

## SOLUÇÃO DO MODELO DA CINÉTICA PONTUAL DE NÊUTRONS: UMA ANÁLISE DOS EFEITOS DOS PRINCIPAIS VENENOS ABSORVEDORES DE NÊUTRONS NO ACIDENTE DE CHERNOBYL

NATÁLIA BARROS SCHAUN<sup>1</sup>; FERNANDA TUMELERO  
<sup>2</sup>; CLAUDIO ZEN PETERSEN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Universidade Federal de Pelotas – natalia.schaun@ufpel.edu.br*

<sup>2</sup>*Universidade Federal de Pelotas – fernanda.tumelero@ufpel.edu.br*

<sup>3</sup>*Universidade Federal de Pelotas – claudio.petersen@ufpel.edu.br*

### 1. INTRODUÇÃO

A energia nuclear tem um papel importante no que se refere a geração de energia limpa. Além de não liberar gases de efeito estufa, ela ainda detém uma série de vantagens como: disponibilidade do combustível; exige-se pouco espaço para sua construção; é uma das fontes com maior eficácia para geração de energia; independe de fatores climáticos, além de outros.

Contudo, sua manipulação inadequada pode acabar gerando graves acidentes irreversíveis, entre os quais se destaca o acidente ocorrido com a explosão do reator 4 em Chernobyl (Ucrânia) na antiga União Soviética em 1986. Após o núcleo do reator ser envenenado por elementos altamente absorvedores de nêutrons, inúmeros procedimentos irregulares foram tomados, a fim de retomar a potência do reator, com o intuito de se realizar um teste de segurança, fazendo com que ocasionasse em uma explosão térmica.

As equações da Cinética Pontual de Nêutrons (ECPN) são modelos relativamente simples, mas que descrevem de forma precisa o comportamento temporal da população de nêutrons através da inserção de diferentes funções para a reatividade, prevendo a distribuição e o crescimento neutrônico no reator, importantes para o controle operacional e segurança de uma usina.

Muitos trabalhos têm sido publicados sobre as equações da Cinética do Pontual de Nêutrons. Em TUMELERO (2015) resolve as ECPN pelo método da Aproximação Polinomial (PAM) com *feedback* de temperatura; GANAPOL (2013) realiza um procedimento numérico que usa o método de Euler Implícito e o esquema de Diferenças Finitas (BEFD); Em PICCA, FURFARO, GANAPOL (2013) desenvolvem a abordagem de Aproximação Constante por Partes Melhorado (EPCA) de KINARD E ALLEN (2004).

As equações da Cinética Pontual de Nêutrons possuem uma característica fundamental devido a diferença nos tempos de vida dos nêutrons prontos e atrasados, denominado rigidez. Com isso, buscou-se na literatura métodos numéricos que a contornasse. O método Rosenbrock (ROS), tem-se mostrado na literatura satisfatório na solução de problemas rígidos. No trabalho de YANG; JEVREMOVIC (2009), utiliza-se o método de Rosembrock para resolver as próprias equações da Cinética Pontual de Nêutrons com diferentes tipos de inserções de reatividade, na qual se comparam os resultados com dados de referência na literatura, considerados *benchmark* em física de reatores.

Portanto, o objetivo deste trabalho é resolver as equações da Cinética Pontual de Nêutrons com efeitos dos principais venenos absorvedores de nêutrons pelo método de Rosenbrock, com o intuito de captar e simular as características do envenenamento do núcleo no reator de Chernobyl no comportamento final da densidade de nêutrons.

## 2. METODOLOGIA

Então, partindo das equações da Cinética Pontual de Nêutrons, incluindo o efeito dos principais venenos, Xenônio-135 e Samário-149 temos:

$$\begin{aligned}
 \frac{dn(t)}{dt} &= \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \lambda C(t) - \sigma_{a,xe} C_{xe}(t)vn(t) - \sigma_{a,sm} C_{sm}(t)vn(t), \\
 \frac{dC(t)}{dt} &= \frac{\beta}{\Lambda} n(t) - \lambda C(t), \\
 \frac{dC_I}{dt} &= \gamma_I \sum_f vn(t) - \lambda_I C_I(t), \\
 \frac{dC_{xe}(t)}{dt} &= \gamma_{xe} \sum_f vn(t) + \lambda_I C_I(t) - \lambda_{xe} C_{xe}(t) - \sigma_{a,xe} C_{xe}(t)vn(t), \\
 \frac{dC_{pm}(t)}{dt} &= \gamma_{pm} \sum_f vn(t) - \lambda_{pm} C_{pm}(t), \\
 \frac{dC_{sm}(t)}{dt} &= \lambda_{pm} C_{pm}(t) - \sigma_{a,sm} C_{sm}(t)vn(t).
 \end{aligned} \tag{1}$$

onde  $n(t)$  é a densidade,  $\rho(t)$  é a reatividade,  $\beta$  é a fração total de nêutrons atrasados,  $\Lambda$  é o tempo médio de geração,  $\lambda$  é a constante de decaimento de um grupo de precursor de nêutrons atrasados,  $C(t)$  é a concentração de precursor de neutrons atrasados,  $\sigma_{a,xe}$  e  $\sigma_{a,sm}$  são as respectivas seções de choque microscópicas de absorção do Xenônio-135 e Samário-149,  $C_{xe}(t)$ ,  $C_{sm}(t)$ ,  $C_{pm}(t)$  e  $C_I(t)$  são as respectivas concentrações dos elementos Xenônio-135, Samário-149, Promésio-149 e Iodo-135,  $\gamma_I$ ,  $\gamma_{pm}$  e  $\gamma_{xe}$  são os respectivos termos de produção dos elementos Iodo-135, Promésio-149 e Xenônio-135,  $\lambda_I$ ,  $\lambda_{xe}$  e  $\lambda_{pm}$  são as constantes de decaimentos dos respectivos elementos Iodo-135, Xenonio-135 e Promésio-149,  $\sum_f$  é a seção de choque macroscópica de fissão e, por fim,  $v$  é a velocidade.

Com as seguintes condições iniciais:

$$\begin{aligned}
 n_0 &= 1, \\
 C(0) &= \frac{\beta}{\lambda \Lambda} n_0, \\
 C_I(0) &= \frac{\gamma_I \sum_f v}{\lambda_I}, \\
 C_{xe}(0) &= \frac{\gamma_{xe} \sum_f v + \lambda_I C_I(0)}{\lambda_{xe} + \sigma_{xe} v}, \\
 C_{pm}(0) &= \frac{\gamma_{pm} \sum_f v}{\lambda_{pm}}, \\
 C_{sm}(0) &= \frac{\lambda_{pm} C_{pm}(0)}{\sigma_{sm} v}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Para resolução do modelo acima utiliza-se o método numérico de Rosenbrock. Os métodos de Rosenbrock pertencem a uma das classes dos método de Runge-Kutta. Consiste em linearizar a implicitude dos Runge-kutta, uma vez que, ao invés de resolver sistemas não-lineares, resolve-se uma sequencia de sistemas lineares.

A estrutura do método de Rosenbrock utilizada encontra-se em YANG; JEVREMOVIC (2009), definida como:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= Bf(y_0, t_0) + Bhc_1 \frac{\partial f}{\partial t}, \\
 k_2 &= Bf(y_0 + a_{21}k_1, t_0 + h) + B \left[ hc_2 \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{c_{21}k_1}{h} \right], \\
 k_3 &= Bf(y_0 + a_{31}k_1 + a_{32}k_2, t_0 + h) + B \left[ hc_3 \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{c_{31}k_1 + c_{32}k_2}{h} \right], \\
 k_4 &= Bf(y_0 + a_{31}k_1 + a_{32}k_2, t_0 + h) + B \left[ hc_4 \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{c_{41}k_1 + c_{42}k_2 + c_{43}k_3}{h} \right], \\
 y(t_0 + h) &= y(t_0) + b_1k_1 + b_2k_2 + b_3k_3 + b_4k_4.
 \end{aligned} \tag{3}$$

onde os  $k$ 's representam os estágios do método,  $B = \left[ \frac{1}{\gamma h} I - \frac{\partial f}{\partial y} \right]^{-1}$ ,  $I$  é a matriz identidade,  $\gamma$  é uma das raízes do polinomio de Laguerre,  $h$  é o tamanho do passo de integração,  $\frac{\partial f}{\partial t}$  e  $\frac{\partial f}{\partial y}$  são as matrizes Jacobianas. Os valores dos outros parâmetros do método podem ser encontrados em YANG; JEVREMOVIC (2009).

#### Sequência de eventos do acidente em Chernobyl

Dia, 25 de Abril de 1986, entre 13h e 14h, a potência foi reduzida de 3200MW para 1600MW, porém foi adiada devido a demanda de energia. Nas 23h prosseguiu-se a redução da potência que de acordo com o programa de ensaio deveria estar entre 700MW-1000MW. Chegando a 00:00h, ocorre a troca de funcionários. Passada as 00:05h, a potência atinge 720MW que continua a cair. 00:28h a potência do reator chega a somente 30MW, (pico da concentração do Xenônio-135). A partir, foram violadas várias normas de segurança a fim de retomar a potência do reator, como a retirada de 205 barras de controle das 211 que tinham. 01:00h começou o teste com a potência em 200MW. Após, desencadeou-se uma série de problemas termo hidráulicos como presença intensa de vapor, pressão, problemas nas bombas de resfriamento do reator, além de outros que levou no aumento brusco na potência e temperatura. Logo, o Botão AZ-5 foi acionado inserindo todas as barras de controle que possuíam grafite nas pontas que ao penetrarem no núcleo, serviram como uma bomba, ocasionando uma explosão térmica as 01:23:48h.

### 3. RESULTADOS PRELIMINARES E DISCUSSÃO

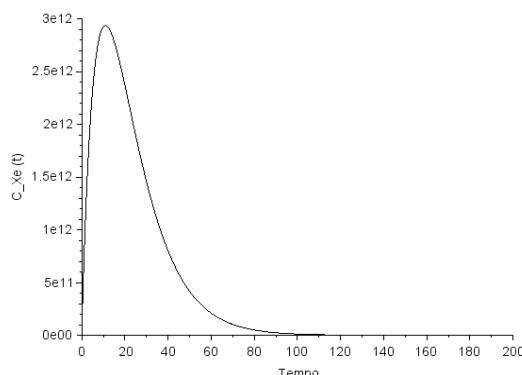


Figura 1. Concentração do elemento Xenônio-135

Como ilustração, na Fig. 1 apresenta-se o gráfico da concentração do Xenônio-135 gerado até 200 horas. Nota-se pelo gráfico, que o Xenônio-135 atinge um pico máximo em sua concentração entre 9 e 10 horas após o desligamento ou operação com baixa potência por um longo período de tempo. No reator 4 de Chernobyl, esse envenenamento no nucleo, fez com que o reator não respondesse as primeiras tentativas de aumento em sua potência, justamente pela reatividade negativa advinda dos venenos. Cabe ressaltar também que o pico de Xenônio-135 se deu aproximadamente na mesma hora da tentativa de retomada da potência o que fez com que os operadores violassem várias regras de segurança, a fim de elevar a potência para os 700MW, potência mínima exigida para a realização do teste. Esse foi o primeiro evento que desencadeou todas a demais etapas até a explosão térmica do reator.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados preliminares obtidos pelo método de Rosenbrock foram os esperados. Este trabalho mostra-se a importância em se conhecer os efeitos dos venenos no comportamento final da densidade de nêutrons, importantes para a retomada segura da potência e segurança de uma usina nuclear. Como trabalhos futuros, pretende-se inserir, além dos efeitos dos principais venenos absorvedores de nêutrons, os efeitos também de temperatura ao modelo, tornando o modelo ainda mais realista.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**TUMELERO, F. Solução das Equações da Cinética Pontual de Neutrons com e sem retroalimentação de temperatura pelo Método da Aproximação Polinomial.** 2015. Dissertação (Mestrado em Modelagem matemática) - Curso de Pós-graduação em Modelagem matemática, Universidade Federal de Pelotas.

**GANAPOL, B. D.** A highly accurate technique for the solution of the point kinetics equations. **Annals of Nuclear Energy.** v.62, 2013.

**PICCA, P. FURFARO, R. GANAPOL, B. D.** A highly accurate algorithm for the solution of the non-linear point kinetics equations. **Annals of Nuclear Energy.** v.58, p.43-53, 2013.

**YANG, X. JEVREMOVIC, T.** Revisiting the Rosenbrock numerical solutions of the reactor point kinetics equation with numerous examples. **Nuclear Technology and Radiation Protection.** v.24, n.4, 2009.

**KINARD, M. ALLEN, K. E. J.** Efficient numerical solution of the point kinetics equations in nuclear reactors dynamics. **Annals of Nuclear Energy.** v.31, p.1039-1051, 2004.