



Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Nuclear
Programa de Pós Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares

AVALIAÇÃO NEUTRÔNICA DA INSERÇÃO DE VENENO
QUEIMÁVEL EM REATOR A ÁGUA PRESSURIZADA

ROCHKHUDSON BATISTA DE FARIA

BELO HORIZONTE - MG
FEVEREIRO – 2013

ROCHKHUDSON BATISTA DE FARIA

**AVALIAÇÃO NEUTRÔNICA DA INSERÇÃO DE VENENO QUEIMÁVEL EM
REATOR A ÁGUA PRESSURIZADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências e Técnicas Nucleares.

Área de concentração: Engenharia Nuclear

Orientadora: Prof^a. Dr^a Maria Auxiliadora Fortini Veloso

Co-Orientador: Prof. Dr. Clarysson Alberto Mello da Silva

Belo Horizonte, MG, 19 de fevereiro de 2013.

F224a

Faria, Rochkudson Batista de.

Avaliação neutrônica da inserção de veneno em reator a água pressurizada [manuscrito] / Rochkudson Batista de Faria. – 2013. xvii, 94 f., enc.: il.

Orientadora: Maria Auxiliadora Fortini Veloso.

Co-orientador: Clarysson Alberto Mello da Silva.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 90-94.

1. Engenharia nuclear – Teses. 2. Reatores de água pressurizada – Teses. I. Fortini, Maria Auxiliadora Veloso. II. Silva, Clarysson Alberto Mello da. III. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.039(043)

AGRADECIMENTOS

Tenho imensa gratidão a muitas pessoas durante esta etapa da minha vida, certamente sem elas não conseguiria vencer, mas em especial quero destacar:

A JAVÉ meu Senhor e meu Deus que sempre ouviu, viu meus pedidos e se fez presente nas diversas pessoas que me ajudaram.

Ao papai (João “Dorites”) que enquanto pode, com o seu modo ser me ensinou a ter paciência, embora eu ainda esteja aprendendo. Saudades

À mamãe (Rita), a quem durante boa parte da minha vida, vi trabalhando dia e noite, quase sem descanso para garantir o meu sustento e de meus irmãos, fazendo o máximo, para que pudéssemos ter o mínimo necessário para sermos pessoas honestas e trabalhadoras, muito obrigado, a senhora consegui.

À Cláudia, minha querida amada, companheira, cúmplice, amor, esposa, mãe das minhas lindas filhas, obrigado por está sempre ao meu lado principalmente em momentos de muita angústia, obrigado por sonhar comigo o meu sonho você não sabe o quanto lhe sou grato.

À titia (Edilourdes) que sempre rezou por mim.

Ao Elias e à Eliana (Lili), pela generosidade de me abrigar em sua casa durante todo esse tempo.

Aos meus irmãos por compreender a minha ausência.

Ao Dr. Daniel Cristian Ferreira Soares, pelas inúmeras e incansáveis conversas que me incentivaram a sair do interior e vir atrás do meu sonho.

À Prof^a Dr^a Cláudia que acreditou em mim, sempre me respeitou e foi muito compreensiva.

Aos colegas e amigos do DEN, por me ajudar com livros, conversas e pelo imenso carinho demonstrado no nascimento da Eduarda.

Aos funcionários e professores do DEN, em especial à Dora minha orientadora pelos conselhos que foram além do desenvolvimento deste trabalho e ao Clarysson, meu co-orientador.

Ao Dr. Rômulo Verdolin de Sousa pela imensa ajuda na modelagem e pelas conversas de incentivo.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Dedico à Cláudia, Carolina e Eduarda (as minhas meninas).

“Podem tirar tudo de você menos o conhecimento”
Albert Einstein

RESUMO

O desenvolvimento deste trabalho teve como partida o “*Burn-up Credit Criticality Benchmark - Phase II-D - PWR-UO₂ Assembly Study of Control Rod Effects on Spent Fuel Composition*” (caso 15), que foi modelado usando os códigos MCNP5 e SCALE 6.0, através dos módulos CSAS6 e TRITON. Os resultados do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) foram comparados com os obtidos por instituições internacionais. Posteriormente, usando o mesmo caso 15 do *Benchmark*, foi realizada uma análise de sensibilidade, usando o SCALE 6.0. Para isso, foram testadas diversas mudanças tais como inserção de diferentes percentuais de veneno queimável, alteração do número e das posições das barras. Em todas as situações foram realizadas análises, comparações e discussões sobre os resultados obtidos.

A mesma metodologia foi aplicada ao núcleo do reator da Central Nuclear do Brasil, Angra II, para inicialmente avaliar o seu comportamento quando submetido a uma variação do percentual de veneno queimável e, em seguida, introduzir modificações também no enriquecimento do combustível nuclear, fazendo as devidas comparações dos resultados obtidos.

Com os resultados e experiências adquiridos, o Departamento de Engenharia Nuclear, está preparado para fazer análises de controle de reatividade com a utilização de diferentes tipos de venenos queimáveis com o código SCALE 6.0 através de seus diversos módulos.

Palavras-Chave: Reator água pressurizada, veneno queimável, gadolínio.

ABSTRACT

The development of this work was to match the "Burn-up Credit Criticality Benchmark - Phase II-D - PWR-UO₂ Assembly Study of Control Rod Effects on Spent Fuel Composition" (case 15), which was modeled using the code MCNP5 and SCALE 6.0. The results of the infinite multiplication factor (k_{inf}) were compared with those obtained by international institutions. Later we performed in this same benchmark, a sensitivity analysis using SCALE 6.0. Thus, we tested several changes in case 15 of Benchmark, such as insertion of different percentages of burnable poison, changing the number and positions of the rods. In all cases were analyzed, comparisons and discussions about the results.

The same methodology was applied to the reactor core of the Nuclear Plant in Brazil, Angra II, initially to evaluate its behavior when subjected to a variation in the percentage of burnable poison and then, introduce changes also in the enrichment of nuclear fuel, doing the appropriate comparisons of results.

Considering results and experience gained, the Department of Nuclear Engineering, is prepared to control analysis of reactivity with the use of different types of burnable poisons under the code SCALE 6.0 through its various modules.

Keywords: Pressurized reactor water, burnable poison, gadolinium.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEC - Atomic Energy Commission
AIEA – Atomic International Energy Agency
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
BNFL - British Nuclear Fuels
BPR - Burnable Poison Rods
BVQ – Barra de Veneno Queimável
CEA - Commissariat à l'Énergie Atomique
CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear
CSAS – Criticality Safety Analysis Sequence
DEN – Departamento de Engenharia Nuclear
EB0 – Elemento Benchmark Zero
EC – Elemento Combustível
EC-SBVQ – Elemento Combustível – Sem Barra de Veneno Queimável
EC-WBPR – Elemento Combustível – Without Burnable Poison Rod
FSAR – Final Safety Analysis Report
IBA - Integral Burnable Absorbers
INB – Indústrias Nucleares do Brasil
JAERI - Japan Atomic Energy Research Institute
JENDL – Dados de Biblioteca
JNES - Japan Nuclear Energy Safety Organisation
LWR - Light Water Reactor
MCNP5 – Monte Carlo N-Partícula Versão 5
NEI – Nuclear Energy Institute
OECD – Organisation for Economic Co-Operation and Development
ORNL - Oak Ridge National Laboratory
PSI - Paul Scherrer Institute
PWR – Pressurized Water Reactor
RSD - Relative Standard Deviation
SBVQ – Sem Barras de Veneno Queimável
SCALE - Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation)

SERCO – Institute United Kingdom

SD – Standard Deviation

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

VTT - Technical Research Centre of Finland

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Participação percentual da energia nuclear na energia total produzida. Fonte: AIEA, 2009.	2
Figura 2.1: Representação esquemática do reator nuclear tipo Angra II [ANEEL, 2008].	7
Figura 2.2: Pastilhas, varetas, esqueleto e elemento combustível [INB, 2013].	11
Figura 2.3: Fluxograma para cálculo de criticalidade.	15
Figura 2.4: Fluxograma da sequência analítica do caminho T-DEPL.....	19
Figura 3.1: Geometria da célula do combustível simulado com os códigos MCNP5 e TRITON6	23
Figura 3.2: Geometria da célula do tubo guia sem barras de controle simulado com os códigos MCNP5 e TRITON6	23
Figura 3.3: Elemento combustível simulado com os códigos MCNP5 e TRITON6	24
Figura 3.4: Fator de multiplicação infinito do EB0.....	27
Figura 3.5: Variação percentual do k_{inf} do EB0	28
Figura 3.6: Fluxo térmico do elemento EB0	29
Figura 3.7: Razão fluxos térmico/total do elemento EB0	29
Figura 3.8: Elemento combustível sem barras de veneno queimável	33
Figura 3.9: Elemento combustível com 08 barras de veneno queimável	33
Figura 3.10: Elemento combustível com 12 barras de veneno queimável	34
Figura 3.11: Elemento combustível com 16 barras de veneno queimável	34
Figura 3.12: Elemento combustível com 20 barras de veneno queimável e legenda dos elementos combustíveis.....	35
Figura 3.13: Fator de multiplicação infinito (EC-WBPR)	36
Figura 3.14: Variação percentual do fator de multiplicação infinito entre os passos (EC-WBPR)	37
Figura 3.15: Fluxo térmico ao longo da queima (EC-WBPR).....	37
Figura 3.16: Razão entre fluxos térmico/total (EC-WBPR).....	38
Figura 3.17: Fluxograma elemento combustível e conjuntos de barras sem veneno e com veneno queimável	39

Figura 3.18: Fator de multiplicação infinito ao longo da queima de 60,0 GWd/MTU (EC-WBPR, EC-8, EC-12, EC-16, EC-20).....	41
Figura 3.19: Variação percentual do k_{inf} (EC-WBPR, EC-8, EC-12, EC-16, EC-20) ..	43
Figura 3.20: Comparações dos fluxos térmicos dos conjuntos 1 e 2.	44
Figura 3.21: Comparação das razões dos fluxos térmico e total do EC-WBPR e dos conjuntos 2 dos (EC-8, EC-12, EC-16, EC-20).....	45
Figura 3.22: Variação percentual da razão dos fluxos térmicos/fluxos totais dos conjuntos 1 e 2. (EC-8, EC-12, EC-16, EC-20).	46
Figura 3.23: Fator de multiplicação infinito (EC-WBPR, EC-8, EC-12, EC-16, EC-20).	48
Figura 3.24: Variação percentual do k_{inf} (EC-WBPR, EC-8, EC-12, EC-16, EC-20). 51	
Figura 3.25: Comparação dos fluxos térmicos dos conjuntos 1 e 2.....	53
Figura 3.26: Comparação entre razões dos fluxos térmicos/totais do conjunto 1 (EC-WBPR) e dos conjuntos 2 (EC-8, EC-12, EC-16, EC-20).	54
Figura 3.27: Variação percentual da razão dos fluxos térmicos/totais dos conjuntos 1 e 2. (EC-8, EC-12, EC-16, EC-20).....	55
Figura 3.28: Comparação dos valores do fator de multiplicação infinito dos elementos combustíveis com 2,0% e 5,0% de veneno queimável.....	57
Figura 3.29: Comparação da variação percentual do fator de multiplicação infinito entre os elementos combustíveis com 2,0% e 5,0% de veneno queimável.	58
Figura 3.30: Comparação entre a razão dos fluxos térmicos/totais dos elementos combustíveis com 2,0% e 5,0% de veneno queimável.....	59
Figura 3.31: Comparação percentual da razão entre os fluxos térmicos/totais dos elementos combustíveis com 2,0% e 5,0% de veneno queimável.....	60
Figura 3.32: Variação do fator de multiplicação entre os EC com 2,0% de Gd.	63
Figura 3.33: Variação da reatividade dos EC com 2,0% de Gd.	64
Figura 3.34: Variação do fator de multiplicação dos EC com 5,0% de Gd.	66
Figura 3.35: Variação da reatividade dos EC com 5,0% de Gd.	67
Figura 3.36: Comparação da variação do fator de multiplicação dos EC com 2,0% e 5,0% de Gd.	68
Figura 4.1: Célula do combustível [ELETRONUCLEAR, 1999].....	70
Figura 4.2: Célula do tubo guia sem absorvedores [ELETRONUCLEAR, 1999].....	70
Figura 4.3: Elemento combustível com 20 Tubos Guia e 08 Absorvedores [ELETRONUCLEAR, 1999].	71

Figura 4.4: Elemento combustível com 20 Tubos Guia e 12 Absorvedores [ELETRONUCLEAR, 1999].	71
Figura 4.5: Núcleo do reator de Angra II com 193 elementos combustíveis e as respectivas legendas	72
Figura 4.6: Comparação dos fatores de multiplicação efetivo do núcleo com diferentes composições	75
Figura 4.7: Comparação da variação percentual do k_{eff} (Gd7%-Gd5%) e (Gd7%-Gd9%).....	76
Figura 4.8: Comparação da razão dos fluxos térmico/total entre as configurações do EC [U-235(N)+Gd7%].	77
Figura 4.9: Comparação da razão dos fluxos térmico/total entre as configurações do EC [U-235(N)+Gd5%].	78
Figura 4.10: Comparação da razão dos fluxos térmico/total entre as configurações do EC [U-235(N)+Gd9%].	78
Figura 4.11: Comparação entre as razões dos fluxos térmicos/totais das configurações 4 com 7,0% (referência), 5,0% e 9,0% de Gd.	79
Figura 5.1: Comparação entre os k_{eff} dos núcleos (C-A1) ambos com 7,0% Gd.....	81
Figura 5.2: Comparação entre os k_{eff} dos núcleos (C1-A2) ambos com 5,0% Gd.....	82
Figura 5.3: Comparação entre os k_{eff} dos núcleos (C2-A3) ambos com 9,0% Gd.....	82
Figura 5.4: Variação percentual do k_{eff} dos núcleos (A1-C).	83
Figura 5.5: Variação percentual do k_{eff} dos núcleos (A2-C1).	84
Figura 5.6: Variação percentual do k_{eff} dos núcleos (A3-C2).	84
Figura 5.7: Comparação das variações percentuais entre os valores do k_{eff} nas configurações 4 dos núcleos (A1-C, A2-C1, A3-C2).....	85
Figura 5.8: Comparação entre as razões dos fluxos térmicos/totais das configurações 4.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição de alguns absorvedores de nêutrons	14
Tabela 3.1 - Parâmetros utilizados na modelagem do EC do PWR	24
Tabela 3.2 - Composição dos materiais modelados e simulados	24
Tabela 3.3 - Fator de Multiplicação (k)	26
Tabela 3.4 - Fator de Multiplicação Infinito e Fluxos de Nêutrons.....	30
Tabela 3.5 - Elementos Combustíveis sem e com barras de veneno queimável	35
Tabela 4.1 - Parâmetros do núcleo de Angra II	73
Tabela 4.2: Identificação do núcleo, composição, percentual e densidade de elementos úteis na simulação.....	74
Tabela 5.1: Identificação do núcleo, composição, percentual e densidade de elementos úteis na simulação.....	80

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO.....	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	IX
LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS	XIV
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1. INTRODUÇÃO.....	1
1.2. ETAPAS DO TRABALHO.....	5
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	5
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1. REATORES A ÁGUA PRESSURIZADA.....	7
2.2. O COMBUSTÍVEL NUCLEAR	9
2.3. O VENENO QUEIMÁVEL	11
2.4. CÓDIGOS NUCLEARES	14
2.4.1. O MÉTODO DE MONTE CARLO - MCNP5.....	15
2.4.2. SISTEMA DE CÓDIGO SCALE	16
CAPÍTULO 3 – SIMULAÇÃO DO BENCHMARK - CASO 15 MODELADO....	22
3.1. METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO DO BENCHMARK DE REFERÊNCIA .	22
3.2. DESCRIÇÃO DO BENCHMARK MODELADO.....	23
3.2.1. RESULTADOS DO CÁLCULO ESTACIONÁRIO DO BENCHMARK DE REFERÊNCIA (CASO 15)	25
3.3. RESULTADOS DA EVOLUÇÃO DO COMBUSTÍVEL (CASO 15)	27
3.4. ESTUDO DE SENSIBILIDADE DO BENCHMARK QUANTO A VARIAÇÃO NO NÚMERO E NA COMPOSIÇÃO DAS BARRAS DE VENENO QUEIMÁVEL (USANDO O MÓDULO TRITON)	30
3.4.1. PARÂMETROS PARA AS MODELAGENS E SIMULAÇÕES	30
3.4.2. RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS SIMULAÇÕES	35

3.4.2.1. ELEMENTO COMBUSTÍVEL SEM BARRAS DE VENENO QUEIMÁVEL.....	36
3.4.3. ELEMENTO COMBUSTÍVEL COM 2,0% DE VENENO QUEIMÁVEL.....	38
3.4.3.A. COMPARAÇÕES ENTRE OS VALORES DO FATOR DE MULTIPLICAÇÃO INFINITO	40
3.4.3.B. COMPARAÇÕES ENTRE OS FLUXOS TÉRMICOS DOS CONJUNTOS 1 E 2 PARA ELEMENTO COMBUSTÍVEL COM 2,0% DE VENENO QUEIMÁVEL.....	43
3.4.4. ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS COM 5,0% DE VENENO QUEIMÁVEL	47
3.4.4.A. COMPARAÇÕES ENTRE OS VALORES DO FATOR DE MULTIPLICAÇÃO INFINITO	47
3.4.4.B. COMPARAÇÕES ENTRE OS FLUXOS TÉRMICOS DOS CONJUNTOS 1 e 2 PARA ELEMENTO COMBUSTÍVEL COM 5,0% DE VENENO QUEIMÁVEL.....	51
3.4.5. COMPARAÇÕES ENTRE OS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS COM 2,0% E 5,0% DE GADOLÍNIO	55
3.4.5.A. VALORES DO FATOR DE MULTIPLICAÇÃO INFINITO.....	56
3.4.5.B. RAZÕES ENTRE OS FLUXOS TÉRMICOS E TOTAIS DOS CONJUNTOS DE BARRAS DE COMBUSTÍVEIS CONTENDO VENENO QUEIMÁVEL.....	59
3.5. ANÁLISE DA REATIVIDADE	60
3.5.1. ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS COM 2,0% DE GADOLÍNIO.....	62
3.5.2. ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS COM 5,0% DE VENENO QUEIMÁVEL	64
3.5.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DO FATOR DE MULTIPLICAÇÃO DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS COM 2,0% E 5,0% DE VENENO QUEIMÁVEL.....	67
CAPÍTULO 4 – ESTUDOS REALIZADOS E RESULTADOS – NÚCLEO DE ANGRA II	69
4.1. SIMULAÇÃO DO NÚCLEO DE ANGRA II – USANDO O SISTEMA DE CÓDIGO SCALE 6.0 (MÓDULO TRITON).....	69
4.2. RESULTADOS E DISCUSSÕES	74

CAPÍTULO 5 – ESTUDOS REALIZADOS E RESULTADOS - MUDANÇA NO ENRIQUECIMENTO DO NÚCLEO DE ANGRA II	80
5.1. SIMULAÇÃO DO NÚCLEO DE ANGRA II – ANÁLISE DA MUDANÇA NO ENRIQUECIMENTO	80
5.2. RESULTADOS E COMPARAÇÕES ENTRE OS NÚCLEOS	81
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

A energia nuclear no mundo teve seu impulso graças à questão ambiental. Hoje ela é apontada como uma alternativa para a expansão e diversificação da matriz energética [ANEEL, 2008], e tem a seu favor grande reservas de urânio. As usinas transformadoras da energia nuclear em energia elétrica não possuem as características típicas das termoelétricas movidas a combustíveis fósseis, que é a emissão de grandes quantidades de gases de efeito estufa, sobretudo o CO₂.

A fissão de um átomo de urânio produz vários milhões de vezes mais energia do que a energia produzida pela combustão de um átomo de carbono em combustíveis fósseis, dando à energia nuclear uma vantagem extraordinária em densidade de potência. Além da produção de energia, os reatores nucleares estão associados a outras aplicações em diversos segmentos da sociedade, como na medicina, radioquímica e formação de imagem [JEVREMOVIC, 2005].

Alguns países como Estados Unidos, França e Japão, aparecem como os maiores produtores e consumidores da energia nuclear [AIEA, 2009]. A França por sua vez, destaca-se por possuir sua matriz energética altamente dependente de fonte nuclear, conforme é mostrado na Figura 1.1.

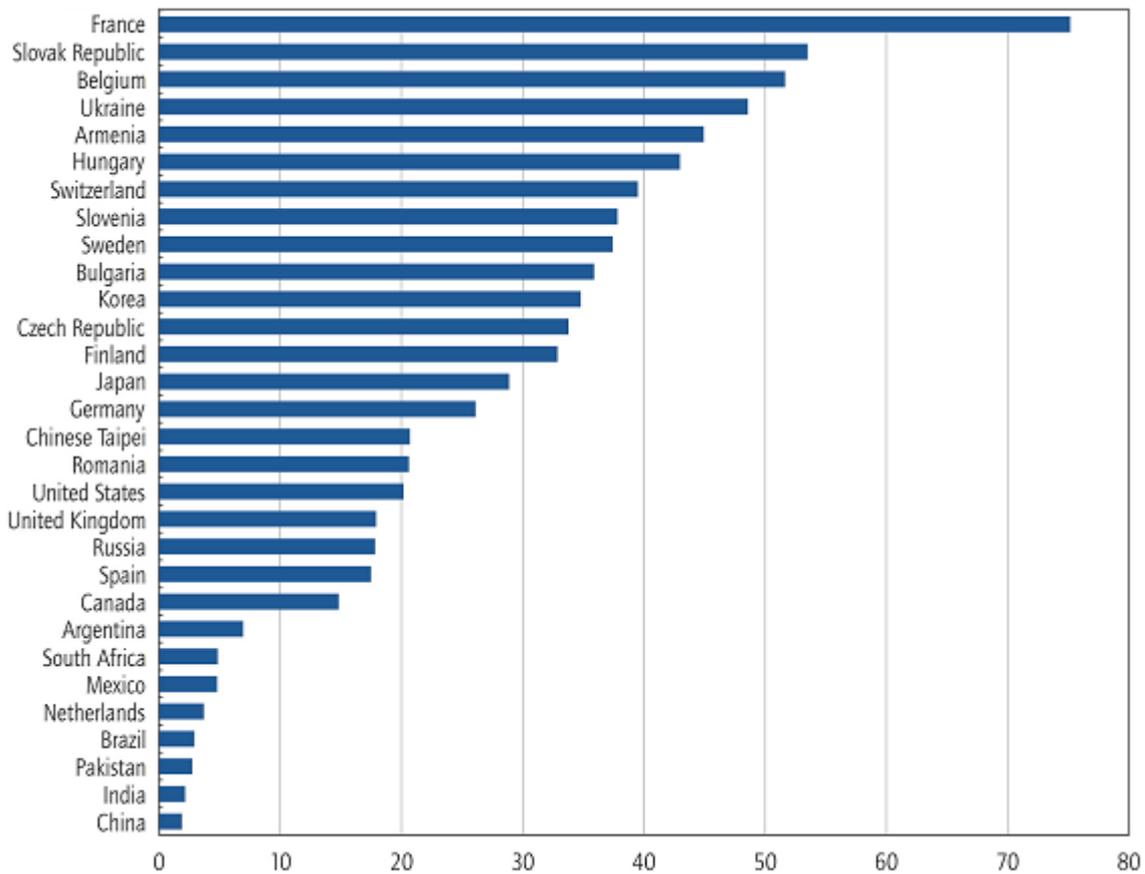


Figura 1.1: Participação percentual da energia nuclear na energia total produzida. Fonte: AIEA, 2009.

. http://www.iea.org/media/news/Nuclear_Roadmap_Fig3.pdf (acessado em 10/01/2013).

Desde 1997 estudos mostram que há uma tendência em aumentar o enriquecimento do combustível nuclear em até 4,5% em reatores tipo PWR que operam em ciclos de 18 meses [ASOU & PORTA, 1997]. De fato, várias usinas já começaram a operar com um ciclo maior. Desse modo, é possível prolongar a queima do combustível nuclear, produzindo alguns benefícios bastante relevantes, como melhor utilização do combustível, o que proporciona a redução de rejeitos radioativos e o gasto com a sua gerência, redução do impacto da mineração e, porque não dizer, na redução da exposição dos trabalhadores durante a recarga. Todos esses fatores refletem de modo bastante positivo inclusive no preço da conversão da energia extraída do núcleo atômico.

Dentro deste contexto, tem-se previsto o aumento do enriquecimento dos combustíveis usados em Angra I e II, para uma possível extensão do ciclo. Ao aumentar o enriquecimento, pretende-se estender a queima, o que implica diretamente em mudanças nos diversos mecanismos de controle, incluindo barras de controle móveis,

veneno de nêutrons solúvel no refrigerante e veneno de nêutrons que queimam durante a operação do núcleo do reator (os denominados venenos queimáveis), conforme afirmam [DUDERSTADT & HAMILTON, 1976].

Atualmente, a usina nuclear, ANGRA II utiliza a inserção de 7,0% do veneno queimável, especificamente gadolínio (Gd), em algumas barras do elemento combustível e, aproximadamente, 1200 a 500 ppm de boro solúvel no refrigerante, com o enriquecimento do combustível variando entre 1,9% a 3,2%, para o ciclo em equilíbrio [ELETRONUCLEAR, 1999].

Conforme [FADAEI, 2011], o boro solúvel usado em PWRs é relativamente estável e não corrosivo, não aderindo aos componentes do núcleo do reator. Apresenta características neutrônicas que o credenciam como um bom absorvedor de nêutrons, podendo estar distribuído uniformemente no núcleo do reator. A sua utilização reduz o número de barras de controle, porém, pode tornar-se corrosivo se sua quantidade for aumentada em função da extensão da queima. Já o aumento de veneno queimável nas barras de combustível pode prejudicar a transferência de calor e, conseqüentemente, o desempenho do núcleo [IWASAKI, et al. 2009].

O Departamento de Engenharia Nuclear da UFMG vem há alguns anos estudando diversas possibilidades de modificações no combustível, tanto para reatores convencionais como para reatores inovadores, que poderão favorecer uma melhor utilização do combustível nuclear promovendo, assim, diminuição na quantidade de rejeitos radioativos gerados. Está sendo estudada a inserção de combustíveis reprocessados, a inserção de Tório (Th) e o aumento do enriquecimento em combustíveis de reatores do tipo PWR. O primeiro objetivo deste trabalho é avaliar o aumento do enriquecimento relacionando-o com a quantidade de veneno queimável e a variação da composição ao longo da queima.

Diversos códigos nucleares podem ser utilizados para fazer simulações do comportamento de um elemento combustível ou mesmo de um reator nuclear. Dentre eles pode-se destacar MCNP (Monte Carlo N-Particle), [BOOTH et al., 2003] em suas versões, e o sistema SCALE (Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation), [BOWMAN, 2008].

Outro objetivo deste trabalho é alcançar um nível de conhecimento adequado nos códigos de Monte Carlo, MCNP5 e SCALE 6.0. Para tanto, utilizou-se dados do benchmark “*Burn-up Credit Criticality Benchmark - Phase II-D - PWR-UO₂, Assembly Study of Control Rod Effects on Spent Fuel Composition*” [OECD, 2006]. Nesta parte foi simulado o elemento combustível descrito neste documento. Especificamente, o caso 15 foi modelado, tanto no MCNP5 quanto no SCALE, e os resultados obtidos em ambos os códigos foram comparados com aqueles obtidos no *benchmark*.

Considerando o reduzido tempo disponível para a execução do estudo e a complexidade de utilização do código SCALE, optou-se, a partir desta fase, pela utilização somente do mesmo. O caso estudo anterior foi ampliado. O passo seguinte foi estudar o sistema de código SCALE de forma a garantir o desenvolvimento de todo o trabalho que se propõe, analisar o mesmo elemento combustível, quanto aos fluxos térmicos, razões entre os fluxos térmicos e totais, fatores de multiplicação nas diferentes composições e número de barras de combustíveis contendo veneno queimável, utilizando uma potência 60,0 GWd/MTU.

Finalmente, com os resultados e experiência adquiridos, o grupo do DEN, está preparado para fazer análise de controle de reatividade com a utilização de diferentes tipos de venenos queimáveis, com o módulo TRITON. O núcleo do reator da usina Angra II, tal qual consta no Final Safety Analysis Report (FSAR, 1999) foi modelado e simulado. Inicialmente, repetiu-se o núcleo descrito no FSAR e posteriormente realizaram-se diversas variações tanto no enriquecimento como na proporção de veneno queimável, com o objetivo de tentar encontrar uma relação adequada. Nesta fase, além do fator de multiplicação efetivo (k_{eff}) avaliou-se também o endurecimento do espectro durante a queima.

1.2. ETAPAS DO TRABALHO

Este trabalho foi realizado em algumas etapas.

Partindo do caso 15 modelou-se o elemento combustível, através do MCNP5 e módulo CSAS6 do sistema de código SCALE e comparou-se os resultados do fator de multiplicação infinito (k_{inf}).

Em seguida, com o objetivo de ampliar o conhecimento na utilização do SCALE, através do módulo TRITON, realizou-se a queima do elemento combustível com enriquecimento de 4,0%, com boro (B) solúvel, sem barras de veneno queimável e utilizando uma potência de 30,0 GWd/MTU e se obteve o valor do k_{inf} , o valor do fluxo térmico e a razão entre o fluxo térmico e total.

Posteriormente, manteve-se o mesmo enriquecimento e utilizou-se o mesmo módulo, mas retirou-se o boro solúvel, inseriu-se barras de veneno queimável em quantidades, posições variadas e em proporções de 2,0% e 5,0% de gadolínio (Gd) e alterou-se a potência para 60,0 GWd/MTU. Foram feitas comparações do k_{inf} , da razão entre os fluxos térmico e total nas diversas simulações realizadas.

Na sequência foi modelado e simulado o núcleo do reator de Angra II, conforme consta no FSAR e também com variações na composição do veneno queimável e finalmente, variou-se também o enriquecimento do combustível nuclear.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação foi estruturada da seguinte forma:

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica relatando um pouco sobre reatores PWR, combustível nuclear, veneno queimável, o método MCNP5 e o sistema de códigos SCALE.

O capítulo 3 refere-se aos estudos realizados e resultados obtidos utilizando o caso 15, através do MCNP5 e o sistema de código SCALE 6.0, módulo TRITON. São apresentadas comparações dos resultados, além das respectivas conclusões.

O capítulo 4 apresenta a metodologia utilizada na modelagem e simulação do núcleo do reator de Angra II, utilizando os parâmetros do FSAR e fazendo modificações no percentual de veneno queimável através do SCALE. Apresenta análises de fluxo de nêutrons e fator de multiplicação e as devidas comparações e conclusões sobre o estudo.

O capítulo 5 apresenta a mesma metodologia do capítulo 4, no entanto, houve modificações no enriquecimento do combustível e as mesmas modificações quanto ao percentual do veneno queimável utilizado no reator nuclear.

O capítulo 6 apresenta uma conclusão geral sintetizando as discussões realizadas nos capítulos 3, 4 e 5. Finalmente, apresentam-se as referências bibliográficas que serviram de suporte para este trabalho.

Acredita-se que esta dissertação poderá ser capaz de contribuir de forma significativa para o entendimento da extensão da queima do combustível nuclear, proporcionando argumentos que poderão ser úteis em decisões a serem tomadas quanto ao enriquecimento do combustível bem como a utilização do veneno queimável como forma de controle da reatividade, a fim de garantir a segurança das instalações nucleares.

Capítulo 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. REATORES A ÁGUA PRESSURIZADA

Os Reatores a Água Pressurizada possuem dois circuitos, como se apresenta na Figura 2.1 onde o circuito primário é composto principalmente pelos componentes: 1 – bomba de água de refrigeração; 2 – vaso de pressão do reator; 3 – em geral, quatro geradores de vapor cada um com uma bomba; 4 – sistema de água de alimentação (vinda do condensador); 5 – sistema de saída do vapor (para a turbina); 6 – pressurizador. A água entra pelo fundo do vaso de pressão e passa pelo núcleo do reator desempenhando o papel de refrigerante e de moderador de nêutrons. Os combustíveis dos reatores PWR são pastilhas cilíndricas de UO_2 , com aproximadamente 1 cm de diâmetro enriquecidas de forma diversificada entre 1,9% a quase 5% no isótopo U-235. As pastilhas são inseridas em tubos de zircalloy com cerca de 4,0 m de comprimento, constituindo assim uma barra de combustível [LAMARSH & BARATTA, 2001].

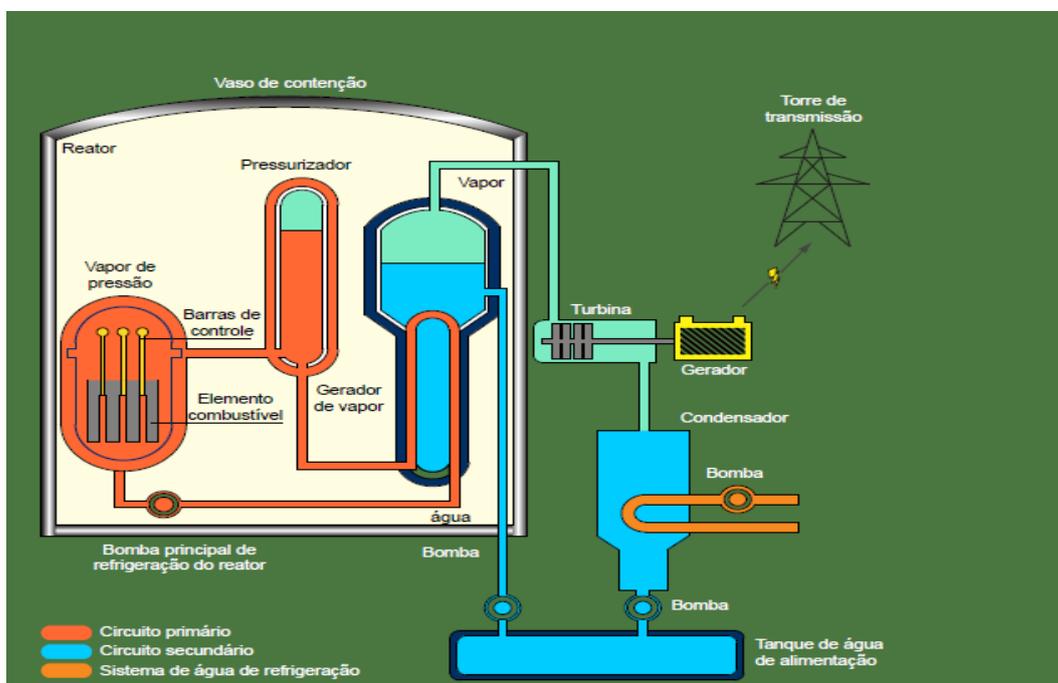


Figura 2.1: Representação esquemática do reator nuclear tipo Angra II [ANEEL, 2008].

Conforme [DUDERSTADT & HAMILTON, 1976] o cálculo de distribuição de potência no núcleo de um reator dependerá sensivelmente de fatores como enriquecimento, razão entre o volume de moderador e combustível, geometria do

núcleo, a localização e o tipo de controle de reatividade e o projeto do elemento combustível. A densidade de potência do núcleo dependerá do espaço e do tempo, por causa da queima do combustível e produção de isótopos ao longo da vida do núcleo. Outro parâmetro de interesse no núcleo do reator é a temperatura, pois ela afetará fortemente a densidade do refrigerante e a absorção nas ressonâncias, o que afetará a reatividade nuclear.

Os reatores nucleares inicialmente devem ser carregados com quantidade de combustível suficiente para manter a criticalidade durante a sua operação. Isto exige uma compensação para o esgotamento do combustível, bem como para o efeito da realimentação da reatividade devido à temperatura e geração de produtos de fissão. Nesse ponto, há vários fatores relacionados ao projeto do combustível tais como razão entre o volume de moderador e volume de combustível, dimensões e configurações do elemento combustível e o enriquecimento do combustível [DUDERSTADT & HAMILTON, 1976].

Para o controle da reatividade é necessária uma análise da quantidade de reatividade negativa ou o controle exigido para compensar o excesso da reatividade no início da vida do núcleo. Existem vários mecanismos diferentes de controle da reatividade, incluindo barras de controle, veneno solúvel e veneno queimável.

O veneno solúvel em Reatores a Água Pressurizada é feito com a utilização do boro (B) diluído na água e assim, distribuído uniformemente no núcleo do reator, a sua utilização reduz o número de barras de controle. O boro é relativamente estável e não corrosivo e não adere aos componentes do núcleo do reator. O uso do veneno solúvel afeta a reatividade principalmente pelo seu efeito no fator de utilização térmica [FADAEI, 2011].

Outra maneira de controlar a reatividade é a utilização de barras de controle constituídas de materiais fortemente absorvedores de nêutrons como a Prata (Ag), o Índio (In) e o Cádmio (Cd). Estas barras são usadas em grande número, possuem pequeno diâmetro e pequeno valor de reatividade e são posicionadas de modo a distorcer pouco a distribuição do fluxo de nêutrons. Desempenham funções básicas como alterar o fator de multiplicação, pois quando são inseridas reduzem o número de fissões e

consequentemente a potência; podem conservar o reator em condição estável (ou crítico), além de, inclusive desligá-lo. Quando as barras são retiradas compensam a diminuição do combustível devido a sua queima ao longo da operação [DUDERSTADT & HAMILTON, 1976].

2.2. O COMBUSTÍVEL NUCLEAR

Conforme [DUDERSTADT & HAMILTON, 1976], combustível é qualquer material fissionável. Este pode ser material físsil como ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu ou ^{241}Pu ou fissionável como ^{232}Th , ^{238}U ou ^{240}Pu . A maioria dos reatores de potência utiliza o combustível em uma forma cerâmica – assim como um óxido (UO_2), um carbeto (UC) ou um nitreto (UN). Este combustível quando utilizado em um reator nuclear, possibilita uma reação de fissão em cadeia [CNEN-NE-1.27, 1999].

O bom funcionamento do reator nuclear passa necessariamente pelo bom desempenho do combustível, portanto é fundamental que a fabricação deste combustível siga os mais altos padrões de qualidade e segurança.

Os reatores nucleares LWR, como o PWR, exigem que o urânio seja enriquecido, ou seja, deve-se aumentar o percentual isótopo físsil (U-235) na massa do combustível que se apresenta como um óxido conforme a fórmula química UO_2 .

Em reatores LWR o enriquecimento do combustível nuclear está em torno de 2,0 a 4,0%. De acordo com FSAR a usina de Angra II possui elementos combustíveis com enriquecimento entre 1,9%, a 3,2% [ELETRONUCLEAR, 1999].

O desempenho do combustível nuclear é fundamental para os reatores nucleares, e sobretudo, para os reatores de potência, pois representa cerca de 30,0% de todo o custo da produção de uma central nuclear [NEI, 2011]. Portanto, é necessário que a fabricação e o uso do combustível nas centrais nucleares ocorram sem nenhuma falha que provoque a necessidade do desligamento do reator fora do prazo estabelecido.

Ao combustível nuclear são imputadas duas restrições fundamentais: a primeira é que o combustível não atinja a temperatura de fusão, por isso é necessário que os materiais utilizados na fabricação tenham a resistência adequada inclusive para suportar a extensão da queima; e a segunda restrição, os produtos de fissão não devem ser liberados para o refrigerante. Desse modo os materiais utilizados na fabricação e o projeto do combustível são fatores de grande relevância, pois frequentemente representam a limitação para a condição de operação no reator. Na execução do projeto deve haver padronização para permitir a eficiência dos métodos de produção, confiabilidade de materiais e de mão de obra, além de especificações realistas com rigoroso controle de qualidade dentro do limite de tolerância aceitável [COCHRAN & TSOUFANIDIS, 1999].

Na maioria dos reatores nucleares em operação, o combustível é composto de UO_2 , envolvido por um revestimento formado por uma liga composta de Zircônio (Zr), Estrôncio (Sn), Ferro (Fe), Cromo (Cr), Háfnio (Hf) e Oxigênio (O). Ambos, combustível e material de revestimento, devem ser adequados às necessidades para as quais foram projetados, tais como resistir a altas temperaturas e alta irradiação [COCHRAN & TSOUFANIDIS, 1999].

Após a inserção do combustível fresco no reator e o início de operação, ele passa a conter novos elementos químicos, fragmentos de fissão, além de transurânicos como resultado de absorção de nêutrons. A Figura 2.2 mostra como um elemento combustível é montado (iniciando pela pastilha, vareta, esqueleto do elemento e finalmente o elemento combustível). A rede cristalina das pastilhas do combustível UO_2 é a primeira barreira imposta aos produtos de fissão (como gases nobres), pois, ela impede que eles escapem e passem para o refrigerante. A outra barreira é o revestimento o qual possui a finalidade de: (a) prevenir a corrosão do combustível causado pelo refrigerante, (b) reter os produtos de fissão que escapam da rede cristalina do combustível, (c) acomodar as mudanças de volume e (d) fornecer uma superfície para a transferência do calor do combustível para o refrigerante [COCHRAN & TSOUFANIDIS, 1999].

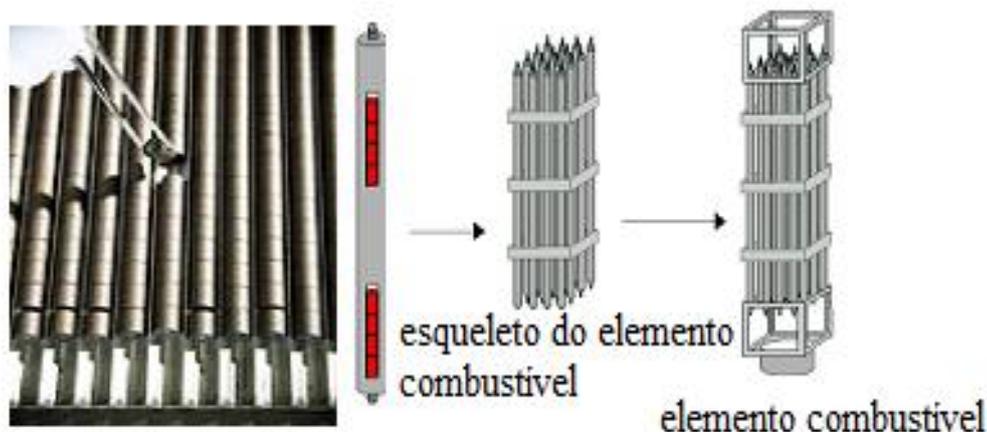


Figura 2.2: Pastilhas, varetas, esqueleto e elemento combustível [INB, 2013].

2.3. O VENENO QUEIMÁVEL

A possibilidade de extensão da queima do combustível é bastante importante principalmente em países como o Brasil, onde a geração termonuclear instalada é pequena e a tecnologia do reprocessamento ainda não é permitida, além de trazer benefício quanto à exposição dos trabalhadores nas centrais nucleares [DURAZZO, 2001]. A extensão da queima é proporcionada pelo aumento do enriquecimento do combustível. Isto requer uma atuação efetiva do sistema de controle de reatividade principalmente no início do ciclo, fase na qual a utilização de venenos queimáveis é muito importante.

O veneno queimável (ou simplesmente veneno) é uma substância que, devido a sua alta seção de choque de absorção de nêutrons reduz a reatividade do núcleo de um reator [CNEN-NE-1.27, 1999]. Os absorvedores de nêutrons melhoram a utilização do combustível, contribuem com distribuição mais uniforme da potência no núcleo do reator, além de serem capazes de controlar a reatividade nuclear.

Os venenos queimáveis são elementos “terras raras” particularmente adequados para o controle da reatividade nuclear, dentre os quais, é possível citar Samário (Sm), Európio (Eu), Disprósio (Dy), Érbio (Er) e Gadolínio (Gd). Tais isótopos removem nêutrons por absorção e assim reduzem de forma eficaz o excesso de reatividade do núcleo. É

desejável que sua atuação aconteça principalmente no início do ciclo, momento onde há maior excesso de reatividade, e portanto, é necessário maior concentração dos venenos queimáveis. A melhor utilização do combustível se dará também em função da sincronia na cinética de queima do combustível e do veneno, pois se espera ao final do ciclo, a menor concentração residual possível de veneno queimável a fim de não continuar a absorção dos nêutrons e reduzir ainda mais a reatividade no núcleo. A presença do veneno queimável em quantidades adequadas reduz a utilização das barras de controle. Conforme [WAGNER & SANDERS, 2002] esta prática reduz a quantidade de actínídeos e produtos de fissão.

Dos venenos queimáveis utilizados em reatores a água leve, de acordo com [COCHRAN & TSOUFANIDIS, 1999] o Gadolínio (Gd) parece ser mais atrativo porque pode ser misturado diretamente no UO_2 , possui vários isótopos e os isótopos naturais Gd-155 e Gd-157 possuem abundância de 14,7% e 15,7% e seção de choque de absorção para nêutrons térmicos igual a $5,8 \cdot 10^4$ b e $2,4 \cdot 10^5$ b respectivamente.

Segundo [YILMAZ et al., 2006] uma forma relevante de melhorar a eficiência do combustível nuclear utilizando o Gd é aumentar o percentual dos isótopos naturais Gd-155 e Gd-157, ou seja, efetuar o enriquecimento do veneno queimável junto ao combustível nuclear. Este enriquecimento pode, conforme [BEJMER & OLA, 2004], eliminar a presença de absorvedor parasita no final do ciclo. Ainda em concordância com [SCHLIECK et al., 2001] a participação do veneno queimável tipo Gd_2O_3 em valores próximos a 2,0% não afetaria a condutividade térmica do combustível nuclear.

Alguns venenos queimáveis são utilizados na forma de compostos químicos como, por exemplo, B_4C , Er_2O_3 , Gd_2O_3 e ZrB_2 , que podem ser usados de forma discreta ou integrados ao combustível nuclear. Neste trabalho foi considerado o veneno queimável na forma da composição isotópica natural, pois é mais recomendado para ciclos de 18 meses, conforme [ASOU & PORTA, 1997 e SECKER & BROWN, 2010].

Conforme [WAGNER & SANDERS, 2002], avanços contínuos em projetos de montagem de combustível nuclear têm permitido melhor desempenho dos reatores nucleares. Uma característica desse avanço é o aumento do uso de absorvedores de

nêutrons como parte integrante da montagem do combustível, seja ele fixo ou removível.

As denominadas barras de veneno queimável (*Burnable Poison Rods* -BPRs) são mais frequentemente usadas na montagem do combustível fresco e são introduzidas dentro dos tubos guias no primeiro ciclo de queima. Contrastando com as BPRs, existem também os absorvedores queimáveis integrados (*Integral Burnable Absorbers* –IBAs), que possuem o veneno queimável já integrado à montagem do elemento combustível quando fabricado.

A tendência mundial na gestão do combustível de PWR tem sinalizado para a utilização de IBAs. Isto é justificado segundo [SANTOS, 2009], pela maior flexibilidade do projeto, além de outras vantagens como evitar a quantidade de rejeitos extra, uma vez que eles estão integrados ao combustível nuclear. Por estas razões os absorvedores discretos ou as BPRs têm sido continuamente abandonados.

A escolha do absorvedor de nêutrons deve se pautar basicamente em função de três critérios [ASOU & PORTA, 1997]:

- (a) Exigência de uma reatividade inicial negativa;
- (b) Cinéticas de queima - o absorvedor deve ser adaptado ao combustível, de modo a obter o desaparecimento praticamente total do veneno quando o reator é desligado e, além disso, minimizar o envenenamento residual no fim do ciclo;
- (c) Controle da distribuição da potência no núcleo, o que deve minimizar os fatores de pico de potência através do ciclo.

Para alcançar esses critérios é necessário escolher adequadamente o número de varetas de veneno queimável, o percentual de veneno em cada vareta, bem como as suas localizações no elemento combustível.

A Tabela 2.1, apresenta a composição de dois principais absorvedores de nêutrons utilizados como venenos queimáveis extraída da Biblioteca de Composição Padrão, conforme [PETRIE et al., 2009]. Entretanto neste trabalho foi utilizado apenas o gadolínio (Gd).

Tabela 2.1 - Composição de alguns absorvedores de nêutrons

Nome do elemento	Densidade (g/cm ³)	Identificação Nuclídeo na Biblioteca de Composição Padrão	Distribuição Isotópica		Energia Ressonância Seção de choque (b)	
			ID	Peso %	Espalhamento	Total
GADOLÍNIO	7,900	64000	64152	0,193	5,80773	9,31788
			64154	2,134	7,12720	11,55622
			64155	14,581	11,33346	42,56798
			64156	20,297	7,51759	9,00551
			64157	15,617	4,56730	10,01622
			64158	24,496	4,37880	5,12278
			64160	22,232	4,61818	4,85875
ÉRBIO	9,006	68000	68162	0,136	7,37000	7,37000
			68164	1,578	7,28000	7,28000
			68166	33,334	5,71682	8,14902
			68167	22,906	19,20864	36,77205
			68168	26,908	7,19000	7,19000
			68170	15,139	7,16000	7,16000

2.4. CÓDIGOS NUCLEARES

Nas simulações realizadas neste trabalho, foram utilizados o código estocástico MCNP versão 5 e o sistema de código SCALE, através de vários módulos que são brevemente descritos no ítem 2.4.2. A Figura 2.3, mostra o fluxograma onde os códigos nucleares foram empregados.

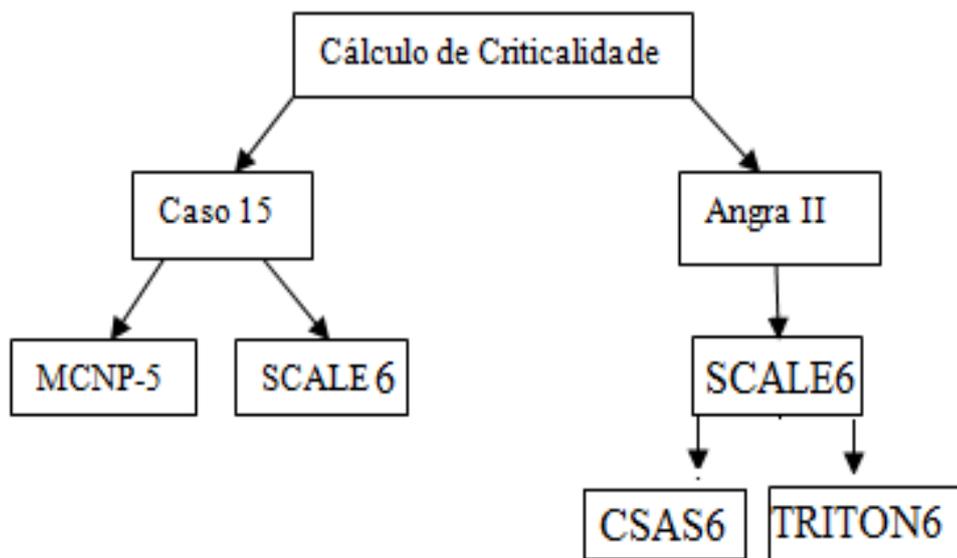


Figura 2.3: Fluxograma para cálculo de criticalidade.

2.4.1. O MÉTODO DE MONTE CARLO - MCNP5

O MCNP (Monte Carlo N- Particle) versão 5 é um código estocástico não faz cálculos da queima do combustível e utiliza a biblioteca de seção de choque ENDF/VI. Dentre os métodos determinísticos, o mais comum é o de ordenadas discretas, que resolve a equação de transporte para o comportamento médio da partícula. Em contraste, o método de Monte Carlo obtém respostas, simulando partículas individuais e registrando alguns aspectos de seu comportamento médio no sistema físico. Métodos determinísticos apresentam informações bastante completas, como por exemplo o fluxo durante todo o espaço de fase do problema. A técnica de Monte Carlo fornece apenas informações sobre contagens específicas solicitadas pelo usuário.

Quando os métodos de Monte Carlo e de ordenadas discretas são comparados, muitas vezes é dito que Monte Carlo resolve a equação de transporte integral, enquanto ordenadas discretas resolve a equação de transporte integro-diferencial de Boltzmann. Duas coisas são enganosas sobre esta afirmação. Em primeiro lugar, as equações de transporte integrais e integro-diferencial são duas formas diferentes de uma mesma equação de Boltzmann. Se uma é resolvida, a outra é resolvida. O método de Monte Carlo "resolve" um problema de transporte, simulando histórias de partículas; a equação

de transporte não precisa ser escrita. No entanto, pode-se derivar uma equação que descreve a densidade de probabilidade das partículas no espaço. Esta equação acaba sendo a mesma equação integral de transporte [BOOTH, et al., 2003].

Monte Carlo pode ser usado para nêutrons, fótons, elétrons ou acoplado / transporte de fótons / elétrons em áreas específicas de aplicação, tais como, incluem como a proteção radiológica e dosimetria, blindagem das radiações, radiografia, física médica, segurança-criticalidade nuclear, projeto e análise de detector, projeto de reator de fusão, descontaminação e desmantelamento. O código trata uma configuração tridimensional arbitrária de materiais em células geométricas delimitada por superfícies de primeiro, segundo grau e quarto grau (tori elíptica). Ele pode ser usado teoricamente para duplicar um processo estatístico (tais como a interação de partículas nucleares com materiais) e é particularmente útil para os complexos problemas que não podem ser modelados por códigos de computador que usam métodos determinísticos. Os eventos probabilísticos individuais que compreendem um processo são simulados sequencialmente. As distribuições de probabilidade que regem estes eventos são estatisticamente amostrados para descrever o fenômeno total. Em geral, a simulação é realizada em um computador porque o número de testes necessários para descrever adequadamente o fenômeno é normalmente muito grande. O processo de amostragem estatística é baseado na seleção de números aleatórios. No transporte de partículas, a técnica de Monte Carlo é pre-eminentemente realista (um experimento numérico) [<http://mcnp-green.lanl.gov>, acessado 31/01/2013].

2.4.2. SISTEMA DE CÓDIGO SCALE

O SCALE, de acordo com [BOWMAN, 2008], é um sistema de códigos que data desde os anos de 1969, quando a Divisão de Tecnologia e Ciência Nuclear do Laboratório Nacional Oak Ridge (ORNL), começou a fornecer suporte computacional no uso do KENO à Comissão de Energia Atômica (AEC) dos Estados Unidos da América. De 1969 a 1976, a equipe do AEC contou com o apoio do pessoal do ORNL para ajudá-los na correta utilização do código na interpretação de dados de criticalidade e análises de transferência de calor. Após a criação da central nuclear dos EUA Nuclear Regulatory Commission (NRC) da AEC, a equipe da NRC, propôs o desenvolvimento de um

sistema de fácil análise e que fornecesse as capacidades técnicas dos módulos individuais. Foi desta forma que nasceu o sistema de códigos SCALE. Com o desenvolvimento do sistema de códigos SCALE era preciso estabelecer objetivos na utilização deste sistema; desta forma estabeleceu-se que o sistema deveria principalmente estar relacionado com: (1) o projeto e as instalações do combustível nuclear; (2) usar códigos de computadores bem estabelecidos e dados de bibliotecas; (3) projetar um formato de entrada adequado aos usuários; (4) preparar uma sequência de análise padrão com módulos de controle, além de módulos funcionais; (5) fornecer uma documentação completa e a disponibilidade pública.

Além desses objetivos, o sistema de código SCALE, foi criado para fornecer uma sequência padronizada às entradas para os módulos de controle projetadas para dar liberdade ao usuário que pode utilizá-los com palavras-chaves. A característica mais importante do sistema SCALE é a capacidade de simplificar ao usuário conhecimento e esforço exigido para preparar misturas de materiais adequados a problemas dependentes do processamento das seções de choques.

No sistema de controle do centro da Análise da Sequência de Segurança de Criticalidade (CSAS) do SCALE, está a biblioteca de subrotinas assim referida como Biblioteca Processadora de Informação de Material (MIPLIB). Esta biblioteca permite ao usuário especificar problemas de materiais usando palavras chaves que são facilmente associadas com misturas, elementos e núclídeos fornecidos na Composição da Biblioteca Padrão.

O módulo CSAS6 é um módulo de cálculo de criticalidade usado para o cálculo do fator de multiplicação de nêutrons (k) via KENO VI, que foi desenvolvido para usar no sistema SCALE.

A estrutura modular do SCALE permite um retorno das execuções dos módulos funcionais para realizar uma análise do sistema. Uma variedade de sistemas de controle tais como CSAS tem sido desenvolvido para automatizar e padronizar várias sequências analíticas. Isto tem contribuído de forma significativa com o intuito de evitar erros e podem ser facilmente verificados.

O sistema de código SCALE é amplamente aceito e utilizado em todo mundo para cálculo de criticalidade de reatores nucleares, ele possui vários módulos, dentre os quais destacam-se: TRITON, BONAMI, KENO VI, ORIGEN-S, WORKER, CENTRM, PMC, COUPLE, KMART6 [BOWMAN, 2008].

O TRITON, de acordo com [DeHART, 2009], é um módulo desenvolvido em conjunto com o NEWT e o ORIGEN-S, que permite cálculos de evolução do combustível. Pode ser usado para fornecer de forma automatizada o processamento de problema dependente da seção de choque seguido de cálculo de fator de multiplicação (k) para uma configuração em duas dimensões usando o NEWT e através do ORIGEN-S fazer previsões quanto às 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.

Ele suporta várias sequências analíticas cada uma com seus projetos e aplicações dentre as quais pode ser citada: o T6-DEPL, uma sequência analítica disponível no módulo de controle TRITON6, que utiliza o KENO VI, seguido pelo módulo de colapsamento KMART6.

A Figura 2.4 apresenta um fluxograma da sequência analítica da interação do TRITON com outros módulos quando se insere a palavra-chave T-DEPL.

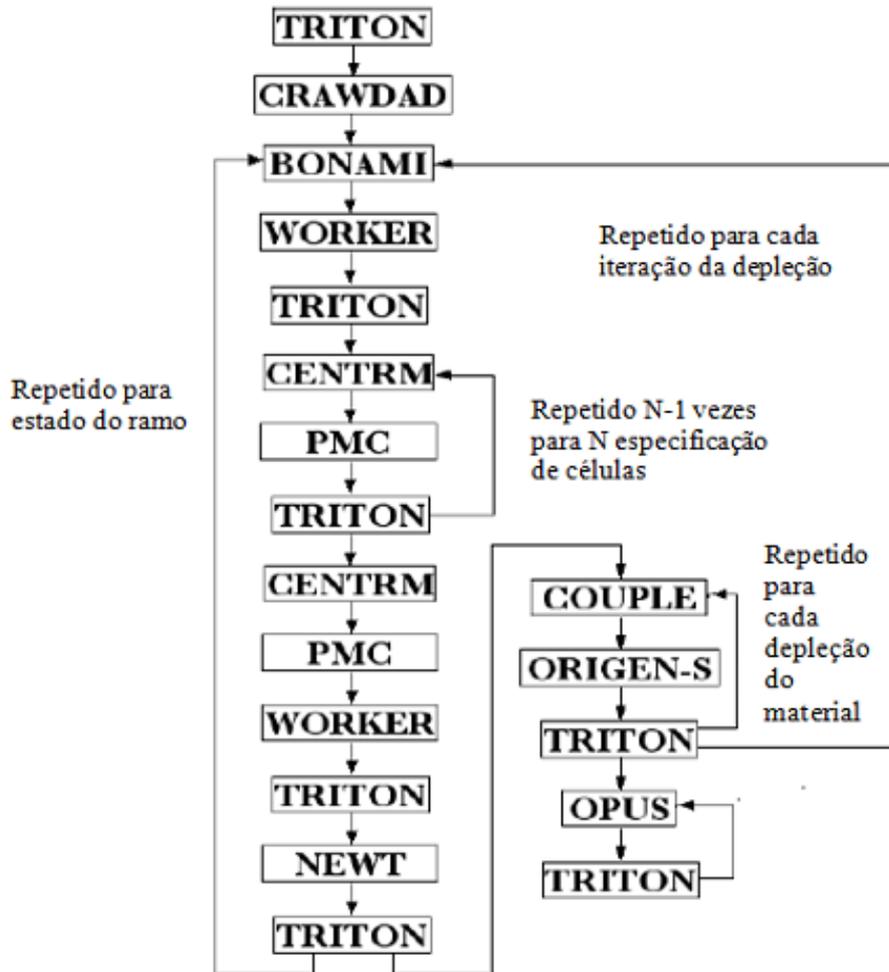


Figura 2.4: Fluxograma da sequência analítica do caminho T-DEPL.

Conforme citado anteriormente, o módulo TRITON 6, utiliza o KENO VI que é um módulo do código de MONTE CARLO, que usa bibliotecas de seção de choque em forma de multigrupo e contínua para cálculos de criticalidade e faz cálculos de fluxo de nêutrons. Após o processamento, utiliza o KMART6 para extrair fluxos, determinar distribuição de potência, colapsar seção de choque de três grupos que são exigidos pelos módulos COUPLE e ORIGEN-S.

Outro módulo do sistema SCALE é o BONAMI (**BON**darenko **AMPX Interpolator**). Este módulo, conforme [GREENE, 2009] acessa a biblioteca mestre AMPX, resolve problemas em uma dimensão, em geometria cilíndrica ou esférica, além de possibilitar o uso de uma ou mais zonas de geometria homogênea, caso em que faz um ou mais cálculos separados e independentes.

De acordo com [GOLUOGLU, et al., 2009] o WORKER é um módulo capaz de criar e modificar formatos de bibliotecas de trabalho, pode ser usado como biblioteca mestre AMPX, ou ser usado em grandes variedades de cálculos de transporte produzida pelo KENO VI. A sua principal função é converter dados de uma biblioteca mestre AMPX dentro do formato de biblioteca de trabalho AMPX, porque a biblioteca mestre AMPX não está estruturada para uso direto no cálculo de transporte de partícula multigrupo.

A biblioteca mestre deve fornecer dados com níveis de detalhes suficiente para satisfazer várias análises de estudo da densidade da seção de choque em conjunto com o cálculo de transporte nêutron-gama.

O CENTRM (Continuous ENergy TRansport Module) é mais um módulo do sistema SCALE e efetua cálculos de espectro de energia contínua de nêutrons em sistemas unidimensionais, resolve a equação de transporte de Boltzmann, utilizando uma combinação de multigrupo e de dados nucleares pontuais. Várias opções de cálculos estão disponíveis, incluindo ordenadas discretas em geometrias cilíndricas ou esféricas, uma solução simplificada de duas regiões, zona pontual ou meios infinitos homogêneos. O CENTRM é utilizado principalmente para calcular os problemas específicos de fluxos em uma malha fina de energia, pode ser usado para gerar dados de seção de choque de auto-blindagem para análise multigrupo de criticalidade ou blindagem [WILLIAMS, et al, 2009].

Segundo [WILLIAMS & HOLLENBACH, 2009] o PMC é um (Programa de produção de seção de choque Multigrupo que usa energia pontual do espectro CENTRM) e gera problema dependente da seção de choque multigrupo de uma biblioteca multigrupo AMPX, uma biblioteca de dados nucleares pontuais e um arquivo de fluxo de nêutrons pontual produzido pelo CENTRM.

O PMC é o principal responsável em produzir seção de choque multigrupos, auto-blindagem sobre faixa de ressonância de núclídeos de interesse.

Conforme explica [GAULD & HERMANN, 2009] o COUPLE processa problemas constantes dependentes da seção de choque e fator de ponderação do fluxo dentro da biblioteca usada pelo ORIGEN-S desenvolvendo cálculos de esgotamento isotópico e

geração de suas fontes de radiações associadas a decaimento de calor. A técnica permite ao ORIGEN-S aplicar a seção de choque de nêutrons de uma biblioteca multigrupo AMPX. Esta biblioteca pode ser produzida diretamente pelo sistema de código AMPX ou pelo sistema de código SCALE usando módulos de processamento e módulos neutrônicos. A biblioteca pode ser usada no cálculo de transporte da rede de combustível a ser analisado.

Nos cálculos de transporte é levado em consideração dentre outros fatores, a temperatura, a composição do combustível e as condições do moderador, tais como densidade e temperatura, tudo com a finalidade de corrigir o ambiente neutrônico na simulação do combustível.

Conforme [GAULD, et al., 2009] a versão original do ORIGEN foi desenvolvida pelo ORNL para uso no cálculo de composições e radioatividade de produtos de fissão, materiais de revestimento e materiais do combustível. A principal vantagem do ORIGEN sobre os outros códigos que simulam a queima, é a capacidade para analisar a matriz completa da transição isotópica, em vez de um número limitado da cadeia de transmutação. Isto é possível, em decorrência da aplicação do método de matriz exponencial para resolver a taxa de equações que descreve a geração de núclídeos, esgotamentos e processos de decaimento.

A versão ORIGEN-S do sistema SCALE apresenta vantagens, sobre o programa original do ORIGEN. A mais importante delas é a capacidade de desenvolver e utilizar dados de problema dependente de seção de choque multigrupo de um processo de simulação de queima de combustível, utilizando informações do projeto de montagem, composições dos materiais e condições de operação do reator especificado pelo usuário.

O módulo ORIGEN-S está constantemente em comunicação com o módulo COUPLE que atualiza a biblioteca de seção de choque do ORIGEN-S com constantes médias de espectro de nêutrons derivada a partir da análise de transporte. A seção de choque pode ser gerada como uma função da queima ou de outras condições do combustível, salva e posteriormente aplicada pelo ORIGEN-S usado assim como um código autônomo.

Capítulo 3 – SIMULAÇÃO DO BENCHMARK - CASO 15 MODELADO

Este capítulo está dividido em cinco subtópicos numerados de 3.1 a 3.6, onde serão apresentados diversos estudos feitos tomando como ponto de partida o caso 15.

O caso 15 consiste de um elemento combustível de um reator tipo PWR, do tipo 17x17, com um tubo guia central e vinte e quatro tubos guias completamente cheios de água com 456 ppm de boro.

3.1. METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO DO BENCHMARK DE REFERÊNCIA

Inicialmente, o elemento combustível (caso 15) será submetido ao cálculo estacionário para análises do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) utilizando os códigos MCNP5 e SCALE 6.0 (CSAS6), cujos resultados estão apresentados no Tópico 3.2.1, o qual também apresenta os valores de k_{inf} alcançados por 13 países que realizaram esse estudo.

Em seguida, a título de aumentar a experiência utilizando o SCALE 6.0 através do módulo TRITON, que realiza cálculos de queima do combustível, o elemento combustível (caso 15) do benchmark, ficará submetido a uma queima de 30,0 GWd/MTU, onde será avaliado o fator de multiplicação infinito (k_{inf}), sua variação, fluxo térmico e a razão entre os fluxos térmico e total.

Feitos estes estudos, percebendo a complexidade e o tempo computacional consumido na utilização de códigos simultaneamente resolveu-se, a partir deste ponto, usar apenas o SCALE 6.0, através do módulo TRITON, propondo modificações na composição do elemento combustível, inserindo veneno queimável em percentuais e quantidades variadas.

Após as modelagens e simulações dos dados, foram apresentados os resultados separadamente com as respectivas análises e, em seguida, feitas comparações entre os resultados com as respectivas conclusões.

3.2. DESCRIÇÃO DO BENCHMARK MODELADO

O primeiro passo é a modelagem do sistema do reator nuclear tipo PWR, com os códigos MCNP5 e o módulo TRITON6, composto por um elemento combustível do tipo 17 x 17, com tubo guia central e tubos guias sem a utilização de barras de veneno queimável, mas com absorvedores diluídos no refrigerante, representado nas Figuras 3.1, 3.2, 3.3 e Tabelas 3.1 e 3.2.

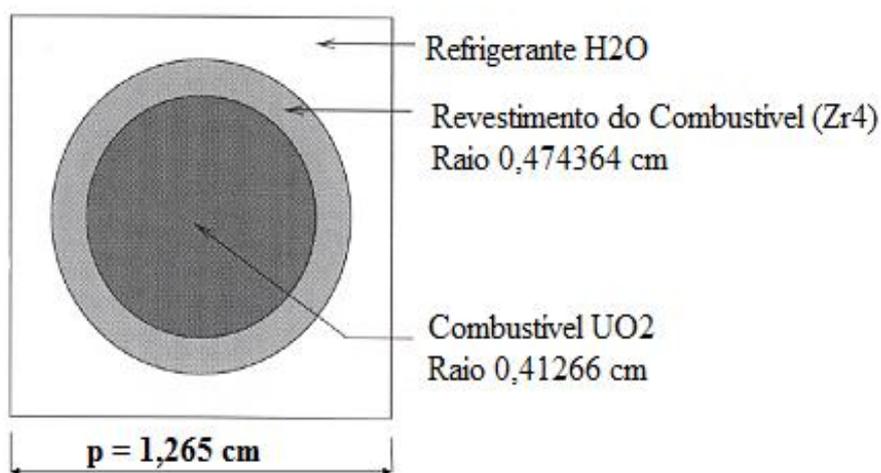


Figura 3.1: Geometria da célula do combustível simulado com os códigos MCNP5 e TRITON6

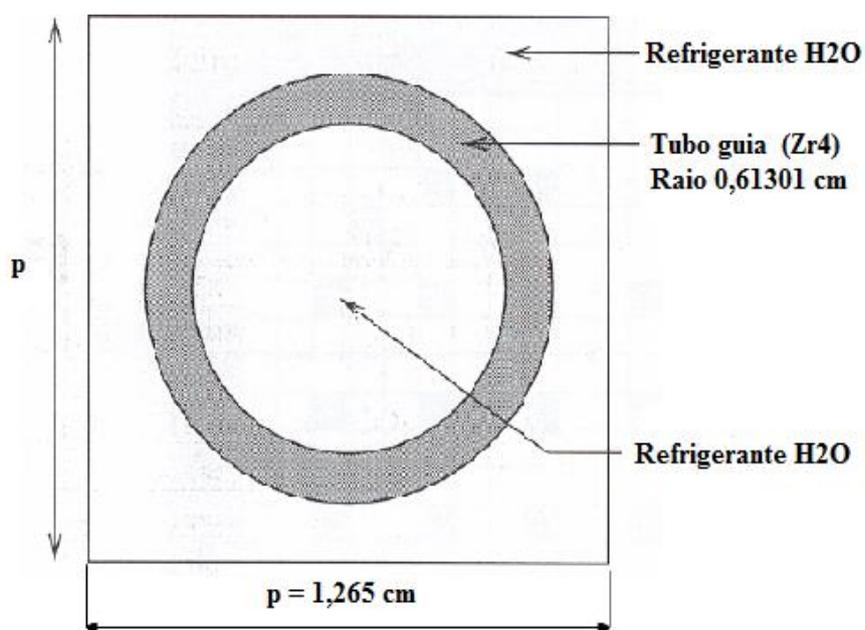


Figura 3.2: Geometria da célula do tubo guia sem barras de controle simulado com os códigos MCNP5 e TRITON6

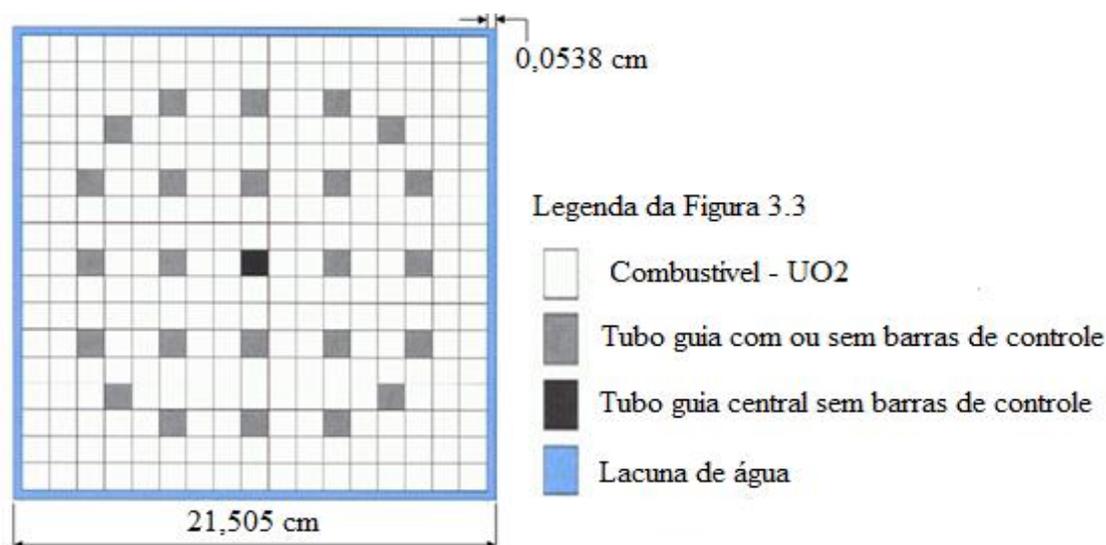


Figura 3.3: Elemento combustível simulado com os códigos MCNP5 e TRITON6

Tabela 3.1 - Parâmetros utilizados na modelagem do EC do PWR

Comprimento da barra de combustível ou tubo guia	365,7 cm
Raio do combustível	0,412660 cm
Raio do revestimento do combustível	0,474364 cm
Raio do refrigerante dentro do tubo guia	0,572940 cm
Raio do tubo guia	0,613010 cm
Passo do Reticulado Varetas (p)	1,265 cm
Passo do Reticulado Elemento Combustível	21,505 cm
Temperatura do Combustível	873 K
Temperatura do Revestimento	673 K
Temperatura do Refrigerante	573 K

Tabela 3.2 - Composição dos materiais modelados e simulados

Composições dos materiais (atom/barn.cm)

Combustível (UO ₂) Enriquecimento 4,0%		Revestimento Combustível		Tubo Guia		Refrigerante (Água com 456 ppm de boro)	
U-234	$7,834 \cdot 10^{-6}$	Fe	$1,383 \cdot 10^{-4}$	Fe	$1,476 \cdot 10^{-4}$	H	$4,860 \cdot 10^{-2}$
U-235	$9,097 \cdot 10^{-2}$	Cr	$7,073 \cdot 10^{-5}$	Cr	$7,549 \cdot 10^{-5}$	O	$2,430 \cdot 10^{-2}$
U-238	$2,155 \cdot 10^{-2}$	O	$2,874 \cdot 10^{-4}$	O	$3,067 \cdot 10^{-4}$	¹⁰ B	$3,692 \cdot 10^{-6}$
O-16	$4,493 \cdot 10^{-2}$	Zr	$3,956 \cdot 10^{-2}$	Zr	$4,222 \cdot 10^{-2}$	¹¹ B	$1,477 \cdot 10^{-5}$

Neste trabalho, foi aplicada a mesma metodologia utilizando dois códigos nucleares diferentes, o MCNP5 e o SCALE que é um sistema de códigos que possui vários módulos, como foi expresso no capítulo 2. O módulo utilizado é o TRITON6 que realiza cálculos determinísticos e acompanha a evolução do combustível nuclear usando a tabela de seção de choque 238 grupos por ser mais completa, porém o tempo computacional empregado é maior.

As modelagens e simulações foram motivadas pela real possibilidade da validação dos códigos e com o conhecimento e experiência alcançados, aplicar a metodologia ao núcleo do reator de Angra II.

3.2.1. RESULTADOS DO CÁLCULO ESTACIONÁRIO DO BENCHMARK DE REFERÊNCIA (CASO 15)

A Tabela 3.3 apresenta o resultado do k_{inf} e os códigos empregados no cálculo pelos 13 participantes, com suas respectivas instituições, que analisaram o caso 15 do benchmark e também os valores estimados neste trabalho. Nesta tabela são mostrados os valores das médias anterior e atual, desvio padrão (*Standard Deviation -SD*), anterior e atual, e finalmente, desvio padrão relativo (*Relative Standard Deviation -RSD*), anterior e atual.

O SD e RSD apresentados na tabela foram calculados em relação aos valores de k_{inf} encontrados pelos diversos participantes através das expressões matemáticas:

$$Média = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P Ni \quad (3.1)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^P (Ni - Média)^2}{P}} \quad (3.2)$$

$$RSD = \frac{SD}{Média} \quad (3.3)$$

onde P indica o número de participantes e Ni representa o valor do fator de multiplicação infinito inicial de cada um.

Tabela 3.3 - Fator de Multiplicação (k)

PAISES	INSTITUTO/DEP.	CÓDIGO	k
França	CEA	CRISTAL 1.0	1,34025
Reino Unido	BNFL	MONK8B	1,34180
Finlândia	VTT	MCNP4C	1,33966
Reino Unido	SERCO	MONK8B	1,34110
Japão	JNES	MVP2.0	1,33913
	JAERI JENDL 3.3	MVP	1,33989
	JAERI JENDL 3.2	MVP	1,34349
Alemanha	AREVA (Framatome-ANP)	KENO V.a	1,34025
EUA	ORNL	HELIOS	1,33797
		SAS2h	1,33797
		TRITON-KENO V.a	1,33797
		TRITON-NEWT V.a	1,33797
Suécia	PSI	MCPX-2.4.0	1,34070
Média Anterior			1,33986
SD Anterior			0,00169
RSD Anterior			0,13%
Brasil	DEN	MCNP5	1,33466
		CSAS6	1,33580
Média Atual			1,33924
SD Atual			0,00227
RSD Atual			0,17%

Os valores encontrados no DEN para o k_{inf} , utilizando o MCNP5 e o CSAS6, estão dentro do desvio padrão calculado anteriormente pelos 13 países através de seus institutos.

3.3. RESULTADOS DA EVOLUÇÃO DO COMBUSTÍVEL (CASO 15)

Foi realizada uma análise do fator de multiplicação infinito, variação percentual do k_{inf} , fluxo térmico, razão entre os fluxos térmico e total do Elemento Benchmark Zero (EBO), representados respectivamente pelas Figuras 3.4 a 3.7 e a Tabela 3.4, ao longo de uma queima de 30,0 GWd/MTU.

A Figura 3.4 apresenta o gráfico referente ao comportamento do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) onde se percebe uma redução linear ao longo da queima.

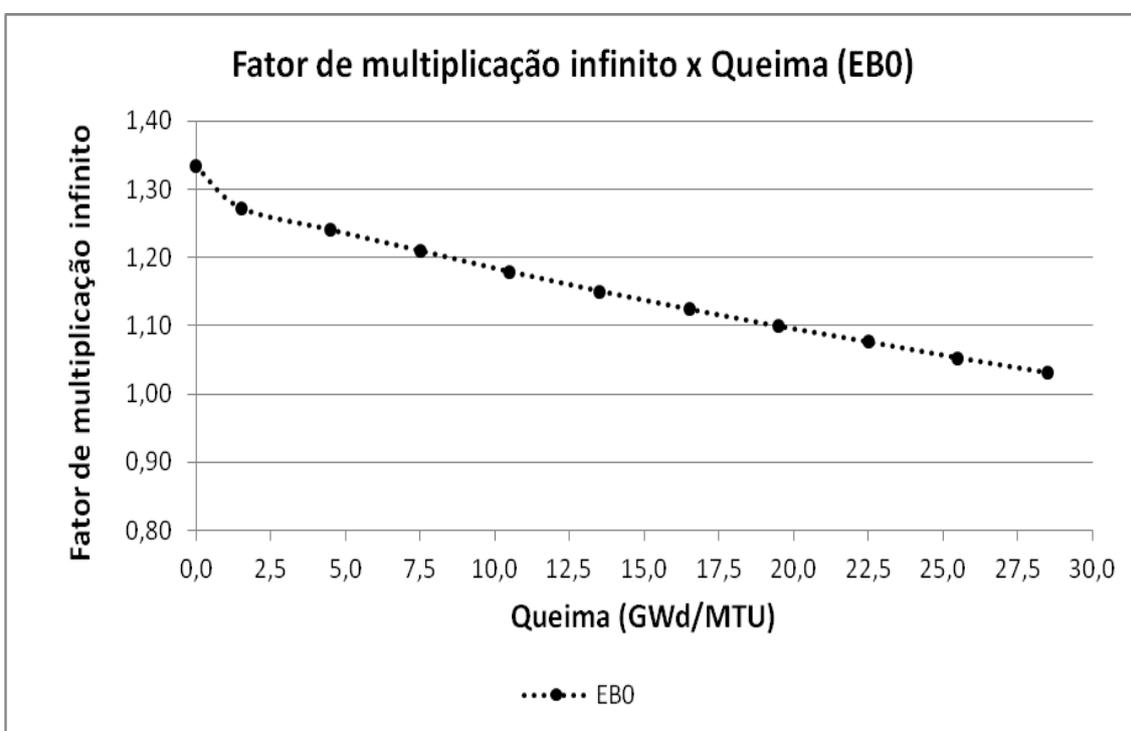


Figura 3.4: Fator de multiplicação infinito do EBO

A diferença percentual entre os valores do fator de multiplicação infinito, entre os intervalos de queima, é definida pela Equação (3.4),

$$\Delta k_{inf} (\%) = \left(\frac{k_{inf} inicial - k_{inf} final}{k_{inf} inicial} \right) \cdot 100 \quad (3.4)$$

onde k_{inf} inicial é o valor do fator de multiplicação no início do cálculo e o k_{inf} final é o valor subsequente.

A Figura 3.5 mostra a variação percentual do fator de multiplicação, onde se observa a queda brusca no intervalo de 0,0 a 5,0 GWd/MTU e uma oscilação constante até o final da queima que se inicia próxima a 5,0 GWd/MTU, sempre no intervalo entre 2,00% a 2,50%. Próximo à queima de 10,0 GWd/MTU a variação percentual atinge o ponto de aproximadamente 2,50% e em torno da queima de 22,5 GWd/MTU atinge um valor percentual de cerca de 2,00%.

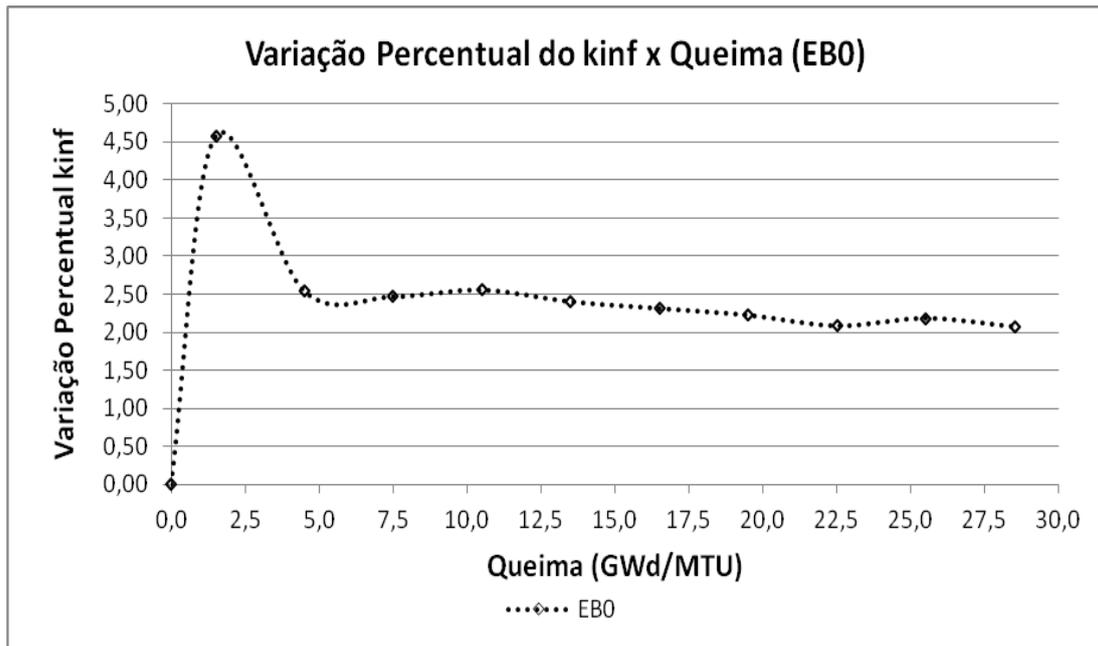


Figura 3.5: Variação percentual do k_{inf} do EBO

O gráfico da Figura 3.6 mostra o fluxo térmico do elemento combustível EBO e nela se observa que o fluxo no início da queima apresenta valores menores que no final. O menor valor está entre 5,0 GWd/MTU e 10,0 GWd/MTU, entretanto a diferença entre o maior e o menor valor do fluxo é pouco maior que 1,0%.

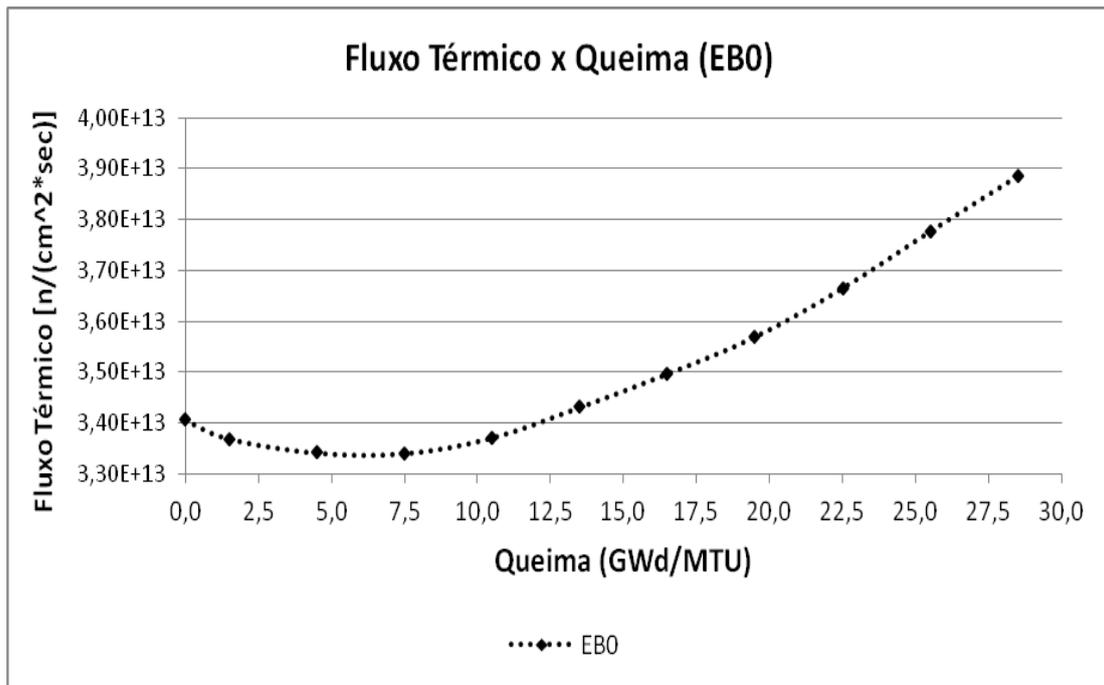


Figura 3.6: Fluxo térmico do elemento EB0

A Figura 3.7 apresenta o gráfico da razão entre os fluxos térmico e total, o qual mostra uma redução contínua desta taxa. Este comportamento caracteriza um aumento no endurecimento do espectro de nêutrons.

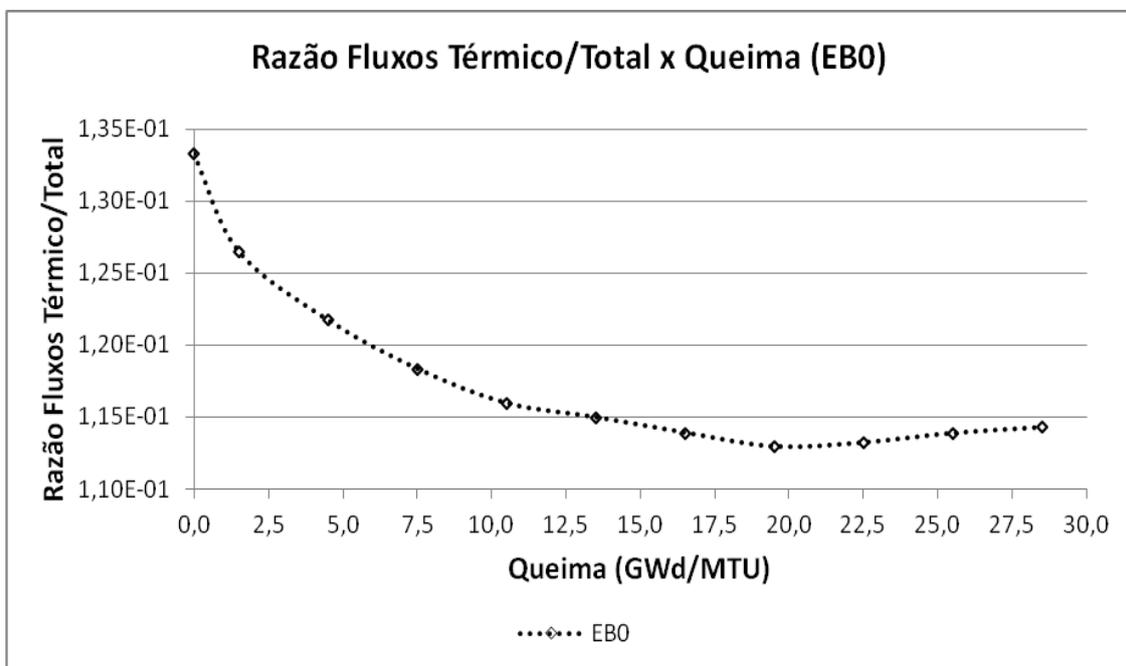


Figura 3.7: Razão fluxos térmico/total do elemento EB0

Tabela 3.4 - Fator de Multiplicação Infinito e Fluxos de Nêutrons.
EBO U235(4%) 30 GWd/MTU - BIBLIOTECA DE SEÇÃO DE CHOQUE 238 GRUPOS

Queima	Fluxo	Fluxo Total	Configuração 1	$\Delta\%$ entre	
kinf	Térmico			kinf	
(MW/MTHM)	n/(cm ² *sec)	n/(cm ² *sec)	$\phi_{Térmico} / \phi_{Total}$		
1,3338	0,0	3,4056E+13	2,5558E+14	1,3325E-01	0,00
1,2728	1,50	3,3689E+13	2,6633E+14	1,2649E-01	4,57
1,2405	4,50	3,3414E+13	2,7454E+14	1,2171E-01	2,54
1,2099	7,50	3,3399E+13	2,8224E+14	1,1834E-01	2,47
1,1790	10,50	3,3708E+13	2,9073E+14	1,1594E-01	2,55
1,1507	13,50	3,4309E+13	2,9842E+14	1,1497E-01	2,40
1,1241	16,50	3,4966E+13	3,0701E+14	1,1389E-01	2,31
1,0991	19,50	3,5693E+13	3,1607E+14	1,1293E-01	2,22
1,0762	22,50	3,6651E+13	3,2376E+14	1,1320E-01	2,08
1,0527	25,50	3,7768E+13	3,3170E+14	1,1386E-01	2,18
1,0309	28,50	3,8853E+13	3,4004E+14	1,1426E-01	2,07

3.4. ESTUDO DE SENSIBILIDADE DO BENCHMARK QUANTO A VARIAÇÃO NO NÚMERO E NA COMPOSIÇÃO DAS BARRAS DE VENENO QUEIMÁVEL (USANDO O MÓDULO TRITON)

Nesta fase do trabalho, serão realizados estudos da sensibilidade do elemento combustível caso 15 do benchmark, fazendo variações na composição do veneno queimável e na quantidade das barras de veneno queimável. O refrigerante não conterà veneno solúvel, o elemento combustível ficará submetido a uma queima de 60 GWd/MTU e os cálculos da evolução do combustível serão realizados pelo módulo TRITON, do sistema de código SCALE 6.0, utilizando a biblioteca de seção de choque 44 grupos de energia, por ser uma biblioteca bastante indicada em reatores tipo PWR e consumir um tempo computacional menor que a biblioteca 238 grupos de energia.

3.4.1. PARÂMETROS PARA AS MODELAGENS E SIMULAÇÕES

Qualquer proporção de veneno queimável reduz a condutividade térmica do combustível, conforme [HIRAI & ISHIMOTO, 1991 e ISHIMOTO et al., 1994]. Valores superiores a 10% resultam numa quantidade residual de absorvedores de nêutrons inaceitável no fim do ciclo [DURAZZO, 2001 e WAGNER & SANDERS,

2002]. Assim, neste trabalho, partindo do enriquecimento do combustível de 4,0% e usando o mesmo percentual de 2,0% para o Gd, variou-se a quantidade de barras de veneno queimável. Em seguida, alterou-se o percentual de Gd para 5,0%. O resumo do estudo realizado é apresentado nas Figuras de 3.8 a 3.12 e Tabela 3.5.

Para os cálculos da composição do novo combustível nuclear sem o veneno queimável (Gd) e com o veneno queimável (Gd), utilizou-se a equação que conforme [LAMARSH & BARATTA, 2001], determina a massa média (\bar{M}_x) de um isótopo considerando o seu enriquecimento, onde w_i significa o peso percentual e M_i é o peso atômico do isótopo.

$$\frac{1}{\bar{M}_x} = \frac{1}{100} \sum \frac{w_i}{M_i} \quad (3.5)$$

Com o intuito de especificar a utilização da Equação (3.5) foram feitas modificações adequando-a à necessidade deste trabalho, conforme as equações (3.6) a (3.11),

$$\bar{M}_U = \left[\frac{w_{U234}}{M_{U234}} + \frac{w_{U235}}{M_{U235}} + \frac{w_{U238}}{M_{U238}} \right]^{-1} \cdot 100 \quad (3.6)$$

onde \bar{M}_U é a massa média de Urânio e $M_{U234}, M_{U235}, M_{U238}$ são as massas do Urânio-234, Urânio-235 e Urânio-238 respectivamente. O cálculo da massa média do combustível nuclear fresco UO_2 , é realizado através da Equação (3.7), onde M_O é a massa do oxigênio (O),

$$\bar{M}_{UO_2} = \bar{M}_U + 2.M_O \quad (3.7)$$

Para o cálculo do combustível com a inserção do gadolínio (Gd), foi considerado o gadolínio natural, isto é, Gd-152, Gd-154, Gd-155, Gd-156, Gd-157, Gd-158, Gd-160 com suas respectivas composições, para encontrar a massa média do Gd:

$$\bar{M}_{Gd}^{-} = \left[\frac{W_{Gd152}}{M_{Gd152}} + \frac{W_{Gd154}}{M_{Gd154}} + \frac{W_{Gd155}}{M_{Gd155}} + \frac{W_{Gd156}}{M_{Gd156}} + \frac{W_{Gd157}}{M_{Gd157}} + \frac{W_{Gd158}}{M_{Gd158}} + \frac{W_{Gd160}}{M_{Gd160}} \right]^{-1} \quad (3.8)$$

Com a Equação 3.9 e considerando a massa dos três átomos de oxigênio (O) foi possível encontrar a massa média da molécula Gd₂O₃, assim,

$$\bar{M}_{Gd_2O_3}^{-} = 2 \cdot \bar{M}_{Gd}^{-} + 3 \cdot M_O \quad (3.9)$$

e, finalmente, a massa média da molécula de UO₂ + Gd₂O₃, através da seguinte equação:

$$\bar{M}_{UO_2+Gd_2O_3}^{-} = \left[\frac{w_{UO_2}}{M_{UO_2}} + \frac{w_{Gd_2O_3}}{M_{Gd_2O_3}} \right]^{-1} \quad (3.10)$$

A unidade usada para os valores das densidades dos isótopos nas simulações foi o atom/barn.cm, porque é exigido por alguns códigos nucleares. Desse modo, o número de Avogadro é frequentemente expresso na forma 0,6022 atoms*cm²/mol*barn [GOORLEY]. Sabendo que 1 barn equivale a 1x10⁻²⁴ cm² [LAMARSH & BARATTA, 2001] a seguinte equação foi utilizada para conversão de massa média em densidade isotópica:

$$N_i = \frac{\left(\frac{\bar{M}_e}{\bar{M}_{UO_2+Gd_2O_3}} \right) \cdot w_{UO_2} \cdot \rho_{UO_2} \cdot 0,6022}{M_i} \quad (3.11)$$

onde N_i é a densidade de cada isótopo, \bar{M}_e é a massa média do elemento químico, $\bar{M}_{UO_2+Gd_2O_3}$ é a massa média da mistura, ρ_{UO_2} é a densidade do combustível, M_i é a massa do isótopo.

Nesta fase do trabalho serão considerados os elementos combustíveis sem barras de veneno queimável e com barras de veneno queimável, com os respectivos percentuais e posições devidamente representados pelas figuras 3.8 a 3.12 e Tabela 3.5.

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	1	1	1
1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	3	1	1	3	1	1	2	1	1	3	1	1	3	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1
1	1	1	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 3.8: Elemento combustível sem barras de veneno queimável

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	1	1	1
1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1
1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1
1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1
1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	3	1	1	3	1	1	2	1	1	3	1	1	3	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1
1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1
1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1
1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1
1	1	1	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 3.9: Elemento combustível com 08 barras de veneno queimável

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	4	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	4	1	1
1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1
1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1
1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1
1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	3	1	1	3	1	1	2	1	1	3	1	1	3	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1
1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1
1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1
1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1
1	1	4	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	4	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 3.10: Elemento combustível com 12 barras de veneno queimável

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	4	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	4	1	1
1	1	1	3	1	1	1	4	1	4	1	1	1	3	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1
1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1
1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1
1	1	3	1	1	3	1	1	2	1	1	3	1	1	3	1	1
1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1
1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1
1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	3	1	1	1	4	1	4	1	1	1	3	1	1	1
1	1	4	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	4	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 3.11: Elemento combustível com 16 barras de veneno queimável

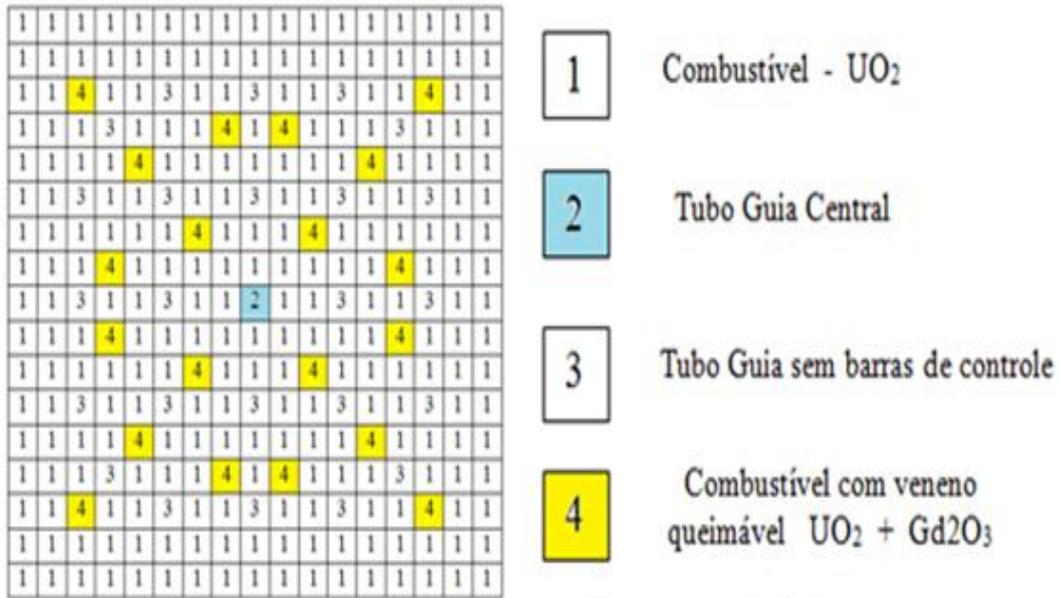


Figura 3.12: Elemento combustível com 20 barras de veneno queimável e legenda dos elementos combustíveis

Tabela 3.5 - Elementos Combustíveis sem e com barras de veneno queimável

Enriquecimento do Combustível – 4,0% de Urânio-235 – Queima 60 GWd/MTU

Veneno Queimável %	Identificação do Elemento	Nº Barras Veneno Queimável	Veneno Queimável %	Identificação do Elemento	Nº Barras Veneno Queimável
0	EC-WBPR	0	0	EC-WBPR	0
2	EC-8	08	5	EC-8	08
	EC-12	12		EC-12	12
	EC-16	16		EC-16	16
	EC-20	20		EC-20	20

3.4.2. RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS SIMULAÇÕES

Após os cálculos realizados através das Equações (3.5) a (3.11) e com o código SCALE 6.0, através do módulo TRITON, foram efetuadas as simulações que proporcionaram a possibilidade de avaliação da sensibilidade do elemento combustível quando submetido às diversas combinações apresentadas na Tabela 3.5.

Foram analisados o fator de multiplicação infinito (k_{inf}), sua variação percentual entre os passos da queima, o fluxo térmico, a razão entre os fluxos térmico e total. O cálculo da variação percentual do fator de multiplicação infinito entre os passos da queima foi realizado utilizando a Equação 3.4.

3.4.2.1. ELEMENTO COMBUSTÍVEL SEM BARRAS DE VENENO QUEIMÁVEL

A Figura 3.13 mostra o comportamento do fator de multiplicação infinito durante toda a queima, onde se observa uma queda um pouco mais brusca no início do ciclo. Entretanto, ao longo da queima o fator de multiplicação continua com a sua tendência de diminuição, mas sem redução drástica. Próximo da queima de 40,0 GWd/MTU o núcleo do reator PWR que contém este elemento combustível torna-se subcrítico.

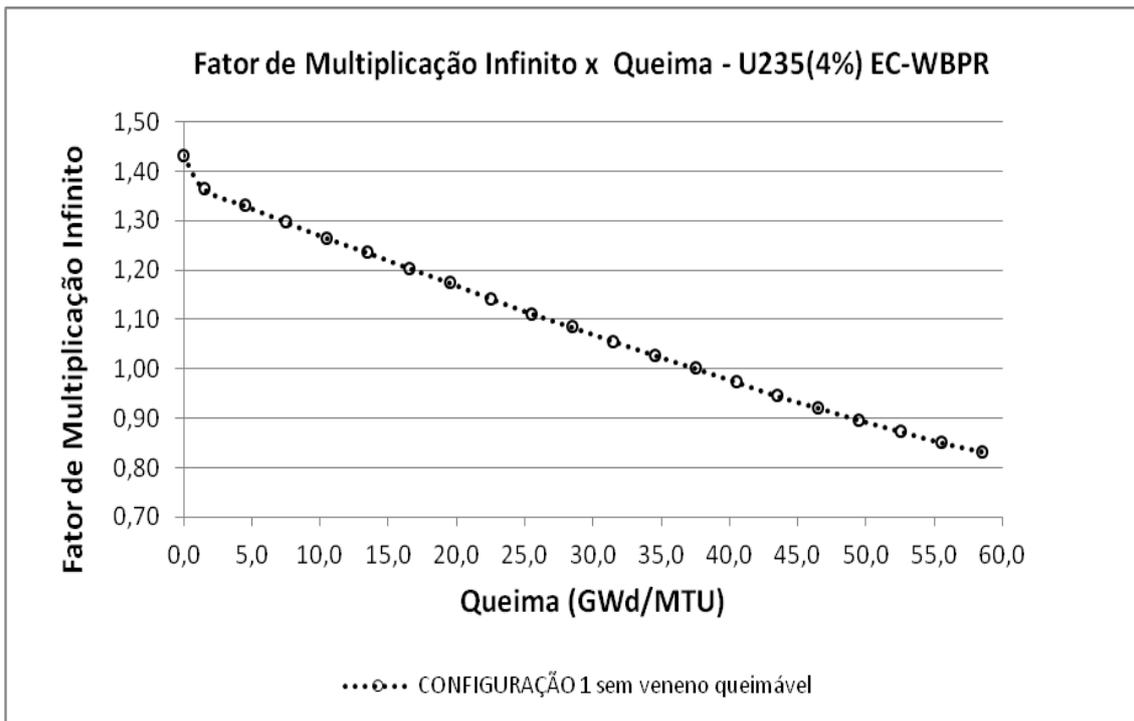


Figura 3.13: Fator de multiplicação infinito (EC-WBPR)

A Figura 3.14 apresenta o gráfico da variação percentual entre os valores do k_{inf} e se observa que há uma queda acentuada no intervalo de queima 0,0 a 5,0 GWd/MTU de quase 3,0%, isto é, o valor da variação do k_{inf} que está acima de 4,5% reduz para próximo de 2,5%. A partir da queima de 5,0 GWd/MTU, a variação percentual ficou praticamente oscilando no intervalo entre 3,0% e 2,0%, até o fim do ciclo.

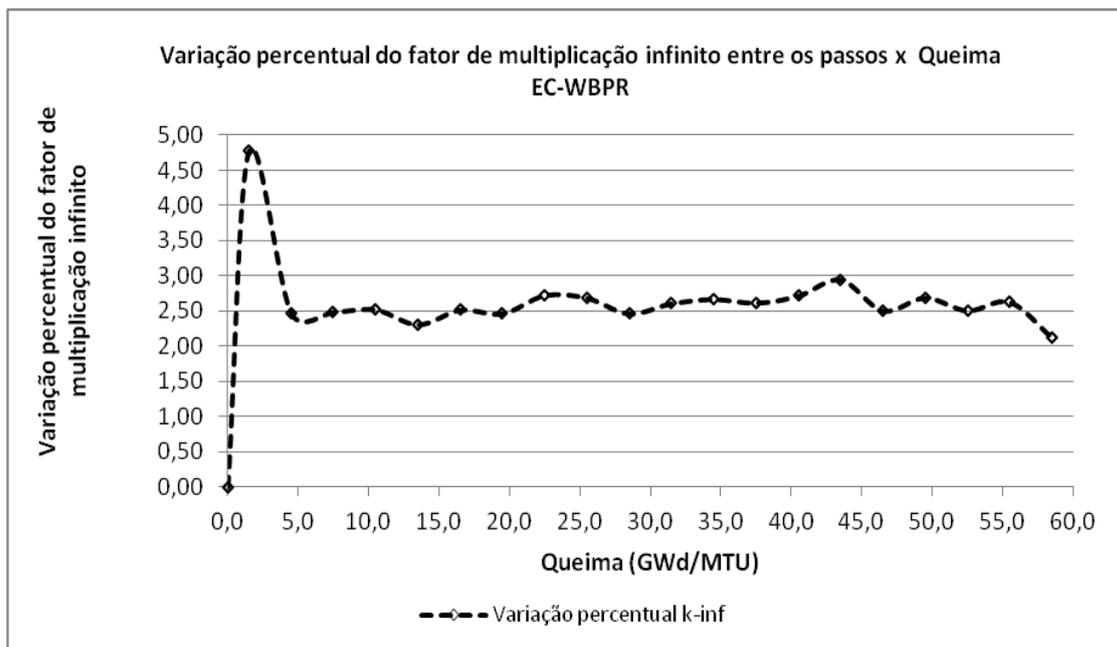


Figura 3.14: Varição percentual do fator de multiplicação infinito entre os passos (EC-WBPR)

A Figura 3.15 apresenta o gráfico do aumento do fluxo de nêutrons térmicos, o que significa uma redução do endurecimento, ou seja, um amolecimento do espectro.

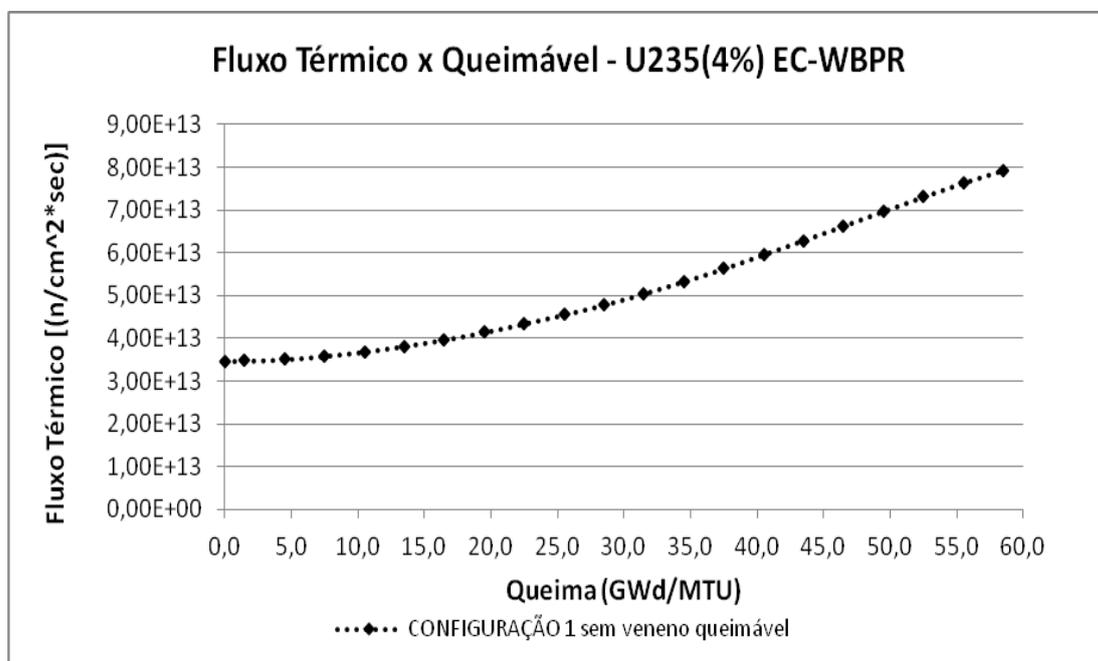


Figura 3.15: Fluxo térmico ao longo da queima (EC-WBPR)

A Figura 3.16 apresenta o gráfico onde a razão entre os fluxos térmico e total está aumentando, caracterizando assim, que a quantidade de nêutrons térmicos em relação ao número total de nêutrons está aumentando.

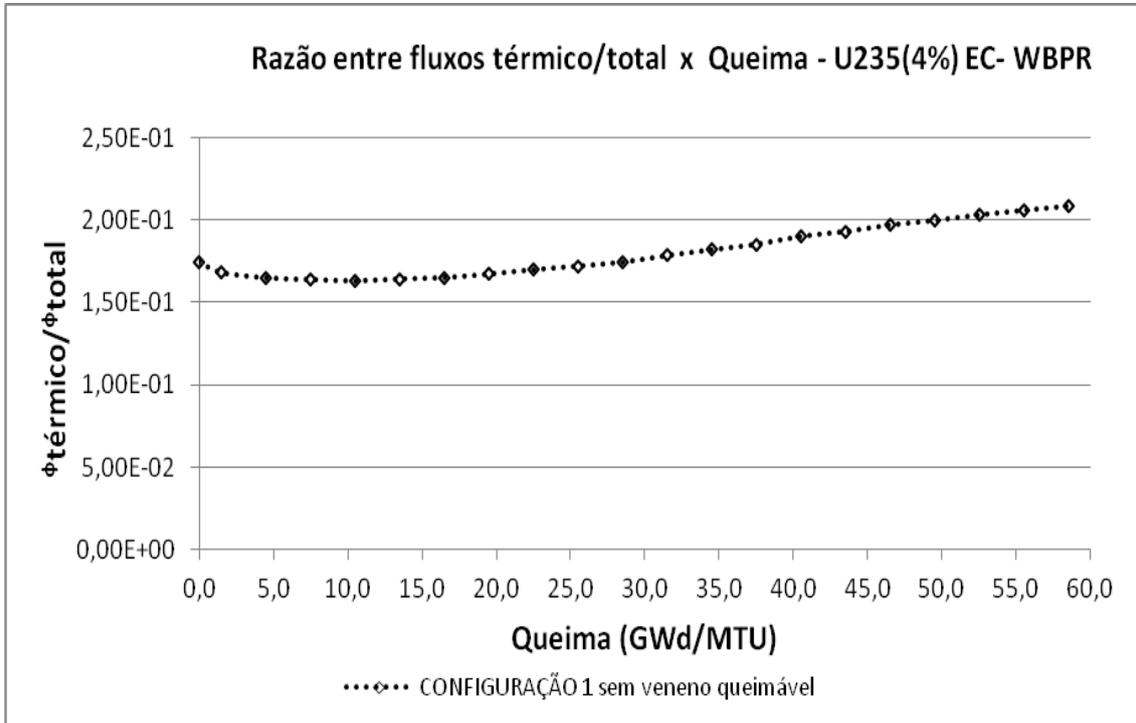


Figura 3.16: Razão entre fluxos térmico/total (EC-WBPR)

3.4.3. ELEMENTO COMBUSTÍVEL COM 2,0% DE VENENO QUEIMÁVEL

A partir desse ponto, serão feitas comparações entre valores do k_{inf} e suas variações percentuais, fluxos térmicos, razões entre fluxos térmicos e totais com as respectivas variações percentuais dos elementos combustíveis com 2,0% de veneno queimável, em relação à variação do número de barras, isto é, 08, 12, 16 e 20.

Para avaliar o comportamento do fluxo neutrônico devido a presença de veneno queimável, cada elemento combustível contendo 08, 12, 16 e 20 barras, será dividido em dois conjuntos de varetas. O Conjunto 1 corresponde às barras sem veneno queimável e o Conjunto 2 representa as barras contendo veneno queimável.

Os elementos combustíveis simulados são compostos de barras de combustíveis, que possuem em sua composição uma configuração sem veneno queimável, cujo elemento

combustível é identificado como EC-WBPR (Elemento Combustível – Without Burnable Poison Rod) e uma configuração com veneno queimável, cujos elementos combustíveis são identificados como EC-8, EC-12, EC-16, EC-20, onde EC significa Elemento Combustível e o número indica a quantidade de barras de veneno queimável que cada EC possui.

Os EC-8, EC-12, EC-16 e EC-20, estão subdivididos em conjuntos de barras de combustíveis sem veneno queimável, identificado como Conjunto 1 (C1) e em conjuntos que possuem barras de veneno queimável, identificado como Conjunto 2 (C2), conforme fluxograma da Figura 3.17.

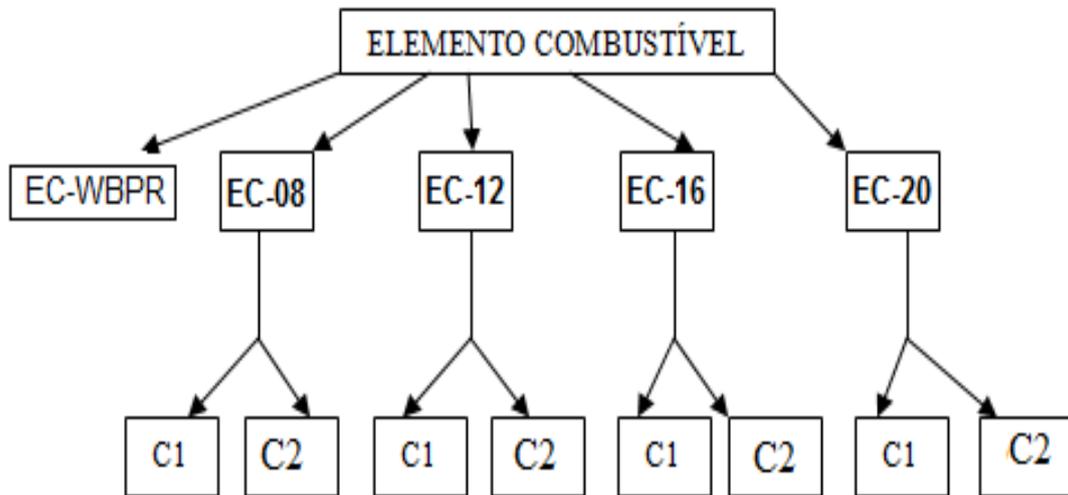


Figura 3.17: Fluxograma elemento combustível e conjuntos de barras sem veneno e com veneno queimável

Inicialmente serão comparadas os conjuntos 1 e 2 para os elementos combustíveis EC-8, EC-12, EC-16, EC-20, avaliando os parâmetros citados no parágrafo anterior. Em seguida serão comparados os elementos combustíveis com as diferentes quantidades de barras de veneno queimável.

3.4.3.A. COMPARAÇÕES ENTRE OS VALORES DO FATOR DE MULTIPLICAÇÃO INFINITO

A Figura 3.18, apresenta valores do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) dos elementos combustíveis EC-WBPR, EC-8, EC-12, EC-16 e EC-20 que apresentam diferenças apenas no intervalo de 0,0 a 10,0 GWd/MTU. A partir deste ponto, os gráficos tornam-se coincidentes até o final da queima. No intervalo de queima 35,0 a 40,0 GWd/MTU todos os elementos combustíveis tornam-se subcríticos. O gráfico que representa o EC-8 mostra uma queda acentuada entre o intervalo de 0,0 a 5,0 GWd/MTU. A partir do ponto 5,0 GWd/MTU há estabilização do k_{inf} e a partir da queima 10,0 GWd/MTU, há uma redução constante e linear do k_{inf} . O gráfico do EC-12, mostra uma queda brusca no k_{inf} no intervalo de 0,0 a 5,0 GWd/MTU. A partir de 5,0 GWd/MTU apresenta um acréscimo no k_{inf} , entretanto, próximo da queima 10,0 GWd/MTU o seu valor volta a diminuir de forma constante e linear. O gráfico do EC-16, mostra uma queda brusca no k_{inf} no intervalo de 0,0 a 5,0 GWd/MTU. No intervalo entre 5,0 GWd/MTU e 10,0 GWd/MTU o valor de k_{inf} volta a subir possuindo um pico no ponto 10,0 GWd/MTU e a partir deste ponto seu valor reduz de forma linear e contínua. O gráfico do EC-20 possui comportamento semelhante ao EC-16, no entanto, o valor do seu k_{inf} inicial é menor que do EC-16, mas no intervalo de queima entre 5,0 GWd/MTU e 10,0 GWd/MTU o valor do k_{inf} aumenta e atinge valores próximos ao do EC-16 no mesmo intervalo.

Como se esperava o elemento combustível sem barras de veneno queimável possui o maior valor do fator de multiplicação no início da queima e o elemento combustível que possui 20 barras de veneno queimável o menor valor, mostrando assim, a interferência do veneno queimável no controle da população de nêutrons.

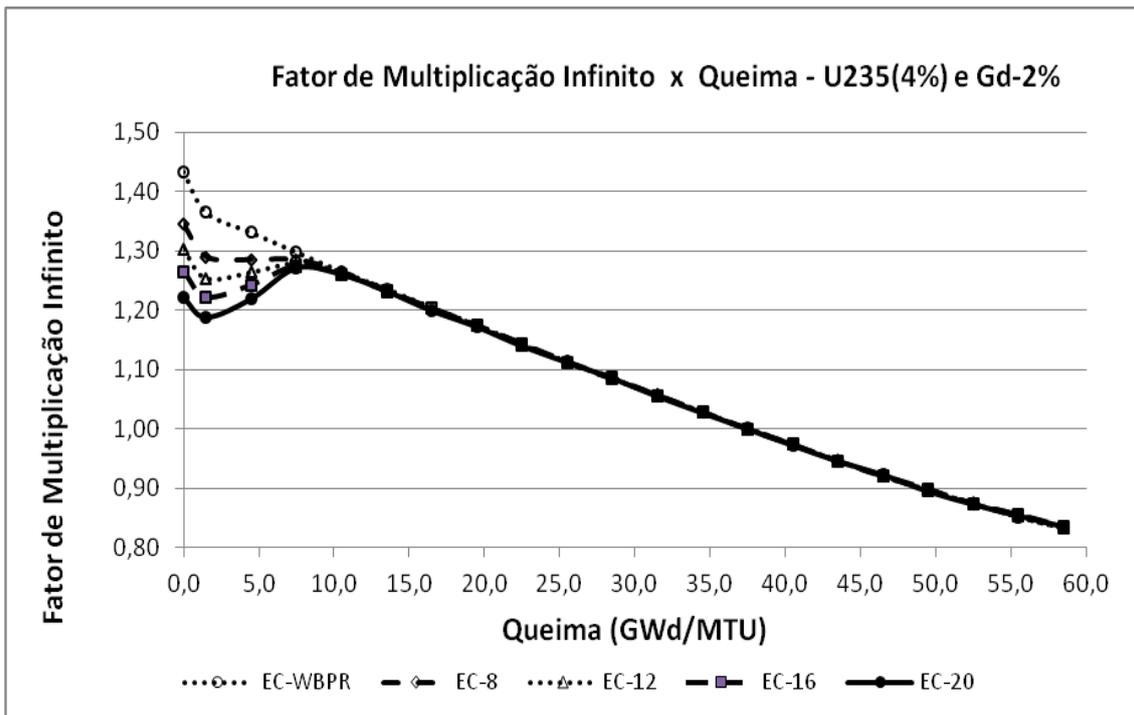


Figura 3.18: Fator de multiplicação infinito ao longo da queima de 60,0 GWd/MTU (EC-WBPR, EC-8, EC-12, EC-16, EC-20)

A Figura 3.19 apresenta o comportamento do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) em nível percentual. Desse modo, é possível identificar de forma mais explícita o seu comportamento em cada elemento ao longo da queima, além de permitir as devidas comparações.

A curva do elemento combustível sem veneno queimável foi discutido anteriormente e comparando-a com as demais, observa-se que possui a menor oscilação no valor do k_{inf} do início ao fim do ciclo.

O gráfico do k_{inf} em nível percentual do EC-8, evidencia a sua queda brusca no intervalo de queima de 0,0 a 5,0 GWd/MTU. Em seguida observa-se que o k_{inf} a partir do intervalo de queima 5,0 a 10,0 GWd/MTU se mantém crescente no intervalo de 10,0 a 15,0 GWd/MTU, próximo da queima 15,0 GWd/MTU, permanece praticamente constante dentro do intervalo de 2,0% a 3,0%, sofrendo pequenas oscilações; e ao final do ciclo a variação percentual encerra-se praticamente em 2,0%.

O gráfico que representa o k_{inf} em nível percentual do EC-12, mostra no intervalo de 0,0 a 5,0 GWd/MTU um pico no valor do k_{inf} e no intervalo de 5,0 a 10,0 GWd/MTU uma

depressão, onde atingindo inclusive valores negativos. Próximo da queima 7,50 GWd/MTU, o k_{inf} volta a crescer e tem seu maior valor após o início do ciclo no intervalo de queima de 10,0 a 15,0 GWd/MTU, mantendo uma variação percentual oscilante dentro do intervalo de 2,0% a 3,0% até o final da queima.

O gráfico da variação percentual do fator de multiplicação infinito do EC-16, mostra que no intervalo de queima 0,0 a 5,0 GWd/MTU, ocorre um pico que está próximo de 3,5%. No intervalo de 5,0 a 10,0 GWd/MTU apresenta a forma de uma parábola com concavidade voltada para cima, possuindo vértice na queima de aproximadamente 7,50 GWd/MTU e -2,5%. A partir desta queima, a parábola passa a ser crescente e por volta da queima de 15,0 GWd/MTU o gráfico apresenta característica linear, mantendo pequenas oscilações no intervalo de variação percentual de 2,0% a 3,0% até o final do ciclo.

O gráfico que representa o EC-20, mostra a variação percentual do fator de multiplicação infinito (Δk_{inf}) um pico ascendente com valor próximo de 3,0% no intervalo de 0,0 a 5,0 GWd/MTU. A partir do pico e até queima de 10,0 GWd/MTU, observa-se que o gráfico tem forma de parábola decrescente que atinge o vértice no ponto abaixo de -4,0%, numa queima acima de 5,0 GWd/MTU. Como a parábola tem sua concavidade voltada para cima, a partir do vértice o k_{inf} possui um comportamento crescente, mostrando que a diferença percentual tende a atingir o zero por volta da queima ligeiramente maior que 10,0 GWd/MTU. A partir deste ponto, se observa que não há mais uma parábola mas oscilações ao longo do eixo da queima dentro de um intervalo de variação percentual de 2,0% a 3,0% e que no intervalo da queima de 40,0 GWd/MTU a 50,0 GWd/MTU, a variação percentual atinge o seu maior valor.

De forma geral, pode-se observar que o elemento combustível com maior quantidade de barras de veneno queimável (EC-20) possui a maior oscilação compreendida no intervalo de aproximadamente +2,7% a -4,5%. Por volta da queima de 10,0 GWd/MTU, todos os gráficos mantêm a oscilação dentro do intervalo da variação percentual de 2,0% a 3,0%.

Desse modo, conclui-se que a maior quantidade de barras de veneno queimável produz maior oscilação no fator de multiplicação infinito.

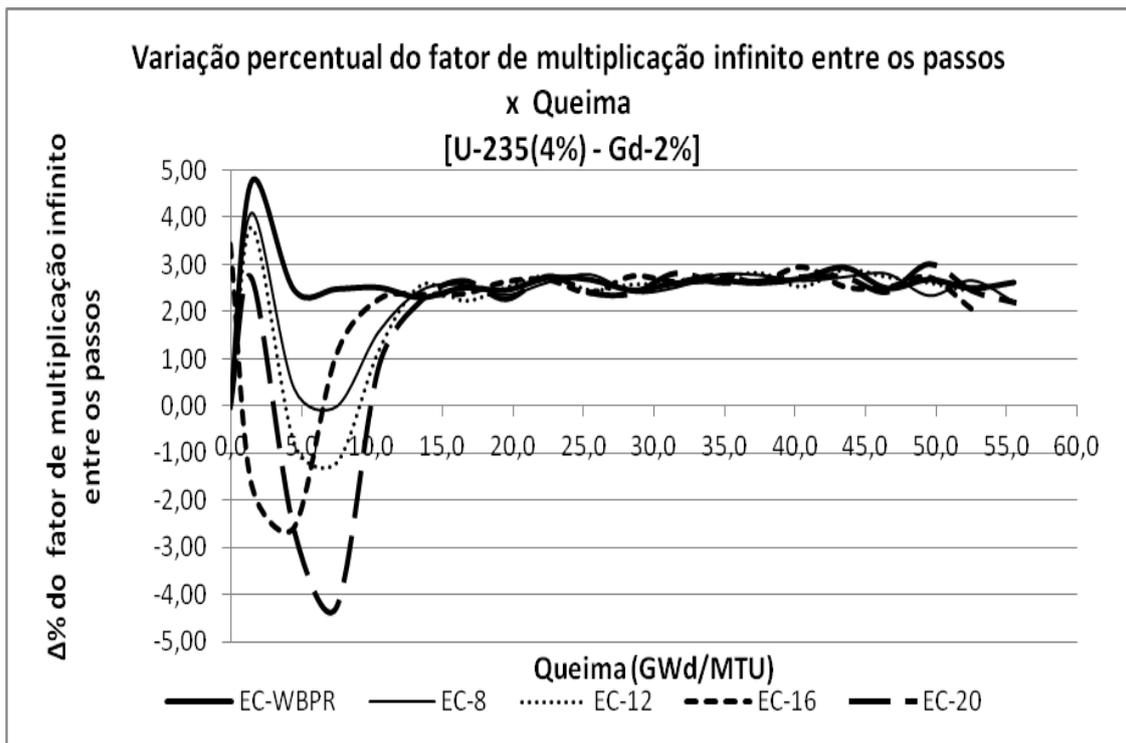


Figura 3.19: Variação percentual do k_{inf} (EC-WBPR, EC-8, EC-12, EC-16, EC-20)

3.4.3.B. COMPARAÇÕES ENTRE OS FLUXOS TÉRMICOS DOS CONJUNTOS 1 E 2 PARA ELEMENTO COMBUSTÍVEL COM 2,0% DE VENENO QUEIMÁVEL

A Figura 3.20 compara os gráficos dos fluxos térmicos dos conjuntos 1 (sem barras de veneno queimável) e 2 (com barras de veneno queimável). De maneira geral o gráfico apresenta discrepância bastante acentuada apenas no intervalo de queima de 0,0 a 10,0 GWd/MTU, onde observa-se que o fluxo térmico é cerca de 3,5 vezes maior no combustível sem barras de veneno queimável do que naqueles nos quais as barras estão presentes. Os gráficos sem a presença e com a presença das barras de veneno queimável convergem para um mesmo ponto, isto é, próximo à queima de 10,0 GWd/MTU. A partir da queima de 10,0 GWd/MTU os gráficos tornam-se praticamente coincidentes até o final do ciclo.

Fazendo uma análise mais individualizada, se observa que nos gráficos dos conjuntos 1 e 2 do EC-8, há uma discrepância apenas no início do ciclo onde o fluxo térmico da conjunto 2 é menor que o conjunto 1, fato atribuído à presença do veneno queimável

Gd₂O₃. À medida que ocorre a queima do combustível os gráficos dos fluxos tornam-se coincidentes. Esta situação pode ser justificada em decorrência da sincronia na cinética da queima do veneno junto ao combustível, o que é bastante relevante mostrando assim, que não há quantidade residual significativa de veneno queimável no final ciclo.

Em relação aos gráficos dos conjuntos do EC-12, comportamento análogo ao EC-8, entretanto, vale ressaltar que o conjunto 1 possui maior inclinação que o conjunto 2 e ao final aos gráficos são paralelos, quase coincidentes.

Os gráficos dos conjuntos do EC-16, são lineares e crescentes, o fluxo térmico da conjunto 2 é cerca de 3,5 vezes menor que o conjunto 1, fato justificado pela atuação do veneno queimável.

Os gráficos dos conjuntos do EC-20, mostra que a diferença entre os fluxos térmicos dos conjuntos estão diminuindo e por volta da queima 10,0 GWd/MTU a diferença existente não tem nenhuma relevância. Os gráficos são lineares e crescentes e a partir da queima 10,0 GWd/MTU são praticamente coincidentes.

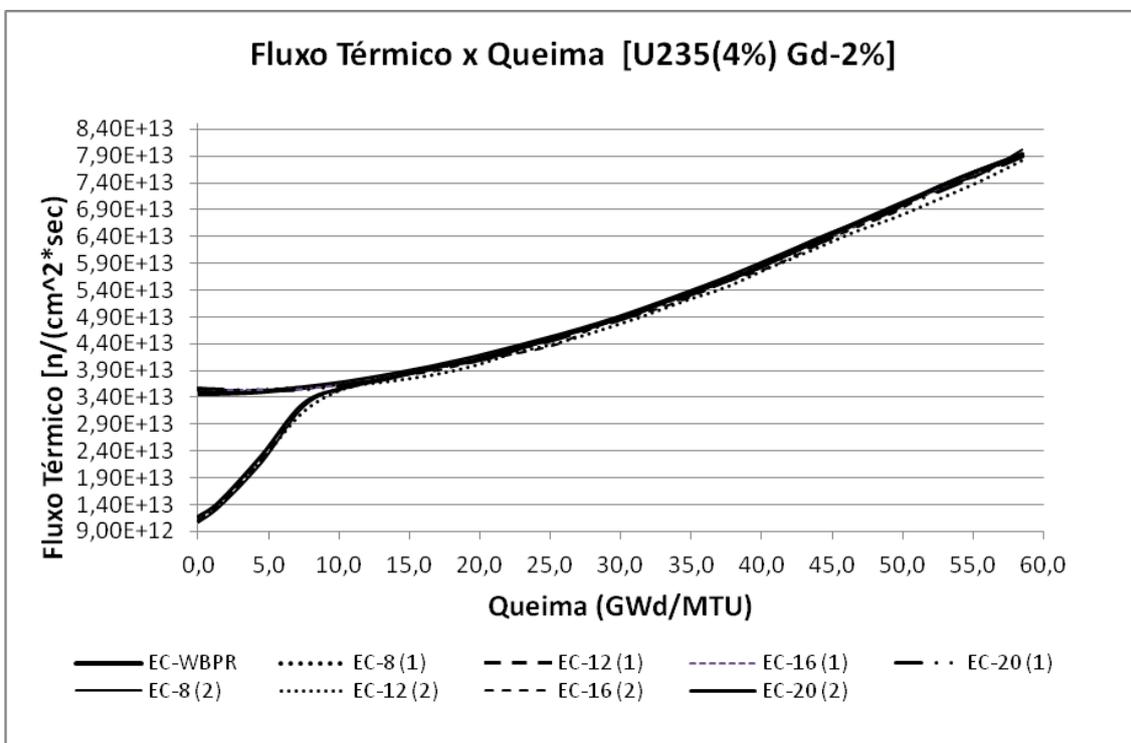


Figura 3.20: Comparações dos fluxos térmicos dos conjuntos 1 e 2. (EC-8, EC-12, EC-16, EC-20)

A Figura 3.21 apresenta a razão dos fluxos térmico e total do elemento combustível sem barras de veneno queimável (EC-WBPR) que servirá como referência e razões entre os fluxos térmicos e totais dos conjuntos 2 dos diferentes elementos combustíveis com 08, 12, 16 e 20 barras de veneno queimável respectivamente (EC-8, EC-12, EC-16 e EC-20).

Os gráficos mostram que não há diferença significativa nas razões entre os fluxos que possa ser justificada em virtude da quantidade de barras de veneno queimável. Porque se observa que os elementos combustíveis com diferentes quantidades de barras de veneno queimável possuem o mesmo comportamento no início e no final da queima.

A partir da queima 10,0 GWd/MTU, os gráficos das razões dos fluxos dos elementos combustíveis sem veneno e com veneno tendem à coincidência até o final da queima.

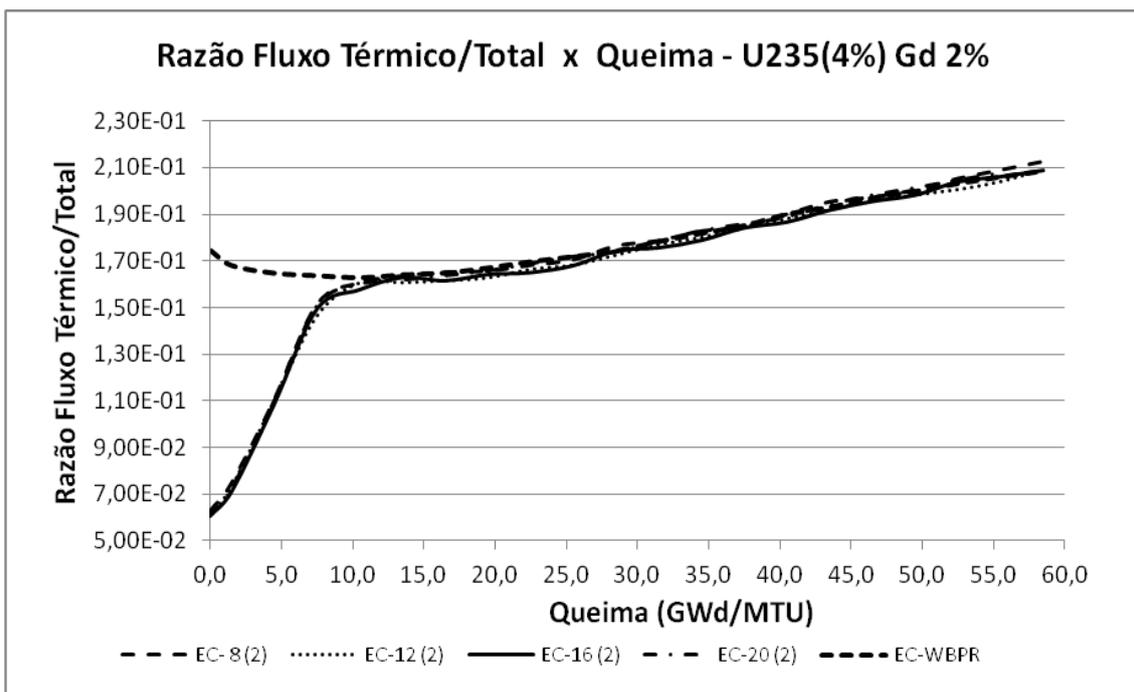


Figura 3.21: Comparação das razões dos fluxos térmico e total do EC-WBPR e dos conjuntos 2 dos (EC-8, EC-12, EC-16, EC-20)

A Figura 3.22, apresenta uma comparação entre as razões dos fluxos térmicos e totais dos conjuntos 1 e 2 dos elementos combustíveis. Nesta análise foi utilizado Equação 3.12,

$$\Delta\Phi = \left(\frac{C_1 - C_2}{C_1} \right) \cdot 100 \quad (3.12)$$

onde C_1 representa a razão entre o fluxo térmico e total do conjunto 1 e C_2 representa a razão entre o fluxo térmico e total do conjunto 2.

De forma geral, se observa em todos os elementos combustíveis que as razões entre os fluxos dos conjuntos 1 são maiores em relação aos conjuntos 2, mais que 60,0%. A partir da queima 10,0 GWd/MTU, a diferença percentual está abaixo de 5,0% e continua reduzindo, chegando inclusive, a atingir valores negativos, este fato é atribuído a atuação do veneno queimável, mostrando que nos conjuntos 2 (que possuem varetas de veneno queimável), o combustível foi melhor preservado ao longo da queima em relação aos conjuntos 1 (sem varetas de veneno queimável).

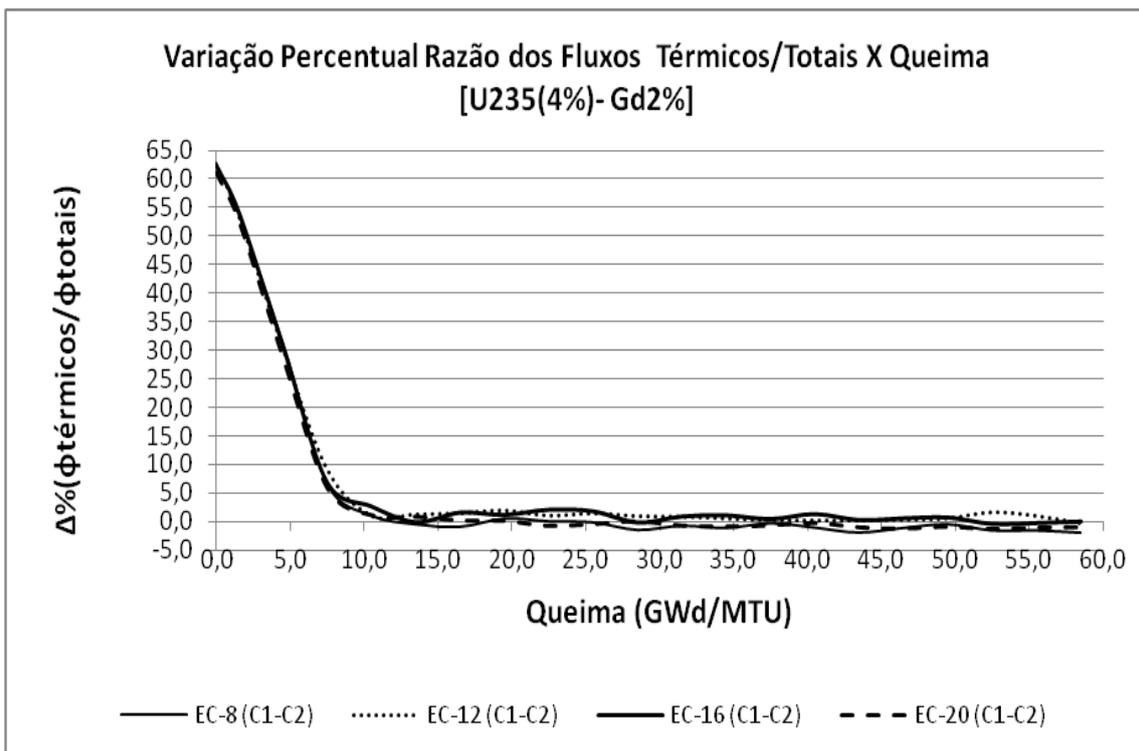


Figura 3.22: Variação percentual da razão dos fluxos térmicos/fluxos totais dos conjuntos 1 e 2. (EC-8, EC-12, EC-16, EC-20).

3.4.4. ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS COM 5,0% DE VENENO QUEIMÁVEL

Como já foi realizada a análise do k_{inf} e a respectiva variação percentual, razão entre fluxos térmico e total e a respectiva variação percentual do elemento combustível sem barras de veneno queimável, a partir de agora, as análises destas grandezas serão realizadas por comparações entre o EC-WBPR que servirá de referência e o conjunto 1 (sem barras de veneno queimável) e o conjunto 2 (com barras de veneno queimável), que são as subdivisões dos elementos combustíveis. Serão consideradas apenas as diferentes quantidades de barras de veneno queimável, visto que todas possuem em suas composições 5,0% de gadolínio (Gd), procedimento análogo ao item 3.4.3.

3.4.4.A. COMPARAÇÕES ENTRE OS VALORES DO FATOR DE MULTIPLICAÇÃO INFINITO

A Figura 3.23 apresenta uma comparação entre os valores do fator de multiplicação infinito do elemento combustível sem barras de veneno queimável (EC-WBPR), com 08 (EC-8), com 12 (EC-12), com 16 (EC-16) e com 20 (EC-20) barras de veneno queimável, respectivamente.

De forma geral, observa-se, que o elemento combustível sem barras de veneno queimável possui o maior fator de multiplicação infinito no início da queima e o elemento combustível que possui 20 barras de veneno queimável possui o menor valor, mostrando assim, a interferência do veneno queimável no controle da população de nêutrons. Todos os gráficos no intervalo de queima 10,0 GWd/MTU a 15,0 GWd/MTU, convergem para um valor comum do fator de multiplicação infinito e em seguida continuam decrescendo de forma igual, visto que todos os gráficos tornam-se coincidentes.

Fazendo uma análise mais detalhada do comportamento de cada elemento combustível ao longo da queima, observa-se que o valor do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) do EC-12 começa a reduzir de forma semelhante aos demais elementos combustíveis. No entanto, no intervalo de queima 10,0 a 15,0 GWd/MTU o seu valor tem um leve

acréscimo, voltando a diminuir de forma constante e se mantém como uma função decrescente até o final do ciclo.

O valor do k_{inf} do EC-16 sofre uma redução no intervalo de queima de 0,0 a 5,0 GWd/MTU, e se mantém praticamente constante até próximo da queima 10,0 GWd/MTU. No intervalo de 10,0 a 15,0 GWd/MTU há um pico ascendente atingindo um valor próximo ao seu valor no início da queima. Próximo da queima de 20,0 GWd/MTU o valor do k_{inf} volta a reduzir e se mantém como uma função decrescente até o final do ciclo.

O comportamento do fator de multiplicação infinito do EC-20 é semelhante ao do EC-16, no intervalo de queima de 0,0 a 5,0 GWd/MTU. No intervalo de queima de 10,0 a 15,0 GWd/MTU, o k_{inf} tem um pico ascendente e atinge valor superior ao que tinha no início da queima. No intervalo de 15,0 a 20,0 GWd/MTU o valor do k_{inf} começa a diminuir e mantém-se como uma função decrescente até o final do ciclo.

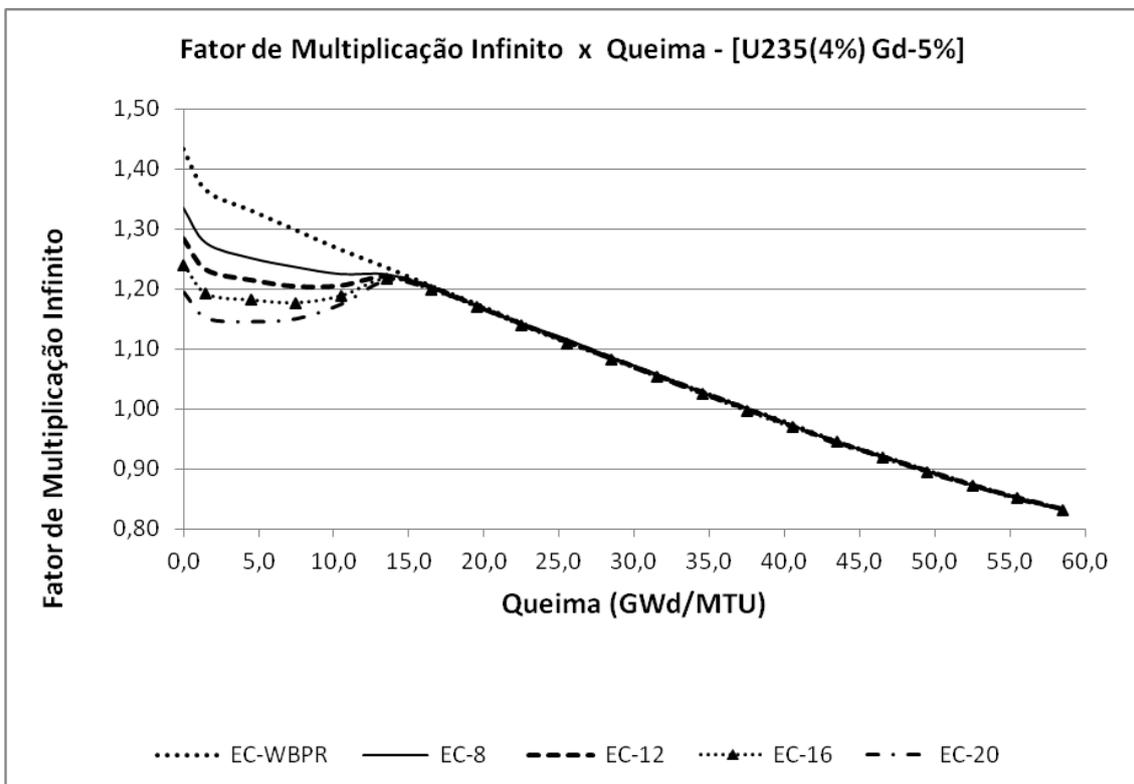


Figura 3.23: Fator de multiplicação infinito (EC-WBPR, EC-8, EC-12, EC-16, EC-20).

A Figura 3.24 apresenta o comportamento do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) em nível percentual e desse modo é possível identificar de forma mais explícita o seu comportamento em cada elemento ao longo da queima. É bastante evidente que todos os gráficos apresentam-se em forma de parábola com a concavidade voltada para baixo no intervalo de queima de 0,0 a 5,0 GWd/MTU. Exceto o gráfico do EC-WBPR todos os demais apresentam-se em forma de parábola com a concavidade voltada para cima, a partir da queima 5,0 GWd/MTU até próximo da queima 20,0 GWd/MTU e em seguida o valor da variação do k_{inf} , oscila dentro de um intervalo de 2,0 a 3,0%.

Comparando, observa-se que o elemento combustível sem veneno queimável possui a menor oscilação no valor do k_{inf} , apresentando a maior oscilação no intervalo de queima de 0,0 a 5,0 GWd/MTU. A partir da queima 5,0 GWd/MTU, a variação percentual oscila dentro do intervalo de 2,0 a 3,0%, até o final da queima.

O valor da variação do k_{inf} do EC-8, no intervalo de 0,0 a 5,0 GWd/MTU possui um pico ascendente maior que 4,0%. A partir da queima de 5,0 GWd/MTU até a queima próximo de 15,0 GWd/MTU há uma queda de mais de 4,0%, onde está o vértice da parábola. A partir desse ponto, o gráfico apresenta comportamento crescente até próximo da queima de 20,0 GWd/MTU e em seguida mantém-se oscilando dentro do intervalo de 2,0 a 3,0%.

A curva que representa o EC-12 no intervalo de 0,0 a 5,0 GWd/MTU é ascendente e mostra um pico ligeiramente maior que 4,0%, em seguida a variação percentual começa a reduzir. No intervalo de 10,0 a 15,0 GWd/MTU a curva adquire a forma de parábola com a concavidade voltada para cima e possui seu vértice no ponto próximo de (13,5 GWd/MTU, -1,50%). No intervalo de 15,0 a 20,0 GWd/MTU a variação percentual aumenta próximo de 4,0%, pois sai de um valor negativo próximo de 1,5% até o ponto positivo 2,5%. No intervalo de 20,0 a 50,0 GWd/MTU a variação percentual oscila entre os valores positivos de 2,5 a 3,0% e finalmente próximo à queima 50,0 GWd/MTU a variação percentual oscila entre os valores positivos de 2,0 a 2,5% até o final da queima.

O EC-16 é representado por um curva que possui comportamento semelhante à curva do EC-12, havendo diferença apenas em relação aos valores, pois o pico ascendente é

ligeiramente menor que 4,0%, em seguida a variação percentual começa a reduzir. No intervalo de 10,0 a 15,0 GWd/MTU a curva adquire a forma de parábola com a concavidade voltada para cima e possui seu vértice no ponto próximo de (13,5 GWd/MTU, -2,50%). No intervalo de 15,0 a 20,0 GWd/MTU a variação percentual aumenta próximo de 5,0%, pois sai de um valor negativo próximo de 2,5% até o ponto positivo 2,5%. A partir do ponto próximo a 20,0 GWd/MTU, a variação percentual oscila entre os valores positivos de 2,5 a 3,0%, até o final do ciclo, mas, há ainda alguns pontos poucos pontos que estão abaixo do valor de 2,5%.

A curva do EC-20 de maneira análoga às demais curvas, apresenta comportamento crescente no intervalo de 0,0 a 5,0 GWd/MTU, com pico positivo no ponto próximo de 3,5%. A partir desse pico a curva tem comportamento decrescente, atingindo valores inclusive negativos. No intervalo de queima de 5,0 a 10,0 GWd/MTU a parábola tem a concavidade voltada para cima, possuindo o ponto de mínimo com coordenadas próximas de (15,0 GWd/MTU, -3,5%). Desse modo observa-se que a variação percentual sofre uma redução de aproximadamente 7,0%, pois sai de um valor positivo de 3,5% até um valor negativo de 3,5%. A partir do ponto de mínimo, a variação percentual começa a aumentar o que ocorre até próximo da queima de 20,0 GWd/MTU. No intervalo de queima de 20,0 a próximo de 45,0 GWd/MTU a variação percentual oscila no intervalo de 2,5 a 3,0%. No intervalo de queima de 45,0 a 60,0 GWd/MTU, a variação percentual ocorre no intervalo de 2,0 a 3,0% .

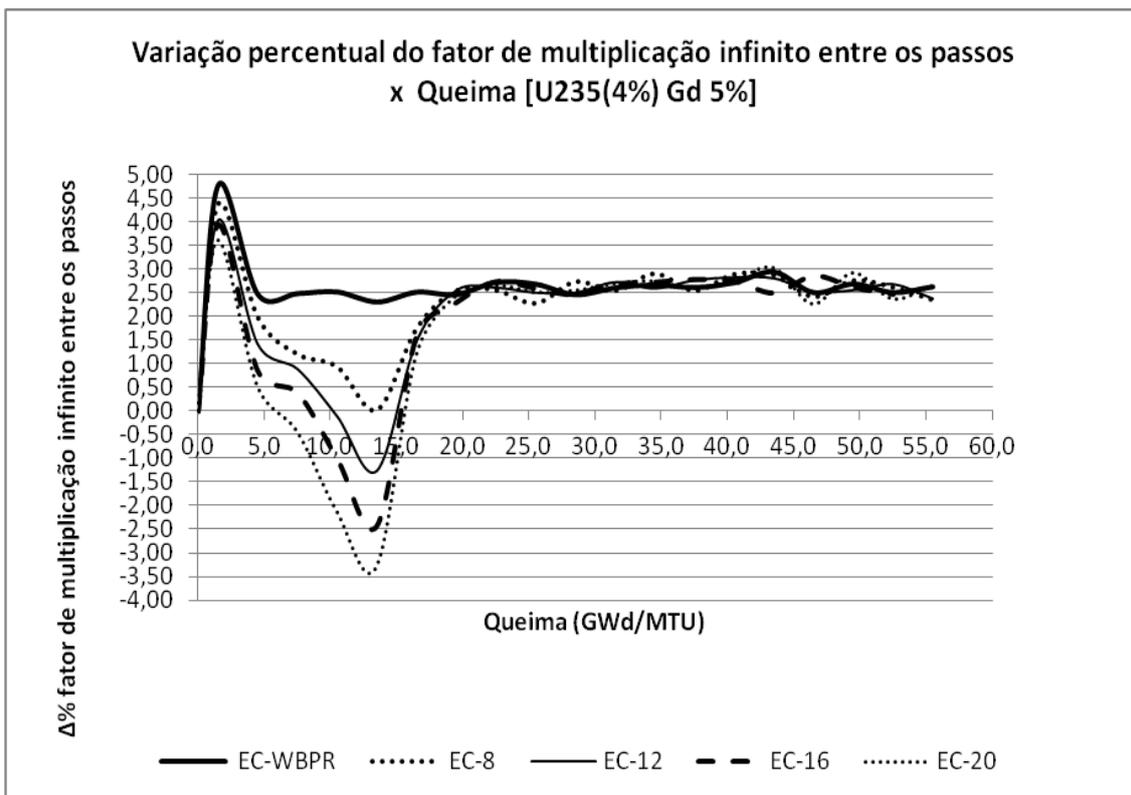


Figura 3.24: Variação percentual do k_{inf} (EC-WBPR, EC-8, EC-12, EC-16, EC-20).

3.4.4.B. COMPARAÇÕES ENTRE OS FLUXOS TÉRMICOS DOS CONJUNTOS 1 e 2 PARA ELEMENTO COMBUSTÍVEL COM 5,0% DE VENENO QUEIMÁVEL

A Figura 3.25 compara os gráficos dos fluxos térmicos dos conjuntos 1 (sem barras de veneno queimável) e 7 (com barras de veneno queimável). De maneira geral as curvas apresentam discrepância bastante acentuada apenas no intervalo de queima de 0,0 a 15,0 GWd/MTU, onde os gráficos que representam os conjuntos 1 possuem fluxo térmico cerca de mais de 3,5 vezes maior que os gráficos dos conjuntos 2.

Todos apresentam comportamentos crescentes e convergentes ao longo do ciclo de queima, e tornam-se paralelos quase coincidentes a partir do intervalo de queima de 15,0 a 20,0 GWd/MTU.

Analisando separadamente os elementos combustíveis, observa-se que as curvas que representam os conjuntos 1 e 2 do EC-8, apresentam diferença apenas no intervalo de

queima de 0,0 a 15,0 GWd/MTU, onde o fluxo térmico do conjunto 2 é muito menor que o conjunto 1. Entretanto, a diferença reduz, haja vista, que ambas curvas são crescentes ao longo da queima e que no intervalo de 15,0 a 20,0 GWd/MTU as curvas tornam-se coincidentes. A partir do intervalo de 20,0 a 25,0 GWd/MTU há uma oscilação entre os fluxos dos conjuntos e no final do ciclo, o fluxo do conjunto 2 é ligeiramente maior que o fluxo do conjunto 1. A diferença inicial é atribuída à presença do veneno queimável.

Em relação às curvas dos conjuntos do EC-12, observa-se que o fluxo térmico do conjunto 1 é cerca de 4,5 vezes maior que o fluxo do conjunto 2, diferença que reduz e a partir da queima 15,0 GWd/MTU as curvas crescem até o final do ciclo de forma paralela.

Os gráficos dos conjuntos do EC-16, são lineares e crescentes, apresentando comportamento bastante semelhante ao EC-12, no entanto, em alguns momentos os gráficos tem pontos de coincidências.

As curvas representantes dos conjuntos 1 e 2 do EC-20, de modo semelhante às demais, possuem diferença acentuada apenas no intervalo de 0,0 a 15,0 GWd/MTU. A partir da queima 20,0 GWd/MTU a diferença entre os fluxos já está bastante minimizada. Os gráficos são lineares, crescentes e a partir da queima 25,0 GWd/MTU são praticamente coincidentes.

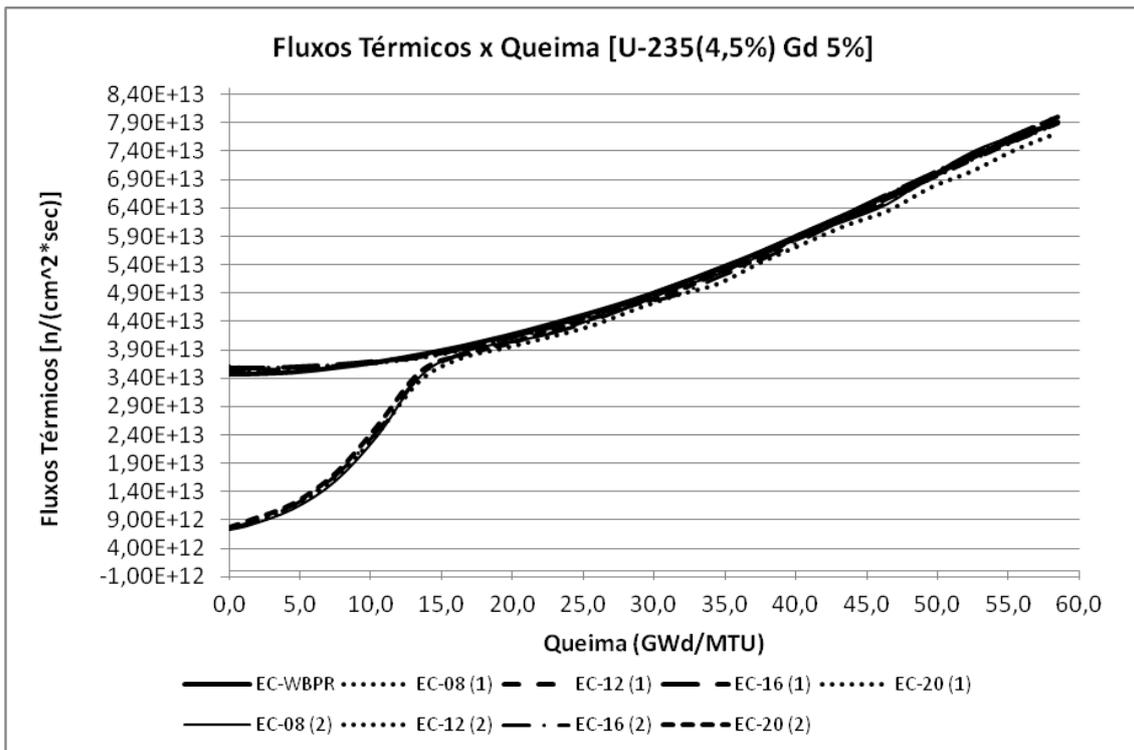


Figura 3.25: Comparação dos fluxos térmicos dos conjuntos 1 e 2 (EC-8, EC-12, EC-16, EC-20).

A Figura 3.26 apresenta a razão dos fluxos térmico e total do elemento combustível sem barras de veneno queimável (EC-WBPR) que servirá como referência e razões dos fluxos térmicos e totais dos conjuntos 2 dos diferentes elementos combustíveis com 08, 12, 16 e 20 barras de veneno queimável respectivamente (EC-8, EC-12, EC-16 e EC-20).

Os gráficos mostram que não há diferença significativa nas razões entre os fluxos que possa ser justificada em virtude da quantidade de barras de veneno queimável. Porque se observa que os elementos combustíveis com diferentes quantidades de barras de veneno queimável possuem o mesmo comportamento no início e no final da queima.

A partir da queima 15,0 GWd/MTU, os gráficos das razões dos fluxos dos elementos combustíveis sem veneno e com veneno mantém uma oscilação muito próxima da coincidência até o final da queima.

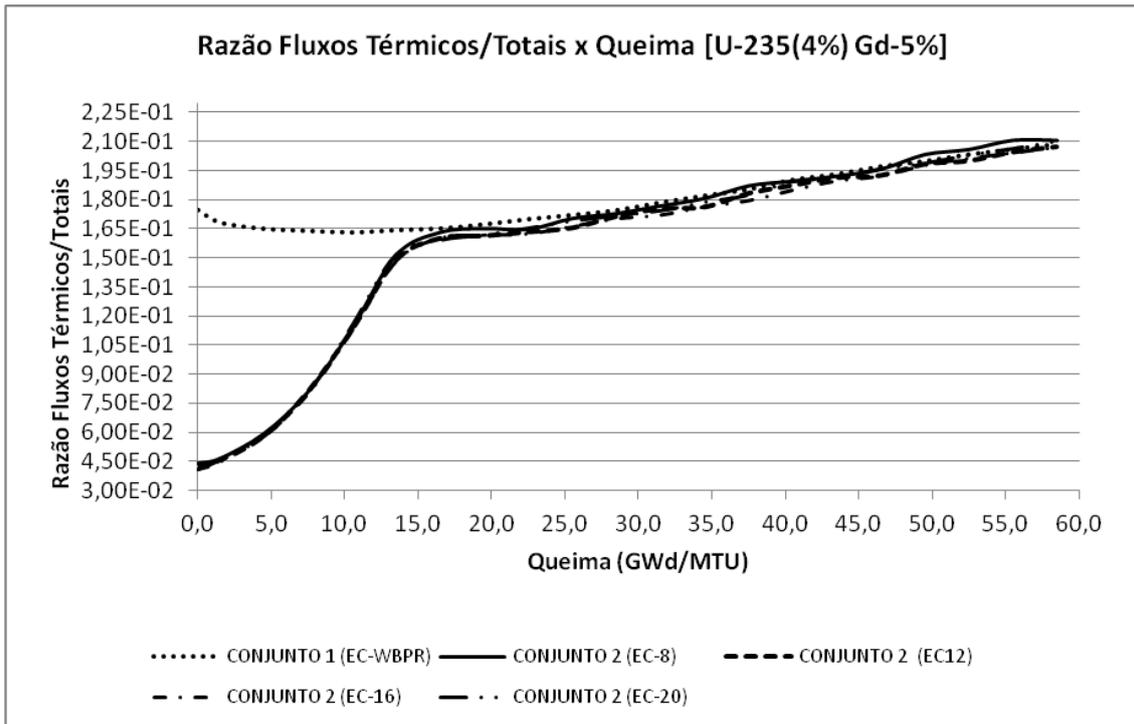


Figura 3.26: Comparação entre razões dos fluxos térmicos/totais do conjunto 1 (EC-WBPR) e dos conjuntos 2 (EC-8, EC-12, EC-16, EC-20).

A Figura 3.27 apresenta uma comparação entre as razões dos fluxos térmicos e totais dos conjuntos 1 e 2 dos elementos combustíveis. Nesta análise os valores foram calculados utilizando a Equação 3.12. No início da queima, observa-se que os valores dos conjuntos 1 são aproximadamente 70,0% maiores que os valores dos conjuntos 2. As configurações de todos os elementos combustíveis apresentam uma redução acentuada no intervalo de 0,0 a 15,0 GWd/MTU.

A curva do EC-8 mostra que a razão do fluxo térmico e total do conjunto 1 é cerca de 75,0% maior que o conjunto 2, no intervalo de 0,0 a 15,0 GWd/MTU, o que significa que o conjunto 1 tem um espectro de nêutrons menos endurecido. Entretanto, esta diferença é reduzida a valores próximo de 0,0% a partir da queima de 15,0 GWd/MTU. No intervalo de 15,0 a 35,0 GWd/MTU a diferença percentual oscila no intervalo de 0,0 a 5,0% e a partir do ponto próximo a 35,0 GWd/MTU, a variação percentual oscilou na faixa de -5,0% a 0,0%.

A curva que representa o EC-12 e EC-16 tem comportamento semelhante ao EC-8, entretanto, em nenhum momento a variação percentual atingiu pontos negativos e

oscilou dentro do intervalo de 0,0 a 5,0%, isto pode significar que houve uma sincronia na cinética de queima dos conjuntos 1 e 2.

O EC-20 possui comportamento análogo aos demais elementos combustíveis, entretanto, a partir da queima 40,0 GWd/MTU e até o final do ciclo a variação percentual tornou-se negativa. Este fato pode ser atribuído à economia de nêutrons ocorrido no conjunto 2, durante a primeira metade do ciclo, o que não houve no conjunto 1, quando o espectro de nêutrons estava menos endurecido.

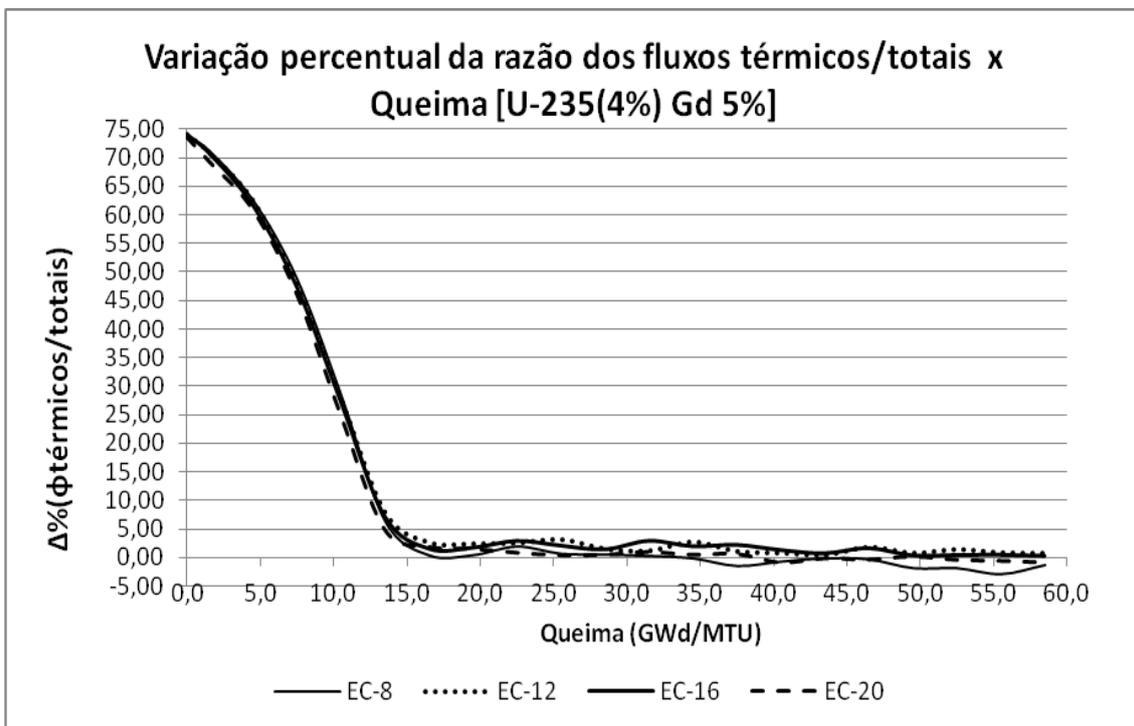


Figura 3.27: Variação percentual da razão dos fluxos térmicos/totais dos conjuntos 1 e 2. (EC-8, EC-12, EC-16, EC-20).

3.4.5. COMPARAÇÕES ENTRE OS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS COM 2,0% E 5,0% DE GADOLÍNIO

Em conformidade com a metodologia adotada até este ponto, este tópico está dividido em subtópicos, apresentando comparações no que tange aos valores do fator de multiplicação infinito (k_{inf}), variação percentual do k_{inf} , razão entre os fluxos térmicos e

totais dos Elementos Combustíveis (EC) com 2,0% e 5,0% de veneno queimável, bem como sua variação percentual.

A variação percentual utilizada para k_{inf} e a razão entre os fluxos térmicos e totais dos EC é realizada utilizando a Equação 3.4.

Em relação à razão entre os fluxos térmicos e totais, bem como sua variação percentual descrito no subtópico 3.4.5.B, é importante lembrar que está sendo considerado apenas conjuntos de barras de combustíveis contendo veneno queimável, devidamente identificado como C2.

3.4.5.A. VALORES DO FATOR DE MULTIPLICAÇÃO INFINITO

A Figura 3.28 apresenta uma comparação entre os valores do fator de multiplicação infinito dos elementos combustíveis simulados, elemento combustível sem barras de veneno queimável (EC-WBPR), elemento combustível com 08 (EC-8), 12 (EC-12), 16 (EC-16) e 20 (EC-20) barras de veneno queimável, respectivamente com 2,0% e 5,0% de gadolínio.

Como esperado, o elemento combustível sem barras de veneno queimável possui o maior fator de multiplicação infinito no início da queima e o elemento combustível que possui 20 barras de veneno queimável com 5,0% de gadolínio, possui o menor valor, mostrando, assim, a interferência do veneno queimável no controle da população de nêutrons. No intervalo de 10,0 a 15,0 GWd/MTU todos os gráficos estão convergindo para um valor comum do k_{inf} e em seguida continua decrescendo de forma igual, visto que todos os gráficos tornam-se coincidentes.

Analisando de forma mais detalhada as curvas da Figura 3.28, observa-se que o EC-8 (Gd-2%), afasta-se menos da curva EC-WBPR que o EC-8 (Gd-5%), no intervalo de 0,0 a 15,0 GWd/MTU.

A curva do EC-12 (Gd-2%) em relação à curva do EC-12 (Gd-5%) são quase paralelas, no intervalo de 0,0 a 15,0 GWd/MTU.

A curva do EC-16 (Gd-2%) no intervalo de 0,0 a 10,0 GWd/MTU, possui forma de parábola com a concavidade voltada para baixo, em contrapartida a curva que representa o EC-16 (Gd-5%), possui a concavidade voltada para cima. Desse modo observa-se ainda que, o ponto de máximo de EC-16 (Gd-2%) está no mesmo intervalo de queima do ponto de mínimo de EC-16 (Gd-5%).

A curva do EC-20 (Gd-2%) no intervalo de 5,0 a 10,0 GWd/MTU aproxima da curva referência (EC-WBPR), fato que ocorre com a curva do EC-20 (Gd-5%) apenas no intervalo de 10,0 a 15,0 GWd/MTU.

Finalmente, através da análise da Figura 3.28 chega-se a conclusão que a maior relevância na diferença existente entre os valores do k_{inf} no intervalo de 0,0 a 15,0 GWd/MTU se deve ao percentual de veneno queimável que cada EC possui.

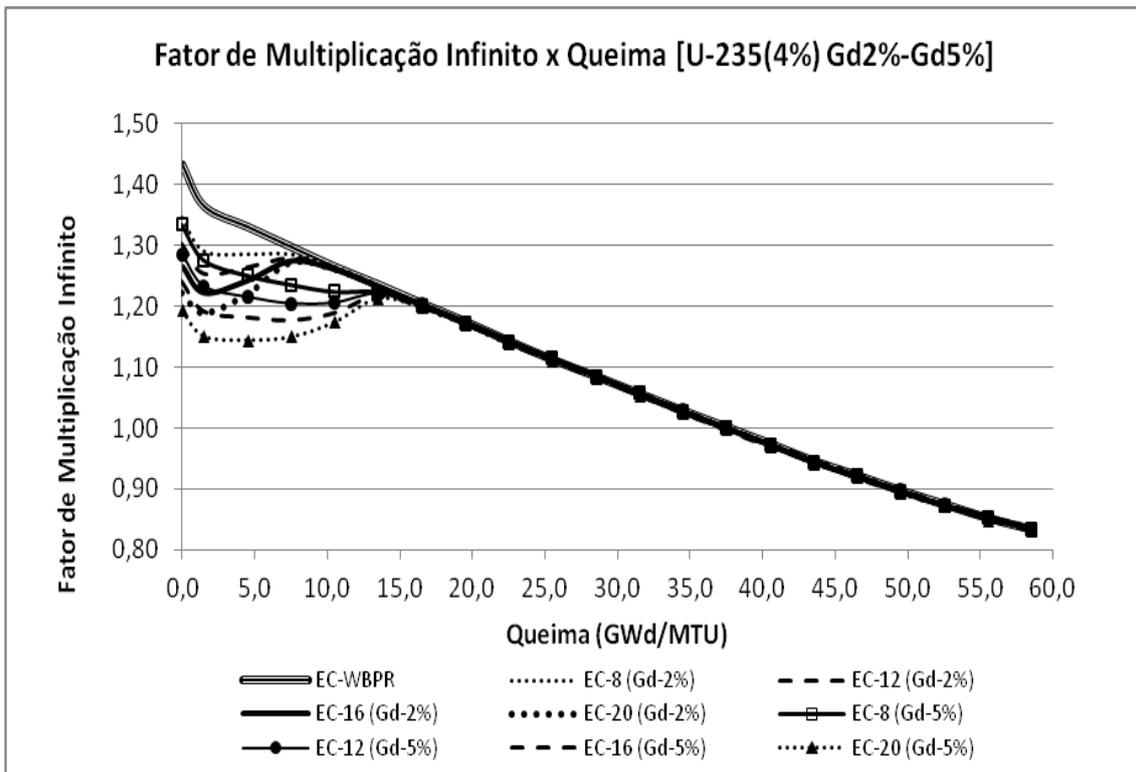


Figura 3.28: Comparação dos valores do fator de multiplicação infinito dos elementos combustíveis com 2,0% e 5,0% de veneno queimável.

A Figura 3.29 mostra a diferença em nível percentual do k_{inf} , comparando os EC correspondentes contendo 2,0% e 5,0% de gadolínio, desse modo observa-se que todos

os gráficos no intervalo de 0,0 a 15,0 GWd/MTU possuem formas de parábolas com a concavidade voltada para baixo. Os pontos máximos de cada parábola estão no intervalo de 5,0 a 10,0 GWd/MTU, onde o menor ponto máximo é do EC-8 (Gd 2%) em relação ao EC-8 (Gd 5%), no intervalo de 3,0 a 4,0% e o maior é do EC-20 (Gd 2%) em relação ao EC-20 (Gd 5%), no intervalo de 9,0 a 10,0%. O EC-12 (Gd 2%) em relação ao EC-12 (Gd 5%) está no intervalo de 5,0 a 6,0% e o EC-16 (Gd 2%) EC-16 (Gd 5%) no intervalo de 7,0 a 8,0%.

Esta avaliação em nível percentual proporciona uma análise quantitativa da interferência do veneno queimável nos EC, o que ocorre principalmente no início do ciclo de queima (0,0 a 15,0 GWd/MTU), pois a partir de 15,0 GWd/MTU a variação percentual oscila entre valores ligeiramente negativos e positivos próximos de 0,0%, não atingindo a barreira de -1,0% e nem a de +1,0%.

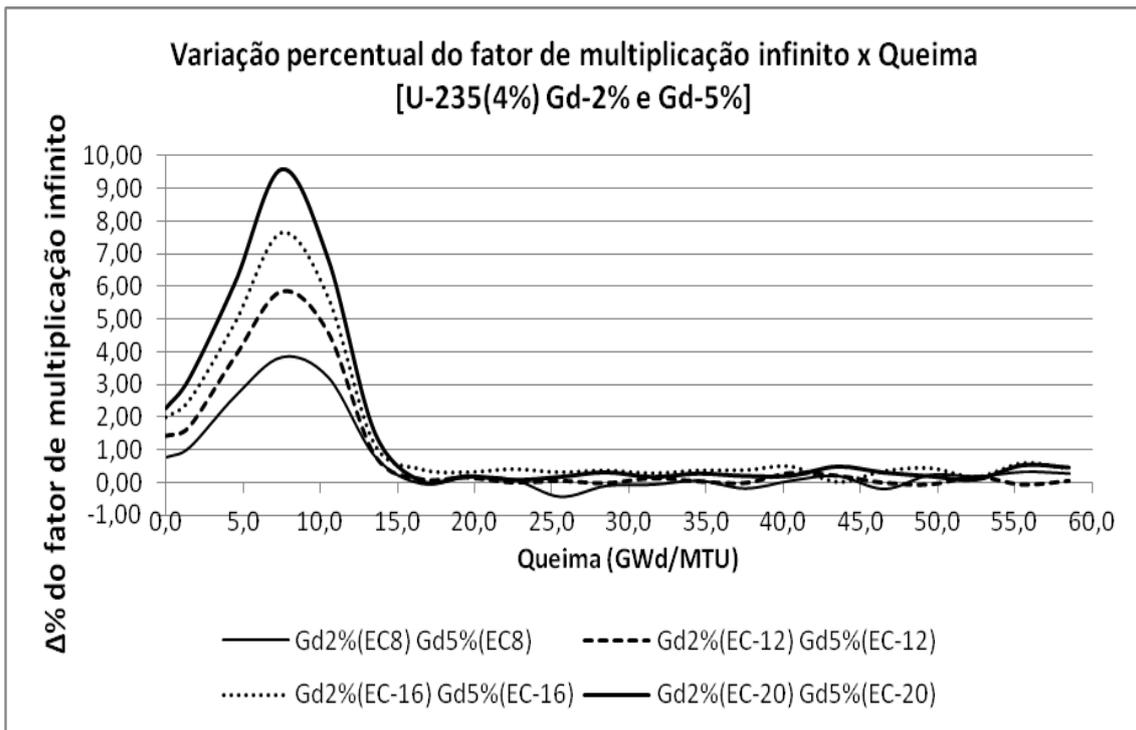


Figura 3.29: Comparação da variação percentual do fator de multiplicação infinito entre os elementos combustíveis com 2,0% e 5,0% de veneno queimável.

3.4.5.B. RAZÕES ENTRE OS FLUXOS TÉRMICOS E TOTAIS DOS CONJUNTOS DE BARRAS DE COMBUSTÍVEIS CONTENDO VENENO QUEIMÁVEL

A Figura 3.30 apresenta a comparação das razões dos fluxos térmicos e totais dos conjuntos 2 dos elementos combustíveis contendo 2,0% e 5,0% de veneno queimável, além de mostrar a curva do EC-WBPR.

Observa-se que as curvas dos EC com 2,0% de gadolínio apresentam uma razão entre os fluxos térmicos e totais maiores que os EC com 5,0% de gadolínio, no intervalo de queima de 0,0 a 15,0 GWd/MTU, pois a partir desta queima todas as curvas se aproximam mantendo pequenas oscilações até o final do ciclo.

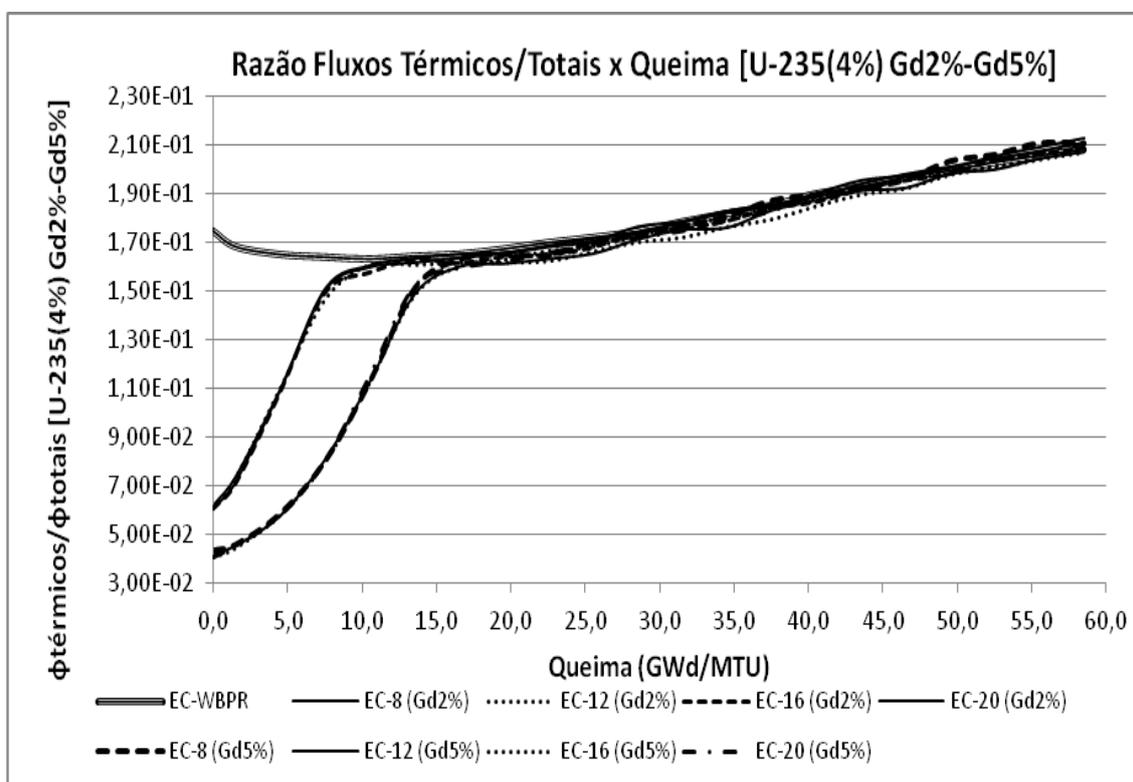


Figura 3.30: Comparação entre a razão dos fluxos térmicos/totais dos elementos combustíveis com 2,0% e 5,0% de veneno queimável.

A Figura 3.31 apresenta esta comparação em nível percentual afim de proporcionar uma análise de forma quantitativa. Os valores obtidos no gráfico, são resultados da aplicação da Equação 3.13, onde R_{Gd2} e R_{Gd5} significam as razões entre os fluxos térmicos e totais do gadolínio a 2% e 5% respectivamente.

$$\Delta\Phi = \left(\frac{R_{Gd2} - R_{Gd5}}{R_{Gd2}} \right) \cdot 100 \quad (3.13)$$

Desse modo, observa-se que os EC com 2,0% possuem maior razão percentual que os EC com 5,0% e que as curvas tem forma de parábola com a concavidade voltada para baixo, possuindo o ponto máximo com coordenadas próximo de 5,0 GWd/MTU e intervalo de 45,0 a 50,0%. A partir deste ponto, a diferença percentual entre os EC começa a diminuir e próximo da queima 15,0 GWd/MTU atinge valores próximos de 0,0% , oscilando dentro do intervalo de 0,0 a 5,0%, até o final do ciclo, entretanto, há alguns pontos em que a diferença percentual torna-se negativa.

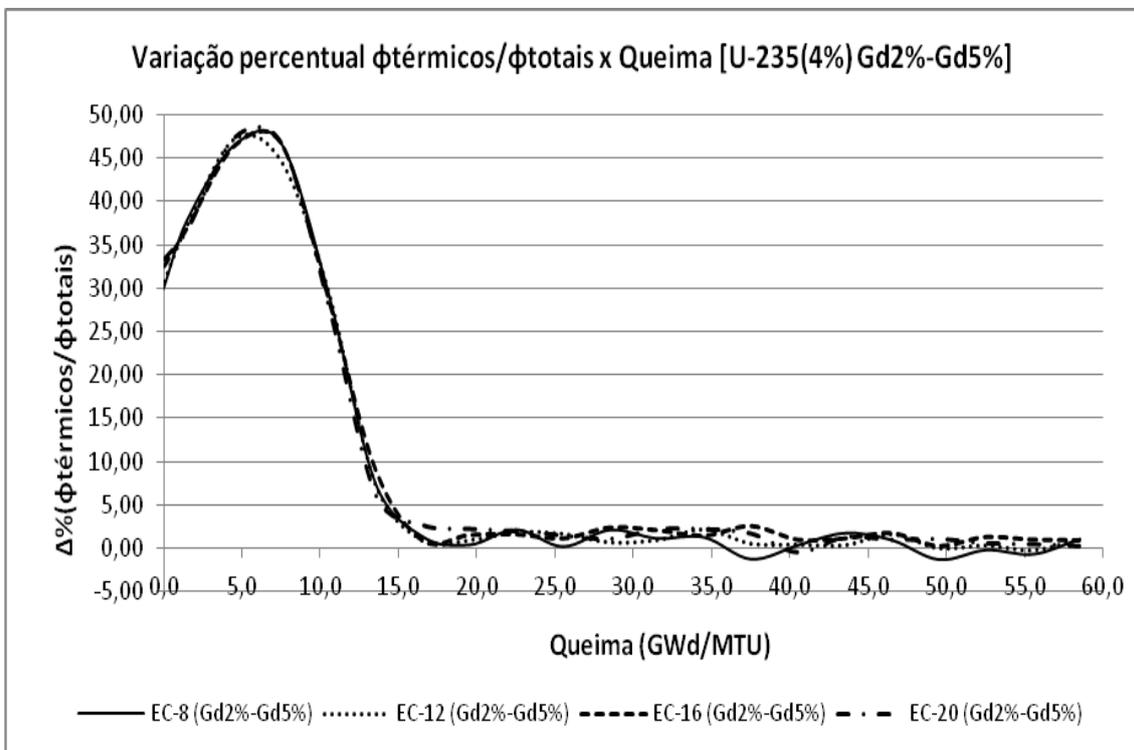


Figura 3.31: Comparação percentual da razão entre os fluxos térmicos/totais dos elementos combustíveis com 2,0% e 5,0% de veneno queimável.

3.5. ANÁLISE DA REATIVIDADE

Utilizando o código SCALE 6.0, através do módulo TRITON, os resultados da reatividade e do coeficiente de reatividade do elemento combustível sem veneno queimável, EC-SBVQ (referência) e dos elementos combustíveis com 2,0% e 5,0% de

Gd com as variações de 08, 12, 16 e 20 barras de veneno queimável, identificados respectivamente como EC-8, EC-12, EC-16 e EC-20, foram analisados para uma queima de 60,0 GWd/MTU e são representados pelas Figuras 3.32, 3.33, 3.34 e 3.35. Após as análises individualizadas foram realizadas comparações entre as variações das reatividades dos elementos combustíveis com 2,0% e 5,0% de Gd, utilizando a Equação 3.12 modificada, representadas graficamente na Figura 3.36.

O elemento combustível sem barras de veneno queimável foi tomado como referência para ambos os casos (elemento combustível com inserção de 2,0% e 5,0% de Gd).

A variação do fator de multiplicação (Δk) foi realizada de acordo com [WAGNER & SANDERS, 2002], utilizando a Equação 3.12, onde k_2 representa o fator de multiplicação com veneno queimável e k_1 o fator de multiplicação sem barras de veneno queimável,

$$\Delta k = k_2 - k_1 \quad (3.12)$$

Conforme [DUDERSTADT & HAMILTON, 1976] cálculo da reatividade (ρ) é realizado em função do fator de multiplicação (k), de acordo com a equação,

$$\rho(t) = \frac{k(t) - 1}{k(t)} \quad (3.13)$$

A variação da reatividade ($\Delta\rho$) é uma grandeza adimensional definida matematicamente pela equação,

$$\Delta\rho(\text{pcm}) = \left(\frac{k_2 - k_1}{k_2 \cdot k_1} \right) \cdot 10^5 \quad (3.14)$$

3.5.1. ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS COM 2,0% DE GADOLÍNIO

A Figura 3.32 mostra curvas da variação do fator de multiplicação (Δk) dos elementos combustíveis EC-8, EC-12, EC-16 e EC-20. É importante destacar que todos os gráficos dos elementos combustíveis apresentam Δk negativa no início do ciclo e ao longo da queima o valor da Δk de aumenta, atingindo valores próximos de zero e alguns valores ligeiramente maiores que zero.

Analisando o gráfico do EC-8, observa-se que este possui a maior variação do fator de multiplicação dentre os elementos combustíveis estudados, ainda assim, valor inicial negativo próximo de -0,10. Durante toda a queima a Δk do elemento permanece negativa, havendo algumas exceções na queima próximo de 22,50 GWd/MTU, 31,50 GWd/MTU, 49,50 GWd/MTU, 55,50 GWd/MTU e 58,50 GWd/MTU.

O gráfico que representa a reatividade do EC-12 possui a segunda maior variação do fator de multiplicação no início do ciclo, ligeiramente acima de -0,15. Durante praticamente toda a queima a Δk permanece negativa, entretanto, observa-se que neste caso há uma maior incidência de Δk positiva em comparação com gráfico do EC-8, evento que ocorre primeiramente na queima em torno de 25,50 GWd/MTU e alterna Δk negativa e positiva até o final do ciclo, totalizando nove pontos onde a variação do fator de multiplicação é positiva.

O gráfico que representa a reatividade do EC-16 possui a segunda menor variação do fator de multiplicação no início do ciclo, com valor ligeiramente abaixo de -0,15. Durante praticamente toda a queima a Δk permanece negativa, entretanto, observa-se que neste caso a incidência de Δk positiva é igual a do EC-8, ou seja, com cinco pontos durante toda a queima. A primeira Δk positiva ocorre no mesmo ponto da primeira incidência do EC-8, isto é, queima próximo de 22,50 GWd/MTU.

O gráfico que representa a reatividade do EC-20 possui a menor variação do fator de multiplicação no início do ciclo, com valor ligeiramente abaixo de -0,20. Durante praticamente toda a queima a reatividade permanece negativa, entretanto, observa-se que neste caso há uma incidência de Δk positiva de seis pontos, tendo a primeira

aparição na queima próximo de 25,50 GWd/MTU igualmente à do EC-12 , Os outros pontos de Δk positiva estão próximos da queima 43,50 GWd/MTU, 46,50 GWd/MTU, 55,50 GWd/MTU e 58,50 GWd/MTU, sendo que nestes dois últimos pontos a variação do fator de multiplicação positiva permanece constante.

É inegável que a variação do fator de multiplicação negativa no início do ciclo se deve à presença do veneno queimável e nesta análise pode-se concluir que a diferença na Δk inicial e final está vinculada à quantidade de barras de veneno queimável que cada elemento combustível possui, pois à medida que o veneno é consumido todos os gráficos demonstraram um comportamento crescente na Δk tornando-a positiva no final do ciclo.

O elemento combustível EC-8, apresentou a maior variação do fator de multiplicação positiva no final do ciclo, enquanto que o elemento combustível EC-12, apresentou a menor. O elemento combustível EC-20, possui a segunda maior variação do fator de multiplicação positiva no final do ciclo.

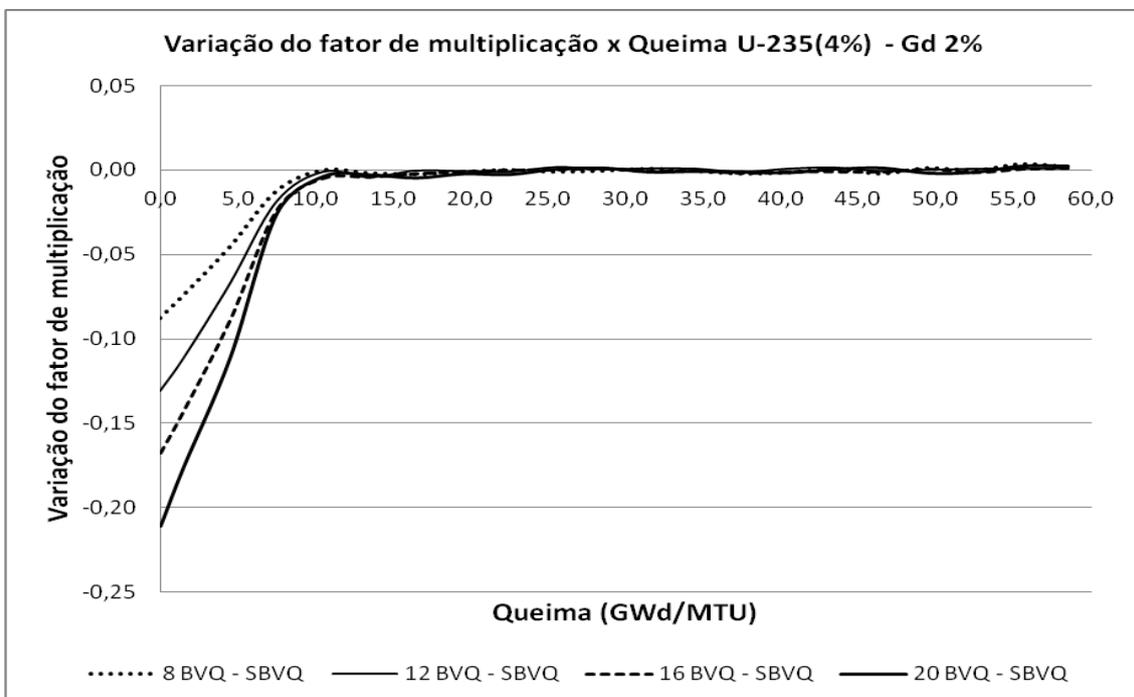


Figura 3.32: Variação do fator de multiplicação entre os EC com 2,0% de Gd.

A Figura 3.33 apresenta a comparação dos coeficientes de reatividade dos elementos combustíveis EC-8, EC-12, EC-16, EC-20. Nesta figura se observa que a maioria dos

coeficientes estão negativos ou próximo de zero. O elemento combustível com menor número de barras de veneno queimável (EC-8) possui o maior coeficiente de reatividade, enquanto que, o elemento combustível com o maior número de barras de veneno queimável (EC-20), possui o menor coeficiente de reatividade. A diferença no valor do coeficiente de reatividade é acentuada no intervalo de 0,0 GWd/MTU a 10,0 GWd/MTU, pois acima deste intervalo a diferença entre os gráficos é praticamente inexistente.

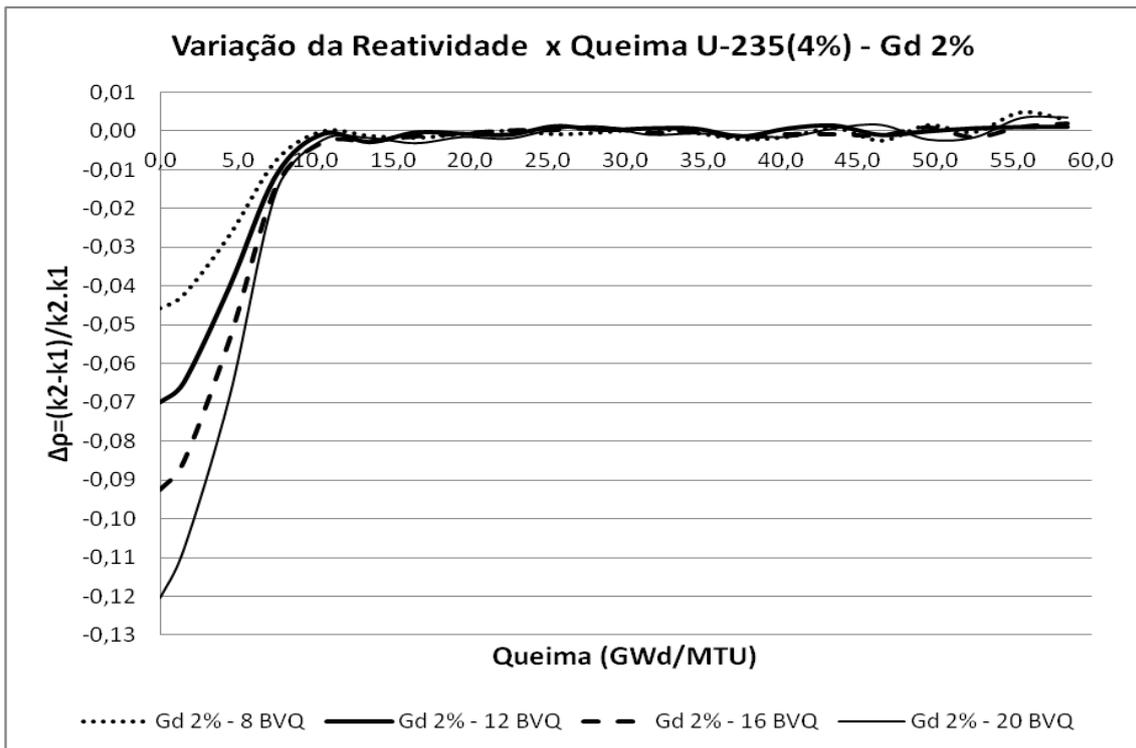


Figura 3.33: Variação da reatividade dos EC com 2,0% de Gd.

3.5.2. ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS COM 5,0% DE VENENO QUEIMÁVEL

A Figura 3.34 mostra gráficos da variação do fator de multiplicação (Δk) dos elementos combustíveis EC-8, EC-12, EC-16 e EC-20, que possuem 5,0% de veneno queimável. Os gráficos dos elementos combustíveis apresentam Δk negativa no início do ciclo e ao longo da queima ela aumenta atingindo valores próximos de zero e até mesmo valores ligeiramente maiores que zero.

O gráfico do EC-8, mostra a maior variação do fator de multiplicação dentre os elementos combustíveis estudados, com valor inicial próximo de -0,10. Durante a queima a Δk permanece negativa, havendo algumas exceções na queima próximo de 25,50 GWd/MTU a 28,50 GWd/MTU e na queima de 55,50 GWd/MTU.

O gráfico do EC-12 apresenta a segunda maior variação do fator de multiplicação no início do ciclo, com valor bastante próximo de -0,15. Durante a queima a Δk permanece negativa, entretanto, observa-se que neste caso há uma maior incidência de Δk positiva em comparação ao gráfico do EC-8, evento que ocorre primeiramente na queima 25,50 GWd/MTU a 28,50 GWd/MTU, na queima 34,50 GWd/MTU, na queima 49,50 GWd/MTU, na queima 55,50 GWd/MTU e finalmente na queima 58,50 GWd/MTU, totalizando seis pontos de variação do fator de multiplicação positiva.

O gráfico do EC-16 possui a segunda menor variação do fator de multiplicação no início do ciclo, com valor próximo de -0,20 e mostra a reatividade que permanece sempre negativa.

O gráfico do EC-20 possui a menor variação do fator de multiplicação no início do ciclo, com valor bem próximo de -0,25. De forma análoga ao EC-16, a Δk permanece negativa durante a queima.

Sem dúvida a variação do fator de multiplicação no início do ciclo se deve à presença do veneno queimável e nesta análise pode-se concluir que a diferença na Δk inicial e final está vinculada à quantidade de barras de veneno queimável que cada elemento combustível possui, pois à medida que o veneno é consumido todos os gráficos demonstraram um comportamento crescente na Δk , sendo que os elementos combustíveis EC-16 e EC-20 em nenhum momento apresentaram Δk positiva, apesar dos valores ficarem bem próximos de zero, principalmente o EC-16, no entanto, não alcançaram o zero.

O elemento combustível EC-12, apresentou a maior variação do fator de multiplicação positiva no final do ciclo e o elemento combustível EC-8 a menor Δk positiva no final do ciclo.

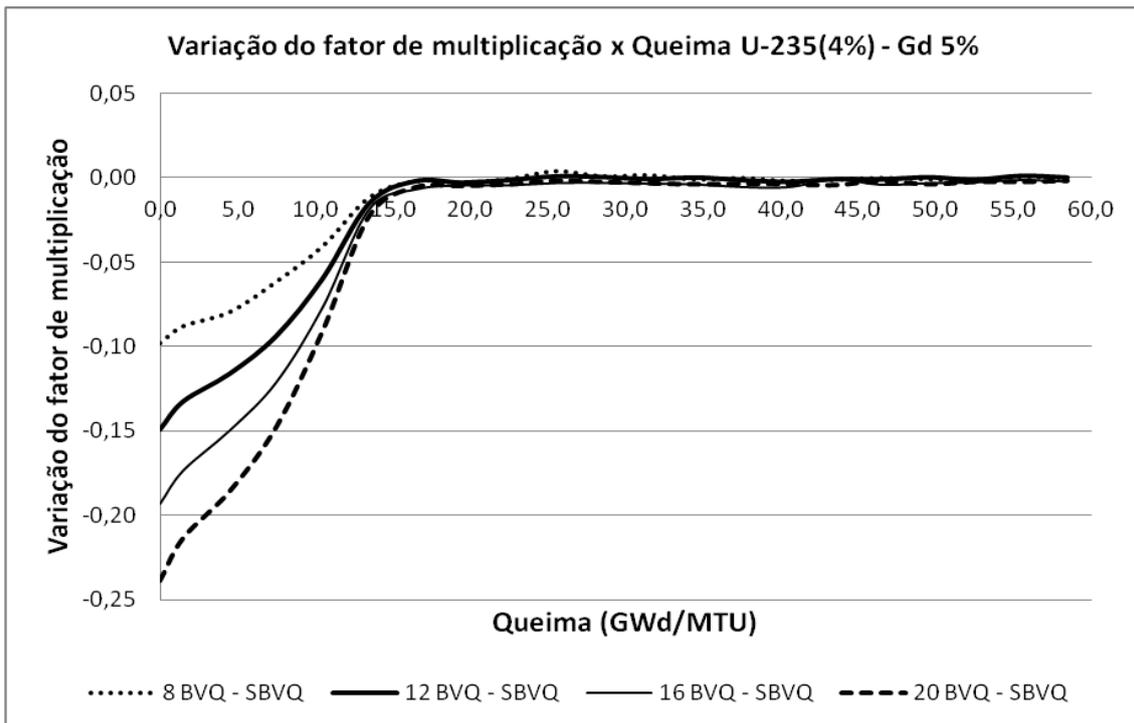


Figura 3.34: Variação do fator de multiplicação dos EC com 5,0% de Gd.

A Figura 3.35 apresenta a comparação dos coeficientes de reatividade dos elementos combustíveis EC-8, EC-12, EC-16, EC-20. Observa-se que a maioria dos coeficientes estão negativos ou próximo de zero, comportamento bastante semelhante com os estudos realizados por [WAGNER & SANDERS, 2002].

O elemento combustível com menor número de barras de veneno queimável (EC-8) possui o maior coeficiente de reatividade, enquanto que, o elemento combustível com o maior número de barras de veneno queimável (EC-20), possui o menor coeficiente de reatividade. A diferença no valor do coeficiente de reatividade é acentuada no intervalo de 0,0 GWd/MTU a 16,50 GWd/MTU, pois acima deste intervalo a diferença entre os gráficos são oscilações paralelas ao eixo da queima.

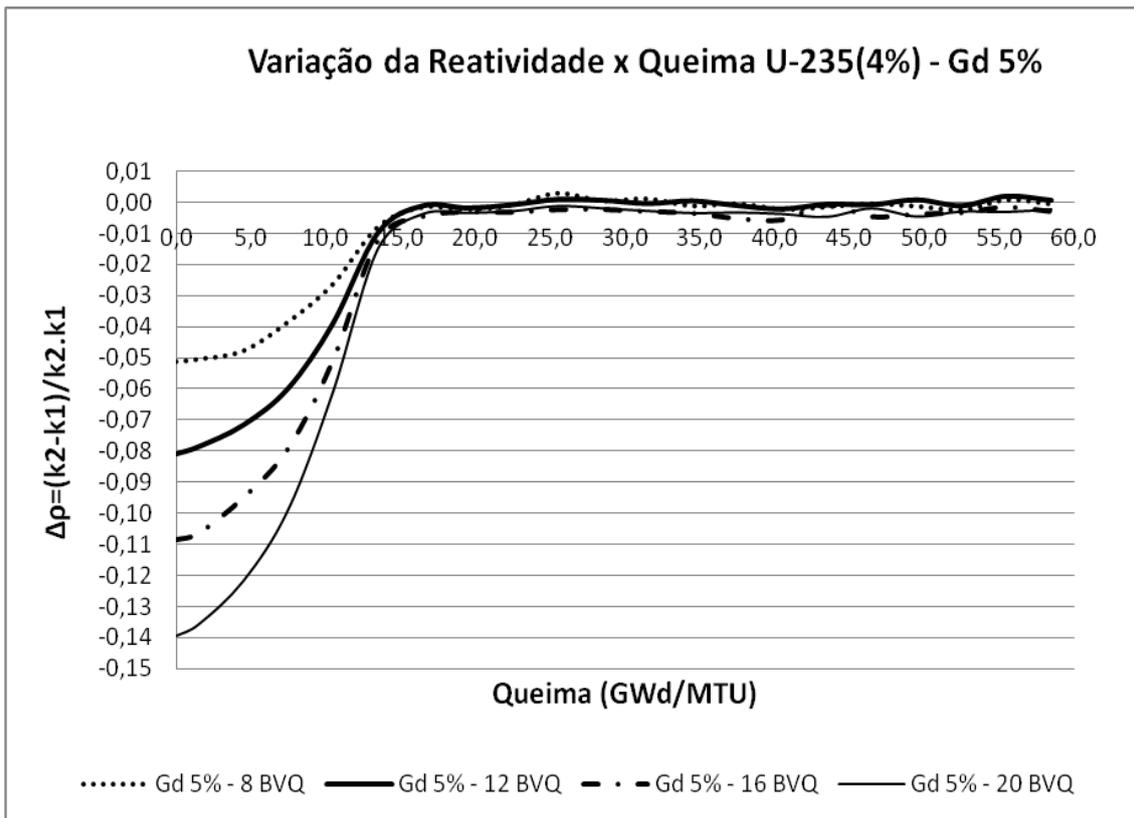


Figura 3.35: Variação da reatividade dos EC com 5,0% de Gd.

3.5.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DO FATOR DE MULTIPLICAÇÃO DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS COM 2,0% E 5,0% DE VENENO QUEIMÁVEL.

A Figura 3.36 apresenta uma comparação entre as variações dos valores do fator de multiplicação dos elementos combustíveis com 2,0% de veneno com os elementos combustíveis com 5,0% de veneno, cujos valores são calculados através da Equação 3.12, onde o fator de multiplicação (k_2) representa os elementos combustíveis com 5,0% de Gadolínio e (k_1) os elementos combustíveis com 2,0% de Gadolínio.

A Figura 3.36 mostra quatro parábolas que apresentam comportamentos semelhantes, pois possuem a concavidade voltada para cima, ou seja, apresentam pontos de mínimo e os vértices possuem abscissas no intervalo entre 5,0 a 10,0 GWd/MTU. A partir do vértice começam a ter comportamento crescente e próximo da queima de 15,0 GWd/MTU perdem a forma de parábola e passam a oscilar com valores próximos de

zero até o final da queima, e em alguns casos atingem valores ligeiramente maiores que zero.

A parábola (1) tem o seu menor valor no eixo de variação dos valores do fator de multiplicação (Δk) no intervalo de -0,05 a -0,04 e apresenta alguns valores ligeiramente maiores que zero. A parábola (2) possui o vértice com ordenada entre os valores -0,08 a -0,07 e também apresenta alguns valores ligeiramente maiores que zero. A parábola (3) possui o vértice com ordenada entre os valores -0,10 a -0,09 e não possui nenhum valor acima de zero. A única diferença significativa que a parábola (4) apresenta em relação à parábola (3) é que o valor da ordenada de seu vértice está entre -0,13, a -0,12.

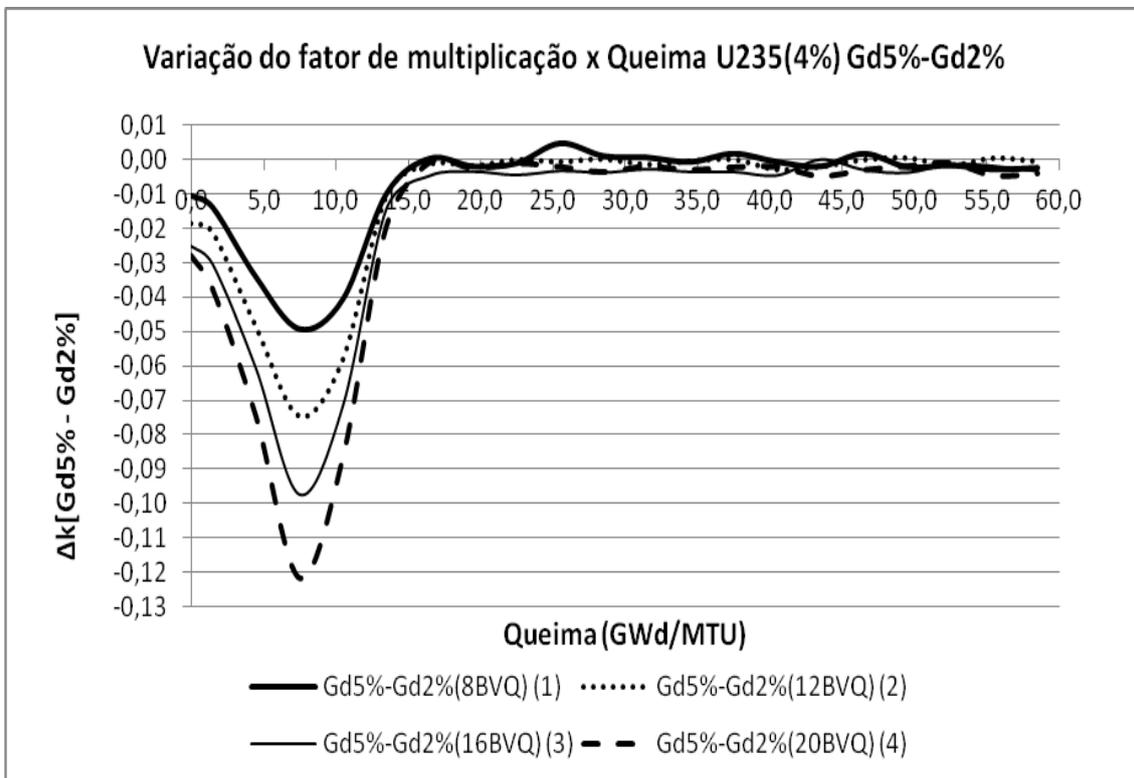


Figura 3.36: Comparação da variação do fator de multiplicação dos EC com 2,0% e 5,0% de Gd.

Capítulo 4 – ESTUDOS REALIZADOS E RESULTADOS – NÚCLEO DE ANGRA II

Como consequência dos estudos, resultados e experiência adquiridos através das simulações com o sistema de código SCALE 6.0, módulo TRITON na análise da sensibilidade neutrônica do elemento combustível (caso 15) do *benchmark*, resolveu-se, ampliar os estudos aplicando a metodologia ao núcleo do reator de Angra II.

Este estudo consiste em analisar o comportamento do fator de multiplicação efetivo (k_{eff}), a razão entre os fluxos térmico e total, variações entre os passos do k_{eff} e comparações entre os resultados.

4.1. SIMULAÇÃO DO NÚCLEO DE ANGRA II – USANDO O SISTEMA DE CÓDIGO SCALE 6.0 (MÓDULO TRITON)

Foi realizada a modelagem do núcleo de Angra II, que possui 193 elementos combustíveis arranjados em conjuntos de 16 x 16 varetas. As figuras de 4.1 a 4.5 representam, respectivamente, a célula do combustível, a célula do tubo guia sem absorvedores, o elemento combustível contendo 20 tubos guias e 08 barras de absorvedores, o elemento combustível contendo 20 tubos guias e 12 barras de absorvedores e o núcleo do reator. Os principais parâmetros do núcleo do reator de Angra-II são apresentados na Tabela 4.1.

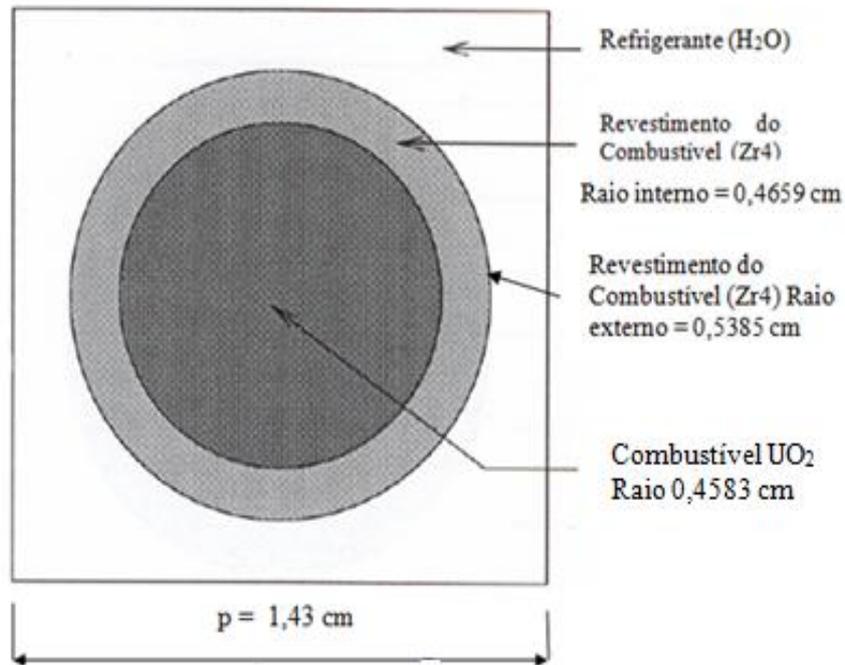


Figura 4.1: Célula do combustível [ELETRONUCLEAR, 1999].

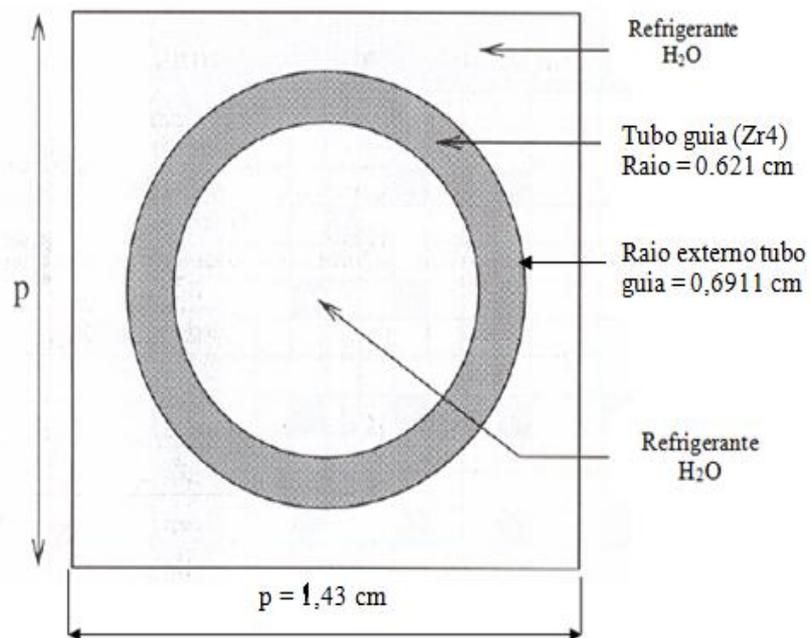


Figura 4.2: Célula do tubo guia sem absorvedores [ELETRONUCLEAR, 1999].

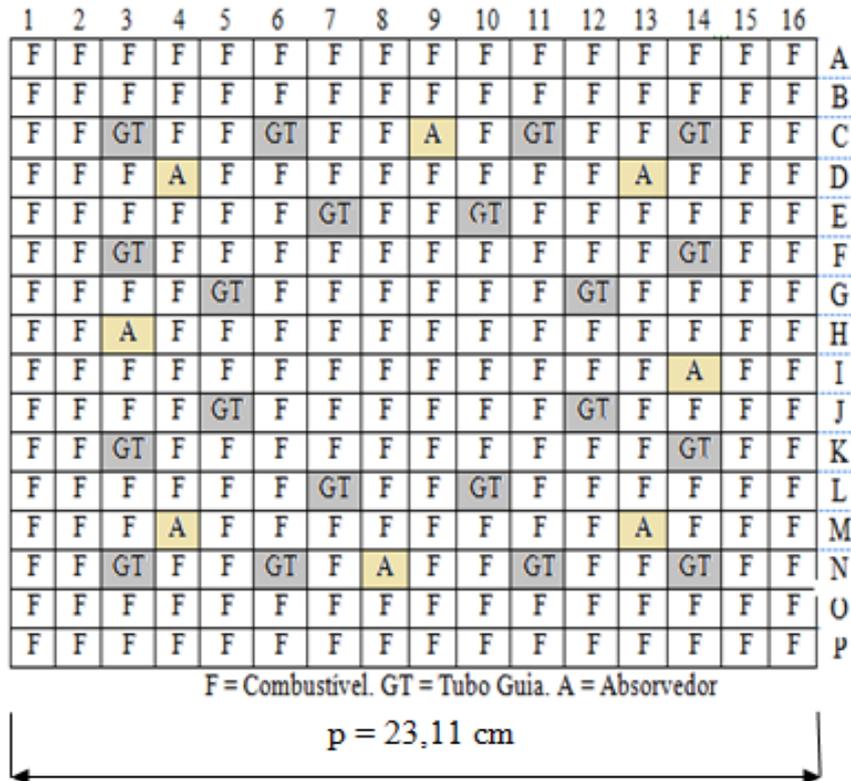


Figura 4.3: Elemento combustível com 20 Tubos Guia e 08 Absorvedores [ELETRONUCLEAR, 1999].

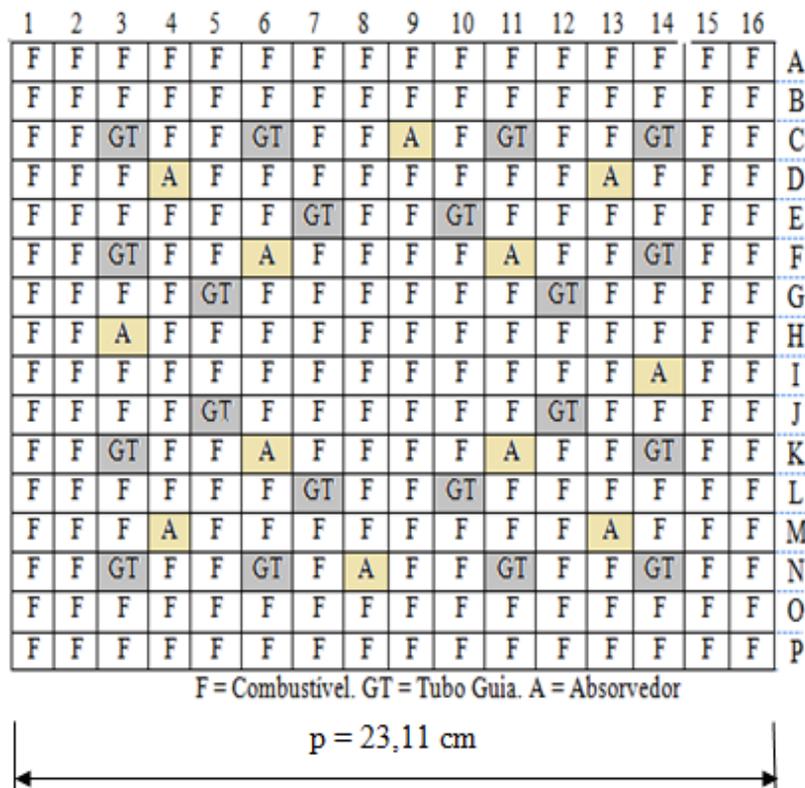
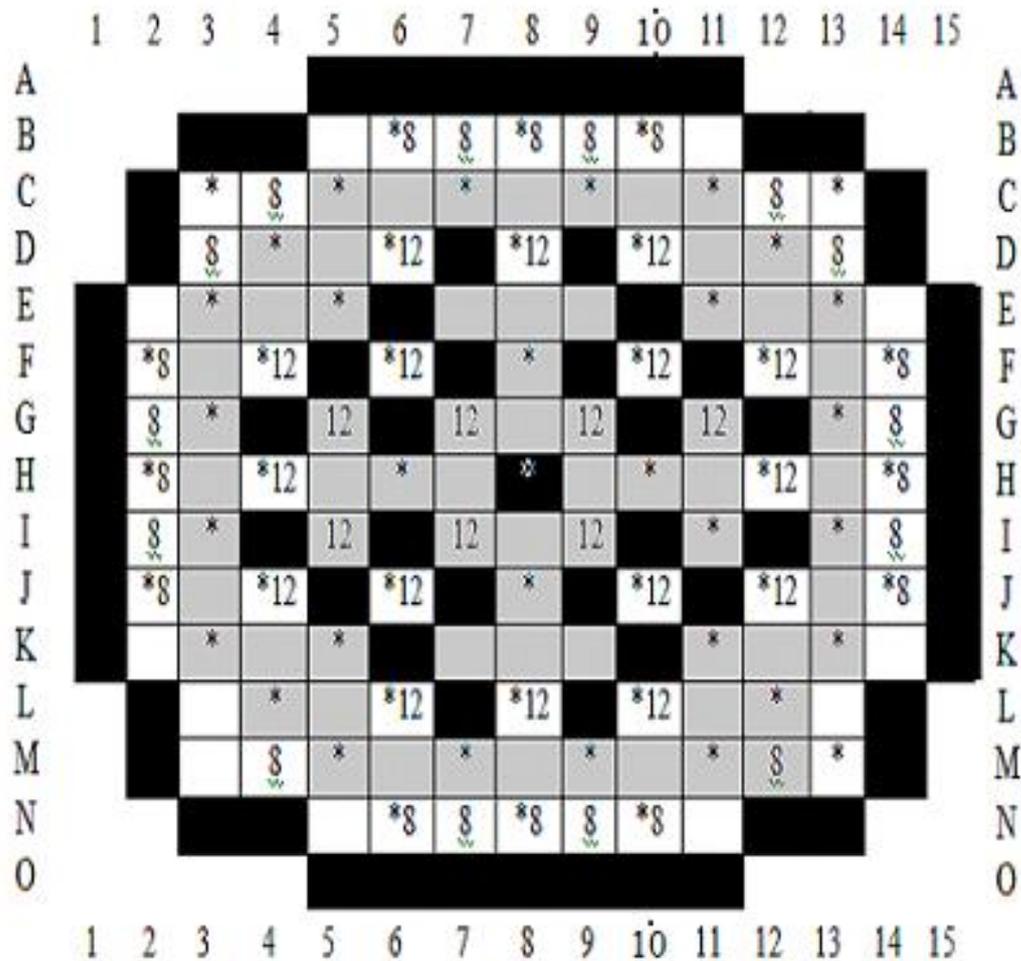


Figura 4.4: Elemento combustível com 20 Tubos Guia e 12 Absorvedores [ELETRONUCLEAR, 1999].



LEGENDA: Figuras 4.3 e 4.4

F	Combustível
A	08 ou 12 Absorvedores
GT	20 Tubos Guias

LEGENDA: Núcleo do reator de Angra II

	U-235 - 1,9%	69 conjuntos de combustíveis
	U-235 - 2,5%	68 conjuntos de combustíveis
	U-235 - 3,2%	56 conjuntos de combustíveis

	08 ou 12	Conjuntos de combustíveis com 08 ou 12 barras de absorvedores
	*	61 conjuntos de combustíveis com conjunto de controle

Figura 4.5: Núcleo do reator de Angra II com 193 elementos combustíveis e as respectivas legendas

Tabela 4.1 - Parâmetros do núcleo de Angra II

Parâmetros	Potência zero (cm)	Potência Total 33,0 GWd/MTU (cm)
Comprimento ativo da Barra do Combustível	390,0	391,6
Comprimento ativo Barra Combustível com veneno queimável	315,0	316,3
Topo sem Gd	45,0	45,2
Fundo sem Gd	30,0	30,1
Raio da pastilha de combustível	0,4555	0,4583
Distância entre barras de combustível	1,43	1,43
Raio externo do revestimento da barra de combustível	0,5375	0,5385
Espessura da parede (Zr4)	0,0725	
Tubo Guia (Zr4)		
Raio interno	0,62	0,621
Raio externo	0,69	0,6911
Espessura da parede	0,07	
Barra de Controle Canning (steel 4541)		
Raio interno	0,4480	
Raio externo	0,5100	
Material absorvedor (Ag-In-Cd)		
Raio externo	0,4435	
Distância entre elementos combustíveis	23,0	23,11

De acordo com o Final Safety Analysis Report (FSAR, 1999), o núcleo possui elementos combustíveis com quatro composições diferentes. Alguns elementos contêm 08 e outros 12 barras de veneno queimável na proporção de 7,0% [ELETRONUCLEAR, 1999].

Inicialmente, realizou-se a análise do comportamento do núcleo do reator com relação ao fluxo de nêutrons e o fator de multiplicação (k_{eff}) em cada mistura, ao longo de uma queima de cerca 33,0 GWd/MTU, sem qualquer tipo de controle, além é claro, de 7,0% de veneno queimável, ou seja, não foram utilizados barras de controle e nem boro (B) diluído no refrigerante.

Após este estudo foi avaliada a mudança na composição do percentual do veneno queimável inserido nas barras de combustíveis, conforme consta na Tabela 4.2, mantendo os demais parâmetros e feita a comparação entre os resultados.

Tabela 4.2: Identificação do núcleo, composição, percentual e densidade de elementos úteis na simulação.

Identificação do núcleo	Descrição Elemento Combustível (EC)		Percentual (%)		Densidade (g/cm ³)
	Tipo de EC	Configuração	Enriquecimento	Gd ₂ O ₃	
C (Referência)	EC 1 – UO ₂	1	1,9	-	10,40
	EC 2 – UO ₂	2	2,5	-	10,40
	EC 3 – UO ₂	3	3,5	-	10,40
	EC4 – UO ₂ +Gd ₂ O ₃	4	0,711	7,0	10,13
C1	EC 1 – UO ₂	1	1,9	-	10,40
	EC 2 – UO ₂	2	2,5	-	10,40
	EC 3 – UO ₂	3	3,5	-	10,40
	EC4 – UO ₂ +Gd ₂ O ₃	4	0,711	5,0	10,13
C2	EC 1 – UO ₂	1	1,9	-	10,40
	EC 2 – UO ₂	2	2,5	-	10,40
	EC 3 – UO ₂	3	3,5	-	10,40
	EC4 – UO ₂ +Gd ₂ O ₃	4	0,711	9,0	10,13

4.2. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em relação ao fator de multiplicação efetivo (k_{eff}) o estudo mostra comportamento bastante semelhante ao longo da queima para as diferentes composições, conforme apresentado na Figura 4.6 que compara o valor do (k_{eff}) nas diferentes composições, havendo pequenas diferenças no intervalo de queima 10,0 a 20,0 GWd/MTU.

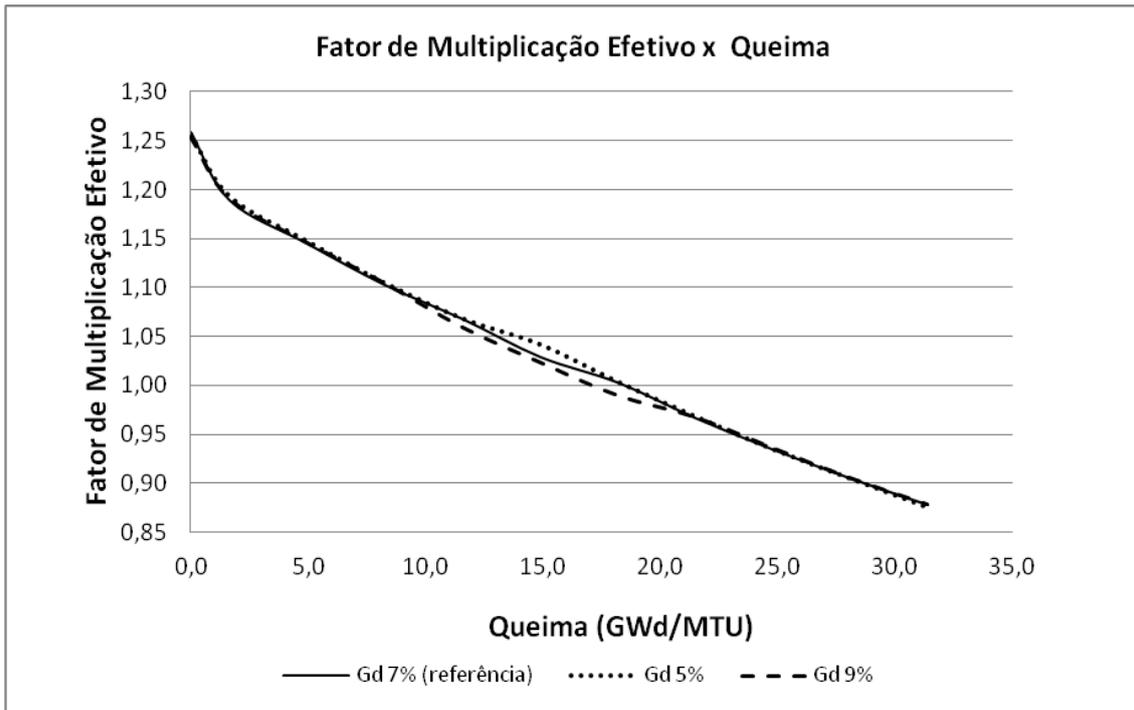


Figura 4.6: Comparação dos fatores de multiplicação efetivo do núcleo com diferentes composições

As diferenças entre os valores do fator de multiplicação efetivo (k_{eff}) são apenas pontuais ao longo da queima de 33,0 GWd/MTU, apresentadas na Figura 4.7 onde há comparações de cada composição. O cálculo dessas diferenças é feito pela Equação (3.4), onde o fator de multiplicação efetivo inicial é relativo ao núcleo referência (7,0% de veneno queimável) e o fator de multiplicação efetivo final são relacionados aos outros casos simulados (5,0% e 9,0%) de veneno queimável.

A Figura 4.7 apresenta a comparação dos dois casos avaliados, caso referência (Gd-7%)-Gd5% e caso referência (Gd-7%)-Gd9%. O que se observa é um comportamento quase simétrico. Próximo da queima de 15,0 GWd/MTU, o núcleo referência (Gd-7,0%) possui o valor do k_{eff} quase 1,5% menor em relação ao núcleo com 5,0% de Gd. Quando a queima se aproxima de 20,0 GWd/MTU essa diferença fica próximo de zero, o que pode ser justificado pela redução do veneno queimável no núcleo referência. Bem próximo do fim da queima, a diferença percentual do valor do k_{eff} do núcleo referência, torna-se maior que o núcleo com 5,0% de Gd e atinge valores positivos próximos a 0,5%.

O gráfico que compara o k_{eff} do núcleo referência com o núcleo contendo 9,0% de (Gd) é o que apresenta maior oscilação ao longo da queima, sobretudo entre 10,0 a 20,0 GWd/MTU, onde sua oscilação está no intervalo de 0,50% a 1,50%. Em torno de uma queima de aproximadamente 18,0 GWd/MTU a variação percentual tem uma queda acentuada atingindo valores ligeiramente abaixo de 0,0%, mantendo-se praticamente constante no intervalo de 0,0% a -0,50% a partir da queima aproximada de 20,0 GWd até o final.

Estes resultados mostram oscilação na diferença percentual do k_{eff} em ambos os casos. Tal diferença possui valores negativos quando o combustível possui 5,0% de Gd e possui valores positivos quando o combustível possui 9,0% de Gd.

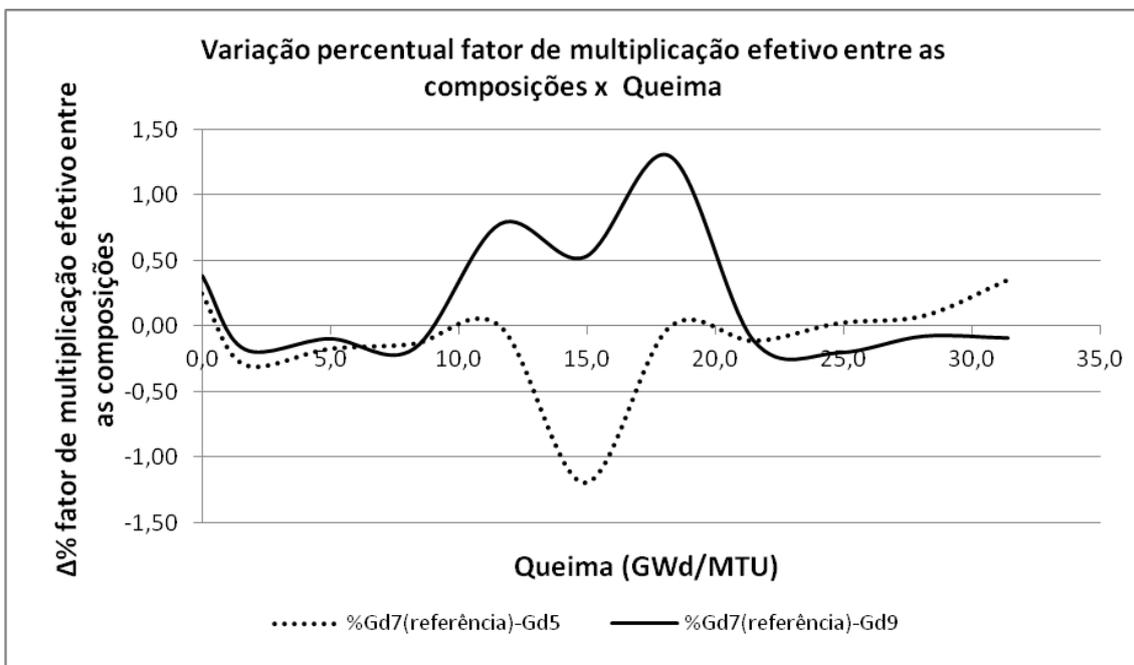


Figura 4.7: Comparação da variação percentual do k_{eff} (Gd7%-Gd5%) e (Gd7%-Gd9%).

Estes resultados do ponto de vista da neutrônica, asseguram que a utilização de 5,0% de veneno queimável é mais vantajoso durante a operação do reator nuclear, visto que ao longo da queima o seu comportamento é bastante semelhante ao núcleo referência. No entanto, tem em seu favor o fato de que a variação percentual do k_{eff} é na maioria das vezes maior que o núcleo referência. Apesar de não ter sido realizado nenhuma análise quanto à condutividade térmica dos elementos combustíveis, pois não é o propósito deste trabalho, estudos afirmam que a presença do veneno queimável em qualquer quantidade afeta a condutividade térmica, podendo reduzir a eficiência do núcleo.

As Figuras 4.8 a 4.10 mostram os gráficos da razão entre os fluxos térmico e total das configurações 1, 2, 3 e 4 para o núcleo referência (7,0% de veneno queimável) e para os núcleos com 5,0% e 9,0% de veneno queimável respectivamente. Os gráficos apresentam comportamentos semelhantes apesar das diferenças na composição dos elementos combustíveis com veneno queimável.

A configuração 1 apresenta a maior razão entre os fluxos no início do ciclo em relação às configurações que não possuem o veneno queimável. Ao longo da queima todos os gráficos das misturas convergem para o mesmo intervalo, com exceção do gráfico referente à configuração 3 -que possui maior enriquecimento- pois além de possuir a menor razão entre os fluxos no início do ciclo, possui uma razão entre fluxos ligeiramente menor do que os demais ao final do ciclo. Outro fato importante é o gráfico da configuração 4 (urânio natural + veneno queimável), que possui a menor razão entre os fluxos, mas, no entanto, a razão aumenta ao longo da queima e chega ao final praticamente coincidente com o gráfico da configuração 1.

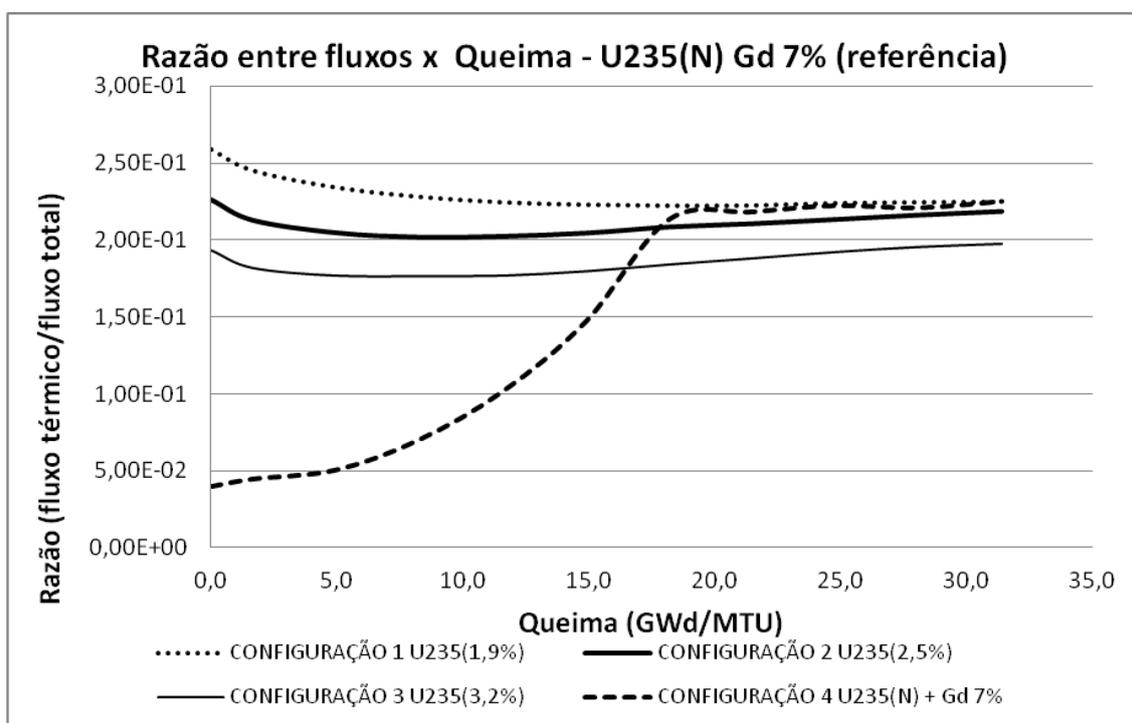


Figura 4.8: Comparação da razão dos fluxos térmico/total entre as configurações do EC [U-235(N)+Gd7%].

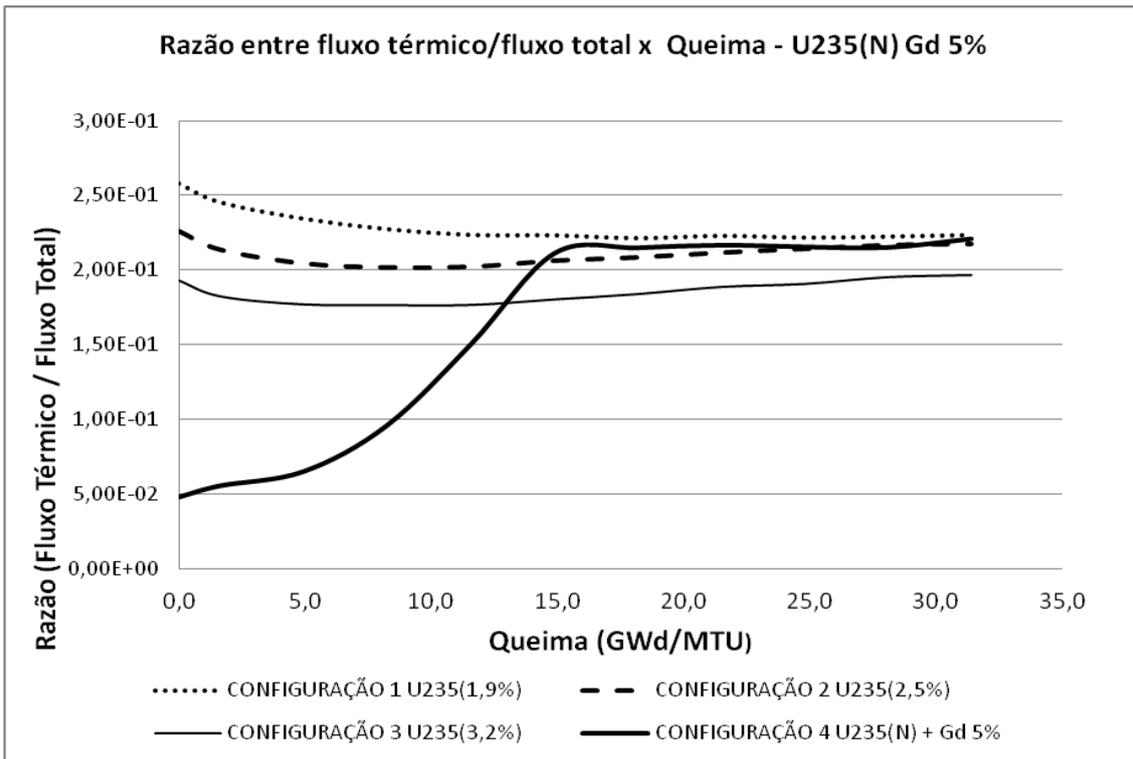


Figura 4.9: Comparação da razão dos fluxos térmico/total entre as configurações do EC [U-235(N)+Gd5%].

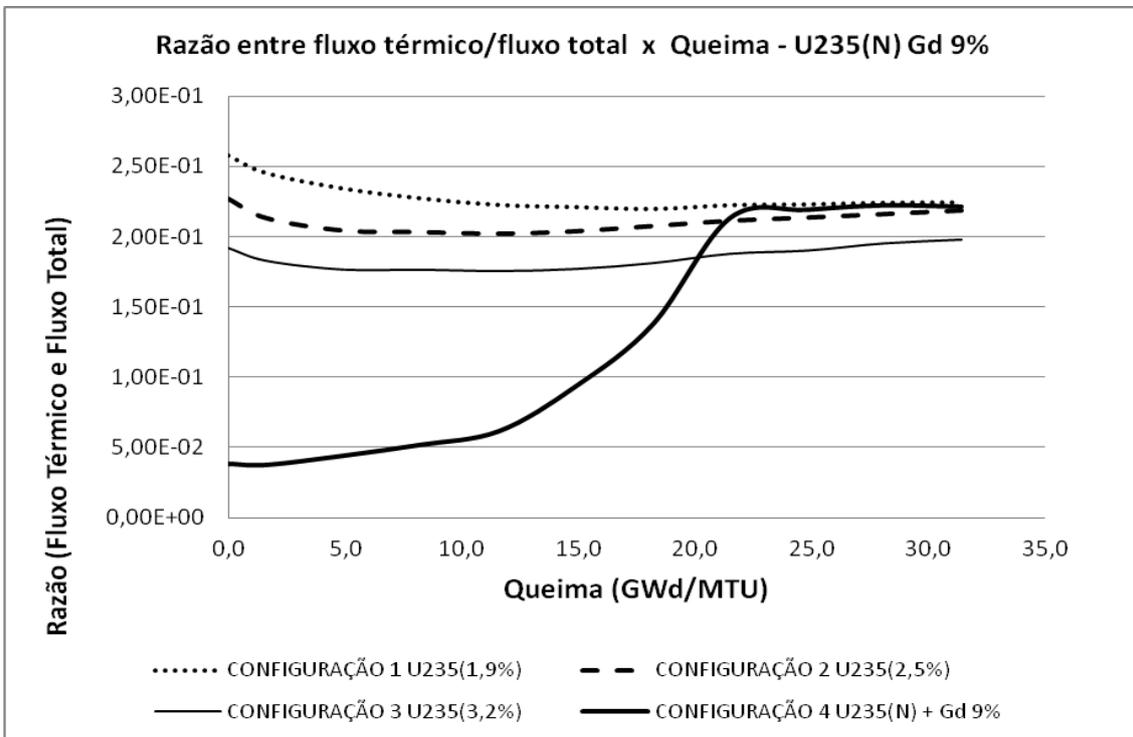


Figura 4.10: Comparação da razão dos fluxos térmico/total entre as configurações do EC [U-235(N)+Gd9%].

Na Figura 4.11 está apresentada uma comparação da razão dos fluxos térmico e total apenas da configuração 4, ou seja, com a inserção de 5,0%, 7,0% e 9,0% de veneno, o que novamente ratifica o comportamento semelhante ao longo da queima de 33,0 GWd/MTU. Estes gráficos demonstram sob a ótica da neutrônica que não há razão que justifique a utilização de 7,0% de veneno queimável em detrimento aos demais valores, pois o comportamento da razão dos fluxos na mistura com as composições 5,0% e 9,0% são semelhantes.

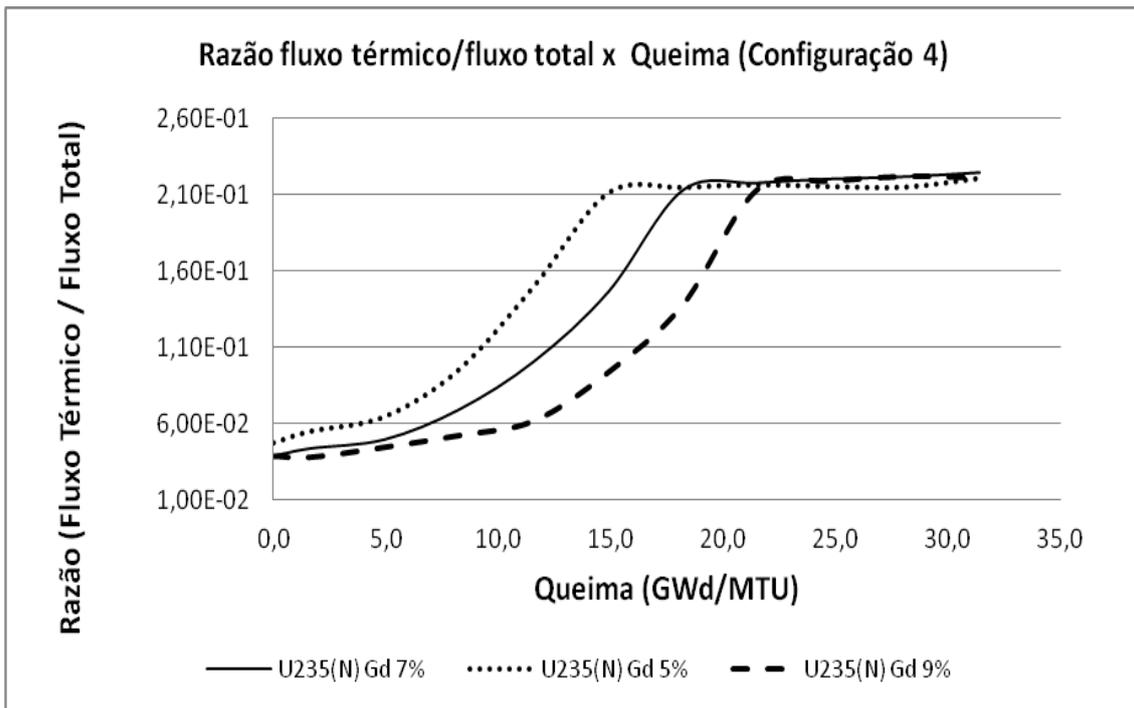


Figura 4.11: Comparação entre as razões dos fluxos térmicos/totais das configurações 4 com 7,0% (referência), 5,0% e 9,0% de Gd.

Analisando a diferença que ocorre no intervalo de queima de 5,0 GWd/MTU a 20,0 GWd/MTU, observa-se que o elemento combustível que possui maior percentual de veneno tem a menor inclinação dentre os gráficos (o que indica que o seu espectro ao longo da queima tem seu endurecimento reduzido) e a curva que possui menor percentual de veneno possui a maior inclinação.

Capítulo 5 – ESTUDOS REALIZADOS E RESULTADOS - MUDANÇA NO ENRIQUECIMENTO DO NÚCLEO DE ANGRA II

Após os estudos feitos com o núcleo de Angra II em conformidade com FSAR e com as mudanças na composição dos elementos combustíveis com percentuais diferentes de veneno queimável, aplicou-se a mesma metodologia usada no capítulo 4. Foram realizados os estudos com as modificações no enriquecimento dos elementos combustíveis de acordo com a Tabela 5.1, mantendo os demais parâmetros.

Tabela 5.1: Identificação do núcleo, composição, percentual e densidade de elementos úteis na simulação

Identificação do núcleo	Descrição Elemento Combustível (EC)		Percentual (%)		Densidade (g/cm ³)
	Tipo de EC	Configuração	Enriquecimento	Gd ₂ O ₃	
A1	EC 1 – UO ₂	1	2,5	-	10,40
	EC 2 – UO ₂	2	3,2	-	10,40
	EC 3 – UO ₂	3	4,5	-	10,40
	EC4 – UO₂+Gd₂O₃	4	0,711	7,0	10,13
A2	EC 1 – UO ₂	1	2,5	-	10,40
	EC 2 – UO ₂	2	3,2	-	10,40
	EC 3 – UO ₂	3	4,5	-	10,40
	EC4 – UO₂+Gd₂O₃	4	0,711	5,0	10,13
A3	EC 1 – UO ₂	1	2,5	-	10,40
	EC 2 – UO ₂	2	3,2	-	10,40
	EC 3 – UO ₂	3	4,5	-	10,40
	EC4 – UO₂+Gd₂O₃	4	0,711	9,0	10,13

5.1. SIMULAÇÃO DO NÚCLEO DE ANGRA II – ANÁLISE DA MUDANÇA NO ENRIQUECIMENTO

A proposta da mudança no enriquecimento é fazer uma análise da real possibilidade de extensão da queima de forma segura. Neste capítulo, será realizado as comparações dos valores do fator de multiplicação efetivo (k_{eff}) e sua variação percentual, além da razão

entre os fluxos térmicos e totais das configurações 4 das simulações feitas no núcleo identificado na Tabela 4.2 e Tabela 5.1.

5.2. RESULTADOS E COMPARAÇÕES ENTRE OS NÚCLEOS

Analisando as Figuras 5.1 a 5.3 onde se compara os gráficos referentes aos fatores de multiplicação (k_{eff}) dos núcleos C com A1, C1 com A2 e C2 com A3, observa-se que o k_{eff} dos núcleos A1, A2 e A3 são sempre maiores que os valores do fator de multiplicação efetivo (k_{eff}) dos núcleos C, C1 e C2, respectivamente, do início ao fim da queima.

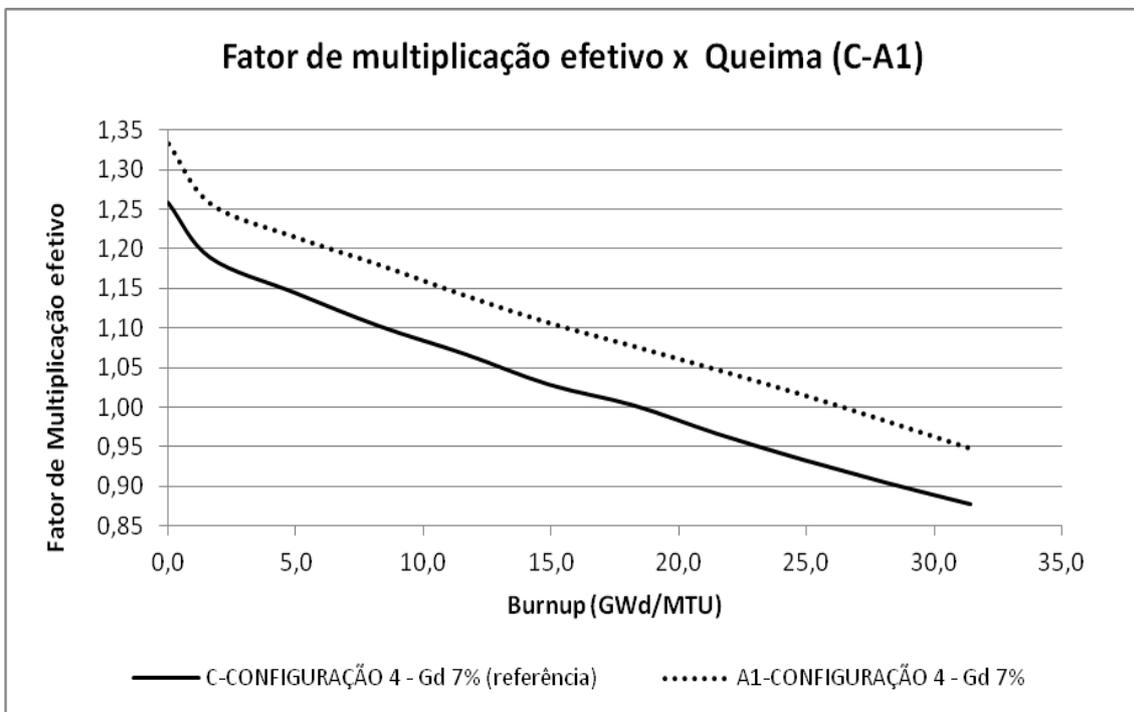


Figura 5.1: Comparação entre os k_{eff} dos núcleos (C-A1) ambos com 7,0% Gd.

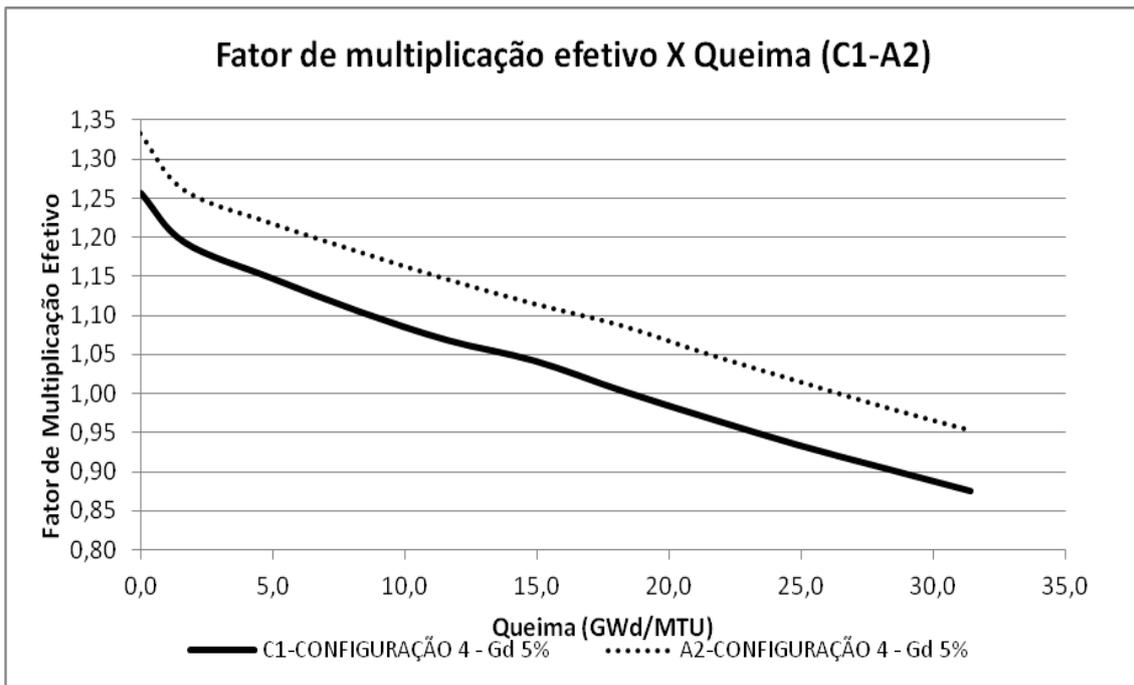


Figura 5.2: Comparação entre os k_{eff} dos núcleos (C1-A2) ambos com 5,0% Gd.

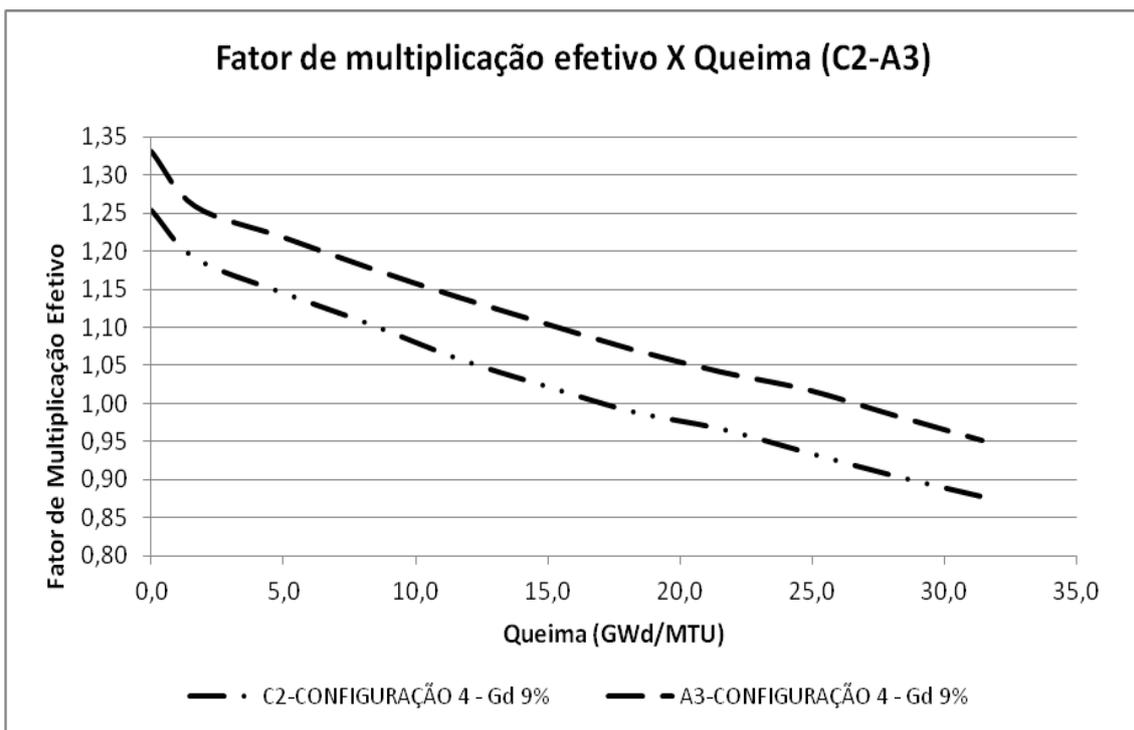


Figura 5.3: Comparação entre os k_{eff} dos núcleos (C2-A3) ambos com 9,0% Gd.

As Figuras 5.4 a 5.6 apresentam gráficos da diferença percentual entre os valores do fator de multiplicação efetivo (k_{eff}) das configurações 4 dos núcleos C com A1, C1 com A2 e C2 com A3, respectivamente. O cálculo dessas diferenças é dado pela Equação

(3.4), onde $k_{inicial}$ representa os valores do k_{eff} dos núcleos C, C1, C2 e o k_{final} os valores do k_{eff} que representam os núcleos A1, A2, A3.

O que se observa é uma tendência de crescimento da diferença do k_{eff} ao longo da queima, principalmente a partir da metade final do ciclo. No início do ciclo as diferenças dos valores entre os núcleos C-A1, C1-A2, C2-A3, estão respectivamente em torno de 5,5%, 5,7% e 5,7% e no final do ciclo estes valores estão respectivamente em torno de 7,5%, 8,2% e 7,6%. Estes resultados sugerem que existe a real possibilidade da extensão da queima.

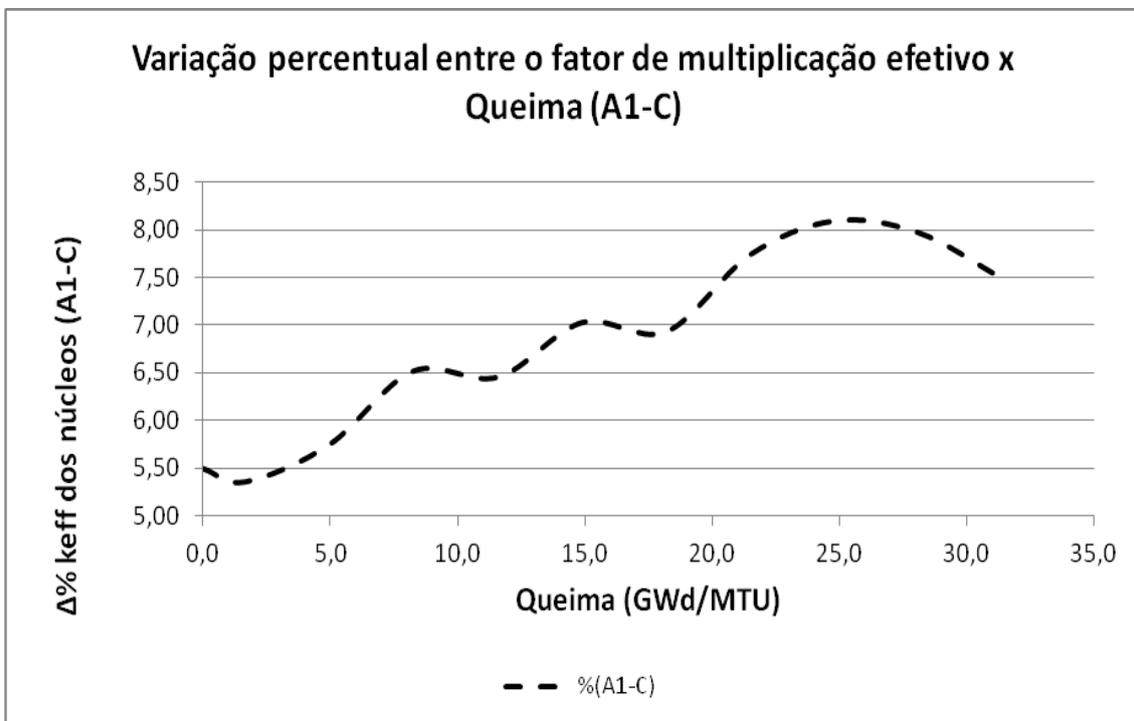


Figura 5.4: Variação percentual do k_{eff} dos núcleos (A1-C).

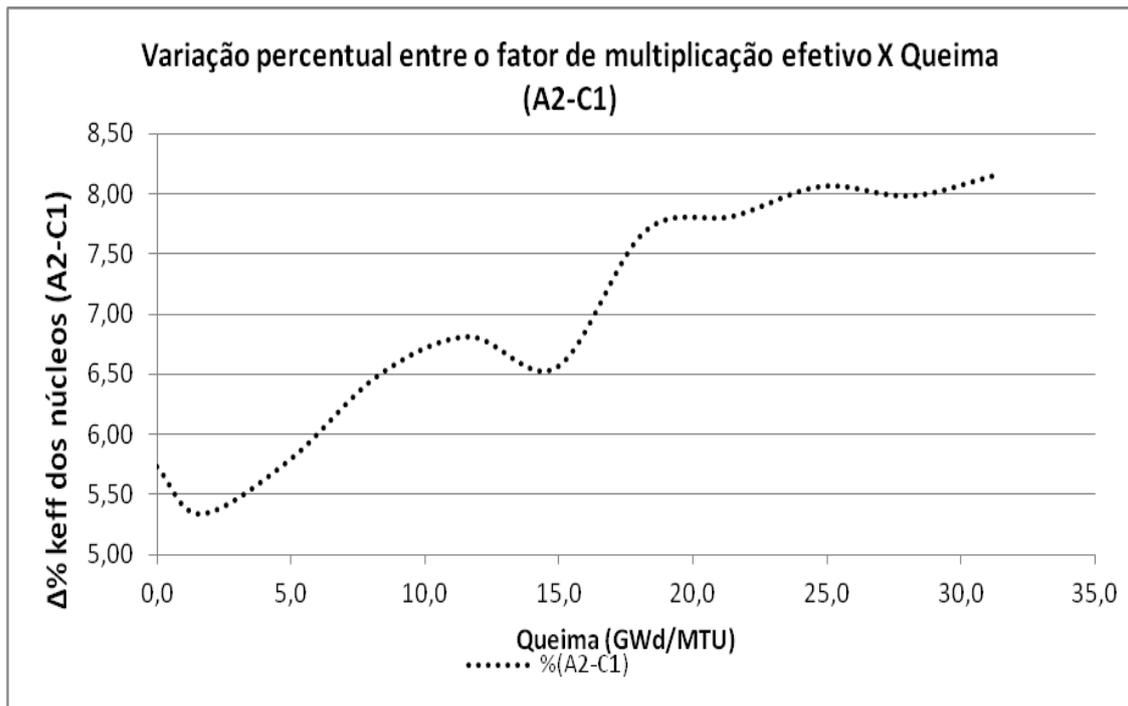


Figura 5.5: Variação percentual do k_{eff} dos núcleos (A2-C1).

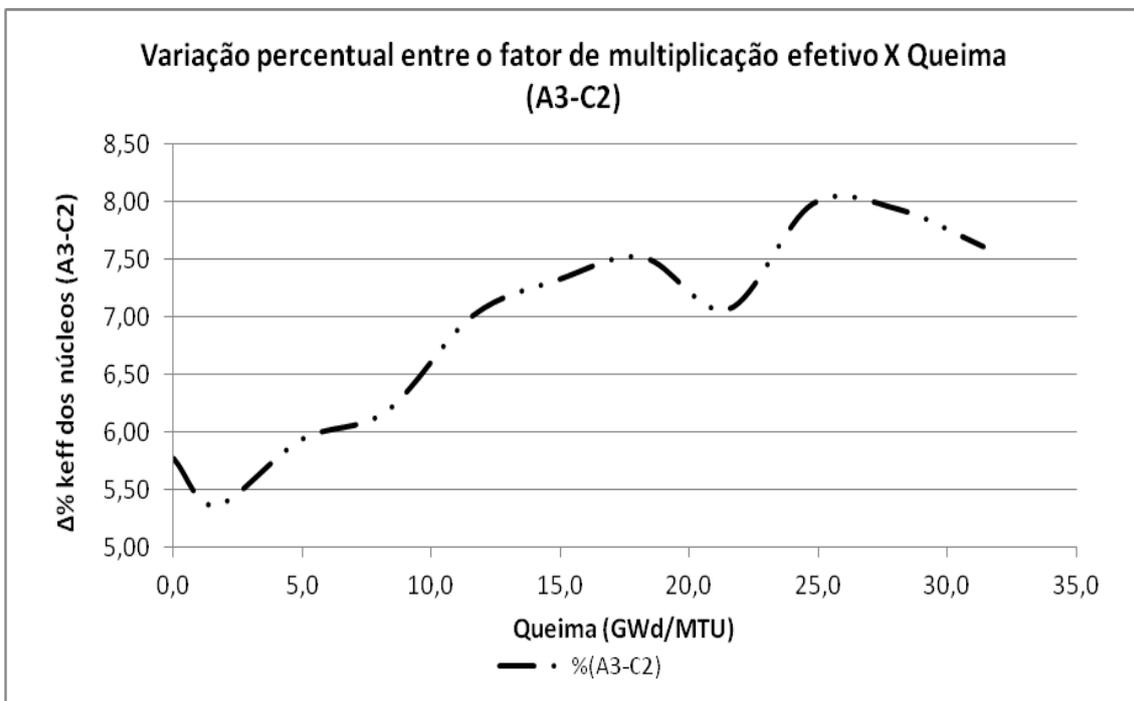


Figura 5.6: Variação percentual do k_{eff} dos núcleos (A3-C2).

A Figura 5.7 apresenta uma comparação do comportamento dos três gráficos referentes às diferenças percentuais dos valores do k_{eff} da configuração 4 dos núcleos A1-C, A2-C1 e A3-C2, onde se observa que há pequenas diferenças ao longo da queima do

combustível nuclear. No início do ciclo a diferença existente é muito pequena entre os diferentes enriquecimentos. Este fato ratifica a atuação do veneno queimável, que à medida que são consumidos a diferença percentual tende a aumentar. É importante ressaltar que a maior variação percentual entre o início e final do ciclo ocorre entre os núcleos A2-C1, ou seja, núcleos que possuem o menor percentual de veneno queimável (5,0% de Gd), o que vem novamente corroborar com a hipótese de que o veneno queimável está atuando principalmente no início do ciclo e havendo equilíbrio entre a cinética de queima do combustível e do veneno queimável, ele será consumido em quase sua totalidade, o que indica o aumento da diferença percentual dos valores do fator de multiplicação efetivo.

A curva que representa os núcleos A2-C1, chega ao final da análise mostrando que a diferença percentual está acima de 8,00% e as curvas que representam os núcleos A1-C e A3-C2, estão muito próximas de 7,50%.

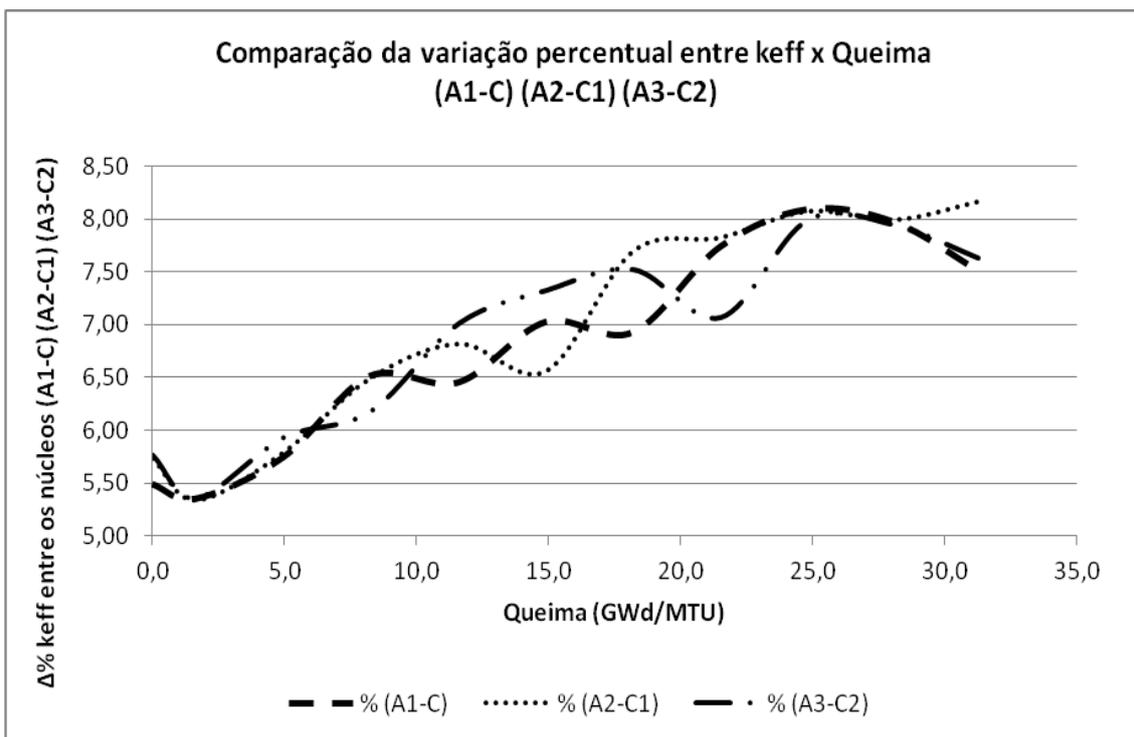


Figura 5.7: Comparação das variações percentuais entre os valores do k_{eff} nas configurações 4 dos núcleos (A1-C, A2-C1, A3-C2).

A Figura 5.8 mostra gráficos das razões entre os fluxos térmicos e fluxos totais da configuração 4 (urânio natural + veneno queimável) do núcleo do reator C, C1 e C2 em

comparação com os núcleos A1, A2 e A3, onde se observa que o comportamento dos gráficos é bastante semelhante, mas eles não são coincidentes. Isso se deve à diferença no enriquecimento do combustível sem o veneno queimável que pode está afetando o comportamento das configurações 4 que possuem composições iguais nos núcleos C-A1, C1-A2 e C2-A3.

As curvas que representam os núcleos C, C1 e C2 são todas mais inclinadas que suas correspondentes dos núcleos A1, A2 e A3, e em alguns intervalos de queima as curvas A1 e A2, possuem pontos comuns com as curvas C e C2.

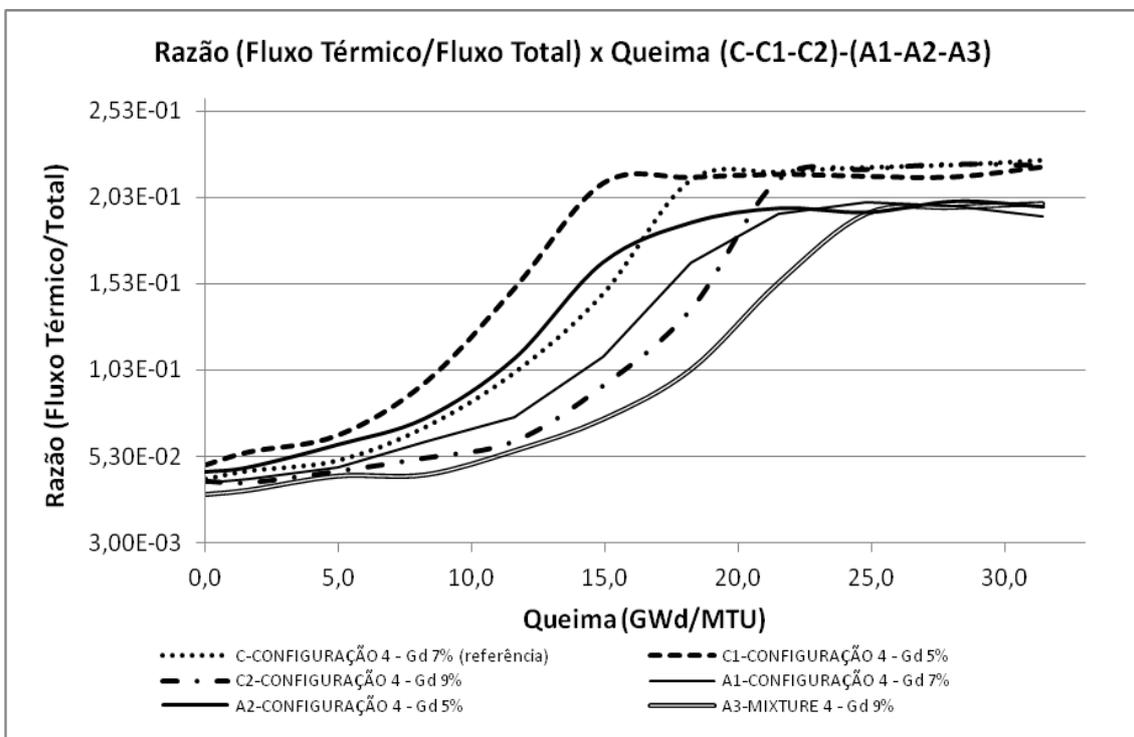


Figura 5.8: Comparação entre as razões dos fluxos térmicos/totais das configurações 4.

Outra análise pertinente é que no início da queima os gráficos estão muito próximos, enquanto que no final a razão do fluxo nas curvas C, C1 e C2, estão com valores acima de dois décimos ($2 \cdot 10^{-1}$), já as curvas A1, A2 e A3, abaixo deste valor.

A presença do veneno queimável provocou um endurecimento do fluxo de nêutrons, predominantemente nos núcleos de maiores enriquecimentos, isto é, A1, A2 e A3, porém, não excluindo o endurecimento do fluxo que houve nos núcleos C, C1 e C2.

Quando se compara as curva dos núcleos C com A1, C1 com A2 e C2 com A3, percebe-se que as inclinações das curvas estão em funções dos percentuais de veneno queimável, pois as curvas de A1, A2 e A3, possuem inclinações menores.

Capítulo 6 – CONCLUSÃO

Analisando de uma forma mais geral, o estudo demonstrou que o elemento combustível sem barras de veneno queimável possui o maior valor do fator de multiplicação no início da queima e o elemento combustível que possui 20 barras de veneno queimável o menor valor, mostrando assim, a interferência do veneno queimável no controle da população de nêutrons.

Conforme esperado, o gadolínio (Gd) desempenhou de forma eficaz sua função como veneno queimável no controle da reatividade, principalmente no início do ciclo, momento em que é necessário o excesso de reatividade capaz de garantir a criticalidade do núcleo ao longo de sua operação, demonstrando que o seu uso, poderá reduzir a utilização de barras de controle, o que favorece a redução de actínídeos e produtos de fissão.

Este trabalho forneceu dados que poderão colaborar com novos estudos sobre a extensão do ciclo combustível, que realizado com as devidas precauções de segurança podem produzir diversos benefícios, como redução do número de recargas que em consequência pode provocar redução no custo da transformação da energia nuclear em elétrica, diminuição na exploração do meio ambiente em busca do urânio, redução na quantidade de rejeitos nucleares com grande potencial de transformação de energia, diminuição do custo de gerenciamento e armazenagem destes rejeitos num país como o Brasil que ainda não utiliza a tecnologia do reprocessamento, aumento no fator de disponibilidade dos reatores tipo PWR nas centrais nucleares e não menos importante redução na exposição dos trabalhadores.

Os resultados mostraram que do ponto de vista da neutrônica, o núcleo do reator da Central Nuclear do Brasil, Angra II, poderia utilizar 5,0% de veneno queimável no lugar dos atuais 7,0% praticados de acordo com FSAR, que não provocaria comprometimento da segurança e haveria um ganho na reatividade acima de 6,8% em média durante o ciclo.

Os resultados deste trabalho, apontam para uma real possibilidade da extensão da queima do combustível, tendo como forte aliado a utilização de barras de veneno queimável (Gd) por suas características excepcionais no controle da população de nêutrons principalmente no início do ciclo. Entretanto, é importante ressaltar que em quantidades elevadas, o Gd, pode afetar a condutividade térmica, por esta razão, é que estudos demonstram que há uma tendência mundial na redução da quantidade de veneno queimável e boro solúvel no controle da reatividade. Sendo assim, é necessário que no Brasil sejam realizados estudos que visem a otimização da utilização de veneno queimável e boro solúvel como sistema de controle da reatividade em reatores tipo PWR.

Enfim, diante do estudo realizado, espera-se que ele possa agregar conhecimentos suficientes que favorecerão decisões no que tange à extensão da queima do combustível nuclear com o aumento do uso de venenos queimáveis como forma de controle da reatividade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AIEA, AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA, 2008 http://www.iaea.org/media/news/Nuclear_Roadmap_Fig3.pdf (acesso 10/01/2013).
- [2] ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, **Atlas de energia elétrica do Brasil**, Brasília, 2008.
- [3] ALPAN, F. ARZU.; LEAL, LUIZ C.; COURCELLE, ARNAUD, **Effect of Energy Self-Shielding Methods on ^{238}U for Criticality Safety Problems**, PHYSOR 2004- The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Developments Chicago, Illinois, April 25-29, 2004, on CD-ROM, American Nuclear Society, Lagrange Park, IL. (2004).
- [4] ASOU, MARIELLE.; PORTA, JACQUES., **Prospect for poisoning reactor cores of the future**, Nuclear Engineering and Design, 168 (1997) 261-270.
- [5] BEJMER, KLAES-HÅKAN.; SEVEBORN, OLA, **Enriched Gadolinium as Burnable Absorber for PWR**, La Grange Park : American Nuclear Society, Lagrange Park, IL, 25-29 de April de 2004, PHYSOR 2004 – The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Developments Chicago, Illinois.
- [6] BOOTH, THOMAS E.; HUGHES, GRADY H.; ZUKAITIS, ANTHONY.; BROWN, FORREST B.; MOSTELLER, RUSSEL D.; BOGGS, MARSHA.; BULL, JEFFREY S.; PRAEL, RICHARD E.; MARTZ, ROGER.; FORSTER, R. ARTHUR.; SOOD, AVNEET.; GOORLEY, JOHN T.; SWEEZY, JEREMY E., **MCNP5 – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code**, Version 5, Los Alamos National Laboratory, Report LA-UR-03-1987 (2003).
- [7] 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.
- [8] CASAL, J. J.; STAMM'LER, R. J. J.; VILLARINO.; FERRI, A. A., **HELLIOS: Geometric Capabilities of a New Fuel-Assembly Program**, Proc. Int. Topl. Mtg. Advances in Mathematics, Computations, and Reactor Physics, Pittsburgh, Pennsylvania, April 28-May 2, 1991, Vol. 2, p. 10.2.1 113.

- [9] CNEN-NE-1.27, INSTALAÇÕES NUCLEARES, **Garantia de Qualidade na aquisição, projetos e fabricação de elementos combustíveis**, Rio de Janeiro, Resolução 02/95, Publicação D.O.U. 01/09/95, Resolução 15/95, Publicação D.O.U. 21/09/99.
- [10] COCHRAN, ROBERT.; TSOUFANIDIS, NICHOLAS. , **The nuclear fuel cycle: analysis and management**. 2^a edição, American Nuclear Society, 1999, La Grange Park, Illinois, USA, 1999 American Nuclear Society, 1999.
- [11] DeHART, M. D., **Newt: A New Transport Algorithm for Two-Dimensional Discrete Ordinates Analysis in Non-Orthogonal Geometries**. Nuclear Science and Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2005/39, Version 6, Vol. II, Sect. F21, January, 2009.
- [12] DeHART, M. D. **TRITON: A Two-dimensional Transport and Depletion Module for Characterization of Spent Nuclear fuel**, Nuclear Science and Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2005/39, Version 6, Vol. I, Sect. T1, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2009.
- [13] DUDERSTADT, JAMES J.; HAMILTON, LOUIS J., **Nuclear Reactor Analysis**, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1976.
- [14] DURAZZO, MICHELANGELO, **Estudo do Mecanismo de Bloqueio da Sinterização no Sistema UO₂-Gd₂O₃**, Tese de Doutorado – IPEN Autarquia Associada à Universidade de São Paulo/2001.
- [15] ELETROBRAS TERMONUCLEAR S.A. ELETRONUCLEAR, **Final Safety Analysis Report Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto. UNIT2**”. REV. 1 Status 08/99, August (1999).
- [16] FADAEI, AMIR HOSEIN., **Investigation of burnable poison effects in reactor core design**, Annal of Nuclear Energy 38 (2011) 2238-2246.
- [17] GAULD, I. C.; HERMANN, O. W., **COUPLE: SCALE System Module to Process Problem-Dependent Cross Sections and Neutron Spectral data for ORIGEN-S Analyses**. Nuclear Science and Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2005/39, Version 6, Vol. II, Sect. F06, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2009.
- [18] GAULD, I. C.; HERMANN, O. W.; WESTFALL., R. M., **ORIGEN-S: SCALE System Module to Calculate Fuel Depletion, Actinide Transmutation, Fission Product Buildup and Decay, and Associated Radiation Source Terms**, Nuclear

- Science and Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2005/39, Version 6, Vol. II, Sect. F7, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2009.
- [19] GOORLEY, TIM, **Criticality Calculations with MCNP5: A Primer 2nd Edition**, Los Alamos National Laboratory, X-5, Report LA-UR-04-0294.
- [20] GREENE, N. M., **BONAMI: Resonance Self-Shielding by the Bondarenko Method**, Nuclear Science and Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2005/39, Version 6, Vol. II, Sect. F1, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2009.
- [21] GULUOGLU, S.; HOLLENBACH, D. F.; PETRIE, L. M., WORKER: SCALE System Module for Creating and Modifying Working Format Libraries, Nuclear Science and Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2005/39, Version 6, Vol. II, Sect. F20, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2009.
- [22] IWASAKI, KOUTA.; MATSUI.; YANAI, KOICHI.; YUDA, RYOUICHI.; ARITA, YUJI.; NAGASAKI, TAKANORI.; YOKOYAMA, NOBORU.; TOKURA, ICHIRO.; UNE, KATSUME.; HARADA, KENICHI, **Effect of Gd₂O₃ Dispersion on the Thermal Conductivity of UO₂**, Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 46, número 7, pag. 673-676 (2009).
- [23] JEVREMOVIC, TATJANA, **Nuclear Principles in Engineering**, Springer Science+Business Media, Inc. New York, 2005.
- [24] KRANE, KENNETH S. **Introductory Nuclear Physics**, John Wiley & Sons, New York, 1988.
- [25] LAMARSH, JOHN R.; BARATTA, ANTHONY J., Introduction to Nuclear Engineering, Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey, USA, 2001.
- [26] MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code - Version 5", <http://mcnp-green.lanl.gov> acessado 31/01/2013.
- [27] M. HIRAI, S. ISHIMOTO. **Thermal diffusivities and thermal conductivities of UO₂-Gd₂O₃**, Journal of Nuclear Science and Technology, 28, 995-1000 (1991).
- [28] MURRAY, RAYMOND L. , **Nuclear Energy: An Introduction to the Concepts Systems and Applications of Nuclear Processes 5^a edition**. Butterworth Heinemann, Raleigh, Carolina do Norte, USA, 2000.
- [29] NUCLEAR ENERGY INSTITUTE (NEI).
<http://www.nei.org/resourcesandstats/documentlibrary/reliableandaffordableenergy/graphicsandcharts/fuelaspercentageelectricproductioncosts/> (acesso 05/12/2012).

- [30] OECD, ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Burn-up Credit Criticality Benchmark - Phase II-D - PWR-UO₂ Assembly Study of Control Rod Effects on Spent Fuel Composition**, NEA N° 6227, ISBN: 92-64-02316-X, France, 2006.
- [31] PERSHAGEN, BENGT, **Light Water Reactor Safety**, Pergamon Press, Studsvik AB, Sweden, 1989.
- [32] PETRIE, L. M.; FOX, P. B.; LUCIUS, K., **Standard Composition Library**, Nuclear Science and Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2005/39, Version 6, Vol. III, Sect. M8, Oak Ridge, Tennessee, 2009.
- [33] PETRIE, L. M.; LANDERS, N. F., **KENO V.a: An Improved Monte Carlo Criticality Program with Supergrouping**, SCALE: A modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, Vol. II, Sec. F11, available from Radiation Safety Information Computational Center at Oak Ridge National Laboratory as CCC-545 (May, 2000).
- [34] ROGERS, TIMOTHY.; RAGUSA, JEAN.; SCHULTZ, STEPHEN.; CLAIR, ROBERT ST., **Optimization of PWR Fuel Assembly Radial Enrichment and Burnable Poison Location Based on Adaptive Simulated Annealing**, Nuclear Engineering and Design 239 (2009) 1019-1029.
- [35] SANDERS, C.E.; WAGNER, J.C., **Study of the Effect of Integral Burnable Absorbers for PWR Burn up Credit**, NUREG/CR-6760, ORNL/TM-2000/321, Oak Ridge National Laboratory, 2002.
- [36] SANTOS, LAURO R., **Estudo do Processamento do Combustível UO₂-7%Gd₂O₃ via Mistura Mecânica com Reutilização de Rejeitos do Processo de Fabricação e Aditivo de Densificação**, Tese de Doutorado – IPEN Autarquia Associada à Universidade de São Paulo/2009.
- [37] SECKER, JEFFREY R.; BROWN, JEFFREY A., **Westinghouse PWR Burnable Absorber Evolution and Usage**. ANS Winter Meeting, American Nuclear Society (2010).
- [38] S. ISHIMOTO, M. HIRAI, K. ITO, Y. KOREI, **Effects of soluble fission products on thermal conductivities of nuclear fuel pellets**, Journal of Nuclear Science and Technology, 31, 796-802 (1994).
- [39] SCHLIECK, M.; BORGER, H. -D.; NEUFERT, A., **Optimized gadolinia concepts for advanced in core fuel management in PWRs**. Nuclear Engineering Designs 205, 191-198, (2001).

- [40] TURNER, JAMES E. **Atoms, Radiation and Radiation Protection**, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007, Weinheim Baden-Württemberg, Germany.
- [41] UCAR (University Corporation for Atmospheric Research) http://www.ucar.edu/learn/1_3_1.htm (acesso 11/01/2013).
- [42] YILMAZ, SERKAN.; IVANOV, KOSTADIN.; LEVINE, SAMUEL.; MAHGEREFTEH, MOUSSA., **Development of enriched Gd-155 and Gd-157 burnable poison designs for a PWR core**, Annals of Nuclear Energy 33 (2006) 439-445.
- [43] WAGNER, JOHN C.; SANDERS, CHARLOTTA E., **Investigation of the Effect of Fixed Absorbers on the Reactivity of PWR Spent Nuclear Fuel for Burn up Credit**, Nuclear Technology, vol. 139, ORNL, Oak Ridge, Tennessee, 2002.
- [44] WAGNER, J. C.; PARKS, C.V., **Parametric Study of the Effect of Burnable Poison Rods for PWR Burn up Credit**, NUREG/CR-6761, ORNL/TM-2000/373, Oak Ridge National Laboratory, 2002.
- [45] WILLIAMS, M. L.; ASGARI, M.; HOLLENBACH, D. F., **CENTRM: A one-dimensional Neutron Transport Code for Computing Pointwise Energy Spectra**. Nuclear Science and Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2005/39, Version 6, Vol. II, Sect. F18, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2009.
- [46] WILLIAMS, M. L.; HOLLENBACH, D. F., **PMC: A Program to Produce Multigroup Cross Sections using Pointwise Energy Spectra from CENTRM**, Nuclear Science and Technology Division, Oak Ridge National Laboratory ORNL/TM-2005/39, Version 6, F19, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2009.