

1 EN / DERE

COMUNICAÇÃO TÉCNICA

DIFIR - 14/87

DATA

22.09.87

DE  
JOÃO JACHIC

PARA  
DISTRIBUIÇÃO

ASSUNTO  
DETERMINAÇÃO SUBÓTIMA DOS FATORES DE HOMOGENEIZAÇÃO NA SIMULAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO UNITÁRIA DO FLUXO AZIMUTAL NO ANEL DE CONTROLE DE UM REATOR RÁPIDO EXPERIMENTAL.

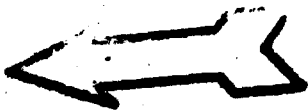
RESUMO

A distribuição unitária do fluxo neutrônico azimutal na região do anel de controle para um projeto de reator rápido de baixa potência é simulada em modelo tipo placa e malhas retangulares por cálculo unidimensional sob condições de contorno periódicas na fronteira. Os resultados evidenciam a viabilidade do método bem como sua aplicação no cálculo de síntese do estado neutrônico tridimensional.



DISTRIBUIÇÃO:

DIR  
DERE  
DIFIR (7)  
DITRE  
DINFO



AUTOR:

A large, stylized handwritten signature in black ink, written over the "AUTOR:" label.

APROVAÇÃO:

A handwritten signature in black ink.  
WILSON S. BASTOS  
Chefe de Dept. de Reatores

APROVADO:

A handwritten signature in black ink.  
LUIZ OSÓRIO DE BRITO AGUIAR  
Chefe do Dept. de Reatores/1EN

OBS.: Trabalho a ser apresentado no 29 CGEN.

## 1. INTRODUÇÃO

Na concepção e dimensionamento de parâmetros de projeto de reatores nucleares controlados procura-se satisfazer às condições mínimas de operacionalidade, segurança e produtividade dirigida. Essa multiplicidade de objetivos, por vezes antagônicos pode ser conciliada escolhendo-se apropriadamente [1] os componentes do reator (R) e sistema de controle (C).

Devido ao alto número de variáveis envolvidas na determinação dos componentes de R e C, opta-se em geral por métodos de otimização [2] correlacionando automaticamente esses parâmetros de projeto com variáveis de estado neutrônico-termodinâmico (X) significativas das condições de operacionalidade e segurança do reator nuclear.

Como o nosso método de otimização [2,3] se baseia na solução de sistema linearizado a partir de coeficientes de sensibilidade de X com R e C, isso requer necessariamente uma metodologia rápida e eficiente de simulação [4] do estado neutrônico-termodinâmico X a partir dos componentes de projeto R para determinados valores do sistema de controle C.

A eficiência da simulação é assegurada em parte por um processo interno de calibração otimizada [4] de parâmetros (b) intrínsecos da metodologia de simulação, conforme esboçado na figura 1 ao lado. A rapidez da simulação do estado tridimensional X é conseguida graças a síntese do fluxo neutrônico-termodinâmico correspondente a resoluções unidimensionais acopladas de projeções ortogonais de R e C sobre planos adequadamente selecionados.

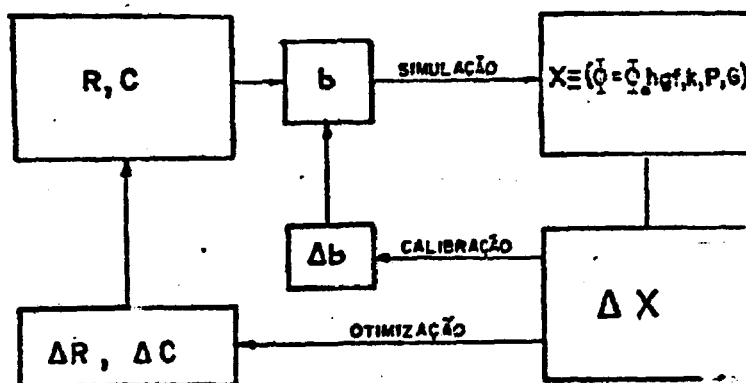


Fig.1. ESQUEMA DO SIMULADOR-OTIMIZADOR AUTOMATICAMENTE CALIBRADO.

## 2. DISTRIBUIÇÃO AZIMUTAL UNITÁRIA

A distribuição espacial do fluxo neutrônico de qualquer grupo de energia pode ser formalmente escrita como:

$$\phi(r, z, \theta) = \phi_0 \frac{\phi(r, z, \theta)}{\phi(r, z, \theta_0)} \frac{\phi(r, z, \theta_0)}{\phi(r, z_0, \theta_0)} \frac{\phi(r, z_0, \theta_0)}{\phi_0} \quad (1.a)$$

$$\equiv \phi_0 h(r, z, \theta) g(r, z) f(r)$$

$$\phi(r, z, \theta) = \phi_0 \frac{\phi(r, z, \theta)}{\phi(r, z, \theta_0)} \frac{\phi(r, z, \theta_0)}{\phi(r_0, z, \theta_0)} \frac{\phi(r_0, z, \theta_0)}{\phi_0} \quad (1.b)$$

$$\equiv \phi_0 h(r, z, \theta) f(r, z) g(z)$$

onde  $\phi_0$  e  $\phi$  são os valores normalizados e não normalizados, respectivamente, do fluxo neutrônico na origem do sistema de coordenadas cilíndricas  $(r_0, z_0, \theta_0)$  adequadamente escolhido.

A metodologia de cálculo do fluxo neutrônico espacial se baseia em síntese das distribuições unidimensionais transversas  $(h, g, f)$  acopladas e espacialmente interpoladas [4]. Assim a formulação expressa pela equação 1.a é adequada ao cálculo radial onde a distribuição unitária unidimensional  $f(r)$  é determinada conhecendo-se a priori as distribuições espaciais transversas  $g$  e  $h$ . Da mesma forma a equação 1.b é usada no cálculo axial da distribuição unitária unidimensional  $g(z)$  conhecendo-se agora as distribuições espaciais transversas  $f$  e  $h$ , determinadas para alguns planos adequadamente escolhidos e então espacialmente interpoladas.

Neste trabalho apresentamos uma formulação aproximada para a simulação da distribuição unitária azimutal  $h(r, z, \theta)$  com ênfase na variável angular, deixando a questão da interpolação radial e axial para trabalho a ser publicado brevemente. O grau de eficiência na simulação da distribuição  $h$  é função das heterogeneidades do caroço, da região de controle e cobertor do núcleo do reator em estudo.

### 3. MODELO DE REATOR

O cálculo da distribuição azimutal será calculado para o núcleo do pré-projeto de reator rápido experimental [1] BR-60 de 50 MW em fase de definições. As barras e anel de controle de geometria hexagonal são simuladas por modelo anular e placas infinitas conforme esboçado nas figuras 2a e 2d a seguir.

Sendo  $H_1$  e  $H_2$  as alturas do núcleo e refletor axial respectivamente e denotando por  $z_c$  o vetor cota de inserção das barras de controle, definimos a coordenada axial adimensional  $z^*$  como:

$$z^* \equiv (z - \frac{H_2 - H_1}{2}) / H_1 \quad (2.a)$$

Dai, a fração cota de inserção das barras de controle será o vetor

$$z_c^* = z^*(z_c) \quad (2.b)$$

Com isso, os principais valores do modelo de reator adotado com 3 barras de controle parcialmente inseridas e 3 barras de segurança totalmente retiradas são:

$$R_1 = 48.65\text{cm} \quad H_1 = 87.57\text{cm} \quad H_2 = 137.57\text{cm} \quad r_c = 27.279\text{cm}$$

$$z_c^* = (0.6, -0.285, 0.4, -0.285, 0.2, -0.285)$$

### 4. MODELO MATEMÁTICO

A distribuição unitária azimutal  $h$  é determinada em alguns planos  $r^* = r$  e  $z^* \neq z^*$  adequadamente escolhidos e depois espacialmente interpolada. Assim o laplaciano do fluxo neutrônico para qualquer grupo de energia é dado por:

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial \phi}{\partial r}) + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} \quad (3.a)$$

$$\text{Se } s \equiv r\theta \quad (3.b)$$

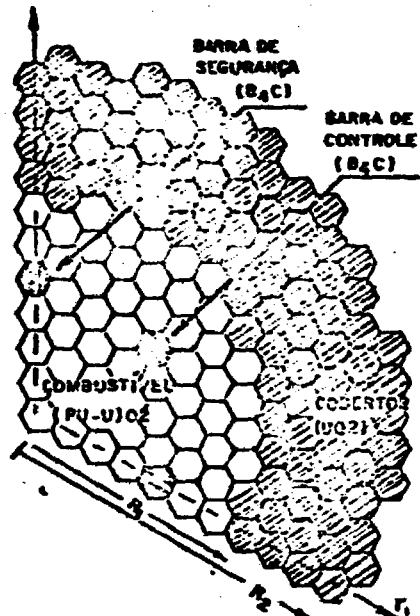


FIG 2a - NÚCLEO HEXAGONAL COM TRÊS BARRAS DE CONTROLE E TRÊS BARRAS DE SEGURANÇA.

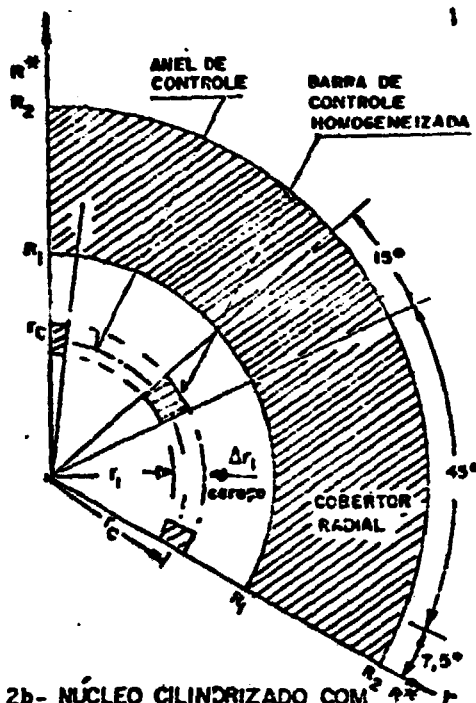


FIG 2b - NÚCLEO CILINDRIZADO COM ANEL DE CONTROLE ANULAR

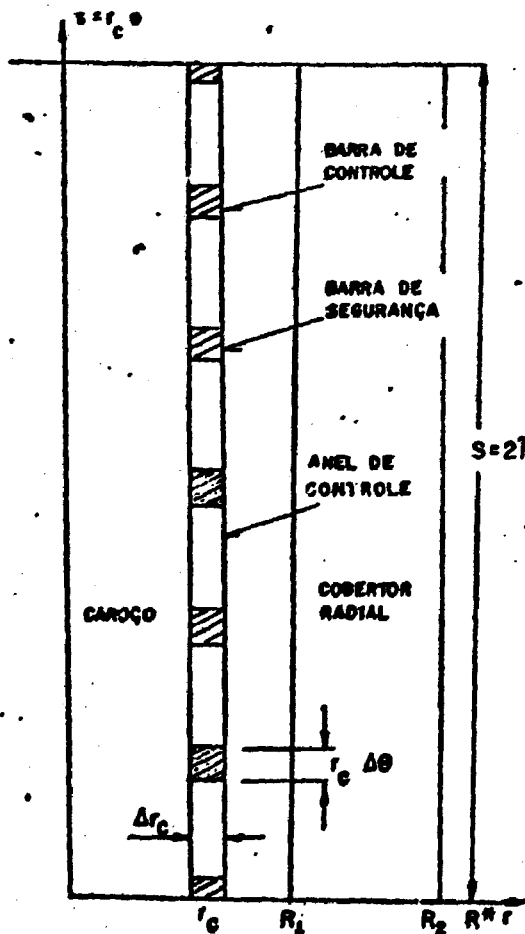


FIG 2c - PLACA RETANGULAR COM NÚCLEO E ANEL DE CONTROLE ESTIRADO DE COMPRIMENTO  $S=2\pi r_c$

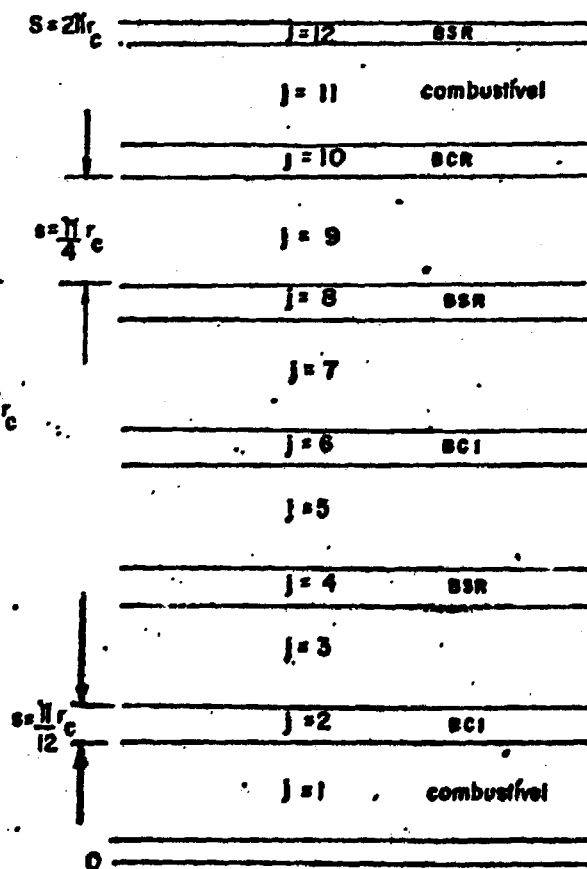


FIG 2d - PLACA INFINITA DE ESPESURA  $S=2\pi r_c$  COM  $J=12$  REGIÕES MATEIRIAIS DO NÚCLEO CONTROLADO.

a equação de difusão a dois grupos de energia para a distribuição azimutal nestes planos será:

$$-D_1 \frac{\partial^2 h_1(r^*, z^*, s)}{\partial s^2} + (\Sigma_{a1}^* + \Sigma_r) h_1(r^*, z^*, s) = \frac{1}{k^*} [v \Sigma_{f1} h_1(r^*, z^*, s) + v \Sigma_{f2} h_2(r^*, z^*, s)] \quad (4.a)$$

$$-D_2 \frac{\partial^2 h_2(r^*, z^*, s)}{\partial s^2} + \Sigma_{a2}^* h_2(r^*, z^*, s) = \Sigma_r h_2(r^*, z^*, s) \quad (4.b)$$

com  $\Sigma_{ag}^* \equiv \Sigma_{ag} + D_g B_g^* \quad g = 1, 2$

e  $B^* \equiv b_r B_r^2 + b_z B_z^2$  e  $\Sigma = \Sigma(r^*, z^*, s)$

onde  $b_r$  e  $b_z$  são os fatores de calibração das curvaturas radial ( $B_r^2$ ) e axial ( $B_z^2$ ) na placa material de espessura  $S=2\pi r_c$  representativa do anel de controle estirado. A equação 4.b foi escrita assumindo  $\chi_2 = 0$  embora no simulador usa-se  $\chi_2 > 0$ .

A distribuição  $h(r, z, s)$  satisfaz ainda as condições de contorno, periódicas na fronteira azimutal  $[0, S]$  e unitária na fronteira radial  $[0, R^*]$ . Isto é,

$$h_g(r^*, z^*, 0) = h_g(r^*, z^*, S) \quad , \quad g = 1, 2 \quad (4.c)$$

$$\frac{\partial h_g(r^*, z^*, 0)}{\partial s} = \frac{\partial h_g(r^*, z^*, S)}{\partial s} \quad , \quad g = 1, 2 \quad (4.d)$$

$$h_g(0, z^*, s) = 1 \quad , \quad g = 1, 2 \quad (4.e)$$

$$h_g(R^*, z^*, s) = 1 \quad , \quad g = 1, 2 \quad (4.f)$$

A solução das equações 4 para a geometria azimutal com 12 regiões materiais esboçada na figura 2d é trivialmente obtida usando o modelo de discretização a diferenças finitas [4] em malhas retangulares. A distribuição tridimensional  $h(r, z, s)$  é determinada a partir da solução das equações 4 e um processo de interpolação espacial correlacionando as frações de inserção ( $z_g^*$ ) das barras de controle com os demais componentes de projeto do núcleo do reator.

## 5. RESULTADOS

As seções de choque efetivas ( $\Sigma^*$ ) subótimas das J regiões materiais nas equações 4 são representadas pelo vetor fatores de homogeneização ( $x$ ) dado em função das seções de choque da barra de combustível ( $\Sigma_a^{BF}$ ), da barra de controle ( $\Sigma_a^{BC}$ ) e do tubo guia ( $\Sigma_a^{TG}$ ). Isto é:

$$\Sigma_{aj}^* = x_j \Sigma_a^{BF} \quad , \quad j = \text{ímpar (região de combustível)} \quad (5.a)$$

$$\Sigma_{aj}^* = x_j \Sigma_a^{BC} + (1-x_j) \Sigma_a^{TG} \quad , \quad j = \text{par (região de controle)} \quad (5.b)$$

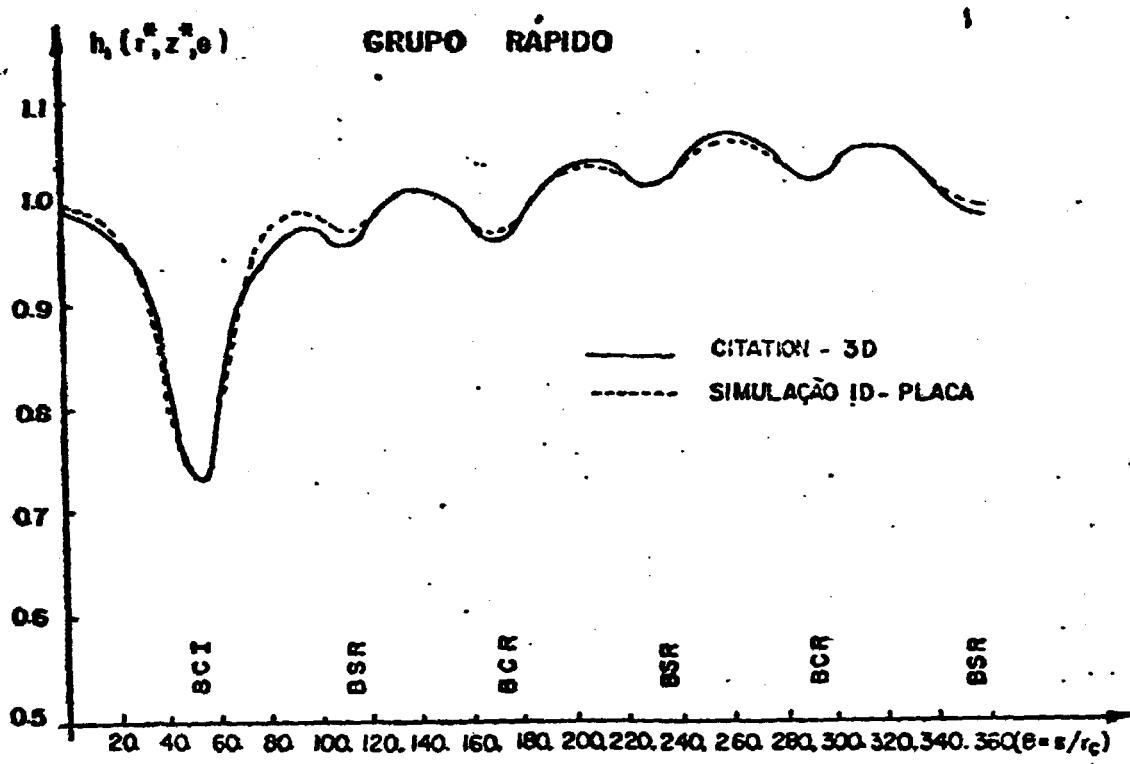


FIG 3a - DISTRIBUIÇÃO AZIMUTAL UNITÁRIA NO PLANO AXIAL  $z^* = 0.5$  PARA A FRAÇÃO DE INSERÇÃO  $z_c^* = (.6, -.285, .4, -.285, .2, -.285)$  SIMULADA POR PLACA INFINITA DE ESPESSURA  $s = 2\pi r_c$  E FATOR DE HOMOGENEIZAÇÃO  $\alpha_2 = (0.65, 0.45, 0.65, 0.053, 0.93, 0.041, 0.93, 0.02, 0.93, 0.02, 0.93, 0.05)$

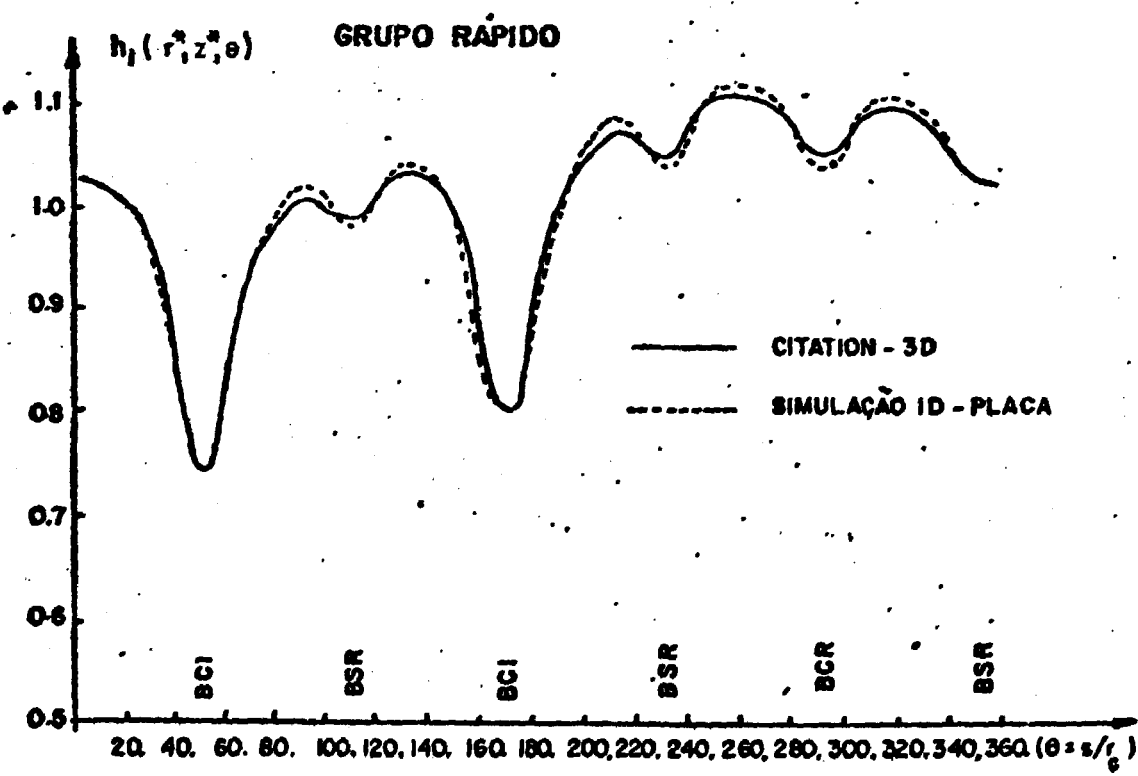


FIG 3b - DISTRIBUIÇÃO AZIMUTAL UNITÁRIA NO PLANO AXIAL  $z^* = 0.3$  PARA A FRAÇÃO DE INSERÇÃO  $z_c^* = (0.6, -.285, .4, -.285, .2, -.285)$  SIMULADA POR PLACA INFINITA DE ESPESSURA  $s = 2\pi r_c$  E FATORES DE HOMOGENEIZAÇÃO  $\alpha_2 = (1.03, 0.49, 1.03, 0.135, 1.03, 0.45, 1.03, 0.113, 1.215, 0.12, 1.215, 0.115)$

As distribuições azimutais unitárias, soluções das equações 4 para o modelo multiregional da figura 2d no anel de controle ( $r^* = r_c$ ) para dois planos axiais  $z^* = 0.5$  e  $z^* = 0.3$ , são explicitadas e comparadas com estado ótimo dado pelo código CITATION-3D nas figuras 3a e 3b.

## 6. CONCLUSÕES

Observando os resultados acima notamos que a distribuição azimutal no anel de controle pode ser adequadamente simulada por um modelo tipo placa infinita representativa do anel de controle estimado, embora que para isso deva-se conhecer ou determinar, via calibração, as curvaturas transversais ao eixo azimutal.

As soluções subótimas dos vetores de homogeneização  $x_1$  e  $x_2$  nas figuras 3a e 3b respectivamente, foram obtidas comparando o fluxo azimutal simulado  $h(r^*, z^*, s)$  com aquele tomado como padrão ( $h^0$ ) dado pelo código tridimensional CITATION aplicado ao modelo da figura 2b. O valor ótimo ( $x^0$ ) será determinado por método de otimização [5,6] da norma quadrática ponderada dos desvios do estado neutrônico-termodinâmico.

Ressaltamos que as equações 4 só são usadas para a determinação da distribuição azimutal unitária  $h(r^*, z^*, s)$  não interessando o valor arbitrário  $k^*$  resultante. Somente após a simulação espacial das funções  $h(r, z, s)$ ,  $f(r, z)$  e  $g(z)$  é que determinamos então os valores da reatividade  $k$ , do fluxo na origem  $\Phi_0$ , da distribuição da potência  $P$  e do ganho de regeneração  $G$ , por integração nos elementos de volume  $drdzds = r dr dz d\theta$  sobre o núcleo do reator no modelo cilindrizado da figura 2b.

Notamos ainda que a partir das equações 4a, 4b, 5a, 5b e as soluções  $x_1$  e  $x_2$  apresentadas na figura 3, podemos determinar os valores efetivos dos coeficientes das curvaturas transversais radial ( $b_r$ ) e axial ( $b_z$ ) e conseqüentemente correlacioná-los com os componentes do projeto do reator ( $R, C$ ) e do estado neutrônico-termodinâmico ( $X$ ). No entanto esse procedimento é semelhante ao processo de calibração otimizada já viabilizada para os fatores de curvatura [5]. Isso generaliza a calibração dos fatores de curvatura para as 3 dimensões espaciais além de converter o problema de homogeneização das regiões materiais no núcleo controlado em um problema interno de calibração otimizada.

## 7. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao programador da DIFIR/DERE/ IEN SÉRGIO ALVES EIRAS, que orientado pelo Mestre MARCEL WAINTRAUB, efetuou inúmeros e exaustivos cálculos do fluxo azimutal em código unidimensional para a determinação subótima dos componentes altamente acoplados do vetor fração de homogeneização ( $x$ ).

## 8. REFERÊNCIAS

- [1] J.Jachic, "PROJETO NEUTRÔNICO CONCEITUAL DO NÚCLEO DE UM REATOR RÁPIDO DE 50 MW: Uma Metodologia de Cálculo Otimizado". C. Téc, DINEU-02/83- IEN/CNEN.
- [2] J.Jachic, "OTIMIZAÇÃO DAS ZONAS DE ENRIQUECIMENTO QUE MAXIMIZEM O GANHO DE REGENERAÇÃO EM UM REATOR RÁPIDO", IV-ENFIR-CENTRECON-ITAIPAVA (NOV/83).

- [3] Luis C.R.M. da Silva, J.Jachic, "OTIMIZAÇÃO DE ALGUNS PARÂMETROS DO MODELO DE REATOR PRODUTOR DE RADIOISÓTOPOS", IV-ENFIR CENTRECON-ITAIPAVA-RJ. (NOV/83).
- [4] J.Jachic, "UMA METODOLOGIA EFICIENTE DE CÁLCULO ESPACIAL A DOIS GRUPOS PARA O ESTADO NEUTRÔNICO E COEFICIENTES DE SENSIBILIDADE DE UM REATOR RÁPIDO", V-ENFIR, CNEN-RJ (ABRIL/85).
- [5] J.Jachic, M.Waintraub, "CALIBRAÇÃO OTIMIZADA DO SIMULADOR NEUTRÔNICO-TERMODINÂMICO PARA REATORES RÁPIDOS DE BAIXA POTÊNCIA", VI-ENFIR-CTA-S.J. dos Campos-SP. (DEZ/86).
- [6] Marcel Waintraub, "CALIBRAÇÃO OTIMIZADA DO VETOR FRAÇÃO DE HOMOGENEIZAÇÃO NA SIMULAÇÃO DO FLUXO AZIMUTAL", a ser publicada.