

TEMA ESPECIAL DE FÍSICA DE REATORES
DO VIII ENFIR

Adimir dos Santos
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares / CNEN-SP

João M. L. Moreira e Alfredo Y. Abe
Coordenadoria para Projetos Especiais - COPESP

RESUMO

O primeiro tema especial de física de reatores incluiu dois problemas com os quais buscava-se avaliar a capacidade de análise das instituições participantes para prever criticalidade em núcleos de UO_2 e estimar reatividade de barras de controle de Ag-In-Cd e B_4C . As instituições participantes, CNEN, CTEx, IPEN/CNEN-SP e IEN/CNEN-RJ apresentaram seus resultados que foram resumidos e comparados pela comissão organizadora neste trabalho. Os resultados completos de cada instituição também se encontram nesta brochura.

Os resultados obtidos pelas instituições apresentaram discrepâncias médias de 0,59 % e 0,47 % na previsão de criticalidade de núcleos de UO_2 -aço inoxidável e UO_2 -zircaloy, respectivamente. As discrepâncias médias para barras de controle de Ag-In-Cd e B_4C foram, respectivamente, de 0,66 % e 1,2 % em reatividade. Todos os participantes utilizaram o programa CITATION para os cálculos de difusão, entretanto para o cálculo celular as instituições utilizaram programas diferentes.

INTRODUÇÃO

Várias instituições internacionais participam de exercícios de cálculo celular e de difusão para avaliar suas capacidades de análise, identificar possíveis problemas em suas metodologias de cálculo e em grupo resolver os problemas encontrados. Atualmente, nota-se que um esforço internacional vem sendo realizado para dirimir dúvidas em cálculos envolvendo ciclos de combustível de alta conversão para a utilização de $Pu^{1,2}$, indicando que o cálculo de núcleos térmicos e rápidos seja um problema já resolvido no exterior. Nota-se também uma certa padronização nos métodos de cálculo em vários países, principalmente na França e Argentina.

O Tema Especial de Física de Reatores do VIII Enfir visou um melhor entendimento das técnicas de previsão de criticalidade e estimativa de reatividade de núcleos térmicos. Os objetivos colocados foram avaliar os diferentes modelos e programas utilizados por instituições do país e identificar possíveis problemas nos resultados. Os problemas propostos^{2,3} incluíram duas unidades críticas de UO_2 com revestimentos de aço inoxidável e de zircaloy e barras de controle de Ag-In-Cd e B_4C . Não foi considerando queima nos problemas.

Os núcleos dos problemas 1 e 72 foram montados nas instalações do "Reactor Evaluation Center" da Westinghouse^{2,3}. Ambos os problemas são baseados em experimentos de determinação da altura crítica dos núcleos por meio da variação do nível de moderador de água leve.

DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

A Unidade Crítica do "Reactor Evaluation Center" é composta basicamente de um tanque de aço inoxidável de 182,88 cm de diâmetro e 213,36 cm de altura. Dentro deste tanque foram colocados os núcleos em estudo e água leve que serve como moderador e refletor. Numa plataforma sobre o tanque forma montadas barras cruciformes de segurança que asseguram o desligamento do núcleo juntamente com o esvaziamento rápido do tanque de moderador. Os núcleos foram montados dispondo varetas de material combustível e absorvedor nas configurações desejadas. O suporte das varetas é garantido por placas espaçadoras de aço inoxidável.

Os experimentos foram realizados de forma que a parte superior das varetas de combustível e de material absorvedor de neutrons ficavam descobertas (sem água ou moderador), tornando o núcleo não refletido na parte superior. A água e o material estrutural abaixo do núcleo constituíam o refletor inferior. Dada a complexidade para modelar corretamente as partes inferior e superior do conjunto crítico, os experimentadores determinaram um "buckling" axial crítico para que os experimentos pudessem ser analisados em duas dimensões. Em suma, os resultados experimentais foram corrigidos tornando o problema bi-dimensional.

A Figura 1 apresenta a localização das varetas de UO_2 revestidas de aço inoxidável e das varetas absorvedoras de Ag-In-Cd no núcleo do problema 1. As Tabelas 8 a 13 no Apêndice apresentam os dados relativos ao problema 1. Na Figura 2 encontram-se as posições das varetas absorvedoras de B_4C e de

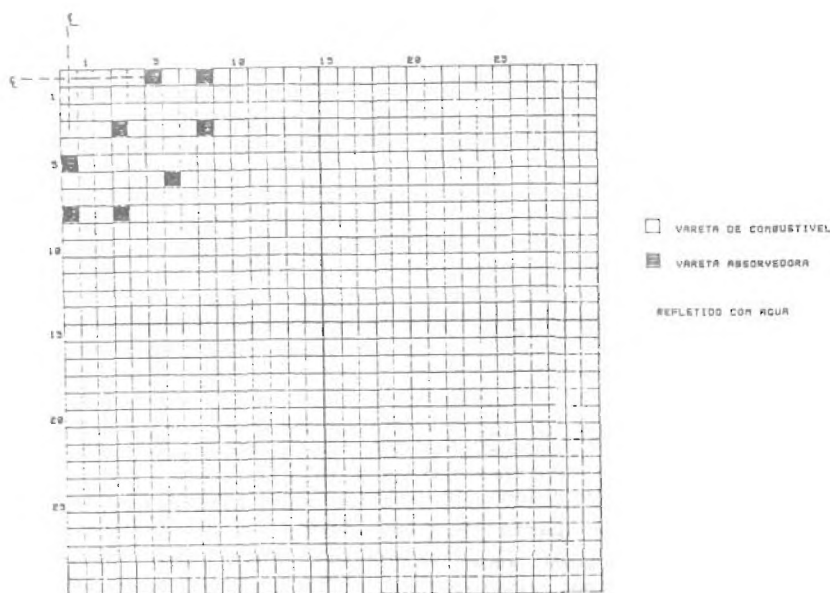


Figura 1 - Núcleo do Problema 1 (61 x 61). Quadros hachurados representam varetas absorvedoras de Ag-In-Cd.

UO₂ revestido de zircaloy no núcleo do problema 2. As Tabelas 14 a 18 no Apêndice apresentam os dados relativo ao problema 2. Salienta-se que o núcleo sem controle em ambos os problemas tem as posições de varetas absorvedoras preenchidas com água leve.

Os "bucklings" axiais das configurações críticas foram obtidos da fórmula $(\frac{H}{H_c})^2$ onde H é a soma da altura da água (altura ativa) e das economias de refletor superior e inferior.

A economia de refletor é obtida da distribuição axial de fluxo neutrônico medida para uma dada configuração. A distribuição de fluxo medida é ajustada a um cosseno de forma a se obter o "buckling" axial. A economia de refletor é definida neste tema especial como a diferença entre o cosseno ajustado é extrapolado a zero e a altura ativa real do núcleo. Os resultados experimentais^{2,3} mostraram que a economia de refletor varia pouco com a presença ou não de varetas absorvedoras no núcleo.

RESULTADOS SOLICITADOS AOS PARTICIPANTES

Foi solicitado aos participantes que:

- 1) Determinassem o k_{eff} para as configurações de núcleo com e sem varetas absorvedoras de neutrons com as respectivas alturas críticas. O núcleo com varetas absorvedoras foi denominado núcleo com controle.
- 2) Determinassem a reatividade das varetas absorvedoras de neutrons considerando como referência o núcleo sem varetas absorvedoras.
- 3) Averiguassem o impacto das modelagens (número de meshes, célula de combustível, célula de controle, célula de água, etc) nos resultados.

Solicitou-se aos participantes que

analisassem os seguintes pontos: aproximações Pl ou B1, tratamento do "gap", modelo do núcleo de espalhamento da água, modelo de auto-blindagem utilizado para célula de controle e de combustível, fator de Dancoff, número de grupos de energia e número de meshes no cálculo celular e de difusão. Solicitou-se também que fossem apresentados os modelos celulares e as bibliotecas utilizadas.

COMPARAÇÃO ENTRE OS CÁLCULOS DOS PARTICIPANTES

A comparação entre os resultados apresentados pelas várias instituições para a análise dos problemas propostos encontram-se resumidas nas tabelas que seguem abaixo. Os traços nas tabelas indicam ausência da informação no texto apresentado pelos participantes^{4,5,6,7} e as interrogações indicam falta de clareza a respeito da informação.

As instituições participantes utilizaram os programas CITATION para cálculo de difusão e LEOPARD, HAMMER, HAMMER-TECHNION e WIMS-TRACA para cálculo celular, ver refs. 4-7. A Tabela 1 mostra os programas e as bibliotecas utilizadas para a análise dos problemas propostos. Algumas instituições se utilizaram de dados de várias bibliotecas para a análise dos problemas.

A Tabela 2 mostra os modelos utilizados para o cálculo celular pelas instituições participantes. Algumas informações não foram mencionadas, entretanto nota-se que: o modelo da célula de combustível inclui 3 ou 4 regiões, no caso de 3 regiões o gap e o revestimento são homogeneizados; o modelo de supercélula foi escolhido por três instituições para representar a vareta absorvedora e o buraco de água. Somente o

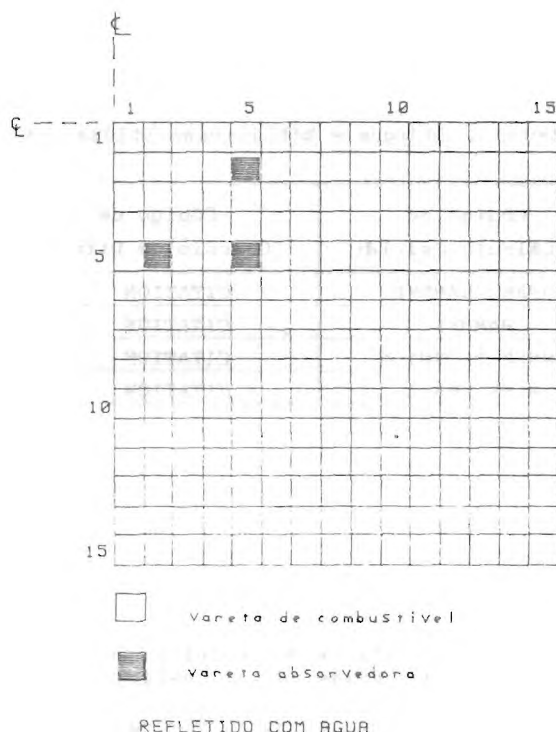


Figura 2 - Núcleo de Problema2 (30 x 30). Quadrados hachurados representam varetas absorvedoras de B₄C.

IPEN/SP considerou o tratamento da autoblindagem na vareta absorvedora. Características do modelo como autoblindagem, espalhamento do núcleo de H, fator de Dancoff e número de meshes no cálculo celular não foram mencionadas por todos os participantes dificultando uma comparação metodológica.

Na Tabela 3 encontram-se as características do cálculo de difusão. A análise do impacto do número de meshes no cálculo de difusão indicou pouca influência para a faixa de 1 a 5 pinos por mesh.

Informações relativas à composição química envolvendo impurezas de UO₂, aço inoxidável, zircaloy, liga Ag-In-Cd e B₄C foram apresentadas apenas pelo IEN/CNEN-RJ. Os isótopos de impurezas que não constavam da biblioteca do programa WIMS-TRACA foram substituídos seguindo o critério de equivalência da seção de choque macroscópica.

A Tabela 4 mostra o tratamento dado a composição química dos materiais de acordo com vários participantes.

RESULTADOS OBTIDOS PELOS PARTICIPANTES

Os problemas propostos permitem avaliar os métodos de cálculo de núcleos de combustível de UO₂ e revestimento de aço inoxidável (problema 1), de núcleos e combustível de UO₂ e revestimento de zircaloy (problema 2), de barras de controle de Ag-In-Cd (problema 1) e barras de controle de B₄C (problema 2). Para o núcleo sem controle foi considerada a diferença $1 - k_{ef}$ como sendo o "bias" existente na previsão de criticidade devido células de UO₂-aço inox

e UO₂-zircaloy. Assumindo que este "bias", descontado do k_{ef} produzido pelo cálculo envolvendo varetas de controle, elimine os erros devido ao combustível e revestimento, os resultados obtidos indicariam apenas discrepâncias das estimativas de reatividade de barras de controle. A Tabela 5 mostra as discrepâncias ou "bias" obtidos para os problemas 1 e 2 para o núcleo sem controle. A Tabela 6 apresenta informações semelhantes relacionadas as varetas ou barras de controle.

Nota-se que os resultados com revestimento de zircaloy foram melhores que os com revestimento de aço inoxidável, erro médio de 0,47 % contra 0,59 % em k_{ef} , respectivamente. O IPEN/CNEN-SP e o IEN/CNEN-RJ obtiveram resultados melhores para revestimento de zircaloy demonstrando maior familiaridade com este revestimento típico de PWR's. A CNEN apresentou melhor resultado com aço inoxidável.

Todas as instituições participantes subestimaram k_{ef} para núcleos de UO₂ e revestimentos de zircaloy e aço inoxidável. O IEN/CNEN-RJ que superestimou k_{ef} do núcleo com revestimento de zircaloy.

Os resultados relativos a barras de controle são bastante diferentes para as várias instituições de forma que o valor médio das discrepâncias não indica qualquer tendência. Os IEN/CNEN-RJ e IPEN/CNEN-SP estimaram melhor a reatividade das varetas de B₄C, enquanto a CNEN e O CTEX estimaram melhor a reatividade das varetas de Ag-In-Cd.

A Tabela 7 mostra a reatividade das barras de controle calculadas em relação ao núcleo sem controle. As discrepâncias indicadas na Tabela 7 coincidem com as

Tabela 1. Códigos e bibliotecas utilizados.

Instituição	Código de Cálculo Celular	Código de Cálculo de Difusão	Biblioteca Dados Nucleares
CNEN/RIO	LEOPARD/HAMMER	CITATION	ENDF/B-III, IV e V
CTEx	HAMMER	CITATION	ENDF/B-III
IPEN/SP	HAMMER-TECHNION	CITATION	ENDF/B-IV, V e JENDL-2
IEN/RIO	WIMS-TRACA	CITATION	---

Tabela 2. Características dos modelos de cálculo celular utilizados pelas várias instituições participantes.

Instituição	Tratamento da Autoblindagem	Modelo de Espalhamento H ₂ O
CNEN/RIO	---	---
CTEx	---	---
IPEN/SP	ROLAIDS/NORDHEIN	---
IEN/RIO	---	NELKIN

Instituição	Tratamento do Gap Combust./Barra C.	Correção de DANCOFF
CNEN/RIO	--- / Sim	---
CTEx	--- / ---	---
IPEN/SP	Sim / Sim	---
IEN/RIO	Sim / Sim	(?)

Instituição	Número de "meshes" Combust./Barra C.	Modelagem da Barra de Controle
CNEN/RIO	--- / ---	Explícito
CTEx	--- / ---	Super-Célula
IPEN/SP	--- / ---	Super-Célula
IEN/RIO	13 / 27	Super-Célula

Instituição	Modelagem do Buraco de H ₂ O	Modelagem da Célula Combustível
CNEN/RIO	---	4 regiões
CTEx	Super-Célula	---
IPEN/SP	Super-Célula	3 regiões
IEN/RIO	Super-Célula	4 regiões

--- indica item não mencionado

? indica item não esclarecido

Tabela 3 Características do modelos de cálculo de difusão.

Instituição	Modelagem Geometria/Simetria	Condição de Contorno Lateral / Super. Infer.
CNEN/RIO	2D / (1/4)	Refletido / Fluxo Nulo
CTEx	--- / ---	--- / ---
IPEN/SP	2D / (1/4)	Refletido / Fluxo Nulo
IEN/RIO	2D / (1/4)	--- / ---

Instituição	Número de "meshes" por vareta	Tamanho do Refletor Prob. 1 / Prob. 2	Número de Grupos p/ calc. de dif.
CNEN/RIO	1-5	47 cm / 58.2 cm	2
CTEx	---	--- / ---	4
IPEN/SP	1-2	80 cm / 80 cm	2/4
IEN/RIO	1-4	--- / ---	4

Tabela 4 Composição química utilizados para UO₂, aço-inox e zircaloy e respectivas impurezas.

Instituição	Zircaloy	UO ₂
CNEN/RIO	não mencionou	---
CTEx	zircaloy equiv.	---
IPEN/SP	não mencionou	---
IEN/RIO	explícito + equiv.	explícito

Tabela 5 Resultados de previsão de criticalidade para o problema 1 (núcleo de UO₂ com revestimento de aço-inox) e problema 2 (núcleo de UO₂ e revestimento de zircaloy).

Instituição	Problema 1		Problema 2	
	Keff	(1-k)	Keff	(1-k)
CNEN/RIO	0.9986	+ 0.0014	0.9915	+ 0.0085
CTEx	0.9870	+ 0.0130	0.9910	+ 0.0090
IPEN/SP	0.9949	+ 0.0051	0.9991	+ 0.0009
IEN/RIO	0.9958	+ 0.0042	1.0006	- 0.0006

Tabela 6 Discrepâncias nas estimativas de criticalidade de núcleos e de reatividade de barras de controle.

Instituição	Discrepância em vareta de Ag-In-Cd	Discrepância em vareta de B ₄ C
CNEN/RIO	+ 0.35	+ 1.18
CTEx	+ 1.54	+ 3.36
IPEN/SP	+ 0.35	+ 0.08
IEN/RIO	+ 0.39	+ 0.17
Média	+ 0.66	+ 1.20

Tabela 7 Reatividade das barras de controle.

Instituição	Ag-In-Cd (%)	Erro* (%)	B4C (%)	Erro* (%)
CNEN/RIO	4.33	-0.11	7.72	-1.20
CTEx	2.88	-1.56	6.97	-1.95
IPEN/SP	4.09	-0.35	8.02	-0.90
IEN/RIO	4.47	+0.03	8.86	-0.06
Experimental	4.44	--	8.92	--

* O erro acima refere-se a diferença entre as reatividades calculada e experimental e é apresentado em unidades de (%).

indicadas na Tabela 6 em relação aos itens CNEN/RIO vareta de B₄C e CTEx e IPEN/SP vareta de Ag-In-Cd. Esperava-se que as discrepâncias indicadas devessem ser próximas dado que os resultados de Tabela 6 incluem as barras de controle.

COMENTÁRIOS FINAIS

Os resultados apresentados indicam que os participantes tem uma boa capacidade de cálculo de reatores térmicos sem considerações de queima. As discrepâncias de 0.59% e 0.48% para núcleos de UO₂ com revestimento de aço inoxidável e zircaloy podem ser considerados bons dado que algumas informações sobre os dados experimentais não estavam disponíveis nas Refs 2,3.

Os resultados apresentados em relação a barra de controle foram inferiores com erros médios de 0.66% para barras de Ag-In-Cd e 1.2% para as barras de B₄C. Entretanto os

resultados apresentados pela CNEN, IEN e IPEN foram melhores.

Notou-se que os cálculos de difusão são realizados por todas as instituições com o programa CITATION, indicando ser esta opção de cálculo um consenso entre os participantes.

Seria interessante que as instituições participantes unidos num esforço conjunto investissem na padronização de uma versão deste programa, acrescentando mais flexíveis e que atenda a todos os grupos interessados no país.

Em relação aos cálculos celulares notou-se que os vários participantes utilizam programas distintos. Notou-se também que algumas instituições não tem capacidade de processar os dados nucleares de bibliotecas básicas, como a ENDF/B-IV, para gerar bibliotecas de programas celulares como WIMS-TRACA e HAMMER. Um esforço no sentido de uniformizar no país um programa de seções de choque com uma biblioteca de dados abrangente parece ser o caminho a seguir. A partir daí poderíamos acompanhar nesta área a evolução está ocorrendo no mundo.

APÊNDICE

Abaixo encontram-se os dados relativos aos problemas 1 e 2.

Tabela 8 Dados da vareta combustível do problema 1.

Combustível	UO ₂
Enriquecimento em peso	2,7 %
Densidade do combustível	93 % da teórica
Diâmetro da pastilha	0,762 cm
Revestimento	SS-304
Densidade do SS-304	7,915 g/cm ³
Diâmetro externo do revestimento	0,859 cm
Espessura do revestimento	0,041 cm
Passo da rede	1,105 cm

Tabela 9 Dados da vareta de absorvedor Ag-In-Cd do problema 1.

Material absorvedor	Ag-In-Cd
Densidade do absorvedor	10,2 g/cm ³
Diâmetro Interno do Absorvedor	0,660 cm
Revestimento	SS-304
Densidade do SS-304	7,915 g/cm ³
Diâmetro externo do revestimento	0,724 cm
Espessura do revestimento	0,025 cm

Tabela 10 Dados da configuração do experimento do problema 1.

Rede quadrada de 61 X 61 posições	
Economia de refletor axial total	12,6 cm
Núcleo sem controle	
Número de varetas de combustível	3697
Número de posições com água	24
Altura de água	48,12 cm
Núcleo com controle	
Número de varetas de combustível	3697
Número de varetas absorvedoras	24
Altura de água	77,46 cm
Temperatura da água	20 C

Tabela 11 Composição química do combustível UO₂ (2,70 w/o) do problema 1.

U	88,1 %
C	80 ppm
Ag	< 0,1 ppm
F	25 ppm
B	< 0,5 ppm
Cr	63 ppm
Cu	2,0 ppm
Fe	617 ppm
Ni	80 ppm
Pb	2 ppm
Si	19 ppm
Sm	1 ppm
O	restante

Tabela 12 Composição química do revestimento de SS-304 do problema 1.

C	0,06 %
Mn	1,23 %
P	0,03 %
Ni	9,58 %
S	0,015 %
Si	0,50 %
Cr	18,20 %
Cu	0,35 %
Fe	restante

Tabela 13 Composição química da liga Ag-In-Cd da vareta absorvedora do problema 1.

Ag	79,6 %
In	15,17 %
Cd	5,08 %
Bi	< 0,0001 %
Cu	0,06 %
Fe	< 0,001 %
Pb	< 0,001 %
Sn	< 0,001 %
Zn	0,004 %

Tabela 14 Dados da vareta combustível para o problema 2.

Combustível	UO ₂
Enriquecimento em peso	2,72 %
Densidade do Combustível	95 % da teórica
Diâmetro da pastilha	1,016 cm
Revestimento	Zircaloy-4
Densidade do Zircaloy-4	6,553 g/cm
Diâmetro externo do revestimento	1,1895 cm
Espessura do revestimento	0,0799 cm
Passo da rede	1,524 cm

Tabela 15 Dados da vareta absorvedora do problema 2.

Material absorvedor	B4C
Densidade do absorvedor	1,35 g/cm ³
Diâmetro do absorvedor	1,003 cm
Revestimento	SS-304
Diâmetro externo do revestimento	1,105 cm
Espessura do revestimento	0,051 cm

Tabela 16 Dados da configuração do problema 2.

Rede quadrada de 30 X 30 posições	
Economia de refletor axial total	13,1 cm
Núcleo sem controle	
Número de varetas de combustível	888
Número de posições com água	12
Altura de água	39,63 cm
Núcleo com controle	
Número de varetas de combustível	888
Número de varetas absorvedoras	12
Altura de água	100,01 cm
Temperatura da água	20 C

Tabela 17 Composição química do combustível UO₂ (2,72 w/o) do problema 2.

U	88,15 w/o	Mg	4,4 ppm
Al	40 ppm	Mn	2,4 ppm
C	< 10 ppm	Mo	6,2 ppm
F	< 10 ppm	Ni	24,3 ppm
B	< 0,5 ppm	Pb	< 8 ppm
Bi	< 1 ppm	Si	< 21 ppm
Cd	< 0,3 ppm	Sn	< 2 ppm
Co	< 4 ppm	Ti	3,9 ppm
Ca	9,5 ppm	V	< 1 ppm
Cr	34 ppm	W	< 50 ppm
Cu	2,0 ppm	N	< 18 ppm
Fe	266 ppm	Zn	< 8 ppm
In	< 3 ppm	O	restante

Tabela 18 Composição química do revestimento de Zircaloy-4 do problema 2.

Zr	98,2 %
Fe	0,21 %
Cr	0,10 %
Ni	0,004 %
Sn	1,4 %
Hf	100 ppm
Al	20 ppm
B	0,2 ppm
C	95 ppm
Cd	0,2 ppm
Co	10 ppm
Cu	33 ppm
Mg	10 ppm
Mn	20 ppm
Mo	20 ppm
N	45 ppm
Pb	20 ppm
Si	58 ppm
Ti	20 ppm
V	20 ppm
W	50 ppm

REFERÊNCIAS

- [1] Ishiguro, Y., et al.. "Advances in the analysis of the NEACRP high conversion LWR benchmark problems", Proc. of The International Conference on The Physics of Reactor : Operation, Design and Computation., Physor-90, Vol-1, p.I-54, Marseille - France, April 1990.
- [2] Gaafer, M.A., Mango, L., Orestano, F.V., Pistella, F; "Assessment of the reliability of the CNEN's calculational methods for the neutronic design of PWR", Nucl. Tech. , Vol. 27, p. 187-206, 1975.
- [3] Sha, W.T.; " On analysis of reactivity worths of the rod cluster control (RCC) elements and local water hole power density peaking", WCAP-3269-47, Westinghouse Electric, 1967.
- [4] Filho, P.C., Conti, F.S.C.; " Tema Especial em Física de Reatores - VIII ENFIR"; VIII ENFIR, Atibaia-SP, Brasil, Sept. 1991
- [5] Vellozo, O.S., Vital, H.C., Balthar, M.C.V.; " Tema Especial em Física de Reatores - VIII ENFIR"; VIII ENFIR, Atibaia-SP, Brasil, Sept. 1991.
- [6] Ferreira, C.R., Yoriyaz, H.; " Tema Especial em Física de Reatores - VIII ENFIR"; VIII ENFIR, Atibaia-SP, Brasil, Sept. 1991.
- [7] Bastos, W.S., Couto, R.T., Santo, A.C.F., Remke, C.A.; Waintraub, M.; " Tema Especial em Física de Reatores - VIII ENFIR"; VIII ENFIR, Atibaia-SP, Brasil, Sept. 1991.