

ST4-C

DESENVOLVIMENTO E TESTE DO CÓDIGO COMPUTACIONAL ZELT-3D
PARA MAPEAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA USANDO OS
SINAIS DA INSTRUMENTAÇÃO LOCALIZADA NO REFLETOR LATERAL.

Paulo José Knob
Divisão de Física de Reatores - RIF
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IPEN/CNEN-SP

SUMÁRIO

A impossibilidade de uso de instrumentação interna em reatores a alta temperatura de combustível esférico levou à necessidade de desenvolvimento de um sistema de instrumentação que seja capaz de monitorar perturbações na distribuição de potência apenas usando detetores localizados nos refletores. Essa instrumentação está dividida em 3 partes ou seja, uma para cada refletor, superior, inferior e lateral. Este trabalho ^{apresenta-se} ~~ocupa-se com~~ o desenvolvimento do sistema localizado no refletor lateral. O sistema foi testado numericamente para a crítica KAHTER do IRE-KFA de dimensões bastante reduzidas e para o reator de potencia PNP-3000 de grandes dimensões tendo sido obtidos bons resultados em ambos os casos.

1. Introdução

Em reatores a alta temperatura de combustível esférico não é possível o uso de instrumentação interna devido à alta temperatura do gás refrigerante (-1150°C) [1] e à própria construção do núcleo que é formado por um aglomerado de esferas. Essa impossibilidade de instrumentação interna levou à necessidade de desenvolvimento de um sistema de instrumentação conceitualmente novo, ou seja, obter-se as informações a respeito da distribuição de potência necessárias para o controle e segurança do reator, apenas com base nos sinais de uma instrumentação localizada fora do núcleo. A instrumentação proposta está dividida em três partes: [2], [3].

- câmaras de fissão rápida no refletor superior para monitoração da distribuição do fluxo rápido.
- detectores SPND no refletor lateral para mapeamento do fluxo térmico.
- termopares no refletor inferior para medidas da temperatura de saída do gás refrigerante.

Este trabalho ocupa-se com o desenvolvimento do sistema de instrumentação localizado no refletor lateral. Este sistema foi testado numericamente para um reator de dimensões bastante reduzidas (unidade crítica KAHTER do Instituto de Desenvolvimento de Reatores -IRE do Centro Nuclear de JÜlich-KFA-RFA) e também para um reator de potência de grandes dimensões (PNP-3000). Os resultados obtidos foram comparados com cálculos de difusão realizados com o código CITATION-3D. A teoria utilizada para o desenvolvimento do sistema de instrumentação foi baseada no modelo proposto por R.Koch e A. Lauer para a detecção de perturbações azimutais e testada para oscilações de xenônio [4].

2. Teoria

O ponto de partida para o desenvolvimento do método de "flux mapping" tridimensional ZELT-3D (zur Entfaltung von Leistungsverteilungen) é a equação de Helmholtz.

$$\nabla^2 \vec{g}(\vec{r}) + B^2 \vec{g}(\vec{r}) = 0$$

(1)

cuja solução para a geometria cilíndrica pode ser escrita da forma

$$g_{nml}(r, \theta, z) = (a_{nml} \cos n\theta + b_{nml} \sin n\theta) J_n(B_m \cdot r) \sin lz \quad (2)$$

Qualquer função que é definida na região

$$0 \leq r \leq R$$

$$0 \leq \theta < 2\pi$$

$$0 \leq z \leq H,$$

é zero nos extremos desta região e possui derivadas de primeira e segunda ordens contínuas, pode ser expandida em uma série dessas funções. (R e H são respectivamente o raio e a altura do reator). A função $\Delta\phi^d(r, \theta, z) = \phi^d(r, \theta, z) - \phi^o(r, \theta, z)$ satisfaz estas condições onde $\phi^d(r, \theta, z)$ é o fluxo neutrônico para uma dada perturbação d e $\phi^o(r, \theta, z)$ é o fluxo neutrônico para o núcleo não perturbado. Com isso pode-se escrever:

$$\Delta\phi^d(r, \theta, z) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} (a_{nml}^d \cos n\theta + b_{nml}^d \sin n\theta) J_n(B_m \cdot r) \sin lz \quad (3)$$

A instrumentação localizada no refletor lateral não recebe informações sobre a distribuição do fluxo neutrônico na direção radial sendo com isso somente possíveis de serem detetadas perturbações azimutais e axiais. Definindo-se as seguintes relações.

$$\alpha_{nml}^d = \frac{a_{nml}^d}{a_{n1l}^d} \quad e \quad \beta_{nml}^d = \frac{b_{nml}^d}{b_{n1l}^d} \quad (4)$$

e usando o fato de que essas relações permanecem inalteradas para qualquer perturbação azimutal e axial, elas podem ser usadas para reconstruir o fluxo neutrônico de uma perturbação usando os sinais de detectores localizados no refletor lateral. Isso pode ser feito da seguinte forma: calculam-se os coeficientes a_{nml} e b_{nml} de uma perturbação azimutal e axial conhecida $\Delta\phi^c(r, \theta, z)$ usando as seguintes equações.

$$a_{oml}^c = \frac{4}{\pi H C} \int_0^H \int_0^{2\pi} \int_0^R r J_0(B_m \cdot r) \sin lz \Delta\phi^c(r, \theta, z) dr d\theta dz \quad (5)$$

$$a_{nm1}^c = \frac{2}{\pi H C} \int_0^H \int_0^{2\pi} \int_0^R r \cdot J_n(B_m \cdot r) \cos n\theta \text{sen} lz \Delta\phi^c(r, \theta, z) dr d\theta dz \quad (6)$$

$$b_{nm1}^c = \frac{2}{\pi H C} \int_0^H \int_0^{2\pi} \int_0^R r J_n(B_m \cdot r) \text{sen} n\theta \text{sen} lz \Delta\phi^c(r, \theta, z) dr d\theta dz \quad (7)$$

com

$$C = \int_0^R r J_n^2(B_m \cdot r) dr$$

A partir desses valores calculam-se as relações α_{nm1}^c e β_{nm1}^c que permanecem inalteradas para qualquer perturbação, ou seja :

$$\alpha_{nm1}^c = \alpha_{nm1} \quad e \quad \beta_{nm1}^c = \beta_{nm1} \quad (8)$$

Além disso pode ser mostrado [5] que a igualdade $\alpha_{nm1} = \beta_{nm1}$ é verdadeira e com isso a equação (3) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\Delta\phi^d(r, \theta, z) = \sum_{l=1}^L \sum_{n=0}^N A_{nl}(r) \text{sen} lz (a_{n1l}^d \cos n\theta + b_{n1l}^d \text{sen} n\theta) \quad (9)$$

onde

$$A_{nl}(r) = \sum_{m=1}^M \alpha_{nm1} J_n(B_m \cdot r) \quad (10)$$

é previamente calculada para uma perturbação conhecida c.

Os valores de $\Delta\phi^d(r, \theta, z)$ da equação (9) são obtidos dos sinais dos detetores localizados no refletor lateral sendo necessários $(2N+1)L$ detetores para obter-se os $(2N+1)L$ coeficientes a_{n1l}^d e b_{n1l}^d .

A partir dos valores a_{n1l}^d e b_{n1l}^d podem ser obtidos os demais coeficientes a_{nm1}^d e b_{nm1}^d a partir dos valores de α_{nm1} .

$$a_{nm1}^d = \alpha_{nm1} \cdot a_{n1l}^d$$

e

$$b_{nm1}^d = \alpha_{nm1} \cdot b_{n1l}^d$$

Com os valores dos coeficientes a_{nm1}^d e b_{nm1}^d conhecidos pode-se calcular $\Delta\phi^d(r, \theta, z)$ para qualquer ponto do reator utilizando-se a equação (3) para os limites das somatórias N, M, L.

3. Resultados

Este sistema de instrumentação foi testado numericamente para dois reatores de características bastante diferentes. Um deles foi a unidade crítica KAHTER do Instituto de Desenvolvimento de Reatores, IRE do Centro Nuclear de Jülich KFA da República Federal Alemã. Essa crítica possui dimensões bastante reduzidas sendo $R= 148$ cm e $H= 300$ cm. O outro reator usado para testes do programa ZELT-3D foi o reator de potência PNP-3000 cujas dimensões são bastante grandes' $R= 725$ cm e $H= 1000$ cm.

As perturbações analisadas foram causadas pela introdução de duas barras absorvedoras excêntricas, em várias profundidades.

3.1. Teste do Sistema ZELT-3D para a Unidade Crítica KAHTER

Para a unidade crítica KAHTER foram analisadas 3 perturbações' causadas pela introdução de duas barras absorvedoras nas profundidades 110 cm, 220 cm e 300 cm. Esses arranjos estão mostrados na figura 1 juntamente com a posição dos detetores e das barras. Foram usados 11 detetores em cada um dos seis planos instrumentados. Este valor foi escolhido baseado em um estudo paramétrico da influência do número de detetores na qualidade da reconstrução onde obteve-se que a partir de 11 detetores não se obtém melhora apreciável na reconstrução [6], [7]. Os três casos foram reconstruídos com os valores de α_{nm1} calculados da perturbação causada por 2 barras absorvedoras inseridas 110 cm. Nas figuras 2 e 3 estão apresentadas as reconstruções' com o programa ZELT-3D para 2 barras inseridas 110 cm e 220 cm. Os resultados dos cálculos com CITATION-3D estão também apresentados para comparação. Pode-se observar que existe uma boa concordância entre os resultados obtidos com CITATION-3D e ZELT-3D. Pode-se também, da observação das figuras, perceber que as barras estão inseridas a uma profundidade entre 97 cm e 127 cm na figura 2 e entre 207 cm e 230 cm na figura 3.

Outra maneira de se conhecer a profundidade de inserção das barras absorvedoras é analisando o comportamento da função $F(z) = \frac{\Delta\phi}{\phi}$ onde $\Delta\phi$ é a diferença entre o fluxo perturbado e o não perturbado calculado com ZELT-3D e ϕ é o fluxo não perturbado calculado com CITATION para um raio R predeterminado e o ângulo θ onde $\Delta\phi$ é mínimo. A função F obtida com os valores do fluxo calculados com CITATION-3D e com ZELT-3D para as três configurações é mostrada na

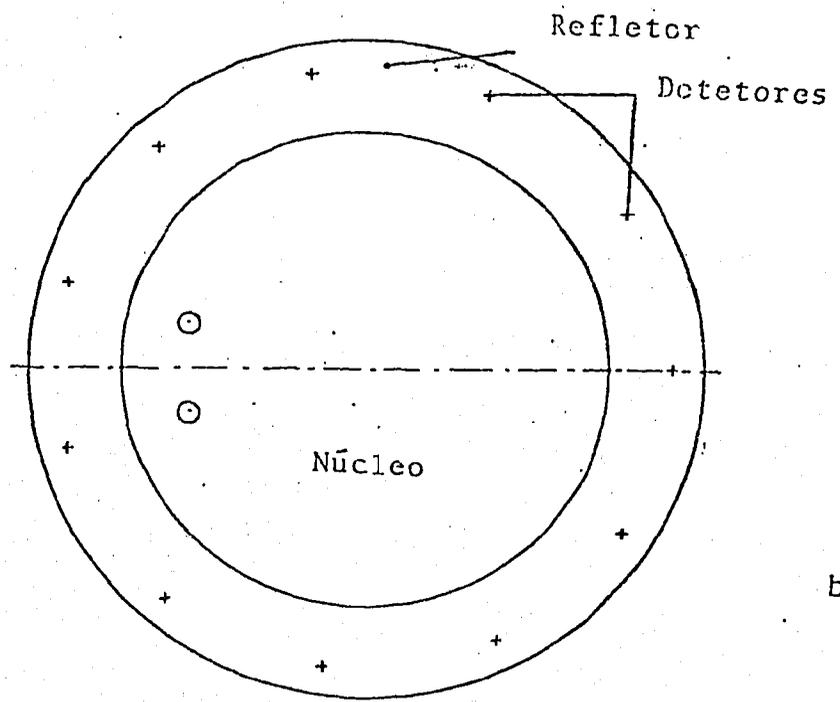
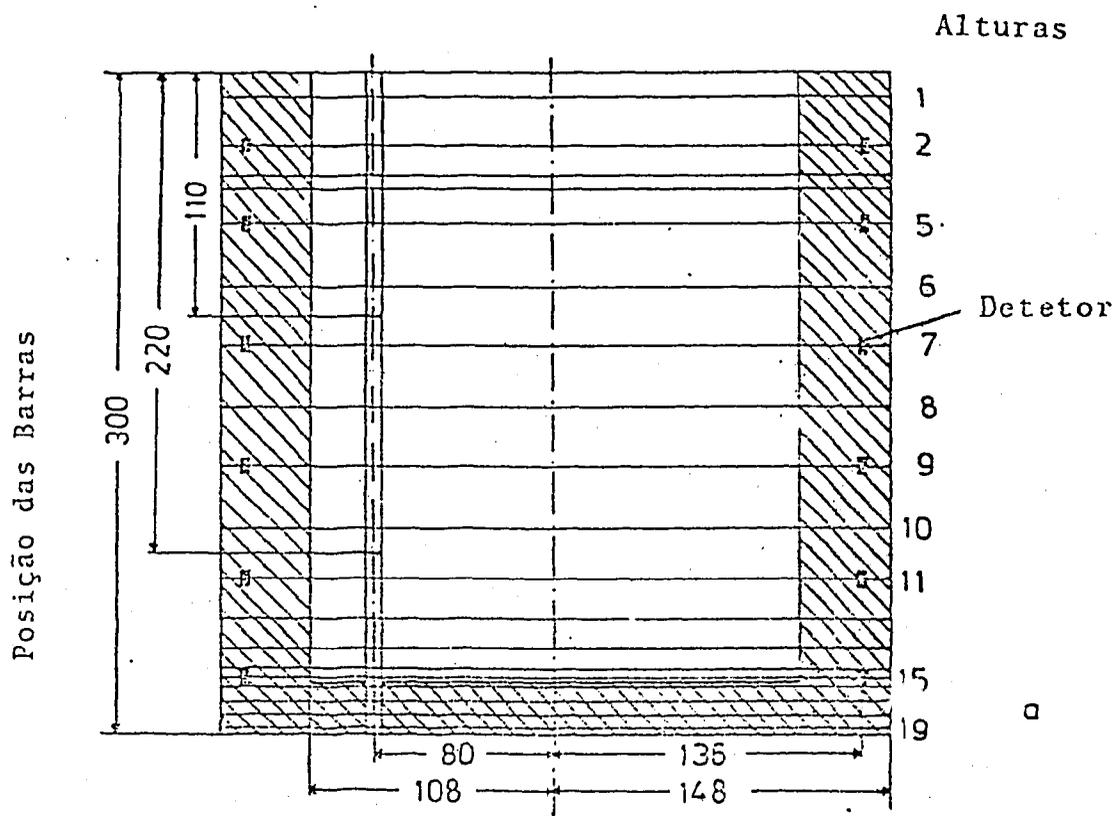
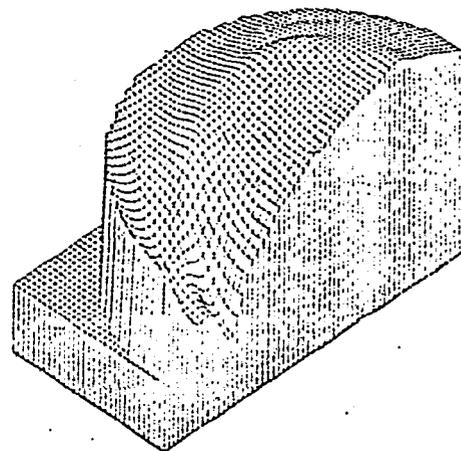
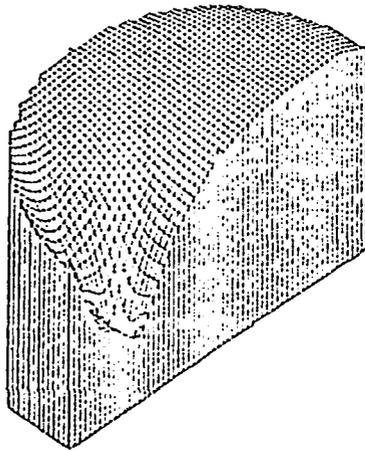
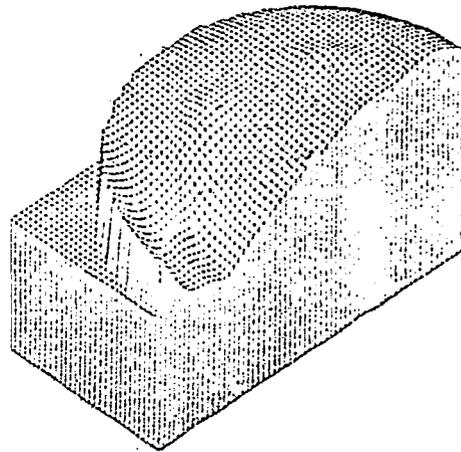
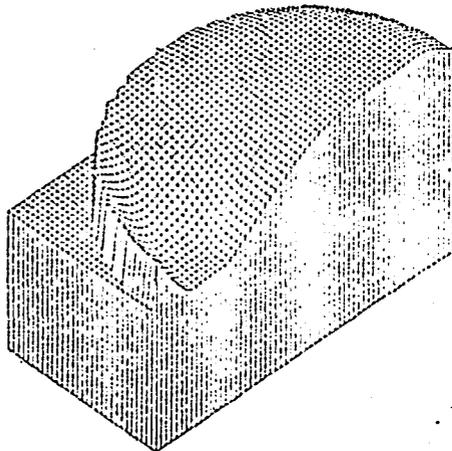


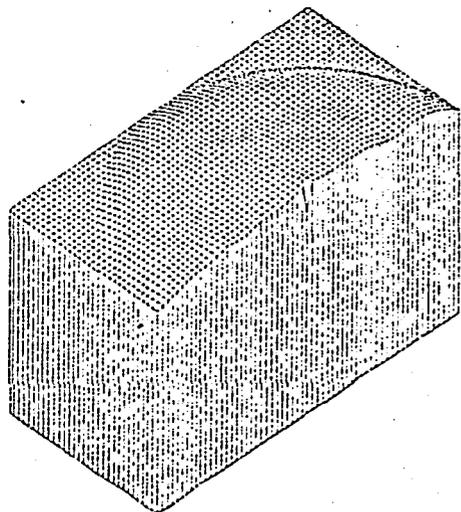
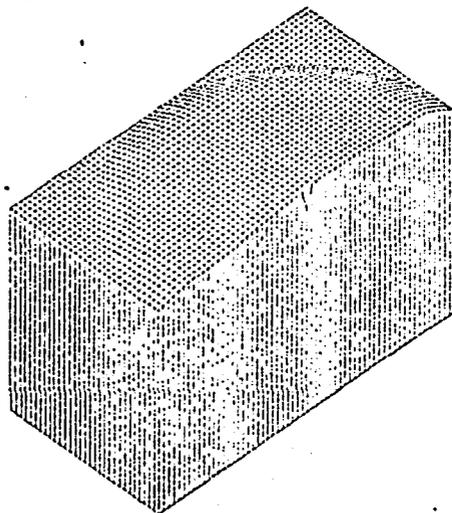
Figura 1 - Posição das barras absorvedoras e dos detetores-crítica KAHTER. a) corte vertical, b) corte horizontal.



Altura 6
Prof. 97cm

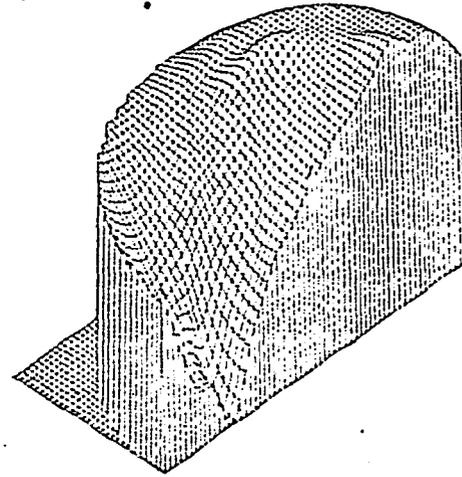
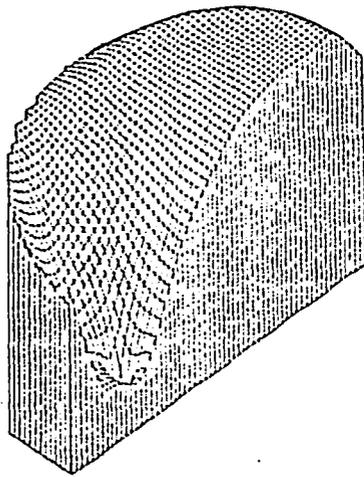


Altura 7
Prof. 127cm

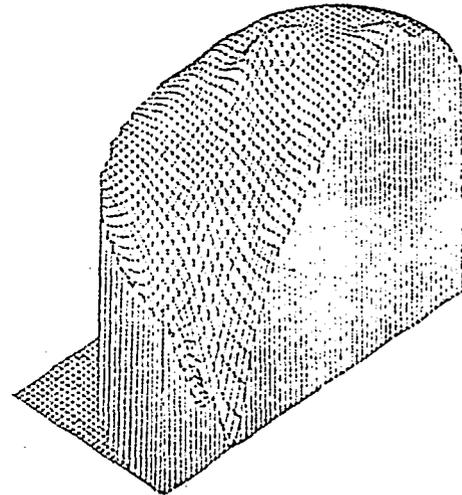
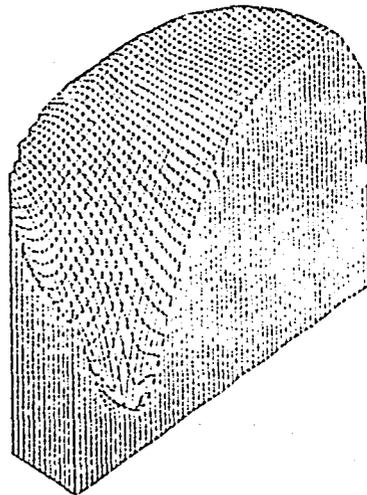


Altura 12
Prof. 248cm

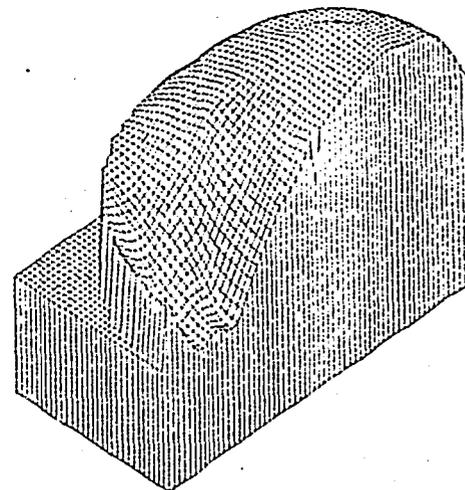
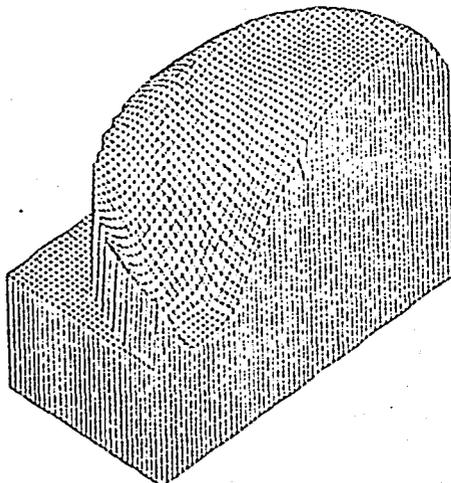
Figura 2 - Perturbação do fluxo térmico ($\Delta\phi = \phi^P - \phi^O$, ϕ^P = fluxo perturbado, ϕ^O = fluxo não perturbado) causada pela introdução de duas barras absorvedoras a uma profundidade de 110 cm.
esquerda: CITATION-3D direita: ZELT-3D.



Altura 5
Prof. 69cm



Altura 10
Prof. 207cm



Altura 11
Prof. 250cm

Figura 3 - Perturbação do fluxo térmico ($\Delta\phi = \phi^P - \phi^O$, ϕ^P = fluxo perturbado, ϕ^O = fluxo não perturbado) causada pela introdução de duas barras absorvedoras a uma profundidade de 220 cm.

esquerda: CITATION-3D

direita: ZELT-3D.

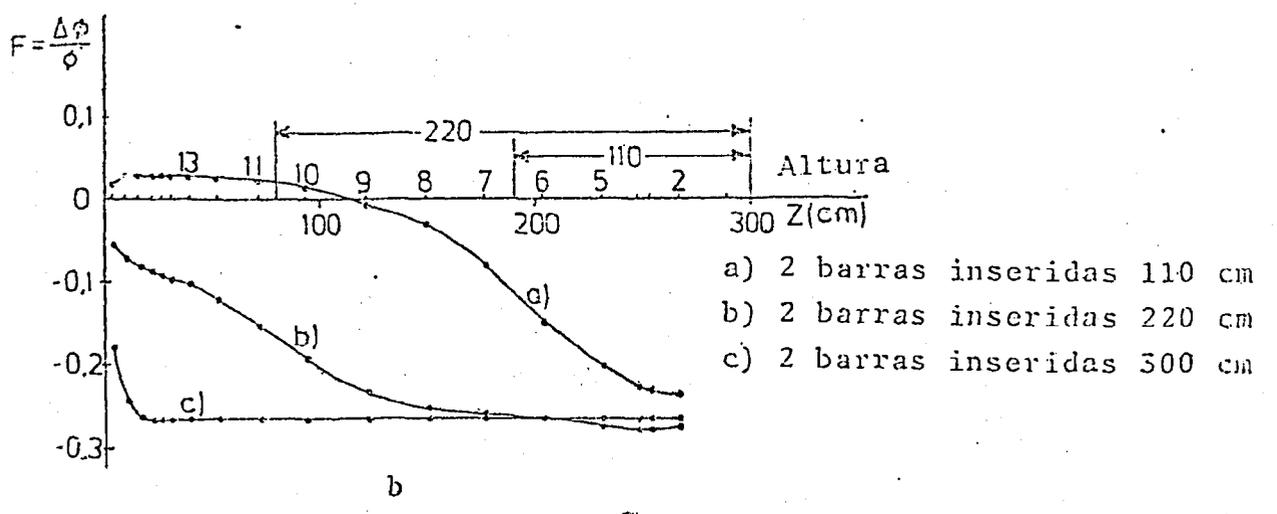
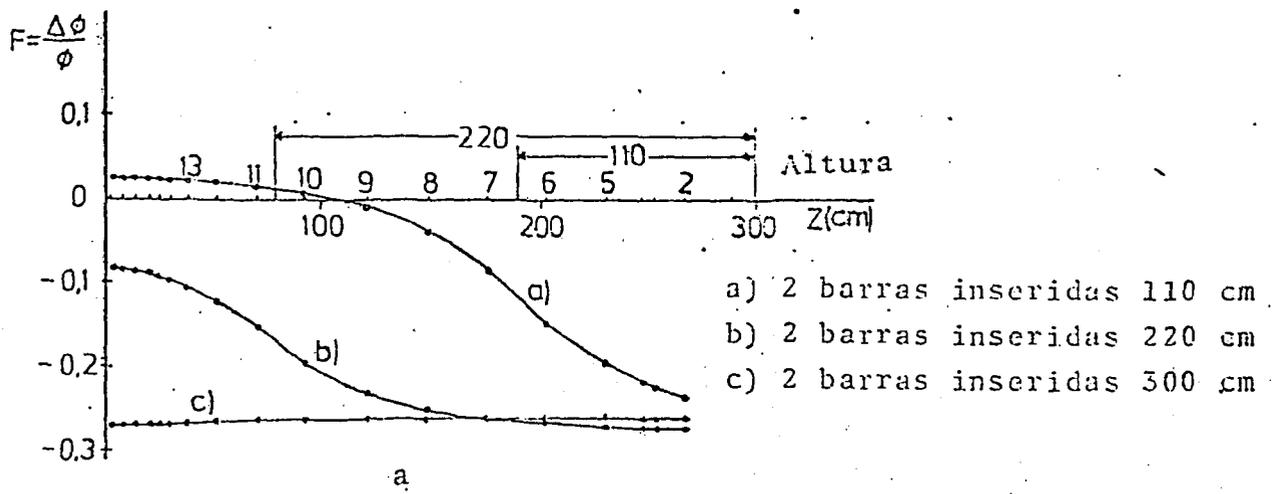


Figura 4 - Função $F = \Delta\phi(z)/\phi(z)$ em $r = 136$ cm e $\theta = 180^\circ$
 (KAHTER).
 a) CITATION b) ZELT-3D

Figura 4. Aqui também observa-se uma boa concordância entre os dois resultados. Pode-se observar que o ponto de maior inclinação da curva F corresponde à profundidade de inserção das barras absorvedoras.

Esses resultados mostram que no caso da unidade crítica KAHTER é possível determinar-se a profundidade de inserção de barras absorvedoras com bastante precisão com uma incerteza inferior a 30 cm. Resta saber se para reatores de grande porte o sistema ZELT-3D também apresenta tão bons resultados. Isto será analisado a seguir.

3.2. Teste do sistema ZELT-3D para o reator de potência PNP-3000.

O reator PNP-3000 possui características bastante diversas da crítica KAHTER entre as quais se destacam as dimensões, a existência do refletor superior e de uma região vazia (gás refrigerante) entre a região combustível e o refletor superior.

- A instrumentação lateral deve monitorar a região do núcleo visto que os refletores superior e inferior possuem sua própria instrumentação. Com isso pode ser feita uma modificação no programa ZELT-3D original em que se desprezam as regiões não combustíveis na direção axial e com isso pode-se obter melhores resultados na reconstrução do fluxo na região combustível. Isso pode ser melhor visualizado na Figura 5 b onde está representado o fluxo térmico em função da altura para o núcleo sem perturbação. Se as relações α_{nml} forem calculadas apenas para o intervalo $150 < Z < 700$ e considerando uma distância extrapolada para o desenvolvimento das funções de 800 cm (veja linha tracejada da Figura 5) podem ser obtidos melhores resultados do que considerando toda a altura do reator. Um estudo comparativo desses dois casos [8] mostrou que utilizando-se apenas a altura ativa do núcleo os resultados são melhores do que se for usada a altura total do reator.

Na Figura 6 estão apresentados os resultados da reconstrução do fluxo térmico com ZELT-3D e CITATION-3D para uma perturbação causada pela introdução de 2 barras absorvedoras até a altura $H=520$ cm. Para a reconstrução do fluxo foram utilizados os valores de α_{nml} calculados da perturbação causada pela introdução de duas barras absorvedoras até a altura de 460 cm. Foram utilizados 33 detetores em 3 alturas diferentes sendo 11 detetores em cada altura. (ver Figura 5a). Da observação da Figura 6 pode-se concluir que as barras absor

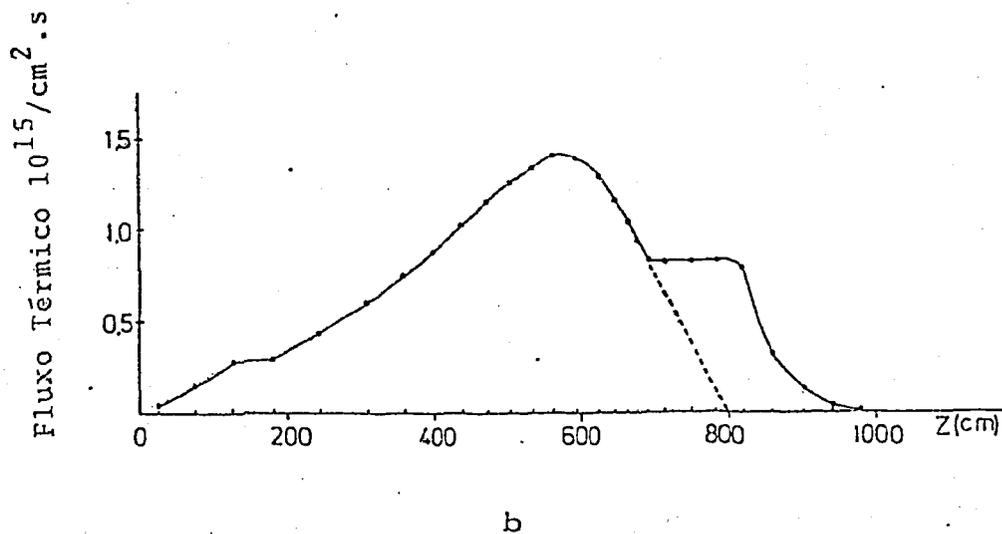
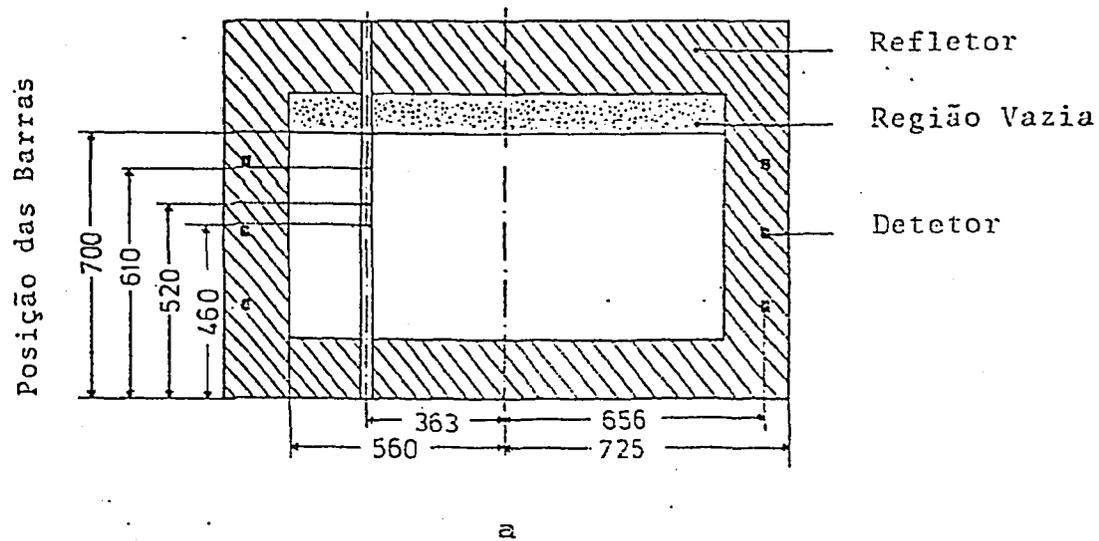
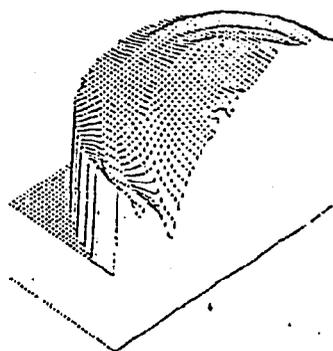
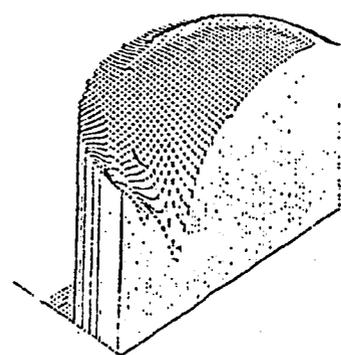
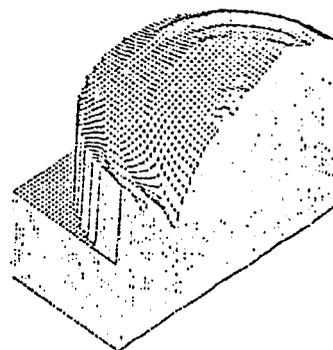
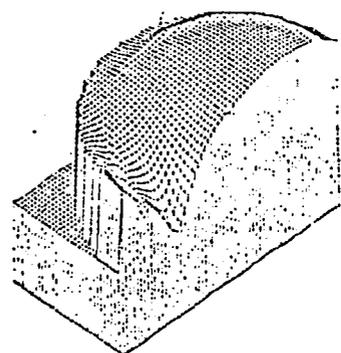


Figura 5 - Reator PNP-3000

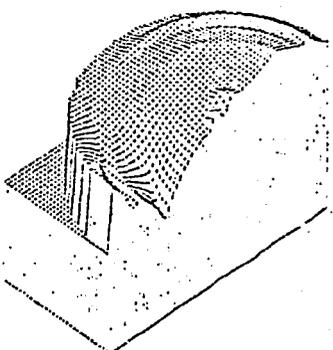
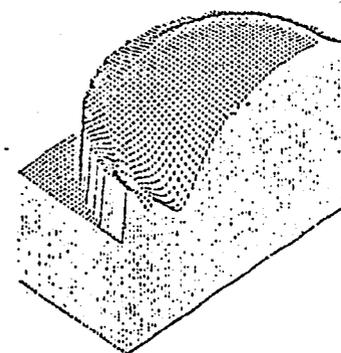
- a) Posição das barras absorvedoras e dos detetores - corte vertical.
- b) Fluxo térmico - distribuição axial.



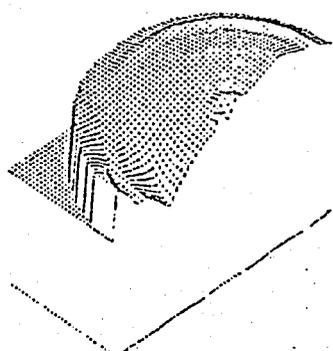
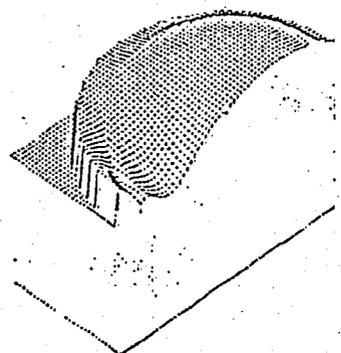
H=535cm



H=505cm



H=475cm



H=440cm

Figura 6 - PNP-3000 com duas barras absorvedoras inseridas até H= 520 cm.

esquerda: CITATION -3D

direita: ZELT-3D

vedoras estão inseridas a uma profundidade entre H= 475 cm e H= 535 cm.

Esses resultados mostram que o sistema ZELT-3D também apresenta bons resultados para reatores de grandes dimensões.

4. Conclusões

Como foi mostrado no presente trabalho, o sistema tridimensional de "flux mapping" proposto é capaz de detectar perturbações azimutais e axiais com bastante precisão usando um número bastante reduzido de detetores. Esta instrumentação, combinada com as instrumentações do refletor superior e inferior [9] é capaz de fornecer informações suficientes para a monitoração e controle da distribuição de potência em reatores a alta temperatura de combustível esférico.

Referências Bibliográficas

1. PNP Statusbericht zum Ende der Konzeptphase vom 1.8. 1975
30.11.1976 Band I, BF, GHT, HRB, KFA, RBW, Dezembro 1976.
2. R.D. Neef, D. Al-Dabagh, D.E. Carlson, P.Knob, H. Schaal, N.Serafin Corenahes Instrumentierungssystem zur Detektion von Flusstörungen bei Kugelhanfen-HTR
Jahrestagung Kerntechnik 1981 (Düsseldorf).
3. R.D. Neef, W.Basse, D.E. Carlson, P.Knob, H.Schaal
Excocore Instrumentation System for the Detection of Flux Perturbations in Pebble Bed HTGRs. Conference on Gas-Cooled Reactors Today, Bristol, England (September 1982).
4. R. Koch, Modelluntersuchungen zum Problem der Detektion von Flussirregularitäten (Xe-Schwingungen) in grossen Reaktoren. Report Jull-1488, KFA Jülich GmbH (1978).
5. P.J. Knob, R.D. Neef and H. Schaal. Development and Test of the tree-dimensional Computer Code ZELT-3D for unfolding Power Distributions using Side Reflector Instrumentation Signals - Nuclear Technology - a ser publicado.

6. Paulo José Knob. Numerische Untersuchungen zur Detektion von Fluss-Störungen im Hochtemperaturreaktor mit einer Ausseninstrumentierung. Interner Bericht. KFA-IRE-IB. 17/81 - Juli 1981.
7. P. Knob, A. Lauer, R.D. Neef Numerische Untersuchungen zur Detektion von Fluss-Störungen im Hochtemperaturreaktor mit einer Ausseninstrumentierung. Atomkernenergie Kerntechnik Band 35 (1980) Lfg. 4.
8. P. J. Knob Entwicklung eines dreidimensionalen Rechenprogramms zur Entfaltung von Leistungsverteilungen mittels Seitenreflektorinstrumentierung sowie Bestimmung der Leistungsfähigkeit und Grenzen dieses Verfahrens. JÜ1-1793, Juli 1982.
9. R. D. Neef, W. Basse, D.E. Carlson, P. Knob, H.Schaal-KFA. H. Wilhelm, A. Strömich - INTERATOM Detection of Flux Perturbations in Pebble Bed HTGRS by Near Core Instrumentation; International Atomic Energy Agency, Vienna-Austria, IAEA-Tc- 389/6-10 - Jun 1982.