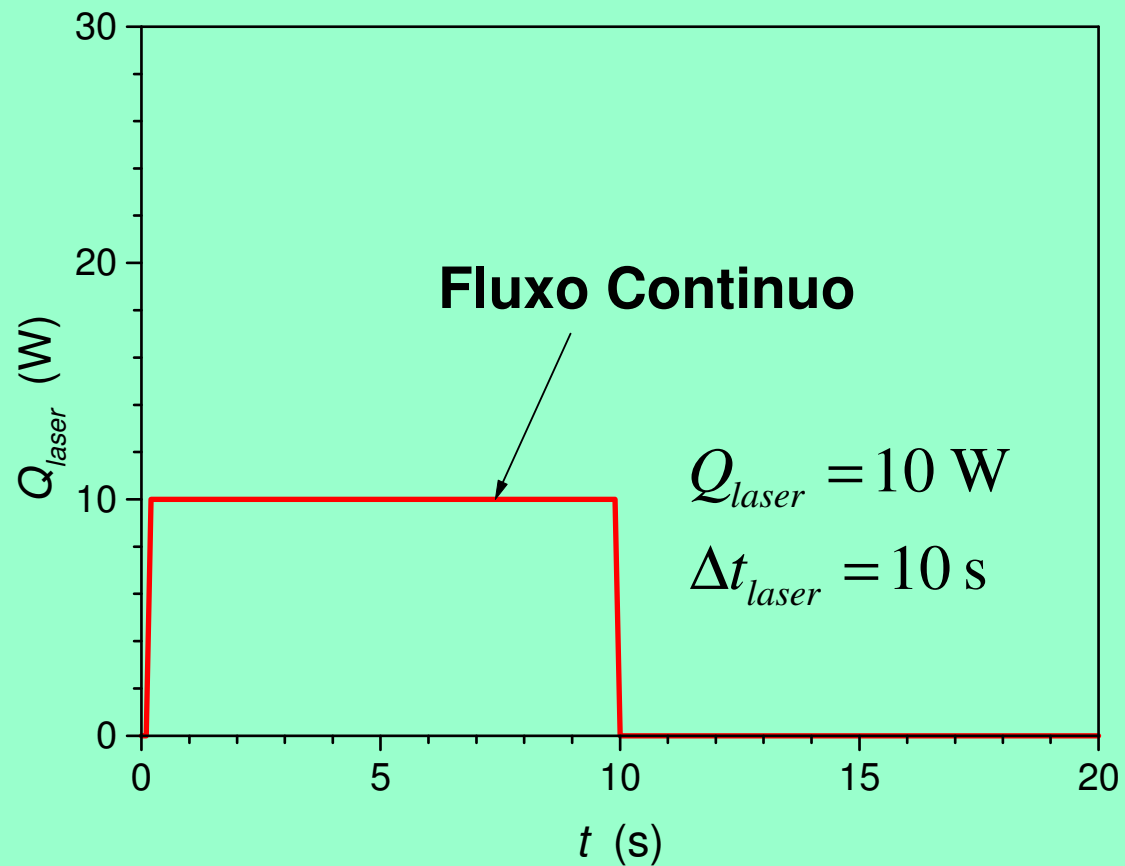




Otimização do experimento:

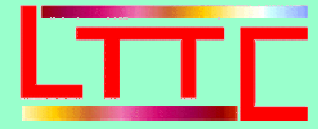


Análise dos coeficientes de sensibilidade

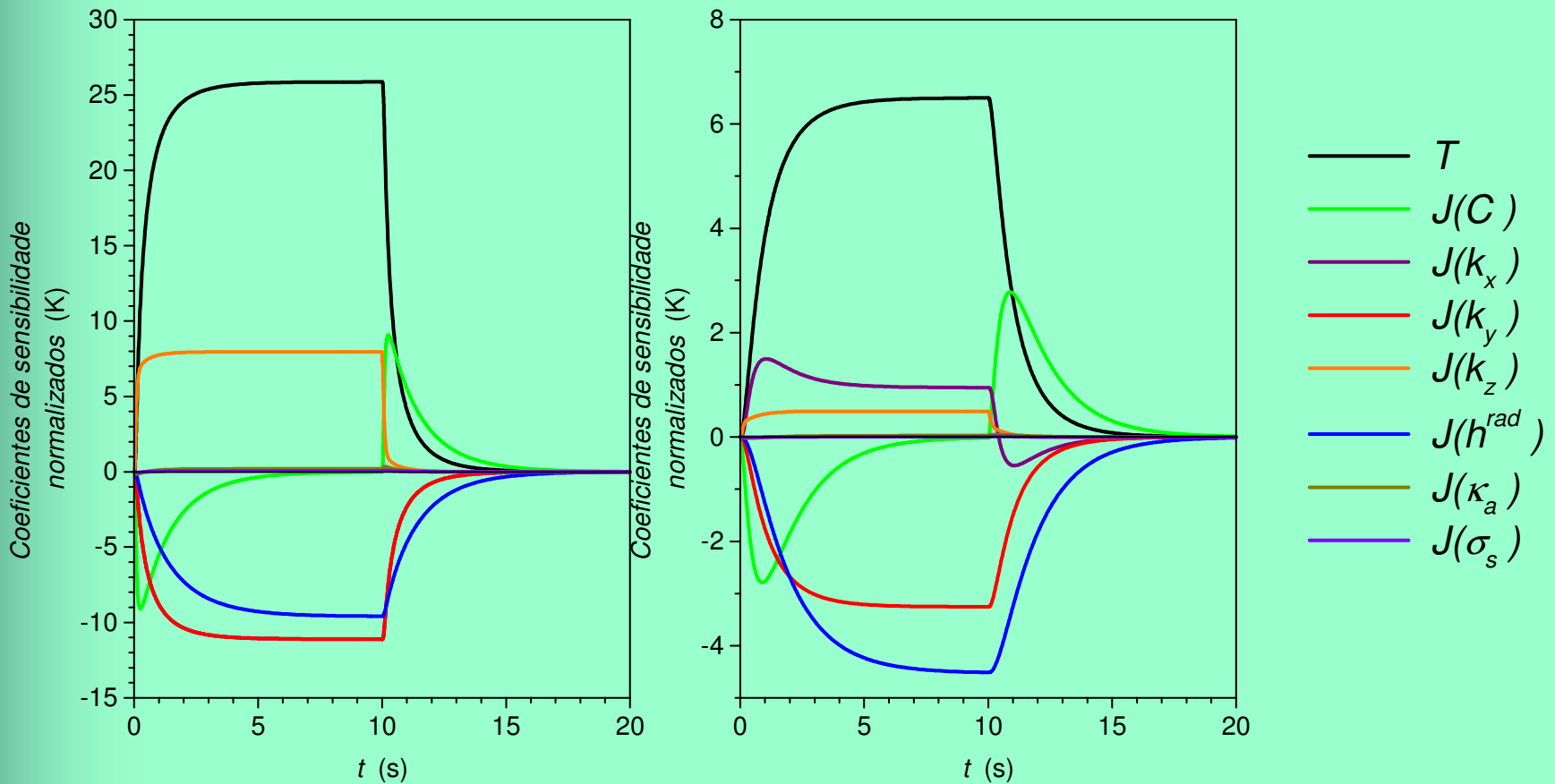




Otimização do experimento:

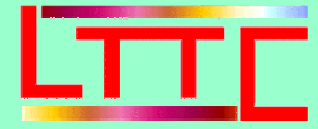


Análise dos coeficientes de sensibilidade

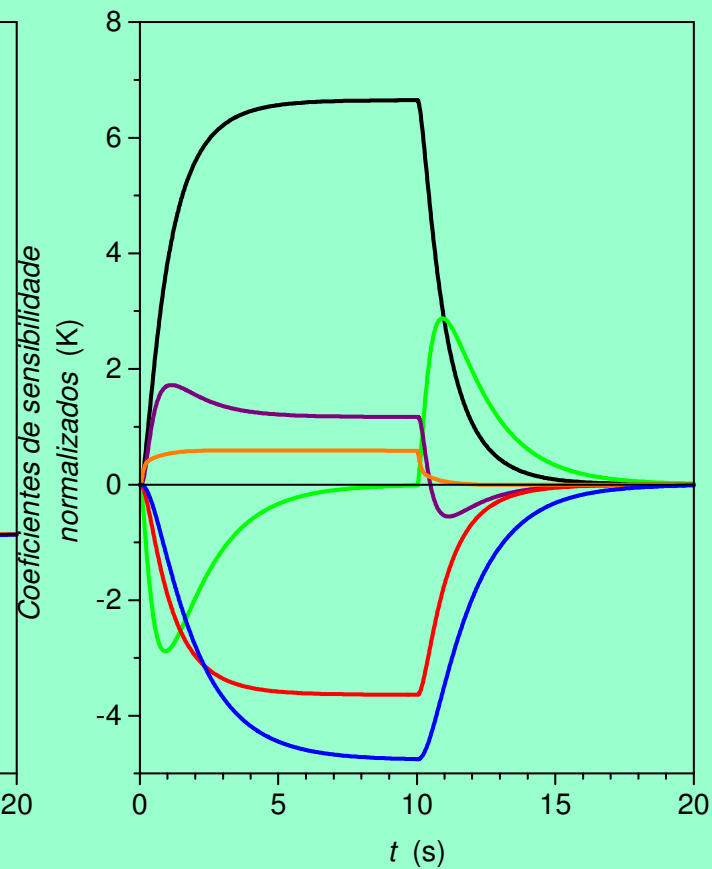
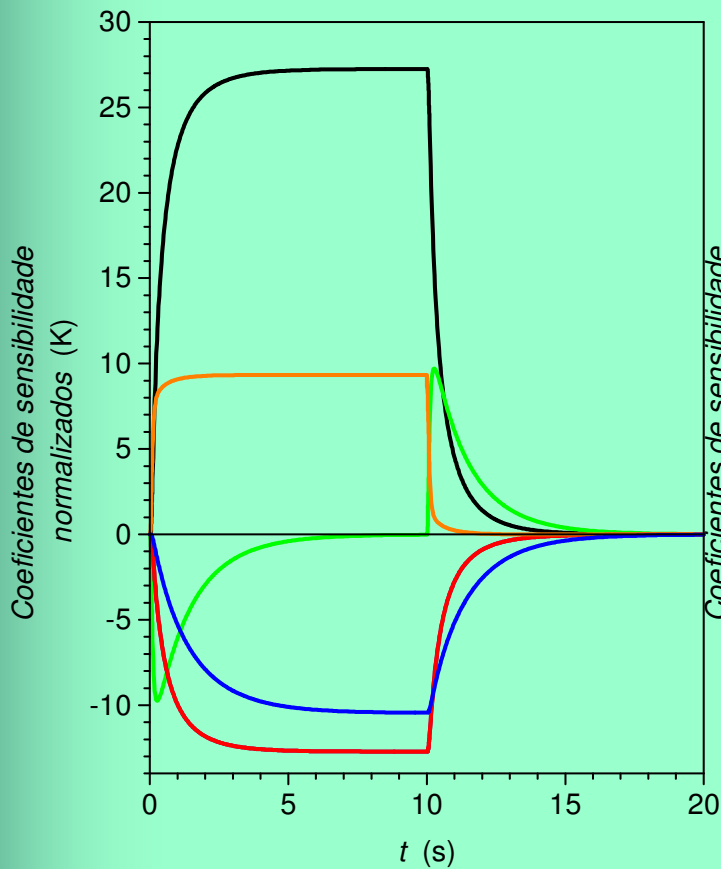




Otimização do experimento:



Análise dos coeficientes de sensibilidade

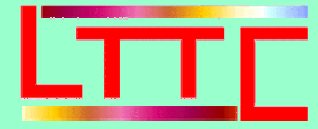


Condução

- T
- $J(C)$
- $J(k_x)$
- $J(k_y)$
- $J(k_z)$
- $J(h^{rad})$

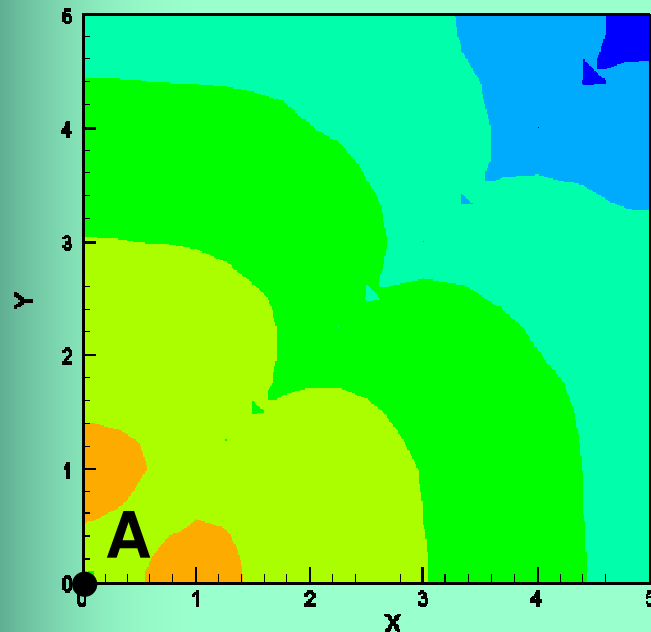


Otimização do experimento:

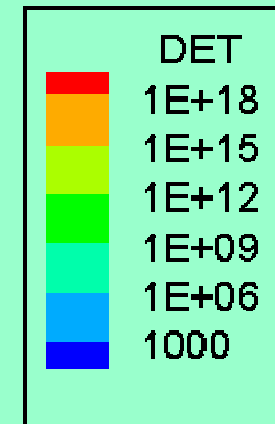
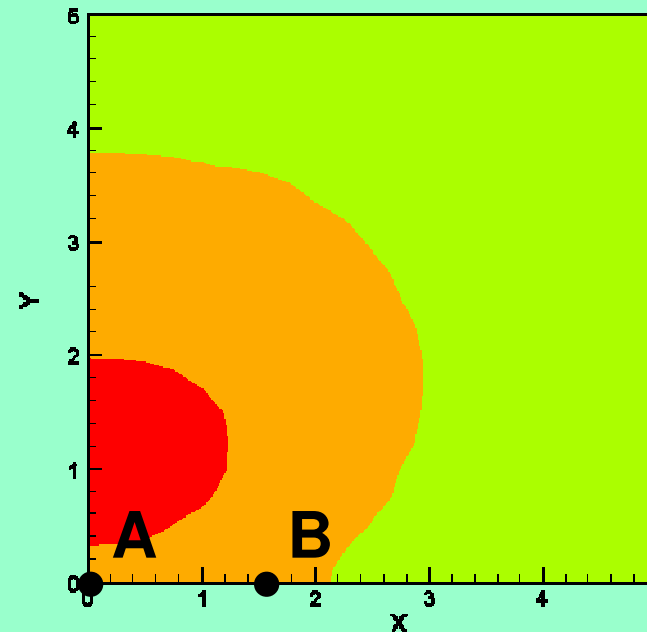


Análise do determinante da matriz de informação : $\max |J^T J| \Rightarrow P^*$

2 sensores

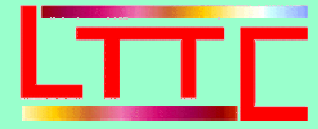


3 sensores

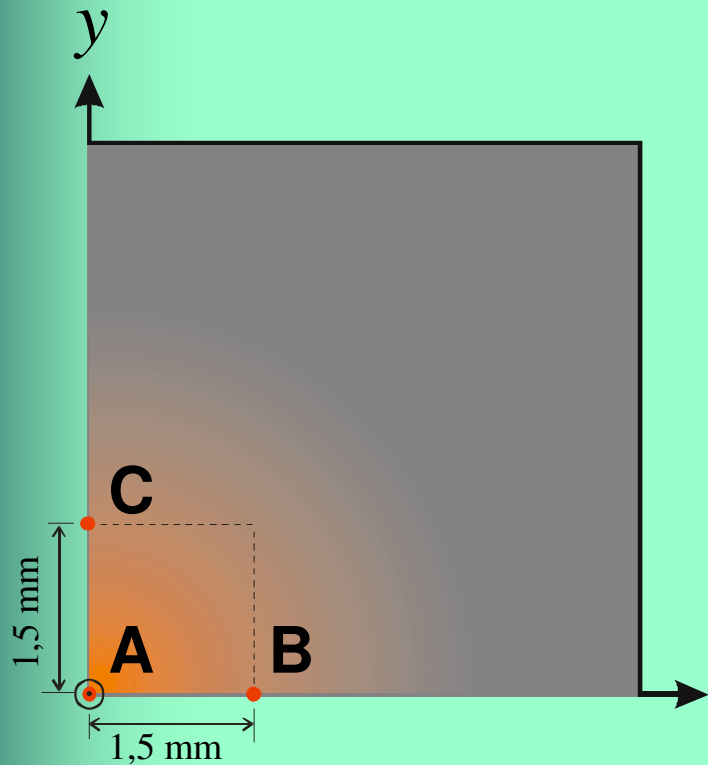




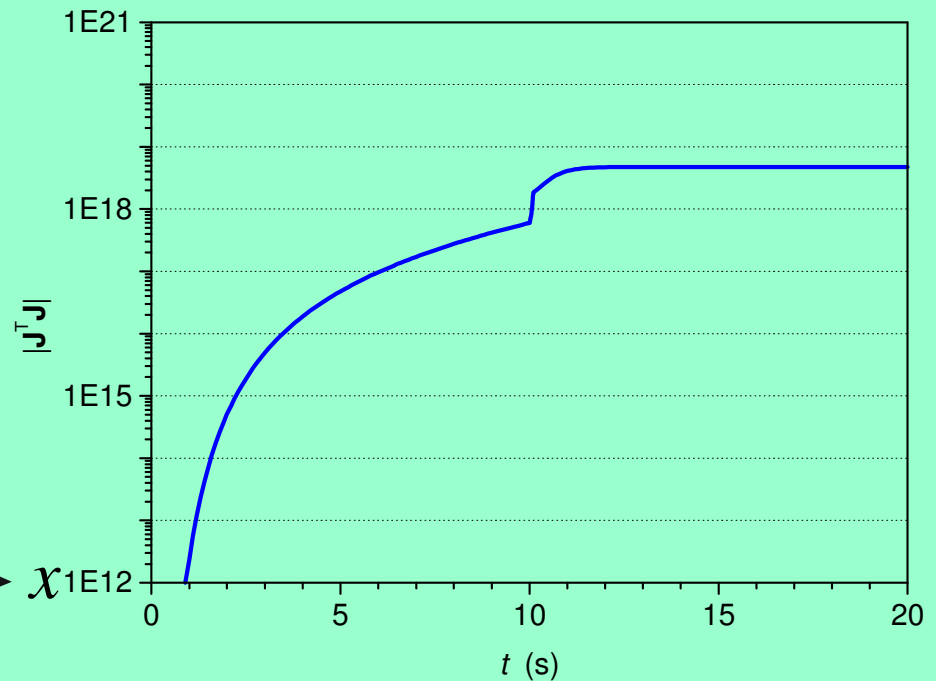
Otimização do experimento:



Análise do determinante da matriz de informação : $\max |\mathbf{J}^T \mathbf{J}| \Rightarrow \mathbf{P}^*$

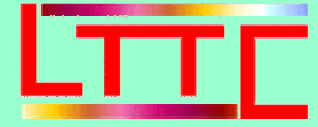


3 sensores





Otimização do experimento:



- Método de Levenberg-Marquardt
 - Método de estimativa seqüencial
- } Não convergem

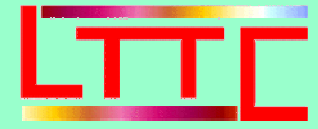
quando a estimativa inicial é longe do vetor de parâmetros reais

- Método Híbrido → Sempre converge
- Velocidade lenta**

solução de mais de 10000 vezes o problema direto



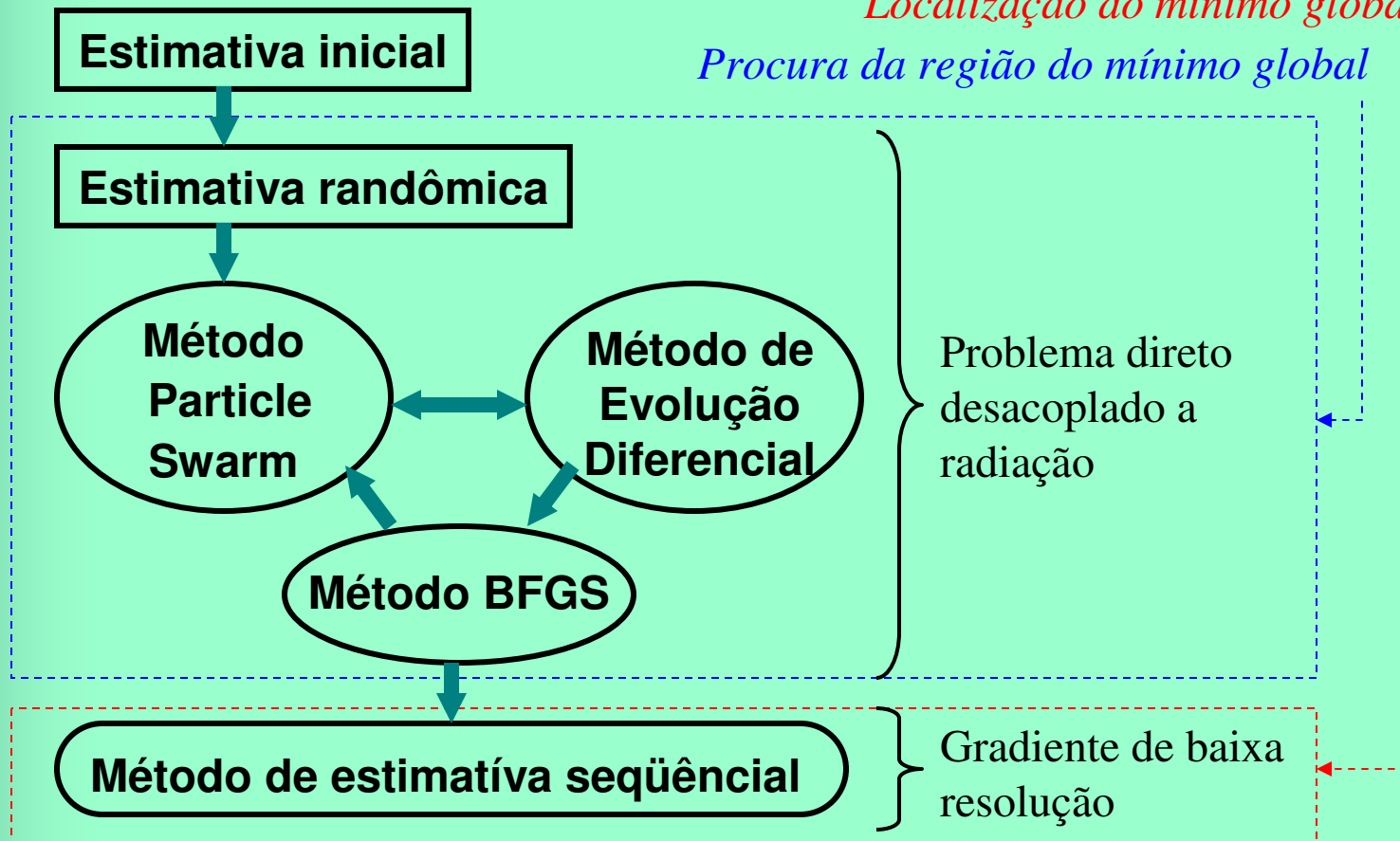
Otimização do experimento:



⇒ *Novo método Híbrido*

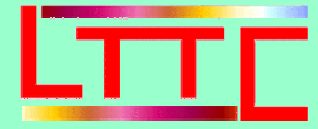
Localização do mínimo global

Procura da região do mínimo global





Resultados: Material ortotrópico



$$k_x = 3 \text{ W/m.K}$$

$$k_y = 20 \text{ W/m.K}$$

$$k_z = 8 \text{ W/m.K}$$

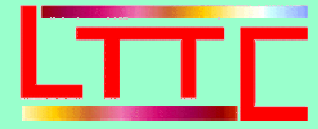
$$C = 2.5 \times 10^6 \text{ J/m}^3.\text{K} \quad h^{rad} = 1819.4 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

$$\Delta T = \pm 2 \text{ K}$$

P_j	Estimativa Inicial	Estimativa pelo Método Híbrido (PB Direto reduzido)		Estimativa pelo Método Seqüencial (Gradiente de baixa resolução)		
		# iterações		# iterações		
C [MJ/m ³ .K]	0.1	# iterações	2.713×10^6	# iterações	2.385×10^6	$\pm 0.242 \times 10^6$
k_x [W/m.K]	50	200	3.913	11	2.932	± 0.237
k_y [W/m.K]	50	Funcional	21.844	Funcional	19.384	± 1.803
k_z [W/m.K]	50	1124.01	10.291	1118.24	7.468	± 1.338
h^{rad} [W/m ² .K]	5		1835.		1812.	$\pm 69.$
C [MJ/m ³ .K]	10	# iterações	2.457×10^6	# iterações	2.385×10^6	$\pm 0.242 \times 10^6$
k_x [W/m.K]	0.5	200	3.979	11	2.932	± 0.237
k_y [W/m.K]	0.5	Funcional	20.490	Funcional	19.384	± 1.803
k_z [W/m.K]	0.5	1119.52	8.846	1118.24	7.468	± 1.338
h^{rad} [W/m ² .K]	5000		1734.		1812.	$\pm 69.$
C [MJ/m ³ .K]	0.1	# iterações	2.572×10^6	# iterações	2.385×10^6	$\pm 0.242 \times 10^6$
k_x [W/m.K]	50	200	3.936	12	2.932	± 0.237
k_y [W/m.K]	0.5	Funcional	21.139	Funcional	19.384	± 1.803
k_z [W/m.K]	50	1120.13	9.434	1118.24	7.468	± 1.338
h^{rad} [W/m ² .K]	5		1779.		1812.	$\pm 69.$



Resultados: Material isotrópico



$$k_x = 5 \text{ W/m.K}$$

$$k_y = 5 \text{ W/m.K}$$

$$k_z = 5 \text{ W/m.K}$$

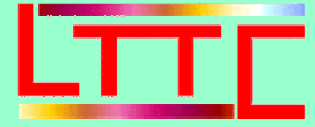
$$C = 2.5 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K} \quad h^{rad} = 1819.4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\Delta T = \pm 2 \text{ K}$$

P_j	Estimativa Inicial	Estimativa pelo Método Híbrido (PB Direto reduzido)		Estimativa pelo Método Seqüencial (Gradiente de baixa resolução)		
		# iterações		# iterações		
C [MJ/m ³ .K]	0.1	# iterações	2.837×10^6	# iterações	2.588×10^6	$\pm 0.203 \times 10^6$
k_x [W/m.K]	50	200	6.416	11	5.043	± 0.351
k_y [W/m.K]	50	Funcional	6.414	Funcional	5.040	± 0.348
k_z [W/m.K]	50	1075.17	6.758	1041.53	5.085	± 0.669
h^{rad} [W/m ² .K]	5		2022.		1826.	$\pm 43.$
C [MJ/m ³ .K]	10	# iterações	3.432×10^6	# iterações	2.588×10^6	$\pm 0.203 \times 10^6$
k_x [W/m.K]	0.5	105	7.464	11	5.043	± 0.351
k_y [W/m.K]	0.5	Funcional	7.545	Funcional	5.040	± 0.348
k_z [W/m.K]	0.5	1093.6	10.428	1041.53	5.085	± 0.669
h^{rad} [W/m ² .K]	5000		1792.		1826.	$\pm 43.$
C [MJ/m ³ .K]	0.1	# iterações	3.048×10^6	# iterações	2.588×10^6	$\pm 0.203 \times 10^6$
k_x [W/m.K]	50	200	6.795	11	5.043	± 0.351
k_y [W/m.K]	0.5	Funcional	6.786	Funcional	5.040	± 0.348
k_z [W/m.K]	50	1061.36	8.392	1041.53	5.085	± 0.669
h^{rad} [W/m ² .K]	5		1817.		1826.	$\pm 43.$

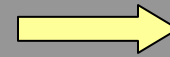


Conclusão: experimento 1



- As propriedades termofísicas (condutivas) de um MST a altas temperaturas foram estimadas.
- Incerteza pequena apesar de $\Delta T = \pm 2 \text{ K}$
- Resolver o problema inverso com medidas experimentais
- Construir o experimento 1:
(medidas de temperatura transiente em vários pontos de uma amostra de MST a altas temperaturas por câmera infravermelha).

Problema Inverso

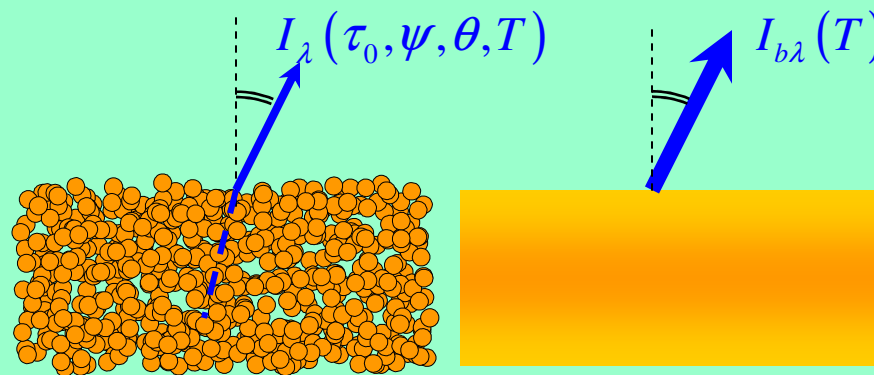


2 etapas

2ª etapa: Estimativa das propriedades radiativas

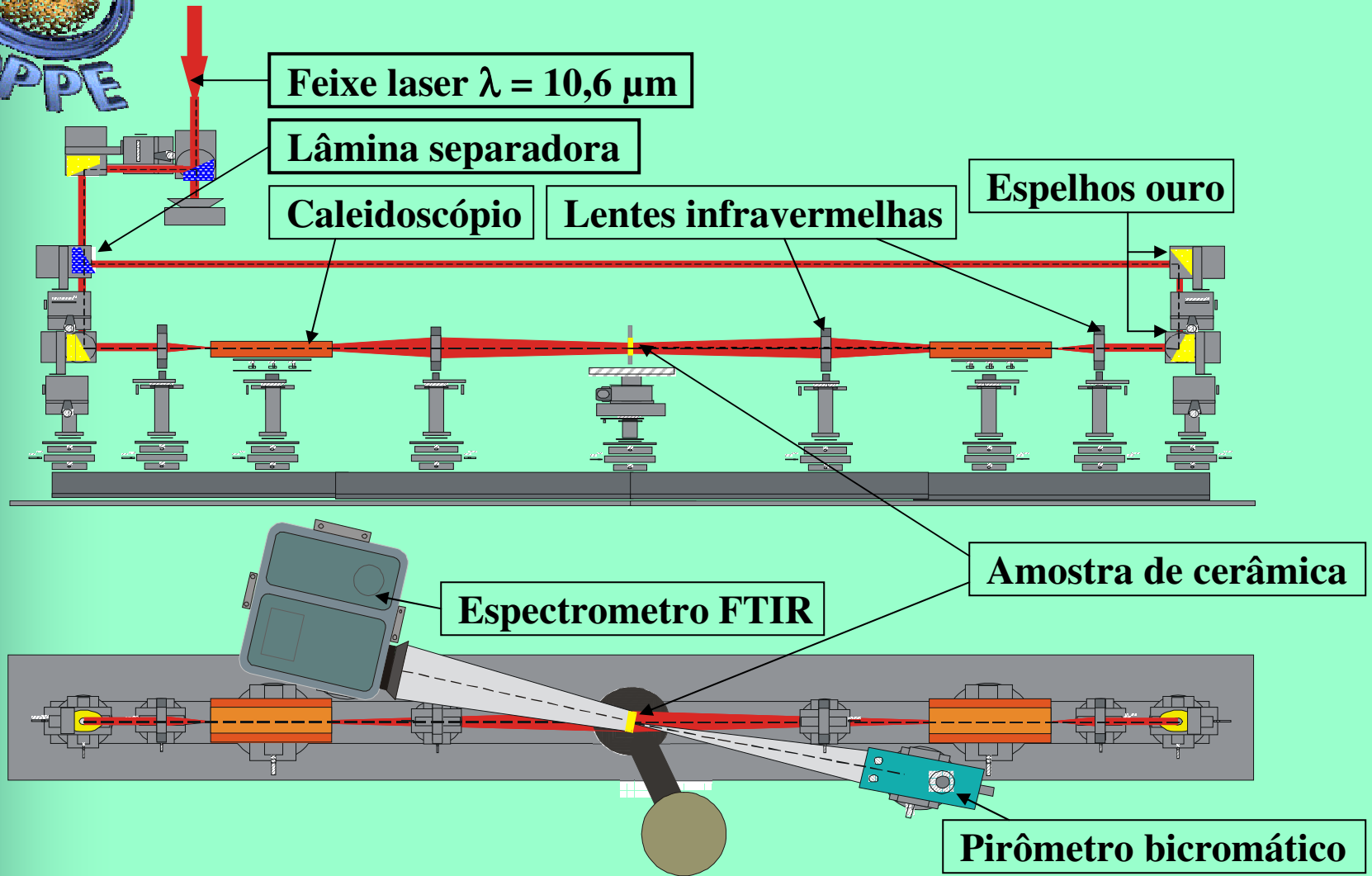
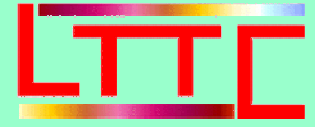
Parâmetros: $\kappa_{a\lambda}, \sigma_{s\lambda}, p_{\lambda}(\vec{s}' \rightarrow \vec{s})$

Medidas: $\epsilon_{\lambda}(\tau_0, \psi, \theta, T) = \frac{I_{\lambda}(\tau_0, \psi, \theta, T)}{I_{b\lambda}(T)}$





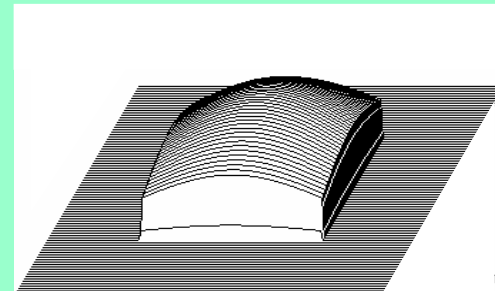
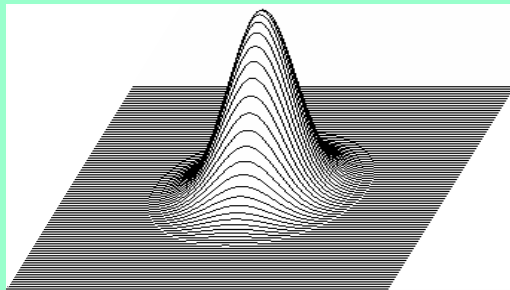
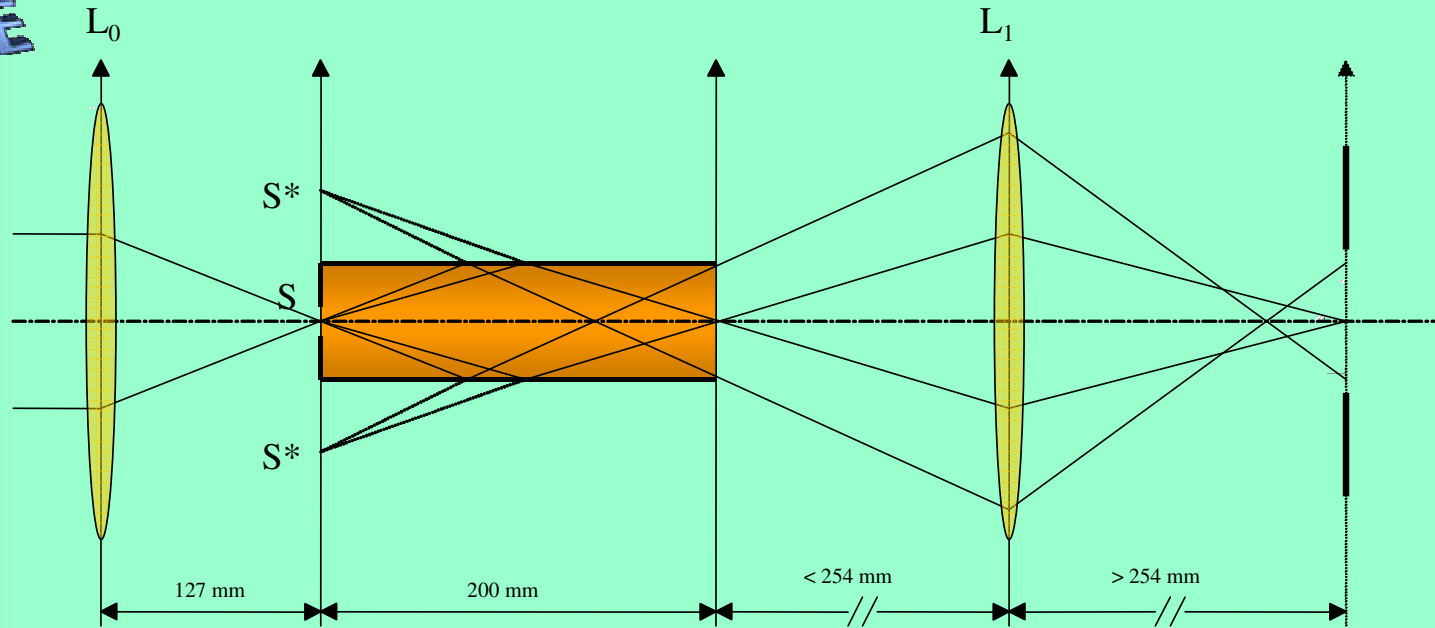
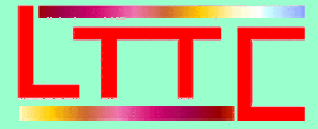
Experimento 2:



Exame de Qualificação – 26 / 04 / 2005

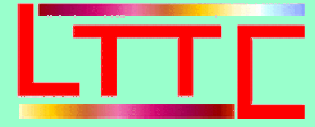


Experimento 2:





Formulação do problema direto:



Acoplamento Condução-Radiação

Resolução simultânea da

- Equação de condução do calor

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \nabla \cdot q^{rad}$$

onde
$$\nabla \cdot q^{rad} = \int_{\lambda=0}^{\infty} \kappa_{a\lambda} \left[4\pi I_{b\lambda}(\mathbf{r}, T) - \int_{\Omega=4\pi} I_{\lambda}(\mathbf{r}, \vec{s}) d\Omega \right] d\lambda$$

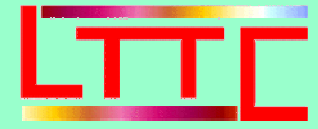
- Equação de Transferência Radiativa (meio cinza por bandas)

$$\xi \frac{\partial I_{\lambda}}{\partial x} + \eta \frac{\partial I_{\lambda}}{\partial y} + \mu \frac{\partial I_{\lambda}}{\partial z} = -(\kappa_{a\lambda} + \sigma_{s\lambda}) I_{\lambda} + S_{\lambda}$$

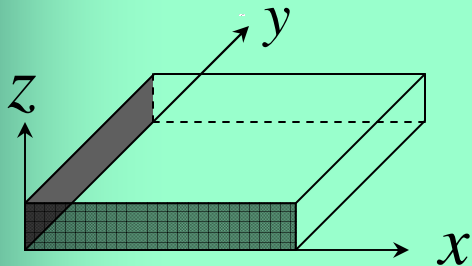
onde
$$S_{\lambda} = \kappa_{a\lambda} n_r^2 I_{b\lambda}(T) + \frac{\sigma_{s\lambda}}{4\pi} \int_{\Omega=4\pi} I_{\lambda} p(\vec{s}' \rightarrow \vec{s}) d\Omega$$



Formulação do problema direto:

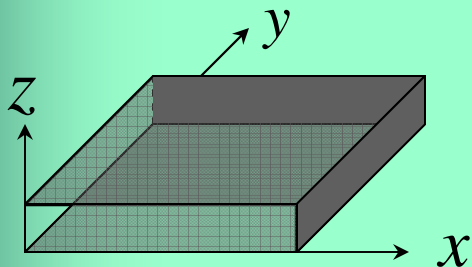
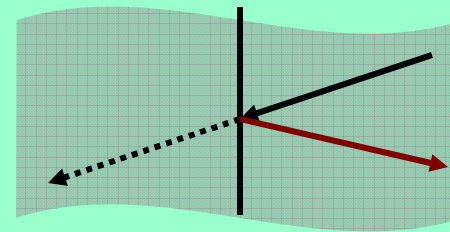


Condições de contorno radiativas:



Plano de simetria:

$$I_{\lambda}(\mathbf{r}, \vec{s}) = I_{\lambda}(\mathbf{r}, \vec{s}^*)$$



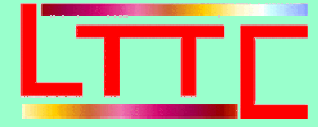
Fronteira transparente com mudança de índice de refração:

$$I_{\lambda}(\mathbf{r}, \vec{s}) = I_{\lambda}(\mathbf{r}, \vec{s}^*) \quad \text{para} \quad \theta_i > \theta_c$$

$$I_{\lambda}(\mathbf{r}, \vec{s}) = 0 \quad \text{para} \quad \theta_i < \theta_c$$



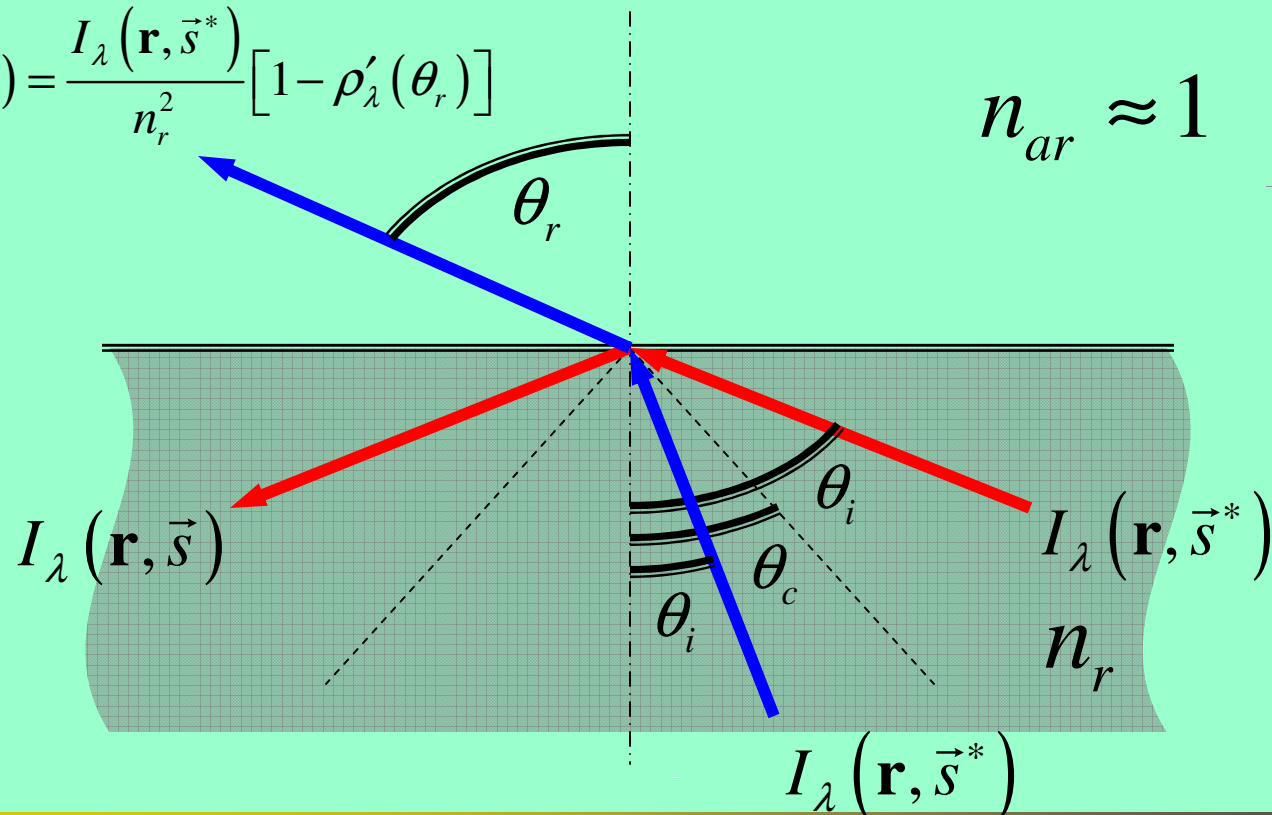
Formulação do problema direto:



Condições de contorno radiativas:

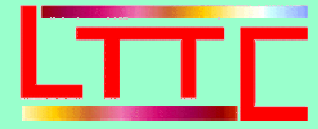
→ Fronteira transparente com mudança de índice de refração:

$$I_\lambda(\mathbf{r}, \vec{s}, \tau_0, T) = \frac{I_\lambda(\mathbf{r}, \vec{s}^*)}{n_r^2} [1 - \rho'_\lambda(\theta_r)]$$

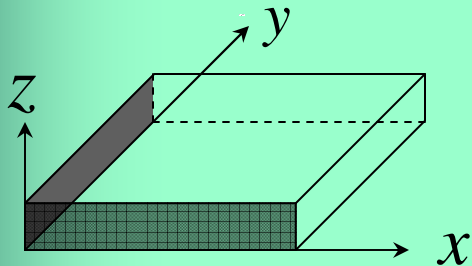




Formulação do problema direto:

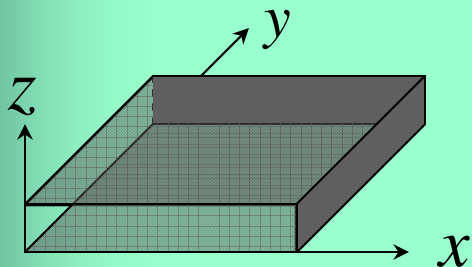


Condições de contorno condutivas:

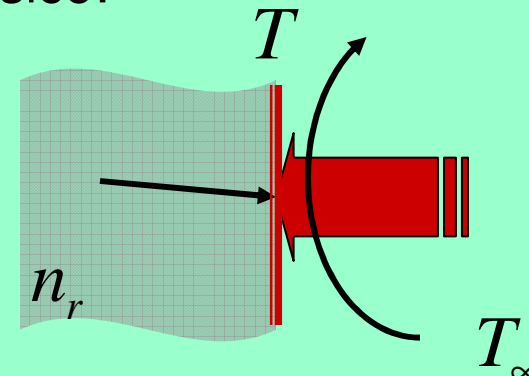


Planos de simetria:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$$



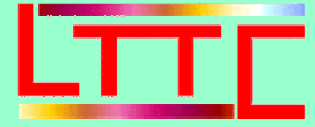
Contorno físico:



$$k \frac{\partial T}{\partial n} + hT = hT_{\infty} + \epsilon_{10.6 \mu\text{m}} \cdot q_{laser}$$



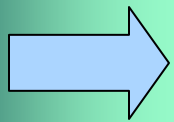
Formulação do problema direto:



Incógnitas do problema direto

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{n}_r(\lambda, T) = n_r(\lambda, T) + i k_r(\lambda, T) \\ \rho(\lambda, \theta, T) \\ p(\lambda, \psi', \theta', \psi, \theta) \end{array} \right.$$

?

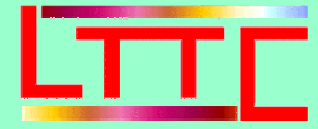


É necessário utilizar um modelo de predição das propriedades óticas

- 1) Equação de Lorentz: $\tilde{n}_r(\lambda, T) \rightarrow \rho(\lambda, \theta, T)$
- 2) Teoria de Mie (partículas esféricas)
Método de Monte-Carlo } $p(\lambda, \psi', \theta', \psi, \theta)$



Formulação do problema direto:



**Como representar a função de fase
Com poucos parâmetros ?**

$$p(\lambda, \psi', \theta', \psi, \theta)$$

$$\lambda = 5 \mu\text{m}$$

$$r_{part} = 150 \mu\text{m}$$

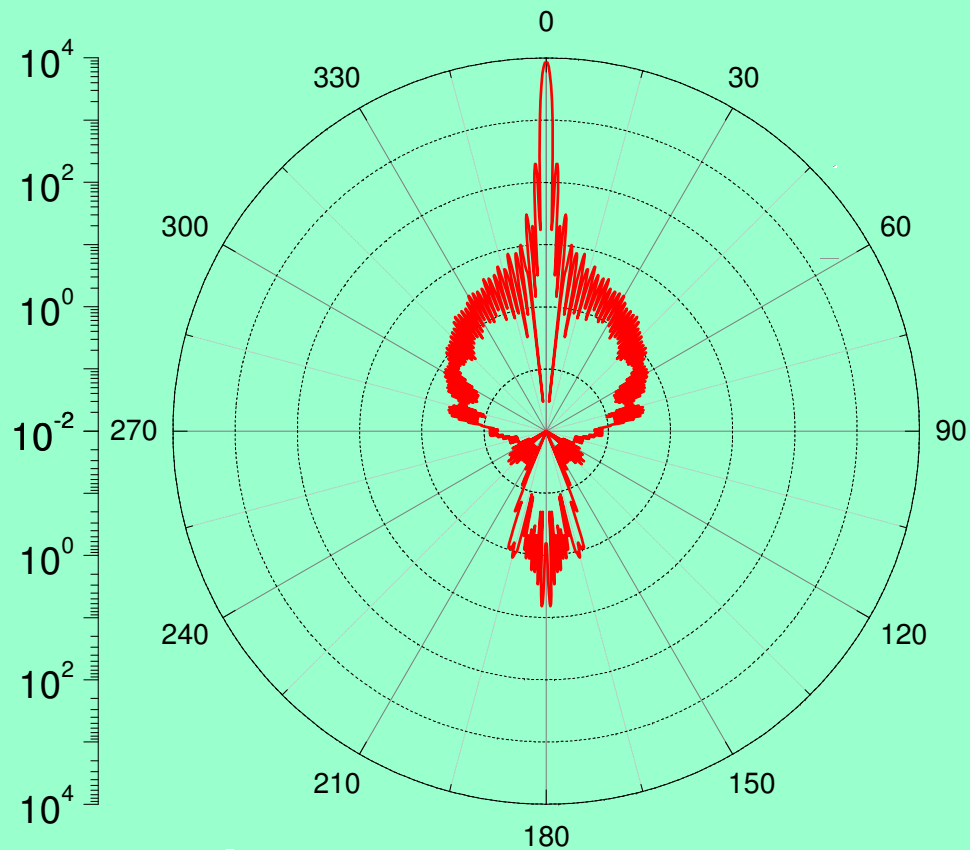
$$f_v = 0.7$$

Parâmetros:

g

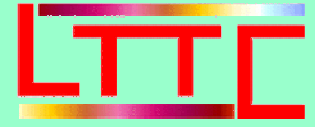
f_1, f_2, g_1, g_2

$a_n \quad n = 1, \dots, N$





Proposta de continuação do trabalho:



Experimento 1:

- Resolver o problema inverso com medidas experimentais.
- Construir o experimento 1 de medidas de temperatura transiente.

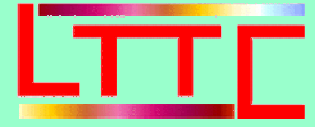
Para sistemas em coordenadas cilíndricas:

- Análise dos coeficientes de sensibilidade
- Otimização do experimento
- Testar o problema inverso sob medidas simuladas

⇒ estimar C, k_r, k_ψ, k_z, h



Proposta de continuação do trabalho:



Experimento 2:

- Terminar a formulação do problema de predição das propriedades óticas.
- Analisar os coeficientes de sensibilidade com relação a $\kappa_{a\lambda}, \sigma_{s\lambda}, g_{\lambda}$ $\lambda = 1, \dots, N_f$
- Realizar medidas de fator de emissão espectral e direcional
- Resolver o problema inverso e estimar $\kappa_{a\lambda}, \sigma_{s\lambda}, g_{\lambda}$



Obrigado....