



# **SENSITIVITY ANALYSIS OF NEUTRON MULTIPLICATION FACTOR DUE TO THE PERTURBATION IN A PWR FILLED BY DIFERENTS CONCENTRATIONS OF ThO<sub>2</sub>**

*Clóves J. da Fonseca<sup>1</sup>, Claudio L. de Oliveira<sup>1</sup>, Rex N. Alves<sup>1</sup>, Marcos Paulo C. de Medeiros<sup>1</sup>, and Isadora C. Gonçalves<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia  
Praça General Tibúrcio 80, Urca - Rio de Janeiro, Brasil

2019



# ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO FATOR DE MULTIPLICAÇÃO DE NÊUTRONS DEVIDO À UMA PERTURBAÇÃO SIMULADA EM UM PWR ABASTECIDO POR DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE ThO<sub>2</sub>

*Clóves J. da Fonseca<sup>1</sup>, Claudio L. de Oliveira<sup>1</sup>, Rex N. Alves<sup>1</sup>, Marcos Paulo C. de Medeiros<sup>1</sup>, and Isadora C. Gonçalves<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia  
Praça General Tibúrcio 80, Urca - Rio de Janeiro, Brasil



## Sumário

- i. Introdução**
- ii. Objetivo**
- iii. Metodologia**
- iv. Resultados e análises**
- v. Conclusões**
- vi. Principais Referências**





# I. Introdução

- Descoberta e domínio da fissão nuclear;
- Crescimento do número de reatores que utilizam urânio como combustível nuclear;
- Expectativa de crescimento da demanda por urânio devido aos novos reatores e pela demanda por energia limpa;
- Perspectiva de horizonte para as reservas de urânio levam à exploração de novos combustíveis nucleares.





# I. Introdução

- A solução mais direta é o tório:
  - ✓ Possui exploração facilitada;
  - ✓ Chega a dezenas de ppm mais abundante que o urânio na crosta terrestre;
  - ✓ Apresenta em seu ciclo fatores complicadores à ploriferação;
  - ✓ No Brasil, as reservas naturais de tório estão entre as maiores do mundo.





## I. Introdução

- Ilson Gradim (2015), verificou que o  $k_{inf}$  de reatores PWR é sensível à perturbação na temperatura do refrigerante.
- Isadora Gonçalves (2017), provou que a adição de ThO<sub>2</sub> no combustível de um reator PWR leva à redução da produção dos venenos queimáveis,  $^{135}\text{Xe}$  and  $^{149}\text{Sm}$ .
- Caio Wichrowski (2017), verificou que a adição de ThO<sub>2</sub> na mistura combustível de um reator PWR leva a um ciclo de queima mais longo, sendo limitada pelo  $k_{inf}$  e pelo enriquecimento.





# SENSITIVITY ANALYSIS OF NEUTRON MULTIPLICATION FACTOR DUE TO THE PERTURBATION IN A PWR FILLED BY DIFFERENT CONCENTRATIONS OF ThO<sub>2</sub>

## II. Objetivo

Analisar a sensibilidade do  $k_{inf}$  à perturbação na temperatura do refrigerante/moderador no núcleo de um reator nuclear PWR abastecido com UO<sub>2</sub> + ThO<sub>2</sub>, utilizando o sistema de códigos nucleares SCALE 6.1.





### III. Metodologia

#### *i. Aproximação Teórica Simplificada a Teoria da Perturbação Liner*

- Há casos em que os efeitos de uma perturbação no reator são inviáveis para serem calculados por meio de um novo cálculo multigrupo, por exemplo perturbação localizada cujos efeitos são pequenos o suficiente para serem perdidos por arredondamento;
- Estes casos podem ser tratados pela teoria da perturbação, desde que o evento no reator, seja ele localizado ou uniforme, não distorça substancialmente o fluxo em sua vizinhança. Essa teoria é baseada em operadores adjuntos e auto-adjuntos.







### III. Metodologia

#### ii. Setup para a determinação dos coeficientes de sensibilidade

- Foi utilizado o sistema de códigos nucleares SCALE 6.1;
  - ✓ Análises de sensibilidade pelo modulo de controle TSUNAMI – **T**ools for **S**ensitivity and **U**ncertainty **M**ethodology **I**mplementation;
  - ✓ Escolhida a temperatura do refrigerante como fator extrínscico a ser variado nas simulações;





### III. Metodologia

#### ii. Setup para a determinação dos coeficientes de sensibilidade

- Os percentuais relativos em peso de cada um dos isótopos da mistura combustível foram calculados por balanço de massa.

$$M_{tot} = x \cdot M_{ThO_2} + (1 - x) \cdot M_{UO_2}$$

- A densidade da mistura combustível foi calculada por uma média ponderada pelo percentual de ThO<sub>2</sub> na mistura;

$$\rho \left[ \frac{g}{cm^3} \right] = x \cdot \rho_{ThO_2} + (1 - x) \cdot \rho_{UO_2}$$

- A faixa de temperatura simulada foi de 280 K a 345 K, variando de 5 em 5 K e o percentual de ThO<sub>2</sub> na mistura variando de 0% a 40% da mistura combustível.





## IV. Resultados e Análises

Tabela 1: Composição da mistura combustível em [%wt] para 2.5% de enriquecimento.

<b>Comp. \ %ThO<sub>2</sub></b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>
<b>Massa Total [g]</b>	269,93	269,63	269,34	269,04	268,75	268,45	268,15	267,86	267,56
<b>Densidade da Mistura [g/cc]</b>	10,960	10,905	10,850	10,795	10,740	10,685	10,630	10,575	10,520
<b>%U-235</b>	2,176	2,070	1,963	1,856	1,749	1,641	1,534	1,426	1,317
<b>%U-238</b>	85,966	81,758	77,540	73,313	69,076	64,831	60,575	56,311	52,037
<b>%O-16</b>	11,819	11,832	11,845	11,858	11,871	11,885	11,898	11,911	11,924
<b>%O-17</b>	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
<b>%Th-232</b>	0,000	4,302	8,614	12,935	17,265	21,606	25,955	30,315	34,684

Fonte: Autor.





## IV. Resultados e Análises

Tabela 2: Composição da mistura combustível em [%wt] para 3.2% de enriquecimento.

<b>Comp. \ %ThO<sub>2</sub></b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>
<b>Massa Total [g]</b>	269,91	269,61	269,32	269,02	268,73	268,43	268,14	267,84	267,55
<b>Densidade da Mistura [g/cc]</b>	10,960	10,905	10,850	10,795	10,740	10,685	10,630	10,575	10,520
<b>%U-235</b>	2,786	2,650	2,513	2,376	2,239	2,101	1,963	1,825	1,686
<b>%U-238</b>	85,356	81,177	76,989	72,791	68,585	64,369	60,144	55,909	51,666
<b>%O-16</b>	11,820	11,833	11,846	11,859	11,872	11,885	11,898	11,911	11,925
<b>%O-17</b>	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
<b>%Th-232</b>	0,000	4,302	8,614	12,936	17,266	21,607	25,957	30,316	34,685

Fonte: Autor.





## IV. Resultados e Análises

Tabela 3: Sensibilidade da VC 2.5% enriq. com 0, 10, 25 e 40%wt de ThO<sub>2</sub>

Sensib. para VC 2.5% Enric. 0%wtThO <sub>2</sub>					Sensib. para VC 2.5% Enric. 10%wtThO <sub>2</sub>			
Temp [K]	Comb.	Gap	Clad	Moderador	Comb.	Gap	Clad	Moderador
280	-1,1872E-02	-7,9071E-04	-1,3848E-02	4,6534E-02	-2,0413E-02	-8,1020E-04	-1,4367E-02	5,4178E-02
290	-1,1872E-02	-7,9071E-04	-1,3848E-02	4,6534E-02	-2,0413E-02	-8,1020E-04	-1,4367E-02	5,4178E-02
300	-1,1803E-02	-7,9022E-04	-1,3845E-02	4,6622E-02	-2,0330E-02	-8,0970E-04	-1,4364E-02	5,4255E-02
310	-1,1693E-02	-7,8952E-04	-1,3842E-02	4,6742E-02	-2,0201E-02	-8,0898E-04	-1,4361E-02	5,4361E-02
320	-1,1582E-02	-7,8887E-04	-1,3839E-02	4,6846E-02	-2,0071E-02	-8,0832E-04	-1,4358E-02	5,4450E-02
330	-1,1473E-02	-7,8827E-04	-1,3836E-02	4,6940E-02	-1,9942E-02	-8,0770E-04	-1,4356E-02	5,4529E-02
340	-1,1362E-02	-7,8770E-04	-1,3833E-02	4,7021E-02	-1,9814E-02	-8,0713E-04	-1,4353E-02	5,4597E-02
Sensib. para VC 2.5% Enric. 25%wtThO <sub>2</sub>					Sensib. para VC 2.5% Enric. 40%wtThO <sub>2</sub>			
Temp [K]	Comb.	Gap	Clad	Moderador	Comb.	Gap	Clad	Moderador
280	-1,5830E-02	-8,1408E-04	-1,4711E-02	4,8583E-02	-3,9601E-03	-8,2652E-04	-1,5641E-02	3,6168E-02
290	-1,5829E-02	-8,1441E-04	-1,4711E-02	4,8582E-02	-3,9601E-03	-8,2652E-04	-1,5641E-02	3,6168E-02
300	-1,5724E-02	-8,1355E-04	-1,4709E-02	4,8641E-02	-3,8304E-03	-8,2594E-04	-1,5638E-02	3,6210E-02
310	-1,5562E-02	-8,1278E-04	-1,4706E-02	4,8722E-02	-3,6311E-03	-8,2510E-04	-1,5635E-02	3,6262E-02
320	-1,5401E-02	-8,1207E-04	-1,4704E-02	4,8788E-02	-3,4337E-03	-8,2433E-04	-1,5633E-02	3,6301E-02
330	-1,5242E-02	-8,1142E-04	-1,4701E-02	4,8845E-02	-3,2427E-03	-8,2362E-04	-1,5631E-02	3,6330E-02
340	-1,5086E-02	-8,1081E-04	-1,4699E-02	4,8891E-02	-3,0541E-03	-8,2296E-04	-1,5629E-02	3,6355E-02

Fonte: Autor.





## IV. Resultados e Análises

Tabela 4: Sensibilidade da VC 3.2% enriq. com 0, 10, 25 e 40%wt de ThO<sub>2</sub>

Sensib. para VC 3.2% Enric. 0%wtThO <sub>2</sub>					Sensib. para VC 3.2% Enric. 10%wtThO <sub>2</sub>			
Temp [K]	Comb.	Gap	Clad	Moderador	Comb.	Gap	Clad	Moderador
280	-2,6016E-02	-7,1550E-04	-1,2603E-02	5,9651E-02	-3,5162E-02	-7,2103E-04	-1,3066E-02	6,7828E-02
290	-2,6015E-02	-7,1550E-04	-1,2603E-02	5,9651E-02	-3,5163E-02	-7,2103E-04	-1,3066E-02	6,7828E-02
300	-2,5969E-02	-7,1507E-04	-1,2600E-02	5,9752E-02	-3,5105E-02	-7,2059E-04	-1,3063E-02	6,7921E-02
310	-2,5896E-02	-7,1444E-04	-1,2596E-02	5,9895E-02	-3,5013E-02	-7,1993E-04	-1,3059E-02	6,8050E-02
320	-2,5820E-02	-7,1386E-04	-1,2592E-02	6,0023E-02	-3,4919E-02	-7,1934E-04	-1,3055E-02	6,8164E-02
330	-2,5743E-02	-7,1331E-04	-1,2588E-02	6,0136E-02	-3,4825E-02	-7,1877E-04	-1,3052E-02	6,8266E-02
340	-2,5665E-02	-7,1280E-04	-1,2585E-02	6,0239E-02	-3,4731E-02	-7,1824E-04	-1,3049E-02	6,8356E-02
Sensib. para VC 3.2% Enric. 25%wtThO <sub>2</sub>					Sensib. para VC 3.2% Enric. 40%wtThO <sub>2</sub>			
Temp [K]	Comb.	Gap	Clad	Moderador	Comb.	Gap	Clad	Moderador
280	-3,1817E-02	-7,0330E-04	-1,3333E-02	6,3383E-02	-2,1155E-02	-6,9069E-04	-1,4196E-02	5,1946E-02
290	-3,1817E-02	-7,0330E-04	-1,3333E-02	6,3383E-02	-2,1156E-02	-6,9069E-04	-1,4196E-02	5,1946E-02
300	-3,1738E-02	-7,0283E-04	-1,3330E-02	6,3460E-02	-2,1051E-02	-6,9016E-04	-1,4194E-02	5,2004E-02
310	-3,1614E-02	-7,0213E-04	-1,3327E-02	6,3566E-02	-2,0889E-02	-6,8939E-04	-1,4190E-02	5,2082E-02
320	-3,1489E-02	-7,0149E-04	-1,3323E-02	6,3657E-02	-2,0729E-02	-6,8868E-04	-1,4187E-02	5,2147E-02
330	-3,1366E-02	-7,0089E-04	-1,3320E-02	6,3738E-02	-2,0571E-02	-6,8801E-04	-1,4184E-02	5,2203E-02
340	-3,1244E-02	-7,0033E-04	-1,3317E-02	6,3807E-02	-2,0414E-02	-6,8739E-04	-1,4182E-02	5,2248E-02

Fonte: Autor.





# IV. Resultados e Análises

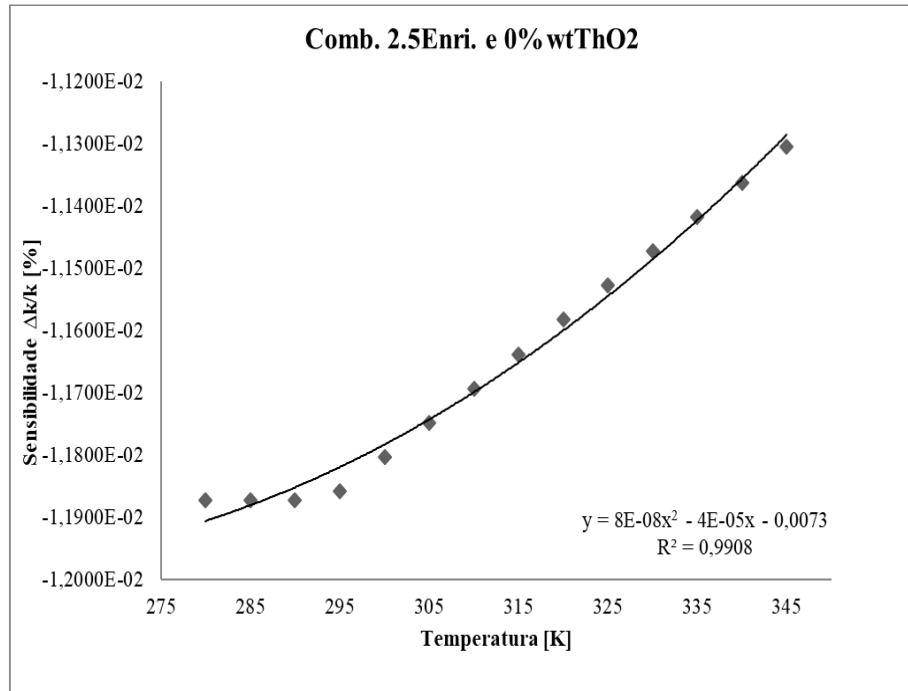


Figura 1: Comportamento da sensibilidade para a Mist. Comb. 2.5% Enriq. e 0%wtThO2.

Fonte: Autor.

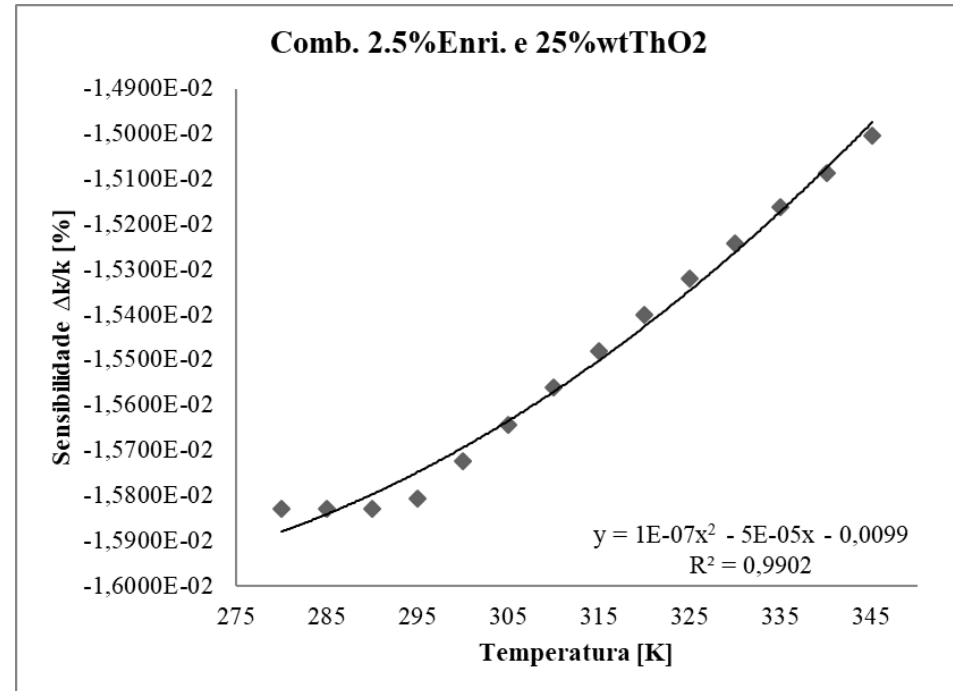


Figura 2: Comportamento da sensibilidade para a Mist. Comb. 2.5% Enriq. e 25%wtThO2

Fonte: Autor.





# IV. Resultados e Análises

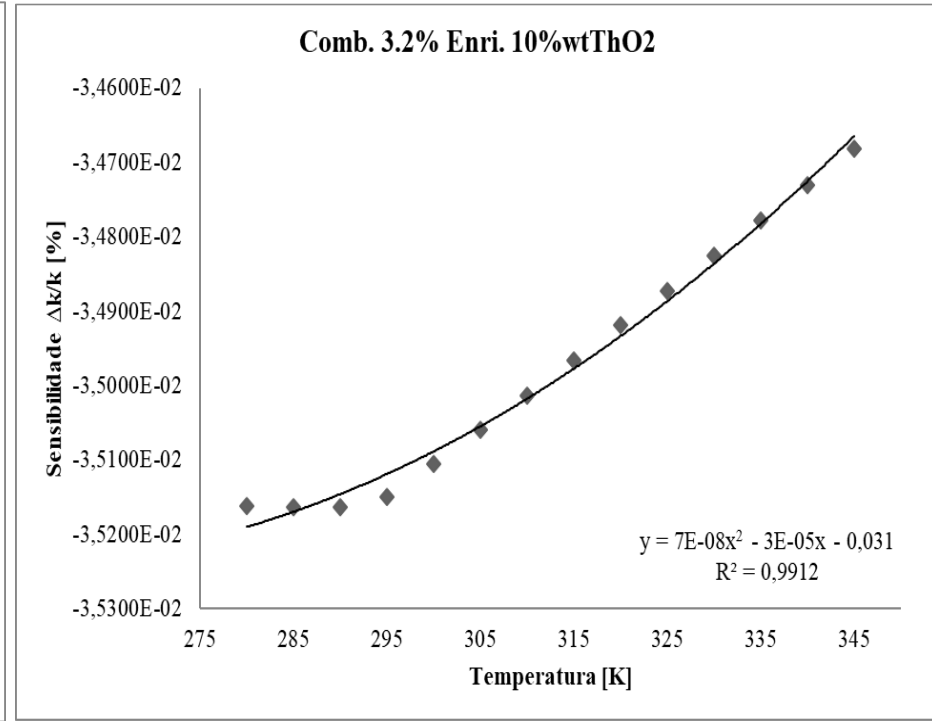
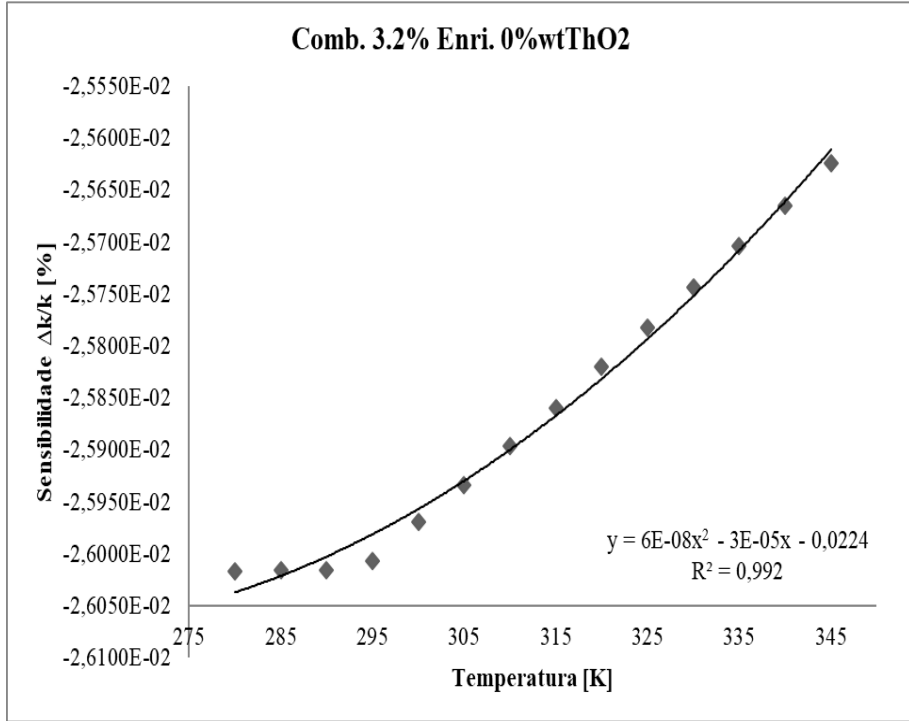


Figura 3: Comportamento da sensibilidade para a Mist. Comb. 3.2% Enriq. e 0%wtThO2. Fonte: Autor.

Figura 4: Comportamento da sensibilidade para a Mist. Comb. 3.2% Enriq. e 10%wtThO2. Fonte: Autor.







## IV. Resultados e Análises

Tabela 5.:Análise evolutiva do  $k_{inf}$  de acordo com o %wt de ThO<sub>2</sub> a 300K.

k_inf a 2.5% de Enr.		k_inf a 3.2% de Enr.		%wt ThO <sub>2</sub>
K_inf_ford	K_inf_adj	K_inf_ford	K_inf_adj	
1,368318	1,368867	1,428761	1,429292	0
1,322656	1,323197	1,386584	1,387106	5
1,285649	1,286180	1,353308	1,353820	10
1,249327	1,249849	1,321293	1,321792	15
<b>1,213435</b>	<b>1,213941</b>	1,288805	1,289291	20
1,175726	1,176219	1,254991	1,255462	25
1,136126	1,136604	<b>1,219250</b>	<b>1,219707</b>	30
1,094201	1,094665	1,181035	1,181477	35
1,049469	1,049918	1,139850	1,140279	40

Fonte: Autor.





## V. Conclusões

- Com as simulações, verificou-se que o  $k_{inf}$  é sensível à variações na temperatura do moderador/refrigerante de um reator nuclear PWR.
- A análise evolutiva do  $k_{inf}$  devido a inserção de ThO<sub>2</sub>, Tabela 5, na mistura combustível mostra a necessidade de aumento do enriquecimento à medida que se incrementa o percentual de ThO<sub>2</sub> na mistura combustível.
- Ainda da Tabela 5 pode ser observada a sensibilidade devida à inserção de tório, para a temperatura de 300 K.





## V. Conclusões

- O acréscimo de  $\text{ThO}_2$  na mistura combustível não tem correlação linear com o comportamento do coeficiente de sensibilidade.
- Propõe-se, para futuros trabalhos a análise de sensibilidade do  $k_{inf}$  de um reator nuclear PWR, como a inserção do venenos queimáveis e, em ciclo de queima com a mistura combustível contendo diferentes percentuais de  $\text{ThO}_2$ .





## VI. Principais Referências

2. IAEA. **International Satatus and Prospects for Nuclear Power 2017**. Bord of Governors General Conference, 2017. Available in: < [https://www-legacy.iaea.org/About/Policy/GC/GC61/GC61InfDocuments/English/gc61inf-8\\_en.pdf](https://www-legacy.iaea.org/About/Policy/GC/GC61/GC61InfDocuments/English/gc61inf-8_en.pdf)> Access in: 24/01/208.

3. OECD. **Uranium 2018 Resources, Production and Demand**. Nuclear Energy Agency Organisation for Economic Co-Operation and Development. OECD iLibrary, 2018. Available in: < <https://doi.org/10.1787/uranium-2018-en>>. Access in: 11/02/2019.

5. NETO, G. Ilson. **Análise das Simulações de Perturbações em Reatores Nucleares Usando o Código SCALE 6.1**. Instituto Militar de Engenharia – IME- EB. Dissertação de Mestrado. Brasil, 2015.

6. GONÇALVES, C. Isadora. **Tório e suas aplicações nucleares**. Instituto Militar de Engenharia (IME)- EB. Dissertação de Mestrado. Brasil, 2017.





## VI. Principais Referências

7. WICHROWSKI, C. Caio. **Análise do tório como combustível para reatores nucleares**. Instituto Militar de Engenharia (IME)- EB. Dissertação de Mestrado. Brasil, 2017.

10. IAEA, **Thorium fuel cycle — Potential Benefits and Challenges**. Nuclear Fuel Cycle and Materials Section International Atomic Energy Agency. TECDOC-1450. ISBN 92–0–103405–9. ISSN 1011–4289. Viena, Áustria. Maio, 2005. Available in: < [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE\\_1450\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1450_web.pdf)>. Acesso in: 17/01/2019.

11. LAMARSH R. John. **Introduction to Nuclear Reactor Theory**. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Reading, Massachusetts. New York University, 1966.

12. DUDERSTADT J. James, HAMILTON J. Louis. **Nuclear Reator Analysis**. Department of Nuclear Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1976.





[www.ime.eb.br](http://www.ime.eb.br)  
[cjfonseca16@gmail.com](mailto:cjfonseca16@gmail.com)



# I. Introdução

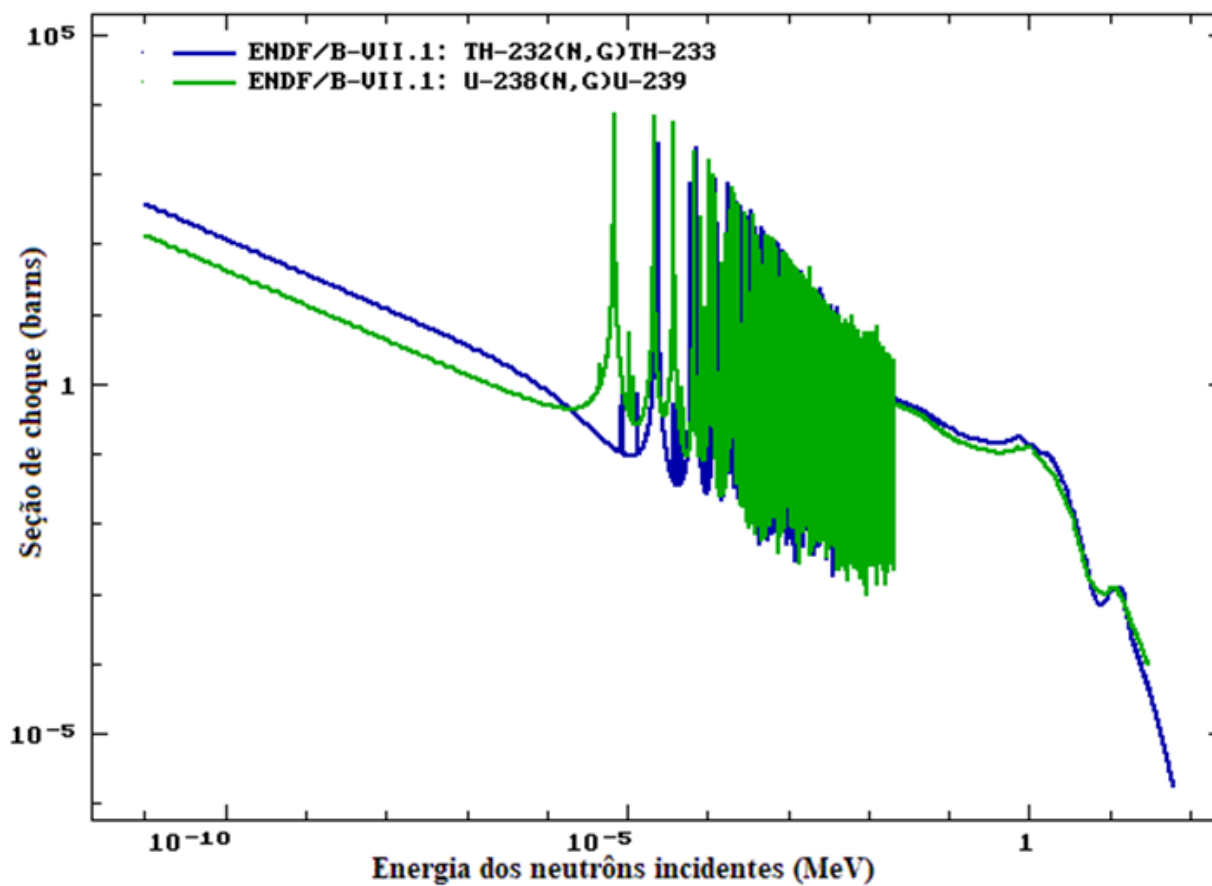


Figure 1: Behaviour of the  $^{232}\text{Th}$  and  $^{238}\text{U}$  Cross sections.

Source: Adapted, [6].





# I. Introdução

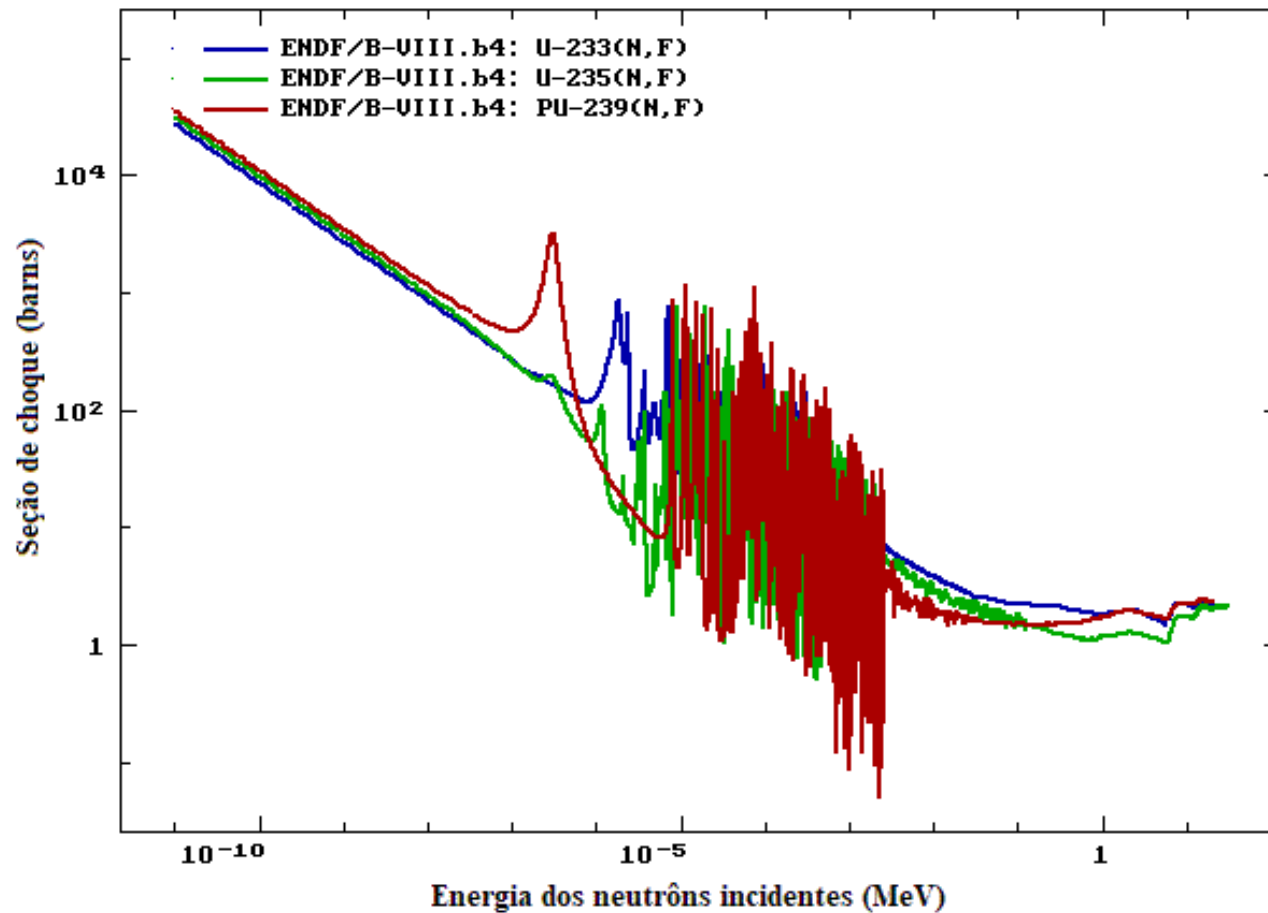


Figure 2: Cross section spectrum for the isotopes  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  and  $^{239}\text{Pu}$ .

Source: Adapted, [6].

