

UM SISTEMA DE OBTENÇÃO DE UM PRÉ-PROJETO OTIMIZADO DE NÚCLEO DE UM REATOR NUCLEAR

LUIZ ANTONIO MAI (IPEN/CNEN-SP)
NANAMI KOSAKA (IPEN/CNEN-SP)

Divisão de Física de Reatores

RESUMO

O trabalho proposto trata do desenvolvimento de um método de obtenção do pré-projeto de núcleo de um reator nuclear, de uma forma otimizada, levando-se em conta os objetivos do projeto, os limites físicos, econômicos e de segurança. Para tanto, simplificações foram feitas no modelo do reator (homogêneo e unidimensional) e nos cálculos (um grupo energético).

Foi adotado como modelo um típico reator PWR de potência e como parâmetros a serem otimizados: o diâmetro da região de combustível, a largura da região refletora, o enriquecimento médio e a razão de moderação. O objetivo é a obtenção da maior reatividade residual no final de um ciclo.

No trabalho é mostrado a resolução de um problema exemplo, através do qual concluiu-se sobre a eficiência, limitações e problemas surgidos. Também são dadas sugestões para um melhor desempenho do sistema e futuros trabalhos.

ABSTRACT

This work proposes a method for obtaining a first design of nuclear reactor cores. It takes into consideration the objectives of the project, physical limits, economical limits and the reactor safety. For this purpose, some simplifications were made in the reactor model: one energy-group, unidimensional and homogeneous core.

The adopted model represents a typical PWR core and the optimized parameters are the fuel thickness, reflector thickness, enrichment and moderating ratio. The objective is to gain a larger residual reactivity at the end of the cycle.

This work also presents results for a PWR core. From the results, many conclusions are established: system efficiency, limitations and problems. Also some suggestions are proposed to improve the system performance for futures works.

1. Introdução

Em projeto de reatores nucleares são exigidos inúmeros e demorados cálculos envolvendo vários códigos de computador, tanto no que se refere a neutrônica e a termohidráulica como também a segurança do núcleo. Porém, todos esses cálculos são executados com base num projeto referência onde os parâmetros básicos já estão aproximadamente determinados. Esses cálculos são feitos levando-se em conta, tanto fatores de desempenho do reator como também fatores de ordem econômica e de segurança que muitas vezes vão de encontro aos primeiros. Assim impõem-se a necessidade de esquematização de um processo que dose convenientemente os vários parâmetros envolvidos que estão limitados e, na maioria das vezes, vinculados entre si, de modo a obter-se um conjunto de parâmetros ótimo.

Dada a importância de problemas de otimização dentro da área nuclear, vários autores tem trabalhado com os mais variados objetivos, através de diversas técnicas. Terney [1] fornece em seu trabalho uma compilação das principais técnicas de otimização em problemas de engenharia nuclear, Goldschmidt [2], através do Princípio de Pontryagin, otimizou a distribuição do combustível fissil para obter a mínima massa crítica em reatores rápidos numa dada potência, Wall [3] utiliza-se da técnica da Programação Dinâmica na otimização do gerenciamento do combustível assim como Kallay [4] utiliza-se da mesma técnica em vários problemas de otimização do reator, Tzanos [5] usou a Programação Linear para otimizar a distribuição de materiais em núcleos de reatores rápidos e Jachic [6-7] tem trabalhado com diversos objetivos na otimização de reatores rápidos regeneradores. Nesses trabalhos encontramos intensa bibliografia do tema que mostra a grande importância de problemas de otimização na engenharia nuclear.

O trabalho aqui apresentado consiste no desenvolvimento de um sistema de obtenção do projeto neutrônico referência de um reator térmico, que será denominado de pré-projeto, de uma forma otimizada, obedecendo aos objetivos a que foi proposto o projeto, os limites físicos, econômicos e de segurança. Os métodos utilizados são a técnica de programação linear (método de Gauss-Jordan) [8] que define o domínio das possíveis soluções e o método do gradiente [9] para determinar a função objetiva ótima. A escolha destes métodos deve-se às características do problema, onde a complexidade na interdependência entre os parâmetros a serem pesquisados impossibilita definir a função objetiva através de uma expressão analítica. Maximizar a função objetiva implica, neste estudo, maximizar o valor de K_{ef} . Simplificações foram feitas no modelo de reator que são : o reator é homogêneo e unidimensional. Os cálculos também foram simplificados para um grupo de energia.

Essas simplificações, no entanto, não comprometem o método em si pois, o objetivo do trabalho consiste justamente em estabelecer as bases da metodologia de cálculo, podendo ser generalizado posteriormente para um reator de duas ou três dimensões e mais de um grupo energético. Essa generalização vai depender basicamente do que se convencionou chamar de simulador, que será visto posteriormente.

2. Descrição Geral do Sistema

Adotou-se como modelo um típico reator PWR de potência e como parâmetros a serem otimizados o tamanho da região combustível do reator (a), a largura da região refletora (b), o enriquecimento isotópico médio (ϵ) e a razão de moderação (H/U). Foi imposta condições para esses parâmetros que podem ser divididas em 3 grupos distintos:

- a) físicos : certamente haverá restrições espaciais do tipo:

$$\begin{aligned} (V1) \quad & a \leq a_0 \\ (V2) \quad & b \leq b_0 \\ (V3) \quad & a+b \leq c_0 \end{aligned}$$

b) econômicos: é razoável supor uma restrição no enriquecimento:

$$(V4) \quad \epsilon \leq \epsilon_0$$

c) segurança: é necessário garantir a segurança do reator durante a operação e isso impõe uma restrição no coeficiente de temperatura (α_t).

$$(V5) \quad \alpha_t \leq 0$$

Os valores a_0, b_0, c_0 e ϵ_0 dependem do projeto do reator em estudo e correspondem aos valores máximos que limitam os parâmetros a, b, ϵ . Tais valores máximos são definidos pelo projetista do reator.

Com exceção do último, todos os demais vínculos estão expressos em termos dos parâmetros do projeto. Além disso, os vínculos, na técnica da programação linear, devem estar expressos na forma linear.

Para transformar o vínculo (V5) numa expressão linear dos parâmetros do projeto, fixa-se um enriquecimento e , através do programa HAMMER [10] gera-se seções de choque microscópicas para diversas razões de moderação com vários estágios de queima. Com os valores de a e b também fixados, executa-se uma queima do reator com o programa CITATION [11] para os diversos casos e, para o último estágio da queima (26.000 MWD/T) levanta-se o gráfico de K_{ef} versus H/U . A forma geral desta curva é mostrado na figura 1 abaixo. Pela curva pode-se determinar a razão de moderação ótima $(H/U)_{ot}$ para um dado enriquecimento, largura do combustível e largura do refletor

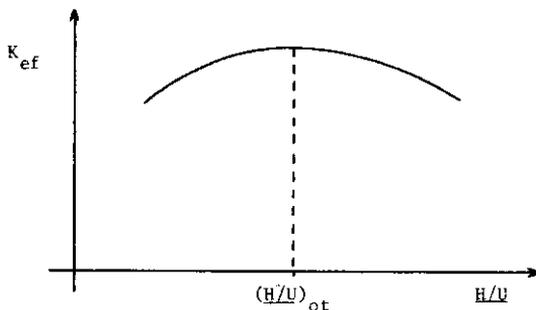


Figura 1 . K_{ef} Versus H/U para um Estágio de Queima.

Variando-se ϵ , a e b e repetindo-se o processo mais algumas vezes, obtém-se um conjunto de pontos que determinam um hiperplano médio através de uma regressão linear e

dessa maneira transforma-se o vínculo de α , numa função linear dos parâmetros do projeto.

Os gráficos de K_{ef} versus H/U são levantados só no fim do ciclo pois os picos, que correspondem ao H/U ótimo, se deslocam para valores menores de H/U com o desenvolvimento da queima, tornando um projeto que no início de vida é inerentemente seguro ($\alpha_c < 0$) num projeto instável ($\alpha_c > 0$).

Procedendo-se da maneira descrita acima, obteve-se a expressão linear do último vínculo :

$$(V5) \quad 0,0043a - 0,117b - 0,162c + H/U \leq 0,43$$

2.1) Definição do Domínio

Uma vez estabelecidos os vínculos lineares entre os parâmetros, é possível determinar-se o domínio das soluções possíveis num hiperespaço de 4 dimensões convexo que será denominado hiperespaço das soluções.

O método Simplex [8] de resolução de problemas de programação linear (PL) utiliza-se do método de Gauss-Jordan para a obtenção do vértices do domínio. Este é o método utilizado neste trabalho, que consta fundamentalmente em introduzir variáveis de folga para obter-se um sistema de equações e gerar sistemas na chamada forma canônica, ou seja, a base do sistema deve ser uma matriz identidade. Resolve-se o sistema para as variáveis da base, anulando-se as variáveis não básicas. Procedendo-se dessa maneira, passando por todas as variáveis, obtém-se os vértices do domínio.

2.2) Simulador

O simulador utilizado baseia-se no método nodal absorção-produção em uma dimensão e em um grupo de energia [12]. A utilização do método nodal num sistema desse tipo é fundamental por ser rápido, dado o número de execuções necessárias. As vantagens serão ainda maiores nos cálculos que envolvam duas ou três dimensões e em mais de um grupo de energia.

O método nodal absorção-produção consiste fundamentalmente em relacionar a corrente de neutrons através da interface entre 2 nodos com os fluxos médios nesses nodos, através de coeficientes de acoplamento nodais. Esses coeficientes são, geralmente, funções da geometria e das propriedades de produção e absorção de nêutrons dos materiais e são calculados com base na equação de difusão de nêutrons. Necessita-se pois de constantes celulares homogêneas (seções de choque e coeficientes de difusão) que foram gerados pelo programa HAMMER para a confecção da biblioteca-fase. Essas constantes são utilizadas pelo simulador via interpolação lagrangeana quadrática.

Neste sistema o nodo é acoplado apenas com os seus vizinhos imediatos. Dividiu-se o reator de tal forma que o tamanho do nodo seja o considerado ótimo segundo a referência 12. A figura 2 abaixo ilustra um caso com 10 nodos no núcleo mais 2 regiões refletoras.

O tamanho de nodo ótimo é de aproximadamente 11 cm e a faixa de variação escolhida para o núcleo do reator está entre 50 e 150 cm, de modo que N (número de divisões) esteja entre 5 e 14.

Assim tem-se : $a_0 = 150$ cm.

O limite inferior (50 cm) foi colocado dentro do próprio sistema e corresponde a uma limitação do simulador.

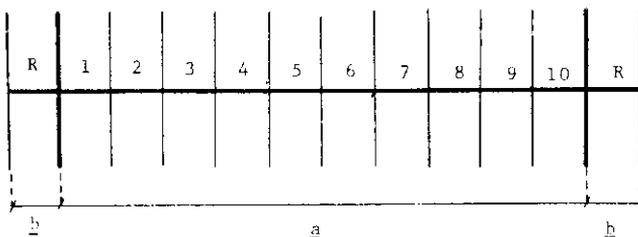


Figura 2 . Ilustração da Divisão em Nodos do Reator.

2.3) Biblioteca-Fase/Interpolação

A biblioteca de seções de choque é formada a partir do programa HAMMER onde as constantes geradas são funções dos parâmetros que definem o estado do sistema. O interpolador atua entre o simulador e a biblioteca-fase fornecendo as constantes adequadas do estado através da interpolação lagrangeana-quadrática.

2.4) Otimizador

Uma vez estabelecido o domínio e dispoñdo do simulador e da biblioteca-fase, resta determinar as coordenadas, ou seja, os parâmetros que forneça o valor do fator de multiplicação efetivo ótimo (K_{ef}^0).

Para que seja possível a visualização do procedimento a ser adotado, supõem-se, como exemplo, uma função somente de 2 variáveis (x e y) como mostra a figura 3 abaixo.

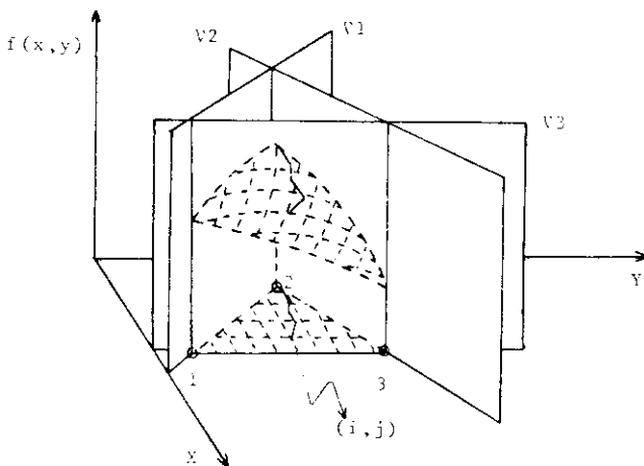


Figura 3 . Visualização de uma Função Vinculada de 2 Variáveis.

O método de Gauss-Jordan determina o domínio, ou seja, os vértices 1, 2 e 3 da figura. Através desses pontos, calcula-se o centro geométrico e, a partir deste, traça-se as malhas grossas (quadriculado na figura). Em cada nó da malha determina-se o K_{ef} , selecionando o maior que será também comparado com o maior K_{ef} dentre os vértices. Dessa maneira, restringe-se o domínio onde se encontra o ponto ótimo que será determinado através do método do gradiente (linha quebrada da figura).

2.4.1) Método do Gradiente

O algoritmo apresentado aqui baseou-se na descrição da referência 9.

O método do gradiente é definido pelo algoritmo iterativo:

$$x_{k+1} = x_k + \delta \nabla F(x_k), \quad (1)$$

onde δ é um escalar não-negativo que maximiza $F[x_k + \delta \nabla F(x_k)]$. Determina-se δ , neste sistema, através da interpolação quadrática entre 3 pontos. Caminha-se na direção do gradiente até obter-se um máximo nesta direção, a partir daí, nova direção é calculada e novo máximo determinado. A figura 4, a seguir, mostra o processo para uma função de 2 variáveis representada pelas suas curvas de nível.

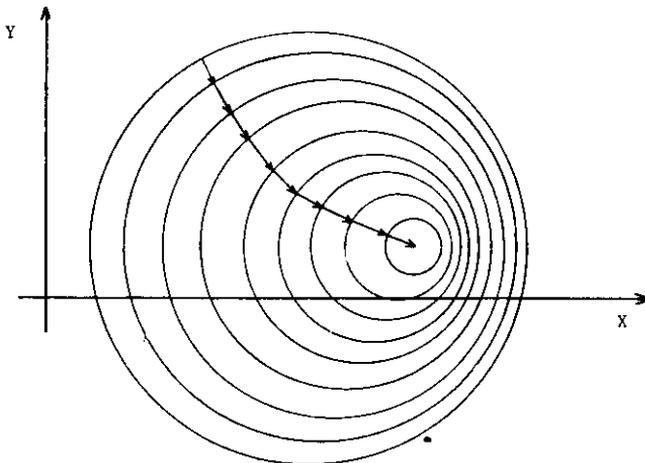


Figura 4. Representação Esquemática do Método do Gradiente.

Não considerou-se até aqui, no método do gradiente, os vínculos que são de dois tipos:

$$a) x_i \leq k_i \quad (2)$$

$$b) \quad \sum_i a_i x_i \leq k_i \quad (3)$$

Pode-se agrupar essas restrições na seguinte notação :

$$C_i(x) \geq 0 \quad , \quad i = 1, 2, \dots, c \quad (4)$$

Isso indica que há C diferentes restrições C_1, C_2, \dots, C_c . Algumas dessas restrições são funções de mais de um parâmetro.

A função objetiva, considerando-se agora os vínculos, se apresenta, agora, na seguinte forma:

$$F^*(x) = F(x) + cc \sum_{i=1}^c \frac{1}{[C_i(x)]^2} \quad (5)$$

onde $F(x)$ é a função objetiva original, a segunda parcela corresponde a chamada função penalidade (FP) e cc é um parâmetro de ajuste. A figura 5 ilustra o efeito da função penalidade sobre uma função qualquer de uma só variável.

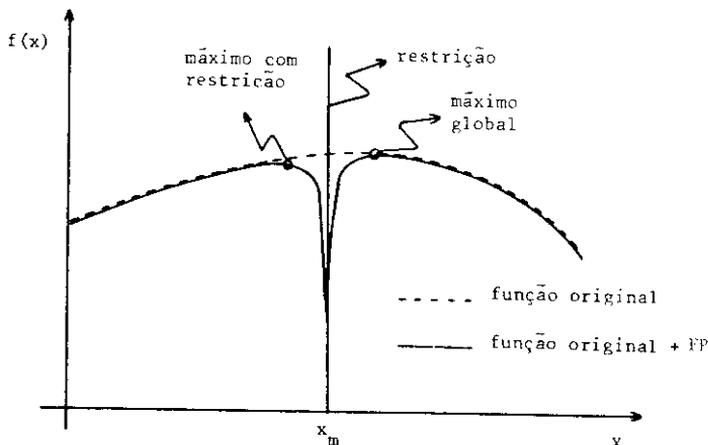


Figura 5. Modificação da Função Objetiva Original.

A figura 6, na página seguinte, resume esquematicamente todo o sistema.

3. Problema-Exemplo

Utilizando-se do sistema descrito no item anterior, resolveu-se um problema exemplo a fim de estabelecer-se os limites de sua aplicabilidade, precisão, vantagens,

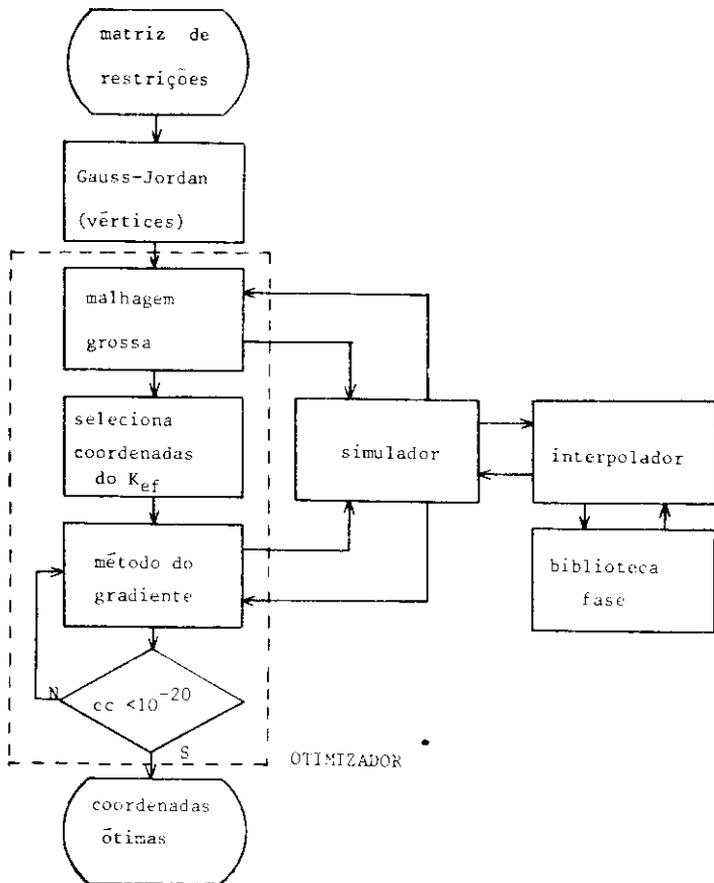


Figura 6 . Esquemática geral do sistema de otimização.

desvantagens e os problemas na sua utilização.

3.1) Descrição do Problema

Colocando-se o problema-exemplo da maneira formal tem-se :

- função objetiva :

$$\text{MAX. } [K_{ef}]$$

- restrições :

$$\begin{array}{ll} \text{(V1)} & a \leq 150 \text{ cm} \\ \text{(V2)} & b \leq 20 \text{ cm} \\ \text{(V3)} & a+b \leq 160 \text{ cm} \\ \text{(V4)} & \epsilon \leq 5\% \\ \text{(V5)} & 0,0043a - 0,117b - 0,160 \epsilon + H/U \leq 0,43 \end{array}$$

Esses valores foram definidos baseados nas características de um PWR.

Existe um outro vínculo implícito no sistema dado por :

$$\text{(V6)} \quad a \geq 50 \text{ cm.}$$

Como já foi dito, este último vínculo corresponde a uma limitação do simulador.

3.2) Análise dos Resultados

Através da listagem dos resultados da resolução do problema-exemplo, concluiu-se que o domínio possui 21 vértices, sendo que apenas 2 deles não se encontram nos eixos do sistema. Dentro desse domínio foram calculados por meio de malhas grossas, 8349 pontos que somados aos 2 vértices que fornecem coordenadas não nulas, somam 8351 pontos pesquisados. Deste total, o ponto de coordenadas:

$$\begin{array}{l} a = 141,7 \text{ cm} \\ b = 17,9 \text{ cm} \\ \epsilon = 5\% \\ H/U = 2,54 \end{array}$$

é o que apresentou o maior K_{ef} (1,20087) e está numa fronteira do domínio. Este é o ponto que dá início ao método do gradiente. Neste exemplo, o método do gradiente convergiu com 101 iterações e as coordenadas ótimas procuradas são :

$$\begin{array}{l} a = 140,9 \text{ cm} \\ b = 18,8 \text{ cm} \\ \epsilon = 5\% \\ H/U = 2,7 \end{array}$$

corresponde a um fator de multiplicação de 1,20119.

3.3) Tempo de Processamento

O computador utilizado para os cálculos foi o CDC - CYBER 180/830 disponível a Divisão de Física de Reatores do IPEN/CNEN-SP. Nesta máquina, a definição dos vértices e a malhagem, para esse problema exemplo, dispenderam 33 minutos de processamento e o método do gradiente mais 12.2 minutos, dando um total de 45,2 minutos de processamento.

Durante esse processo foram gerados 10034 pontos da função objetivo.

4. Conclusões

Observou-se, através das impressões intermediárias durante o método do gradiente, que a coordenada correspondente a largura do reator (a) não caminhava corretamente. Isso é devido ao fato que a se situa desde o início do método do gradiente, numa zona de saturação, onde um pequeno incremento desta coordenada não é suficiente a ponto de produzir variação no fator de multiplicação efetivo. Na verdade é exatamente isso que se esperava que acontecesse. Porém, por efeito da variação das outras coordenadas no processo do gradiente, particularmente H/U , a coordenada a é levada para pontos, ainda que pertencente ao trecho de saturação, que a fazem diminuir constantemente mas, que no cômputo geral levam a valores de K_{eff} cada vez maiores. Esse problema foi contornado, incrementando-se a coordenada a até o limite máximo das restrições logo após o método do gradiente.

Uma outra observação importante que, de certa forma está relacionada ao fato anteriormente descrito, diz respeito ao ponto ótimo não estar num dos vértices do domínio como poderia-se imaginar intuitivamente, todavia este ponto está numa das fronteiras ($\epsilon=5\%$).

Por fim, como sugestão para tornar o sistema mais realístico, propõe-se um simulador rápido que trabalhe com 2 ou 3 dimensões e mais de um grupo energético. Dispondo deste simulador, e de um conjunto de vínculos lineares envolvendo os parâmetros principais do reator, ter-se-á um pré-projeto bem próximo ao projeto final do reator, facilitando toda a série de cálculos posteriores e como consequência uma ferramenta realmente útil no auxílio de projetos de núcleos de reatores nucleares.

Referências

- [1] Terney, W.B. Optimization Techniques in Nuclear Engineering. Massachusetts Institute of Technology, 1967.
- [2] Goldschmidt, P & Quenon, J. Minimum Critical Mass in Fast Reactors With Bounded Power Density. Nuclear Science and Engineering : 39,311-319, 1970.
- [3] Wall, I & Frenech, H. The Application of Dynamic Programming to Fuel Management Optimization. Nuclear Science and Engineering : 22,285-297, 1965.
- [4] Kallay, N. Dynamic Programming and Nuclear Reactor System Design. Nuclear Science and Engineering : 8,315-325, 1960.

- [5] Tzanos, C. P., Gyftopoulos, E.P. & Driscoll, M.D. Optimisation of Material Distributions in Fast Reactor Cores. Nuclear Science and Engineering: 52, 84-94, 1973.
- [6] Jachic, J. Otimização das Zonas de Enriquecimento que Maximizem o Ganho de Regeneração em um Reator Rápido. Anais do IV Encontro Nacional de Física de Reatores. Itaipava, R.J., 1983.
- [7] Jachic, J. Um Método de Otimização de Parâmetros na Física de Reatores Nucleares. Anais do III Encontro Nacional de Física de Reatores. Itaipava, R.J., 1982.
- [8] Bregalda, P.F.; Oliveira, A.A.F. & Bornstein, C.T. Introdução à Programação Linear, Rio de Janeiro, Editora Campus, LTDA, 1983.
- [9] Daniels, R.W. An Introduction to Numerical Methods and Optimization Techniques, New York, Elsevier North-Holland, Inc., 1978.
- [10] Suich, J.E. & Honeck, H.C. The HAMMER System Heterogeneous Analysis of Multigroup Methods of Exponential and Reactor. Aiken, S.C., DuPont de Nemours, Savannah River Laboratory, 1967 (DP-1064).
- [11] Fowler, T.B.; Vondy, D.R.; Cunningham, G.W. Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Laboratory, Jul. (ORNL-TM-2496, Rev. 2), 1971.
- [12] Ferreira, C.R. Utilização do Método Nodal Absorção-Produção em Cálculos de Distribuição de Fluxo de Nêutrons e de Potência em uma Dimensão e um Grupo de Energia. São Paulo, IPEN/CNEN-SP (dissertação de mestrado), 1984.