

## Aplicação da Lógica Fuzzy para previsão de parâmetros em um reator nuclear

### Application of Fuzzy Logic for parameters prediction in a Nuclear Reactor

Carla Cristina Araújo Parreira<sup>1\*</sup>, Juan Canellas Bosch Neto<sup>1</sup>, Bruna Paloma Ribeiro<sup>1</sup>, João Victor Sales Castro<sup>1</sup>, Welberth Santos Laizo<sup>1</sup>, Fernanda Carlos Monteiro<sup>1</sup> e Juliana Abreu de Freitas<sup>1</sup>

---

#### RESUMO

A viabilidade dos reatores nucleares depende de um sistema de segurança eficiente na operação das unidades de processamento nucleares. Grande parte da segurança dos reatores de fissão nuclear está relacionada com a densidade de nêutrons que necessita de um balanço bem equilibrado entre os nêutrons emitidos e os nêutrons perdidos (via absorção ou fuga de nêutrons), a fim de evitar grandes danos como superaquecimento e possíveis explosões. Neste trabalho foi utilizado o *software In\_Fuzzy* que utiliza a lógica difusa para realizar simulações de parâmetros de um Reator Nuclear. Por meio da Lógica Fuzzy foi possível realizar uma estimativa numérica em relação aos percentuais de nêutrons no reator. Com essa análise, obteve-se um valor de aproximadamente 60% de nêutrons que devem ser emitidos pela fonte primária no Reator e 41% de nêutrons que devem ser absorvidos pelos moderadores para manter a segurança desse Reator.

**Palavras-chave:** Lógica Fuzzy; Reator Nuclear; Nêutrons.

---

#### ABSTRACT

The viability of nuclear reactors depends on an efficient safety system in the operation of nuclear processing units. Much of the safety of nuclear fission reactors is related to the neutron density, which requires a well-balanced balance between emitted neutrons and lost neutrons (via neutron absorption or escape) in order to avoid major damage such as overheating and possible explosions. In this work, the *In\_Fuzzy* software was used, which uses fuzzy logic to perform parameter simulations of a Nuclear Reactor. Through Fuzzy Logic it was possible to perform a numerical estimate in relation to the percentage of neutrons in the reactor. With this analysis, we obtained a value of approximately 60% of neutrons that must be emitted by the primary source in the Reactor and 41% of neutrons that must be absorbed by the moderators to maintain the safety of this Reactor.

**Keywords:** Fuzzy Logic; Nuclear reactor; neutrons.

---

---

<sup>1</sup> Universidade Federal de São João Del

\* E-mail: carla-araujo07@hotmail.com

## INTRODUÇÃO

A lógica *fuzzy* foi introduzida nos meios científicos em 1965 por Lofti Asker Zadeh quando introduziu conjuntos com graus de pertinência 0, ½ e 1, diferentemente de 0 ou 1 da lógica booleana e que mais tarde expandiu para um número infinito de valores. Hoje ela é elemento fundamental em diversos sistemas, sendo considerada uma técnica de excelência no universo computacional. Possui também enorme aceitação na área de controle de processos. O conceito *fuzzy* pode ser entendido como uma situação em que não é possível responder simplesmente "sim" ou "não". Mesmo conhecendo as informações necessárias sobre a situação, dizer algo entre "sim" e "não", como "talvez" ou "quase", torna-se mais apropriado, como por exemplo, no caso dos Reatores Nucleares (LUCAS, 2011).

Segundo Fonseca (2009), a reação nuclear pode ser caracterizada pela sua criticidade, podendo ser uma reação crítica, subcrítica ou supercrítica de acordo com a sua produção de nêutrons. Para que um reator nuclear opere em um nível de potência constante, a taxa de produção de nêutrons via fissão de nêutrons deverá ser balanceada pela perda via absorção ou fuga de nêutrons.

- Reação Crítica: Acontece quando se atinge o equilíbrio de nêutrons.
- Reação Supercrítica: Ocorre quando a produção de nêutrons é superior a absorção e fugas, ocasionando o aumento da potência do reator. Neste caso, os dispositivos intrínsecos de controle deverão entrar em atuação no instante apropriado.
- Reação Subcrítica: Sucede quando a produção de nêutrons é inferior a sua absorção juntamente com as fugas. Neste caso a reação nuclear não permanece sustentável ao longo do tempo.

A Equação 1 permite a definição do coeficiente de criticalidade.

$$K = \frac{P}{(A+L)} \quad (1)$$

K é o coeficiente de criticalidade;

$0 \leq K < 1$  reação subcrítica (não há reação em cadeia autossustentada)

$K = 1$  reação crítica (reação em cadeia no estado estacionário)

$K \geq 1$  reação supercrítica (reação em cadeia crescente)

P = n.º de nêutrons

A = n.º de nêutrons absorvidos

L = n.º de fuga de nêutrons

O K também pode ser calculado conforme a Equação 2:

$$K = \frac{\text{Nêutrons produzidos por fissão em uma geração}}{\text{Nêutrons absorvidos na geração anterior}} \quad (2)$$

Analisar a criticalidade de um reator é algo complexo, inclusive na maioria dos casos, para fins de cálculos considera-se o reator como apenas crítico, sendo que para que ele opere de forma constante, sem perder a potência, é necessário que ele seja levemente supercrítico, acusando um k em torno 1,01 (PARREIRA, C. et al., 2021).

O cálculo desse coeficiente de criticalidade, conforme explicitado nas equações 1 e 2 se dá em relação à emissão e absorção dos nêutrons dentro do reator nuclear. Essa relação não é amplamente divulgada na literatura e essa informação é interessante de ser calculada visto que se trata de uma reação em cadeia que deve ser muito bem controlada a fim de evitar prejuízos e acidentes, ao mesmo tempo em que objetiva-se ter uma boa eficiência no processo (PARREIRA, C.; BOSCH NETO, J.; CORRÊA, B., 2021).

O controle ativo da reação em cadeia ocorre pela inserção ou retirada de barras de controle no núcleo do reator ou através da variação da concentração de Boro (B) no Sistema de Refrigeração do Reator (SRR). As barras de controle são constituídas por uma liga de Prata (Ag), Índio (In) e Cádmiio (Cd), que confere excelente característica de absorção de nêutrons (GALVÃO, 2017).

Esse controle da reação é essencial para evitar prejuízos e acidentes nas Usinas Nucleares.

## METODOLOGIA

Para análise da relação entre o percentual de nêutrons emitidos e o percentual de nêutrons absorvidos, em um Reator de Fissão, foi utilizado o *software in\_Fuzzy* para simular esses quantitativos, de forma a obter esses percentuais de modo que o sistema se mantenha crítico, evitando uma superpotência com risco de explosões, assim como uma subpotência evitando que o processo seja interrompido.

Nessa simulação foram utilizadas duas funções de pertinência de entrada:

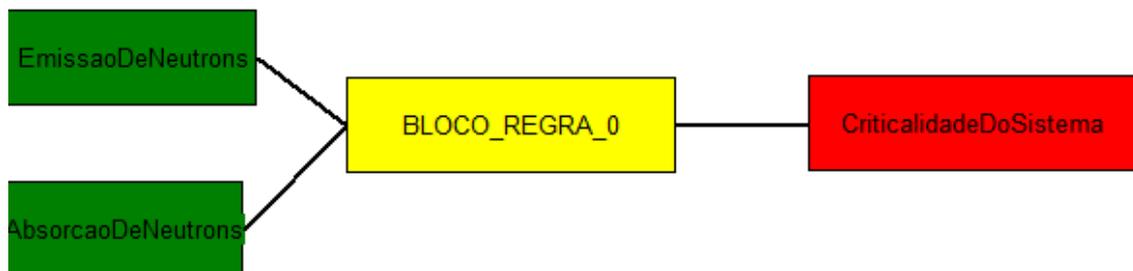
- Emissão de nêutrons no sistema
- Absorção de Nêutrons pelo sistema

E uma função de pertinência de saída:

- Criticalidade do sistema

Na Figura 1 está apresentado o esquema elaborado no *software* para esse sistema.

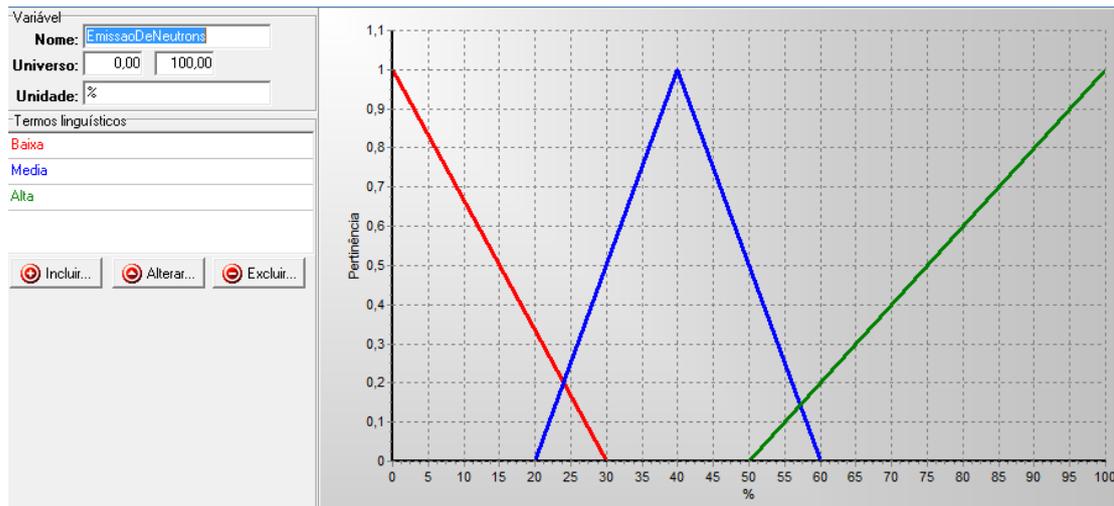
**Figura 1.** Esquema para análise da criticalidade do Reator Nuclear em relação à absorção e emissão de nêutrons, via Software In\_Fuzzy.



Fonte: Autora, 2021

A Função de pertinência de Emissão de Nêutrons foi dividida em Baixa, Média e Alta, onde uma baixa emissão de nêutrons considera uma emissão de até 30% dos nêutrons no sistema, uma média emissão considera de 20 a 60% e uma alta emissão de nêutrons é considerada acima de 50%, conforme a Figura 2.

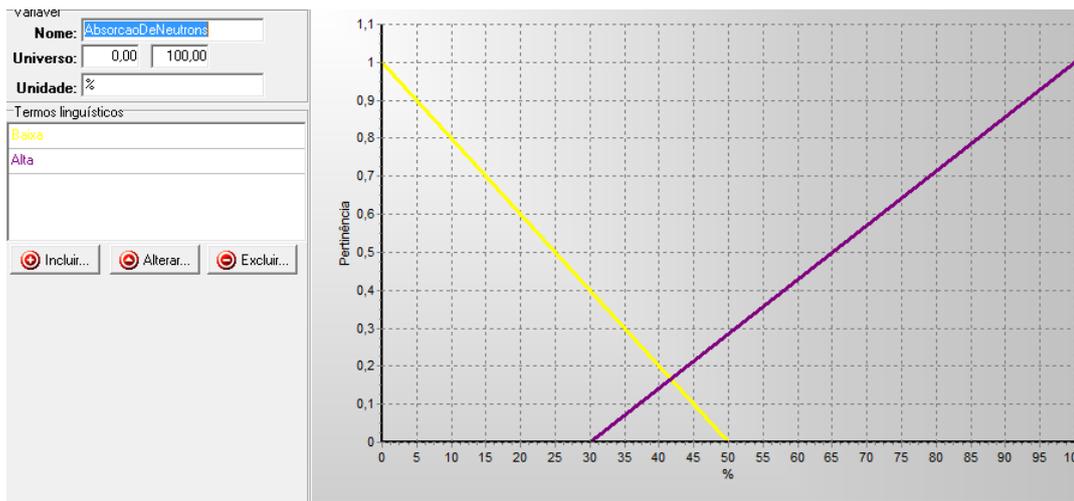
**Figura 2.** Função de Pertinência: Emissão de Nêutrons no Reator Nuclear



Fonte: Autora, 2021

A Função de pertinência de Absorção de Nêutrons foi classificada em Baixa e Alta. Onde uma baixa absorção é considerada até 50% e uma alta absorção já é considerada a partir de 30%, conforme a Figura 3.

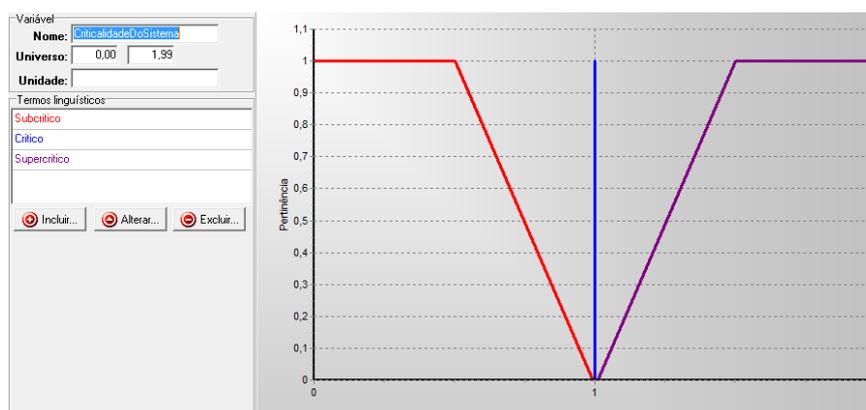
**Figura 3.** Função de Pertinência: Absorção de Nêutrons no Reator Nuclear



Fonte: Autora, 2021

Para o resultado do esquema, foi simulada uma única Função de pertinência de saída que foi a Criticalidade do sistema que foi classificada em Subcrítico, Crítico e Supercrítico. Sabendo que um Reator é considerado “subcrítico” quando se tem o coeficiente de criticalidade ( $k$ ) menor que 1, então utilizou-se os valores até 0,99. Para a classificação “crítico” utilizou-se uma função discreta selecionando apenas o valor 1. E para a classificação “supercrítica” utilizou-se os valores maiores que 1, conforme Figura 4.

**Figura 4.** Função de Pertinência: Criticalidade do Reator Nuclear



Fonte: Autora, 2021

Para esse Sistema, era necessário o mínimo de 2 regras e máximo de 6 regras para obter bons resultados. A construção dessas regras está relacionada com a interpretação do esquema montado e algumas estão apresentadas nos seguintes exemplos:

Se o fluxo de nêutrons é baixo ou a absorção de nêutrons é alta então o sistema é **subcrítico**.

Se o fluxo de nêutrons é alto ou a absorção de nêutrons é baixa então o sistema é **supercrítico**.

Se o fluxo de nêutrons é médio e absorção de nêutrons é baixa então o sistema é **crítico**.

Essas mesmas regras são inseridas no bloco de regras do software *in\_Fuzzy* conforme Figura 5.

**Figura 5.** Bloco de Regras para o Sistema de Reator Nuclear

Nro	Se	Antecedentes	Então	Consequentes
1	Se	(EmissaoDeNeutrons = Baixa) OR (AbsorcaoDeNeutrons = Alta)	Então	(CriticalidadeDoSistema = Subcritico)
2	Se	(EmissaoDeNeutrons = Alta) OR (AbsorcaoDeNeutrons = Baixa)	Então	(CriticalidadeDoSistema = Supercritico)
3	Se	(EmissaoDeNeutrons = Media) OR (AbsorcaoDeNeutrons = Baixa)	Então	(CriticalidadeDoSistema = Critico)

Fonte: Autora, 2021

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como forma de análise numérica dos quantitativos de nêutrons no Reator Nuclear, foram realizadas várias simulações, no *software In\_Fuzzy*, das proporções de nêutrons emitidos e nêutrons absorvidos, conforme Figura 5. Como resultado das simulações obteve-se a relação de 60% de nêutrons emitidos e 41% de nêutrons absorvidos para que se tenha um sistema levemente supercrítico ( $k=1,01$ ) e uma reação em cadeia controlada, porém positiva, de forma a haver uma produção sustentável na Usina Nuclear.

**Figura 6.** Simulações no Software *In\_Fuzzy*

15	80,00	2,00	1,58
31	80,00	40,00	1,30
16	60,00	40,00	1,04
15	60,00	45,00	0,93
15	60,00	42,00	0,99
16	60,00	41,00	1,01
16	60,00	41,50	1,00

Fonte: Autora, 2021

## CONCLUSÃO

Diante da alta periculosidade das atividades nucleares, é sempre importante avaliar incógnitas relacionadas a esse sistema. É amplamente discutida a necessidade de se obter reações controladas dentro de um Reator Nuclear e para isso a literatura informa sobre a criticalidade do sistema que deve ter um coeficiente um pouco acima de 1 ( $k=1,01$ ) que caracteriza um sistema levemente supercrítico. Por meio da utilização da lógica *Fuzzy*, aplicando o software *in\_Fuzzy*, foi possível descobrir a relação percentual entre os nêutrons emitidos e os nêutrons absorvidos de forma a manter o sistema com essa característica ideal para o funcionamento.

Como esses percentuais não são abordado na literatura, considera-se como uma estimativa, de forma que da total capacidade para emissão de nêutrons pela fonte primária, deve-se ser emitido apenas em torno de 60% dos nêutrons e no decorrer do processo, ao atingir a reação em cadeia que ocorre com a fissão, os mecanismos de absorção de nêutrons devem absorver em torno de 41% dos nêutrons para que a reação continue a ocorrer de forma sustentável, sem haver um crescimento exponencial da densidade de neutrons. Dessa maneira o Reator Nuclear funciona sem queda na produtividade e sem ocorrência de uma superpopulação de nêutrons acarretando riscos à operação.

## **REFERÊNCIAS**

FONSECA.M. **Reflexos da Manobrabilidade de Usinas Nucleares na operação de Sistema Elétrico**. Dissertação de Mestrado-Ciências em Engenharia Elétrica-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

GALVÃO, H. P., **Modelagem Dinâmica do Circuito Primário e Secundário de Reatores PWR aplicando critérios de estabilidade**, 2017, 84p., Trabalho de Graduação-Curso de Engenharia Nuclear, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

LUCAS, C. A. **Uma Introdução á Lógica Fuzzy**. Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e de Gestão Tecnológica, v. 1, n. 1, p. 17–28, 2011.

PARREIRA, C.; BOSCH NETO, J.; CORRÊA, B. **Modelagem e simulação dinâmica de um reator nuclear por fissão: uma revisão**. The Journal Engineering and Exact Sciences, v. 7, 3, May. 2021.

PARREIRA, C. et al. **Modelagem matemática e simulação para previsão do fluxo de nêutrons em reatores nucleares**. Conjecturas, v. 21, n. 4. 2021.

*Recebido em: 03/02/2022*

*Aprovado em: 05/03/2022*

*Publicado em: 10/03/2022*