



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES**

FABIANA BEGHINI AVELAR MONTEIRO

**Proposta de Combustível Reprocessado Diluído em Tório para Sistemas PWR –
Inserções homogênea e micro heterogênea**

Belo Horizonte

2017

FABIANA BEGHINI AVELAR MONTEIRO

**Proposta de Combustível Reprocessado Diluído em Tório para Sistemas PWR –
Inserções homogênea e micro heterogênea**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências e Técnicas Nucleares.

Área de Concentração: Engenharia Nuclear e da Energia

Orientadora: Cláudia Pereira Bezerra Lima

Belo Horizonte

2017

M775p

Monteiro, Fabiana Beghini Avelar.

Proposta de combustível reprocessado diluído em tório para sistemas PWR - inserções homogênea e micro heterogênea [manuscrito] / Fabiana Beghini Avelar Monteiro. – 2017.

123 f., enc.: il.

Orientadora: Cláudia Pereira Bezerra Lima.

Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f.113-123.

Bibliografia: f.111-112.

1. Engenharia nuclear - Teses. 2. Reatores nucleares - Teses. 3. Combustíveis nucleares - Teses. 4. Tório - Teses. I. Lima, Cláudia Pereira Bezerra. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.039(043)

Aos meus pais Fábio e Rosângela, ao meu
marido Igor e ao meu filho Mateus, com
amor e gratidão.



FOLHA DE APROVAÇÃO


Proposta de Combustível Reprocessado Micro Heterogêneo Diluído em Tório para Sistemas PWR

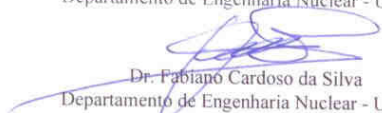
FABIANA BEGHINI AVELAR MONTEIRO

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, área de concentração ENGENHARIA NUCLEAR E DA ENERGIA.


Aprovada em 16 de dezembro de 2016, pela banca constituída pelos membros:


Prof. Cláudia Pereira Bezerra Lima - Orientadora
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG


Prof. Clarysson Alberto Mello da Silva
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG


Dr. Fabiano Cardoso da Silva
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG


Dr. Amir Zacarias Mesquita
CDTN/CNEN


Dra. Marliza Rodríguez Gual
CDTN/CNEN

Belo Horizonte, 16 de dezembro de 2016.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Dra. Cláudia Pereira, por todo o tempo dedicado a me ajudar neste trabalho, bem como por toda a compreensão e paciência despendidas. Serei eternamente grata, apesar de não ter palavras para expressar essa gratidão.

A toda minha família, em especial aos meus pais, Fábio e Rosângela, ao meu marido Igor, à Nilce e ao Afonso. Sem a ajuda deles, não seria possível a realização deste trabalho.

Aos meus amigos do DEN, em especial Karol, Patrícia, Victor, Dani, Rochk e Carlos sempre presentes, com palavras amigas e confortantes e pelos ensinamentos!

Aos meus amigos Janine, Danilo e Carol Euclides, pelos ombros e ouvidos preciosos nos momentos de dificuldade e angústia!

A minha amiga Sisa, pelo reencontro e pela essencial ajuda já no finalzinho!

A todos os professores e funcionários do DEN!

Por fim, gostaria de agradecer à financiadora desta pesquisa, a CAPES.

O mistério da vida me causa a mais forte emoção. É o sentimento que suscita a beleza e a verdade, cria a arte e a ciência. Se alguém não conhece esta sensação ou não pode mais experimentar espanto ou surpresa, já é um morto-vivo e seus olhos se cegaram.

Albert Einstein

RESUMO

Neste trabalho foi proposta a inserção de um combustível reprocessado diluído em tório para sistemas PWR, considerando as formas homogênea e micro heterogênea. Utilizando o pacote de códigos nucleares SCALE 6.0, estudou-se, inicialmente a sensibilidade das bibliotecas disponíveis, considerando a inserção de tório, através da utilização de dois *benchmarks* de uma célula combustível. Um deles considerando combustível MOX e outro combustível (ThO₂-UO₂). Posteriormente, os combustíveis reprocessados e diluídos em tório foram caracterizados e inseridos em três modelos: uma célula, um elemento e um núcleo. As avaliações dos dados neutrônicos foram realizadas através da análise dos fatores de multiplicação infinito e efetivo, bem como o estudo da evolução do combustível ao longo da queima. Também foi avaliada a taxa de conversão para o modelo do núcleo, ao longo da queima, para cada proposta de geometria e composição.

Os resultados mostram a possibilidade de inserção de combustível reprocessado diluído em tório em núcleos do tipo PWR, e em termos neutrônicos, dentro da abordagem desta tese, a inserção do combustível de forma homogênea mostrou-se mais adequado do que quando se utiliza a inserção micro heterogênea. Os resultados também mostram que, ao introduzir este combustível no núcleo, é necessário eliminar os elementos contendo veneno queimável, devido à grande quantidade de material absorvedor presente no combustível reprocessado diluído em tório. Além disso, obtém-se um fator de conversão muito acima do apresentado pelo combustível padrão, indicando a possibilidade de extensão de queima.

Palavras-Chave: SCALE 6.0; inserção micro heterogênea; combustível reprocessado diluído em tório; PWR.

ABSTRACT

It was proposed, in this study, the insertion of a nuclear fuel to be used in PWR systems, considering two insertion's types: homogeneous and micro heterogeneous. By using the computer software system SCALE 6.0, the study of the libraries' sensibility was initially done considering the thorium insertion with two benchmarks of a fuel pin, considering two types of fuel: a MOX and a ThO₂-UO₂ fuel. Then, the reprocessed fuel spiked with thorium were characterized and inserted in three models: a cell, an element and a nucleus. The neutronic data evaluation was carried out by the analysis of de effective and infinite multiplication factors, as well the fuel evolution during the burnup. The conversion ratio (CR) was also evaluated for the nucleus model during the burnup for each geometry e composition proposals.

The results show the possibility of the reprocessed fuel spiked with thorium insertion in a PWR system and, in neutronic terms, within this thesis analysis, the homogenous insertion showed to be more suitable than the micro heterogeneous insertion. The results also show that, when introducing this fuel in a nucleus, it is necessary to eliminate the elements which contain poison burnable, due to the huge amount of absorber material present in the reprocessed fuel spiked with thorium. Besides, the conversion ratio obtained was greater than the presented by standard fuel, indicating the possibility of extending the burnup.

Key-Words: SCALE 6.0; micro heterogeneous insertion; reprocessed fuel spiked with thorium; PWR.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Ciclos fértil/físsil para o tório e urânio.
- Figura 2 – Fluxograma do processo de reprocessamento
- Figura 3 – Etapas de separação UREX +.
- Figura 4 – Célula combustível.
- Figura 5 – Célula combustível modelada.
- Figura 6 – Vareta combustível.
- Figura 7 – Célula combustível modelada.
- Figura 8 – Célula combustível: modelo homogêneo
- Figura 9 – Configuração das varetas de combustível, modelo homogêneo (sem escala)
- Figura 10 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis UO_2 (1,9%), TRU (13%), TRUOUT (24%) e TRUIN (20%) para a CEL 01.
- Figura 11 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis TRU (13%), TRUOUT (24%) e TRUIN (20%) para a CEL 01.
- Figura 12 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis UO_2 (2,5%), TRU (21%), TRUOUT (38%) e TRUIN (34%) para a CEL 02.
- Figura 13 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis TRU (21%), TRUOUT (38%) e TRUIN (34%) para a CEL 02.
- Figura 14 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis UO_2 (3,2%), TRU (27%), TRUOUT (49%) e TRUIN (44%) para a CEL 03.
- Figura 15 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis UO_2 (3,2%), TRU (27%), TRUOUT (49%) e TRUIN (44%) para a CEL 03.
- Figura 16 – Variação da massa dos nuclídeos para os combustíveis da célula CEL 01.
- Figura 17 – Variação da massa dos nuclídeos, com exceção do ^{232}Th , para os combustíveis da célula CEL 01.
- Figura 18 – Variação da massa dos nuclídeos para os combustíveis da célula CEL 02.
- Figura 19 – Variação da massa dos nuclídeos, com exceção do ^{232}Th , para os combustíveis da célula CEL 02.
- Figura 20 – Variação da massa dos nuclídeos para os combustíveis da célula CEL 03.
- Figura 21 – Variação da massa dos nuclídeos, com exceção do ^{232}Th , para os combustíveis da célula CEL 03.
- Figura 22 – Elemento Combustível modelado: ELE 01.

- Figura 23 – Elemento Combustível modelado: ELE 02.
- Figura 24 – Elemento Combustível modelado: ELE 03.
- Figura 25 – Elemento Combustível modelado: ELE 04.
- Figura 26 – Elemento Combustível modelado: ELE 05.
- Figura 27 – Elemento Combustível modelado: ELE 06.
- Figura 28 – ELE 01: elemento combustível UO_2 , 1,9% enriquecido, sem veneno queimável
(a) TRUOUT; (b) TRUIN
- Figura 29 – ELE 02: elemento combustível UO_2 , 2,5% enriquecido, sem veneno queimável
(a) TRUOUT; (b) TRUIN
- Figura 30 – ELE 03: elemento combustível UO_2 , 2,5% enriquecido, com 12 varetas de veneno queimável (a) TRUOUT; (b) TRUIN
- Figura 31 – ELE 04: elemento combustível UO_2 , 3,2% enriquecido, sem veneno queimável
(a) TRUOUT; (b) TRUIN
- Figura 32 – ELE 05: elemento combustível UO_2 , 3,2% enriquecido, com 8 varetas de veneno queimável (a) TRUOUT; (b) TRUIN
- Figura 33 – ELE 06: elemento combustível UO_2 , 3,2% enriquecido, com 12 varetas de veneno queimável (a) TRUOUT; (b) TRUIN
- Figura 34 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis UO_2 (1,9%), TRU (10%), TRUOUT (18%) e TRUIN (13%) para o ELE 01.
- Figura 35 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis TRU (10%), TRUOUT (18%) e TRUIN (13%) para o ELE 01.
- Figura 36 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis UO_2 (2,5%), TRU (18%), TRUOUT (35%) e TRUIN (30%) para o ELE 02.
- Figura 37 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis TRU (18%), TRUOUT (35%) e TRUIN (30%) para o ELE 02.
- Figura 38 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis UO_2 (2,5%), TRU (17%), TRUOUT (25%) e TRUIN (30%) para o ELE 03.
- Figura 39 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis TRU (17%), TRUOUT (25%) e TRUIN (30%) para o ELE 03.
- Figura 40 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis UO_2 (3,2%), TRU (27%), TRUOUT (48%) e TRUIN (43%) para o ELE 04.
- Figura 41 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis TRU (27%), TRUOUT (48%) e TRUIN (43%) para o ELE 04.

Figura 42 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis UO_2 (3,2%), TRU (24%), TRUOUT (44%) e TRUIN (39%) para o ELE 05.

Figura 43 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis TRU (24%), TRUOUT (44%) e TRUIN (39%) para o ELE 05.

Figura 44 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis UO_2 (3,2%), TRU (24%), TRUOUT (43%) e TRUIN (38%) para o ELE 06.

Figura 45 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis TRU (24%), TRUOUT (43%) e TRUIN (38%) para o ELE 06.

Figura 46 – Variação da massa dos nuclídeos para os combustíveis do elemento ELE 01.

Figura 47 – Variação da massa dos nuclídeos ^{232}Th , ^{238}Pu , ^{239}Pu e ^{240}Pu para os combustíveis do elemento ELE 01.

Figura 48 – Variação da massa dos nuclídeos ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{242m}Am , ^{242}Cm e ^{244}Cm para os combustíveis do elemento ELE 01.

Figura 49 – Variação da massa dos nuclídeos para os combustíveis do elemento ELE 02.

Figura 50 – Variação da massa dos nuclídeos ^{232}Th , ^{238}Pu , ^{239}Pu e ^{240}Pu para os combustíveis do elemento ELE 02.

Figura 51 – Variação da massa dos nuclídeos ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{242m}Am , ^{242}Cm e ^{244}Cm para os combustíveis do elemento ELE 02.

Figura 52 – Variação da massa dos nuclídeos para os combustíveis do elemento ELE 03.

Figura 53 – Variação da massa dos nuclídeos ^{232}Th , ^{238}Pu , ^{239}Pu e ^{240}Pu para os combustíveis do elemento ELE 03.

Figura 54 – Variação da massa dos nuclídeos ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{242m}Am , ^{242}Cm e ^{244}Cm para os combustíveis do elemento ELE 03.

Figura 55 – Variação da massa dos nuclídeos para os combustíveis do elemento ELE 04.

Figura 56 – Variação da massa dos nuclídeos ^{232}Th , ^{238}Pu , ^{239}Pu e ^{240}Pu para os combustíveis do elemento ELE 04.

Figura 57 – Variação da massa dos nuclídeos ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{242m}Am , ^{242}Cm e ^{244}Cm para os combustíveis do elemento ELE 04.

Figura 58 – Variação da massa dos nuclídeos para os combustíveis do elemento ELE 05.

Figura 59 – Variação da massa dos nuclídeos ^{232}Th , ^{238}Pu , ^{239}Pu e ^{240}Pu para os combustíveis do elemento ELE 05.

Figura 60 – Variação da massa dos nuclídeos ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{242m}Am , ^{242}Cm e ^{244}Cm para os combustíveis do elemento ELE 05.

- Figura 61 – Variação da massa dos nuclídeos para os combustíveis do elemento ELE 06.
- Figura 62 – Variação da massa dos nuclídeos ^{232}Th , ^{238}Pu , ^{239}Pu e ^{240}Pu para os combustíveis do elemento ELE 06.
- Figura 63 – Variação da massa dos nuclídeos ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{241}Pu , ^{242}Pu , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{242}Cm e ^{244}Cm para os combustíveis do elemento ELE 06.
- Figura 64 – Distribuição dos elementos no núcleo: elementos com UO_2 1,9% enriquecido em vermelho; elementos com UO_2 2,5% enriquecido em azul claro; com UO_2 3,2% enriquecido em azul escuro.
- Figura 65 – Evolução do fator de multiplicação efetivo ao longo da queima para os combustíveis UO_2 e TRU (33%), TRUOUT (62%) e TRUIN (62%).
- Figura 66 – Evolução do fator de multiplicação efetivo ao longo da queima para os combustíveis TRU (33%), TRUOUT (62%) e TRUIN (62%).
- Figura 67 – Variação da massa dos isótopos para os combustíveis UO_2 e TRU (33%).
- Figura 68 – Variação da massa dos nuclídeos ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu e ^{241}Pu para os combustíveis UO_2 e TRU (33%).
- Figura 69 – Variação da massa dos nuclídeos ^{232}Th , ^{233}Th , ^{233}Pa , ^{233}U , ^{237}Np , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{243}Am , ^{242}Cm e ^{244}Cm para os combustíveis UO_2 e TRU (33%).
- Figura 70 – Variação da massa do ^{232}Th ao longo da queima para os combustíveis TRU.
- Figura 71 – Variação da massa do ^{233}Th ao longo da queima para os combustíveis TRU.
- Figura 72 – Variação da massa do ^{233}Pa ao longo da queima para os combustíveis TRU.
- Figura 73 – Variação da massa do ^{233}U ao longo da queima para os combustíveis TRU.
- Figura 74 – Variação da Taxa de Conversão ao longo da queima para os combustíveis TRU (33%) e UO_2 .

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Composição do Combustível MOX tipo A (OECD, 2003).
- Tabela 2 – Composição do Combustível MOX tipo B (OECD, 2003).
- Tabela 3 – Composição do Combustível MOX tipo C (OECD, 2003).
- Tabela 4 - Comparação dos valores do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) de diversos países, códigos e bibliotecas de seção de choque para o MOX A (OECD, 2003).
- Tabela 5 - Comparação dos valores obtidos no DEN para o fator de multiplicação infinito (k_{inf}) de diversas bibliotecas de seção de choque para o MOX A (OECD, 2003).
- Tabela 6 - Comparação dos valores do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) de diversos países, códigos e bibliotecas de seção de choque para o MOX B (OECD, 2003).
- Tabela 7 - Comparação dos valores obtidos no DEN para o fator de multiplicação infinito (k_{inf}) de diversas bibliotecas de seção de choque para o MOX B (OECD, 2003).
- Tabela 8 - Comparação dos valores do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) de diversos países, códigos e bibliotecas de seção de choque para o MOX C (OECD, 2003).
- Tabela 9 - Comparação dos valores obtidos no DEN para o fator de multiplicação infinito (k_{inf}) de diversas bibliotecas de seção de choque para o MOX C (OECD, 2003).
- Tabela 10 – Parâmetros do Modelo da Célula de Combustível (PWR)
- Tabela 11 – Composições Iniciais (PWR)
- Tabela 12 - Comparação dos valores do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) de diversos códigos e bibliotecas de seção de choque (Weaver et al, 2000)
- Tabela 13 – Comparação dos valores obtidos para k_{inf} correspondente a cada combustível caracterizado com os obtidos para UO_2 com três enriquecimentos distintos: modelo homogêneo
- Tabela 14 – Composição do Combustível TRU (13%)
- Tabela 15 – Composição do Combustível TRU (21%)
- Tabela 16 – Composição do Combustível TRU (27%)
- Tabela 17 – Comparação dos valores obtidos do k_{inf} correspondente a cada combustível com os obtidos para UO_2 com três enriquecimentos distintos: modelo micro heterogêneo.
- Tabela 18 – Composição do Combustível TRUOUT (24%)
- Tabela 19 – Composição do Combustível TRUOUT (38%)

Tabela 20 – Composição do Combustível TRUOUT (49%)

Tabela 21 – Composição do Combustível TRUIN (20%)

Tabela 22 – Composição do Combustível TRUIN (34%)

Tabela 23 – Composição do Combustível TRUIN (44%)

Tabela 24 – Comparação dos valores obtidos para o fator de multiplicação infinito k_{inf} considerando o combustível reprocessado diluído em tório e UO_2 nos seis elementos modelados

Tabela 25 – Comparação dos valores obtidos para o fator de multiplicação infinito k_{inf} considerando o combustível reprocessado diluído em tório e UO_2 nos seis elementos modelados

Tabela 26 – Composição do Combustível TRU (10%)

Tabela 27 – Composição do Combustível TRU (17%)

Tabela 28 – Composição do Combustível TRU (19%)

Tabela 29 – Composição do Combustível TRU (24%)

Tabela 30 – Composição do Combustível TRU (27%)

Tabela 31 – Comparação dos valores obtidos para o fator de multiplicação infinito k_{inf} considerando a configuração TRUOUT

Tabela 32 – Comparação dos valores obtidos para o fator de multiplicação infinito k_{inf} considerando a configuração TRUIN

Tabela 33 – Composição do Combustível TRUOUT (13%)

Tabela 34 – Composição do Combustível TRUOUT (18%)

Tabela 35 – Composição do Combustível TRUOUT (25%)

Tabela 36 – Composição do Combustível TRUIN (30%)

Tabela 37 – Composição do Combustível TRUIN (35%)

Tabela 38 – Composição do Combustível TRUIN (39%)

Tabela 39 – Composição do Combustível TRUIN (43%)

Tabela 40 – Composição do Combustível TRUIN (44%)

Tabela 41 – Composição do Combustível TRUIN (48%)

Tabela 42 – Composição do Combustível TRUIN (33%)

Tabela 43 – Composição do Combustível TRUOUT/TRUIN (62%)

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

AEAT – *AEA Technology*

AIEA – Agência Internacional de Energia Atômica

ANL – *Argonne National Laboratory*

BNFL – *British Nuclear Fuels*

CEA – *Commissariat à l'Énergie Atomique*

CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

Cluster – Conjunto

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear

CR – Fator de Conversão

DEN/UFMG – Departamento de Energia Nuclear/Universidade Federal de Minas Gerais

DETR – *Department of Environment, Transport and the Regions*

DP – Desvio Padrão

DPR – Desvio Padrão Relativo

EC – Elemento Combustível

EDF – *Électricité de France*

ELE – Elemento Combustível

EMS – *E Mennerdahl Systems*

ENDF/B-V – Dados de Biblioteca

ENDF/B-VII – Dados de Biblioteca

FPEX – *Fission Product Extraction*

FSAR – *Final Safety Analysis Report*

GA – *General Atomic*

GANEX – *Group Actinide Extraction*

Gap – Espaço Anular

HM – *Heavy Metal*

HTR – *High-Temperature Reactor*

KEPCO – *Korea Electric Power Corporation*

KFKI – *Atomic Energy Research Institute*

IAEA – *International Atomic Energy Agency*

INB – Indústrias Nucleares do Brasil

INEEL – *Idaho National Engineering and Environmental Laboratory*

IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IPPE – *State Scientific Centre of Russian Federation, Institute of Physics and Power Engineering (SSC IPPE)*
IPSN – *Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire*
JAERI – *Japan Atomic Energy Research Institute*
LWR – *Light Water Reactor*
MA – *Minor Actinides*
MIT – *Institute of Massachusetts*
MOX – *Mixture Oxide*
MRS – *Materials Research Society*
NPEX – *Neptunium/Plutonium Extracion*
NUPEC – *Institute of Nuclear Safety, Nuclear Power Engineering Corporation*
OECD – *Organisation for Economic Co-Operation and Development*
ORNL – *Oak Ridge National Laboratory*
PNC – *PNC Tokai Works*
Pitch – Distância entre elementos combustíveis
PSI – *Paul Scherrer Institute*
PUREX – *Plutonium Uranium Redox EXtraction*
PWR – *Pressurized Water Reactor*
SCALE – *Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation*
SENCIR – *Semana de Engenharia Nuclear e Ciências das Radiações*
SIEMENS – *Siemens AG, Power Generation Group (KWU), Dept. NDM3*
TALSPEAK – *Trivalent Actinide/Lanthanide Separation by Phosphorus-reagent Extraction by Aqueous Komplexes*
THTR – *Thorium High-Temperature Reactor*
THOREX – *Thorium Extraction*
TRU – *Transurânicos*
TRUE – *Transuranium Extracion*
TRUIN – *TRU na parte interna*
TRUOUT – *TRU na parte externa*
UFMG – *Universidade Federal de Minas Gerais*
UREX – *Uranium Extraction*
Zry-4 – *ZyrcaLOY - 4*

LISTA DE SÍMBOLOS

k – fator de multiplicação de nêutrons

k_{eff} – fator de multiplicação efetivo

k_{inf} – fator de multiplicação infinito

(n,γ) – reação de captura radiativa

β^- – decaimento beta menos

$T_{1/2}$ – meia vida

Z – número atômico

σ – desvio padrão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	017
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	022
2.1 PANORAMA GERAL SOBRE A UTILIZAÇÃO DE TÓRIO.....	022
2.2 CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS SOBRE O TÓRIO.....	023
2.3 REPROCESSAMENTO E RECICLAGEM.....	024
2.4 DESCRIÇÃO DO CÓDIGO UTILIZADO.....	027
3 CÁLCULO DE CÉLULA.....	029
3.1 DESCRIÇÃO DO <i>BENCHMARK</i> U/MOX.....	030
3.2 COMPARAÇÃO DO RESULTADOS OBTIDOS PARA U/MOX	033
3.3 DESCRIÇÃO DO BENCHMARK TH/MOX.....	041
3.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA TH/MOX.....	042
3.5 CÉLULA COM COMBUSTÍVEL REPROCESSADO DILUÍDO EM Th APLICADO A UMA CÉLULA DE ANGRA II.....	045
3.5.1 MODELO HOMOGÊNEO.....	045
3.5.2 MODELO MICRO HETEROGÊNEO.....	049
3.5.3 COMPARAÇÕES ENTRE OS MODELOS HOMOGÊNEO E MICRO HETEROGÊNEO.....	055
4 AVALIAÇÃO DE UM ELEMENTO COMBUSTÍVEL COM COMBUSTÍVEL REPROCESSADO DILUÍDO EM TÓRIO	063
4.1 DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS MODELADOS.....	063
4.1.1 MODELO HOMOGÊNEO.....	063
4.1.2 MODELO MICRO HETEROGÊNEO.....	073
4.2 COMPARAÇÕES ENTRE OS MODELOS HOMOGÊNEO E MICRO HETEROGÊNEO.....	085
5 PROPOSTA DE INSERÇÃO DE COMBUSTÍVEL REPROCESSADO DILUÍDO EM TÓRIO EM ELEMENTOS DE UM NÚCLEO	099
5.1 PROPOSTAS DE COMBUSTÍVEIS REPROCESSADOS DILUIDO EM TÓRIO – INSERÇÕES HOMOGÊNEA E MICRO HETEROGÊNEA.....	099
5.2 COMPARAÇÕES ENTRE OS MODELOS.....	101
6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	109

6.1 CONCLUSÕES.....	109
6.2 PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	110
REFERÊNCIAS.....	111
APÊNDICE I.....	113
APÊNDICE II.....	122

1 INTRODUÇÃO

Vários países que operam comercialmente reatores nucleares de potência têm mostrado preocupação em relação ao rejeito nuclear, devido à atual questão ambiental. Os riscos radiológicos associados aos rejeitos produzidos por combustíveis a base de urânio estão relacionados à quantidade de plutônio presente no combustível queimado (SHAPIRA, 1999). O que continua sendo um grande desafio em relação ao gerenciamento deste combustível é a presença de actínídeos e produtos de fissão, contribuintes para radiotoxicidade do rejeito. Uma opção possível seria reprocessá-lo (OECD, 2015).

Há várias técnicas de reprocessamento do combustível nuclear, algumas já existentes e outras ainda em desenvolvimento. Elas podem ser classificadas de acordo com a sua maturidade, segundo a Agência Internacional de Energia Nuclear (IAEA,2008), em seis categorias distintas:

(1) PUREX, implementada nas plantas de 2ª geração, em escala industrial, tem por objetivos principais a redução do volume e radiotoxicidade do rejeito nuclear (restrito aos produtos de fissão e actínídeos menores) e o desenvolvimento sustentável da energia nuclear, fechando o ciclo de combustível de forma a reciclar o plutônio nos combustíveis MOX (UO_2 - PuO_2) e RepU (urânio reprocessado) nos reatores LWRs ou em reatores rápidos;

(2) tecnologias evolutivas, baseadas na técnica PUREX e voltadas para as plantas de 3ª geração, com o objetivo de gerenciamento do urânio e plutônio, já prontas para implementação. Alguns dos objetivos incluem a melhora do comportamento do combustível MOX e a separação seletiva de alguns actínídeos menores e produtos de fissão;

(3) processos aquosos utilizando novas moléculas de extração, com o objetivo de separar os actínídeos menores (MA) a partir do armazenamento provisório;

(4) métodos baseados na piroquímica, capazes de reprocessar diferentes tipos de combustíveis altamente radioativos, como metais, carbonetos, óxidos ou nitretos, com grande quantidade de materiais físeis;

(5) combinação de hidro e piro-processos, que apesar de apresentar vantagens referentes aos dois tipos de processos, tem sua eficiência afetada pela descontinuidade entre eles;

(6) outros processos de inovação, ainda em estágio de desenvolvimento, tais como: utilização do fluido freon e extração supercrítica de CO₂, processos baseados em métodos de cromatografia e processos utilizando métodos de precipitação.

Dentre as várias técnicas de reprocessamento citadas, há uma preocupação importante em relação à proliferação de armas nucleares, as quais podem ser produzidas a partir do plutônio recuperado. A técnica UREX +, baseada no PUREX, tem uma vantagem neste aspecto, pois o plutônio não é separado dos elementos transurânicos após reprocessamento (MUSEMBIA et al, 2013). Esta técnica é capaz de separar U, Tc, Cs, Sr, TRU e Ln, além dos produtos de fissão (IAEA, 2008). Através dela, é possível recuperar mais de 90% do urânio, mais de 95% do tecnécio e do iodo, mais de 97% do céscio e do estrôncio, mais de 99% do plutônio e netúnio e aproximadamente 99,5% do amerício e do cúrio (ANL, 2004).

O combustível reprocessado, pela técnica UREX+ sai com uma matriz de aproximadamente 52% de material físsil. Para reutilização, esse material pode ser diluído em urânio empobrecido ou em tório (FERREIRA, 2014). O interesse em se utilizar o tório no combustível nuclear justifica-se pelo fato de que combustíveis à base de tório podem ser usados para reduzir o rejeito proveniente do ciclo convencional do urânio e podem evitar a proliferação de armas nucleares, além de o tório ser mais abundante na natureza do que o urânio e ainda poder, quando se irradia dentro do reator, gerar o ²³³U, em sua cadeia (OECD, 2016).

O tório tem sido pesquisado como constituinte de combustível desde o início da era nuclear, apesar de seu ciclo como um todo não ter sido completamente estudado. No final da década de 1970, o estudo do tório foi desencorajado por alguns motivos principais: alguns países, como a França, começaram a estudar o ciclo do urânio/plutônio, bastante promissor para a época e os acidentes de *Three Mile Island*, nos Estados Unidos (1979) e de Chernobyl, na Ucrânia (1986), que acabaram por desencadear um desinteresse a respeito da energia nuclear que influenciou outros países. Neste período, o preço do urânio caiu bastante, enfraquecendo a economia e inviabilizando a reciclagem e reprocessamento. Atualmente, as oportunidades e

desafios provenientes do uso do tório no ciclo de combustível continuam sendo estudadas por diversos países e também através de diversos programas internacionais (OECD, 2016).

No Brasil, o reconhecimento do valor estratégico da utilização do tório como combustível nuclear teve início no começo dos anos 60, pois tem uma das maiores reservas de tório do mundo, estimada em 1,2 milhões de ThO_2 . O grupo de estudo pioneiro foi o denominado “Grupo do Tório”, o qual realizou vários progressos conceituais conduzindo o primeiro projeto de utilização do tório em reatores do tipo *Pressurized Water Reactor* (PWR). As atividades deste grupo foram encerradas com a decisão da construção de um reator PWR, na Unidade 1 de Angra dos Reis (MAIORINO; CARLUCCIO, 2004).

No começo dos anos 70, várias atividades teóricas e experimentais a respeito da utilização do tório foram conduzidas a partir do acordo de cooperação entre o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) e o *General Atomic* (GA). Este programa foi encerrado com a assinatura do programa de transferência de tecnologia entre Brasil e Alemanha, para a construção de oito plantas nucleares e indústria completa do ciclo de combustível (MAIORINO; CARLUCCIO, 2004).

No final dos anos 70, o maior programa de pesquisa na utilização do tório foi desenvolvido com o incentivo do “*International Nuclear Fuel Cycle Evaluation*” e conduzido pelo Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), Empresas Nucleares Brasileiras S/A (Nuclebras) e as empresas alemãs KFA- Jülich, Siemens A.G-KWU e NUKEN. O programa foi interrompido após nove anos, quando ocorreu uma reformulação completa da estrutura nuclear brasileira, com a extinção da Nuclebras e com a transferência do CDTN para a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) (PINHEIRO et al, 1988).

O Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) tem pesquisado novos combustíveis para reatores do tipo PWR desde os anos 90, incluindo a inserção de combustíveis reprocessados e tório. No trabalho de Cota e Pereira (1997), um novo tipo de combustível proveniente do reprocessamento, cujas características neutrônicas eram compatíveis com o seu uso em reatores do tipo PWR foi estudado. Pôde-se concluir, com este trabalho que a inserção de tório em reatores PWR apresenta resultados satisfatórios no que se refere à neutrônica e à queima do combustível. Ainda, Cota e Pereira

(1997), trazem proposta de métodos alternativos de reprocessamento para baixos graus de descontaminação de urânio-plutônio que permitam a recuperação de materiais físséis para utilização em reatores do LWR.

Dentro deste contexto pretendeu-se, neste trabalho, avaliar o comportamento de um combustível reprocessado diluído em tório, inserido no núcleo de um reator do tipo PWR, com os mesmos dados da Unidade 2 de Angra dos Reis, conforme o FSAR, *Final Safety Analysis Report, Ver 13, April 2013*, da Eletronuclear – Eletrobras Termonuclear S.A. A inserção do combustível se deu através de duas formas: uma homogênea e outra micro heterogênea. A introdução do combustível de forma micro heterogênea pode ser usada, segundo Todosow et al (2005), para obter maiores valores de queima. Ela é caracterizada por uma separação espacial de poucos milímetros ou centímetros entre o tório e o urânio em uma vareta de combustível ou através do elemento combustível.

Dois *benchmarks* foram utilizados, inicialmente, para modelar uma célula combustível feita através do sistema de códigos SCALE 6.0: “*Burn-up Credit Criticality Benchmark. Phase IV-A. Reactivity Prediction Calculations for Infinite Arrays of PWR MOX Fuel Pin Cells*” (OECD, 2003) e “*A PWR Thorium Pin Cell Burnup Benchmark*” (WEAVER et al, 2000). O primeiro foi utilizado para conferir se o modelo, com as bibliotecas disponíveis, respondem adequadamente quando se utiliza nuclídeos transurânicos na matriz do combustível e o segundo para verificar as modificações que podem ocorrer quando se utiliza o tório na matriz do combustível. O estudo de sensibilidade das bibliotecas foi realizado para que a metodologia utilizada neste trabalho fosse validada e para que fosse escolhida a biblioteca mais adequada, disponível do código SCALE 6.0, a ser utilizada (BOWMAN, 2008). Escolhida a biblioteca, foram modeladas a célula combustível, o elemento combustível e o núcleo do reator, utilizando os mesmos dados que os do reator de Angra 2.

Para a inserção de forma homogênea, considerou-se que a célula de combustível continha apenas combustível reprocessado diluído em tório. Para a inserção de forma micro heterogênea, duas configurações micro heterogêneas radiais foram caracterizadas: uma na qual o combustível reprocessado ocupava a parte externa da célula de combustível e outra, a parte interna. Todos os modelos simulados foram analisados considerando o estado estacionário e posteriormente, quando submetidos à queima. Neste estudo avaliou-se o

comportamento do fator de multiplicação em estado estacionário bem como a evolução do combustível, durante a queima. Para o núcleo do reator, também avaliou-se a taxa de conversão ao longo da queima para o tipo de inserção do combustível proposto para avaliar as técnicas de reprocessamento do combustível estudadas

O objetivo do trabalho é avaliar, desde o modelo de célula até o núcleo, a possibilidade, em termos neutrônicos, da inserção de combustível reprocessado diluído em tório em reatores tipo PWR.

Para alcançar o objetivo proposto, este trabalho foi organizado da seguinte forma: no Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o panorama geral da utilização do tório, uma breve descrição técnica sobre o tório, e sobre reciclagem e reprocessamento de combustíveis nucleares; no Capítulo 3 é realizado o estudo da sensibilidade das bibliotecas disponíveis no código nuclear utilizado e a validação da metodologia utilizando dois *benchmarks*, considerando uma célula combustível. Em seguida aplica-se esta modelagem para uma célula do reator nuclear de Angra 2 (Eletronuclear, 2013); no Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas simulações dos sistemas modelados de um elemento combustível (Eletronuclear, 2013) considerando os dois modelos: homogêneo e heterogêneo; no Capítulo 5 faz-se a simulação do núcleo, utilizando a mesma metodologia. Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e as perspectivas de trabalhos futuros sobre o trabalho desenvolvido.

O ineditismo da tese é que pela primeira vez avaliou-se o modelo micro heterogêneo em um núcleo do tipo PWR com elementos contendo combustível reprocessado diluído em tório. A sua importância é que a utilização de combustível reprocessado apresenta algumas vantagens, tais como a redução da quantidade de urânio a ser minerada e a quantidade de combustível queimado a ser armazenado, diminuindo-se assim o impacto ambiental (TSOULFANIDIS, 2013). Estas vantagens também justificam a escolha de investigar, neste trabalho, a utilização de combustível reprocessado em reatores PWR.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PANORAMA GERAL SOBRE A UTILIZAÇÃO DO TÓRIO

No início do desenvolvimento da energia nuclear, o tório foi considerado um suplemento ou até mesmo um substituto em potencial para o urânio, que àquela época, acreditava-se que poderia entrar em escassez. Assim, em 1944, foi criado um comitê nos Estados Unidos, o “*The New Piles Committee*”, que recomendava que estudos sobre a utilização do tório como combustível nuclear fossem realizados. Porém, descobriu-se que os recursos naturais de urânio não eram tão limitados como o esperado. Além disso, como o tório não é físsil, não é possível iniciar uma reação em cadeia com um combustível composto apenas por tório. Esses dois fatores acabaram por desencorajar o prosseguimento da pesquisa nesta área. No período de 1950 a 1970, o ciclo do tório voltou a ser bastante estudado, apesar dos inúmeros desafios técnicos e industriais. O tório não pode substituir o urânio por não ter um isótopo físsil, mas gera o nuclídeo físsil ^{233}U por captura neutrônica (OECD, 2015).

Ainda de acordo com o relatório da OECD (2015), os primeiros reatores refrigerados a água leve, *Ligh Water Reactor* (LWR), desenvolvidos no final dos anos 50 e começo dos anos 60 nos Estados Unidos, foram operados inicialmente com combustível à base de tório: o *Elk River* e o *Peach Bottom*. O *Fort St. Vrain*, sucessor do *Peach Bottom*, operou em larga escala de 1976 a 1989. Em 1962, o *Edison Indian Point-I* iniciou suas operações utilizando tório enriquecido com ^{235}U e teve seu rejeito nuclear reprocessado na planta de reprocessamento de West Valley, nos Estados Unidos. Nos anos de 1970 e 1980, estudou-se a possibilidade de um reator LWR regenerador, utilizando ciclo de ^{233}U /tório, que apesar de atingir um fator de conversão de 1,0139, não se tornou comercial. A Alemanha também estudou o ciclo do tório desde o início da era nuclear e vários programas foram iniciados para utilização de tório em reatores LWR e HTR. O THTR-300 atingiu sua primeira criticalidade em 1983, utilizando combustível à base de tório e urânio. A irradiação de uma vareta de combustível teste com tório e plutônio (Th/Pu) foi irradiada no *Obrigheim Power Station*, na Alemanha, em um projeto desenvolvido no *Fifth Framework Programme* da União Européia, de 2000 a 2005. Em 2013, a *Thor Energy*, companhia norueguesa de energia, iniciou um programa de irradiação no reator *Hailden*, com o objetivo de qualificar o uso de combustível à base de

tório e plutônio para LWRs. No final de 2013, *Areva* (França) e *Solvay/Rhodia* (Brasil) acordaram em desenvolver um programa de pesquisa a respeito da utilização do tório para complementar o combustível à base de urânio/plutônio nos reatores de 3ª geração. Estas companhias têm inventário de tório na França, provenientes do urânio e extração de terras raras. O Canadá também tem desenvolvido, há vários anos, pesquisa sobre combustíveis à base de tório adicionado a constituintes físséis, tais como urânio e plutônio. O *Canadian Nuclear Laboratories* (CNL) iniciou um projeto importante com o objetivo de registrar a maior parte dos aspectos relacionados ao tório. Há ainda uma cooperação internacional na qual a IAEA coordena um projeto de pesquisa, intitulado “*Near-Term and Promising Long-Term Deployment of Thorium Energy Systems*” (OECD, 2015).

2.2 CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS SOBRE O TÓRIO

O tório, ^{232}Th , de acordo com a OECD (2015), é um nuclídeo denominado fértil, pois ao interagir com um nêutron térmico, tem maior probabilidade de absorvê-lo do que sofrer uma fissão, como ocorre com os nuclídeos físséis. Assim, o nuclídeo fértil, ao absorver um nêutron térmico, se transmuta em um nuclídeo mais pesado que pode ser físsil. O mesmo ocorre com o ^{238}U . Para o ^{232}Th , o nuclídeo físsil que aparece é o ^{233}U e para o ^{238}U é o ^{239}Pu .

Esses dois processos de “captura radiativa”, reações do tipo (n,γ) , seguido de decaimentos radioativos (β^-) representam os ciclos de combustível “fértil/físsil”: $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$ e $^{238}\text{U}/^{239}\text{Pu}$, conforme ilustrado na Figura 1 (OECD, 2015).

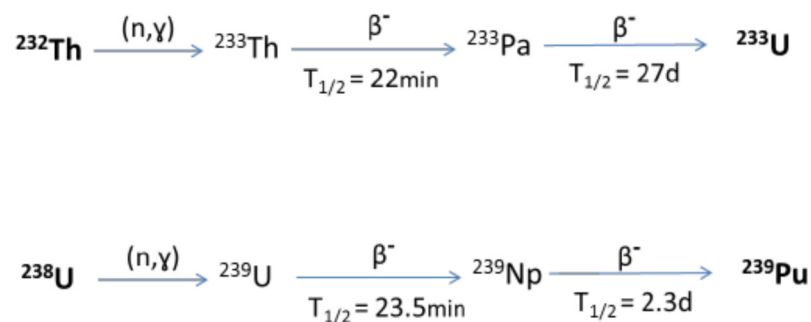


Figura 1 – Ciclos fértil/físsil para o tório e urânio

Fonte: (OECD, 2015).

Ainda de acordo com a OECD (2015), o ciclo de combustível baseado no tório, apesar de requerer um nuclídeo físsil para iniciar a reação em cadeia, deve se tornar autônomo ao longo da queima, com a produção do ^{233}U , que ocorre no tório fértil. Isto justifica a utilização da aproximação micro heterogênea neste trabalho, a qual fará com que haja uma separação espacial entre o tório e o urânio.

O fator de conversão (CR) é definida como a razão entre a taxa de consumo e a taxa de produção dos nuclídeos físsis no combustível de um reator em operação. Ao atingir a conversão ($\text{CR} \geq 1$), o reator funciona de forma independente, em um ciclo fechado de combustível. Em certas situações, é possível produzir mais material físsil do que é consumido em um reator ($\text{CR} > 1$). Valores da taxa de conversão de reatores PWR atuais variam de 0,5 a 0,6. Com a utilização de combustível MOX, os valores podem subir para 0,7. Mesmo sem atingir a regeneração, a utilização de combustível reprocessado no sentido de conseguir valores mais altos de taxa de conversão se torna desejável, em termos de melhor utilização dos recursos naturais (OECD, 2015).

2.3 REPROCESSAMENTO E RECICLAGEM

O reprocessamento é a operação de reaproveitamento dos nuclídeos a partir do combustível queimado para a fabricação de um novo combustível, que pode ser retornado ao reator para produzir mais energia, reciclagem. O combustível usado contém a maior parte do ^{238}U original, aproximadamente um terço do ^{235}U original, certa quantidade de plutônio, quase todos os produtos da fissão e elementos transurânicos ($Z > 92$). Esta operação é baseada, de forma simplificada, nos principais passos descritos na Figura 2 (TSOULFANIDIS, 2013).

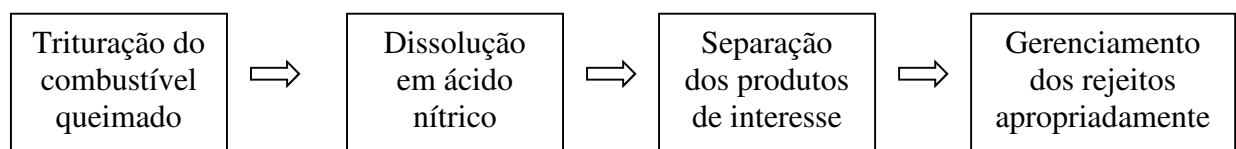


Figura 2 – Fluxograma do processo de reprocessamento (desenho da autora)

Conforme Gholamzadeh et al (2014), apesar de antigo, o interesse em inserir tório da matriz do combustível foi retomado atualmente, devido, principalmente, à preocupação a não proliferação, a necessidade de ciclos de combustível extensos, a uma maior queima e gerenciamento do rejeito nuclear. Neste contexto, para o combustível reprocessado caracterizado neste trabalho, considerou-se a matriz do combustível formado pelos materiais transurânicos, provenientes do combustível queimado padrão, após cinco anos de resfriamento e reprocessado através da técnica UREX +, diluído em tório.

A técnica de reprocessamento denominada UREX+ é proveniente do PUREX e constituído por cinco operações:

- (1) UREX: recuperação do tecnécio e urânio;
- (2) FPEX: recuperação de céscio e estrôncio;
- (3) NPEX: recuperação de plutônio e neptúnio;
- (4) TRUE: recuperação de amerício, cúrio e terras raras (produtos de fissão);
- (5) TALSPEAK: separação do amerício e do cúrio das terras raras.

Através desta técnica, é possível recuperar mais de 90% do urânio, mais de 95% do tecnécio e do iodo, mais de 97% do céscio e do estrôncio, mais de 99% do plutônio e neptúnio e aproximadamente 99,5% do amerício e do cúrio (ANL, 2004). Trata-se de um processo aquoso, cujo estágio de desenvolvimento está bem maduro. Ela é usada em plantas de reprocessamento na França, Japão e Reino Unido. A Figura 3 mostra as etapas de separação da técnica UREX +.

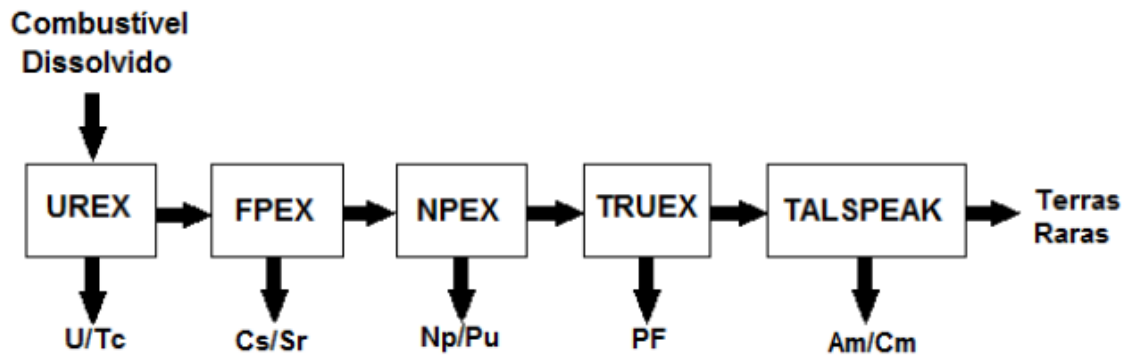


Figura 3 – Etapas de separação UREX +

Fonte: (VANDEGRIFT et al, 2004)

A variação do PUREX para obter-se o UREX foi concebida com o intuito de oferecer o tratamento de grandes quantidades de combustível queimado e para que U e Tc pudessem ser extraídos. Os elementos transurânicos, são refinados em meio aquoso, juntamente com os produtos de fissão. Neste processo, a solução contendo U é convertida em trióxido de urânio e o refinado aquoso contendo os transurânicos é evaporado e calcinado para produção do óxido, para tratamento posterior através da piroquímica, a fim de separar os transurânicos dos produtos de fissão. O refinado também alimenta os outros processos aquosos para recuperação do neptúnio e plutônio e também do célio e estrôncio (THOMPSON et al, 2002). Esta técnica apresenta uma vantagem quanto à questão da não proliferação, pois o plutônio não é separado dos elementos transurânicos após reprocessamento (MUSEMBIA et al, 2013).

O combustível reprocessado, pela técnica UREX+ sai com uma matriz com aproximadamente 52% de material físsil. Para reutilização, esse material pode ser diluído com urânio empobrecido ou com tório. Um aspecto interessante dos combustíveis alternativos é a lenta variação do fator de multiplicação dos combustíveis transurânicos em comparação com o do combustível de UO_2 do reator. Além disso, a diluição em tório, quando comparada com a diluição em urânio empobrecido, proporciona maior extensão da queima, já que para um mesmo conteúdo físsil inicial, o k_{eff} das misturas com tório situa-se acima do das misturas com urânio (FERREIRA, 2014).

2.4 DESCRIÇÃO DO CÓDIGO UTILIZADO

O sistema de códigos nucleares utilizado neste trabalho foi SCALE versão 6.0, *Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation* (BOWMAN, 2008). Este sistema foi desenvolvido no *Oak Ridge National Laboratory*, que estabelece que ele deveria estar relacionado com:

- (1) o projeto e as instalações do combustível nuclear;
- (2) a utilização de códigos de computadores bem estabelecidos e dados de bibliotecas;
- (3) a capacidade de projetar um formato de entrada adequado aos usuários;
- (4) o preparo de uma sequência de análise com módulos de controle e funcionais;
- (5) a capacidade de fornecer uma documentação completa e a disponibilidade pública.

É um sistema modular, ou seja, funciona através de módulos funcionais e de controle. Os módulos de controle processam os dados automaticamente e os funcionais os analisam em sequências. Essa estrutura permite um retorno das execuções dos módulos para a análise do sistema de forma automatizada e padronizada, evitando erros, já que a verificação é facilitada (BOWMAN, 2008). Nas simulações realizadas neste trabalho, foi utilizado o sistema de códigos SCALE, através dos módulos descritos a seguir. Através deles, os sistemas estudados foram modelados e os cálculos neutrônicos e de criticalidade foram efetuados, bem como o estudo da evolução do combustível.

O módulo de controle CSAS6, *Criticality Safety Analysis Sequence With KENO-VI*, foi utilizado para o cálculo do fator de multiplicação de nêutrons (k), no estado estacionário. Ele apresenta dados de entrada simples e prepara as sessões de choque para o cálculo do fator de multiplicação efetivo de um sistema tridimensional através do módulo funcional no SCALE que calcula o k_{eff} de sistemas tridimensionais (GOLUOGLU et al, 2008).

O módulo de controle TRITON foi utilizado para os cálculos de evolução do combustível. Ele foi desenvolvido em conjunto com o KENO-VI e o ORIGEN-S e permite cálculos da evolução do combustível. Pode ser usado para fornecer, automaticamente, o processamento de

problemas dependentes da seção de choque seguido do cálculo do fator de multiplicação (k) para uma configuração em duas dimensões usando o KENO-VI e, através do ORIGEN-S, fazer os cálculos de depleção para prever concentrações isotópicas, termo fonte e calor de decaimento, com variação de fluxo ao longo do tempo de forma determinística em 2-D ou de forma estocástica em 3-D (DeHART, 2009).

3 CÁLCULO DE CÉLULA

O estudo de sensibilidade das bibliotecas foi realizado para que a metodologia utilizada neste trabalho fosse validada e para que fosse escolhida a biblioteca mais adequada, disponível do código SCALE 6.0, a ser utilizada, segundo a composição do combustível usado. Este estudo é necessário, pois ao utilizar o tório na matriz do combustível, como é o caso deste trabalho, não são todas as bibliotecas que fornecerão os dados referentes aos elementos que se formam à medida que o combustível se queima.

Para tanto, foram utilizados dois *benchmarks*, um com combustível U/MOX e outro com combustível ThO₂-UO₂: “*Burn-up Credit Criticality Benchmark. Phase IV-A. Reactivity Prediction Calculations for Infinite Arrays of PWR MOX Fuel Pin Cells*” (OECD, 2003) e “*A PWR Thorium Pin Cell Burnup Benchmark*” (WEAVER et al, 2000), respectivamente. Estes dois *benchmarks* foram usados para comparar com o modelo desenvolvido nesta tese.

Esta análise seguiu as seguintes etapas:

- Modelagem da célula combustível de acordo com os *benchmarks*;
- Validação da metodologia;
- Modelagem da célula combustível de acordo com o reator de Angra 2;
- Inserção de combustível reprocessado diluído em tório nas células de combustível;
- Cálculo de criticalidade, de queima e evolução do combustível.
- Comparação dos modelos homogêneo e micro heterogêneo.

No cálculo de célula foram utilizadas as bibliotecas de energia contínua, ENDF/ B-VI e ENDF/B-VII, a ENDF/B-V colapsada de 44 grupos e a ENDF/B-VII colapsada de 238 grupos e os resultados para cada combustível, U/MOX e ThO₂-UO₂, foram comparados com os obtidos para os combustíveis reprocessados diluídos em tório.

Para identificar o impacto dos diferentes dados nucleares no cálculo da criticalidade no estado estacionário, a Média, o Desvio Padrão (DP) e o Desvio Padrão Relativo (DPR) do k_{inf} foram calculados utilizando as Equações (1), (2) e (3), respectivamente, onde L representa o número de participantes/número de bibliotecas e k_l o fator de multiplicação infinito de cada participante/biblioteca.

$$Média = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L k_l \quad (1)$$

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^L (k_l - Média)^2}{L}} \quad (2)$$

$$DPR = \frac{DP}{Média} \quad (3)$$

A descrição das geometrias utilizadas nos *benchmarks* é apresentada nas seções seguintes, bem como a comparação dos dados coletados, conforme descrito anteriormente.

3.1 DESCRIÇÃO DO BENCHMARK U/MOX

O *benchmark* “*Burn-up Credit Criticality Benchmark. Phase IV-A. Reactivity Prediction Calculations for Infinite Arrays of PWR MOX Fuel Pin Cells*” trata-se de uma investigação inicial dos efeitos de reatividade observado nos combustíveis MOX quando inseridos em células de combustível de reatores do tipo PWR. Os combustíveis MOX apresentados representam o atual interesse neste tipo de combustível (OECD, 2003).

- MOX tipo A, ou de primeira geração, é atribuído a uma matriz de plutônio derivado do reprocessamento de combustíveis UO_2 provenientes de reatores térmicos.
- MOX tipo B é atribuído ao plutônio proveniente do descarte de armas nucleares.
- MOX tipo C é um combustível hipoteticamente produzido a partir do plutônio reprocessado proveniente de combustíveis MOX queimados (OECD, 2003).

As densidades atômicas destes combustíveis estão apresentadas nas Tabelas 1 a 3.

Tabela 1 – Composição do Combustível MOX tipo A (OECD, 2003)

Isótopo	Densidade Atômica (átomos/ barn.cm)
U-234	2,7999E-07
U-235	5,8570E-05
U-238	2,3074E-02
Pu-238	2,4700E-05
Pu-239	8,0623E-04
Pu-240	3,1298E-04
Pu-241	1,6533E-04
Pu-242	5,3981E-05
O-16	4,8992E-02

Tabela 2 – Composição do Combustível MOX tipo B (OECD, 2003)

Isótopo	Densidade Atômica (átomos/ barn.cm)
U-234	2,8452E-07
U-235	5,9518E-05
U-238	2,3447E-02
Pu-238	4,8972E-07
Pu-239	9,1194E-04
Pu-240	5,8276E-05
Pu-241	3,8689E-06
Pu-242	4,8161E-07
O-16	4,8965E-02

Tabela 3 – Composição do Combustível MOX tipo C (OECD, 2003)

Isótopo	Densidade Atômica (átomos/ barn.cm)
U-234	2,7318E-7
U-235	5,7145E-5
U-238	2,2513E-2
Pu-238	7,8503E-5
Pu-239	7,0356E-4
Pu-240	5,4493E-4
Pu-241	2,3257E-4
Pu-242	3,8610E-4
O-16	4,9031E-2

A geometria da célula de combustível usada no *benchmark* está ilustrada na Figura 4. Ela consiste de uma pastilha de combustível de raio igual a 0,412 cm cercada por um revestimento de Zircaloy-4 de 0,063 cm de espessura, sem nenhum *gap* entre o combustível e o revestimento e está inserida em um cubo de 1,33 cm de lado, cercada por água.

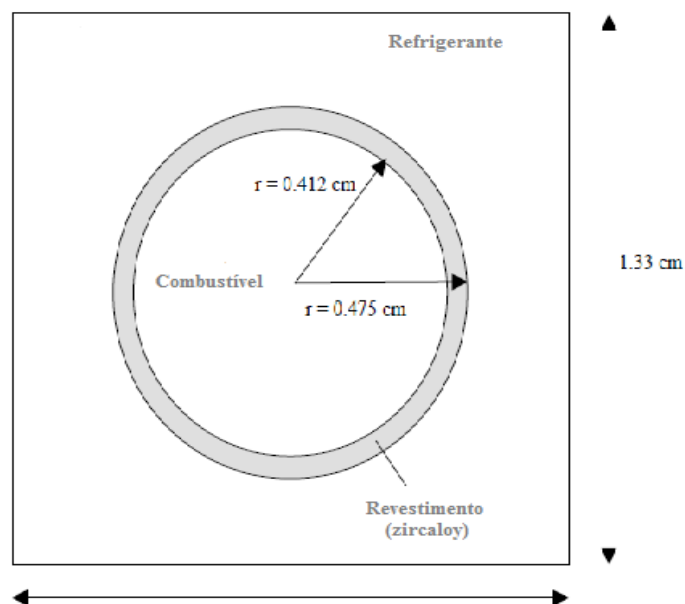


Figura 4 – Célula Combustível

Fonte: (OECD, 2003).

3.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA U/MOX

Os resultados apresentados no *benchmark* para os diferentes combustíveis MOX, foram comparados com os resultados obtidos das simulações realizadas neste trabalho através do código SCALE 6.0, utilizando o módulo CSAS 6 e serão nomeados como DEN. A modelagem da célula de combustível foi feita utilizando os mesmos dados de geometria e materiais do *benchmark*. A Figura 5 apresenta a célula combustível modelada.



Figura 5 – Célula combustível modelada

Para o cálculo do valor do fator de multiplicação infinito foi utilizado a sequência CSAS6 do código SCALE 6.0, considerando 5000 partículas e 243 gerações. Os valores obtidos para k_{inf} para as diferentes bibliotecas de seção de choque para neutrons, bem como os valores apresentados no *benchmark* e os cálculos do DP e do DPR, vêm apresentados nas Tabelas 4 a 9.

Tabela 4 - Comparação dos valores do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) de diversos países, códigos e bibliotecas de seção de choque para o MOX A (OECD, 2003).

PAÍS	INSTITUTO/ DEPARTAMENTO	CÓDIGO	BIBLIOTECA NEUTRÔNICA	k_{inf}	DP CÓDIGO (σ)
FRANÇA	EDF/DER	TRIPOLI-4	JEF2	1,3036	-
JAPÃO	PNC	KENO-Va	ENDF/B-V	1,2966	-
REINO UNIDO	BNFL	MONK7B	UKNDL	1,3012	-
REINO UNIDO	BNFL	WIMS7B	JEF2.2	1,2961	-
REINO UNIDO	BNFL	KENO-Va	ENDF/B-IV	1,3040	-
REINO UNIDO	BNFL	KENO-Va	ENDF/B-V	1,2996	-

Continuação da Tabela 4 - Comparação dos valores do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) de diversos países, códigos e bibliotecas de seção de choque para o MOX A (OECD, 2003).

PAÍS	INSTITUTO/ DEPARTAMENTO	CÓDIGO	BIBLIOTECA NEUTRÔNICA	k_{inf}	DP CÓDIGO (σ)
JAPÃO	JAERI	MVP94.1	JENDL-3.2	1,3029	-
JAPÃO	JAERI	SRAC95	JENDL-3,2	1,3038	-
FRANÇA	CEA	APOLLO2	JEF2.2	1,3045	-
ALEMANHA	SIEMENS	KENO-Va	ENDF/B-V	1,2986	-
ALEMANHA	SIEMENS	MCNP4B2	ENDF/B-VI	1,2999	-
REINO UNIDO	AEAT	WIMS7B	JEF2.2	1,2998	-
REINO UNIDO	AEAT	MONK7B	JEF2.2	1,3021	-
REINO UNIDO	AEAT	KENO-Va	ENDF/B-V	1,2984	-
PAÍS DE GALES	IPPE	WIMS/ABBN	FOND-2	1,2893	-
SUÉCIA	EMS	XSDRNPM	ENDF/B-V	1,2974	-
SUÉCIA	EMS	XSDRNPM	ENDF/B-IV	1,3000	-
SUÉCIA	EMS	XSDRNPM	ENDF/B-V	1,2916	-
FRANÇA	IPSN	APOLLO2	JEF2.2	1,3021	-
REINO UNIDO	DETR	MONK	UKNDL	1,3029	-
JAPÃO	NUPEC	ANISN	ENDF/B-IV/	1,3070	-
JAPÃO	NUPEC	XSDRNPM	JENDL-3.2	1,2943	-
JAPÃO	NUPEC	XSDRNPM	ENDF/B-V	1,2996	-
JAPÃO	NUPEC	MVP	ENDF/B-IV	1,3014	-
JAPÃO	NUPEC	MCNP4A	JENDL-3.2	1,3079	-
ESTADOS UNIDOS	ORNL	XSDRNPM	JENDL-3.2	1,2947	-
ESTADOS UNIDOS	ORNL	NEWT	ENDF/B-V	1,2980	-
ESTADOS UNIDOS	ORNL	KENO-Va	ENDF/B-V	1,2979	-
ESTADOS UNIDOS	ORNL	XSDRNPM	ENDF/B-V	1,2929	-
ESTADOS UNIDOS	ORNL	NEWT	ENDF/B-V	1,2989	-
ESTADOS UNIDOS	ORNL	KENO-Va	ENDF/B-V	1,2978	-
SUIÇA	PSI	BOXER	ENDF/B-V	1,3061	-
ESTADOS UNIDOS	ANL	VIM	JEF1	1,3108	-
COREIA	KEPCO	HELIOS	ENDF/B-VI	1,3037	-
HUNGRIA	KFKI	MCNP4C	ENDF/B-VI	1,2987	-
HUNGRIA	KFKI	MCNP4C	ENDF/B-VI	1,3042	-
SUIÇA	EMS	MCNP4C2	JEF2.2	1,2981	-

Continuação da Tabela 4 - Comparação dos valores do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) de diversos países, códigos e bibliotecas de seção de choque para o MOX A (OECD, 2003).

PAÍS	INSTITUTO/ DEPARTAMENTO	CÓDIGO	BIBLIOTECA NEUTRÔNICA	k_{inf}	DP CÓDIGO (σ)
BRASIL	DEN	KENO-VI	ENDF/ B-VI	1,2909	0,00033
BRASIL	DEN	KENO-VI	ENDF/ B-VII	1,29466	0,00034
BRASIL	DEN	KENO-VI	44 GRUPOS (V5-44) ¹	1,2936	0,00025
BRASIL	DEN	KENO-VI	238 GRUPOS (V5-238) ¹	1,29913	0,00028
BRASIL	DEN	KENO-VI	238 GRUPOS (V6-238) ²	1,29844	0,00026
BRASIL	DEN	KENO-VI	238 GRUPOS (V7-238) ³	1,30208	0,00027
MÉDIA			ANTERIOR	1,30017	
			ATUAL	1,29966	
DESVIO PADRÃO			ANTERIOR	0,00454	
			ATUAL	0,00462	
DESVIO PADRÃO RELATIVO			ANTERIOR	0,35%	
			ATUAL	0,36%	

Tabela 5 - Comparação dos valores obtidos no DEN do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) de diversas bibliotecas de seção de choque para o MOX A (OECD, 2003).

PAÍS	INSTITUTO/ DEPARTAMENTO	CÓDIGO	BIBLIOTECA NEUTRÔNICA	k_{inf}	DP CÓDIGO (σ)
BRASIL	DEN	KENO-VI	ENDF/ B-VI	0,00462	0,00034
BRASIL	DEN	KENO-VI	ENDF/ B-VII	0,00462	0,00025
BRASIL	DEN	KENO-VI	44 GRUPOS (V5-44) ¹	0,00462	0,00028
BRASIL	DEN	KENO-VI	238 GRUPOS (V5-238) ¹	0,00462	0,00026
BRASIL	DEN	KENO-VI	238 GRUPOS (V6-238) ²	0,00462	0,00027
BRASIL	DEN	KENO-VI	238 GRUPOS (V7-238) ³	0,00462	0,00034
MÉDIA					1,29647
DESVIO PADRÃO					0,00412
DESVIO PADRÃO RELATIVO					0,32%

¹ Colapsada da ENDF/B - V

² Colapsada da ENDF/B - VI

³ Colapsada da ENDF/B - VII

Tabela 6 - Comparação dos valores do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) de diversos países, códigos e bibliotecas de seção de choque para o MOX B (OECD, 2003).

PAÍS	INSTITUTO/ DEPARTAMENTO	CÓDIGO	BIBLIOTECA NEUTRÔNICA	k_{inf}	DP CÓDIGO (σ)
FRANÇA	EDF/DER	TRIPOLI-4	JEF2	1,4148	-
JAPÃO	PNC	KENO-Va	ENDF/B-V	1,4163	-
REINO UNIDO	BNFL	MONK7B	UKNDL	1,4100	-
REINO UNIDO	BNFL	WIMS7B	JEF2.2	1,4077	-
REINO UNIDO	BNFL	KENO-Va	ENDF/B-IV	1,4087	-
REINO UNIDO	BNFL	KENO-Va	ENDF/B-V	1,4221	-
JAPÃO	JAERI	MVP94.1	JENDL-3.2	1,4186	-
JAPÃO	JAERI	SRAC95	JENDL-3.2	1,4190	-
JAPÃO	CEA	APOLLO2	JEF2.2	1,4163	-
ALEMANHA	SIEMENS	KENO-Va	ENDF/B-V	1,4180	-
ALEMANHA	SIEMENS	MCNP4B2	ENDF/B-VI	1,4099	-
REINO UNIDO	AEAT	WIMS7B	JEF2.2	1,4108	-
REINO UNIDO	AEAT	MONK7B	JEF2.2	1,4136	-
REINO UNIDO	AEAT	KENO-Va	ENDF/B-V	1,4137	-
REINO UNIDO	IPPE	WIMS/ABBN	FOND-2	1,4012	-
SUÉCIA	EMS	XSDRNPM	ENDF/B-V	1,4161	-
SUÉCIA	EMS	XSDRNPM	ENDF/B-IV	1,4069	-
SUÉCIA	EMS	XSDRNPM	ENDF/B-V	1,4103	-
FRANÇA	IPSN	APOLLO2	JEF2.2	1,4153	-
REINO UNIDO	DETR	MONK	UKNDL	1,4080	-
JAPÃO	NUPEC	ANISN	ENDF/B-IV/	1,4162	-
JAPÃO	NUPEC	XSDRNPM	JENDL-3.2	1,4156	-
JAPÃO	NUPEC	XSDRNPM	ENDF/B-V	1,4060	-
JAPÃO	NUPEC	MVP	ENDF/B-IV	1,4194	-

Continuação da Tabela 6 - Comparação dos valores do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) de diversos países, códigos e bibliotecas de seção de choque para o MOX B (OECD, 2003).

PAÍS	INSTITUTO/ DEPARTAMENTO	CÓDIGO	BIBLIOTECA NEUTRÔNICA	k_{inf}	DP CÓDIGO (σ)
JAPÃO	NUPEC	MCNP4A	JENDL-3.2	1,4262	-
ESTADOS UNIDOS	ORNL	XSDRNPM	JENDL-3.2	1,4162	-
ESTADOS UNIDOS	ORNL	NEWT	ENDF/B-V	1,4180	-
ESTADOS UNIDOS	ORNL	KENO-Va	ENDF/B-V	1,4182	-
ESTADOS UNIDOS	ORNL	XSDRNPM	ENDF/B-V	1,4112	-
ESTADOS UNIDOS	ORNL	NEWT	ENDF/B-V	1,4154	-
ESTADOS UNIDOS	ORNL	KENO-Va	ENDF/B-V	1,4146	-
SUIÇA	PSI	BOXER	ENDF/B-V	1,4178	-
ESTADOS UNIDOS	ANL	VIM	JEF1	1,4146	-
COREA	KEPCO	HELIOS	ENDF/B-VI	1,4184	-
HUNGRIA	KFKI	MCNP4C	ENDF/B-VI	1,4111	-
HUNGRIA	KFKI	MCNP4C	ENDF/B-VI	1,4148	-
SUÉCIA	EMS	MCNP4C2	JEF2.2	1,4110	-
BRASIL	DEN	KENO-VI	ENDF/ B-VI	1,41066	0,0003
BRASIL	DEN	KENO-VI	ENDF/ B-VII	1,4164	0,0003
BRASIL	DEN	KENO-VI	44 GRUPOS (V5-44) ¹	1,41286	0,00023
BRASIL	DEN	KENO-VI	238 GRUPOS (V5-238) ¹	1,414	0,00027
BRASIL	DEN	KENO-VI	238 GRUPOS (V6-238) ²	1,41218	0,00026
BRASIL	DEN	KENO-VI	238 GRUPOS (V7-238) ³	1,41716	0,00026
MÉDIA			ANTERIOR	1,41411	
			ATUAL	1,41408	
DESVIO PADRÃO			ANTERIOR	0,00492	
			ATUAL	0,00463	
DESVIO PADRÃO RELATIVO			ANTERIOR	0,35%	
			ATUAL	0,33%	

¹ Colapsada da ENDF/B – V

² Colapsada da ENDF/B – VI

³ Colapsada da ENDF/B – VII

Tabela 7 - Comparação dos valores obtidos no DEN do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) de diversas bibliotecas de seção de choque para o MOX B (OECD, 2003).

PAÍS	INSTITUTO/ DEPARTAMENTO	CÓDIGO	BIBLIOTECA NEUTRÔNICA	k_{inf}	DP
					CÓDIGO (σ)
BRASIL	DEN	KENO-VI	ENDF/ B-VI	1,41066	0,0003
BRASIL	DEN	KENO-VI	ENDF/ B-VII	1,4164	0,0003
BRASIL	DEN	KENO-VI	44 GRUPOS (V5-44) ¹	1,41286	0,00023
BRASIL	DEN	KENO-VI	238 GRUPOS (V5-238) ¹	1,414	0,00027
BRASIL	DEN	KENO-VI	238 GRUPOS (V6-238) ²	1,41218	0,00026
BRASIL	DEN	KENO-VI	238 GRUPOS (V7-238) ³	1,41716	0,00026
MÉDIA					1,41388
DESVIO PADRÃO					0,00251
DESVIO PADRÃO RELATIVO					0,18%

¹ Colapsada da ENDF/B - V

² Colapsada da ENDF/B – VI

³ Colapsada da ENDF/B – VII

Tabela 8 - Comparação dos valores do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) de diversos países, códigos e bibliotecas de seção de choque para o MOX C (OECD, 2003).

PAÍS	INSTITUTO/ DEPARTAMENTO	CÓDIGO	BIBLIOTECA NEUTRÔNICA	k_{inf}	DP
					CÓDIGO (σ)
FRANÇA	EDF/DER	TRIPOLI-4	JEF2	1,2007	-
JAPÃO	PNC	KENO-Va	ENDF/B-V	1,1922	-
REINO UNIDO	BNFL	MONK7B	UKNDL	1,2038	-
REINO UNIDO	BNFL	WIMS7B	JEF2.2	1,1913	-
REINO UNIDO	BNFL	KENO-Va	ENDF/B-IV	1,2035	-
REINO UNIDO	BNFL	KENO-Va	ENDF/B-V	1,1947	-
JAPÃO	JAERI	MVP94.1	JENDL-3.2	1,1967	-
JAPÃO	JAERI	SRAC95	JENDL-3.2	1,1983	-
FRANÇA	CEA	APOLLO2	JEF2.2	1,2004	-
ALEMANHA	SIEMENS	KENO-Va	ENDF/B-V	1,1919	-
ALEMANHA	SIEMENS	MCNP4B2	ENDF/B-VI	1,1956	-

Continuação da Tabela 8 - Comparação dos valores do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) de diversos países, códigos e bibliotecas de seção de choque para o MOX C (OECD, 2003).

PAÍS	INSTITUTO/ DEPARTAMENTO	CÓDIGO	BIBLIOTECA NEUTRÔNICA	k_{inf}	DP CÓDIGO (σ)
REINO UNIDO	AEAT	WIMS7B	JEF2.2	1,1952	-
REINO UNIDO	AEAT	MONK7B	JEF2.2	1,198	-
REINO UNIDO	AEAT	KENO-Va	ENDF/B-V	1,1934	-
REINO UNIDO	IPPE	WIMS/ABBN	FOND-2	1,1827	-
SUÉCIA	EMS	XSDRNPM	ENDF/B-V	1,1887	-
SUÉCIA	EMS	XSDRNPM	ENDF/B-IV	1,1986	-
SUÉCIA	EMS	XSDRNPM	ENDF/B-V	1,1866	-
FRANÇA	IPSN	APOLLO2	JEF2.2	1,1973	-
REINO UNIDO	DETR	MONK	UKNDL	1,2031	-
JAPÃO	NUPEC	ANISN	ENDF/B-IV/	1,2032	-
JAPÃO	NUPEC	XSDRNPM	JENDL-3.2	1,1884	-
JAPÃO	NUPEC	XSDRNPM	ENDF/B-V	1,1985	-
JAPÃO	NUPEC	MVP	ENDF/B-IV	1,1965	-
JAPÃO	NUPEC	MCNP4A	JENDL-3.2	1,2014	-
ESTADOS UNIDOS	ORNL	XSDRNPM	JENDL-3.2	1,1887	-
ESTADOS UNIDOS	ORNL	NEWT	ENDF/B-V	1,1927	-
ESTADOS UNIDOS	ORNL	KENO-Va	ENDF/B-V	1,1911	-
ESTADOS UNIDOS	ORNL	XSDRNPM	ENDF/B-V	1,188	-
ESTADOS UNIDOS	ORNL	NEWT	ENDF/B-V	1,1948	-
ESTADOS UNIDOS	ORNL	KENO-Va	ENDF/B-V	1,1931	-
SUÍÇA	PSI	BOXER	ENDF/B-V	1,2011	-
ESTADOS UNIDOS	ANL	VIM	JEF1	1,2024	-

Continuação da Tabela 8 - Comparação dos valores do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) de diversos países, códigos e bibliotecas de seção de choque para o MOX C (OECD, 2003).

PAÍS	INSTITUTO/ DEPARTAMENTO	CÓDIGO	BIBLIOTECA NEUTRÔNICA	k_{inf}	DP CÓDIGO (σ)
COREA	KEPCO	HELIOS	ENDF/B-VI	1,1986	-
HUNGRIA	KFKI	MCNP4C	ENDF/B-VI	1,1956	-
HUNGRIA	KFKI	MCNP4C	ENDF/B-VI	1,2008	-
SUÉCIA	EMS	MCNP4C2	JEF2.2	1,1945	-
BRASIL	DEN	KENO-VI	ENDF/ B-VI	1,18468	0,00038
BRASIL	DEN	KENO-VI	ENDF/ B-VII	1,18716	0,00035
BRASIL	DEN	KENO-VI	44 GRUPOS (V5-44) ¹	1,18777	0,00023
BRASIL	DEN	KENO-VI	238 GRUPOS (V5-238) ¹	1,19472	0,00028
BRASIL	DEN	KENO-VI	238 GRUPOS (V6-238) ²	1,19406	0,00028
BRASIL	DEN	KENO-VI	238 GRUPOS (V7-238) ³	1,19696	0,00026
MÉDIA			ANTERIOR	1,19573	
			ATUAL	1,19506	
DESVIO PADRÃO			ANTERIOR	0,00530	
			ATUAL	0,00547	
DESVIO PADRÃO RELATIVO			ANTERIOR	0,44%	
			ATUAL	0,46%	

Tabela 9 - Comparação dos valores obtidos no DEN do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) de diversas bibliotecas de seção de choque para o MOX C (OECD, 2003)

PAÍS	INSTITUTO/ DEPARTAMENTO	CÓDIGO	BIBLIOTECA NEUTRÔNICA	k_{inf}	DP CÓDIGO (σ)
BRASIL	DEN	KENO-VI	ENDF/ B-VI	1,18468	0,00038
BRASIL	DEN	KENO-VI	ENDF/ B-VII	1,18716	0,00035
BRASIL	DEN	KENO-VI	44 GRUPOS (V5-44) ¹	1,18777	0,00023
BRASIL	DEN	KENO-VI	238 GRUPOS (V5-238) ¹	1,19472	0,00028
BRASIL	DEN	KENO-VI	238 GRUPOS (V6-238) ²	1,19406	0,00028
BRASIL	DEN	KENO-VI	238 GRUPOS (V7-238) ³	1,19696	0,00026
MÉDIA					1,19089
DESVIO PADRÃO					0,00498
DESVIO PADRÃO RELATIVO					0,42%

¹ Colapsada da ENDF/B - V

² Colapsada da ENDF/B - VI

³ Colapsada da ENDF/B - VII

Pode-se observar das Tabelas 4 a 9 referentes aos combustíveis MOX dos tipos A, B e C que os valores obtidos para o k_{inf} neste trabalho (DEN) utilizando as diferentes bibliotecas através do módulo KENO-VI, estão dentro do intervalo de valores obtidos por outras instituições, validando assim, o procedimento adotado.

O subítem a seguir utiliza outro *benchmark* para realizar a mesma análise, mas com a mistura ThO_2-UO_2 .

3.3 DESCRIÇÃO DO *BENCHMARK* ThO_2-UO_2

O *benchmark* “A PWR Thorium Pin Cell Burnup Benchmark” trata-se da análise de uma célula extraída de um elemento típico de um PWR *Westinghouse* de 17x17 varetas, na qual as pastilhas usuais de UO_2 foram substituídas por uma mistura de ThO_2-UO_2 . A Figura 6 traz o modelo representativo da célula deste PWR.

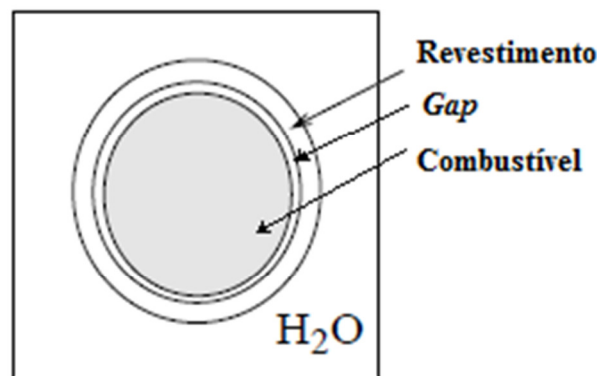


Figura 6 – Vareta Combustível

Fonte: (WEAVER et al, 2000).

As Tabelas 10 e 11 apresentam os parâmetros detalhados do modelo da célula para um PWR *Westinghouse*, apresentados no *benchmark* utilizado.

Tabela 10 – Parâmetros do Modelo da Célula de Combustível (PWR)

Parâmetro	Valor
Temperatura do Combustível (K)	900
Densidade de Potência (kW/kgHM)	38,1347
Densidade do Combustível (g/cm ³)	9,424
Temperatura do Revestimento (K)	621,1
Densidade do Revestimento (g/cm ³)	6,505
Pressão do Refrigerante (bar)	155,13
Temperatura do Refrigerante (K)	583,1
Densidade do Refrigerante (g/cm ³)	0,705
Raio da Pastilha de Combustível (mm)	4,1274
Raio Interno do Revestimento (mm)	4,1896
Raio Externo do Revestimento (mm)	4,7609
<i>Pitch</i> (mm)	12,626

Tabela 11 – Composições Iniciais (PWR)

	Isótopo	Peso Percentual (%)
	Th-232	65,909
	U-234	0,034
Combustível	U-235	5,49
	U-238	17,740
	O-16	12,026
Revestimento	Zr-4 (zircaloy -4)	100
Refrigerante	H-1	11.9
	O-16	88.81

3.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA ThO₂-UO₂

Da mesma forma que a anterior, os resultados apresentados no *benchmark* foram comparados com os resultados obtidos neste trabalho (DEN) com simulações realizadas através do código

SCALE 6.0. A modelagem da célula de combustível foi feita utilizando os mesmos dados de geometria e materiais do *benchmark*. A Figura 7 apresenta a célula combustível modelada.

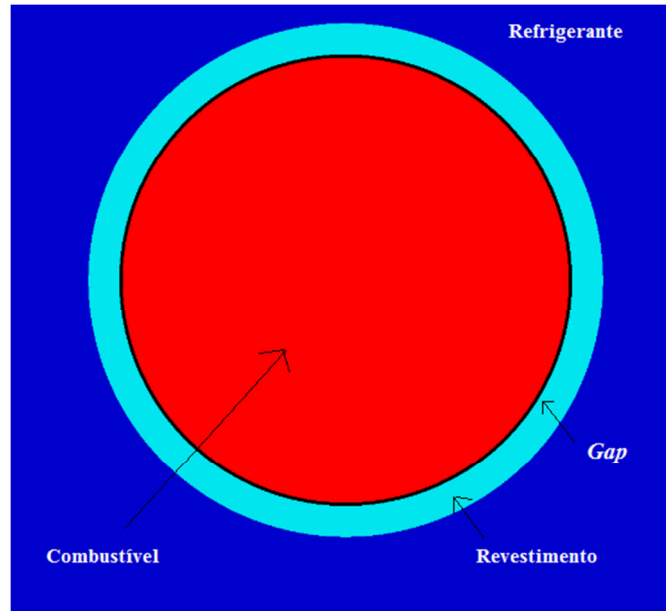


Figura 7 – Célula combustível modelada

Para o cálculo do valor do fator de multiplicação infinito foi utilizado a sequência CSAS6 do código SCALE 6.0, considerando 5000 partículas e 243 gerações. Os valores obtidos para k_{inf} para as diferentes bibliotecas, bem como os valores apresentados no *benchmark* e os cálculos do DP e do DPR, vêm apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Comparação dos valores do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) de diversos códigos e bibliotecas de seção de choque (WEAVER et al, 2000)

PAÍS	INSTITUTO/ DEPARTAMENTO	CÓDIGO	BIBLIOTECA NEUTRÔNICA	k_{inf}	DP
					CÓDIGO σ
USA	MIT	CASMO-4	ENDF/B-6	1,23782	-
USA	MIT	MOCUP	UTXS	1,23354	-
USA	INEEL	MOCUP	UTXS	1,22347	-
BRASIL	DEN	KENO-VI	ENDF/ B-VI	1,24682	0,00046
BRASIL	DEN	KENO-VI	ENDF/ B-VII	1,23886	0,00053
BRASIL	DEN	KENO-VI	44 GRUPOS (V5-44) ¹	1,23742	0,00044
BRASIL	DEN	KENO-VI	238 GRUPOS (V5-238) ¹	1,2357	0,00037
BRASIL	DEN	KENO-VI	238 GRUPOS (V6-238) ²	1,23834	0,00041
BRASIL	DEN	KENO-VI	238 GRUPOS (V7-238) ³	1,24985	0,00041
MÉDIA			ANTERIOR		1,23161
			ATUAL		1,23798
DESVIO PADRÃO			ANTERIOR		0,00737
			ATUAL		0,00755
DESVIO PADRÃO RELATIVO (ATUAL)			ANTERIOR		0,60%
			ATUAL		0,61%

¹ Colapsada da ENDF/B - V

² Colapsada da ENDF/B - VI

³ Colapsada da ENDF/B - VII

Pode-se observar da Tabela 12 que os valores obtidos para o k_{inf} utilizando as diferentes bibliotecas através do módulo KENO-6, estão, novamente, dentro do intervalo de valores obtidos por outras instituições, validando assim, o procedimento adotado.

A biblioteca escolhida foi a ENDF/B-VII colapsada em 238 grupos (V7-238), pois além de apresentar o desvio padrão próximo às outras bibliotecas, a mais completa: é a versão colapsada da biblioteca contínua mais atualizada, contém dados para todos os núclídeos, tem 148 grupos rápidos e 90 grupos térmicos. Além disso, nesta na versão do código SCALE, as bibliotecas contínuas ce_V6 e ce_V7 não podem ser usadas para cálculos de queima (DEHART, 2009).

3.5 – CÉLULA COM COMBUSTÍVEL REPROCESSADO DILUÍDO EM Th APLICADO A UMA CÉLULA DE ANGRA 2

Após sido validada a metodologia, os combustíveis reprocessados e diluídos em tório foram caracterizados e inseridos considerando três sistemas modelados: uma célula, um elemento e um núcleo.

Os sistemas foram modelados de acordo com os dados de Angra 2, contidos no *Final Safety Analysis Report* (Eletronuclear, 2013). Esta planta é de um reator PWR, projetado pela *KWU Group of Siemens Aktiengesellschaft* (Siemens), *Berlin und Munchen, Federal Republic of Germany* em conjunto com Eletrobras Termonuclear S.A – Eletronuclear, Rio de Janeiro.

A inserção dos combustíveis nos sistemas foi estudada através de dois modelos: um modelo homogêneo e um modelo heterogêneo. O comportamento do combustível reprocessado e diluído em tório foi comparado com o comportamento do combustível UO_2 em todos os sistemas modelados.

O primeiro sistema modelado foi o da célula combustível, descrito nos subitens 3.5.1 e 3.5.2. Os valores de k_{inf} para as células modeladas foram obtidos e comparados com os obtidos utilizando o combustível padrão UO_2 . A evolução do k_{inf} e da composição isotópica do combustível ao longo da queima também foram obtidos. As melhores configurações serão inseridas posteriormente no elemento combustível.

3.5.1 MODELO HOMOGÊNEO

A geometria da célula de combustível usada no modelo homogêneo consiste de uma pastilha de combustível de raio igual a 0,4583 cm cercada por um revestimento de *zircaloy-4* de 0,073 cm de espessura, com um *gap* entre o combustível e o revestimento, e está inserida em um cubo de 1,43 cm de lado, cercada por água, conforme ilustrado na Figura 8 (Eletronuclear, 2013).

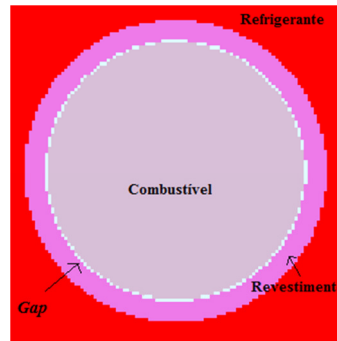


Figura 8 – Célula combustível: modelo homogêneo

Ainda de acordo com o FSAR (Eletronuclear, 2013), há três tipos distintos de células combustíveis no reator de Angra 2: o primeiro tipo contém combustível UO_2 com enriquecimento de 1,9%, o segundo tipo contém combustível UO_2 com enriquecimento de 2,5% e o terceiro tipo contém combustível UO_2 com enriquecimento de 3,2%, ocupando posições distintas. Dessa forma, foram modelados três tipos de células:

- CEL 01: célula com combustível UO_2 , 1,9% enriquecido;
- CEL 02: célula com combustível UO_2 , 2,5% enriquecido;
- CEL 03: célula com combustível UO_2 , 3,2% enriquecido.

Para a caracterização dos combustíveis reprocessados diluídos em tório, denominados TRU, considerou-se inicialmente a composição do combustível queimado UO_2 de um típico PWR, com enriquecimento inicial de 3,2%, após cinco anos de resfriamento (COTA E PEREIRA, 1997). Em seguida, o combustível queimado e resfriado foi teoricamente reprocessado através da técnica de reprocessamento UREX+, que conforme discutido anteriormente, é capaz de recuperar mais de 90% do urânio, mais de 95% do tecnécio e do iodo, mais de 97% do cério e do estrôncio, mais de 99% do plutônio e neptúnio e aproximadamente 99,5% do amerício e do cúrio. O combustível reprocessado foi então diluído em ^{232}Th , sendo que a quantidade de material físsil contida nele foi variada: iniciou-se em 1% e aumentou até atingir 30%, a fim de tornar o comportamento do combustível reprocessado similar aos dos combustíveis UO_2 , com os três enriquecimentos distintos.

Após modelagem das células, os cálculos de criticalidade no estado estacionário foram realizados através da sequência CSAS6 do SCALE 6.0, considerando 5000 partículas e 243 gerações.

A Tabela 13 apresenta os valores obtidos para k_{inf} correspondentes aos combustíveis reprocessados com as quantidades de material físsil de 13%, 21% e 27%, que apresentaram os valores mais próximos para k_{inf} em relação ao combustível UO_2 com enriquecimentos de 1,9%, 2,5% e 3,2%, respectivamente. As composições destes combustíveis estão apresentadas nas Tabelas 14 a 16.

Tabela 13 – Comparação dos valores obtidos para k_{inf} correspondente a cada combustível caracterizado com os obtidos para UO_2 com três enriquecimentos distintos: modelo homogêneo

COMBUSTÍVEL	k_{inf}	DP CÓDIGO (σ)
UO2 (1.9%)	1,23895	0,00053
UO2 (2.5%)	1,31755	0,00058
UO2 (3.2%)	1,37897	0,00060
TRU (13%)	1,23265	0,00054
TRU (21%)	1,31673	0,00051
TRU (27%)	1,37775	0,00052

Tabela 14 – Composição do Combustível TRU (13%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	69,625
Pu-238	0,319
Pu-239	9,321
Pu-240	3,908
Pu-241	2,112
Pu-242	1,112
Np-237	0,603
Am-241	0,646
Am-242m	0,001
Am-243	0,242
Cm-242	0,001
Cm-243	0,001
Cm-244	0,055
Cm-245	0,002
Cm-246	0,001
O-16	12,045

Tabela 15 – Composição do Combustível TRU (21%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	58,374
Pu-238	0,516
Pu-239	15,064
Pu-240	6,317
Pu-241	3,414
Pu-242	1,797
Np-237	0,974
Am-241	1,044
Am-242m	0,002
Am-243	0,392
Cm-242	0,001
Cm-243	0,001
Cm-244	0,090
Cm-245	0,004
Cm-246	0,001
O-16	12,002

Tabela 16 – Composição do Combustível TRU (27%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	49,929
Pu-238	0,663
Pu-239	19,375
Pu-240	8,125
Pu-241	4,392
Pu-242	2,312
Np-237	1,253
Am-241	1,343
Am-242m	0,003
Am-243	0,504
Cm-242	0,001
Cm-243	0,001
Cm-244	0,116
Cm-245	0,006
Cm-246	0,001
O-16	11,969

Estes combustíveis foram inseridos na célula modelada, queimados e o estudo da evolução do fator de multiplicação e do combustível ao longo da queima será comparado com o combustível reprocessado inserido no modelo micro heterogêneo, no subitem 3.5.3.

3.5.2 MODELO MICRO HETEROGÊNEO

A geometria da célula de combustível usada no modelo micro heterogêneo também foi modelada com os dados do reator de Angra 2, descrita no FSAR (ELETRONUCLEAR, 2013), porém com algumas modificações para que apresentasse uma aproximação micro heterogênea. Conforme discutido, anteriormente, a aproximação micro heterogênea é caracterizada por uma separação espacial de poucos milímetros ou centímetros entre o tório e o urânio em uma vareta de combustível. Dessa forma, duas configurações foram caracterizadas:

- A primeira configuração, denominada TRUOUT, apresenta a vareta de combustível em uma combinação micro heterogênea radial, a qual contém os combustíveis TRU e UO_2 . Nela, o UO_2 ocupa a parte interna, cujo raio mede 0,3240 cm, e o TRU a parte externa, cujo raio mede 0,4583 cm.
- A segunda configuração, denominada TRUIN, apresenta a vareta de combustível em uma combinação micro heterogênea radial, a qual contém os combustíveis TRU e UO_2 . Nela, o UO_2 ocupa a parte externa, cujo raio mede 0,4583 cm, e o TRU a parte interna, cujo raio mede 0,3240 cm.

Os volumes se conservam nas duas configurações. O que varia em cada configuração é a quantidade de material físsil. O enriquecimento do UO_2 se mantém constante (1,9%, 2,5% e 3,2%). A Figura 13 ilustra as configurações das varetas de combustível com aproximação micro heterogênea.

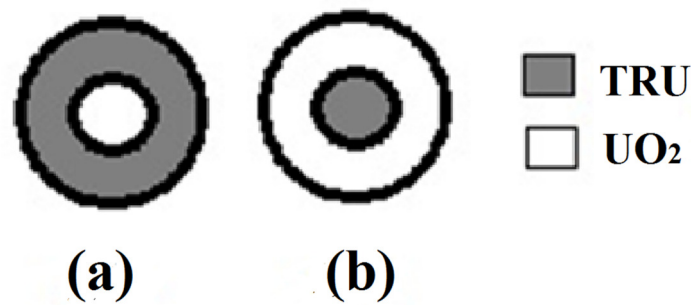


Figura 9 – Configurações das varetas de combustível modelo micro heterogêneo (fora de escala): (a) TRUOUT; (b) TRUIN

Foram modeladas seis células de combustível, considerando os diferentes enriquecimentos apresentados nas células do reator de Angra 2, da seguinte forma:

- CEL 01:
 - TRUOUT: célula combustível com aproximação micro heterogênea radial, contendo os combustíveis TRU, com quantidade de material físsil que variou de 15% a 50%, na parte externa e UO₂, com enriquecimento de 1,9% na parte interna;
 - TRUIN: célula combustível com aproximação micro heterogênea radial, contendo os combustíveis TRU, com quantidade de material físsil que variou de 15% a 50%, na parte interna e UO₂, com enriquecimento de 1,9% na parte externa;

- CEL 02:
 - TRUOUT: célula combustível com aproximação micro heterogênea radial, contendo os combustíveis TRU, com quantidade de material físsil que variou de 15% a 50%, na parte externa e UO₂, com enriquecimento de 2,5% na parte interna;
 - TRUIN: célula combustível com aproximação micro heterogênea radial, contendo os combustíveis TRU, com quantidade de material físsil que variou de 15% a 50%, na parte interna e UO₂, com enriquecimento de 2,5% na parte externa;

- CEL 03:
 - TRUOUT: célula combustível com aproximação micro heterogênea radial, contendo os combustíveis TRU, com quantidade de material físsil que variou de 15% a 50%, na parte externa e UO₂, com enriquecimento de 3,2% na parte interna;
 - TRUIN: célula combustível com aproximação micro heterogênea radial, contendo os combustíveis TRU, com quantidade de material físsil que variou de 15% a 50%, na parte interna e UO₂, com enriquecimento de 3,2% na parte externa.

Após modelagem das células, os cálculos de criticalidade no estado estacionário foram realizados, da mesma forma que a anterior. A Tabela 17 apresenta os valores obtidos para k_{inf} correspondentes aos combustíveis reprocessados com as quantidades de material físsil de 24%, 38% e 49% (modelo heterogêneo – configuração TRUOUT) e com as quantidades de material físsil de 20%, 34% e 44% (modelo heterogêneo – configuração TRUIN). Estes combustíveis estudados apresentaram os valores mais próximos para k_{inf} em relação ao combustível UO₂ com enriquecimentos de 1,9%, 2,5% e 3,2%, respectivamente. As composições destes combustíveis estão apresentadas nas Tabelas 18 a 23.

Tabela 17 – Comparação dos valores obtidos do k_{inf} correspondente a cada combustível com os obtidos para UO₂ com três enriquecimentos distintos: modelo micro heterogêneo.

COMBUSTÍVEL	CEL 01	CEL 02	CEL 03
UO ₂	1,23895 ± 0,00053	1,31755 ± 0,00058	1,37897 ± 0,00060
TRUOUT 24%	1,23390 ± 0,00054		
TRUOUT 38%		1,31494 ± 0,00053	
TRUOUT 49%			1,37986 ± 0,00054
TRUIN 20%	1,23625 ± 0,00053		
TRUIN 34%		1,31651 ± 0,00051	
TRUIN 44%			1,37524 ± 0,00051

Tabela 18 – Composição do Combustível TRUOUT (24%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	54,152
Pu-238	0,590
Pu-239	17,219
Pu-240	7,221
Pu-241	3,903
Pu-242	2,055
Np-237	1,114
Am-241	1,194
Am-242m	0,003
Am-243	0,448
Cm-242	0,001
Cm-243	0,001
Cm-244	0,103
Cm-245	0,005
Cm-246	0,001
O-16	11,986

Tabela 19 – Composição do Combustível TRUOUT (38%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	34,430
Pu-238	0,935
Pu-239	27,288
Pu-240	11,443
Pu-241	6,185
Pu-242	3,256
Np-237	1,765
Am-241	1,892
Am-242m	0,005
Am-243	0,710
Cm-242	0,001
Cm-243	0,002
Cm-244	0,163
Cm-245	0,008
Cm-246	0,001
O-16	11,910

Tabela 20 – Composição do Combustível TRUOUT (49%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	18,909
Pu-238	1,206
Pu-239	35,211
Pu-240	14,766
Pu-241	7,981
Pu-242	4,202
Np-237	2,278
Am-241	2,442
Am-242m	0,006
Am-243	0,917
Cm-242	0,001
Cm-243	0,002
Cm-244	0,211
Cm-245	0,011
Cm-246	0,001
O-16	11,850

Tabela 21 – Composição do Combustível TRUIN (20%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	59,781
Pu-238	0,491
Pu-239	14,346
Pu-240	6,016
Pu-241	3,252
Pu-242	1,712
Np-237	0,928
Am-241	0,994
Am-242m	0,002
Am-243	0,373
Cm-242	0,001
Cm-243	0,001
Cm-244	0,086
Cm-245	0,004
Cm-246	0,001
O-16	12,007

Tabela 22 – Composição do Combustível TRUIN (34%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	40,068
Pu-238	0,836
Pu-239	24,409
Pu-240	10,236
Pu-241	5,533
Pu-242	2,913
Np-237	1,579
Am-241	1,692
Am-242m	0,004
Am-243	0,635
Cm-242	0,001
Cm-243	0,001
Cm-244	0,146
Cm-245	0,007
Cm-246	0,001
O-16	11,932

Tabela 23 – Composição do Combustível TRUIN (44%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	25,967
Pu-238	1,083
Pu-239	31,608
Pu-240	13,255
Pu-241	7,165
Pu-242	3,772
Np-237	2,045
Am-241	2,192
Am-242m	0,005
Am-243	0,823
Cm-242	0,001
Cm-243	0,002
Cm-244	0,189
Cm-245	0,010
Cm-246	0,001
O-16	11,877

Os combustíveis reprocessados diluídos em tório que apresentaram os valores mais próximos para k_{inf} em relação ao combustível UO_2 , conforme apresentado, foram queimados e o estudo da evolução do fator de multiplicação e do combustível ao longo da queima foi realizado no subitem 3.5.3.

3.5.3 COMPARAÇÕES ENTRE OS MODELOS HOMOGÊNEO E MICRO HETEROGÊNEO

As células com combustíveis reprocessados com as quantidades de material físsil de 24%, 38% e 49% (modelo heterogêneo – configuração TRUOUT) e com as quantidades de material físsil de 20%, 34% e 44% (modelo heterogêneo – configuração TRUIN) foram escolhidos para serem queimados. Para a queima utilizou-se o módulo TRITON, do código SCALE 6,0, com uma potência específica constante de 38,0 GWd/MTU (Eletronuclear, 2013), durante 868,5 dias. As temperaturas utilizadas foram de 873 K para o combustível, 618 K para o revestimento e 583 K para o moderador (Eletronuclear, 2013). O estudo da evolução do fator de multiplicação da célula combustível e do combustível ao longo da queima foi realizado e o resultado foi comparado com o do combustível UO_2 . As Figuras 10 a 15 apresentam a evolução do k_{inf} ao longo da queima das células combustíveis CEL 01, CEL 02 e CEL 03. Para melhor visualização do comportamento dos combustíveis reprocessados e diluídos em tório, já que se mostraram similares, apresentou-se também o comportamento deles separados do UO_2 , para todas as células combustíveis.

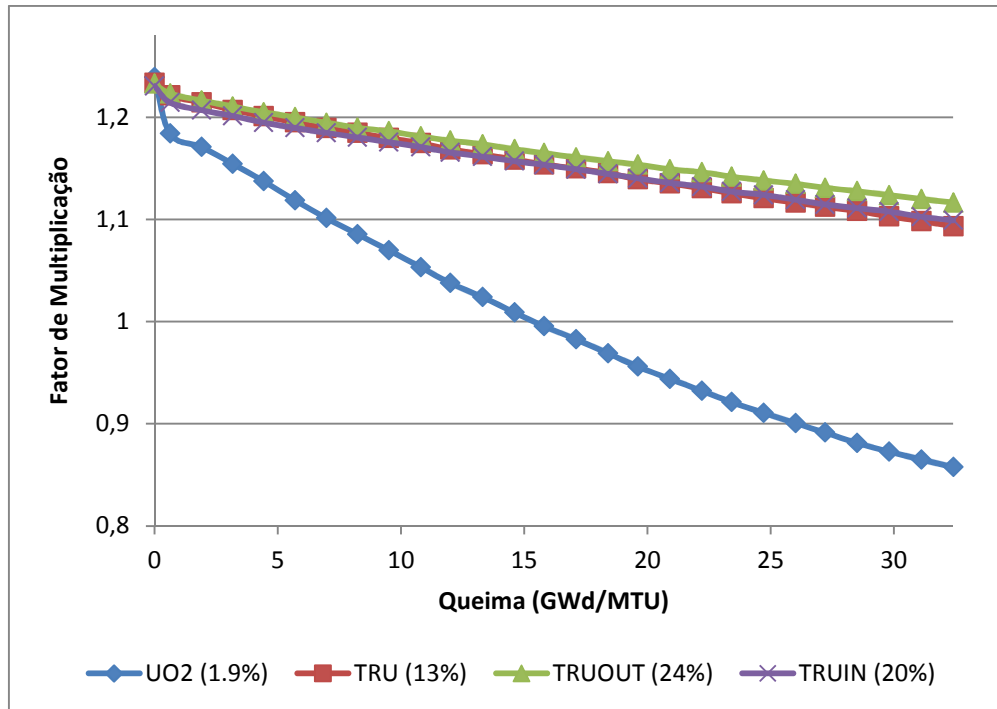


Figura 10 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis UO_2 (1,9%), TRU (13%), TRUOUT (24%) e TRUIN (20%) para a CEL 01.

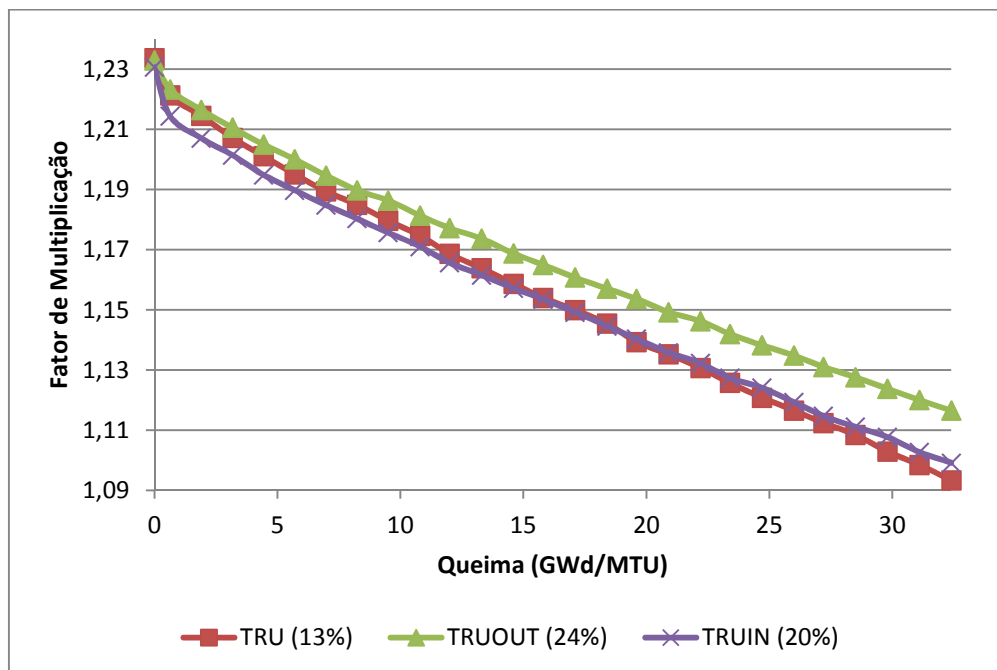


Figura 11 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis TRU (13%), TRUOUT (24%) e TRUIN (20%) para a CEL 01.

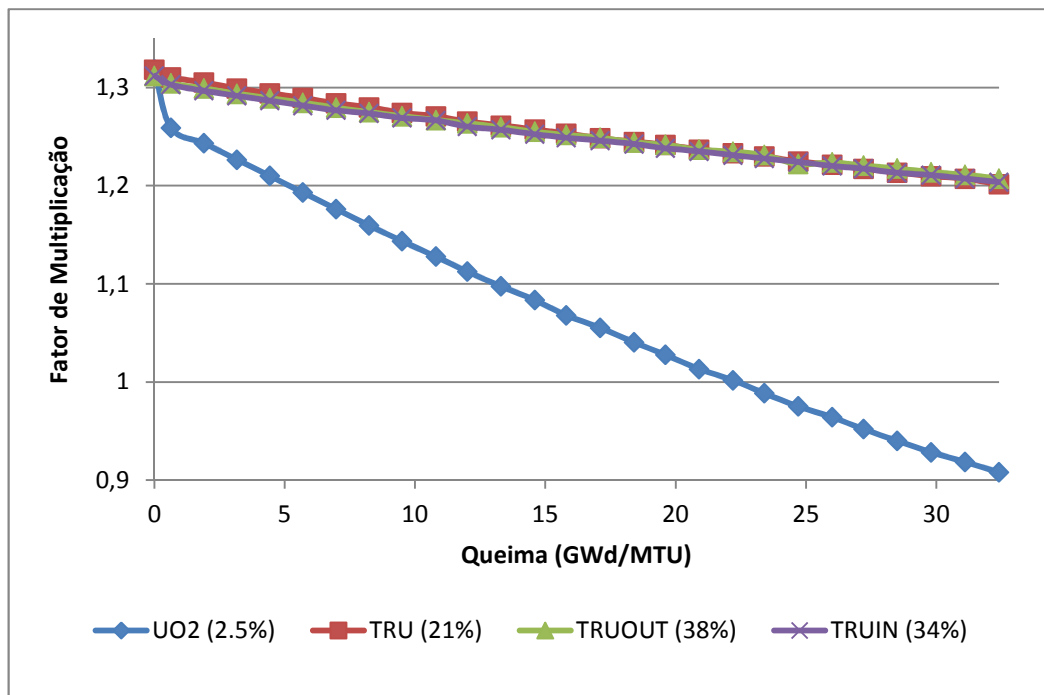


Figura 12 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis UO_2 (2,5%), TRU (21%), TRUOUT (38%) e TRUIN (34%) para a CEL 02.

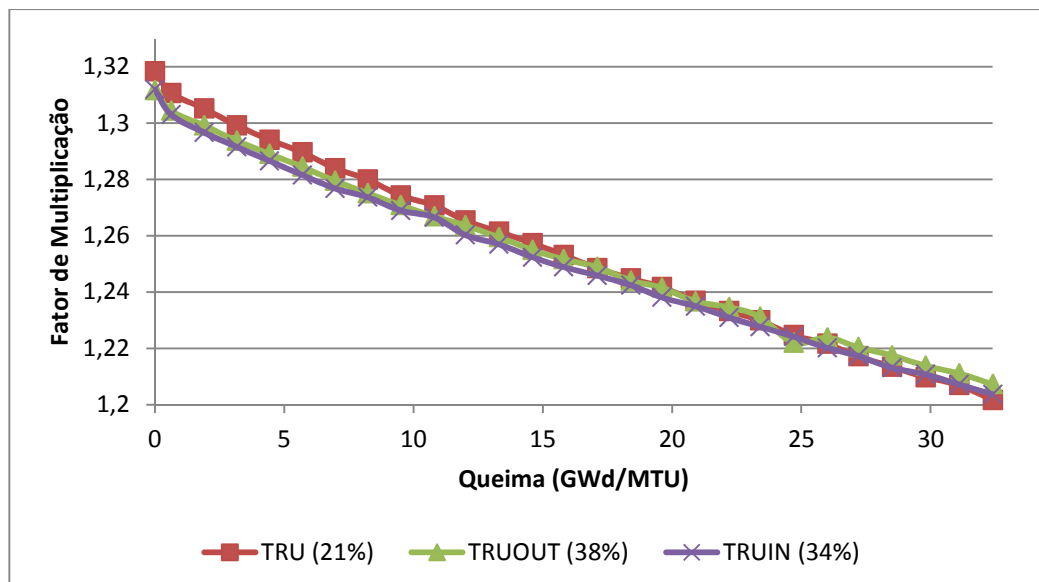


Figura 13 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis TRU (21%), TRUOUT (38%) e TRUIN (34%) para a CEL 02.

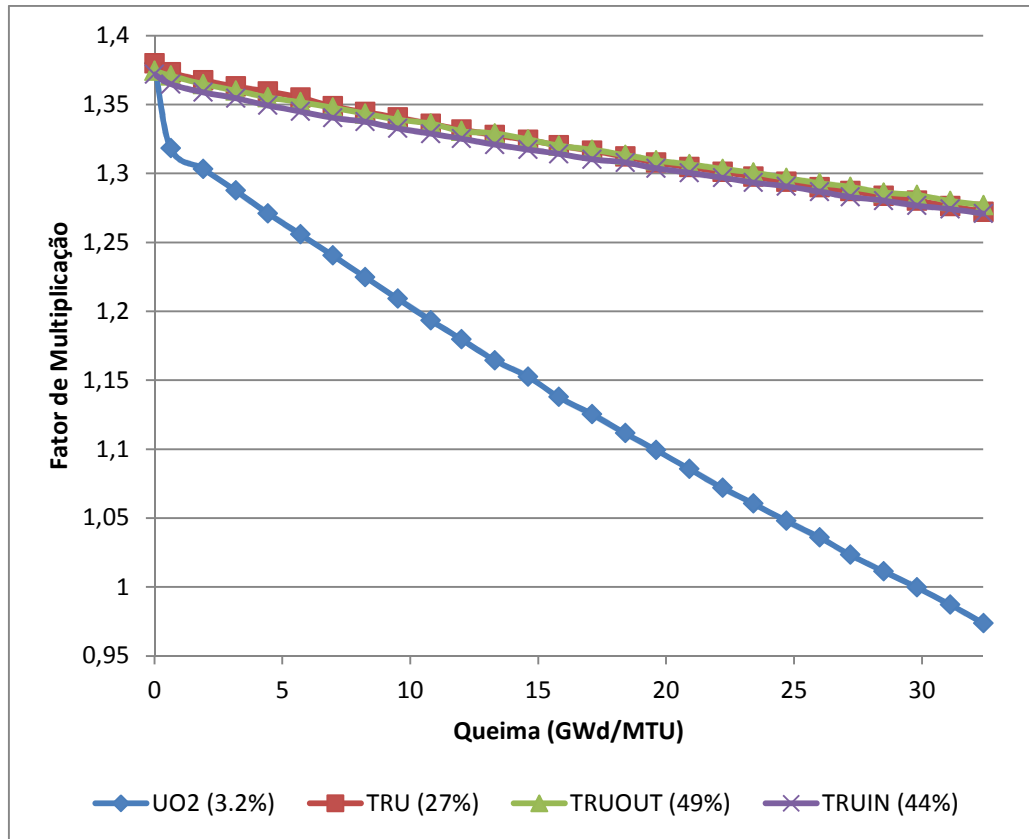


Figura 14 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis UO_2 (3,2%), TRU (27%), TRUOUT (49%) e TRUIN (44%) para a CEL 03.

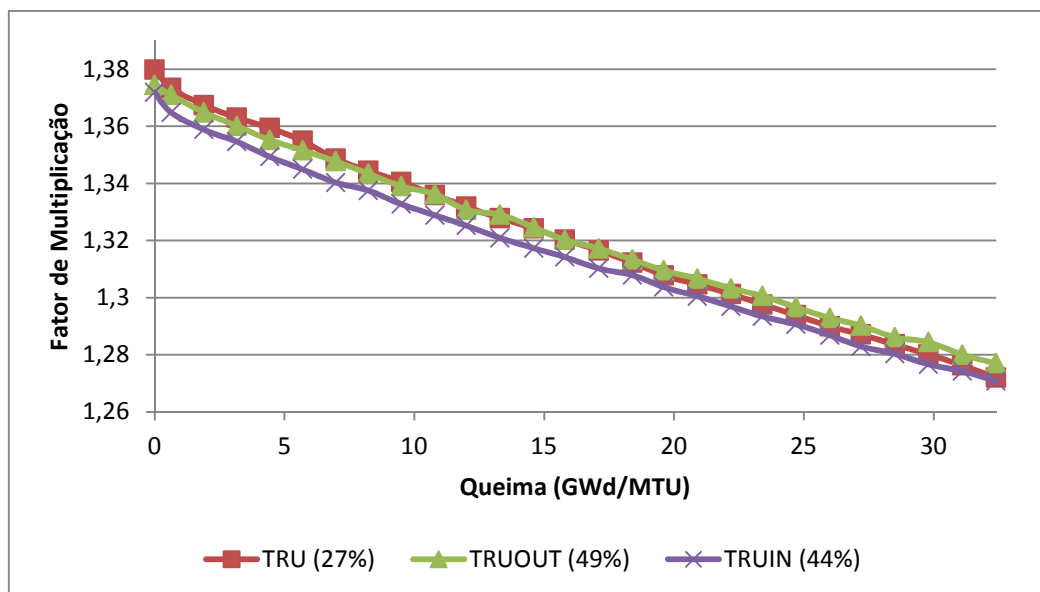


Figura 15 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis UO_2 (3,2%), TRU (27%), TRUOUT (49%) e TRUIN (44%) para a CEL 03.

TRUOUT (49%) e TRUIN (44%) para a
CEL 03.

Observa-se das Figuras 10 a 15, que, para todas as células, que a variação do fator de multiplicação em função da queima dos combustíveis reprocessados e diluídos em tório (TRU, TRUOUT e TRUIN), quando comparada com o do combustível de UO_2 , é mais lenta, sugerindo uma possibilidade de extensão da queima. Ainda é necessário analisar o comportamento dos modelos homogêneo e micro heterogêneo em um elemento combustível, no qual há presença de absorvedores. Essa análise será feita no próximo capítulo.

As Figuras 16 a 21 apresentam a variação da composição isotópica de cada combustível escolhido, inserido nas células combustíveis. Para tanto, considerou-se a subtração entre a massa total dos isótopos presentes no combustível após e antes da queima. As figuras apresentam também a variação dos nuclídeos sem contabilizar o ^{232}Th , para visualizar melhor o percentual em todas as células dos outros isótopos ou actinídeos.

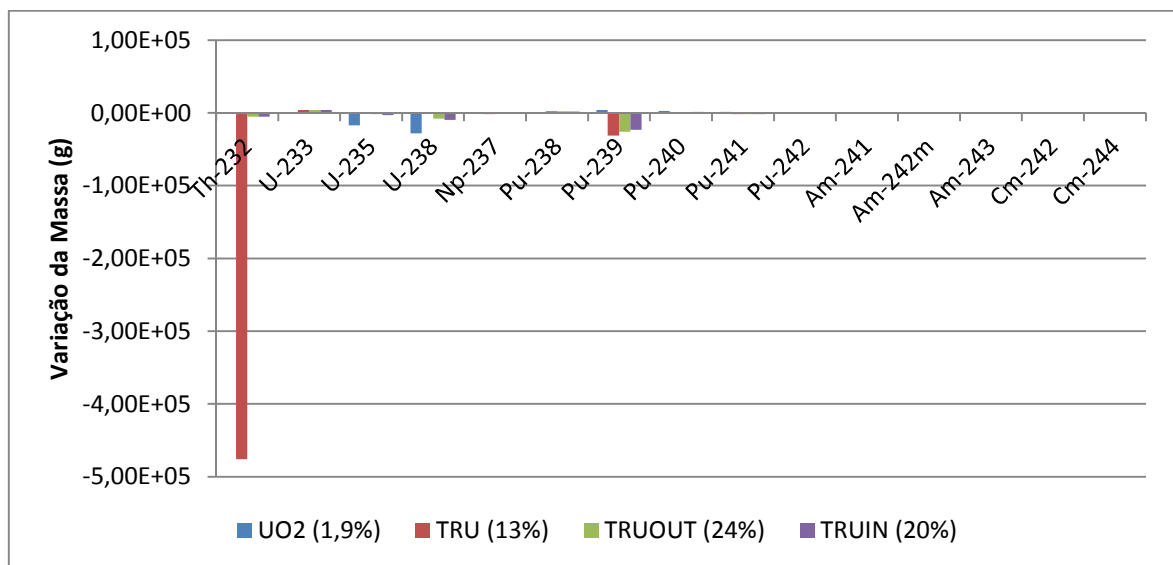


Figura 16 – Variação da massa dos nuclídeos para os combustíveis da célula CEL 01.

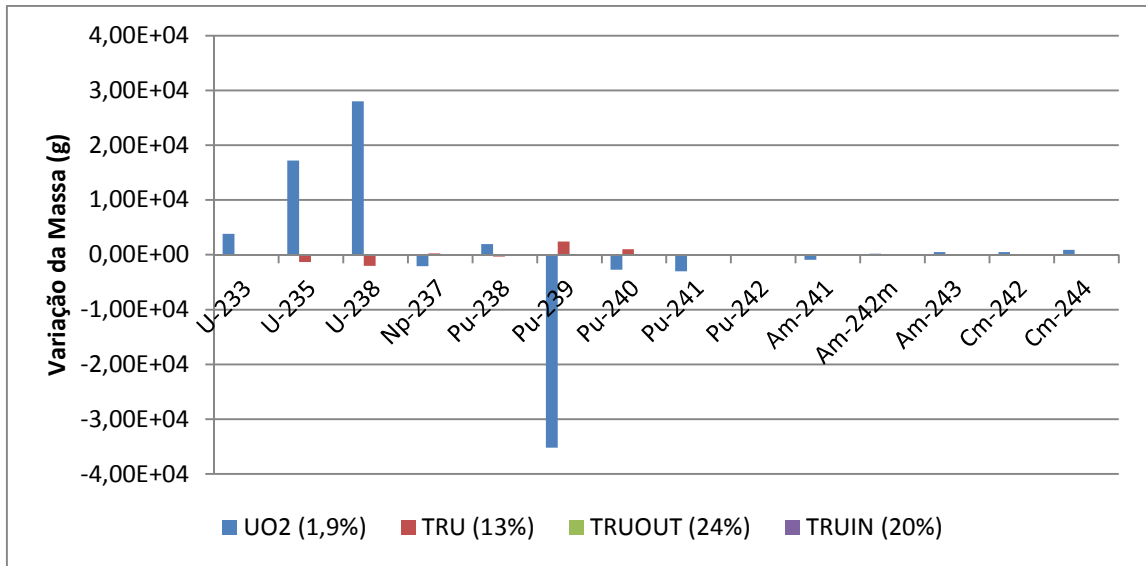


Figura 17 – Variação da massa dos nuclídeos, com exceção do ^{232}Th , para os combustíveis da célula CEL 01.

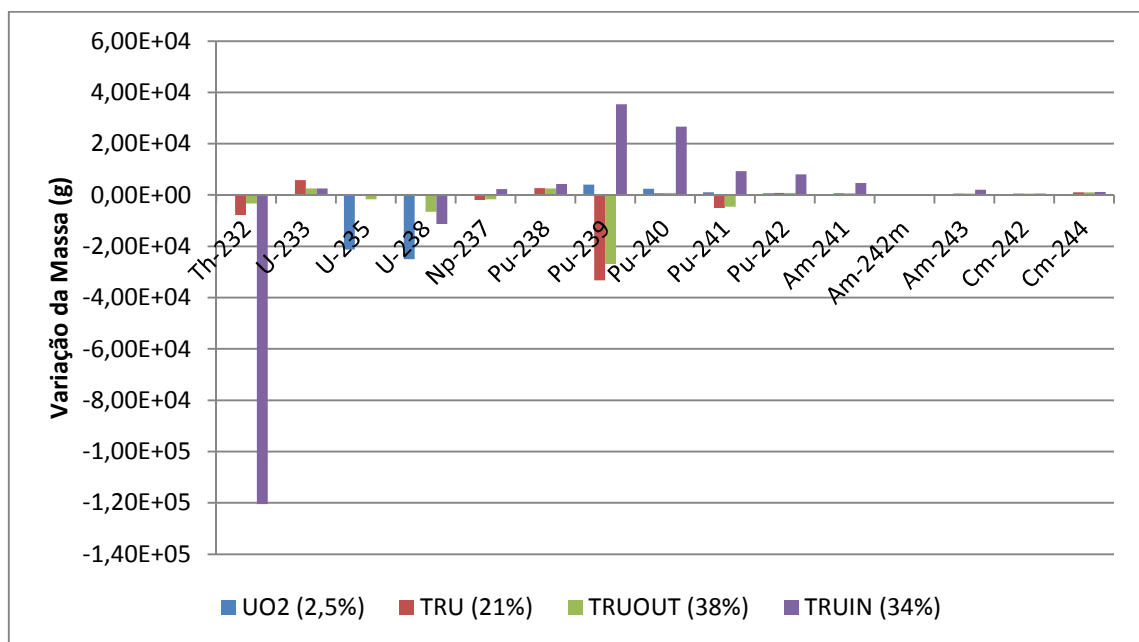


Figura 18 – Variação da massa dos nuclídeos para os combustíveis da célula CEL 02.

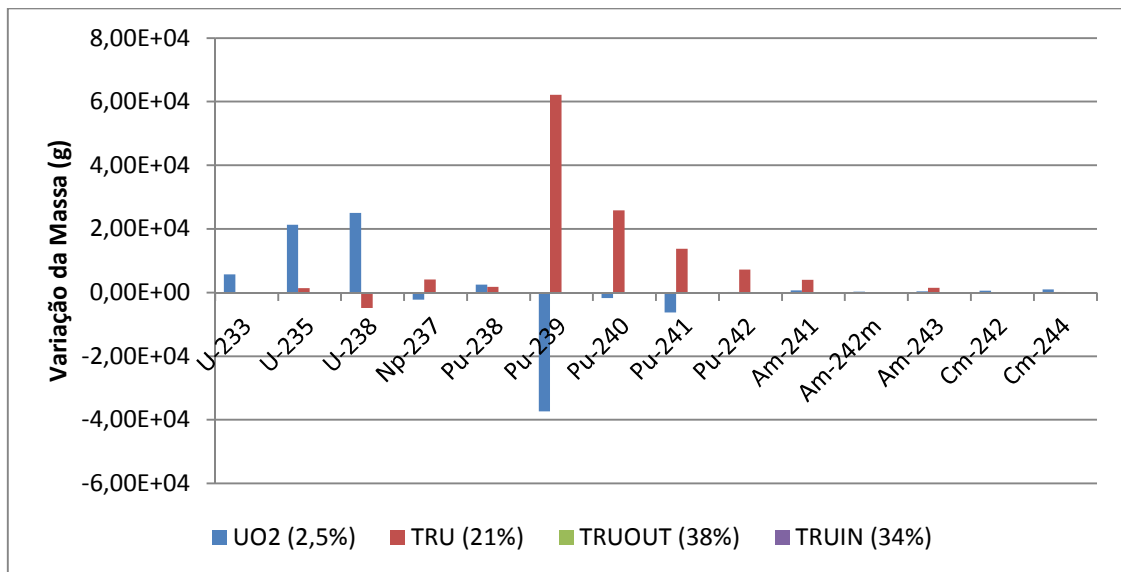


Figura 19 – Variação da massa dos núclídeos, com exceção do ^{232}Th , para os combustíveis da célula CEL 02.

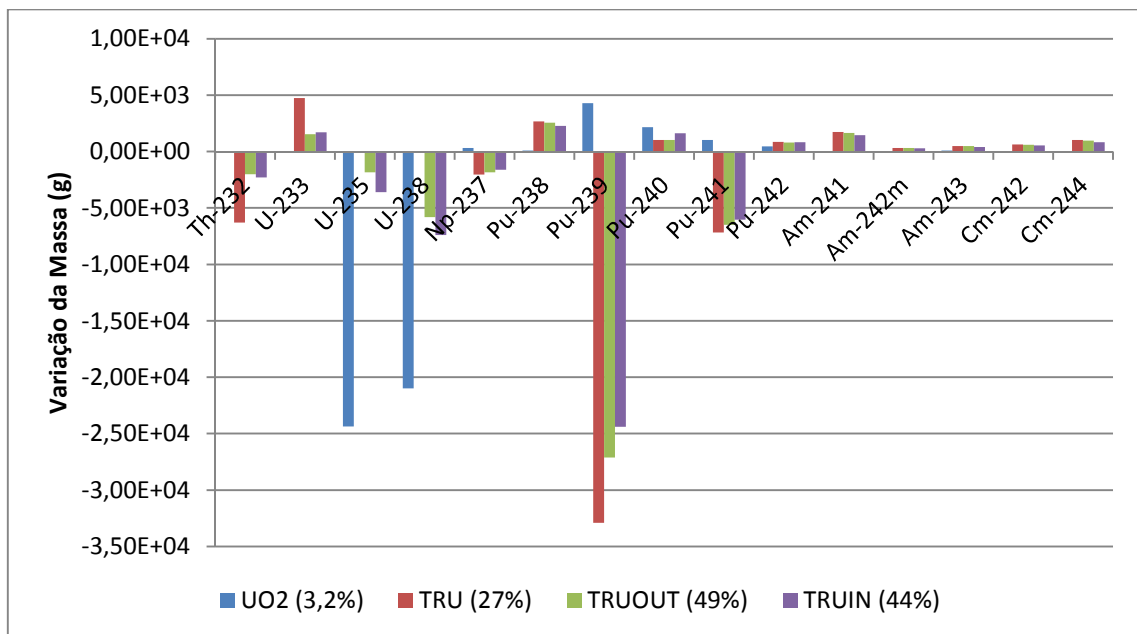


Figura 20 – Variação da massa dos núclídeos para os combustíveis da célula CEL 03.

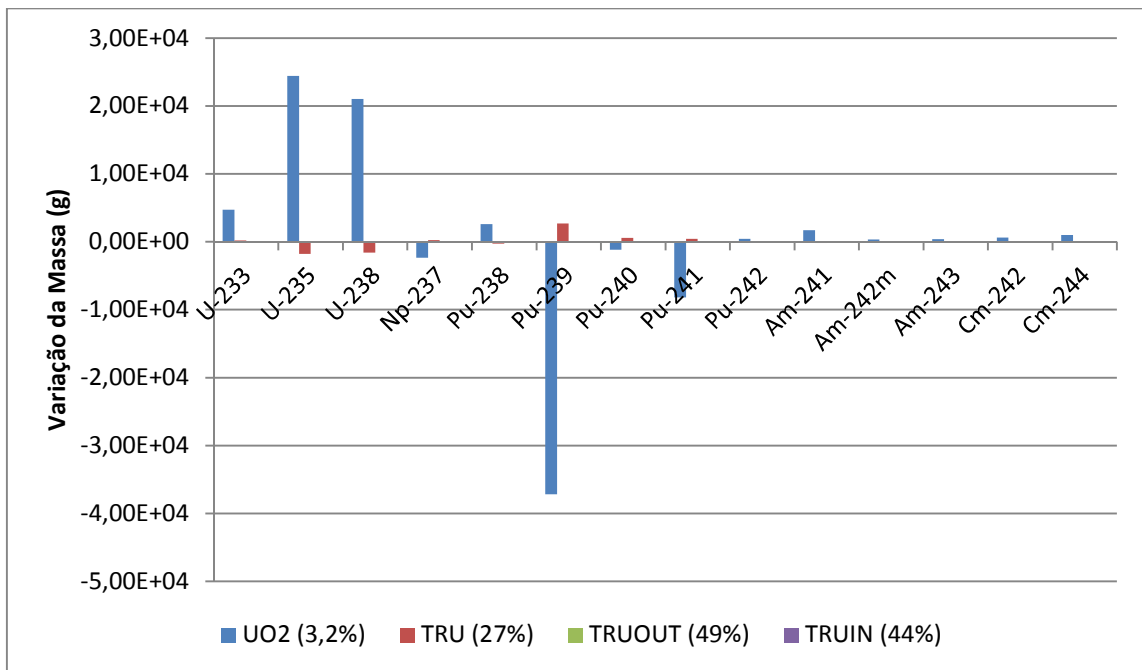


Figura 21 – Variação da massa dos nuclídeos, com exceção do ^{232}Th , para os combustíveis da célula CEL 03.

Observa-se nas figuras anteriores que a variação da composição isotópica foi similar para os três tipos de célula.

Para o combustível UO_2 , houve aumento de massa dos nuclídeos ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu e diminuição de massa dos nuclídeos ^{235}U e ^{238}U .

Para os combustíveis TRU, TRUOUT e TRUIN houve aumento de massa dos nuclídeos ^{233}U , ^{238}Pu , ^{242}Pu , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{243}Am , ^{242}Cm e ^{244}Cm e diminuição de massa dos nuclídeos ^{232}Th , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu e ^{241}Am .

4 AVALIAÇÃO DE UM ELEMENTO COMBUSTÍVEL COM COMBUSTÍVEL REPROCESSADO DILUÍDO EM TÓRIO

Após análise da inserção de combustível reprocessado diluído em tório em dois modelos distintos de célula combustível, homogêneo e micro heterogêneo, e comparada com uma célula de combustível contendo UO_2 , foi realizada a análise da inserção de combustível reprocessado diluído em tório em dois modelos de elemento combustível, ou seja, homogêneo e micro heterogêneo.

Esta análise seguiu as seguintes etapas:

- Modelagem dos elementos combustíveis: modelos homogêneo e micro heterogêneo;
- Inserção de combustível reprocessado diluído em tório em substituição ao combustível UO_2 nas células de combustível do elemento combustível;
- Cálculo de criticalidade, de queima e evolução isotópica do combustível.
- Comparação entre os modelos.

4.1 DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS MODELADOS

4.1.1 MODELO HOMOGENEO

Os elementos combustíveis modelados, conforme discutido anteriormente, apresentam os mesmos dados que os do reator de Angra 2. De acordo com a Eletronuclear (2013), este reator é do tipo PWR e é composto por 193 elementos combustíveis e 61 barras de controle. Dos 193 elementos, 69 são compostos por varetas de combustível UO_2 com enriquecimento de 1,9%, 68 varetas com enriquecimento de 2,5% e 56 varetas com enriquecimento de 3,2%. Todos os elementos contêm 20 tubos guia, alguns contêm 8 varetas de veneno queimável (Gd_2O_3) e outros contêm 12 varetas de veneno queimável (Gd_2O_3). Ele é moderado a água leve (H_2O), que também atua como refrigerante, fluindo de modo ascendente pelo núcleo do reator. Cada elemento combustível contém 16 x 16 varetas.

Dessa forma, foram modelados seis tipos de elementos combustíveis:

- ELE 01: elemento combustível UO_2 , 1,9% enriquecido, sem veneno queimável;
- ELE 02: elemento combustível UO_2 , 2,5% enriquecido, sem veneno queimável;
- ELE 03: elemento combustível UO_2 , 2,5% enriquecido, com 12 varetas de veneno queimável (Gd_2O_3);
- ELE 04: elemento combustível UO_2 , 3,2% enriquecido, sem veneno queimável;
- ELE 05: elemento combustível UO_2 , 3,2% enriquecido, com 8 varetas de veneno queimável (Gd_2O_3);
- ELE 06: elemento combustível UO_2 , 3,2% enriquecido, com 12 varetas de veneno queimável (Gd_2O_3);

A Tabela 24 apresenta os principais parâmetros do núcleo e as Figuras 22 a 27 ilustram os seis tipos de elemento combustível modelados.

Tabela 24 - Principais Parâmetros da Unidade II da Planta Nuclear de Angra

1. Reator		
Potência Térmica	MW	3765
Pressão de Operação	bar	158
Número de Elementos Combustível		193
Número de Barras de Controle		61
2. Elemento Combustível (Comprimentos a T=20°C)		
Tipo de Elemento Combustível (EC)		16x16
<i>Pitch</i>	mm	230.0
<i>Pitch</i> da Vareta	mm	14.3
Comprimento Ativo da Vareta	cm	390.0
Material do Veneno Queimável		Gd ₂ O ₃
Material do Revestimento		Zry-4
Material do Tubo Guia		Zry-4
Número por EC dentro do Comprimento Ativo		7
Material		Zry4/Inc.718
3. Varetas de Controle <i>Cluster</i>		
Absorvedor neutrônico		Ag-In-Cd
Número de varetas absorvedoras por <i>Cluster</i>		20
Material		Aço Inoxidável-4541

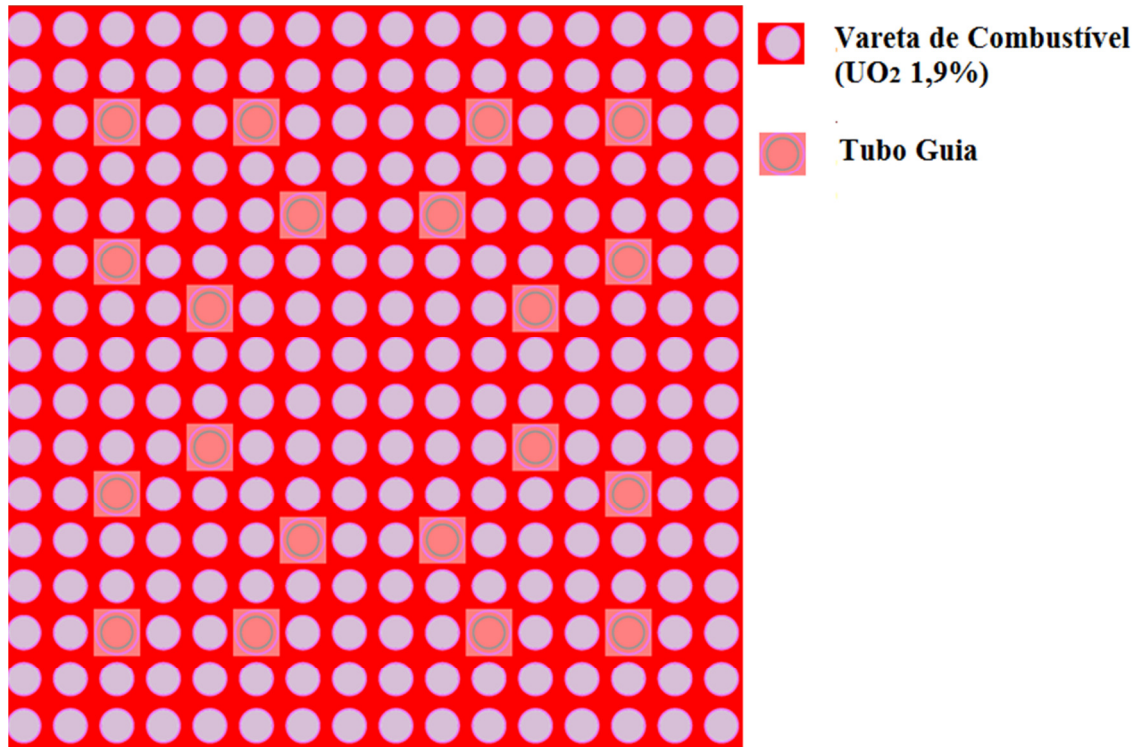


Figura 22 – Elemento Combustível modelado:
ELE 01

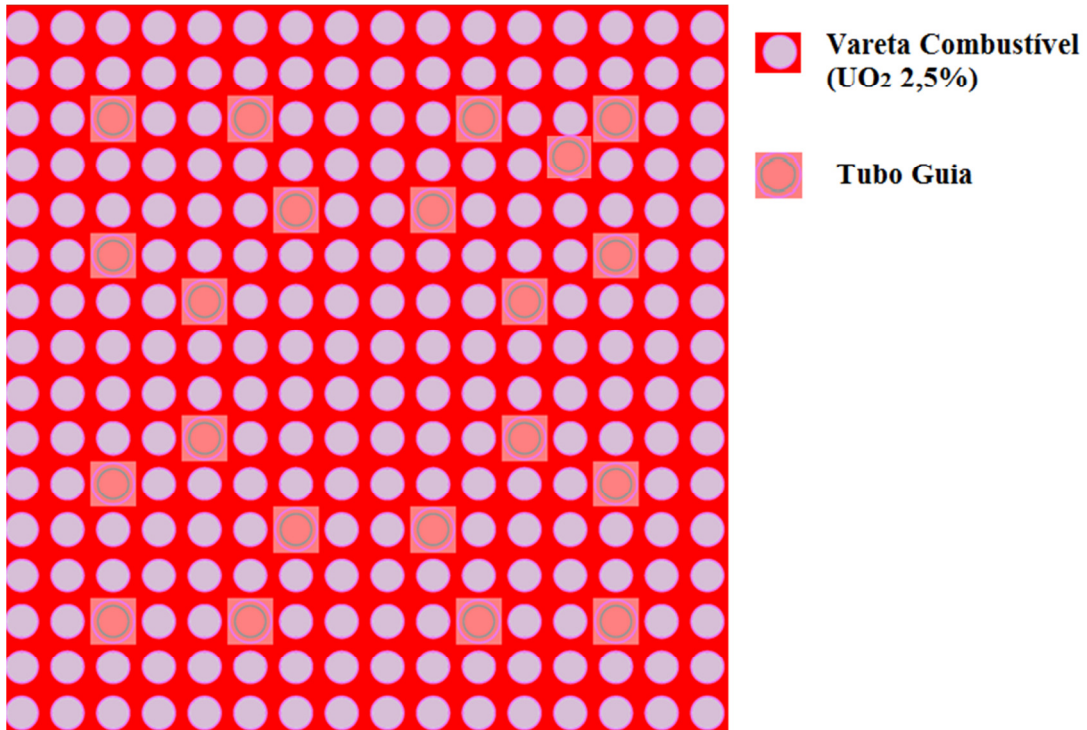


Figura 23 – Elemento Combustível modelado:
ELE 02

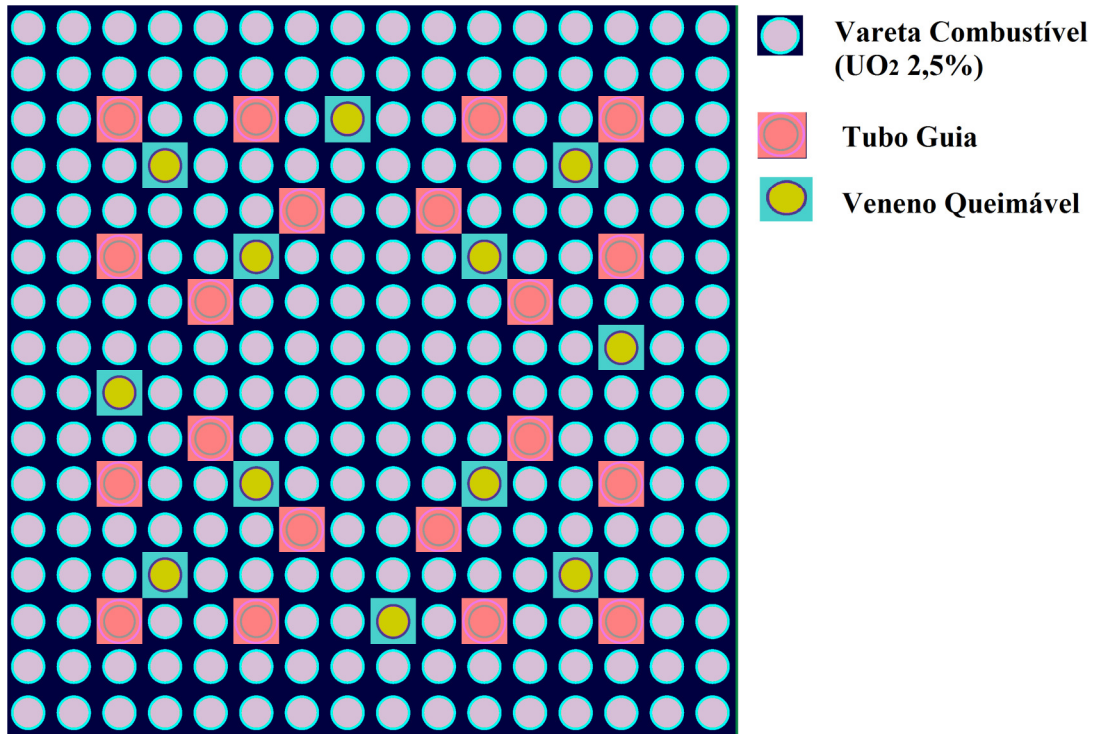


Figura 24 – Elemento Combustível modelado:
ELE 03

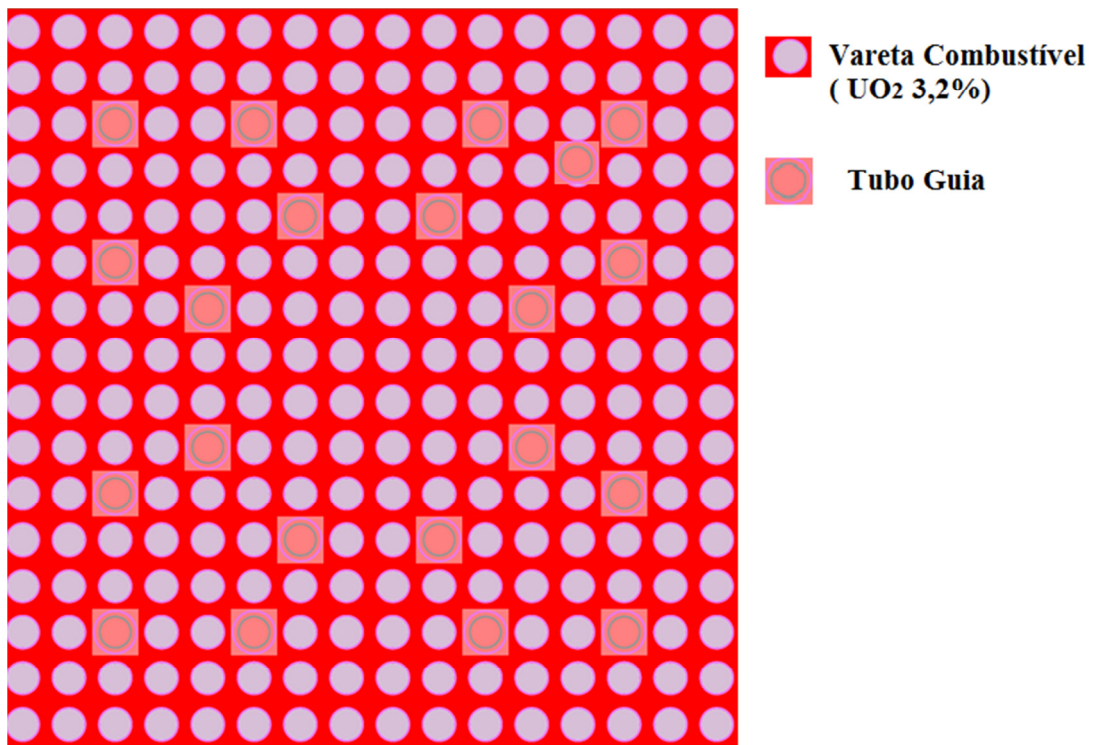


Figura 25 – Elemento Combustível modelado:
ELE 04

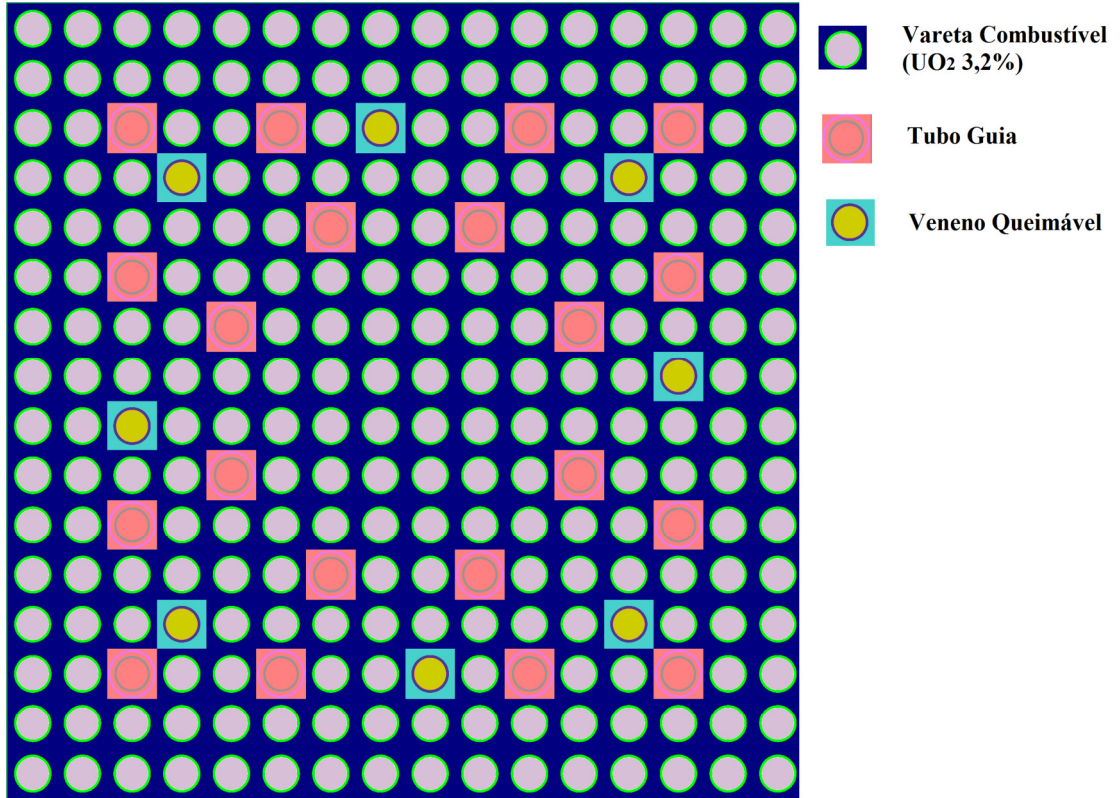


Figura 26 – Elemento Combustível modelado:
ELE 05

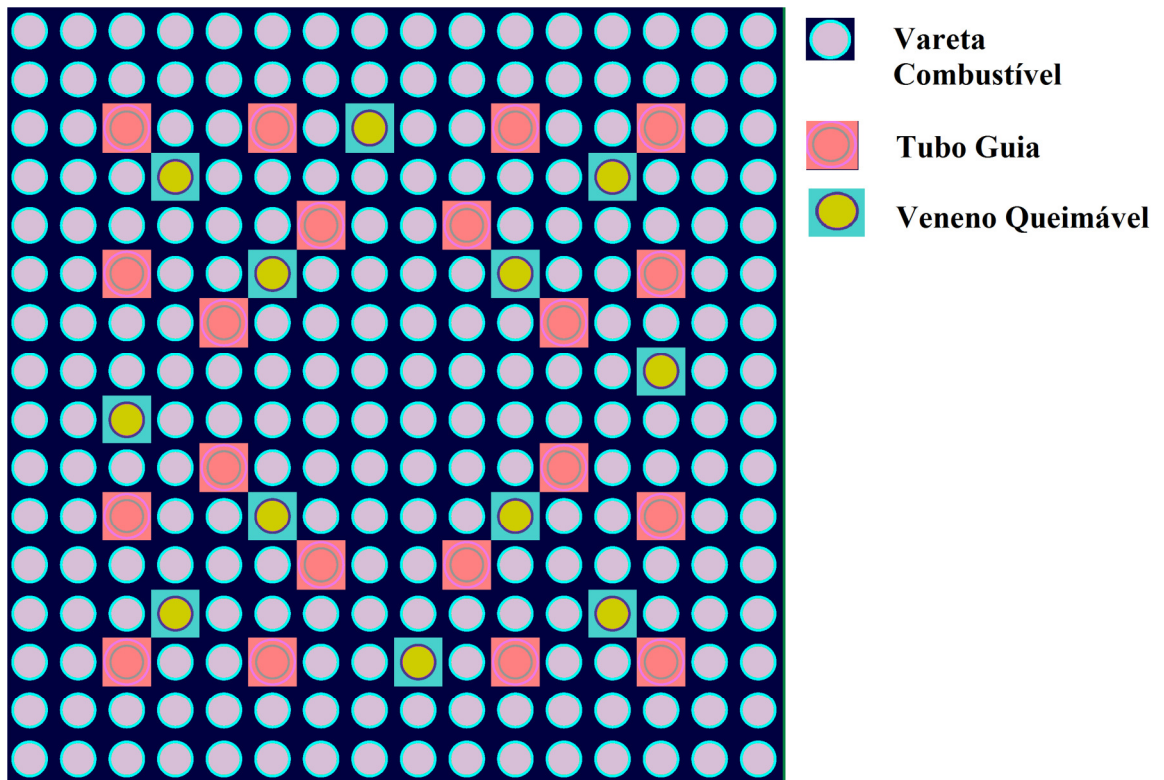


Figura 27 – Elemento Combustível modelado:
ELE 06

Após modelagem dos elementos combustíveis, os cálculos de criticalidade no estado estacionário foram realizados. De forma similar à anterior, os combustíveis reprocessados diluídos em tório foram inseridos nos elementos combustíveis modelados em substituição ao combustível UO_2 sem que os parâmetros apresentados na Tabela 24 fossem alterados.

A quantidade de material físsil contida na matriz do combustível foi novamente variada: iniciou-se em 1% e aumentou até atingir 27%, a fim de tornar o fator de multiplicação do combustível reprocessado similar aos dos combustíveis UO_2 .

A Tabela 25 apresenta os valores obtidos para k_{inf} correspondentes aos combustíveis reprocessados com as quantidades de material físsil de 10%, 17%, 19%, 24% e 27% (modelo homogêneo – TRU). Estes combustíveis apresentaram os valores mais próximos para k_{inf} em relação ao combustível UO_2 nos seis elementos modelados. As suas composições estão apresentadas nas Tabelas 26 a 30.

Tabela 25 – Comparação dos valores obtidos para o fator de multiplicação infinito k_{inf} considerando o combustível reprocessado diluído em tório e UO_2 nos seis elementos modelados

COMBUSTÍVEL	ELE 01	ELE 02	ELE 03	ELE 04	ELE 05	ELE 06
UO_2	$1,22178 \pm 0,00053$	$1,30701 \pm 0,00055$	$1,26196 \pm 0,00069$	$1,37473 \pm 0,00058$	$1,33693 \pm 0,00063$	$1,32945 \pm 0,00065$
TRU 10%	$1,22215 \pm 0,00052$					
TRU 19%		$1,30427 \pm 0,00056$				
TRU 17%			$1,26795 \pm 0,00055$			
TRU 27%				$1,37608 \pm 0,00055$		
TRU 24%					$1,33483 \pm 0,00054$	$1,32880 \pm 0,00053$

Tabela 26 – Composição do Combustível TRU (10%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	72,436
Pu-238	0,270
Pu-239	7,886
Pu-240	3,307
Pu-241	1,787
Pu-242	0,941
Np-237	0,510
Am-241	0,546
Am-242m	0,001
Am-243	0,205
Cm-242	0,001
Cm-243	0,001
Cm-244	0,047
Cm-245	0,002
Cm-246	0,001
O-16	12,056

Tabela 27 – Composição do Combustível TRU (17%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	64,001
Pu-238	0,417
Pu-239	12,192
Pu-240	5,113
Pu-241	2,763
Pu-242	1,455
Np-237	0,788
Am-241	0,845
Am-242m	0,002
Am-243	0,317
Cm-242	0,001
Cm-243	0,001
Cm-244	0,073
Cm-245	0,003
Cm-246	0,001
O-16	12,024

Tabela 28 – Composição do Combustível TRU (19%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	61,188
Pu-238	0,467
Pu-239	13,628
Pu-240	5,715
Pu-241	3,089
Pu-242	1,626
Np-237	0,881
Am-241	0,945
Am-242m	0,002
Am-243	0,354
Cm-242	0,001
Cm-243	0,001
Cm-244	0,081
Cm-245	0,004
Cm-246	0,001
O-16	12,018

Tabela 29 – Composição do Combustível TRU (24%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	54,152
Pu-238	0,590
Pu-239	17,219
Pu-240	7,221
Pu-241	3,903
Pu-242	2,055
Np-237	1,114
Am-241	1,194
Am-242	0,003
Am-243	0,448
Cm-242m	0,001
Cm-243	0,001
Cm-244	0,103
Cm-245	0,005
Cm-246	0,001
O-16	11,986

Tabela 30 – Composição do Combustível TRU (27%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	49,929
Pu-238	0,663
Pu-239	19,375
Pu-240	8,125
Pu-241	4,392
Pu-242	2,312
Np-237	1,253
Am-241	1,343
Am-242m	0,003
Am-243	0,504
Cm-242	0,001
Cm-243	0,001
Cm-244	0,116
Cm-245	0,006
Cm-246	0,001
O-16	11,969

Foram escolhidos os combustíveis reprocessados com as quantidades de material físsil de 10%, 17%, 19% e 24% e 27% que apresentaram os valores mais próximos para k_{inf} em relação ao combustível UO_2 , respectivamente, para serem queimados. Os resultados obtidos serão comparados com os resultados obtidos através do modelo micro heterogêneo no subitem 4.2.

4.1.2 MODELO MICRO HETEROGÊNEO

Os elementos combustíveis modelados de forma micro heterogênea, também foram baseados nos elementos do núcleo do reator de Angra 2, porém sofreram algumas modificações para que apresentassem uma aproximação micro heterogênea, da mesma forma feita anteriormente.

Foram modelados seis tipos de elementos combustíveis:

- ELE 01: elemento combustível UO_2 , 1,9% enriquecido, sem veneno queimável ;

- TRUOUT: célula combustível com aproximação micro heterogênea radial, contendo os combustíveis TRU na parte externa e UO_2 , com enriquecimento de 1,9% na parte interna;
- TRUIN: célula combustível com aproximação micro heterogênea radial, contendo os combustíveis TRU na parte interna e UO_2 , com enriquecimento de 1,9% na parte externa;
- ELE 02: elemento combustível UO_2 , 2,5% enriquecido, sem veneno queimável:
 - TRUOUT: célula combustível com aproximação micro heterogênea axial, contendo os combustíveis TRU na parte externa e UO_2 , com enriquecimento de 2,5% na parte interna;
 - TRUIN: célula combustível com aproximação micro heterogênea axial, contendo os combustíveis TRU na parte interna e UO_2 , com enriquecimento de 2,5% na parte externa;
- ELE 03: elemento combustível UO_2 , 2,5% enriquecido, com 12 varetas de veneno queimável (Gd_2O_3):
 - TRUOUT: célula combustível com aproximação micro heterogênea axial, contendo os combustíveis TRU na parte externa e UO_2 , com enriquecimento de 2,5% na parte interna;
 - TRUIN: célula combustível com aproximação micro heterogênea axial, contendo os combustíveis TRU na parte interna e UO_2 , com enriquecimento de 2,5% na parte externa;
- ELE 04: elemento combustível UO_2 , 3,2% enriquecido, sem veneno queimável;
 - TRUOUT: célula combustível com aproximação micro heterogênea radial, contendo os combustíveis TRU na parte externa e UO_2 , com enriquecimento de 3,2% na parte interna;
 - TRUIN: célula combustível com aproximação micro heterogênea radial, contendo os combustíveis TRU na parte interna e UO_2 , com enriquecimento de 3,2% na parte externa;

- ELE 05: elemento combustível UO_2 , 3,2% enriquecido, com 8 varetas de veneno queimável (Gd_2O_3);
 - TRUOUT: célula combustível com aproximação micro heterogênea radial, contendo os combustíveis TRU na parte externa e UO_2 , com enriquecimento de 3,2% na parte interna;
 - TRUIN: célula combustível com aproximação micro heterogênea radial, contendo os combustíveis TRU na parte interna e UO_2 , com enriquecimento de 3,2% na parte externa;

- ELE 06: elemento combustível UO_2 , 3,2% enriquecido, com 12 varetas de veneno queimável (Gd_2O_3);
 - TRUOUT: célula combustível com aproximação micro heterogênea axial, contendo os combustíveis TRU na parte externa e UO_2 , com enriquecimento de 3,2% na parte interna;
 - TRUIN: célula combustível com aproximação micro heterogênea axial, contendo os combustíveis TRU na parte interna e UO_2 , com enriquecimento de 3,2% na parte externa;

Para esta simulação, as varetas de combustível UO_2 foram substituídas, nos elementos modelados, pelas varetas considerando as configurações TRUOUT e TRUIN. As Figuras 28 a 33 mostram as posições ocupadas pelas varetas, considerando o modelo micro heterogêneo.

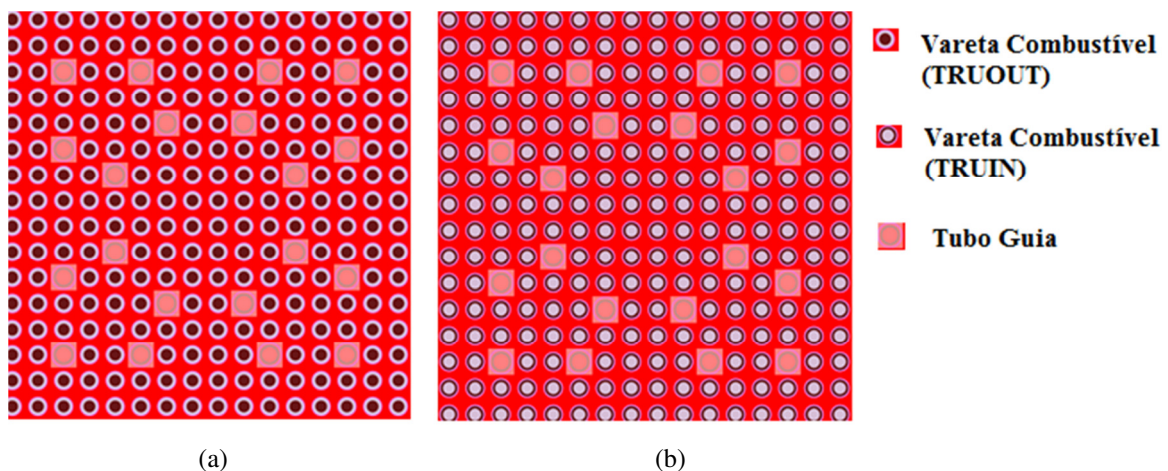


Figura 28 – ELE 01: elemento combustível UO_2 , 1,9% enriquecido, sem veneno queimável
(a) TRUOUT; (b) TRUIN

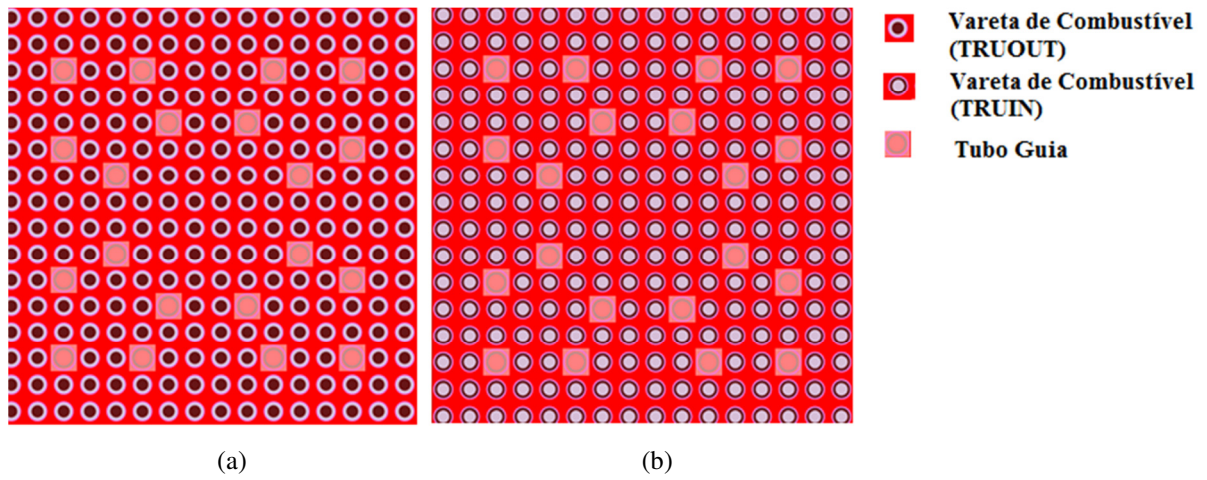


Figura 29 – ELE 02: elemento combustível UO_2 ,
2,5% enriquecido, sem veneno queimável
(a) TRUOUT; (b) TRUIN

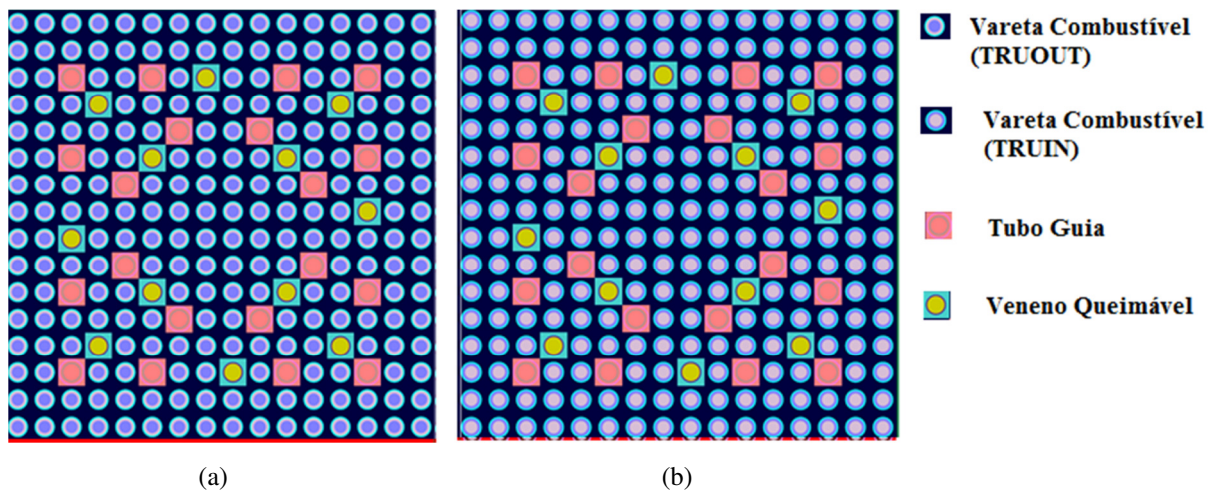


Figura 30 – ELE 03: elemento combustível UO_2 ,
2,5% enriquecido, com 12 varetas de
veneno queimável (a) TRUOUT; (b)
TRUIN

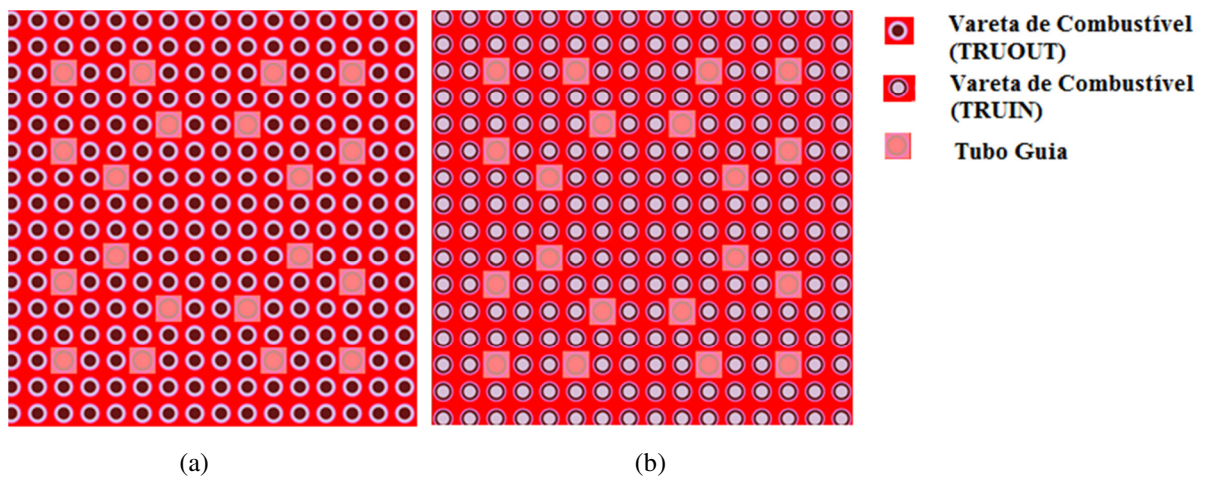


Figura 31 – ELE 04: elemento combustível UO₂,
3,2% enriquecido, sem veneno queimável
(a) TRUOUT; (b) TRUIN

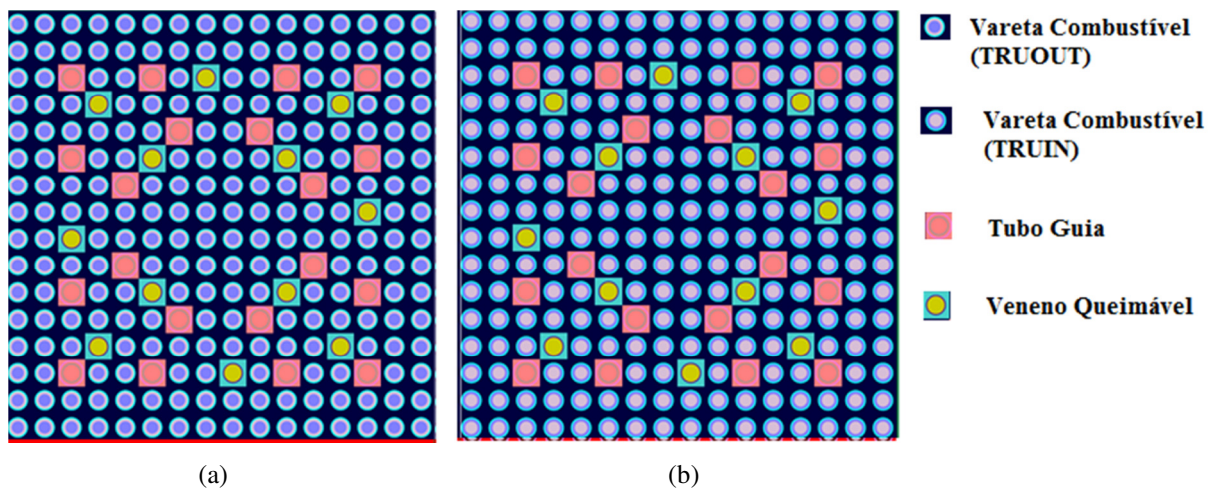


Figura 32 – ELE 05: elemento combustível UO₂,
3,2% enriquecido, com 8 varetas de
veneno queimável (a) TRUOUT; (b)
TRUIN

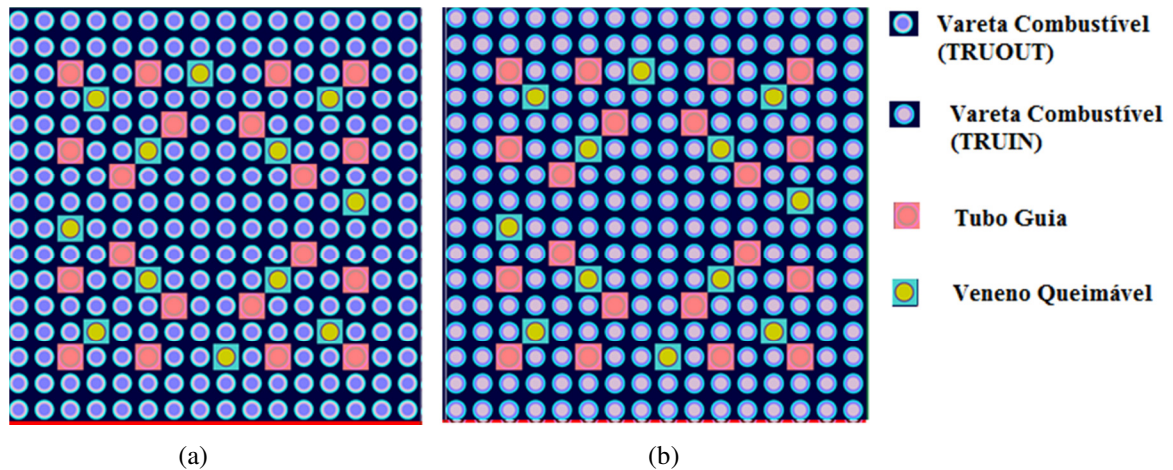


Figura 33 – ELE 06: elemento combustível UO_2 , 3,2% enriquecido, com 12 varetas de veneno queimável (a) TRUOUT; (b) TRUIN

Após modelagem dos elementos combustíveis, os cálculos de criticalidade no estado estacionário foram realizados. De forma similar à anterior, os combustíveis reprocessados já caracterizados foram inseridos nos elementos combustíveis modelados, variando a quantidade de material físsil contida na matriz do combustível.

Os dados obtidos para o fator de multiplicação infinito para os elementos com configuração TRUOUT e TRUIN foram comparados com os dados obtidos utilizando-se UO_2 , conforme apresentado nas Tabelas 31 e 32, respectivamente.

A Tabela 31 apresenta os valores obtidos para k_{inf} correspondentes aos combustíveis reprocessados diluídos em tório com as quantidades de material físsil de 18%, 24%, 30%, 35%, 44% e 48% (modelo heterogêneo – configuração TRUOUT). A Tabela 32 apresenta os valores obtidos para k_{inf} correspondentes aos combustíveis reprocessados diluídos em tório e com as quantidades de material físsil de 13%, 25%, 35%, 38%, 39% e 43% (modelo heterogêneo – configuração TRUIN). Estes foram combustíveis que apresentaram os valores mais próximos para k_{inf} em relação ao combustível UO_2 padrão, conforme descrito anteriormente: ELE 01, ELE 02, ELE 03, ELE 04, ELE 05 e ELE 06. As composições dos combustíveis reprocessados diluído em tório com as respectivas quantidades de material físsil estão apresentadas nas Tabelas 33 a 41. Estes combustíveis foram escolhidos para serem queimados. Os resultados obtidos serão comparados com os resultados obtidos através do modelo micro heterogêneo no subitem 4.2.

Tabela 31 – Comparação dos valores obtidos para o fator de multiplicação infinito k_{inf} considerando a configuração TRUOUT

COMBUSTÍVEL	ELE 01	ELE 02	ELE 03	ELE 04	ELE 05	ELE 06
UO ₂	1,22178 ±0,00053	1,30701 ±0,00055	1,26196±0,00069	1,37473±0,00058	1,33693±0,00063	1,32945±0,00065
TRUOUT 18%	1,22415 ±0,00058					
TRUOUT 35%		1,30586 ±0,00055				
TRUOUT 30%			1,26331 ±0,00061			
TRUOUT 48%				1,37608 ±0,00055		
TRUOUT 44%					1,33767 ±0,00057	
TRUOUT 24%						1,32887 ±0,00054

Tabela 32 – Comparação dos valores obtidos para o fator de multiplicação infinito k_{inf} considerando a configuração TRUIN

COMBUSTÍVEL	ELE 01	ELE 02	ELE 03	ELE 04	ELE 05	ELE 06
UO ₂	1,22178 ±0,00053	1,30701 ±0,00055	1,26196±0,00069	1,37473±0,00058	1,33693±0,00063	1,32945±0,00065
TRUIN 13%	1,22302 ±0,00062					
TRUIN 35%		1,30758 ±0,00053				
TRUIN 25%			1,26350 ±0,00067			
TRUIN 43%				1,37391 ±0,00050		
TRUIN 39%					1,33635 ±0,00056	
TRUIN 38%						1,32775 ±0,00060

Tabela 33 – Composição do Combustível TRUOUT (13%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	69,625
Pu-238	0,319
Pu-239	9,321
Pu-240	3,908
Pu-241	2,112
Pu-242	1,112
Np-237	0,603
Am-241	0,646
Am-242m	0,001
Am-243	0,242
Cm-242	0,001
Cm-243	0,001
Cm-244	0,055
Cm-245	0,002
Cm-246	0,001
O-16	12,045

Tabela 34 – Composição do Combustível TRUOUT (18%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	61,188
Pu-238	0,467
Pu-239	13,628
Pu-240	5,715
Pu-241	3,089
Pu-242	1,626
Np-237	0,881
Am-241	0,945
Am-242m	0,002
Am-243	0,354
Cm-242	0,001
Cm-243	0,001
Cm-244	0,081
Cm-245	0,004
Cm-246	0,001
O-16	12,018

Tabela 35 – Composição do Combustível TRUOUT (25%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	52,745
Pu-238	0,614
Pu-239	17,938
Pu-240	7,522
Pu-241	4,066
Pu-242	2,140
Np-237	1,160
Am-241	1,244
Am-242m	0,003
Am-243	0,467
Cm-242	0,001
Cm-243	0,001
Cm-244	0,107
Cm-245	0,005
Cm-246	0,001
O-16	11,980

Tabela 36 – Composição do Combustível TRUIN (30%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	45,704
Pu-238	0,737
Pu-239	21,532
Pu-240	9,030
Pu-241	4,88
Pu-242	2,569
Np-237	1,393
Am-241	1,493
Am-242m	0,003
Am-243	0,560
Cm-242	0,001
Cm-243	0,001
Cm-244	0,129
Cm-245	0,006
Cm-246	0,001
O-16	11,953

Tabela 37 – Composição do Combustível TRUIN (35%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	38,659
Pu-238	0,861
Pu-239	25,129
Pu-240	10,538
Pu-241	5,696
Pu-242	2,999
Np-237	1,625
Am-241	1,742
Am-242m	0,004
Am-243	0,654
Cm-242	0,001
Cm-243	0,002
Cm-244	0,150
Cm-245	0,007
Cm-246	0,001
O-16	11,926

Tabela 38 – Composição do Combustível TRUIN (39%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	33,019
Pu-238	0,959
Pu-239	28,008
Pu-240	11,745
Pu-241	6,348
Pu-242	3,342
Np-237	1,812
Am-241	1,942
Am-242m	0,005
Am-243	0,729
Cm-242	0,001
Cm-243	0,002
Cm-244	0,168
Cm-245	33,019
Cm-246	0,959
O-16	28,008

Tabela 39 – Composição do Combustível TRUIN (43%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	27,378
Pu-238	1,058
Pu-239	30,888
Pu-240	12,953
Pu-241	7,001
Pu-242	3,686
Np-237	1,998
Am-241	2,142
Am-242m	0,005
Am-243	0,804
Cm-242	0,001
Cm-243	0,002
Cm-244	0,185
Cm-245	0,009
Cm-246	0,001
O-16	11,883

Tabela 40 – Composição do Combustível TRUIN (44%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	25,967
Pu-238	1,083
Pu-239	31,608
Pu-240	13,255
Pu-241	7,165
Pu-242	3,772
Np-237	2,045
Am-241	2,192
Am-242m	0,005
Am-243	0,823
Cm-242	0,001
Cm-243	0,002
Cm-244	0,189
Cm-245	0,010
Cm-246	0,001
O-16	11,877

Tabela 41 – Composição do Combustível TRUIN (48%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	20,321
Pu-238	1,181
Pu-239	34,490
Pu-240	14,464
Pu-241	7,818
Pu-242	4,116
Np-237	2,231
Am-241	2,392
Am-242m	0,006
Am-243	0,898
Cm-242	0,001
Cm-243	0,002
Cm-244	0,207
Cm-245	0,010
Cm-246	0,001
O-16	11,856

4.2 COMPARAÇÕES ENTRE OS MODELOS HOMOGÊNEO E MICRO HETEROGÊNEO

Os elementos combustíveis com os combustíveis reprocessados com as quantidades de material físsil de 18%, 24%, 30%, 35%, 43%, 44% e 48% apresentaram os valores mais próximos para k_{inf} em relação ao combustível UO_2 na configuração TRUOUT e os combustíveis reprocessados com as quantidades de material físsil de 13%, 25%, 35%, 38%, 39% e 43% apresentaram os valores mais próximos para k_{inf} em relação ao combustível UO_2 na configuração TRUIN; ver Tabelas 31 e 32.

Simulou-se a queima destes combustíveis, considerando que não havia boro diluído no refrigerante em nenhuma das etapas de queima. As Figuras 34 a 45 apresentam a evolução do k_{inf} dos elementos combustíveis ao longo da queima. Novamente, para melhor visualização do comportamento dos combustíveis reprocessados e diluídos em tório, já que se mostraram similares, apresentou-se também o comportamento deles separados do UO_2 , para todos os elementos combustíveis.

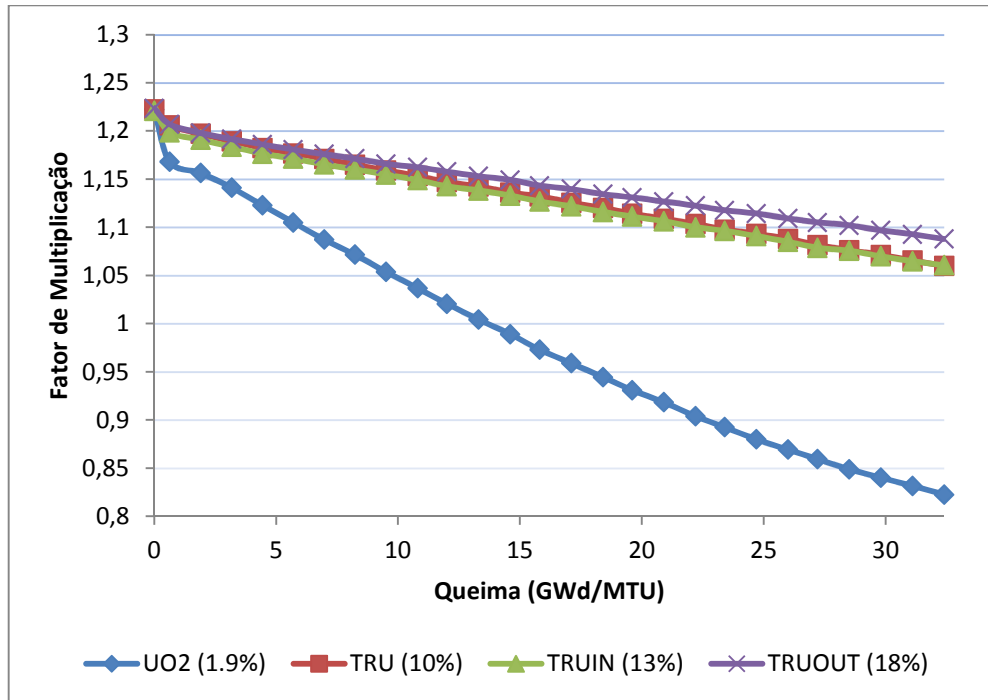


Figura 34 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis UO_2 (1,9%), TRU (10%), TRUOUT (18%) e TRUIN (13%) para o ELE 01.

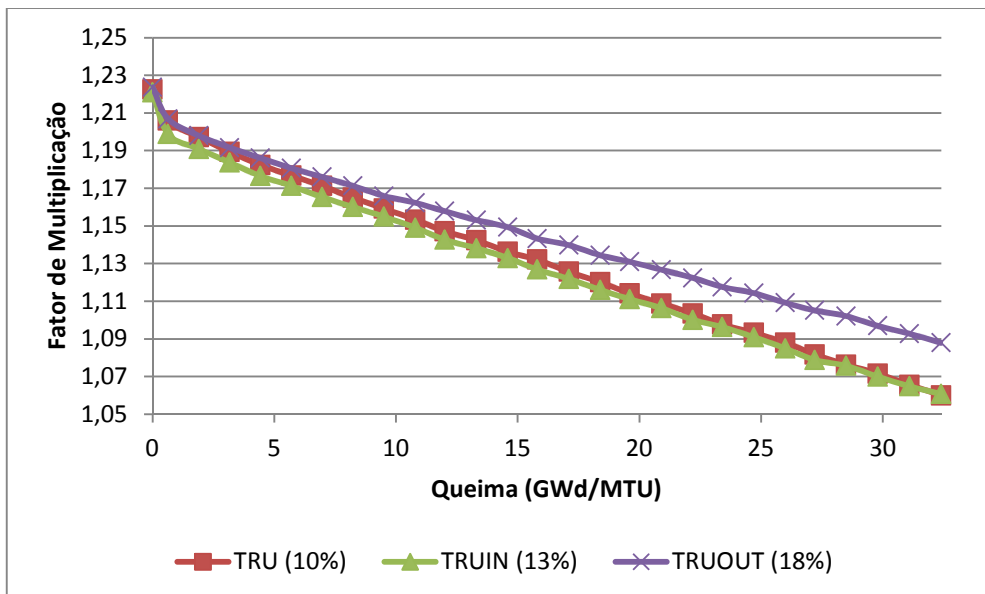


Figura 35 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis TRU (10%), TRUOUT (18%) e TRUIN (13%) para o ELE 01.

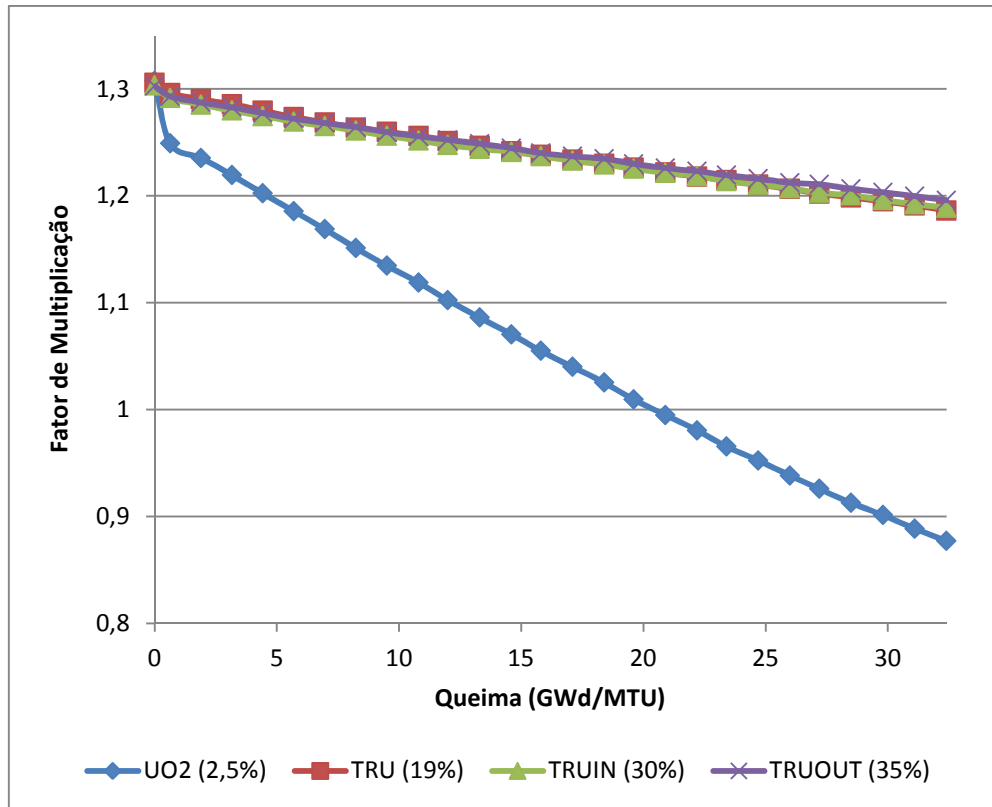


Figura 36 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis UO2 (2,5%), TRU (18%), TRUOUT (35%) e TRUIN (30%) para o ELE 02.

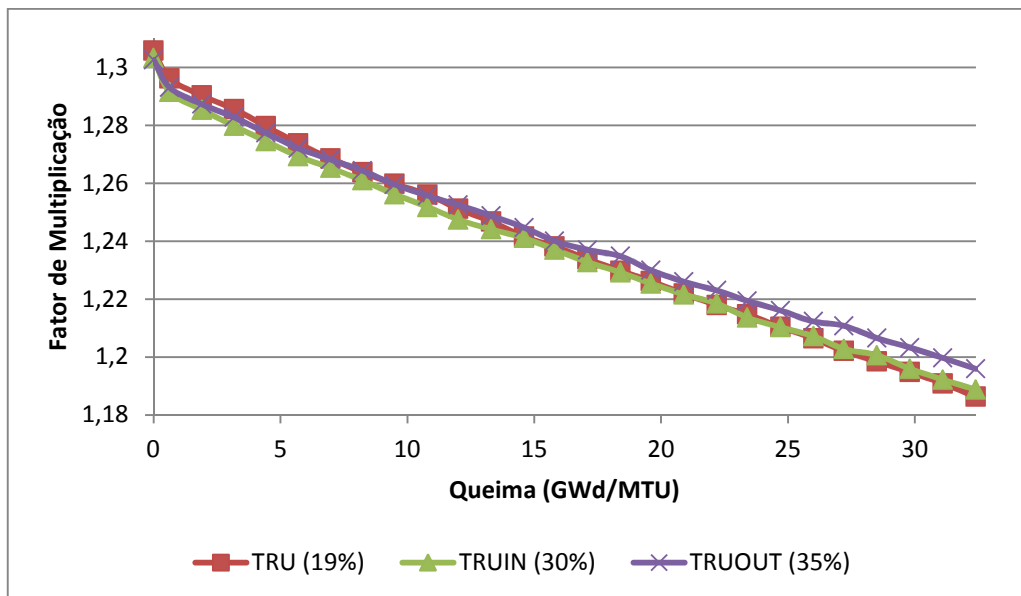


Figura 37 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis TRU (18%), TRUOUT (35%) e TRUIN (30%) para o ELE 02.

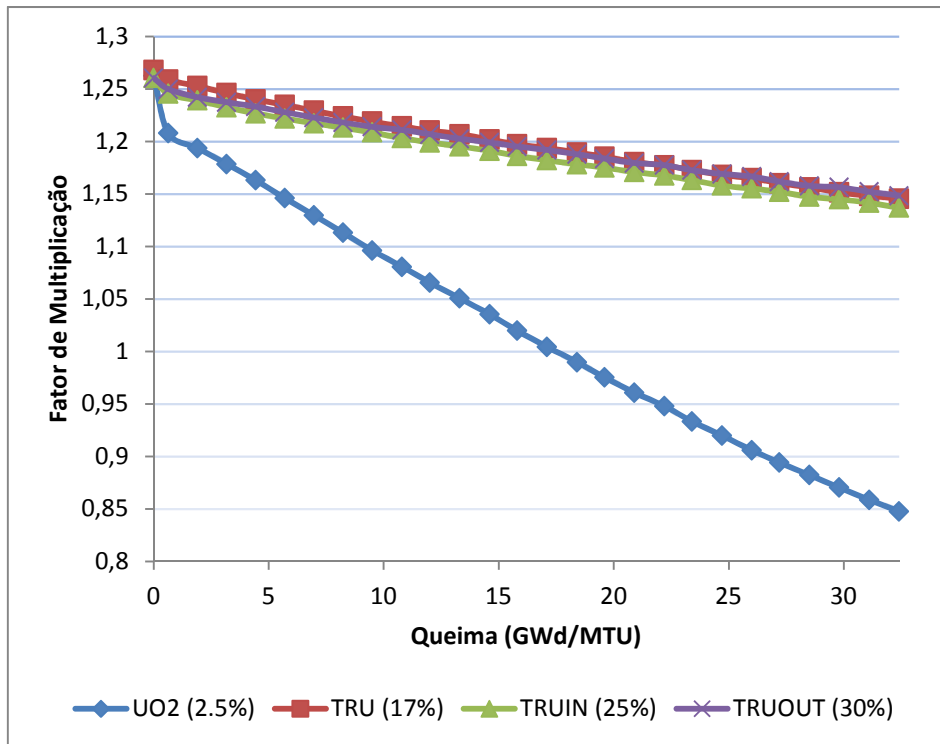


Figura 38 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis UO_2 (2,5%), TRU (17%), TRUOUT (25%) e TRUIN (30%) para o ELE 03.

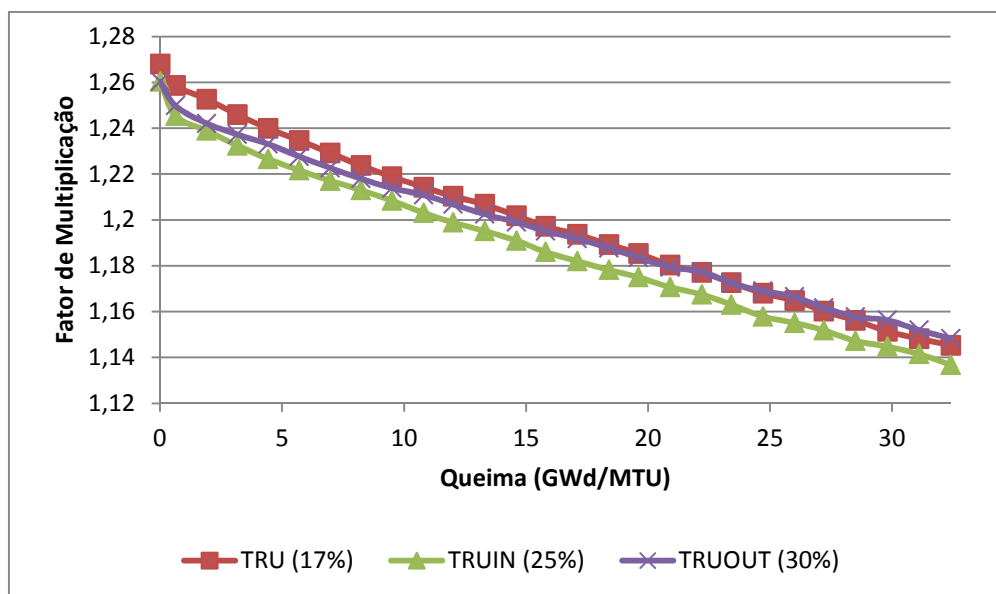


Figura 39 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis TRU (17%), TRUOUT (25%) e TRUIN (30%) para o ELE 03.

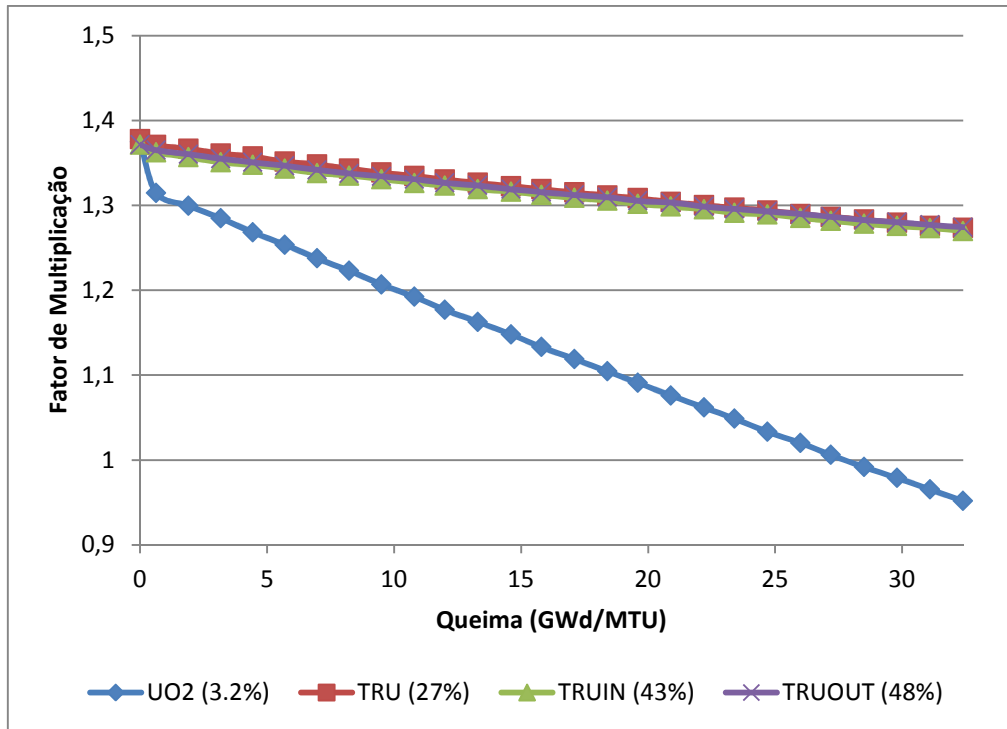


Figura 40 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis UO₂ (3,2%), TRU (27%), TRUOUT (48%) e TRUIN (43%) para o ELE 04.

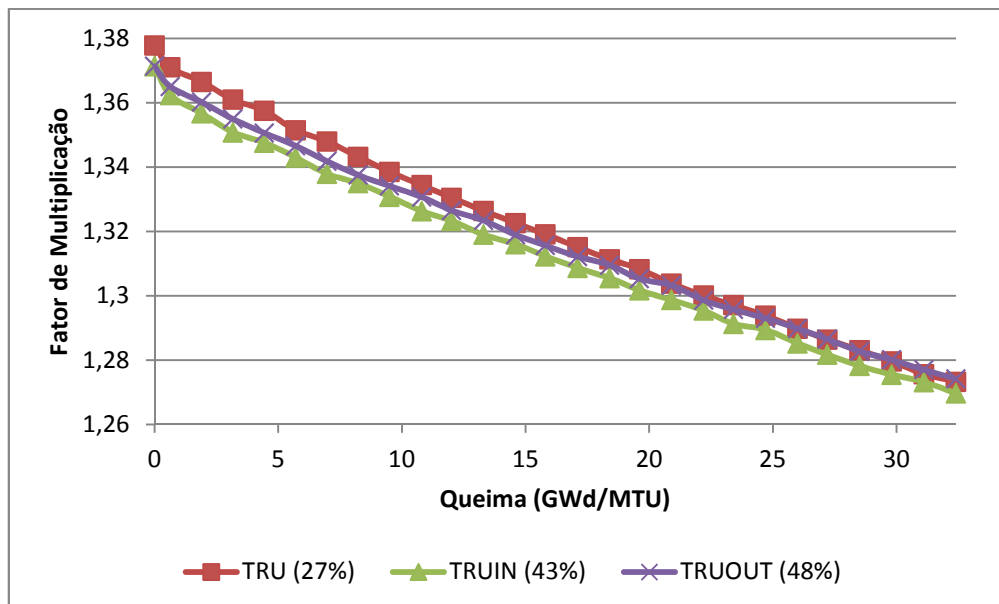


Figura 41 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis TRU (27%), TRUOUT (48%) e TRUIN (43%) para o ELE 04.

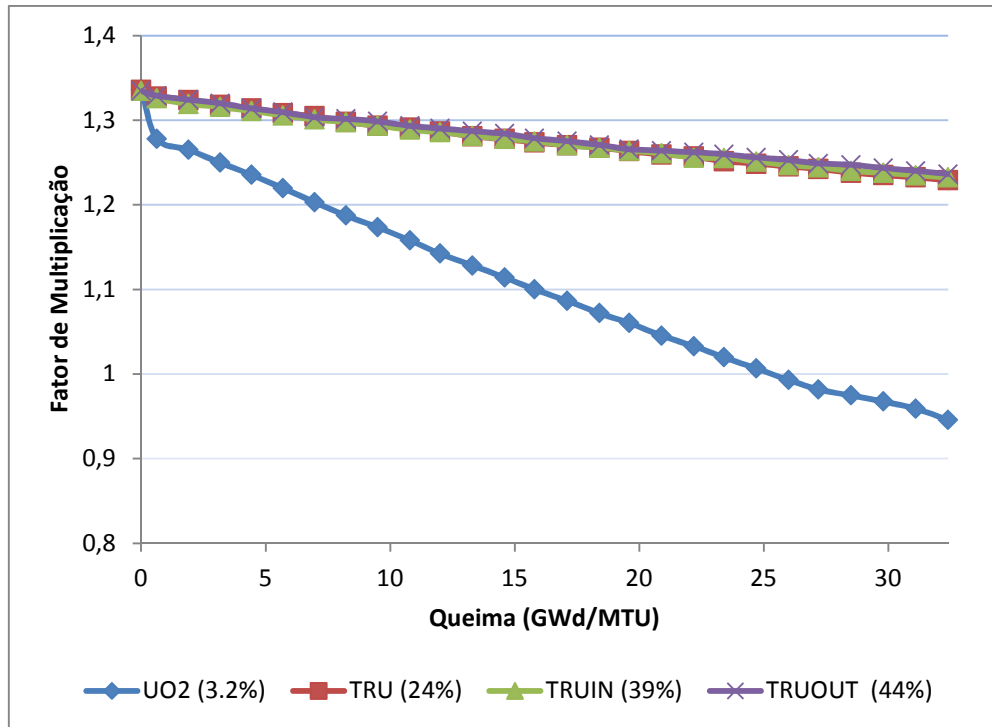


Figura 42 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis UO_2 (3,2%), TRU (24%), TRUOUT (44%) e TRUIN (39%) para o ELE 05.

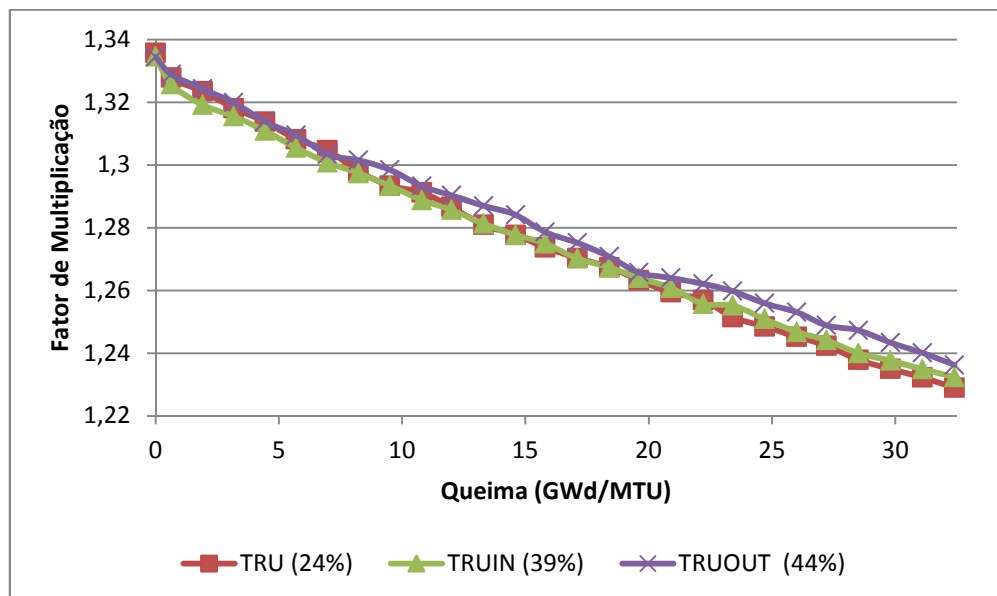


Figura 43 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis TRU (24%), TRUOUT (44%) e TRUIN (39%) para o ELE 05.

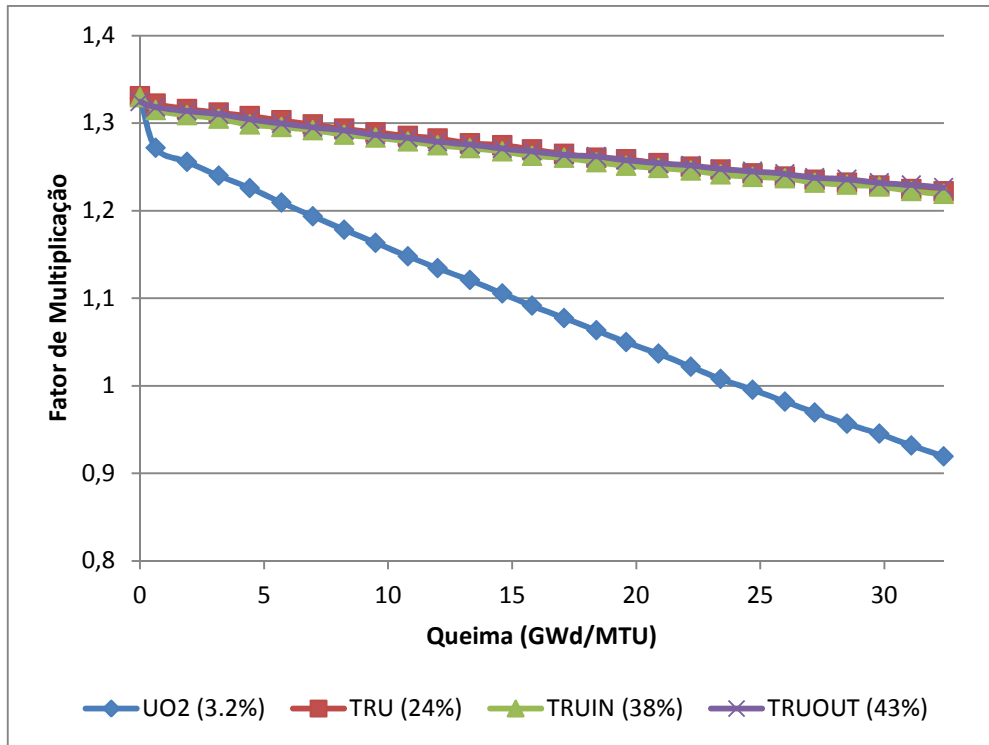


Figura 44 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis UO_2 (3,2%), TRU (24%), TRUOUT (43%) e TRUIN (38%) para o ELE 06.

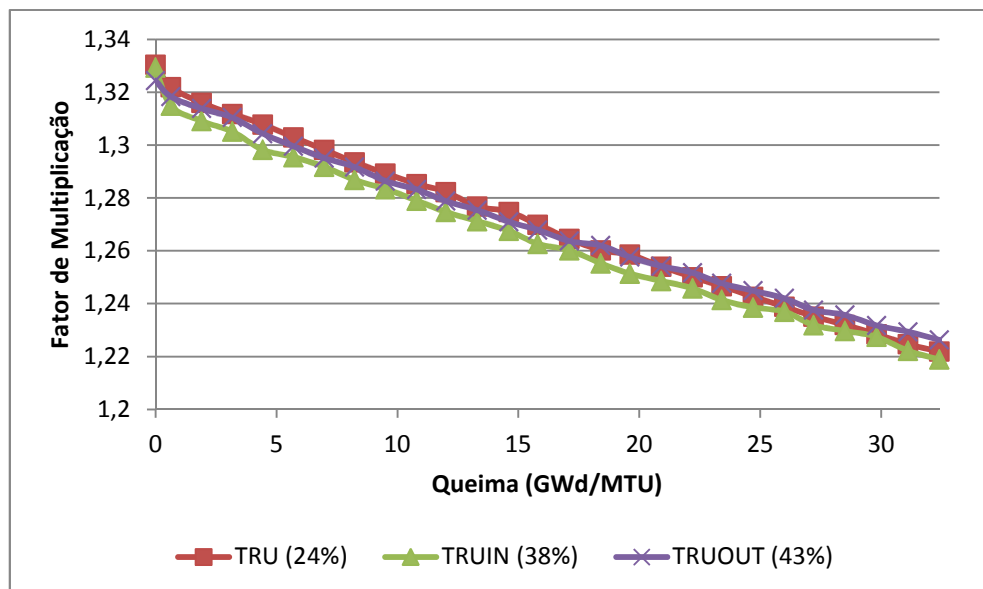


Figura 45 – Evolução do k_{inf} ao longo da queima dos combustíveis TRU (24%), TRUOUT (43%) e TRUIN (38%) para o ELE 06.

Observa-se das Figuras 34 a 45 que, novamente, a variação do fator de multiplicação em função da queima dos elementos combustíveis reprocessados e diluídos em tório, quando comparada com o do combustível de UO_2 , é mais lenta, sugerindo uma possibilidade de extensão da queima.

Observa-se também que a quantidade de material físsil presente nos combustíveis é menor quando inseridos no elemento tipo ELE 01, ou seja, em substituição ao combustível UO_2 com enriquecimento de 1,9% em um elemento sem veneno queimável. Ainda é necessário analisar o comportamento dos modelos homogêneo e micro heterogêneo em um elemento combustível, quando inserido no núcleo. Essa análise será feita no próximo capítulo.

As Figuras 46 a 63 apresentam a variação da composição isotópica dos combustíveis escolhidos ao longo da queima, para cada combustível reprocessado diluído em tório escolhido e a comparação com o combustível padrão e o modelo homogêneo. Para uma melhor análise, a variação da massa dos nuclídeos em maior e em menor quantidade, em cada elemento, também são apresentados.

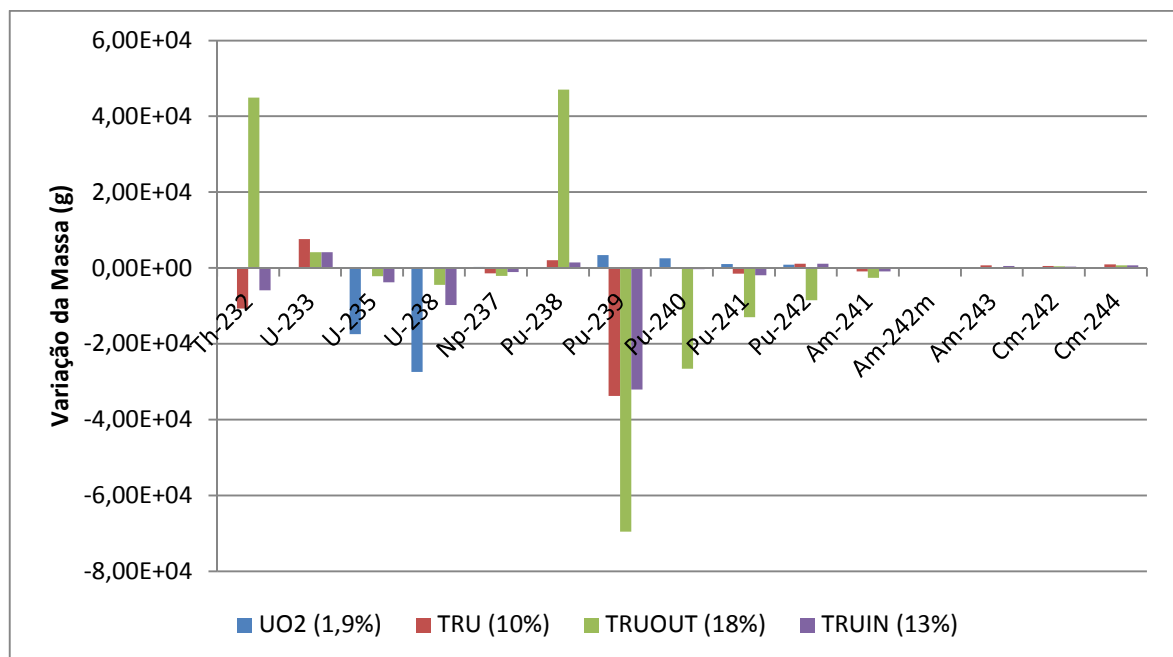


Figura 46 – Variação da massa dos nuclídeos para os combustíveis do elemento ELE 01.

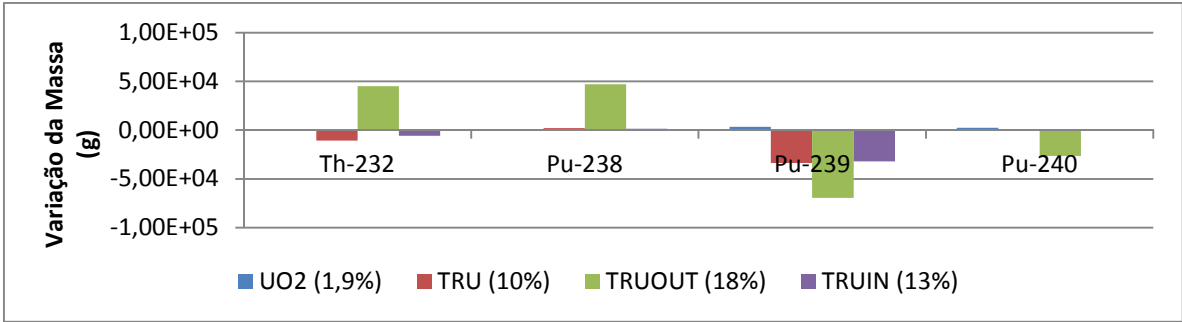


Figura 47 – Variação da massa dos nuclídeos ²³²Th, ²³⁸Pu, ²³⁹Pu e ²⁴⁰Pu para os combustíveis do elemento ELE 01.

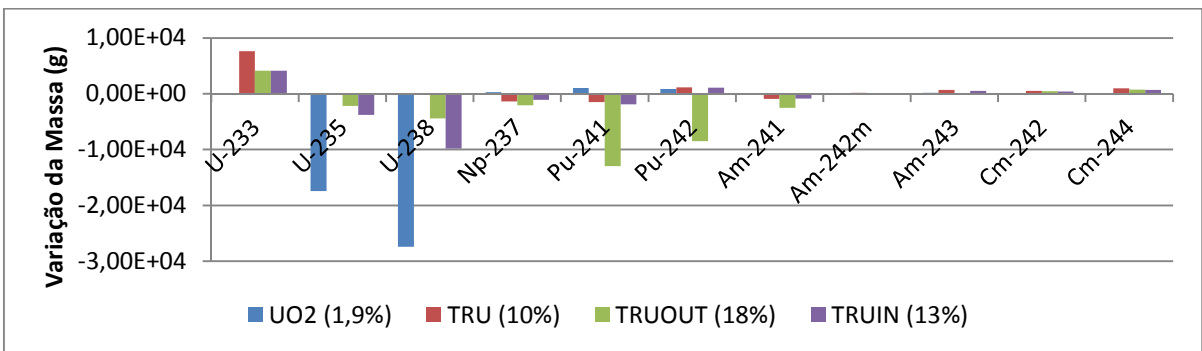


Figura 48 – Variação da massa dos nuclídeos ²³³U, ²³⁵U, ²³⁸U, ²³⁷Np, ²⁴¹Pu, ²⁴²Pu, ^{242m}Am, ²⁴²Cm e ²⁴⁴Cm para os combustíveis do elemento ELE 01.

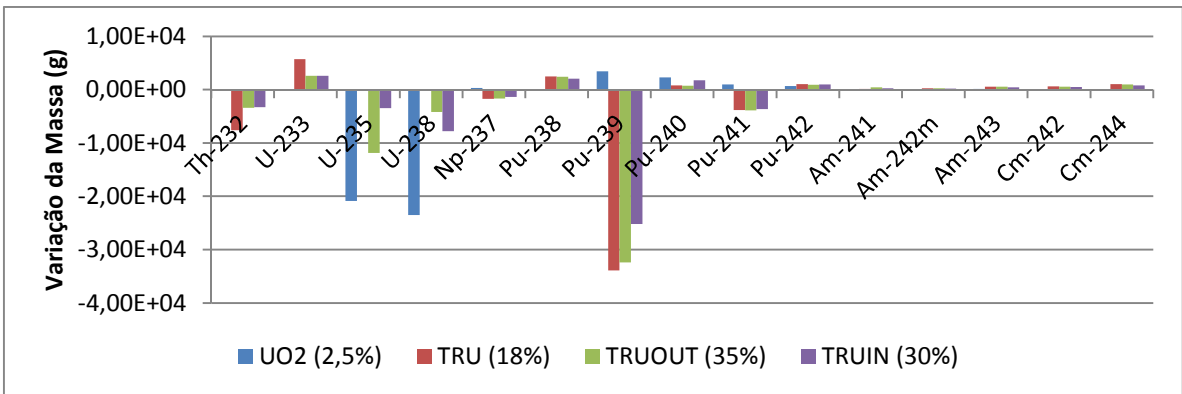


Figura 49 – Variação da massa dos nuclídeos para os combustíveis do elemento ELE 02.

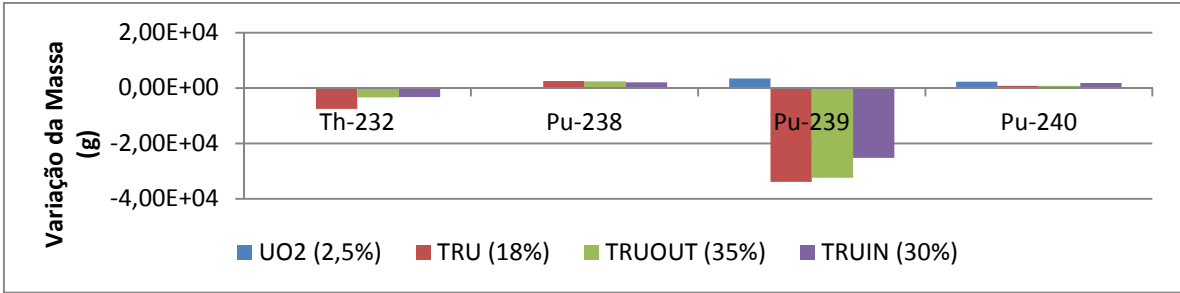


Figura 50 – Variação da massa dos nuclídeos ²³²Th, ²³⁸Pu, ²³⁹Pu e ²⁴⁰Pu para os combustíveis do elemento ELE 02.

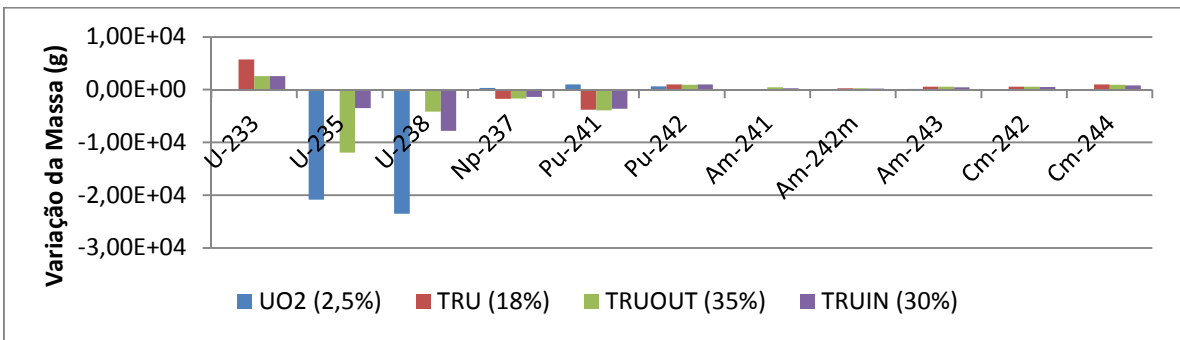


Figura 51 – Variação da massa dos nuclídeos ²³³U, ²³⁵U, ²³⁸U, ²³⁷Np, ²⁴¹Pu, ²⁴²Pu, ^{242m}Am, ²⁴²Cm e ²⁴⁴Cm para os combustíveis do elemento ELE 02.

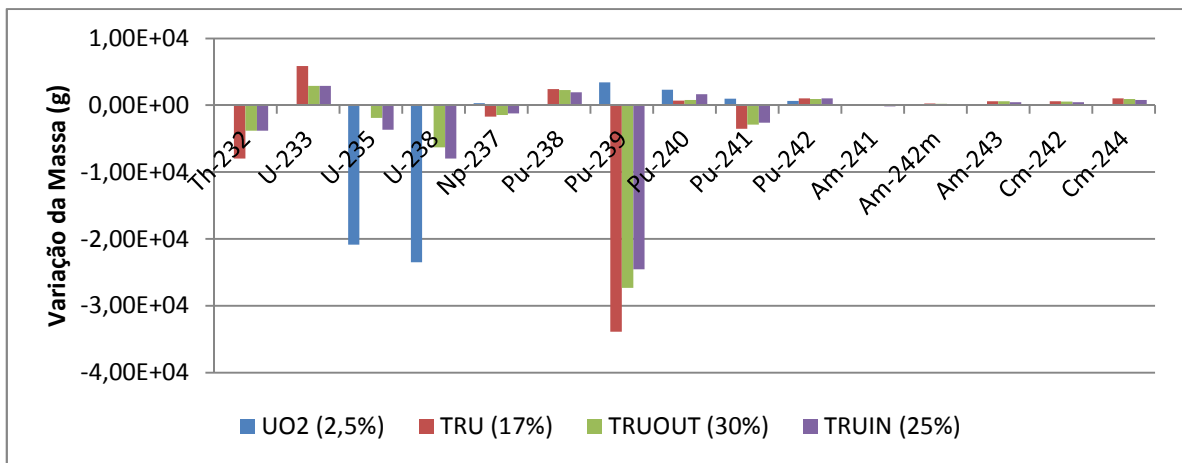


Figura 52 – Variação da massa dos nuclídeos para os combustíveis do elemento ELE 03.

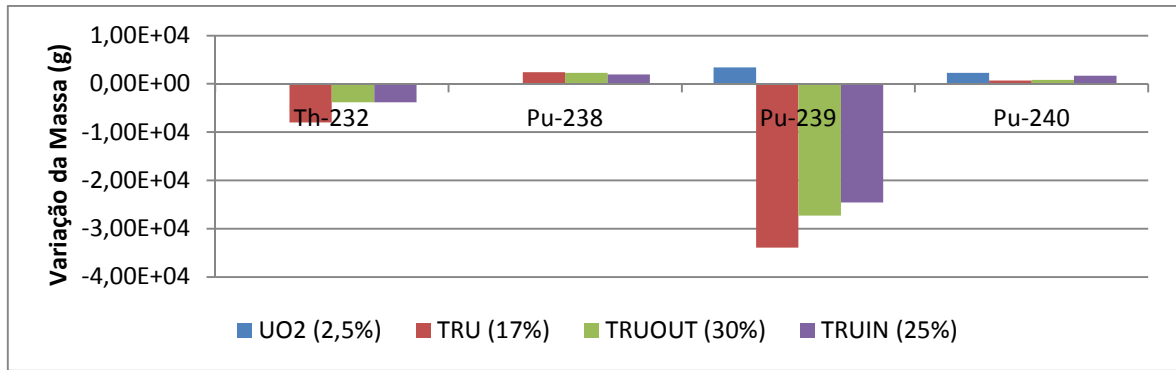


Figura 53 – Variação da massa dos nuclídeos ^{232}Th , ^{238}Pu , ^{239}Pu e ^{240}Pu para os combustíveis do elemento ELE 03.

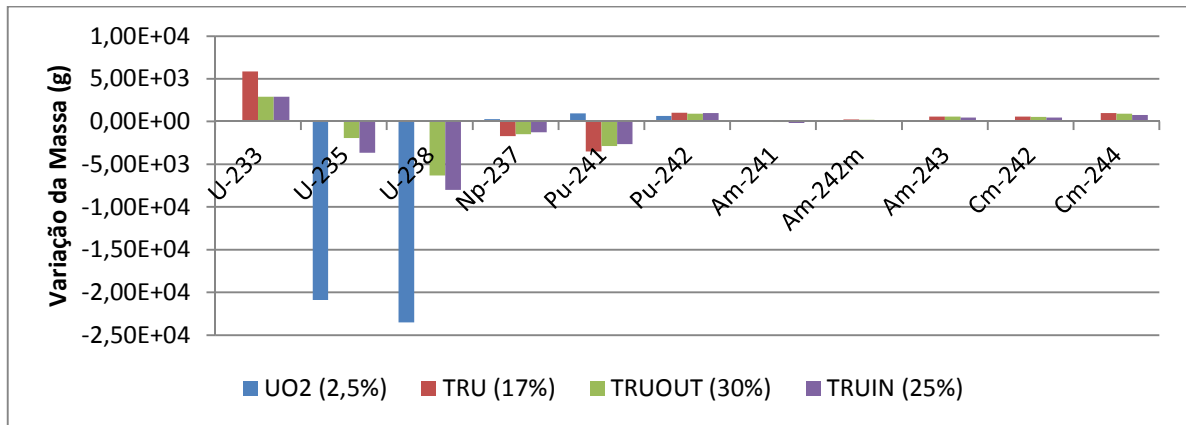


Figura 54 – Variação da massa dos nuclídeos ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{241}Pu , ^{242}Pu , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{242}Cm e ^{244}Cm para os combustíveis do elemento ELE 03.

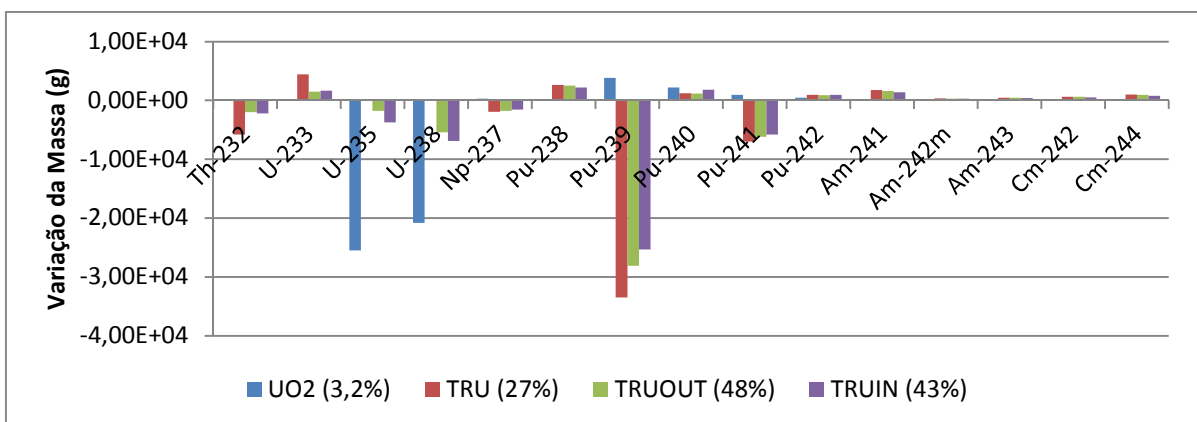


Figura 55 – Variação da massa dos nuclídeos para os combustíveis do elemento ELE 04.

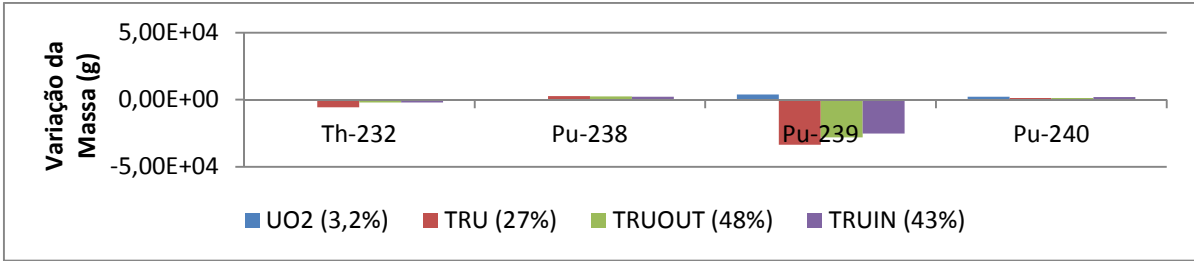


Figura 56 – Variação da massa dos nuclídeos ²³²Th, ²³⁸Pu, ²³⁹Pu e ²⁴⁰Pu para os combustíveis do elemento ELE 04.

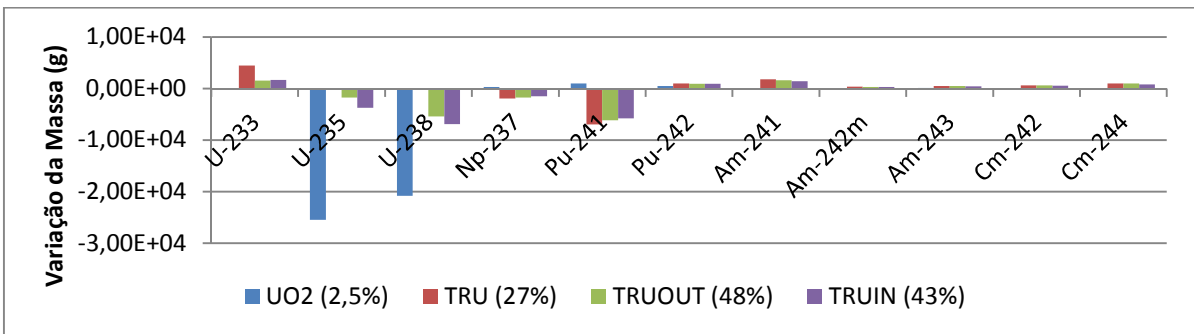


Figura 57 – Variação da massa dos nuclídeos ²³³U, ²³⁵U, ²³⁸U, ²³⁷Np, ²⁴¹Pu, ²⁴²Pu, ^{242m}Am, ²⁴²Cm e ²⁴⁴Cm para os combustíveis do elemento ELE 04.

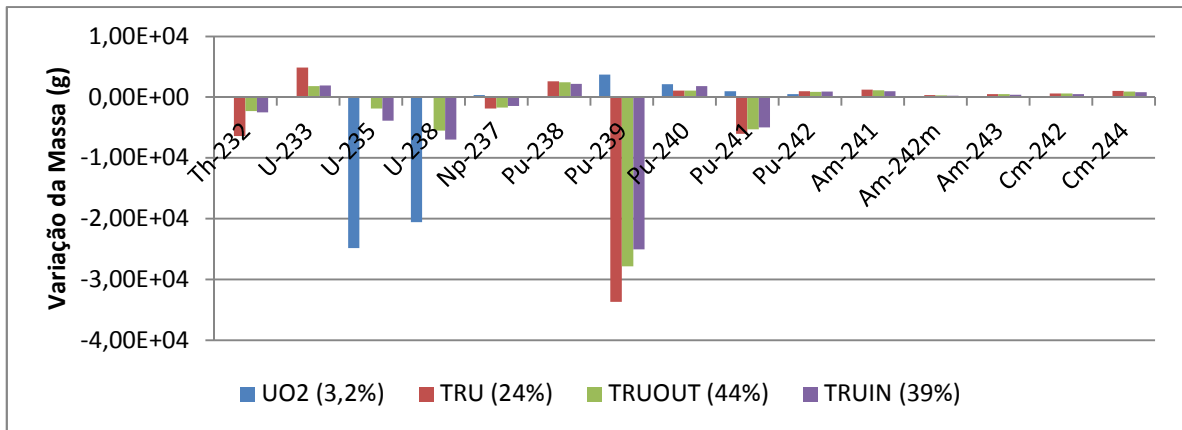


Figura 58 – Variação da massa dos nuclídeos para os combustíveis do elemento ELE 05.

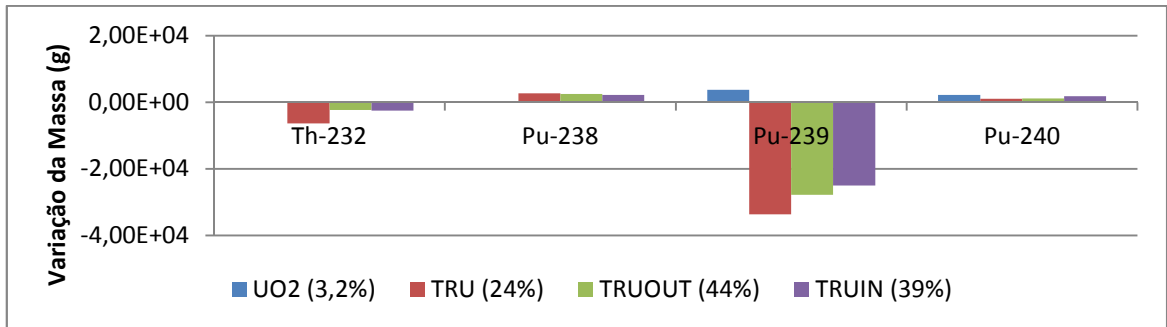


Figura 59 – Variação da massa dos nuclídeos ²³²Th, ²³⁸Pu, ²³⁹Pu e ²⁴⁰Pu para os combustíveis do elemento ELE 05.

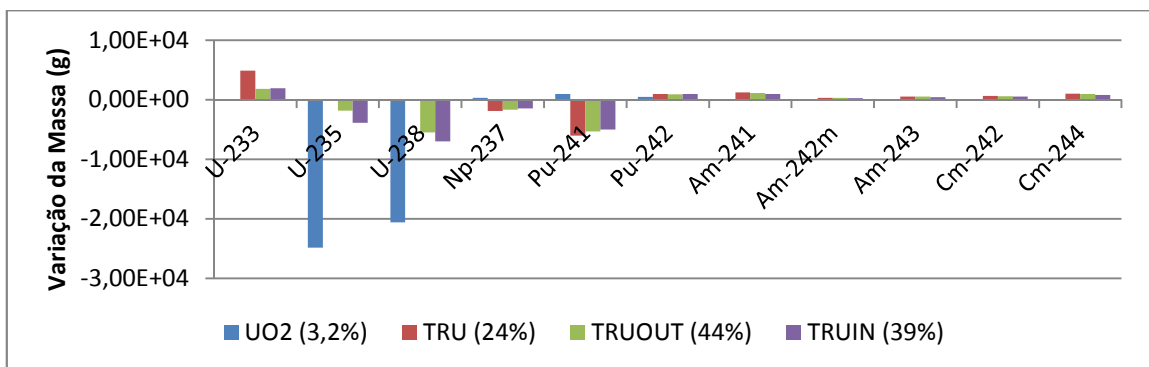


Figura 60 – Variação da massa dos nuclídeos ²³³U, ²³⁵U, ²³⁸U, ²³⁷Np, ²⁴¹Pu, ²⁴²Pu, ^{242m}Am, ²⁴²Cm e ²⁴⁴Cm para os combustíveis do elemento ELE 05.

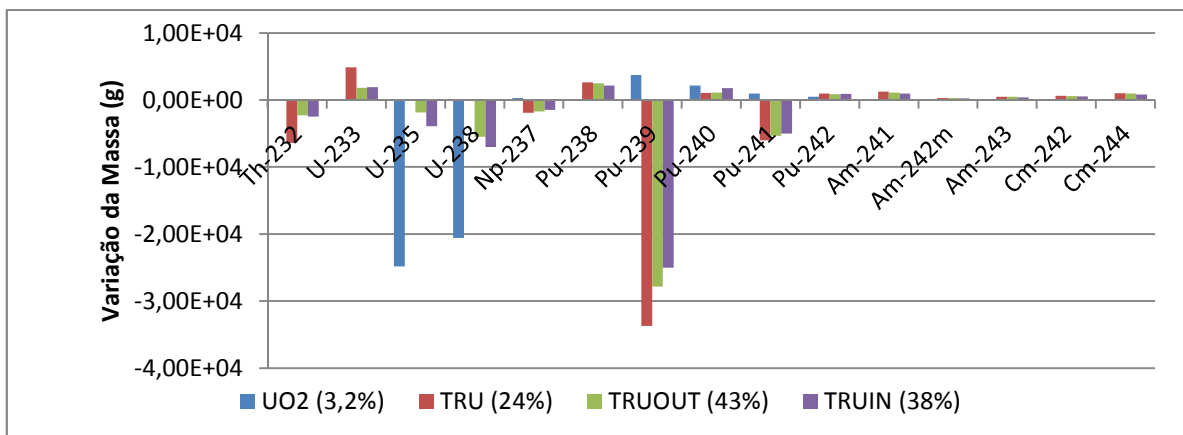


Figura 61 – Variação da massa dos nuclídeos para os combustíveis do elemento ELE 06.

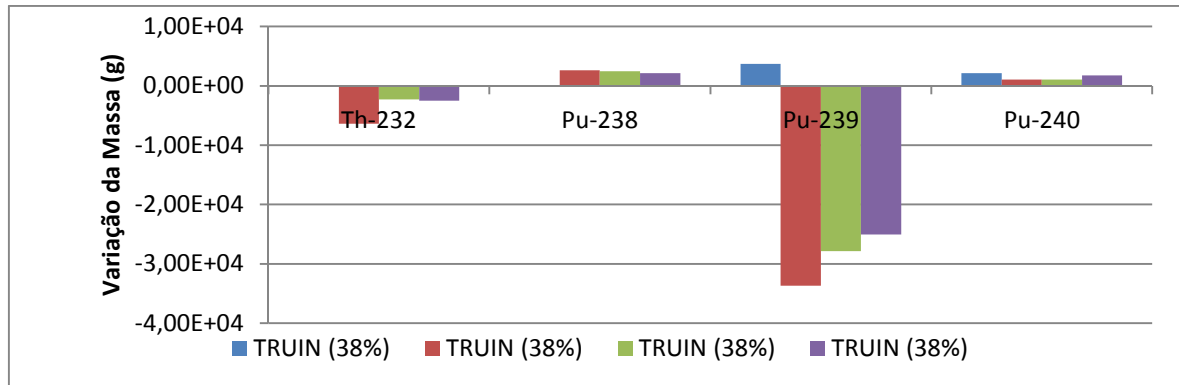


Figura 62 – Variação da massa dos nuclídeos ^{232}Th , ^{238}Pu , ^{239}Pu e ^{240}Pu para os combustíveis do elemento ELE 06.

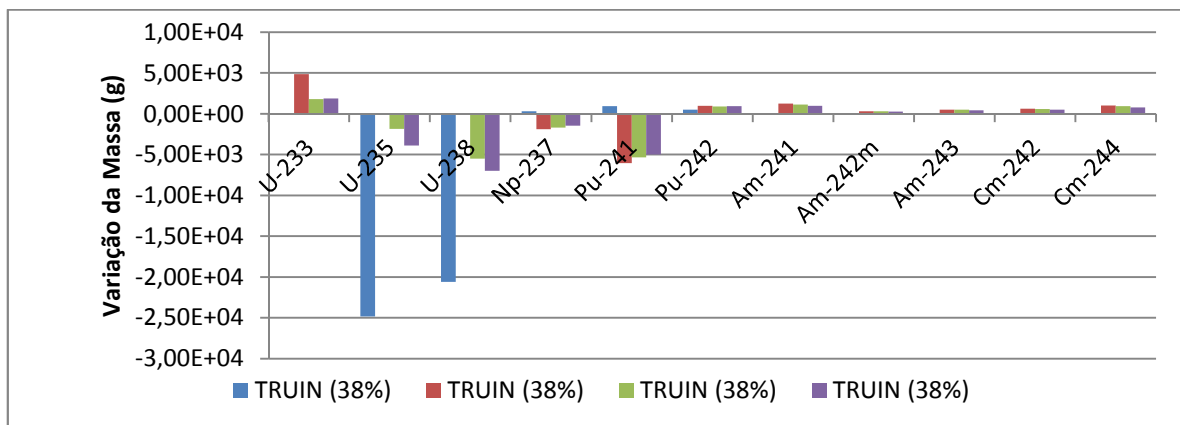


Figura 63 – Variação da massa dos nuclídeos ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{241}Pu , ^{242}Pu , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{243}Am , ^{242}Cm e ^{244}Cm para os combustíveis do elemento ELE 06.

Observa-se das Figuras anteriores que a variação da composição isotópica foi, novamente, similar para os seis tipos de elementos. Para o combustível UO_2 , houve aumento de massa dos nuclídeos ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu e diminuição de massa dos nuclídeos ^{235}U e ^{238}U . Para os combustíveis TRU, TRUOUT e TRUIN houve aumento de massa dos nuclídeos ^{233}U , ^{238}Pu , ^{242}Pu , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{243}Am , ^{242}Cm e ^{244}Cm e diminuição de massa dos nuclídeos ^{232}Th , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu e ^{241}Am .

No próximo capítulo será analisada a inserção de material reprocessado diluído em tório no núcleo do reator, utilizando os dois modelos: homogêneo e micro heterogêneo. Neste trabalho, escolheu-se avaliar o núcleo, inserido o combustível reprocessado nos elementos do tipo ELE 01.

5 PROPOSTA DE INSERÇÃO DE COMBUSTÍVEL REPROCESSADO DILUÍDO EM TÓRIO EM ELEMENTOS DE UM NÚCLEO

Após análise da inserção de combustível reprocessado diluído em tório considerando o modelo de célula e posteriormente o elemento combustível de forma homogênea e micro heterogênea, e comparada com um elemento combustível contendo UO_2 , parte-se agora para a análise de sua inserção no núcleo. Nesta fase, apenas se analisará a inserção no elemento tipo ELE 01, sem inserção de veneno queimável.

Esta análise seguiu as seguintes etapas:

- Modelagem do núcleo: inserções homogênea e micro heterogênea;
- Inserção de combustível reprocessado diluído em tório em substituição ao combustível UO_2 nas células de combustível do elemento combustível do tipo ELE 01;
- Cálculo de criticalidade, de queima, evolução isotópica do combustível e evolução da taxa de conversão.
- Comparação entre os modelos.

5.1 PROPOSTAS DE COMBUSTÍVEIS REPROCESSADOS DILUÍDO EM TÓRIO – INSERÇÕES HOMOGÊNEA E MICRO HETEROGÊNEA

Inicialmente, o núcleo de Angra 2 foi modelado de forma padrão, conforme informações do FSAR de Angra 2 (Eletronuclear, 2013). A Figura 64 apresenta o núcleo modelado, mostrando as posições ocupadas por seus seis tipos de elementos combustíveis. Simulou-se a queima deste núcleo utilizando-se os mesmos parâmetros de queima que as simulações anteriores e obteve-se o valor do fator de multiplicação efetivo, a evolução do combustível e o fator de conversão, ao longo da queima.

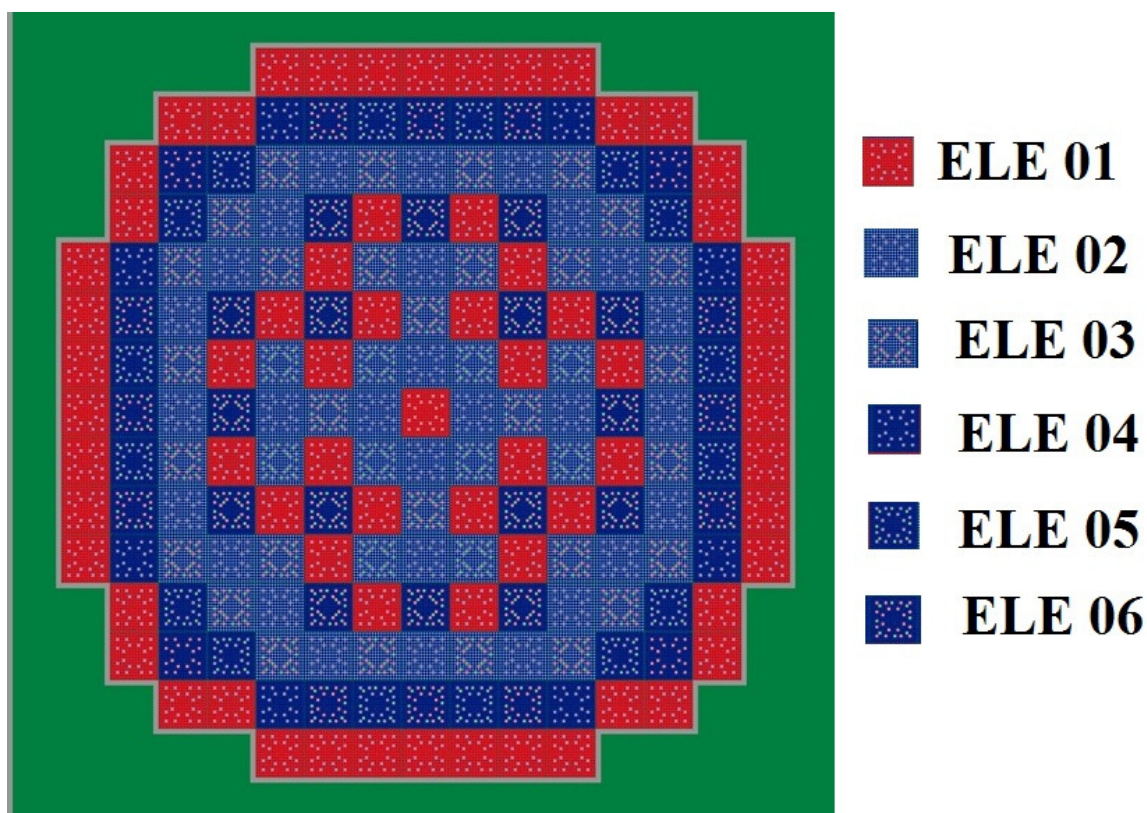


Figura 64 – Distribuição dos elementos no núcleo: elementos com UO_2 1,9% enriquecido em vermelho; elementos com UO_2 2,5% enriquecido em azul claro; com UO_2 3,2% enriquecido em azul escuro.

Em seguida, foram modelados três outros núcleos, substituindo os elementos combustíveis com combustível UO_2 no elemento tipo ELE 01 (elemento combustível UO_2 , 1,9% enriquecido, sem veneno queimável) pelos elementos combustíveis com combustível reprocessado diluído em tório nas três configurações caracterizadas: TRU, TRUOUT e TRUIN. Nos demais elementos do núcleo (ELE 02, ELE 03, ELE 04, ELE 05 e ELE 06) foram retiradas todas as varetas de veneno queimável, devido à grande quantidade de absorvedores presentes no combustível reprocessado diluído em tório.

Observou-se que, para que os valores do fator de multiplicação efetivo do núcleo com combustível reprocessado diluído em tório apresentassem-se próximos ao do núcleo padrão, a quantidade de material físsil necessária era muito grande. A quantidade de material físsil inserida nos elementos combustíveis com combustível reprocessado variou de 30% a 62%.

5.2 COMPARAÇÕES ENTRE OS MODELOS HOMOGÊNEO E MICRO HETEROGÊNEO

Conforme dito anteriormente, a quantidade de material físsil inserida nos elementos com combustível reprocessado diluído em tório variou de 30% a 62%, considerando as três configurações: TRU, TRUIN e TRUOUT.

Na configuração TRU, o combustível reprocessado diluído em tório com a quantidade de material físsil de 33%, inserido nos elementos tipo ELE 01 no núcleo, em substituição ao UO_2 do núcleo padrão, apresentou os valores mais próximos para k_{eff} em relação ao combustível UO_2 . A Tabela 42 apresenta a composição deste combustível.

Nas configurações TRUIN e TRUOUT, foi necessária uma quantidade muito grande de material físsil. Os valores de k_{eff} nas duas configurações só se tornou próximo ao valor do k_{eff} do núcleo padrão quando a quantidade de material físsil atingiu os 62%, cuja composição está apresentada na Tabela 43.

As Figuras 65 e 66 apresentam a evolução do k_{eff} ao longo da queima dos combustíveis escolhidos para a inserção no núcleo. Para melhor visualização do comportamento dos combustíveis reprocessados e diluídos em tório, já que se mostraram similares, apresentou-se também o comportamento deles separados do UO_2 .

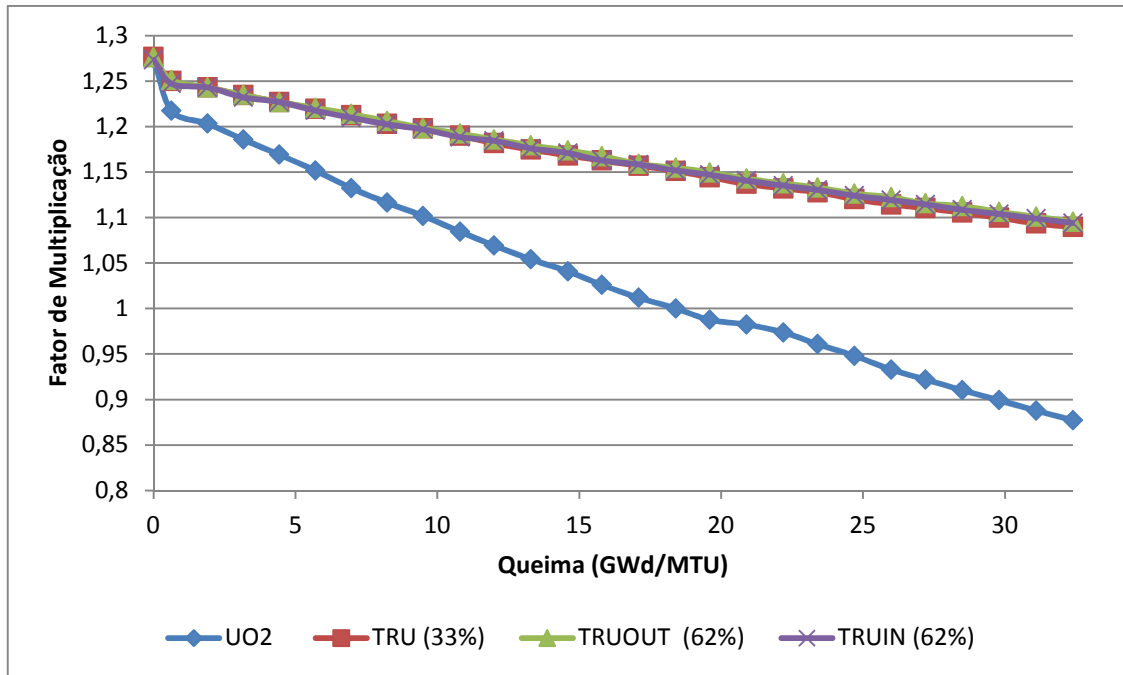


Figura 65 – Evolução do fator de multiplicação efetivo ao longo da queima para os combustíveis UO₂ e TRU (33%), TRUOUT (62%) e TRUIN (62%).

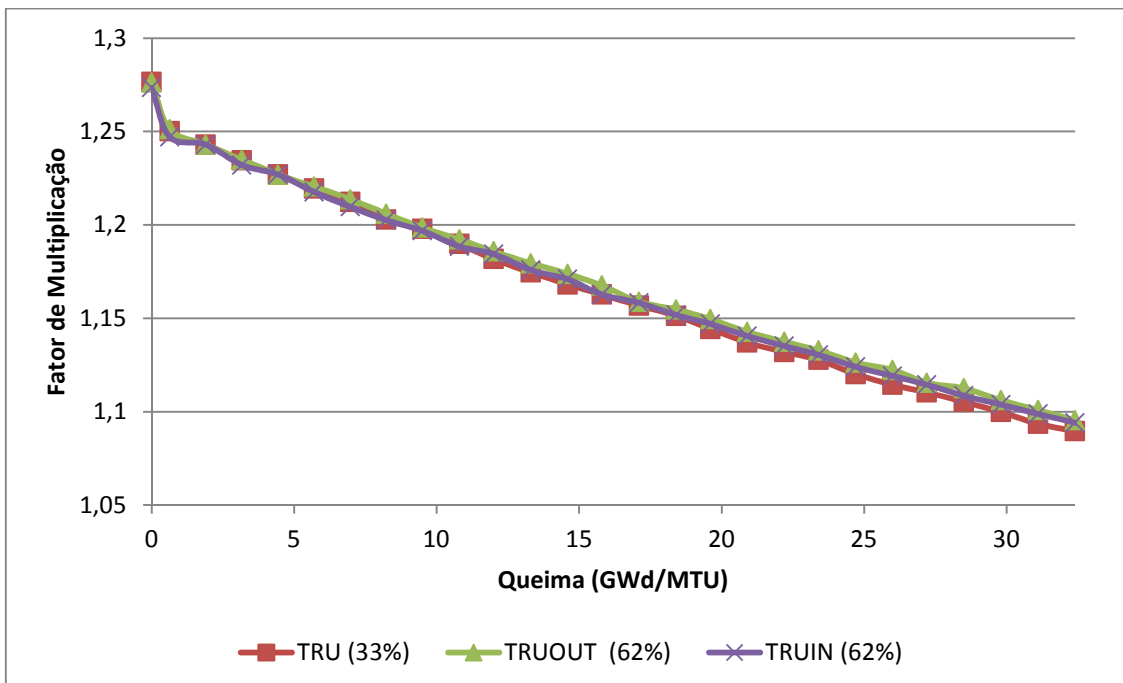


Figura 66 – Evolução do fator de multiplicação efetivo ao longo da queima para os combustíveis TRU (33%), TRUOUT (62%) e TRUIN (62%).

Tabela 42 – Composição do Combustível TRU (33%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	41,477
Pu-238	0,811
Pu-239	23,690
Pu-240	9,935
Pu-241	5,370
Pu-242	2,827
Np-237	1,532
Am-241	1,643
Am-242m	0,004
Am-243	0,616
Cm-242	0,001
Cm-243	0,001
Cm-244	0,142
Cm-245	0,007
Cm-246	0,001
O-16	11,937

Tabela 43 – Composição do Combustível TRUOUT/TRUIN (62%)

Isótopo	Peso Percentual (%)
Th-232	0,540
Pu-238	1,528
Pu-239	44,589
Pu-240	18,699
Pu-241	10,107
Pu-242	5,321
Np-237	2,884
Am-241	3,092
Am-242m	0,008
Am-243	1,161
Cm-242	0,001
Cm-243	0,003
Cm-244	0,267
Cm-245	0,014
Cm-246	0,001
O-16	11,779

Observa-se das Figuras 65 e 66 que, novamente, a variação do fator de multiplicação em função da queima dos combustíveis reprocessados, quando comparada com o do combustível de UO_2 padrão, é mais lenta, sugerindo uma possibilidade de extensão da queima.

Apesar da similaridade entre o comportamento dos combustíveis reprocessados, observa-se que as configurações TRUOUT/TRUIN são inviáveis, pois a quantidade de material físsil necessária é muito grande. Além disso, para atingir esta quantidade de material físsil, a quantidade de tório diluída na matriz do combustível se torna bem pequena (ver Tabela 43). Portanto, considerou-se a configuração TRU mais adequada para inserção de combustível reprocessado e diluído em tório no núcleo. Assim, os dados de evolução do combustível e do fator de conversão ao longo da queima, foram obtidos apenas para a configuração TRU. Estes dados foram comparados com os dados obtidos da queima do núcleo padrão,

As Figuras 67 a 69 apresentam o resultado do estudo da evolução isotópica do elemento combustível ao longo da queima, comparando os valores de massa no início e no final, para os combustíveis UO_2 e TRU. Novamente, para uma melhor análise, a variação da massa dos núclídeos em maior e em menor quantidade, também são apresentados.

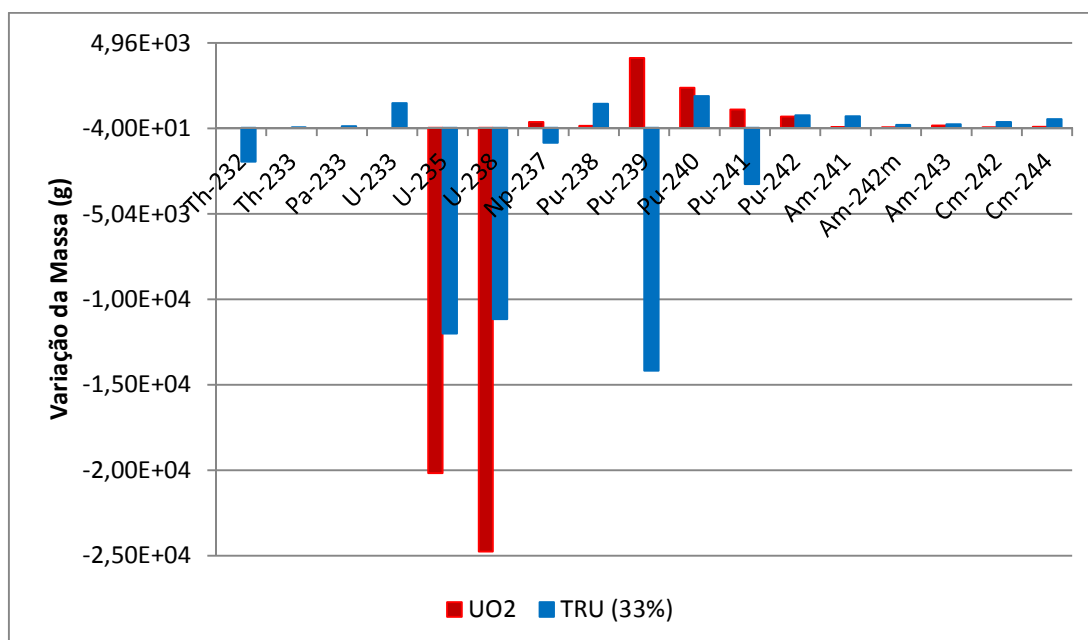


Figura 67 – Variação da massa dos núclídeos para os combustíveis UO_2 e TRU (33%).

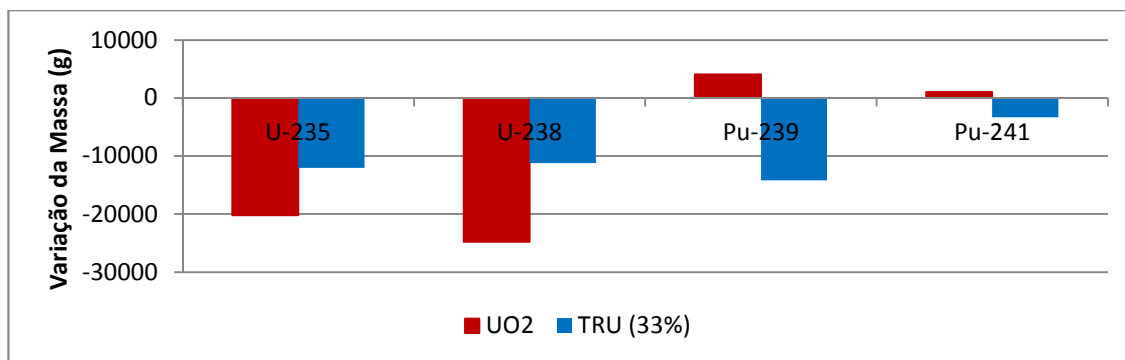


Figura 68 – Variação da massa dos nuclídeos ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu e ^{241}Pu para os combustíveis UO_2 e TRU (33%).

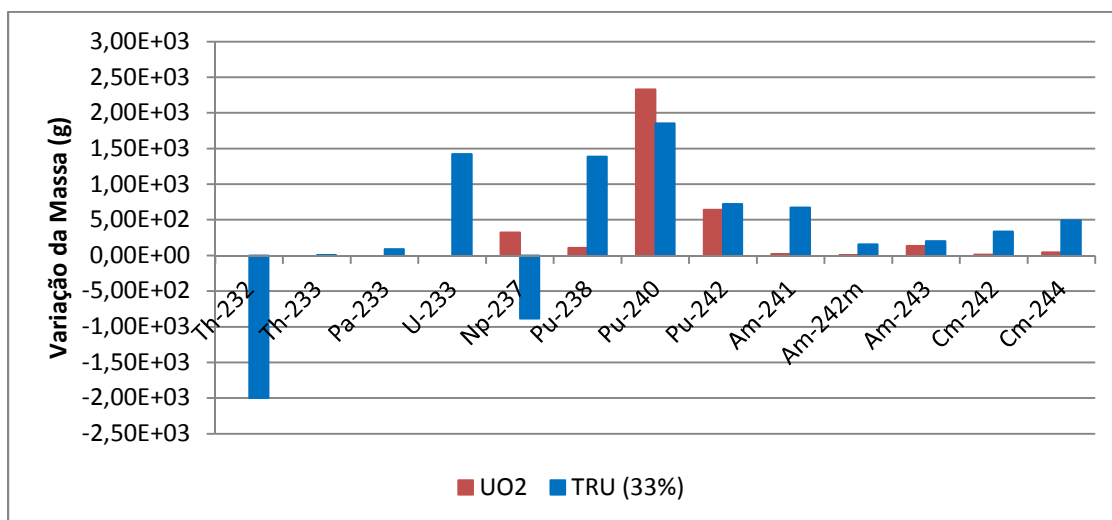


Figura 69 – Variação da massa dos nuclídeos ^{232}Th , ^{233}Th , ^{233}Pa , ^{233}U , ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{243}Am , ^{242}Cm e ^{244}Cm para os combustíveis UO_2 e TRU (33%).

Observa-se das figuras anteriores que, para o combustível UO_2 , houve aumento de massa dos nuclídeos ^{239}Pu e ^{241}Pu , principalmente, e diminuição de massa dos nuclídeos ^{235}U e ^{238}U . Para o combustível TRU, houve diminuição de massa dos nuclídeos ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu e ^{241}Pu . A vantagem desta diminuição da massa destes nuclídeos está na diminuição do risco de proliferação de combustível nuclear para armas nucleares,

As Figuras 70 a 73 apresentam a evolução isotópica dos elementos ^{232}Th , ^{233}Th , ^{233}Pa e ^{233}U ao longo da queima

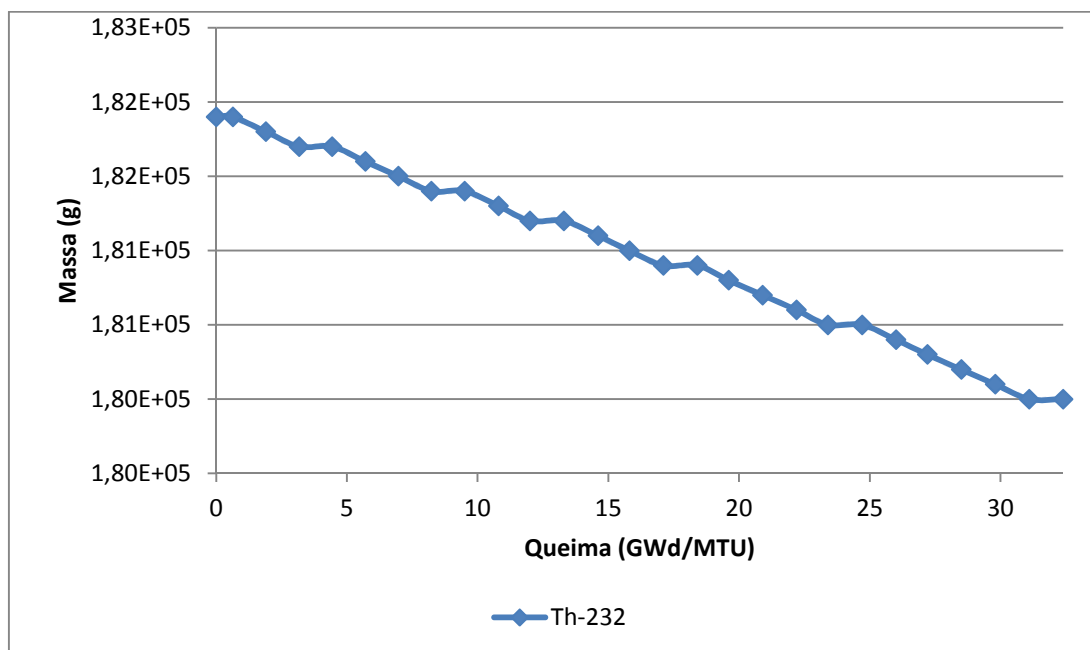


Figura 70 – Variação da massa do ^{232}Th ao longo da queima para os combustíveis TRU.

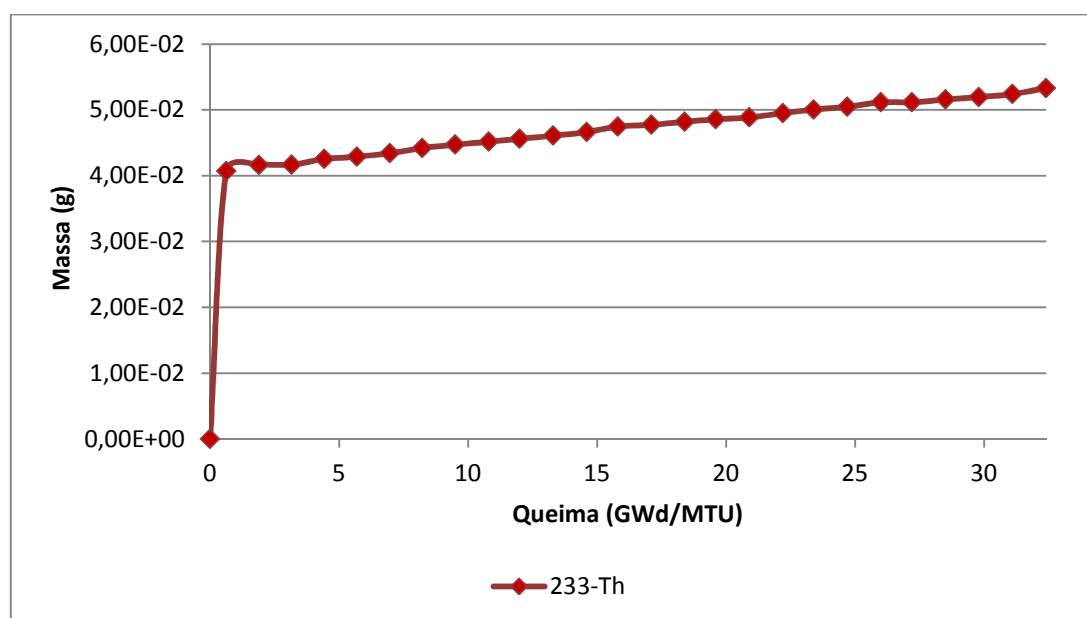


Figura 71 – Variação da massa do ^{233}Th ao longo da queima para os combustíveis TRU.

Observa-se das Figuras 70 e 71 que, houve diminuição da massa do ^{232}Th e aumento da massa do ^{233}Th , de forma intensa no começo da queima.

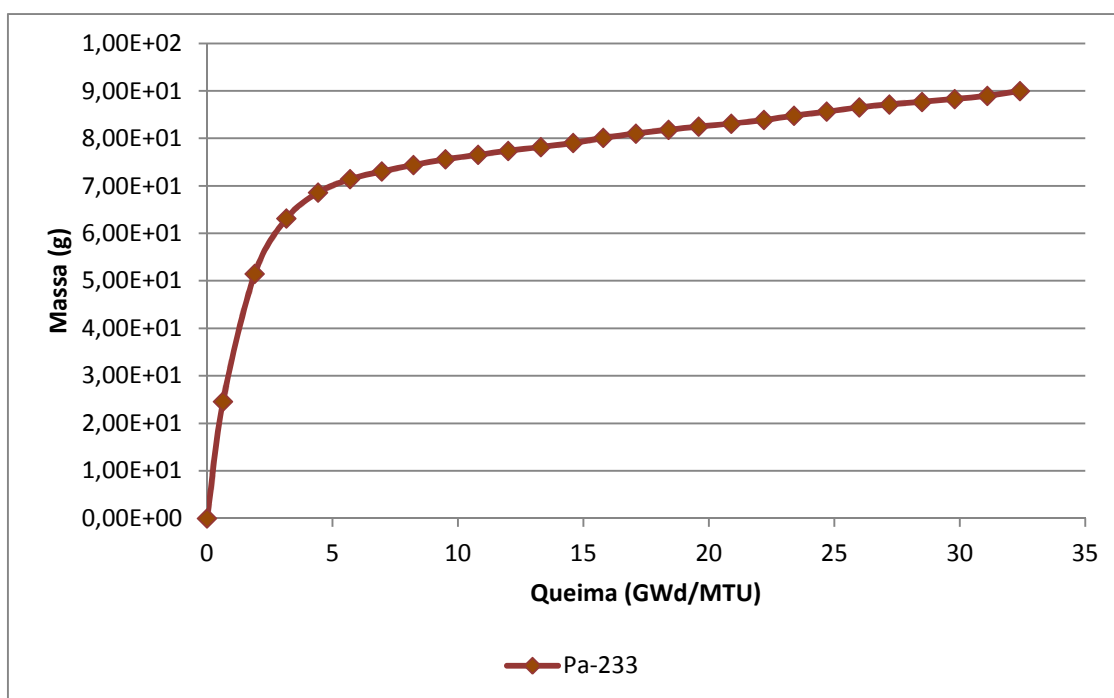


Figura 72 – Variação da massa do ^{233}Pa ao longo da queima para os combustíveis TRU.

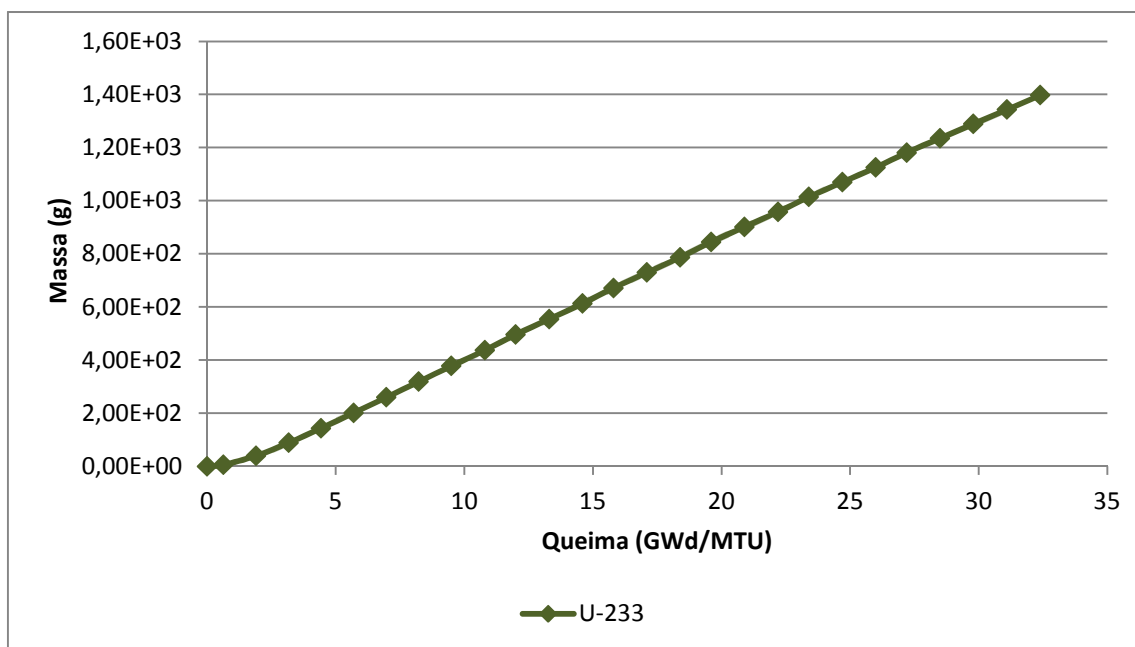


Figura 73 – Variação da massa do ^{233}U ao longo da queima para os combustíveis TRU.

Observa-se das Figuras 72 e 73 que, apesar do ^{233}Pa possuir maior seção de choque de absorção, a produção do ^{233}U é suficiente para promover a extensão da queima.

Finalmente, o fator de conversão (CR) foi calculada e sua evolução ao longo da queima foi analisada. Para isto, considerou-se os seguintes nuclídeos físséis presentes no início e no final da queima: ^{233}U , ^{235}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{241}Pu , ^{241}Am e ^{244}Cm . A Figura 74 apresenta a evolução do fator de conversão ao longo da queima do modelo homogêneo comparado com o núcleo padrão com combustível UO_2 .

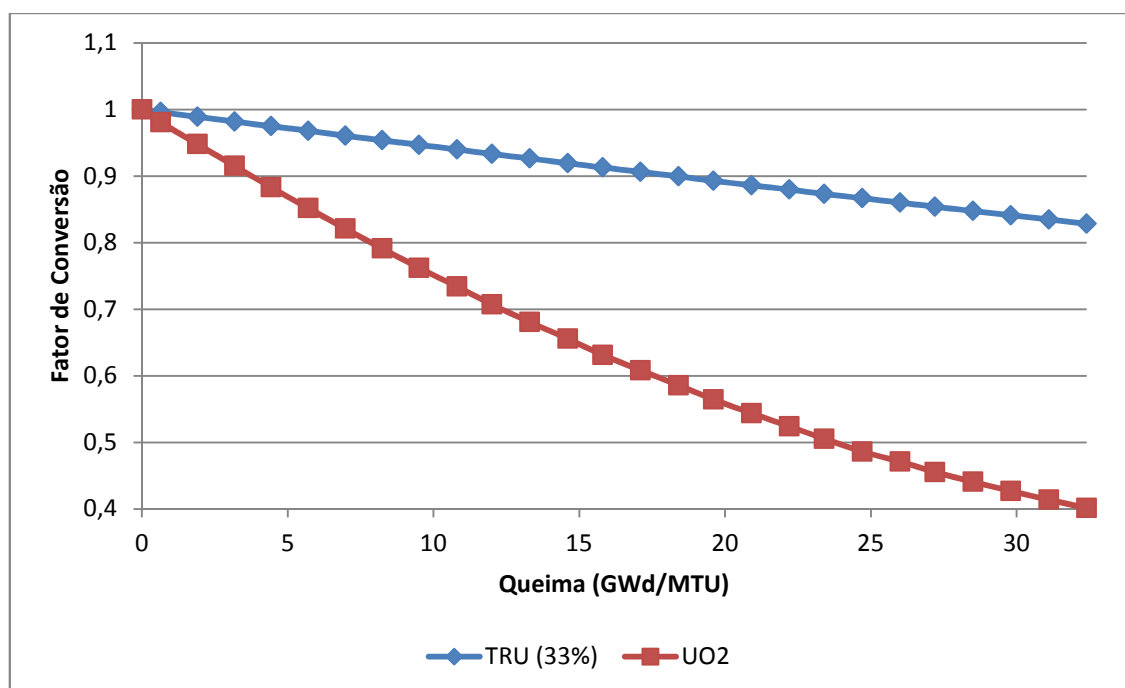


Figura 74 – Variação do Fator de Conversão ao longo da queima para os combustíveis TRU (33%) e UO_2 .

Observa-se da Figura 74 claramente, como esperado, que o reator de Angra 2 não é regenerador, entretanto a taxa de conversão usando combustível reprocessado diluído em tório é muito maior que o combustível tradicional e maior que a taxa de conversão quando se usa MOX em PWR, que é ao redor de 0,7, no final da queima (OECD, 2015). Isso mostra claramente a possibilidade de extensão da queima, considerando os itens avaliados nesta tes, o que aumenta a disponibilidade do reator e diminui o rejeito radioativo, diminuindo assim o risco de proliferação.

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

- O estudo demonstra a possibilidade de inserção de combustível reprocessado à base de elementos transurânicos e diluído em tório em um núcleo do tipo PWR porque se estende a queima, diminui o rejeito radioativo e diminui o risco à proliferação;
- O estudo demonstra a obtenção de economia em um ciclo do reator com o emprego do modelo homogêneo;
- O modelo que se mostrou mais adequado para a inserção de combustível reprocessado em tório foi o modelo homogêneo, no qual a quantidade de material físsil necessária para apresentar um comportamento similar ao do combustível UO_2 foi menor, em comparação ao modelo micro heterogêneo, o que possivelmente causará menos impacto no projeto geral do núcleo;
- Os modelos micro heterogêneos apresentaram comportamento similar ao do modelo homogêneo e, no núcleo, considerando o aspecto neutrônico abordado nesta tese, não houve variação significativa entre os comportamentos dos combustíveis nas outras duas configurações (TRUOUT e TRUIN);
- Em uma primeira avaliação, considerando a composição mais adequada para a inserção do combustível reprocessado diluído em tório foi nos elementos do tipo ELE 01 (elemento combustível UO_2 , 1,9% enriquecido, sem veneno queimável);;
- Não foi necessário manter as varetas de veneno queimável nos elementos do núcleo, uma vez que o combustível reprocessado diluído em tório contém absorvedores em quantidade suficiente para manter a criticalidade do sistema;
- A produção de ^{233}U não foi prejudicada devido à absorção de ^{233}Pa ;
- O fator de conversão é maior para o modelo homogêneo de combustíveis reprocessados diluídos em tório (TRU – 33%), estudados nesta tese, comparado com o combustível padrão UO_2 .

6.2 PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

- Fatores importantes tais como distribuição do fluxo e potência, fatores de pico e acoplamento neutrônico-termohidráulico no modelo do núcleo ainda devem ser avaliados em trabalhos futuros. Tais fatores e outros relacionados à segurança do reator devem ser analisados ainda, para que se possa definir adequadamente o posicionamento dos elementos combustíveis compostos de combustíveis reprocessados diluídos em tório.

REFERÊNCIAS

ARGONNE NATIONAL LABORATORY. **Lab-Scale Demonstration of the UREX+ Process**, WM'04 Conference, February 29 – March 4, Tucson, AZ. USA, 2004.

BOWMAN, S. M. **KENO-VI Primer: A Primer for Criticality Calculations with SCALE/KENO-VI Using GeeWiz**, Nuclear Science and Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2008/069, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2008

COTA, S.; PEREIRA C.; **Neutronic Evaluation Of The Nonproliferating Reprocessed Nuclear Fuels in Pressurized Water Reactors**. Annals of Nuclear Energy, Grã-Bretanha, v. 24, n.10, p. 829-834, 1997.

DEHART, M. D. **Triton: a two-dimensional transport and depletion module for characterization of spent nuclear fuel**. ORNL/TM-2005/39, Version 6, Vol. I, Sect. T1, Nuclear Science and Technology Division, 2009.

ELETRONUCLEAR - ELETROBRÁS TERMONUCLEAR S.A. **Final Safety Analysis Report – FSAR Angra 2**. Rio de Janeiro, Rev. 13, April, 2013.

FERREIRA, A. M. F. **Transurânicos em reator a gás de alta temperatura**. Universidade Federal de Minas Gerais, Tese de Doutorado, 2014.

GHOLAMZADEH Z. et al. **Burn-up calculation of different thorium-based fuel matrixes in a thermal research reactor using MCNPX 2.6 code**. NUKLEONIKA 2014;59(4):129-136 DOI: 10.2478/nuka-2014-0017, 2014.

GOLUOGLU, S. et al. **CSAS6: Control Module For Enhanced Criticality Safety Analysis With KENO-VI**. ORNL/TM-2008/039, 2008.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Reference data series n.1. 2008 edition Disponível em: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/45/073/45073473.pdf> Acesso em: 20 de janeiro de 2016.

MAIORINO J. R.; CARLUCCIO T. **A Review of Thorium Utilization as an option for Advanced Fuel Cycle- Potential Option for Brazil in the Future**. ANES: Americas Nuclear Energy Symposium, Miami Beach, Florida, October, 2004.

MUSEMBIA M. V.; SEUNG-YOUNGB J.; EUN-HAC, K. **Analysis of UREX+1a and Pyroprocessing Technologies from Safeguards Aspects**. Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting Gyeongju, Korea, October, 2013.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. NUCLEAR ENERGY AGENCY. **Burn-up Credit Criticality Benchmark. Phase IV-A. Reactivity Prediction Calculations for Infinite Arrays of PWR MOX Fuel Pin Cells**. NEA/NSC/DOC(2003)3. ISBN 92-64-02123-X. France, 2003.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Introduction of Thorium in the Nuclear Fuel Cycle:Short- to long-term considerations**.

Disponível em: <https://www.oecd-nea.org/science/pubs/2015/7224-thorium.pdf>. Acesso em: 06 de janeiro de 2016.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **State-of-the-art Report on Innovative Fuels for Advanced Nuclear Systems**, NEA, n. 6895, 2014. Disponível em: <https://www.oecd-nea.org/science/pubs/2014/6895-report-innovative-fuels.pdf>. Acesso em: 28 de abril de 2015.

PINHEIRO R.B. et al. **Final Report (1979-1988)”, German-Brazilian Cooperation in Scientific Research and Technological Development, Program of Research and Development on the Thorium Utilization in PWRs**. Herausgegeben Von Der Kernforschungsanlage Julich GmbH, ZENTRALBIBLIOTHEK Titelsatz: Graphische Betriebe Der KFA, p. 31, 1988.

SHAPIRA, J. P. G. **A joint venture between research (CEA and CNRS) and industry (EDF and FRAMATOME)**. Nuclear Physics, A654, p. 458c-466c, 1999.

THOMPSON, M. A. et al. **Demonstration of the Dresden Reactor Fuel Solution**. Available electronically at <http://www.osti.gov/bridge> Available for a processing fee to U.S. Department of Energy). September 30, 2002.

TODOSOW, M. et al. **Use of Thorium in Light Water Reactor**. Nuclear Technology , Vol.151, N°.2, 2005.

TSOULFANIDIS, N. **The Nuclear Fuel Cycle**. IBSN: 978-0-89448-460-5, 2013.

VANDEGRIFT, G. F. et al. **Lab Scale Demonstration of the Urex+ Process**. WM'04 Conference, February 29, – Tucson, AZ March 4, 2004.

WEAVER, K. D. et al **A PWR Thorium Pin Cell Burnup Benchmark** Advances in Reactor Physics and Mathematics and Computation into the Next Millennium (PHYSOR 2000), 2000.

APÊNDICE I
TABELAS COM OS DADOS DA VARIAÇÃO DA MASSA DOS NUCLÍDEOS

CAPÍTULO 3

- Variação da massa dos núclídeos ao longo da queima: CEL 01

ISÓTOPO	UO ₂ (1.9%)		TRU (13%)		TRUOUT (24%)		TRUIN (20%)	
	QUANT INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)
Th-232	0,00E+00	0,00E+00	7,91E+05	3,15E+05	3,21E+05	3,16E+05	3,55E+05	3,50E+05
U-233	0,00E+00	2,06E-04	0,00E+00	3,84E+03	0,00E+00	3,85E+03	0,00E+00	3,73E+03
U-235	1,90E+04	1,84E+03	3,89E-13	2,91E+01	9,08E+03	7,26E+03	9,07E+03	5,96E+03
U-238	9,80E+05	9,52E+05	3,94E-13	5,35E-02	4,69E+05	4,61E+05	4,68E+05	4,59E+05
Np-237	0,00E+00	2,94E+02	6,85E+03	5,06E+03	6,60E+03	5,14E+03	5,51E+03	4,28E+03
Pu-238	0,00E+00	1,06E+02	3,63E+03	5,71E+03	3,50E+03	5,73E+03	2,92E+03	4,83E+03
Pu-239	0,00E+00	3,80E+03	1,02E+05	7,06E+04	1,02E+05	7,63E+04	8,52E+04	6,18E+04
Pu-240	0,00E+00	2,60E+03	4,28E+04	4,27E+04	4,28E+04	4,31E+04	3,57E+04	3,70E+04
Pu-241	0,00E+00	1,11E+03	2,31E+04	2,12E+04	2,32E+04	2,12E+04	1,93E+04	1,75E+04
Pu-242	0,00E+00	8,29E+02	1,21E+04	1,30E+04	1,22E+04	1,30E+04	1,02E+04	1,11E+04
Am-241	0,00E+00	2,34E+01	7,08E+03	6,21E+03	7,08E+03	6,61E+03	5,91E+03	5,38E+03
Am-242m	0,00E+00	4,00E-01	0,00E+00	1,94E+02	7,84E-03	1,95E+02	0,00E+00	1,52E+02
Am-243	0,00E+00	1,71E+02	2,66E+03	3,31E+03	2,66E+03	3,31E+03	2,22E+03	2,75E+03
Cm-242	0,00E+00	1,32E+01	2,09E-02	5,24E+02	2,09E-02	5,25E+02	1,26E-01	4,53E+02
Cm-244	0,00E+00	5,80E+01	6,13E+02	1,59E+03	6,14E+02	1,60E+03	5,12E+02	1,33E+03

- Variação da massa dos nuclídeos ao longo da queima: CEL 02

ISÓTOPO	UO ₂ (2.5%)		TRU (21%)		TRUOUT (38%)		TRUIN (34%)	
	QUANT INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)
Th-232	0,00E+00	0,00E+00	6,63E+05	6,56E+05	2,04E+05	2,01E+05	3,55E+05	2,34E+05
U-233	0,00E+00	3,28E-04	0,00E+00	5,76E+03	0,00E+00	2,52E+03	0,00E+00	2,49E+03
U-235	2,50E+04	3,77E+03	3,89E-13	3,72E+01	1,19E+04	1,02E+04	9,07E+03	8,70E+03
U-238	9,75E+05	9,50E+05	3,94E-13	8,78E-02	4,66E+05	4,59E+05	4,68E+05	4,57E+05
Np-237	4,29E-13	3,22E+02	1,11E+04	9,16E+03	1,05E+04	8,74E+03	5,51E+03	7,85E+03
Pu-238	4,31E-13	1,04E+02	5,87E+03	8,49E+03	5,54E+03	8,04E+03	2,92E+03	7,18E+03
Pu-239	4,32E-13	4,00E+03	1,71E+05	1,38E+05	1,62E+05	1,35E+05	8,52E+04	1,20E+05
Pu-240	4,34E-13	2,44E+03	7,18E+04	7,25E+04	6,78E+04	6,86E+04	3,57E+04	6,23E+04
Pu-241	4,36E-13	1,09E+03	3,88E+04	3,37E+04	3,67E+04	3,22E+04	1,93E+04	2,85E+04
Pu-242	4,38E-13	6,47E+02	2,04E+04	2,13E+04	1,93E+04	2,01E+04	1,02E+04	1,82E+04
Am-241	0,00E+00	2,47E+01	1,19E+04	1,25E+04	1,12E+04	1,19E+04	5,91E+03	1,06E+04
Am-242m	0,00E+00	4,30E-01	0,00E+00	2,91E+02	0,00E+00	2,77E+02	0,00E+00	2,39E+02
Am-243	0,00E+00	1,23E+02	4,46E+03	5,01E+03	4,21E+03	4,77E+03	2,22E+03	4,22E+03
Cm-242	0,00E+00	1,16E+01	2,40E-01	6,11E+02	2,42E-01	5,83E+02	1,26E-01	5,20E+02
Cm-244	0,00E+00	3,60E+01	1,03E+03	2,08E+03	9,72E+02	1,97E+03	5,12E+02	1,72E+03

- Variação da massa dos nuclídeos ao longo da queima: CEL 03

ISÓTOPO	UO ₂ (3,2%)		TRU (27%)		TRUOUT (49%)		TRUIN (44%)	
	QUANT INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)
Th-232	0,00E+00	0,00E+00	5,67E+05	5,61E+05	1,12E+05	1,10E+05	1,54E+05	1,52E+05
U-233	0,00E+00	5,31E-04	0,00E+00	4,74E+03	0,00E+00	1,53E+03	0,00E+00	1,70E+03
U-235	3,20E+04	7,63E+03	3,89E-13	3,44E+01	1,53E+04	1,34E+04	1,53E+04	1,17E+04
U-238	9,68E+05	9,47E+05	3,94E-13	1,13E-01	4,62E+05	4,57E+05	4,62E+05	4,55E+05
Np-237	4,29E-13	3,23E+02	1,42E+04	1,22E+04	1,35E+04	1,17E+04	1,21E+04	1,05E+04
Pu-238	4,31E-13	8,89E+01	7,54E+03	1,02E+04	7,15E+03	9,71E+03	6,43E+03	8,71E+03
Pu-239	4,32E-13	4,28E+03	2,20E+05	1,87E+05	2,09E+05	1,82E+05	1,88E+05	1,63E+05
Pu-240	4,34E-13	2,16E+03	9,23E+04	9,33E+04	8,75E+04	8,85E+04	7,86E+04	8,03E+04
Pu-241	4,36E-13	1,03E+03	4,99E+04	4,27E+04	4,73E+04	4,08E+04	4,25E+04	3,65E+04
Pu-242	4,38E-13	4,41E+02	2,63E+04	2,71E+04	2,49E+04	2,57E+04	2,24E+04	2,32E+04
Am-241	0,00E+00	2,46E+01	1,53E+04	1,70E+04	1,45E+04	1,61E+04	1,30E+04	1,44E+04
Am-242m	0,00E+00	4,40E-01	0,00E+00	3,27E+02	0,00E+00	3,14E+02	0,00E+00	2,76E+02
Am-243	0,00E+00	7,36E+01	5,73E+03	6,21E+03	5,43E+03	5,91E+03	4,88E+03	5,27E+03
Cm-242	0,00E+00	8,81E+00	4,01E-02	6,25E+02	3,13E-01	5,99E+02	2,80E-01	5,39E+02
Cm-244	0,00E+00	1,76E+01	1,32E+03	2,33E+03	1,25E+03	2,21E+03	1,13E+03	1,95E+03

CAPÍTULO 4

- Variação da massa dos nuclídeos ao longo da queima: ELE 01

ISÓTOPO	UO ₂ (1.9%)		TRU (10%)		TRUOUT (18%)		TRUIN (13%)	
	QUANT INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)
Th-232	0,00E+00	0,00E+00	8,40E+05	8,29E+05	3,21E+05	3,66E+05	4,13E+05	4,07E+05
U-233	0,00E+00	1,78E-04	0,00E+00	7,61E+03	0,00E+00	4,12E+03	0,00E+00	4,14E+03
U-235	1,90E+04	1,56E+03	3,89E-13	4,64E+01	9,08E+03	6,89E+03	9,08E+03	5,29E+03
U-238	9,81E+05	9,53E+05	3,94E-13	4,35E-02	4,69E+05	4,64E+05	4,69E+05	4,59E+05
Np-237	4,29E-13	2,76E+02	5,27E+03	3,87E+03	6,60E+03	4,53E+03	3,58E+03	2,47E+03
Pu-238	4,31E-13	9,68E+01	2,79E+03	4,86E+03	3,50E+03	5,06E+04	1,90E+03	3,34E+03
Pu-239	4,32E-13	3,42E+03	8,15E+04	4,78E+04	1,02E+05	3,26E+04	5,53E+04	2,33E+04
Pu-240	4,34E-13	2,55E+03	3,42E+04	3,42E+04	4,28E+04	1,63E+04	2,32E+04	2,29E+04
Pu-241	4,36E-13	1,02E+03	1,85E+04	1,70E+04	2,32E+04	1,02E+04	1,25E+04	1,07E+04
Pu-242	4,38E-13	8,46E+02	9,73E+03	1,09E+04	1,22E+04	3,69E+03	6,60E+03	7,70E+03
Am-241	0,00E+00	2,03E+01	5,65E+03	4,75E+03	7,08E+03	4,53E+03	3,83E+03	2,96E+03
Am-242m	0,00E+00	3,32E-01	0,00E+00	1,42E+02	7,84E-03	1,35E+02	0,00E+00	8,11E+01
Am-243	0,00E+00	1,65E+02	2,12E+03	2,80E+03	2,66E+03	2,65E+03	1,44E+03	1,97E+03
Cm-242	0,00E+00	1,25E+01	1,20E-01	5,12E+02	2,09E-02	4,73E+02	8,37E-02	3,78E+02
Cm-244	0,00E+00	5,33E+01	4,90E+02	1,46E+03	6,14E+02	1,34E+03	3,32E+02	1,02E+03

- Variação da massa dos nuclídeos ao longo da queima: ELE 02

ISÓTOPO	UO ₂ (2.5%)		TRU (18%)		TRUOUT (35%)		TRUIN (30%)	
	QUANT INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)
Th-232	0,00E+00	0,00E+00	6,81E+05	6,74E+05	2,29E+05	2,26E+05	2,71E+05	2,68E+05
U-233	0,00E+00	2,63E-04	0,00E+00	5,69E+03	0,00E+00	2,59E+03	0,00E+00	2,59E+03
U-235	2,39E+04	2,97E+03	3,73E-13	3,40E+01	1,19E+04	2,44E+01	1,20E+04	8,48E+03
U-238	9,30E+05	9,07E+05	3,78E-13	7,28E+01	4,65E+03	4,67E+02	4,66E+05	4,58E+05
Np-237	4,09E-13	2,95E+02	9,09E+03	7,37E+03	9,65E+03	7,98E+03	8,26E+03	6,89E+03
Pu-238	4,11E-13	9,44E+01	4,82E+03	7,27E+03	5,11E+03	7,50E+03	4,38E+03	6,44E+03
Pu-239	4,13E-13	3,40E+03	1,41E+05	1,07E+05	1,49E+05	1,17E+05	1,28E+05	1,03E+05
Pu-240	4,14E-13	2,30E+03	5,89E+04	5,97E+04	6,25E+04	6,33E+04	5,35E+04	5,53E+04
Pu-241	4,16E-13	9,62E+02	3,19E+04	2,80E+04	3,38E+04	2,99E+04	2,89E+04	2,53E+04
Pu-242	4,18E-13	6,57E+02	1,68E+04	1,78E+04	1,78E+04	1,87E+04	1,52E+04	1,62E+04
Am-241	0,00E+00	2,05E+01	9,75E+03	9,86E+03	1,03E+04	1,08E+04	8,85E+03	9,12E+03
Am-242m	0,00E+00	3,41E-01	0,00E+00	2,50E+02	0,00E+00	2,62E+02	0,00E+00	2,14E+02
Am-243	0,00E+00	1,20E+02	3,66E+03	4,23E+03	3,88E+03	4,45E+03	3,33E+03	3,78E+03
Cm-242	0,00E+00	1,09E+01	2,30E-01	5,85E+02	2,24E-01	5,71E+02	2,09E-02	4,99E+02
Cm-244	0,00E+00	3,42E+01	8,44E+02	1,85E+03	8,96E+02	1,85E+03	7,67E+02	1,56E+03

- Variação da massa dos nuclídeos ao longo da queima: ELE 03

ISÓTOPO	UO ₂ (2.5%)		TRU (17%)		TRUOUT (30%)		TRUIN (25%)	
	QUANT INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)
Th-232	0,00E+00	0,00E+00	6,97E+05	6,89E+05	2,60E+05	2,56E+05	2,99E+05	2,95E+05
U-233	0,00E+00	2,63E-04	0,00E+00	5,87E+03	0,00E+00	2,91E+03	0,00E+00	2,88E+03
U-235	2,39E+04	2,97E+03	3,73E-13	3,48E+01	1,14E+04	9,48E+03	1,14E+04	7,77E+03
U-238	9,30E+05	9,07E+05	3,78E-13	6,88E-02	4,45E+05	4,38E+05	4,46E+05	4,38E+05
Np-237	4,09E-13	2,95E+02	8,59E+03	6,90E+03	7,91E+03	6,43E+03	6,57E+03	5,33E+03
Pu-238	4,11E-13	9,44E+01	4,55E+03	6,97E+03	4,19E+03	6,45E+03	3,48E+03	5,40E+03
Pu-239	4,13E-13	3,40E+03	1,33E+05	9,88E+04	1,22E+05	9,50E+04	1,02E+05	7,71E+04
Pu-240	4,14E-13	2,30E+03	5,57E+04	5,64E+04	5,13E+04	5,21E+04	4,26E+04	4,43E+04
Pu-241	4,16E-13	9,62E+02	3,01E+04	2,66E+04	2,77E+04	2,48E+04	2,30E+04	2,04E+04
Pu-242	4,18E-13	6,57E+02	1,58E+04	1,69E+04	1,46E+04	1,55E+04	1,21E+04	1,31E+04
Am-241	0,00E+00	2,05E+01	9,21E+03	9,17E+03	8,48E+03	8,43E+03	7,05E+03	6,87E+03
Am-242m	0,00E+00	3,41E-01	0,00E+00	2,39E+02	0,00E+00	2,22E+02	0,00E+00	1,75E+02
Am-243	0,00E+00	1,20E+02	3,46E+03	4,04E+03	3,19E+03	3,77E+03	2,65E+03	3,11E+03
Cm-242	0,00E+00	1,09E+01	1,92E-01	5,79E+02	2,00E-02	5,41E+02	2,00E-02	4,66E+02
Cm-244	0,00E+00	3,42E+01	7,97E+02	1,80E+03	7,35E+02	1,67E+03	6,10E+02	1,38E+03

- Variação da massa dos nuclídeos ao longo da queima: ELE 04

ISÓTOPO	UO ₂ (3,2%)		TRU (27%)		TRUOUT (48%)		TRUIN (43%)	
	QUANT INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)
Th-232	0,00E+00	0,00E+00	5,67E+05	5,61E+05	1,21E+05	1,19E+05	1,62E+05	1,60E+05
U-233	0,00E+00	4,79E-04	0,00E+00	4,42E+03	0,00E+00	1,51E+03	0,00E+00	1,65E+03
U-235	3,20E+04	6,51E+03	3,89E-13	3,19E+01	1,53E+04	1,35E+04	1,53E+04	1,15E+04
U-238	9,68E+05	9,47E+05	3,94E-13	1,13E-01	4,62E+05	4,56E+05	4,62E+05	4,56E+05
Np-237	4,29E-13	3,16E+02	1,42E+04	1,23E+04	1,32E+04	1,15E+04	1,18E+04	1,03E+04
Pu-238	4,31E-13	8,74E+01	7,54E+03	1,02E+04	7,01E+03	9,52E+03	6,27E+03	8,48E+03
Pu-239	4,32E-13	3,81E+03	2,20E+05	1,87E+05	2,05E+05	1,77E+05	1,83E+05	1,58E+05
Pu-240	4,34E-13	2,18E+03	9,23E+04	9,35E+04	8,58E+04	8,70E+04	7,68E+04	7,86E+04
Pu-241	4,36E-13	9,57E+02	4,99E+04	4,29E+04	4,64E+04	4,02E+04	4,15E+04	3,57E+04
Pu-242	4,38E-13	4,80E+02	2,63E+04	2,72E+04	2,44E+04	2,53E+04	2,19E+04	2,28E+04
Am-241	0,00E+00	2,27E+01	1,53E+04	1,70E+04	1,42E+04	1,58E+04	1,27E+04	1,41E+04
Am-242m	0,00E+00	3,87E-01	0,00E+00	3,28E+02	0,00E+00	3,11E+02	0,00E+00	2,69E+02
Am-243	0,00E+00	7,71E+01	5,73E+03	6,20E+03	5,33E+03	5,81E+03	4,77E+03	5,15E+03
Cm-242	0,00E+00	9,04E+00	4,01E-02	6,25E+02	3,07E-01	5,98E+02	2,74E-01	5,31E+02
Cm-244	0,00E+00	1,81E+01	1,32E+03	2,31E+03	1,23E+03	2,17E+03	1,10E+03	1,89E+03

- Variação da massa dos nuclídeos ao longo da queima: ELE 05

ISÓTOPO	UO ₂ (3.2%)		TRU (24%)		TRUOUT (44%)		TRUIN (39%)	
	QUANT INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)
Th-232	0,00E+00	0,00E+00	6,15E+05	6,09E+05	1,50E+05	1,47E+05	1,90E+05	1,87E+05
U-233	0,00E+00	4,32E-04	0,00E+00	4,86E+03	0,00E+00	1,81E+03	0,00E+00	1,89E+03
U-235	3,10E+04	6,18E+03	3,89E-13	3,22E+01	1,48E+04	1,29E+04	1,49E+04	1,10E+04
U-238	9,38E+05	9,18E+05	3,94E-13	1,01E-01	4,48E+05	4,43E+05	4,49E+05	4,42E+05
Np-237	4,16E-13	3,12E+02	1,26E+04	1,07E+04	1,18E+04	1,01E+04	1,04E+04	8,95E+03
Pu-238	4,17E-13	8,79E+01	6,71E+03	9,31E+03	6,24E+03	8,71E+03	5,52E+03	7,67E+03
Pu-239	4,19E-13	3,71E+03	1,96E+05	1,62E+05	1,82E+05	1,54E+05	1,61E+05	1,36E+05
Pu-240	4,21E-13	2,14E+03	8,20E+04	8,31E+04	7,64E+04	7,75E+04	6,75E+04	6,93E+04
Pu-241	4,23E-13	9,42E+02	4,44E+04	3,83E+04	4,13E+04	3,60E+04	3,65E+04	3,15E+04
Pu-242	4,24E-13	4,82E+02	2,34E+04	2,43E+04	2,17E+04	2,26E+04	1,92E+04	2,02E+04
Am-241	0,00E+00	2,24E+01	1,36E+04	1,48E+04	1,26E+04	1,38E+04	1,12E+04	1,21E+04
Am-242m	0,00E+00	3,82E-01	0,00E+00	3,10E+02	0,00E+00	2,92E+02	0,00E+00	2,50E+02
Am-243	0,00E+00	7,83E+01	5,10E+03	5,60E+03	4,74E+03	5,24E+03	4,20E+03	4,60E+03
Cm-242	0,00E+00	9,06E+00	4,01E-02	6,18E+02	2,72E-01	5,86E+02	2,41E-01	5,17E+02
Cm-244	0,00E+00	1,89E+01	1,18E+03	2,18E+03	1,09E+03	2,03E+03	9,67E+02	1,76E+03

- Variação da massa dos nuclídeos ao longo da queima: ELE 06

ISÓTOPO	UO ₂ (3,2%)		TRU (24%)		TRUOUT (43%)		TRUIN (38%)	
	QUANT INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)	QUANTIDADE INICIAL (g)	QUANTIDADE FINAL (g)
Th-232	0,00E+00	0,00E+00	6,15E+05	6,09E+05	1,50E+05	1,47E+05	1,90E+05	1,87E+05
U-233	0,00E+00	4,32E-04	0,00E+00	4,86E+03	0,00E+00	1,81E+03	0,00E+00	1,89E+03
U-235	3,10E+04	6,18E+03	3,89E-13	3,22E+01	1,48E+04	1,29E+04	1,49E+04	1,10E+04
U-238	9,38E+05	9,18E+05	3,94E-13	1,01E-01	4,48E+05	4,43E+05	4,49E+05	4,42E+05
Np-237	4,16E-13	3,12E+02	1,26E+04	1,07E+04	1,18E+04	1,01E+04	1,04E+04	8,95E+03
Pu-238	4,17E-13	8,79E+01	6,71E+03	9,31E+03	6,24E+03	8,71E+03	5,52E+03	7,67E+03
Pu-239	4,19E-13	3,71E+03	1,96E+05	1,62E+05	1,82E+05	1,54E+05	1,61E+05	1,36E+05
Pu-240	4,21E-13	2,14E+03	8,20E+04	8,31E+04	7,64E+04	7,75E+04	6,75E+04	6,93E+04
Pu-241	4,23E-13	9,42E+02	4,44E+04	3,83E+04	4,13E+04	3,60E+04	3,65E+04	3,15E+04
Pu-242	4,24E-13	4,82E+02	2,34E+04	2,43E+04	2,17E+04	2,26E+04	1,92E+04	2,02E+04
Am-241	0,00E+00	2,24E+01	1,36E+04	1,48E+04	1,26E+04	1,38E+04	1,12E+04	1,21E+04
Am-242m	0,00E+00	3,82E-01	0,00E+00	3,10E+02	0,00E+00	2,92E+02	0,00E+00	2,50E+02
Am-243	0,00E+00	7,83E+01	5,10E+03	5,60E+03	4,74E+03	5,24E+03	4,20E+03	4,60E+03
Cm-242	0,00E+00	9,06E+00	4,01E-02	6,18E+02	2,72E-01	5,86E+02	2,41E-01	5,17E+02
Cm-244	0,00E+00	1,89E+01	1,18E+03	2,18E+03	1,09E+03	2,03E+03	9,67E+02	1,76E+03

APÊNDICE II

TRABALHOS PUBLICADOS EM DECORRÊNCIA DA PESQUISA REALIZADA

ARTIGOS COMPLETOS PUBLICADOS EM PERIÓDICOS

- MONTEIRO, FABIANA B. A.; CASTRO, VICTOR F.; DE FARIA, ROCHKHUDSON B.; FORTINI, ÂNGELA; DA SILVA, CLARYSSON A. M.; PEREIRA, CLAUBIA. **Micro Heterogeneous Approaches for the Insertion of Reprocessed and Combined Thorium Fuel Cycles in a PWR System.** MRS Proceedings, v. 1814, p. imrc2015sim28-abs012, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1557/opl.2016.34>
- MONTEIRO, FABIANA. B. A.; DE FARIA, ROCHKHUDSON. B.; FORTINI, ÂNGELA ; DA SILVA, CLARYSSON A. M. ; PEREIRA, CLÁUBIA . **Assessment of the Insertion of Reprocessed Fuels and Combined Thorium Fuel Cycles in a PWR System.** MRS Proceedings, v. 1769, p. 6E 13, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1557/opl.2015.123>

CAPÍTULOS DE LIVROS PUBLICADOS

- MONTEIRO, FABIANA B. A.; VELASQUEZ, CARLOS E. ; DE FARIA, ROCHKHUDSON B. ; DE ALMEIDA, DIEGO M. ; FORTINI, ÂNGELA ; PEREIRA, CLAUBIA ; VELOSO, MARIA AUXILIADORA F. ; COSTA, ANTONELLA L. **Thorium and Transuranic (TRU) Advanced Fuel Cycle: An Option for Brazilian Nuclear Plants.** Thorium Energy for the World. 1ed.: Springer International Publishing, 2016, v. , p. 399-401.
DOI: 10.1007/978-3-319-26542-1_66

PARTICIPAÇÃO EM CONGRESSOS INTERNACIONAIS

- AVELAR, F. B.; PEREIRA, CLAUDIA; M. DA SILVA, CLARYSSON; V. DE SOUSA, RÔMULO; F. VELOSO, MARIA AUXILIADORA; L. COSTA, ANTONELLA. **Study of Thorium advanced Fuel Cycle Utilization in Angra II Brazilian Power Plant**. 2013 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2013- Recife, PE, Brazil, November 24-29, 2013. Associação Brasileira de Energia Nuclear – ABEN. ISBN: 978-85-99141-05-2.
- AVELAR, FABIANA. B.; CASTRO VICTOR. F.; DE FARIA, ROCKHUDSON. B.; PEREIRA, CLAUDIA.; FORTINI, ÂNGELA. **Study of Thorium advanced Fuel Cycle Utilization in Angra II Brazilian Power Plant**. 2015 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2015 São Paulo, SP, Brazil, October 4-9, 2015. Associação Brasileira de Energia Nuclear – ABEN. ISBN: 978-85-99141-06-9.

OUTRAS PARTICIPAÇÕES

- AVELAR, F. B.; PEREIRA, C.; SOUZA, R. V.; FARIA, R. B. **Avaliação da Inserção de combustíveis reprocessados diluídos em tório em reatores do tipo PWR. 2014. (II SENCIR).**