



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES

Raphael Henrique Martins Silva

Estudo Inicial de Combustível Anelar para PWR

Belo Horizonte

2017

Raphael Henrique Martins Silva

Estudo Inicial de Combustível Anelar para PWR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da Escola de Engenharia da UFMG, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Ciências e Técnicas Nucleares.

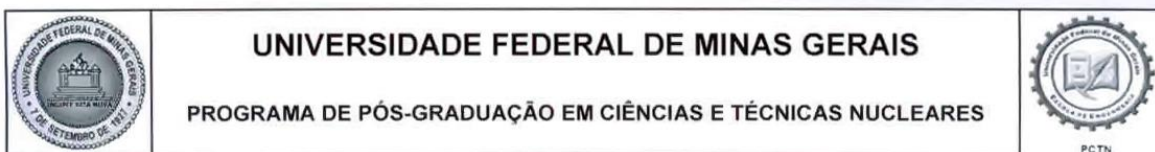
Área de Concentração: Engenharia Nuclear e da Energia

Orientador: Prof. Dr. Clarysson Alberto Mello da Silva
Coorientador (a): Prof.^a. Dr (a). Cláudia P. Bezerra
Lima

Belo Horizonte

2017

S586e	<p>Silva, Raphael Henrique Martins. Estudo inicial de combustível anelar para PWR [manuscrito] / Raphael Henrique Martins Silva. – 2017. xvi, 77 f., enc.: il.</p> <p>Orientador: Clarysson Alberto Mello da Silva. Coorientadora: Cláudia P. Bezerra Lima.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 76-77. Bibliografia: f. 73-75.</p> <p>1. Engenharia nuclear - Teses. 2. Reatores de água pressurizada - Teses. 3. Análise por ativação nuclear - Teses. 4. Combustíveis nucleares - Elementos - Teses. I. Silva, Clarysson Alberto Mello da. II. Lima, Cláudia Pereira Bezerra. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p>
	CDU: 621.039(043)



FOLHA DE APROVAÇÃO


Estudo Inicial de Combustível Anelar para PWR

RAPHAEL HENRIQUE MARTINS SILVA

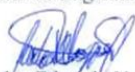
Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, área de concentração ENGENHARIA NUCLEAR E DA ENERGIA.

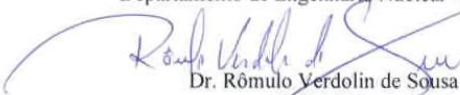
Aprovada em 20 de fevereiro de 2017, pela banca constituída pelos membros:


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


Profa. Cláudia Pereira Bezerra Lima – Coorientadora
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG


Profa. Antonella Lombardi Costa
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG


Dr. Carlos Eduardo Velásquez Cabrera
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG


Dr. Rômulo Verdolin de Sousa
HC/HSJD

Belo Horizonte, 20 de fevereiro de 2017.

Dedico esse trabalho a todos que contribuíram diretamente e / ou indiretamente ao meu crescimento acadêmico / profissional e principalmente a minha família, meu Pai Haroldo, minha mãe Rita e meu irmão Rodrigo.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Clarysson Alberto Mello da Silva, por toda a orientação nesses últimos 2 anos de trabalho. Pela paciência demonstrada em todos os momentos de dúvida por minha parte e pela confiança no serviço.

Às Profa (s). Dra (s). Maria Auxiliadora Fortini Veloso e Claubia Pereira Bezerra Lima pela coorientação e suporte ao desenvolvimento do trabalho. A Profa. Dra Antonella Lombardi Costa e principalmente aos amigos de mestrado Mario Cerrogrande Ramos, Raoni Adão pela ajuda incondicional a pesquisa apresentada nesta dissertação.

À Universidade Federal de Ouro Preto, pela oportunidade de realização do curso de graduação e à Universidade Federal de Minas Gerais. Por possibilitar-me a continuidade em meu processo de aprendizado e qualificação de alta qualidade.

À Agências de fomento CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), por intermédio da estatal do setor nuclear ELETRONUCLEAR, CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), FAPEMIG (Fundação do Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) e CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear). Demonstro meu agradecimento por todo suporte financeiro e técnico investido nesse projeto.

RESUMO

A geração de energia elétrica através do processo termonuclear tem contribuído de forma eficaz para o atendimento do crescente aumento da demanda energética. Segundo dados da IAEA (*International Atomic Energy Agency*), atualmente mais da metade dos reatores comerciais em funcionamento no mundo são do tipo PWR (*Pressurized Water Reactor*), os quais utilizam combustíveis na forma de pastilhas cilíndricas de óxido de urânio (UO_2). Esta geometria tem sido mantida durante muitos anos; entretanto, vários estudos têm sido desenvolvidos utilizando combustíveis na forma anelar. Esse trabalho tem por objetivo avaliar a substituição das tradicionais varetas de um elemento combustível típico PWR de arranjo 16x16 por varetas anelares. Assim, simulações computacionais foram realizadas para calcular parâmetros neutrônicos dos ECAs (Elementos Combustível Anelares) e comparar com os resultados com ECP (Elemento Combustível Padrão típico PWR). Nesse contexto, o código MCNPX 2.6.0 (*Monte Carlo N-Particle eXtended*) foi utilizado para simular os ECAs de arranjos 13x13, 14x14 e 15x15 e o ECP típico de um PWR de arranjo 16x16. As dimensões externas do ECP e a razão V_M/V_F (Volume Moderador / Volume Combustível) foram mantidas iguais em todos os elementos combustíveis simulados. O enriquecimento do combustível foi de 3,2% no ECP 16, 3,8% no ECA 13 e 3,9% nos ECAs 14 e 15. Os diferentes valores de enriquecimento nas configurações anelares foram determinados visando obter o mesmo k_{inf} do elemento combustível padrão. O fator de multiplicação infinito, fluxos neutrônico, fator de pico, distribuição de potências axiais e radiais foram calculados pelo MCNPX 2.6.0. Além disso, a evolução do combustível foi avaliada durante o ciclo de queima. Após todas simulações realizadas, ambos elementos combustíveis anelares ECA 14 (3,9%) e ECA 15 (3,9%), se mostraram propício a incorporação da geometria anelar na sua configuração. Parâmetros neutrônicos como distribuição de potência, fluxos, criticalidades e queima demonstram semelhantes comportamentos entre os ECAs e confirmam a equivalência dos resultados. A continuidade da pesquisa direciona-se as outras composições de combustíveis, enriquecimentos e análises termo-hidráulicas nas simulações do ECAs, objetivando adquirir parâmetros mais precisos para determinação da configuração de ECA a ser utilizado em possíveis substituições no núcleo.

Palavras-chave: PWR, Combustível Anelar, MCNPX 2.6.0, Análises Neutrônicas

ABSTRACT

The generation of electric energy through thermonuclear process has contributed effectively to the increasing energy demand. According to the IAEA (International Atomic Energy Agency), currently more than half of commercial reactors in operation in the world are of type PWR (Pressurized Water Reactor), which use fuels rods in the form of cylindrical pellets of uranium oxide (UO_2). This geometry has been maintained for many years; However, several studies have been developed using fuels in annular fuel rods. This work aims to evaluate the replacement of traditional rods of a typical PWR 16 x 16 fuel assembly arrangements for annular fuel rods. So, a set of computer simulations were performed to calculate parameters neutronics of ECAs (Advanced Assemblies) and to compare the results with ECP (Standard Assembly). In this context, the MCNPX 2.6.0 (Monte Carlo N-Particle eXtended) code was used to simulate the ECAs 13 x 13, 14 x 14 and 15 x 15 arrangements and the ECP typical PWR 16 x 16 arrangement. The external dimensions of the ECP and the V_M/V_F (Moderator Volume / Fuel Volume) were kept equal in all simulated assemblies. The enrichment of fuel was 3.2% to the ECP 16, 3.8% to ECA 13 and 3.9% to ECAs 14 and 15. The different values of enrichment of annular settings were determined to obtain the same k_{inf} of standard assembly. The infinite multiplication factor, neutronic flux, peaking factor, axial and radial power distribution were calculated by the MCNPX 2.6.0. Furthermore, the evolution of the fuel was evaluated during the burnup. After all simulations have performed, both annular fuel assemblies ECA 14 (3.9%) and ECA 15 (3.9%), were conducive to incorporation of annular geometry in your configuration. Neutronics parameters as power distribution, flux, criticality and burnup demonstrate similar behaviors between ECAs and confirm the equivalence of results. The continuity of research directs the other compositions of fuels, enrichment and thermo-hydraulic analysis in simulations of ECAs, aiming to acquire more accurate parameters for determining the configuration of ECA to be used in possible replacements in the core.

Keywords: PWR, Annular Fuel, MCNPX 2.6.0, Neutronic Analysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Elemento combustível contendo varetas combustível tabulares formando gaps anelares concêntricos	3
Figura 2: Esquema do Combustível anelar e Tradicional do reator PWR.....	4
Figura 3: Elemento combustível típico 16x16 (Esquerda) e elemento combustível anelar 15x15 (Direita), ambos com mesmas dimensões geométricas externas.....	5
Figura 4: Combustível anelar VIPAC (Esquerda) e Combustível Anelar Sintered (Direita)....	5
Figura 5: Alterações físicas das pastilhas após processo de irradiação e aumento de potência .	8
Figura 6: O layout dos três casos de elementos combustíveis considerados, (a) anelar – 7, (b) anelar – 8 e (c) anelar – 9 (Amin and Faghihi, 2013).....	10
Figura 7: Elemento combustível tradicional 16x16 (a esquerda) e elemento combustível anelar 12x12 (a direita) (Yang, et al. 2009).	11
Figura 8: Elemento combustível Tradicional (a esquerda) e elemento combustível anelar (a Direita).....	13
Figura 9: 3 tipos de Elementos Combustíveis estudados associados a reator AWRH.	15
Figura 10: Elemento Combustível 16x16.....	19
Figura 11: Elementos Combustíveis anelares simulados na pesquisa.	21
Figura 12: Determinação das nomenclaturas utilizadas nas varetas simuladas.....	22
Figura 13: Valores de k_{inf} dos ECAs e ECP 16 enriquecidos a 3.2%.....	31
Figura 14: Gráfico k_{inf} x Enriquecimento.	32
Figura 15: Comparação de valores de k_{inf} entre diferentes enriquecimentos.	33
Figura 16: Gráfico comparativo k_{inf} x Temperatura	35
Figura 17: Fluxo ECP 16 (3,2%).....	36
Figura 18: Fluxo ECA 15 (3,9%).	36
Figura 19: Fluxo ECA 14 (3,9%).	37
Figura 20: Fluxo ECA 13 (3,8%).	37
Figura 21: Gráfico comparativo fluxos dos Elementos Combustíveis.....	38

Figura 22: Gráfico comparativo fluxos dos Elementos Combustíveis (Ampliado).	39
Figura 23: Fluxo CEL 16 (3,2%).....	40
Figura 24: Fluxo CEL 15 (3,9%).....	40
Figura 25: Fluxo CEL 14 (3,9%).....	41
Figura 26: Fluxo CEL 13 (3,8%).....	41
Figura 27: Gráfico comparativo dos fluxos dentro das CELs.	42
Figura 28: Gráfico comparativo dos fluxos na região central das células (Ampliado).	42
Figura 29: Distribuição de potência ECP 16 (3,2%).	43
Figura 30: Distribuição de potência ECA 15 (3,9%).....	44
Figura 31: Distribuição de potência ECA 14 (3,9%).....	44
Figura 32: Distribuição de potência ECA 13 (3,8%).....	45
Figura 33: Gráfico comparativo das Distribuição axial de potência.	46
Figura 34: Queima dos Elementos combustíveis.	50
Figura 35: Razão fluxo rápido pelo total em relação à queima.	50
Figura 36: Evolução dos isótopos 238 do urânio e 239 do plutônio na queima.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de Nano Partículas utilizadas.....	12
Tabela 2: Parâmetro de alterações do EC.....	14
Tabela 3: Dados do ECP 16 simulado no MCNPX 2.6.0 e no SCALE 6.0.....	18
Tabela 4: Composição isotópica utilizada nas simulações.....	19
Tabela 5: Dados dos Elementos Combustíveis simulados.....	24
Tabela 6: Temperatura empregada nas análises de reatividade em função da variação de temperatura do combustível.....	25
Tabela 7: Temperaturas utilizadas nas simulações.....	25
Tabela 8: Valores de criticalidade a 0 ppm de boro.....	30
Tabela 9: Tabela de valores de k_{inf} em relação ao enriquecimento.....	33
Tabela 10: Composição isotópica utilizada nas simulações dos ECAs.....	34
Tabela 11: Tabela fator de pico ECP 16 (3,2%).....	47
Tabela 12: Tabela fator de pico ECA 15 (3,9%).....	48
Tabela 13: Tabela fator de pico ECA 14 (3,9%).....	48
Tabela 14: Tabela fator de pico ECA 13 (3,8%).....	49
Tabela 15: Concentração de actínídeos após a queima (Fração de massa).....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHWR	<i>Advanced Heavy Water Reactor</i>
Atm	Atmosfera
BOC	<i>Beginning of Cycle</i>
BWR	<i>Boiling Water Reactor</i>
CEL	Célula
DNBR	<i>Departure from Nucleate Boiling Ratio</i>
EC	Elemento combustível
ECA	Elemento combustível Anelar
ECP	Elemento combustível Padrão
FROD	<i>Fuel Rod Outer Diameter</i>
HS	<i>Heat Structure</i>
INB	Indústrias Nucleares do Brasil
IRIS	<i>International Reactor Innovative and Securite</i>
KAERI	<i>Korea Atomic Energy Research Institute</i>
KNFC	<i>Korea Nuclear Fuel Company</i>
LOCA	<i>Loss of Coolant Accident</i>
LOFA	<i>Loss of Flow Accident</i>
LWR	<i>Light Water Reactor</i>
MCNP-5	<i>Monte Carlo N-Particle – Versão 5</i>
MCNPX 2.6.0	<i>Monte Carlo N-Particle eXtended – Versão 2.6.0</i>
MDNBR	<i>Minimum departure from nucleate boiling ratio</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
NERI	<i>Nuclear Energy Research Institute</i>
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1.	COMBUSTÍVEL ANELAR	3
2.1.	CONCEITOS GERAIS DO COMBUSTÍVEL ANELAR	4
2.2.	DESCRIÇÃO NEUTRÔNICA DO COMBUSTÍVEL ANELAR.....	6
2.3.	COMBUSTÍVEL ANELAR EM REATORES LWR.....	8
2.3.1.	COMBUSTÍVEL ANELAR EM REATORES PWR E BWR.	9
2.5.	COMBUSTÍVEL ANELAR EM REATORES AHWR	14
3.	METODOLOGIA	16
3.1.	BREVE DESCRIÇÃO DOS CÓDIGOS EMPREGADOS NAS SIMULAÇÕES	16
3.2.	1ª ETAPA: VALIDAÇÃO DO ECP.....	18
3.3.	2ª ETAPA: SIMULAÇÃO DO COMBUSTÍVEL ANELAR	20
3.3.1.	CONFIGURAÇÃO DO ELEMENTO COMBUSTÍVEL ANELAR.....	20
3.3.2.	AVALIAÇÃO DA CRITICALIDADE DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS .	24
3.3.3.	ANÁLISE DO FLUXO NEUTRÔNICO E DA DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA... ..	25
3.3.4.	ANÁLISE DO FATOR PICO DE POTÊNCIA.....	28
3.4.	3ª ETAPA: AVALIAÇÃO DA QUEIMA DO ECP 16 E DOS ECAS.	29
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
4.1.	VALIDAÇÃO DO ECP	30
4.2.	SIMULAÇÃO DO COMBUSTÍVEL ANELAR.....	31
4.2.1.	AVALIAÇÃO DA CRITICALIDADE DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS .	31
4.2.2.	ANÁLISE DE FLUXO NEUTRÔNICO	35
4.2.3.	ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA	43
4.2.4.	ANÁLISE DO FATOR DE PICO	46
4.3.	AVALIAÇÃO DA QUEIMA DO COMBUSTÍVEL ANELARES E PADRÃO .	49

5.	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	57
	ANEXO 1	60

1. INTRODUÇÃO

Reatores com tecnologia LWR são responsáveis por gerar a maior parte da energia elétrica gerada por usinas nucleares no mundo. Quase 90% dessas plantas com essa tecnologia, trabalham exclusivamente com ciclo único de operação utilizando o óxido de urânio (UO_2). A operação desse ciclo vem sendo alvo de estudos há algumas décadas, objetivando otimizar o processo de geração de energia, bem como, obter maior sustentabilidade do sistema (Savchenko, et al. 2014).

Atualmente, existem aproximadamente 439 usinas nucleares no mundo de múltiplas particularidades. No Brasil o complexo de usinas nucleares de Angra, constituída por duas plantas em operação e uma em construção, representa cerca de 3% da energia elétrica consumida no sistema energético nacional (Paiva 2015).

Na segunda metade do século XX, pesquisadores desenvolveram um projeto de vareta combustível que permitia fluxo de refrigerante interno e externo ao material físsil utilizado. Tal projeto foi denominado combustível anelar e foi proposto como alternativa às tradicionais varetas combustível sólidas utilizadas nos reatores LWR atuais. Essa nova geometria permite um aumento na densidade de potência no núcleo do reator confirmado através de parâmetros neutrônicos e termo-hidráulicos simulados (Blinkov, et al. 2010).

Além do aumento expressivo da densidade de potência do núcleo, varetas anelares proporcionam outros fatores positivos no contexto estudado. Nos aspectos termo-hidráulicos, a transferência de calor das varetas anelares para o refrigerante é consideravelmente maior devido a incorporação dos canais internos de refrigeração na geometria. A utilização dessa tecnologia minimizam os problemas relacionados a trincas, ruptura ou deformação do revestimento, devido às menores temperaturas na região do material físsil (Blinkov, et al. 2010).

O estudo deste tipo de vareta combustível representa uma significativa proposta de melhora no desempenho para ambas gerações de reatores PWR (*Pressurized Water Reactor*) e BWR (*Boiling Water Reactor*) em operação pelo mundo. Além disso, estudos experimentais e teóricos visam aprimorar a abordagem neutrônica e termo-hidráulica com objetivo de manter ou até ampliar parâmetros de segurança (Amin and Faghihi, 2013); (Erfani Nia, al. 2012).

Neste contexto, o presente trabalho aborda avaliações de diferentes configurações de elementos combustíveis contendo varetas anelares. O objetivo é avaliar a substituição das

tradicionais varetas de um elemento combustível típico PWR (16x16) por varetas anelares. Neste trabalho, o elemento combustível de Angra II (Eletrobrás Termonuclear 1999) será utilizado como referência de comparação, no qual, será baseada a composição e as dimensões externas do elemento combustível anelar (ECA). O elemento combustível padrão (ECP) e os elementos combustíveis anelares (ECAs) serão simulados utilizando o código MCNPX 2.6.0 (*Monte Carlo N-Particle eXtended* – Versão 2.6.0) onde parâmetros neutrônicos serão calculados. Tais simulações visam comparar o comportamento neutrônico entre o ECP e os ECAs através da análise da criticalidade, do fluxo neutrônico, distribuição de potência, fator pico de potência e otimização da extensão da queima.

O conteúdo dessa dissertação foi dividido em 5 capítulos, discriminados da seguinte forma:

Capítulo 1: Mostra uma breve introdução relacionada aos combustíveis anelares e principais características atribuídas a esta tecnologia. O objetivo da pesquisa também se inclui dentro do capítulo com suas consequentes discriminações.

Capítulo 2: Introduce uma revisão bibliográfica abrangendo sucintos esclarecimentos sobre Combustível Anelar, discernindo suas principais características e técnicas associadas. Também constituirá esse capítulo a discriminação de trabalhos anteriormente desenvolvidos por notáveis pesquisadores do meio, buscando maior embasamento para contextualização da pesquisa.

Capítulo 3: Explica os métodos pelos quais os processos de simulações computacionais serão realizados nessa dissertação. A metodologia do trabalho será descrita sucintamente com intuito de direcionar o leitor a maiores entendimentos da pesquisa.

Capítulo 4: Apresenta os resultados e discussões de todo o processo de simulação acontecido nessa pesquisa. Gráficos, tabelas e comentários relativos ao método final da pesquisa também serão apresentados nesse capítulo.

Capítulo 5: As conclusões do trabalho, indicam as melhores configurações de combustíveis anelares baseadas nas simulações neutrônicas. A comparação com o elemento combustível de referência (16x16) servirá como base para conclusão e suporte na elaboração de futuras alterações nas análises. Prosseguimentos da linha de pesquisa em futuros trabalhos também são abordados nesse capítulo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. COMBUSTÍVEL ANELAR

O conceito de combustível anelar teve início na década de 50, onde uma tecnologia associada a duas movimentações de fluxos de refrigerante, interno e externo, foi implementada pela primeira vez. Esta inovação foi adaptada em elementos combustíveis de reatores nucleares moderados a grafite os quais foram utilizadas dentro de alguns reatores de pesquisa como é apresentado na Figura 1 (Blinkov, et al. 2010).

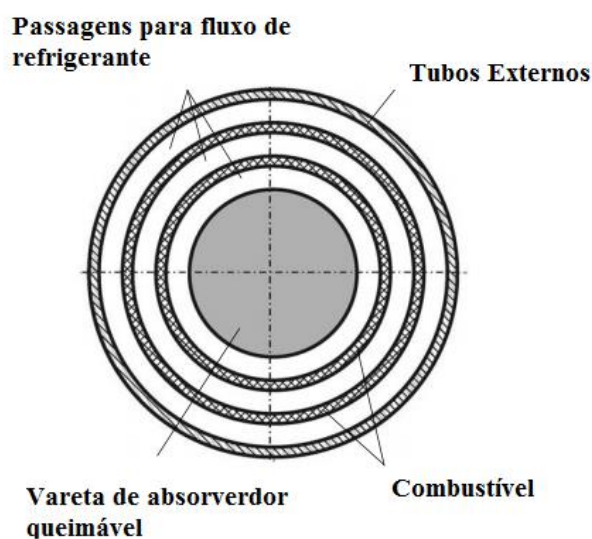


Figura 1: Elemento combustível contendo varetas combustíveis tabulares formando gaps anelares concêntricos

(Adaptado de Blinkov, et al. 2010).

A intensificação de pesquisas sobre o assunto ampliou-se consideravelmente desde anos 2000. Agências e centros de pesquisas ao redor do mundo, gerenciadas pelo organismo internacional NERI (*Nuclear Energy Research Institute*), MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) e KAERI (*Korea Atomic Energy Research Institute*), impulsionaram o processo de otimização de combustíveis nucleares. Tais estudos têm como objetivo aumentar a segurança e o desempenho do combustível durante o ciclo de operação, visando proporcionar o máximo de desempenho aos ciclos de queima e retardar os limites dos procedimentos de recarga (Blinkov, et al. 2010).

Projetado para reatores do tipo LWR, essa tecnologia se mostrou amplamente difundida pelo mundo. Países como Estados Unidos, Índia, Rússia, China e Coreia do Sul, conduzem

as principais pesquisas no mundo relacionadas a esse projeto de combustível. A agência Sul Coreana KAERI identificou diversos fatores que viabilizariam a inserção da pesquisa aos atuais LWR utilizados pelo país. Nos últimos 20 anos, diversas linhas de pesquisas associadas à combustível nuclear foram trabalhadas visando estabelecer uma otimização significativa a esse contexto. No qual, se atingiu com a tecnologia relacionada à varetas anelares enfatizada nessa pesquisa (Kwon, et al. 2013).

Futuras aplicações relacionadas à energia nuclear dependeriam fortemente de otimização de gastos. Devido às comparações diretas com outras fontes de energia, plantas nucleares demandariam altos custos relacionados a estruturas, equipamentos e manutenção. Esse fato (otimização) poderia ser alcançado com minimização de custos correlacionados a fabricação do núcleo e combustíveis (Yang, et al. 2009).

2.1. CONCEITOS GERAIS DO COMBUSTÍVEL ANELAR

O conceito de combustíveis anelares pode representar um aumento de densidade específica de potência em até 50%, devido ao aumento da razão superfície do combustível / volume da pastilha de forma individual como apresentado na Figura 2 (Ellis, 2006).

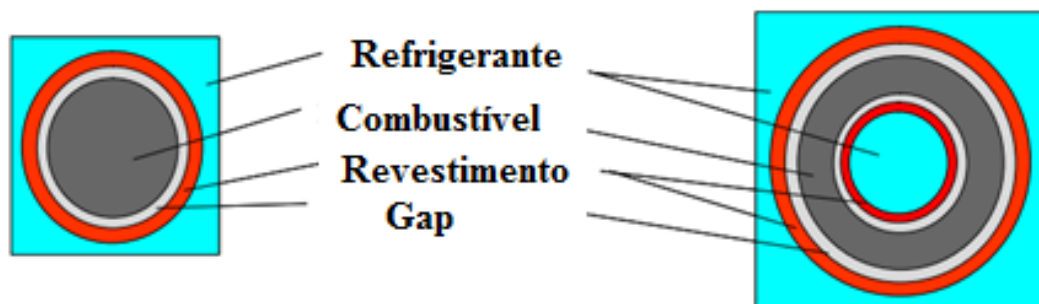


Figura 2: Esquema do Combustível anelar e Tradicional do reator PWR.

(Adaptado de Kazimi et al. 2006).

Dentre as principais características propostas para o combustível anelar, destaca-se a maior eficiência térmica sem a necessidade de modificar parâmetros como enriquecimento do combustível devido ao canal interno de refrigeração da nova geometria. Para adaptar as varetas anelares, em substituição às tradicionais, as dimensões externas do novo elemento combustível devem ser as mesmas do elemento combustível tradicional. Esta imposição

tem por finalidade não alterar fisicamente o núcleo do reator. Neste elemento combustível anelar mostrado na Figura 3, cálculos relativos ao *Pitch Distance* das varetas combustíveis têm que ser refeitos com o objetivo de adaptar o número de varetas anelares de acordo com as dimensões escolhidas (Erfani Nia, et al. 2012).

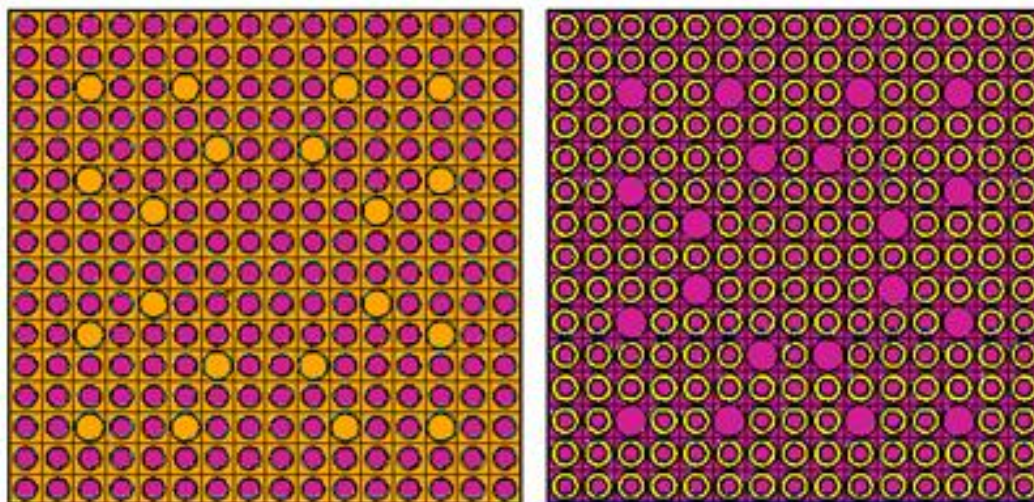


Figura 3: Elemento combustível típico 16x16 (Esquerda) e elemento combustível anelar 15x15 (Direita), ambos com mesmas dimensões geométricas externas.

Com fins de aprofundar o conhecimento sobre combustível anelar, pode-se classificar a tecnologia em dois tipos distintos de projetos mostrados na Figura 4 (Lahoda, et al. 2007).

1. *Sintered*: Composto por combustível UO_2 , apresenta-se de forma contextualizada por possuir um gap interno e externo ao material físsil, constituído pelo gás hélio.
2. VIPAC: Similar ao *Sintered*, possui uma natureza menos implementada por não apresentar o gap de gás hélio envolvendo o material físsil.

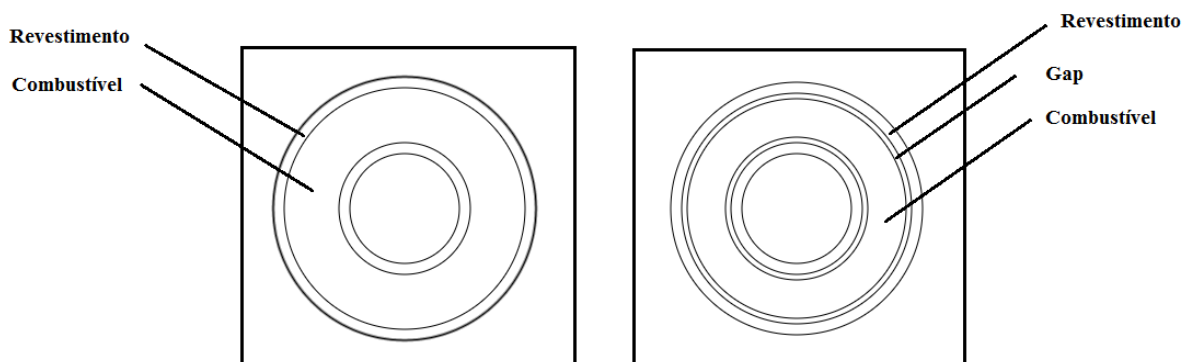


Figura 4: Combustível anelar VIPAC (Esquerda) e Combustível Anelar *Sintered* (Direita).

Dentre as demais particularidades do combustível Anelar, podemos citar (Kazimi, et al. 2006)

- O Combustível anelar impreterivelmente possui o *pitch distance* das varetas do elemento combustível maior do que o combustível típico, devido à acomodação do fluxo de refrigerante no canal interno.
- Devido à refrigeração em ambos os lados, a razão superfície/volume é aumentada em comparação ao combustível típico, proporcionando menor captura de ressonância em relação ao U_{238} . Tal fato relaciona-se diretamente ao maior volume de revestimento utilizado nos combustíveis anelares.
- Em virtude da dupla moderação, a necessidade de revestimentos em ambos os lados penaliza fatores como fator de multiplicação (k_{eff}), determinando maior captura radioativa no revestimento (zircalloy-4).

No ponto de vista termo-hidráulico, maior transferência de calor é encontrada nas varetas anelares em relação à tradicionais, visto que, a implementação do canal interno de refrigeração e redução da temperatura de pico do combustível contribuem diretamente para tal processo. Parâmetros relacionados a DNB (*Departure from Nucleate Boiling*) e DNBR (*Departure from Nucleate Boiling Ratio*) são diretamente responsáveis por mensurar os limites mínimos e máximos do fluxo de calor crítico associados a formação de bolhas dentro do reator. De modo que, acidentes relacionados à LOCA (*Loss of Coolant Accident*) e LOFA (*Loss of Flow Accident*) não se apresente no processo de transferência de calor do reator. Uma descrição detalhada do processo relacionado à esses parâmetros termo-hidráulicos citados são apresentados no Anexo 1.

2.2. DESCRIÇÃO NEUTRÔNICA DO COMBUSTÍVEL ANELAR

A implementação desse novo conceito viabiliza modificações neutrônicas e termo-hidráulicas relevantes a novos projetos de reatores baseados na tecnologia LWR, nos aspectos convenientes aos cálculos de k (fator de multiplicação de nêutrons), enriquecimento do combustível e análises isotópicas, entre outras (Yang, et al. 2009).

Em relação ao material físsil, duas regiões distintas da pastilha combustível apresentam de forma antagônica relacionadas ao enriquecimento considerável em relação ao elemento Plutônio. O processo de irradiação determina diferentes tipos de concentração de Pu nas bordas do combustível, de modo geral, nos aros localizados nas porções interna e externa das varetas faceadas diretamente com moderador. Tal fato é devido à forte absorção à ressonância de nêutrons na região epitérmica do ^{238}U nas superfícies das pastilhas combustível. Isso pode caracterizar um desenvolvimento fora da média desse isótopo e consequentes modificações de parâmetros físicos (Feng, et al. 2007). Além disso, devido ao canal interno de refrigeração, as varetas anelares apresentam menor temperatura axial de pico na região do combustível. Esta característica impede fusões associados a materiais como revestimentos (Nascimento, 2000); (Feng, et al. 2007).

Deformações e anormalidades podem ocorrer de forma considerável em outros componentes do combustível, em virtude da maior complexidade em relação ao combustível típico e por possuir duas superfícies. O combustível anelar apresenta, de forma sistemática, alguns desenvolvimentos de assimetrias relacionado ao processo de inchamento das pastilhas combustível no decorrer da queima. Soma-se a esse fato o stress térmico das varetas anelares, no qual disparidades de temperaturas da superfície da vareta em relação ao canal interno proporcionam deformações estruturais (Kwon, et al. 2013).

Em outras palavras, essas variações podem ser explicadas por diferentes comportamentos dos gaps, revestimentos e pastilha em relação à aplicação contínua de irradiação, ocasionando alterações de espessura, inesperadas deformações e rupturas. Pastilhas e gaps, devido à baixa condutividade térmica do UO_2 e do gás de preenchimento (hélio) respectivamente, possuem maior relação com possíveis anormalidades acontecidas nas varetas combustíveis como visualizado na Figura 5, fator que gera eventuais assimetrias ao sistema de varetas do núcleo (Oguma, 1983); (Yang, et al. 2009).

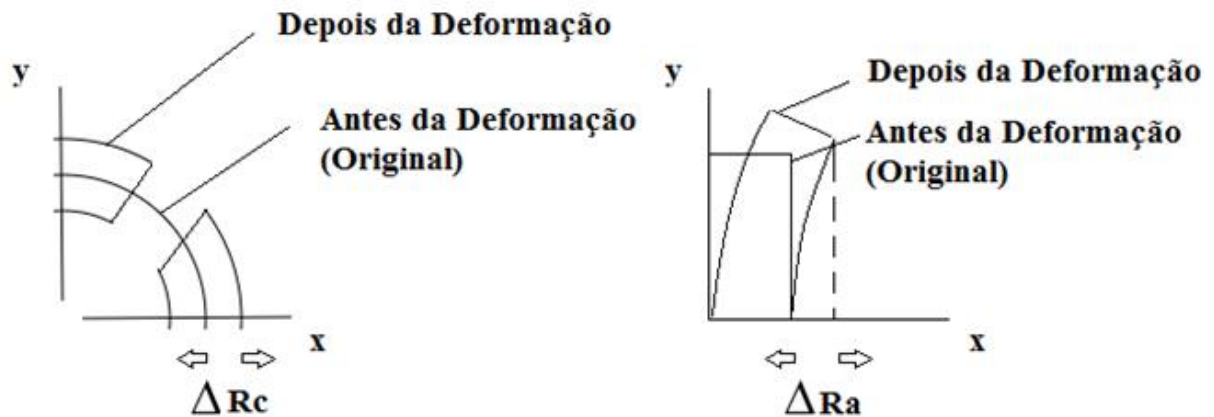


Figura 5: Alterações físicas das pastilhas após processo de irradiação e aumento de potência (Adaptado de Oguma, 1983).

Em relação à densidade específica de potência, o combustível anelar pode proporcionar um incremento de 30-50% de densidade de potência em reatores do tipo LWR e uma queima de 80-100 MWd/kg, especificamente varetas de combustível do tipo *Sintered*, que possuem melhor potencial para tais objetivos. Também apresentam reduzida liberação de gases de fissão comparado a reatores com mesmos valores de queima. (Saidinezhad and Hamieh, 2012).

As concentrações de hidrogênio e acúmulos de óxidos no revestimento do combustível anelares possuem valores comparáveis ao combustível tradicional, pois o fluxo de irradiação e calor entre as duas tecnologias se assemelham nesses aspectos.

Soma-se a esse fator a necessidade de aumento do enriquecimento do combustível, acerca de níveis a serem determinados. Esse procedimento é essencial para compensar o total de energia demandada, baseada em possíveis reduções do volume do material físsil, alterando de forma relevante alguns parâmetros relacionados ao núcleo, associando um decréscimo dos valores de reatividades do sistema com o endurecimento do espectro de nêutrons (Ellis, 2006).

2.3. COMBUSTÍVEL ANELAR EM REATORES LWR

Os combustíveis anelares inicialmente tiveram como objetivo aplicação em reatores do tipo LWR, por tais reatores utilizam água leve como refrigerante/moderador. A importância

da utilização deste tipo de componente (Água Leve), se relaciona à um amplo conhecimento físico-químico e termo-hidráulico conhecido pela comunidade acadêmica mundial (Feng, et al. 2007).

Estudos preliminares mostraram que as densidades de potência dos reatores LWR podem aumentar significativamente com o uso de varetas combustíveis anelares. Simulações mostraram que o núcleo contendo varetas combustíveis anelares possuem densidade de potência até 50% maior e menores temperaturas do combustível que um núcleo LWR utilizando as tradicionais varetas sólidas. Tais simulações ocorreram com enriquecimento do óxido de urânio (UO_2) a 8% e a redução do volume total de material físsil utilizado no núcleo (Feng, et al. 2007).

Neste mesmo estudo os valores de reatividade demonstraram-se menores em relação ao uso das tradicionais varetas sólidas, com considerável redução do espectro térmico de nêutrons. Tal fato é associado à utilização da concentração de 1750 PPM de boro e à maior quantidade de veneno queimáveis nos elementos combustíveis (Feng, et al. 2007).

2.3.1. COMBUSTÍVEL ANELAR EM REATORES PWR e BWR.

Na década atual, elementos combustíveis de configuração PWR vêm se mostrando inovadores em parâmetros neutrônicos e termo-hidráulicos em relação à utilização de varetas anelares. Estudos mostram que essa modificação se caracteriza por possuir um substancial aumento em até 50% de densidade de potência. Uma proposta de substituição das tradicionais varetas sólidas PWR por varetas anelares no elemento combustível hexagonal VVER-1000, teve como objetivo comparar parâmetros neutrônicos e termo-hidráulicos e estimar dois importantes coeficientes de segurança, *prompt reactivity* e *power coefficients* relacionado ao reator PWR de referência (Mozafari and Faghihi, 2013).

Em relação ao coeficiente *prompt reactivity*, uma inserção de reatividade pode ocasionar mudanças significantes na potência do reator no período de tempo curto comparado à exigido para a transferência de calor do combustível para o moderador. Essa alteração de reatividade muda consideravelmente a temperatura do combustível, tornando - o adiabático. Hoje reatores nucleares obrigatoriamente possuem projetos com coeficientes *prompt reactivity* negativos, pois caso contrário, podem gerar instabilidades inerentes a todo o sistema de operação do reator (Nia, 2012).

O *power coefficients* é relacionado às mudanças incrementais de reatividade com a potência proporcionado por diferentes temperaturas dos materiais do reator. Essas diferentes

temperaturas são chamadas na literatura de coeficiente de reatividade de potência (Nia, 2012).

Tais coeficientes de segurança (*prompt reactivity* e *power coefficients*) são estudados na pesquisa com intuito de evitar problemas com o parâmetro DNB relacionado à transferência de calor do combustível para o refrigerante e estudar a influência da variação da temperatura do combustível / refrigerante na reatividade do sistema respectivamente (FAGHIHI, et al. 2011).

Por esse motivo, um núcleo contendo 163 elementos combustíveis hexagonais com 331 varetas típicas e 18 varetas de controle foi estudado utilizando óxido de urânio (UO_2) como combustível. Devido à simetria do núcleo, os parâmetros estimados foram relativos a 1/6 da configuração do núcleo do reator, de acordo com as alterações referentes nessa pesquisa (Amin and Faghihi, 2013).

Os elementos combustíveis hexagonais anelares foram determinados como tendo 7, 8 e 9 varetas em cada aresta do hexágono e referenciados com anelar 7, 8 e 9 como demonstrado na Figura 6. O número de varetas do ECA foi definido pela fórmula $3n^2 - 3n + 1$, onde n se caracteriza por ser o número de pinos em cada lado do elemento combustível, ou seja, os elementos combustíveis hexagonais anelares possuem na sua configuração 118 / 8, 156 / 12 e 204 / 12 varetas anelares e de controle respectivamente (Amin and Faghihi, 2013).

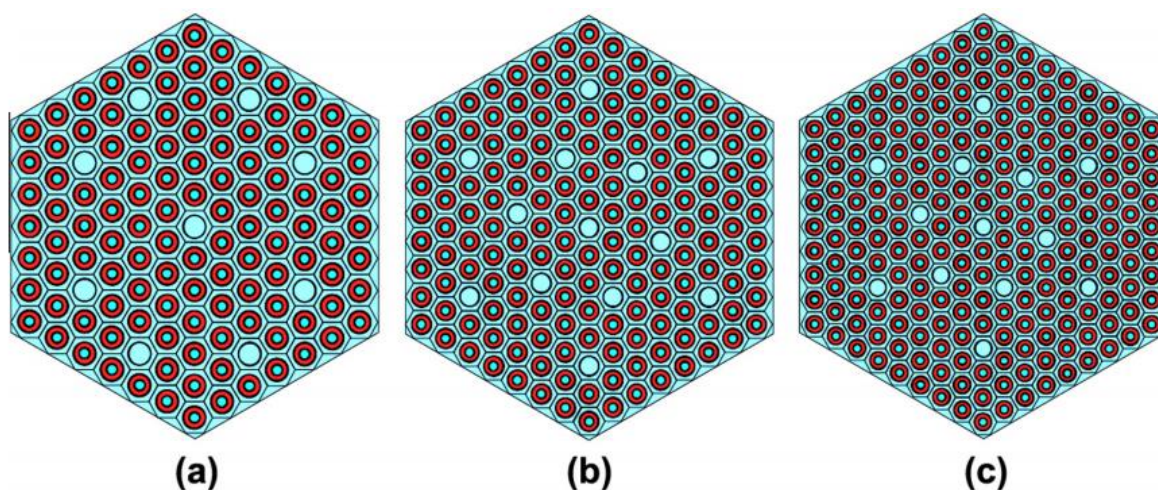


Figura 6: O layout dos três casos de elementos combustíveis considerados, (a) anelar – 7, (b) anelar – 8 e (c) anelar – 9 (Amin and Faghihi, 2013).

Tais simulações concluíram que no caso em que a aresta possui 7 varetas anelares não ocorreu o aumento esperado de potência devido ao baixo incremento de área de superfície

quente. Nos casos de 8 e 9 varetas de aresta, o caso 9 apresentou 12% a mais de área quente do que no caso 8 (Amin and Faghihi, 2013).

Em relação a criticalidade, devido à razão V_M/V_F , os raios externos das varetas anelares diminuíram com a manutenção dos valores de material físsil, os volumes dos revestimentos e gaps reduziram em todos os casos. Tais fatos propiciaram o aumento dos valores k_{eff} com o aumento da razão referida anteriormente (Amin and Faghihi, 2013).

Em outro caso simulado de reator VVER-1000, reator de posse iraniano, foi analisado também utilizando elementos combustíveis hexagonais anelares em substituição as tradicionais sólidas PWR, os parâmetros neutrônicos foram simulados no código MCNP-5 (Erfani Nia, et al. 2012).

Como resultado, o decréscimo do coeficiente do efeito *Doppler* encontrados nas varetas anelares foi um importante fator para evitar a captura de ressonância em relação ao ^{238}U , também possibilita as maiores densidades de fissões do ^{235}U comparados a outros tipos de reatores e diminui a concentração de boro diluído no moderador (Erfani Nia, et al. 2012).

O conceito dos combustíveis anelares foi implementado no reator de água pressurizada denominado OPR-1000, o qual teve sua configuração interna modificada para o arranjo 12x12, singularizando o arranjo anterior constituído de combustível típico 16x16 como mostrado na Figura 7. Tais modificações resultaram em relevante aumento de densidade potência na ordem de 20%, propiciando que valores maiores de densidade de potência fossem desejados nas futuras e diferentes intervenções no sistema (Yang, et al. 2009).

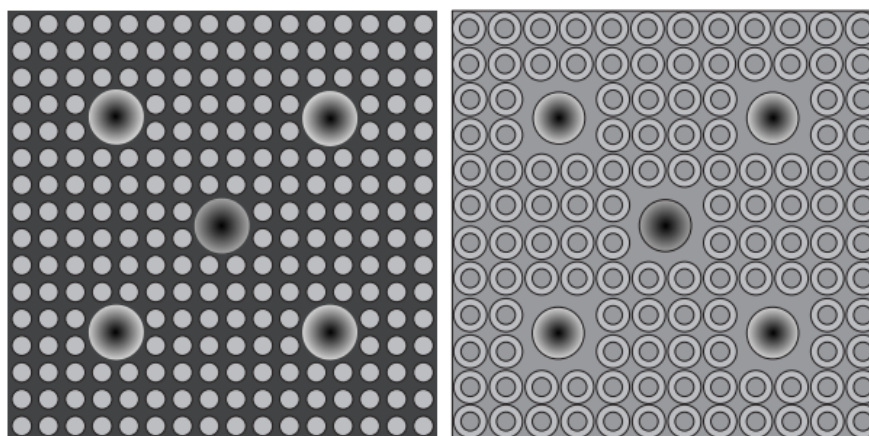


Figura 7: Elemento combustível tradicional 16x16 (a esquerda) e elemento combustível anelar 12x12 (a direita) (Yang, et al. 2009).

É impreterível salientar que, no avanço da tecnologia da fabricação de pastilhas e revestimento, elementos combustíveis se tornaram menores, ocasionando o aumento de números de varetas dentro do elemento combustível e conseqüente incremento de superfícies de transferência de calor (Yang, et al. 2009).

O reator VVRE-1000 revelou-se propício a modificações no sistema de operação, associando combustíveis anelares à utilização de nano partículas no refrigerante mostrados na Tabela 1. Essa pesquisa possui como objetivo propor tentativas de melhoria de plantas nucleares que utilizam varetas anelares associadas à transferência de calor do combustível para o refrigerante. Esse reator é caracterizado por possuir a geometria hexagonal, constituída por 163 elementos combustíveis com 311 varetas e possuindo na sua configuração 18 tubos guias como visualizado na Figura 8. A utilização de nano partículas, como absorvedores no moderador, uniformemente dispersados no fluido refrigerante retrata interessantes particularidades no âmbito neutrônico, ou seja, redução dos valores de k_{eff} de acordo com a variação da composição das nano partículas (Ansarifard and Ebrahimi, 2016).

Tabela 1: Tipos de Nano Partículas utilizadas.

Nano Partícula	Nome	ρ (g/cm³)
Al₂O₃	Alumina	3,90
Al	Alumínio	2,70
ZrO₂	Zircônia	5,68
TiO₂	Titânio	4,25
CuO	Óxido de Cobre	6,50
Cu	Cobre	8,93

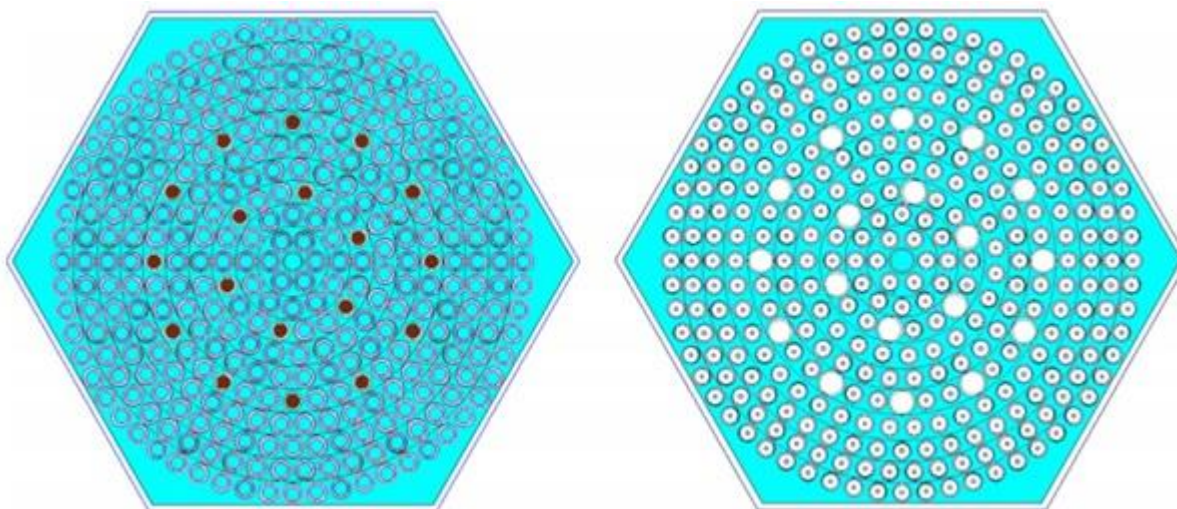


Figura 8: Elemento combustível Tradicional (a esquerda) e elemento combustível anelar (a Direita)
(Ansarifar and Ebrahimian, 2016).

A constituição do combustível em ambos os casos de queima de combustível (Anelar / Típico) é representada por óxido de urânio com enriquecimento inicial variando de 1,6% a 3,7%, o volume de material físsil permanece inalterado independente dos conceitos de combustível. A composição das nano partículas diluídas no refrigerante, foi escolhida baseadas em testes preliminares e tendo como critérios suas respectivas densidades (g/cm^3) (Ansarifar and Ebrahimian, 2016).

De maneira geral, o uso de nano partículas no refrigerante do reator VVRE-1000, demonstrou, em níveis diferentes, redução de valor do fator de multiplicação de nêutrons k_{eff} . Os elementos ZrO_2 e Al_2O_3 evidenciaram menores e maiores alterações de k_{eff} , respectivamente, vinculados ao conceito de combustível Anelar. No reator PWR típico, as alterações foram relacionadas ao elemento Al_2O_3 somente (Ansarifar and Ebrahimian, 2016).

Com o objetivo de caracterizar e desenvolver uma melhor performance de reatores de água leve fervente (BWR), três elementos combustíveis anelares de configuração 5x5, 6x6 e 7x7 foram simulados e comparados com o elemento combustível contendo varetas típicas sólidas 9x9 estudado e adaptado do *General Electric BWR5*. Análises do ponto de vista termo-hidráulica foram realizadas com o intuito de estabelecer uma correlação da mais apurada geometria anelar para esse específico tipo de reator. Tais análises foram associadas ao comportamento das propriedades do fluxo entre o canal interno e externo da geometria

anelar, procurando o entendimento de como o fluxo de calor crítico afeta os parâmetros das configurações (Ellis, 2006).

No entanto, a manutenção e / ou melhora dos valores da razão de fluxo de calor crítico para as três configurações simuladas (5x5, 6x6 e 7x7) não foram uma estratégia promissora para o aumento de potência no reator BWR. Este fato, possui relação direta com problemas associados ao aumento da área de superfície de transferência de calor, no qual, mostra impasses relacionados à mistura do refrigerante dos canais interno se misturarem com subcanais ao redor (Ellis, 2006).

2.5. COMBUSTÍVEL ANELAR EM REATORES AHWR

Reatores com tecnologia AHWR (*Advanced Heavy Water Reactor*), assim como reatores LWR, foram investigados em relação ao uso do combustível anelar. Tal pesquisa identificou, de maneira análoga, um aumento de densidade de potência correlacionado a implementação do combustível. Porém, fator adverso, como razão de fluxo de calor mínimo a mais alta potência se apresentara de modo consistente no contexto ligado à moderação e refrigeração a água pesada (Deokule, et al. 2015).

Para tal processo, 3 tipos de configurações de Elementos Combustíveis foram projetados possuindo, respectivamente, 33, 25 e 19 varetas de combustível anelar mostrados na Figura 9. Dentro desse mecanismo, o diâmetro interno relativo a cada vareta foi alterado nos intervalos específicos assim determinados na Tabela 2 (Deokule, et al. 2015).

Tabela 2: Parâmetro de alterações do EC

Elemento Combustível	Nº de Varetas anelares	Acréscimo no diâmetro interno (mm)
A	33	8,00
B	25	10,0
C	19	11,8

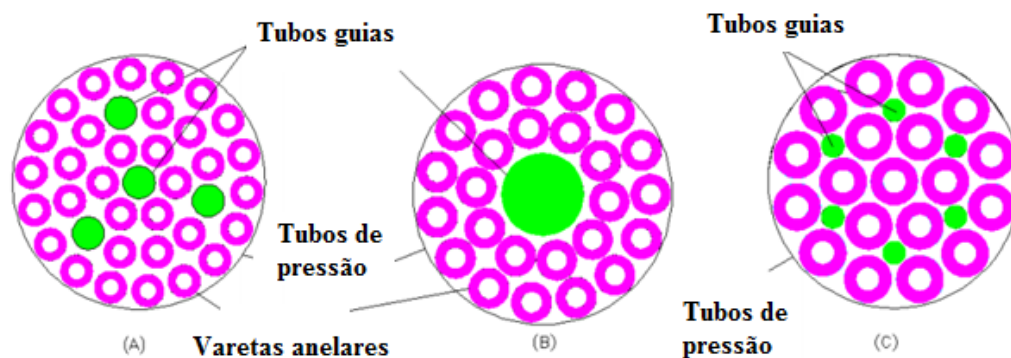


Figura 9: 3 tipos de Elementos Combustíveis estudados associados a reator AWRH.

(Adaptado de Deokule et al. 2015).

De modo geral, o uso do combustível anelar possui vantagens atreladas à menor temperatura do combustível e menos fissuras das pastilhas. No entanto, também possui desvantagens associadas à liberação de maior quantidade de gás de fissão, maiores absorções parasíticas de nêutrons, superfície de erosão, redução da área interna de fluxo e inchamento das paredes do revestimento. Tais fatores negativos, demandam que o uso de combustíveis anelares em reatores moderados com água pesada seja cuidadosamente estudado, evitando que problemas relacionados a essa natureza prejudiquem a operação de específico tipo de reator (Deokule, et al. 2015).

3. METODOLOGIA

O desenvolvimento do trabalho ocorreu em três etapas. Na primeira etapa, foi feita a validação neutrônica do ECP de referência. Para isso, foram utilizados os códigos MCNPX 2.6.0 e SCALE 6.0. Na segunda etapa, baseada nas dimensões externas e na composição isotópica do ECP, os ECAs foram simulados usando os códigos MCNPX 2.6.0 com a finalidade de comparar os parâmetros neutrônicos entre ECP e ECA. A terceira e última etapa envolve análise de um ciclo de queima típico PWR envolvendo o ECP e os ECAs. Esta fase tem por finalidade verificar as possíveis vantagens e desvantagens do ECA no ciclo de um PWR.

3.1. BREVE DESCRIÇÃO DOS CÓDIGOS EMPREGADOS NAS SIMULAÇÕES

Vários trabalhos têm utilizado códigos da família MCNP e SCALE para simulações neutrônicas (EL BAKKARI, 2009); (EL BAKKARI, 2012); (REARDEN, 2015). Estes trabalhos demonstram que tais códigos obtêm resultados precisos comparados a valores de referência. Baseado em tais experiências, o trabalho desenvolvido nesta dissertação empregou o MCNPX 2.6.0 e o SCALE 6.0 para a simulação de elemento combustíveis de PWR.

O MCNPX 2.6.0 foi desenvolvido pelo LANL (*Los Alamos National Laboratory*) como uma extensão do código de transporte Monte Carlo projetado para registrar vários tipos de partículas em uma grande faixa de energia. Nesta versão é possível simular transmutação, queima e produção de partículas atrasadas de um sistema nuclear. Este código possui diversas aplicações nas áreas da física médica, proteção radiológica, modelagem de instalações nucleares, detectores, blindagem da radiação, etc (Pelowitz, 2008).

O SCALE 6.0 é um sistema de códigos desenvolvido no ORNL (*Oak Ridge National Laboratory*). Trata-se de uma ferramenta amplamente utilizada para aplicações nucleares tais como: processamento de seções de choque, cálculos de física de reatores, análises de criticalidade, radioproteção, blindagem das radiações, caracterização do combustível queimado, análises de sensibilidade e incerteza. Este sistema de códigos consiste de uma estrutura de sequências e módulos funcionais de controle e de interface usando métodos

determinísticos e estocásticos para a solução da equação de transporte de partículas (ORNL, 2009).

O MCNPX 2.6.0 emprega o método estocástico Monte Carlo para calcular os autovalores, autovetores, energia integrada das taxas de reação, número médio de nêutrons produzidos por fissão e energia liberada por fissão. Em relação ao SCALE 6.0, dentre os vários módulos funcionais, existem aqueles que também empregam o método Monte Carlo para solucionar o transporte de partículas no meio. O aspecto mais útil deste método é a possibilidade de representar e estudar fenômenos em geometria complicada, envolvendo formas que seriam praticamente impossíveis representar por uma equação diferencial. Entretanto, os cálculos são realizados em estado estacionário e, desta forma, a densidade isotópica dos núclídeos presentes nos materiais não variam em função do tempo. Portanto, para considerar a evolução dos núclídeos é necessário que outro módulo esteja acoplado ao módulo estocástico para realizar os cálculos de queima. Desta forma, tais cálculos são processos integrados os quais envolvem a estimativa do fluxo em estado-estacionário no módulo estocástico e a evolução dos núclídeos em um módulo determinístico (Pelowitz, 2008); (ORNL, 2009).

O MCNPX 2.6.0 emprega o módulo MCNPX para cálculo do fluxo e o CINDER90 para avaliar a evolução do combustível, o qual, calcula o inventário de aproximadamente 3.400 núclídeos (WILSON, 1995); (Hendricks et al., 2008). Em relação ao SCALE 6.0, dentre os diferentes módulos possíveis, neste trabalho empregou-se o módulo KENO-VI para calcular o fluxo em estado estacionário e ORIGEN-S para cálculo da queima do combustível. O ORIGEN-S é responsável pela determinação dos grupos de sessões de choque para todos os núclídeos de interesse nas reações. Tais determinações, possui relação direta com as especificações dos fluxos de nêutrons de todas as regiões medidas pelo SCALE 6.0. Em geral, o ORIGEN-S possui a capacidade de calcular mudanças de inventário de aproximadamente 1.700 núclídeos e de forma generalizada possui menos confiabilidade do que o CINDER90 (KIM, 2014); (HERMANN, 1995).

3.2. 1ª ETAPA: VALIDAÇÃO DO ECP

Na primeira etapa do trabalho, o ECP 16x16 foi simulado usando o MCNPX 2.6.0 e o SCALE 6.0. A biblioteca utilizada pelo código MCNPX 2.6.0 foi a ENDF/B-VII.1 e no SCALE 6.0 a ENDF/B-VII colapsada a 238 grupos de energia. Tais simulações têm como finalidade comparar os valores de criticalidade calculados pelos dois códigos a diferentes temperaturas (“*Hot Full Power*” e “*Zero Cold Power*”) e diferentes enriquecimentos do combustível. O objetivo principal desta etapa é verificar se o modelo do ECP configurado no MCNPX e no SCALE possui o mesmo comportamento e se os valores estimados por tais códigos apresentam pequenas diferenças.

Nas condições de “*Hot Full Power*”, o combustível / gap, o revestimento e o moderador foram simulados as respectivas temperaturas de 873 K/873 K, 618 K e 587 K respectivamente. Nas condições de “*Zero Cold Power*” todas as regiões das varetas do ECP foram modeladas a temperatura de 293 K. As características de simulação relacionadas às espessuras de gaps, revestimentos e propriedades de tubos guias foram realizadas de acordo documento de referência (Eletrobrás Termonuclear 1999). A Tabela 3 apresenta os principais dados do ECP e a Figura 10 mostra a disposição dos tubos guias do elemento combustível. Este sistema foi configurado através de uma malha quadrada onde cada célula desta malha representa uma célula combustível ou uma célula que contém o tubo guia. Este elemento combustível foi denominado ECP 16.

Tabela 3: Dados do ECP 16 simulado no MCNPX 2.6.0 e no SCALE 6.0.

Dimensões externas (cm)		22,88	
Comprimento Ativo (cm)		391,6	
Nº de Varetas Combustíveis		236	
Nº de tubos Guias		20	
<i>Pitch Distance</i> (cm)		1,43	
Raios Tubos	Interno		
Guias (cm)	Externo		
Raio varetas combustível (cm)	<i>Zero Cold Power</i>	Raio externo do combustível (R_{FO})	0,4555
		Raio interno do revestimento (R_{COI})	0,4650
		Raio externo do revestimento (R_{COO})	0,5375
	<i>Hot Full Power</i>	Raio externo do combustível (R_{FO})	0,4583
		Raio interno do revestimento (R_{COI})	0,4659
		Raio externo do revestimento (R_{COO})	0,5385

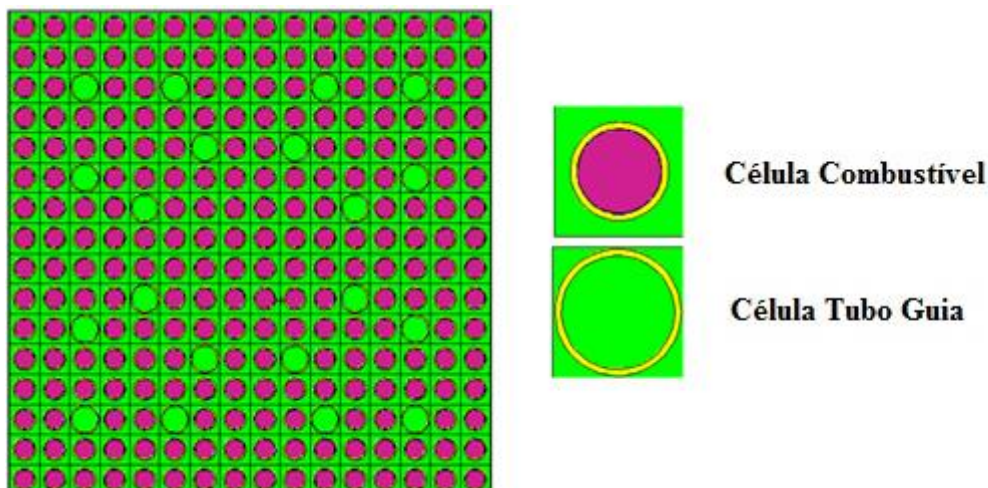


Figura 10: Elemento Combustível 16x16.

A composição isotópica utilizada nas simulações é apresentada na Tabela 4. Baseado no documento de referência (Eletrobrás Termonuclear 1999), três enriquecimentos foram considerados: 1,9%, 2,5% e 3,2% e o revestimento das varetas de combustíveis é constituído por Zircaloy-4. As simulações não consideram boro diluído no moderador.

Tabela 4: Composição isotópica utilizada nas simulações.

Região	Isótopos	Concentração (Densidade Atômica)
Combustível (1,9 %)	^{235}U	4,46279E-04
	^{238}U	2,27511E-02
	^{16}O	4,63947E-02
Combustível (2,5 %)	^{235}U	5,87215E-04
	^{238}U	2,26121E-02
	^{16}O	4,63987E-02
Combustível (3,2 %)	^{235}U	7,51613E-04
	^{238}U	2,24491E-02
	^{16}O	4,64015E-02
Gap	^3He	1,50456E-07
	^4He	1,50456E-01
Revestimento	Zr (nat)	4,25403E-02
	Sn (nat)	4,82542E-04
	Fe (nat)	1,48560E-04
	Cr (nat)	7,59777E-05
	Hf (nat)	2,21335E-06
Moderador (0 ppm de boro)	^1H	4,71981E-02
	^{16}O	2,35991E-02

3.3. 2ª ETAPA: SIMULAÇÃO DO COMBUSTÍVEL ANELAR

Nesta parte do trabalho o MCNPX 2.6.0 foi utilizado para simular os ECAs com objetivo de comparar os resultados com o ECP 16. Essas simulações ocorreram em duas distintas etapas. Na primeira, os ECAs foram simulados de acordo com o enriquecimento originalmente utilizado nos ECP, ou seja, 3,2%. Na segunda etapa, os ECAs foram simulados variando o enriquecimento de 3,3% a 4,0%. Esta metodologia foi empregada para obter valores de k_{inf} semelhantes ao elemento combustível padrão de referência (ECP 16). Após essas etapas, as configurações dos ECAs com os novos valores de enriquecimentos foram simuladas com o objetivo de estimar a criticalidade, o fluxo neutrônico, fator de pico e distribuição de potência. Nesta fase do trabalho, as análises foram realizadas em estado estacionário. Os detalhes da configuração dos ECAs bem como dos parâmetros avaliados são descritos a seguir.

3.3.1. CONFIGURAÇÃO DO ELEMENTO COMBUSTÍVEL ANELAR

Três elementos combustíveis anelares foram avaliados. O número de varetas de tais elementos foi baseado em trabalhos anteriores (Kazimi, Hejzlar et al. 2006), mas as dimensões externas bem como a razão V_M/V_F (Volume Moderador/Volume Combustível) foram baseadas no ECP 16. Na Figura 11, é apresentada a configuração dos ECAs onde as seguintes nomenclaturas foram empregadas:

- ECA 13 – Elemento Combustível Anelar– dimensão 13x13;
- ECA 14 – Elemento Combustível Anelar– dimensão 14x14;
- ECA 15 – Elemento Combustível Anelar– dimensão 15x15.

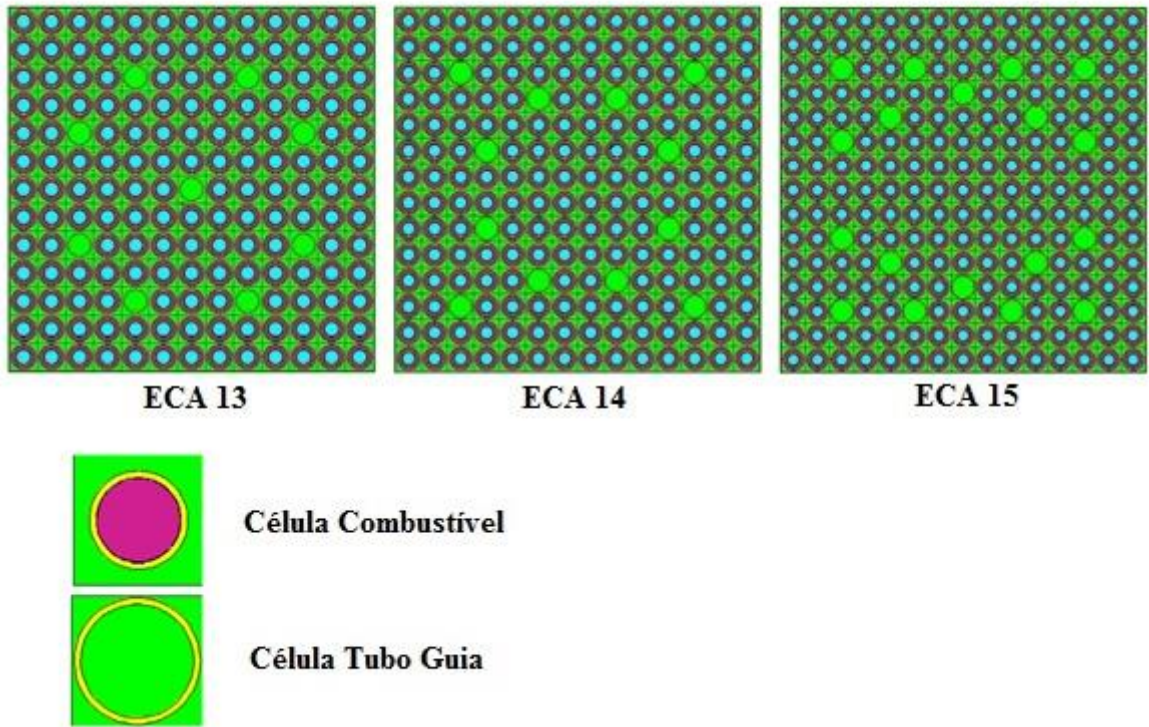


Figura 11: Elementos Combustíveis anelares simulados na pesquisa.

Usando a mesma metodologia de modelagem do ECP 16, os ECAs foram configurados usando uma malha quadrada onde cada célula desta malha representa uma célula combustível ou uma célula que contém o tubo guia. O ponto principal em tais configurações é manter a mesma razão V_M/V_F do ECP 16 validado anteriormente. Assim, os raios externos (R_{FO}) da pastilha combustível dos ECAs foram calculados visando obter a mesma razão V_M/V_F do ECP 16. Este cálculo foi baseado no seguinte método:

$$\left[\frac{V_M}{V_F} \right]_{ECP16} = \left[\frac{V_M}{V_F} \right]_{ECAs} \equiv R \quad (1)$$

Isto é;

$$R = \frac{S_{FA} - \pi \cdot n_f \cdot (R_{COO}^2 - R_{CI}^2) - \pi \cdot n_g \cdot (R_{COO}^2 - R_{COI}^2)}{\pi \cdot n_f \cdot (R_{FO}^2 - R_{FI}^2)} \quad (2)$$

onde:

$$\frac{V_M}{V_F} \equiv R = \text{Razão volume moderador / volume combustível do ECP 16;}$$

R_{CI} é o raio interno do revestimento interno;

R_{CIO} é o raio externo do revestimento interno;

R_{FI} é o raio interno do combustível;

R_{FO} é o raio externo do combustível;

R_{COI} é o raio interno do revestimento externo;

R_{COO} é o raio externo do revestimento externo;

S_{FA} é a área do elemento combustível;

n_f é o número de Varetas Combustíveis; e

n_g é o número de Tubos Guias.

Na Figura 12, é apresentada a nomenclatura utilizada nas simulações, em relação aos raios internos das varetas combustíveis.

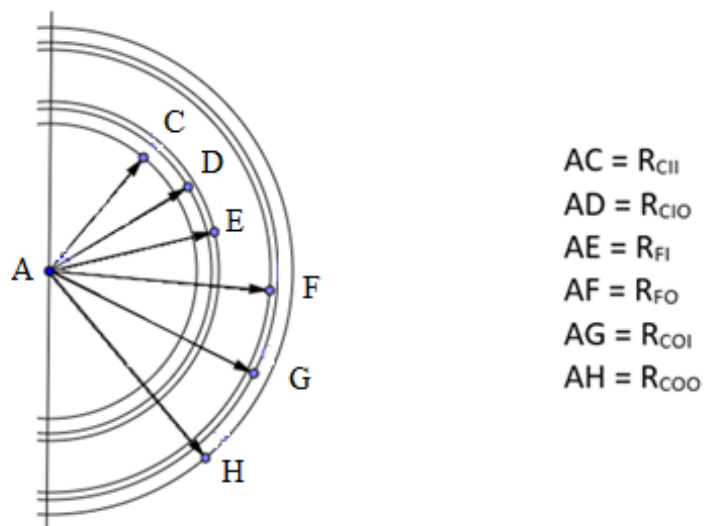


Figura 12: Determinação das nomenclaturas utilizadas nas varetas simuladas.

Assim, após isolar o termo de interesse (R_{FO}) na equação (2), obtém-se a seguinte equação:

$$A \cdot R_{FO}^2 + B \cdot R_{FO} + C = 0 \quad (3)$$

onde:

$$A = n_f \cdot \pi \cdot (1 + R);$$

$$B = 2 \cdot n_f \cdot \pi \cdot (e_G + e_R);$$

$$C = n_f \cdot \pi \cdot [(e_G + e_R)^2 - R_{CI}^2 - R \cdot R_{FI}^2] + n_g \cdot \pi \cdot (R_{COO}^2 - R_{COI}^2);$$

e_G representa a espessura do gap; e

e_R representa a espessura do revestimento.

Finalmente, através da equação (3) calcula-se o raio externo da pastilha de combustível:

$$R_{FO} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (4)$$

Na Tabela 5, informam-se as características geométricas das varetas combustíveis, dos tubos guias, o valor do *Pitch Distance* e demais informações relacionadas às simulações dos ECAs. Os raios calculados pelas fórmulas deduzidas anteriormente estão destacados em seus respectivos arranjos.

Tabela 5: Dados dos Elementos Combustíveis simulados.

Parâmetro		ECP 16	ECA 13	ECA 14	ECA 15
Raio vareta combustível, (cm)	R_{cii}	-	0,4317	0,3767	0,3367
	R_{cio}	-	0,4888	0,4338	0,3938
	R_{FI}	-	0,4950	0,4400	0,4000
	R_{FO}	0,4583	0,7314	0,6656	0,6155
	R_{coi}	0,4659	0,7390	0,6732	0,6231
	R_{coo}	0,5385	0,8116	0,7458	0,6957
Raio Tubo Guia (cm)	Interno	0,6200	0,7000	0,7000	0,7000
	Externo	0,6900	0,7683	0,7683	0,7683
Nº Varetas Combustível		236	160	184	207
Nº Tubos Guias		20	09	12	18
<i>Pitch Distance</i>		1,43	1,76	1,63	1,52
Volume (cm ³)	V_M	118066	110471	109294	107925
	V_F	60733	56823	56217	55516
V_M/V_F		1,944023	1,944023	1,944023	1,944023

3.3.2. AVALIAÇÃO DA CRITICALIDADE DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS

Os valores de criticalidade foram avaliados em estado estacionário para duas condições. Na primeira análise, os elementos combustíveis foram simulados em condições de *Hot Full Power*. As temperaturas de simulação foram baseadas em documentos de referência (Eletrobrás Termonuclear 1999). A Tabela 6 mostra a temperaturas e os enriquecimentos usados nas simulações. Conforme mostrado nesta tabela, o combustível do ECP 16 possui um enriquecimento de 3,2% conforme documento de referência (Eletrobrás Termonuclear 1999). Em relação ao ECAs, para obter k_{inf} próximos ao do ECP 16, valores de enriquecimento de 3,2% a 4,0 % foram avaliados. Neste caso, apenas a composição do combustível foi alterada. A concentração isotópica dos outros componentes, bem como as dimensões geométricas não foram modificadas.

Tabela 6: Temperatura empregada nas análises de reatividade em função da variação de temperatura do combustível.

Parâmetro		ECP 16	ECA's
Temperatura	Combustível	873 K	600 K
	Gap	873 K	600 K
	Revestimento	618 K	587 K
	Moderador	587 K	587 K
Enriquecimento		3,2 %	3,3% – 4,0%

Na segunda análise, avaliou-se o comportamento do combustível em função da variação da temperatura. Neste caso, variou-se a temperatura do combustível e manteve-se constante a temperatura dos demais componentes dos elementos combustíveis. A Tabela 7 apresenta a temperatura empregada nos oito casos simulados onde o gap, o revestimento e o moderador foram mantidos a 273 K. O enriquecimento usado neste estudo foi determinado após as análises iniciais de criticalidade descritas anteriormente. Este estudo foi realizado com a finalidade de verificar se os sistemas avaliados são intrinsecamente seguros em relação a variação de temperatura.

Tabela 7: Temperaturas utilizadas nas simulações.

Região	Caso							
	01	02	03	04	05	06	07	08
Combustível	300	400	500	600	800	900	1000	1200
Gap	273	273	273	273	273	273	273	273
Revestimento	273	273	273	273	273	273	273	273
Moderador	273	273	273	273	273	273	273	273

Em todos os casos simulados de criticalidade não foi utilizado boro no moderador e, em ambos os procedimentos, utilizaram-se os parâmetros geométricos e composição anteriormente descritos na Sessão 3.1.

3.3.3. ANÁLISE DO FLUXO NEUTRÔNICO E DA DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA

O código MCNPX 2.6.0 é capaz de estimar a fluência e a taxa de reação em qualquer região da vareta combustível, ou do elemento combustível, ou núcleo do reator. Entretanto, o fluxo neutrônico e distribuição de potência são estimados indiretamente. Para o cálculo do fluxo emprega-se a seguinte equação (Hendricks et al., 2008):

$$\phi_N = \phi_{MCNP} \cdot \left[\frac{P \cdot \nu}{Q \cdot k \cdot C} \right] \quad (5)$$

onde:

ϕ_N é o fluxo estimado no elemento combustível $\left(\frac{N^\circ \text{ de nêutrons}}{cm \cdot \text{segundo}} \right)$;

ϕ_{MCNP} é a fluência estimada no elemento combustível $\left(\frac{N^\circ \text{ de nêutrons}}{cm} \right)$;

P é potência média no elemento combustível (MW);

ν é o número médio de nêutrons por fissão (estimado pelo código);

Q é a energia média liberada por fissão ($\cong 200$ MeV);

k é o fator de multiplicação do sistema nuclear simulado (estimado pelo código); e

C é a constante utilizada para transformar eV para J ($\cong 1.6022 \times 10^{-19}$ J).

No cálculo da distribuição de potência, foi utilizado o seguinte procedimento:

$$dp_C = N_C \cdot \frac{P_C}{P_T} \quad (6)$$

onde:

dp_C é a distribuição de potência estimada na célula;

N_C é número total de célula geradora de potência em um elemento combustível;

P_T é a potência total das células;

P_C é a potência nas células;

Ora, a potência total das células e a potência em uma célula pode ser calculada respectivamente por:

$$P_T = \sum_1^{N_C} P_C = P_1 + P_2 + \dots + P_{N_C} \quad (7)$$

e

$$P_C = R_C \cdot \left[\frac{V_C \cdot P \cdot \nu}{Q \cdot k_{eff} \cdot 3,12 \times 10^{10}} \right] \quad (8)$$

onde:

R_C é a taxa de reação calculada pelo MCNPX para uma única célula;

V_C é o volume da célula;

P é a potência média da célula;

ν é o número médio de nêutrons por fissão (estimado pelo código);

Q é a energia média liberada por fissão ($\cong 200$ MeV); e

k_{eff} é o fator de multiplicação do sistema nuclear simulado (estimado pelo código).

Agora, substituindo a equação (8) em (7) e considerando que para um mesmo sistema, em uma determinada condição V_C, P, Q, ν e k_{eff} será constante, vem que:

$$P_T = \left[\frac{V_C \cdot P \cdot \nu}{Q \cdot k_{eff} \cdot 3,12 \times 10^{10}} \right] \cdot \sum_1^{N_C} R_C \quad (9)$$

Portanto, substituindo as equações (8) e (9) em (6), obtém-se:

$$dp_c = N_C \cdot \frac{R_C}{\sum_1^{N_C} R_C} \quad (10)$$

onde $\sum_1^N R_C$ é o somatório de todas as taxas de reação geradas pelo elemento combustível. Desta forma, a distribuição de potência de um determinado sistema nuclear modelado no MCNPX pode ser calculado a partir das taxas de reação (R_C) estimadas em cada célula deste sistema. Para calcular o fluxo e a distribuição de potência dos elementos combustíveis, uma malha em 3D foi configurada dentro sistema modelado. O MCNPX

estima a fluência e/ou as taxas de reações dentro de cada célula desta malha. No cálculo do fluxo, foi configurada uma malha 16 x 16 x 01. Para obter a distribuição de potência radial, a malha foi configurada para coincidir com as dimensões do *Pitch Distance* do elemento combustível. Por exemplo, para o ECA 13, foi modelada uma malha 13 x 13 x 01 (o mesmo método foi empregado para os demais elementos combustíveis). Desta forma, calcula-se a potência relativa dentro de cada célula do ECP e dos ECAs.

Para obter a distribuição de potência axial, uma malha de 01 x 01 x 24 foi considerada. Assim, os 24 valores axiais representam a potência relativa média de cada um desses planos.

3.3.4. ANÁLISE DO FATOR PICO DE POTÊNCIA

Configurações de sistemas nucleares heterogêneos apresentam variações espaciais do fluxo neutrônico e da potência devido a diferenças da composição isotópica deste sistema. Este comportamento possui uma função importante no projeto de reatores nucleares. Sempre que houver recarga do núcleo, inserção de barras de controle e/ou veneno queimável, etc, tal comportamento precisa ser avaliado. Desta forma, em análises neutrônicas e termo-hidráulicas o conhecimento do fluxo neutrônico e/ou da potência local é fundamental. O fator pico de potência (F_{PP}) é definido como a razão entre a potência local máxima (P_{LM}) e a potência média do sistema nuclear estudado (P_{MS}); isto é:

$$F_{PP} = \frac{P_{LM}}{P_{MS}} \quad (11)$$

Sendo que a potência está em função do fluxo, a equação anterior pode ser reescrita como (DUDERSTADT, 1977):

$$F_{PP} = \frac{\phi_{LM}}{\phi_{MS}} \quad (12)$$

onde:

ϕ_{LM} representa o fluxo local máximo; e

ϕ_{MS} representa o fluxo médio do sistema nuclear avaliado.

Portanto, o fator pico de potência pode ser determinado a partir dos valores do fluxo nêutronico de cada célula do sistema. As simulações realizadas com o MCNPX 2.6.0 emprega a equação (11), para calcular o fator pico de potência. O código determina os valores de fluxo (ϕ_{LM} e ϕ_{MS}) e posteriormente o F_{PP} é indiretamente calculado pelo usuário. Neste sentido, para estimar o fluxo espacial do sistema modelado, uma malha retangular coincidente com as dimensões do *Pitch Distance* foi configurada dentro de cada elemento combustível. Desta maneira, obtêm-se os valores do fluxo local (ϕ_L) em cada célula desta malha. No entanto, o fluxo médio do sistema (ϕ_{MS}) foi calculado considerando o volume total do EC. Neste caso, considera-se todo elemento combustível como uma única célula. Finalmente, a razão ϕ_L/ϕ_{MS} foi calculada para todas as células da malha onde o maior valor desta razão representa o F_{PP} .

3.4. 3ª ETAPA: AVALIAÇÃO DA QUEIMA DO ECP 16 E DOS ECAs.

Após as análises dos parâmetros neutrônicos em estado estacionário, a queima foi simulada utilizando o MCNPX 2.6.0. Esta metodologia foi empregada visando avaliar o ciclo do combustível para ECAs que apresentarem comportamentos promissores para futuros estudos. O objetivo dessa etapa do trabalho é analisar os valores de criticalidade durante a queima e também a evolução de composição do combustível. Neste estudo, os valores de densidade específica de potência e de queima foram respectivamente de 38 W/gU e de 33 GWd/ton. As simulações foram executadas em condições de *Hot Full Power* onde os valores de temperatura são os mesmos apresentados na Tabela 6. Os enriquecimentos dos ECAs foram determinados após as primeiras análises de criticalidade descritas no item 3.3.2. Demais parâmetros relacionados à composição do gap, revestimento e moderador estão de acordo com a Tabela 4 apresentada previamente. Em todos os casos não foi utilizado boro diluído no moderador e utilizou-se os parâmetros geométricos anteriormente descritos na Sessão 3.1.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. VALIDAÇÃO DO ECP

Na Tabela 8, são apresentados os valores de (k_{inf}) e o desvio padrão (σ) relacionados aos valores estimados pelo MCNPX 2.6.0 e SCALE 6.0. Em geral, as diferenças de valores entre os dois códigos utilizados permaneceram menores nas simulações ocorridas à *Zero Cold Power* do que *Hot Full Power*, mas em todos os casos, tais diferenças se encontram na terceira casa decimal.

Nas simulações realizadas à *Zero Cold Power*, as diferenças entre os valores ficaram inferiores a $0,007E+05$. Nos casos relacionados à *Hot Full Power*, todas as simulações permaneceram acima do valor acima descrito de $0,007E+05$, mas mantendo-se ainda na terceira casa decimal. Este comportamento pode ser explicado pelas diferentes bibliotecas utilizadas em ambos os programas.

Os resultados observados na validação confirmam os valores encontrados nas simulações nos códigos MCNPX 2.6.0 e SCALE 6.0, pois as diferenças encontradas se mantiveram na terceira casa decimal. Tais diferenças são aceitáveis em análises de criticalidade e, portanto, os modelos configurados em tais códigos podem ser empregados para cálculo do k_{inf} destes sistemas.

Tabela 8: Valores de criticalidade a 0 ppm de boro.

<i>Zero Cold Power</i>					
Enriquecimento do Combustível	k_{inf}			σ	
	MCNPX	SCALE	Diferença	MCNPX	SCALE
1,9%	1,25403	1,25173	0,0023E+05	0,00032	0,00058
2,5%	1,32862	1,32484	0,0037E+05	0,00038	0,00054
3,2%	1,38464	1,38099	0,0036E+05	0,00039	0,00055
<i>Hot Full Power</i>					
Enriquecimento do Combustível	k_{inf}			σ	
	MCNPX	SCALE	Diferença	MCNPX	SCALE
1,9%	1,23316	1,22328	0,0098E+05	0,00038	0,00058
2,5%	1,30545	1,29798	0,0074E+05	0,00038	0,00057
3,2%	1,36096	1,35379	0,0071E+05	0,00041	0,00062

4.2. SIMULAÇÃO DO COMBUSTÍVEL ANELAR

4.2.1. AVALIAÇÃO DA CRITICALIDADE DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS

Na Figura 13, são apresentados os valores de k_{inf} em função do tipo de elemento combustível simulado nos enriquecimentos à 3,2%. Tais valores estão diretamente relacionados à quantidade de material físsil dos elementos. Como pode ser visto na Tabela 5, apresentada anteriormente, os elementos combustíveis têm diferentes volumes de combustível. Nota-se que o ECP 16 e o ECA 15 possuem, respectivamente, maior e menor volume de UO_2 . Assim, tais elementos apresentam respectivamente o maior e o menor valor de k_{inf} . O valor de desvio padrão médio das simulações dessa etapa foi de 0,00048.

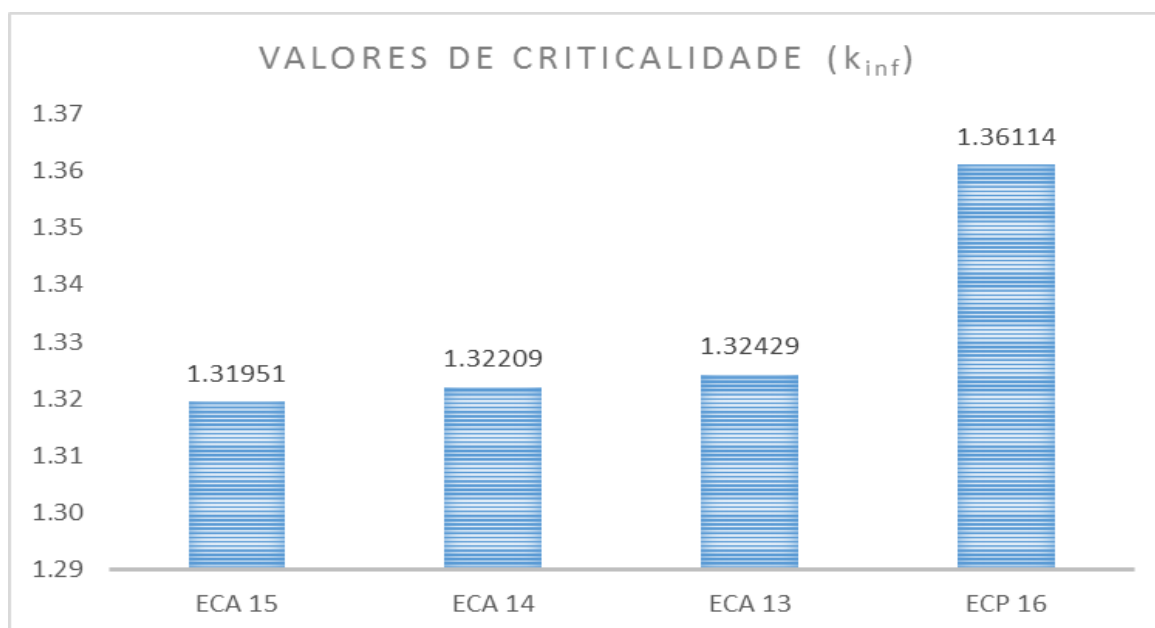


Figura 13: Valores de k_{inf} dos ECAs e ECP 16 enriquecidos a 3,2%.

Para obter valores de k_{inf} próximos ao ECP 16, o enriquecimento do combustível dos ECAs foi alterado de 3,2 % a 4,0 %. A Figura 14 apresenta o k_{inf} do ECA 13, ECA 14 e ECA 15 para valores de enriquecimento de 3,2 % a 4,0%. De modo geral, o comportamento das curvas em relação ao enriquecimento se mostram semelhantes em todos os casos simulados. Conforme o esperado, os valores de k_{inf} possui, em todos os casos simulados, uma relação direta: quanto maior o enriquecimento, maior o valor de criticalidade. Entre os ECAs estudados, nota-se que para um mesmo enriquecimento, há uma redução de k_{inf} conforme o aumento do número de varetas combustíveis; isto é, o ECA 13 possui maior

k_{inf} enquanto o ECA 15 apresenta o menor valor deste parâmetro. Este comportamento pode ser devido ao diferente volume do combustível e do moderador entre os ECAs. A Tabela 5 mostra que o ECA 13 possui maior volume de combustível e de moderador enquanto o ECA 15 apresenta menor volume de tais grandezas. Portanto, é possível que esta característica provoque diferenças no k_{inf} mesmo considerando um mesmo valor de enriquecimento.

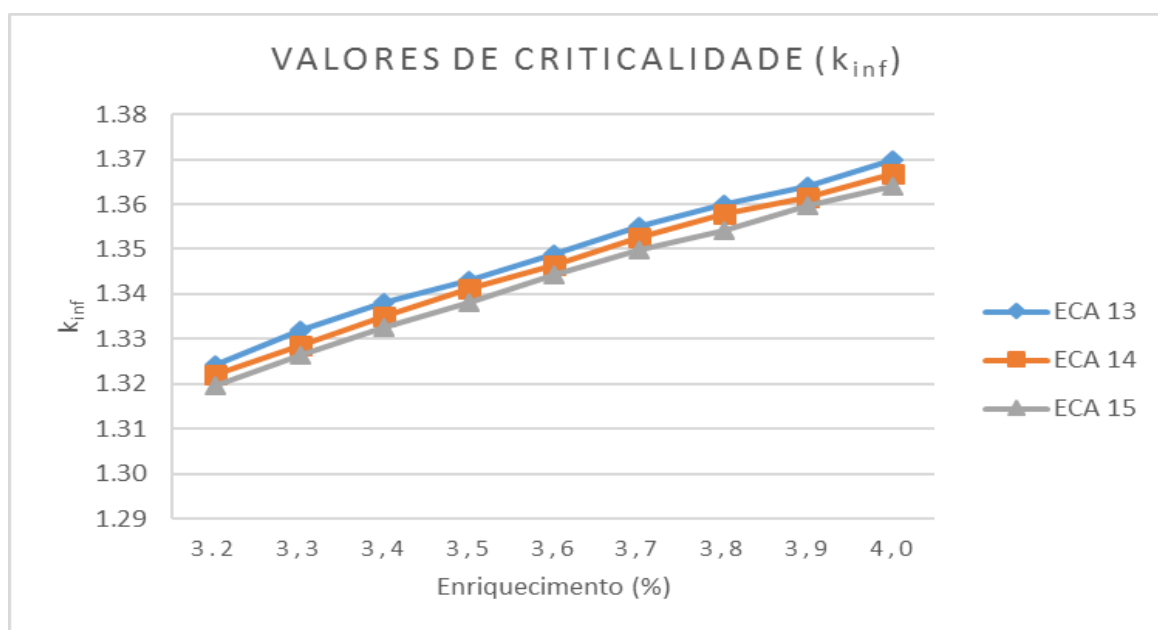


Figura 14: Gráfico k_{inf} x Enriquecimento.

Na Tabela 9, são apresentados os valores do k_{inf} em função do enriquecimento utilizado nessa etapa da pesquisa, com o erro médio estimado em 0,00040. Como pode ser observado na Figura 13, o ECP 16 possui $k_{inf} = 1,36114$. Através da Tabela 8 nota-se que os enriquecimentos de 3,8 % e de 3,9% geram valores de k_{inf} mais próximos daquele encontrado no ECP 16. Assim, nas próximas etapas de estudo, será utilizado o enriquecimento de 3,8 % para o ECA 13 e 3,9 % para o ECA 14 e ECA 15. Visto que, no prosseguimento da pesquisa, tais enriquecimento (3,8% e 3,9%) servirão exclusivamente de parâmetros de comparação entre os elementos combustíveis anelares e padrão simulados.

A Figura 15 mostra os valores de k_{inf} em função do enriquecimento inicial (3,2%) e do enriquecimento de 3,8 % e de 3,9 %. Entre os elementos combustíveis anelares, o ECA 14 possui k_{inf} mais próximo do referencial ECP 16 e o ECA possui maior diferença (138 pcm).

Considerando análises de criticalidade, esta diferença é aceitável e, portanto, pode ser considerado que tais enriquecimentos geram valores de k_{inf} similares ao de referência ECP 16. A Tabela 10, apresenta os valores das densidades atômicas utilizadas nas simulações dos ECAs.

Tabela 9: Tabela de valores de k_{inf} em relação ao enriquecimento.

Enriquecimento	ECA 13	ECA 14	ECA 15
3,2%	1,32429	1,32209	1,31951
3,3%	1,33182	1,32851	1,32648
3,4%	1,33812	1,33493	1,33261
3,5%	1,34293	1,34124	1,33821
3,6%	1,34907	1,34649	1,34432
3,7%	1,35520	1,35275	1,34988
3,8%	1,36001	1,35797	1,35426
3,9%	1,36396	1,36160	1,35976
4,0%	1,36990	1,36682	1,36416

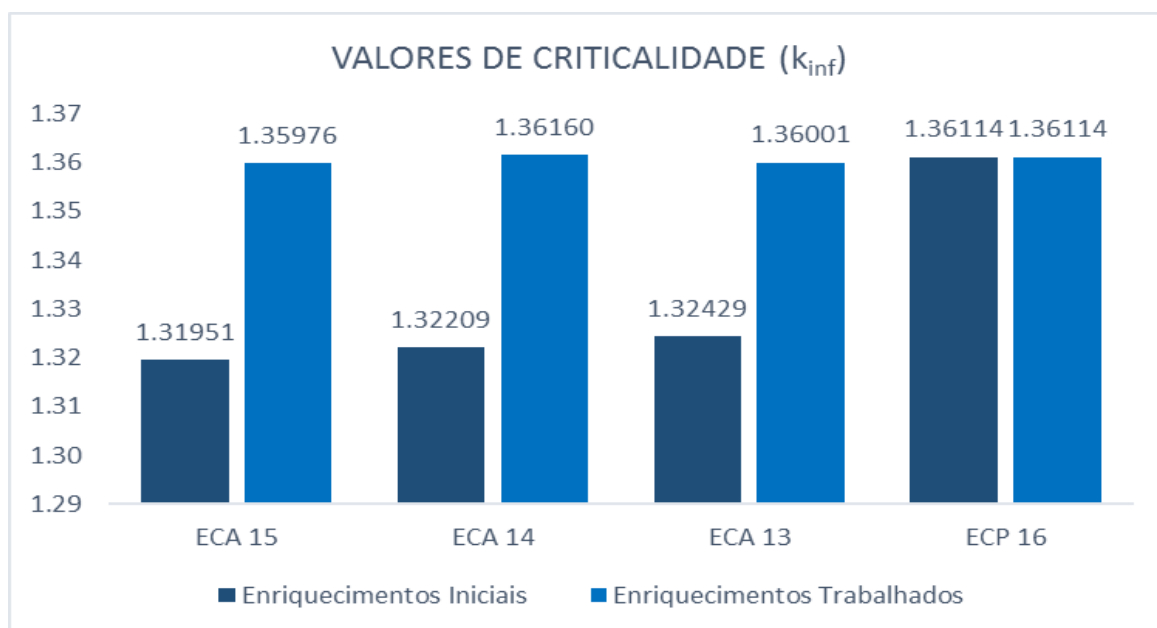


Figura 15: Comparação de valores de k_{inf} entre diferentes enriquecimentos.

Tabela 10: Composição isotópica utilizada nas simulações dos ECAs.

Enriquecimento	Isótopos	Concentração (Densidade Atômica)
Combustível (3,8 %)	^{235}U	8,92503E-04
	^{238}U	2,23090E-02
	^{16}O	4,64031E-02
Combustível (3,9 %)	^{235}U	9,15989E-04
	^{238}U	2,22858E-02
	^{16}O	4,64036E-02

Na Figura 16, é mostrado o comportamento do k_{inf} em função da variação da temperatura do combustível. O desvio padrão médio das simulações foi de 0.00048. Através desta figura constata-se a diminuição dos valores do k_{inf} com o aumento da temperatura, como esperado na pesquisa. Este comportamento pode ser explicado através do efeito *Doppler*. O aumento de temperatura provoca alargamento nos picos de ressonância; isto é, um acréscimo de temperatura gera redução da seção de choque, diminuindo assim a probabilidade de interação (LAMARSH, 1975). Em um reator, espera-se que um aumento de temperatura gere uma redução no número de fissões e, por consequência, provoque diminuição na população de nêutrons. Esta característica garante que o coeficiente de temperatura do combustível mantenha-se dentro dos parâmetros de segurança. Portanto, os comportamentos apresentados pelos ECAs, em relação a variação de temperatura, viabilizam a continuidade das pesquisas.

Em um aspecto geral, o ECP 16 apresenta maiores valores de k_{inf} em todas as temperaturas de simulação. Dentre os elementos combustíveis anelares o ECA 14 possui, valores de criticalidade mais próximo do ECP 16 de referência.

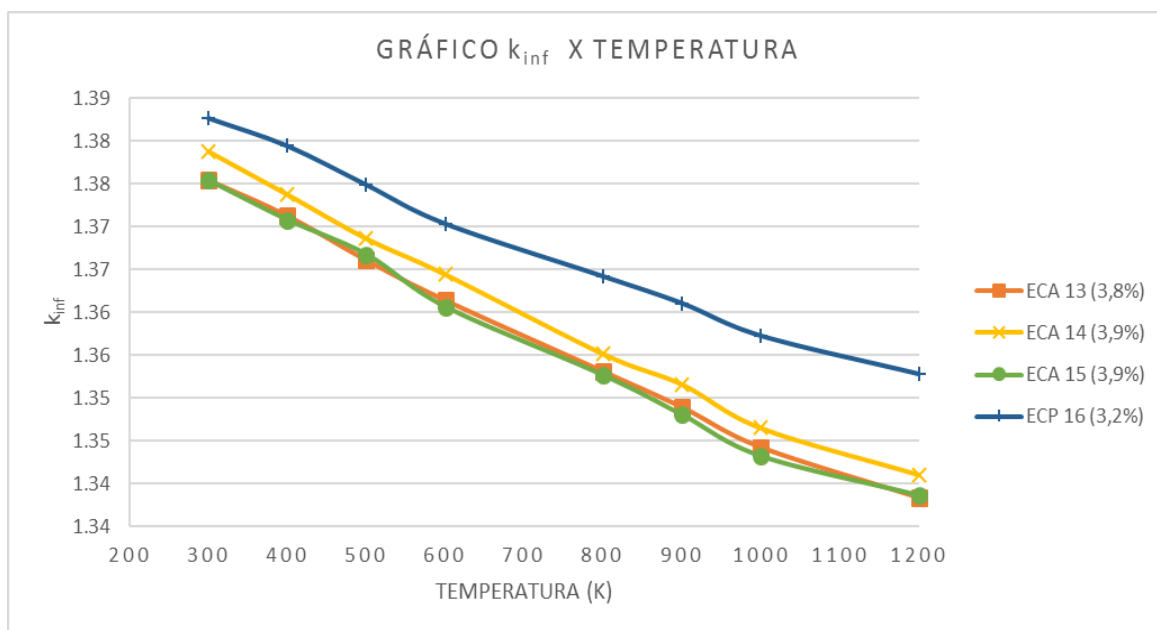


Figura 16: Gráfico comparativo k_{inf} x Temperatura

4.2.2. ANÁLISE DE FLUXO NEUTRÔNICO

Nas Figuras 17 a 20 estão ilustrados os comportamentos dos fluxos radial (ϕ_{NR}) nos elementos combustíveis ECP 16 (3,2%), ECA 15 (3,9%), ECA 14 (3,9%) e ECA 13 (3,8%) simulados com enriquecimentos previamente determinados, o erro médio estimado pelo código nessas simulações é de 0,00045. Estas figuras mostram que em todos os casos o fluxo neutrônico possui um perfil similar. O fluxo apresenta valores máximos no centro do elemento combustível e valores mínimos nas extremidades. Este perfil é o esperado para sistemas nucleares como os ECs simulados, os quais não apresentam nenhum tipo de absorvedor e de refletor. Assim, o fluxo neutrônico dos elementos combustíveis simulados apresenta comportamento típico de sistemas nucleares similares.

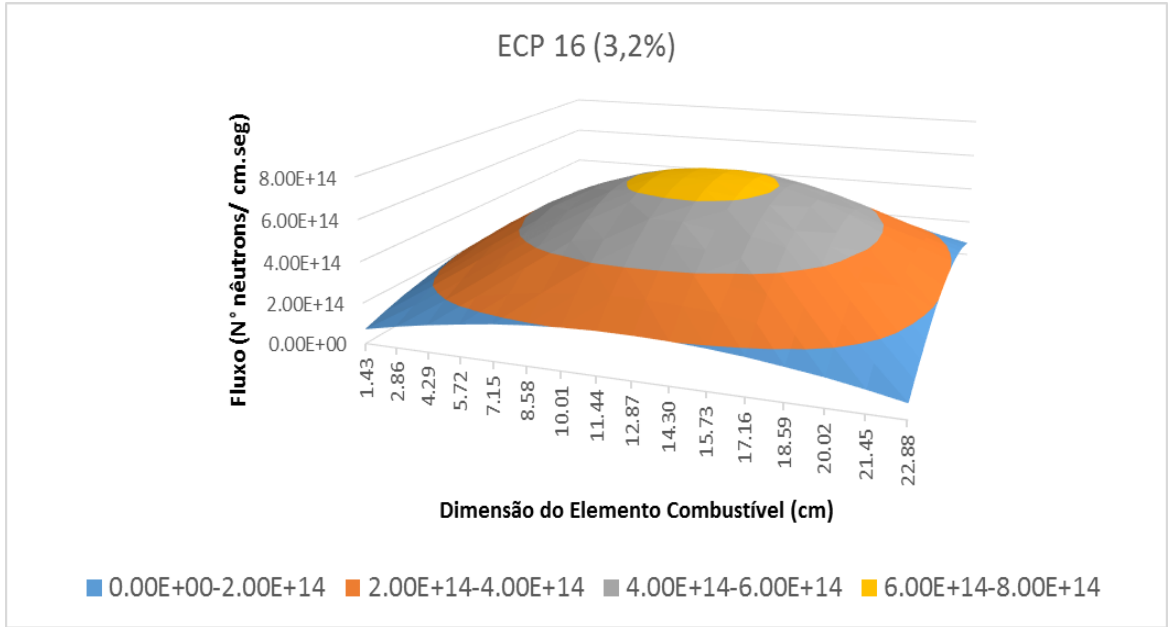


Figura 17: Fluxo ECP 16 (3,2%).

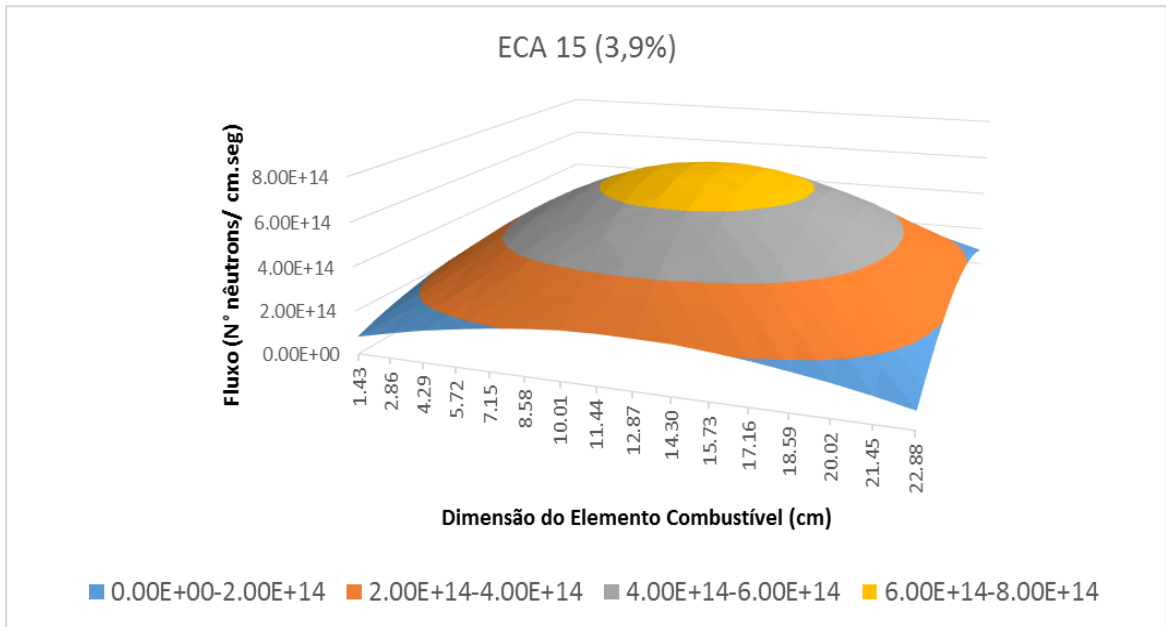


Figura 18: Fluxo ECA 15 (3,9%).

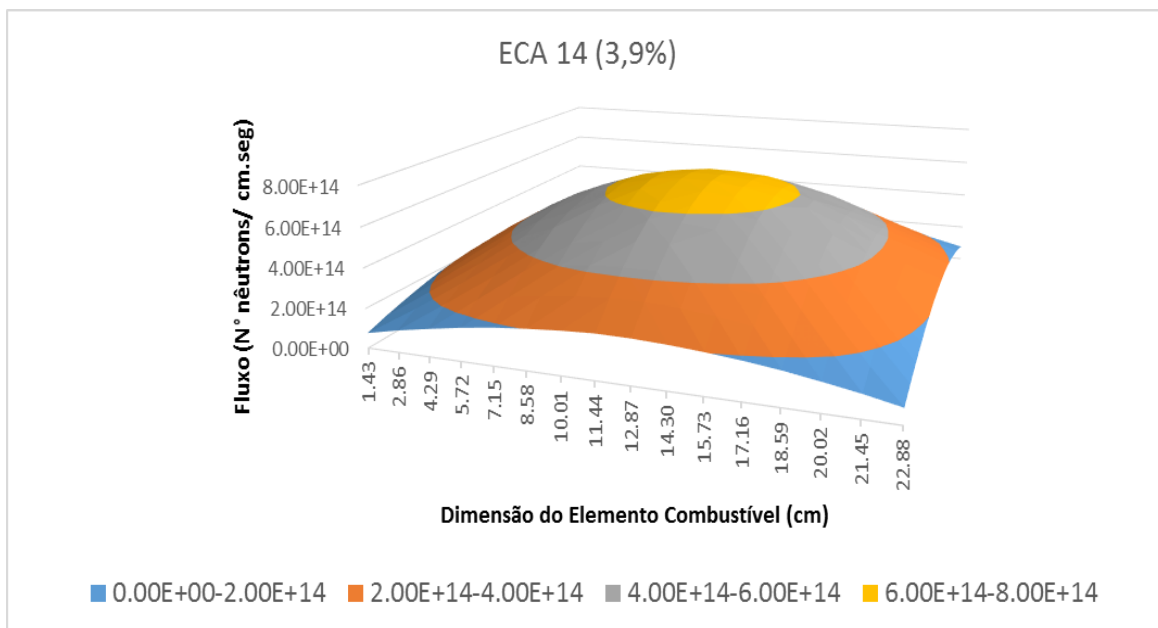


Figura 19: Fluxo ECA 14 (3,9%).

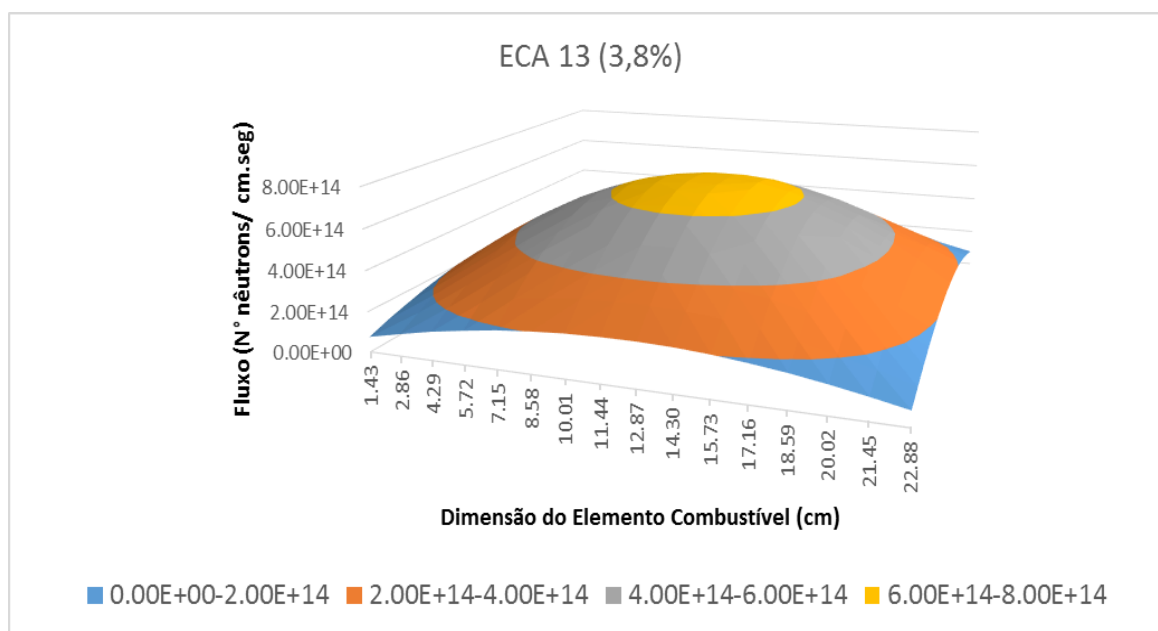


Figura 20: Fluxo ECA 13 (3,8%).

Para comparar o fluxo neutrônico entre os elementos combustíveis simulados, as Figuras 21 e 22 apresenta o perfil do ϕ_{NR} no eixo central dos ECs. Observa-se que ECP 16 e o ECA 15 possuem respectivamente os menores e os maiores valores de ϕ_{NR} . Considerando os elementos combustíveis anelares, o ECA 15 também possui os maiores valores de ϕ_{NR} enquanto o ECA 14 e o ECA 13 apresentam valores similares e menores. É possível que haja uma relação entre o número de varetas (NV) e o fluxo, pois nota-se que quanto maior o NV (no ECA 15) maior ϕ_{NR} . Este comportamento é observado apenas entre os ECAs simulados, pois o ECP 16 possui, dentre todos, a maior quantidade de varetas, mas possui os menores valores de fluxo.

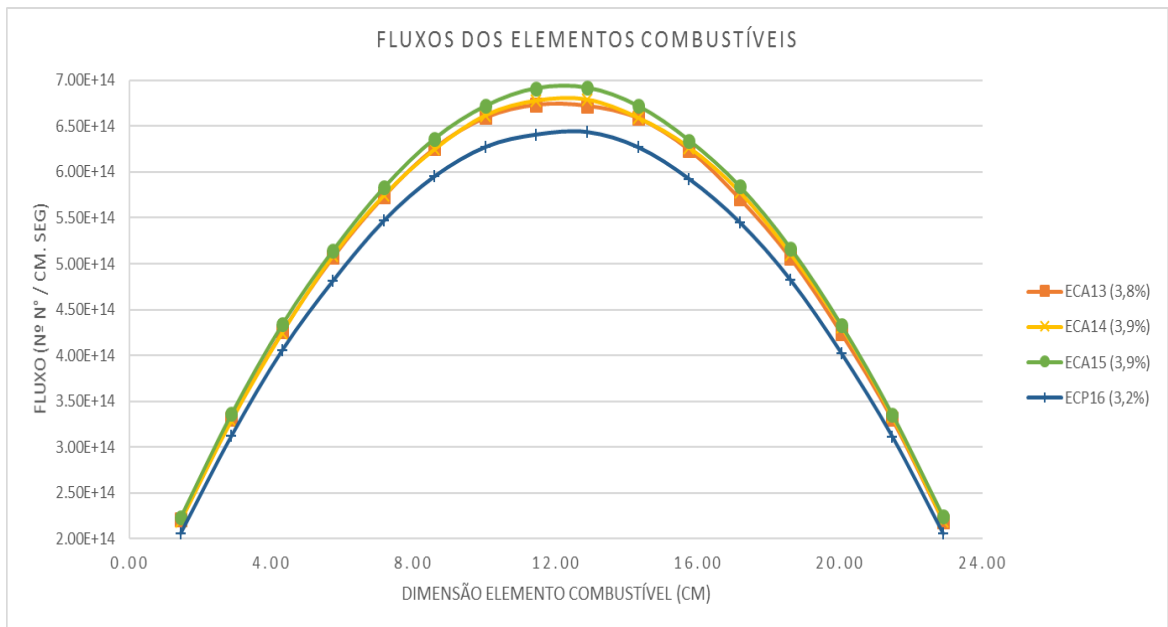


Figura 21: Gráfico comparativo fluxos dos Elementos Combustíveis.

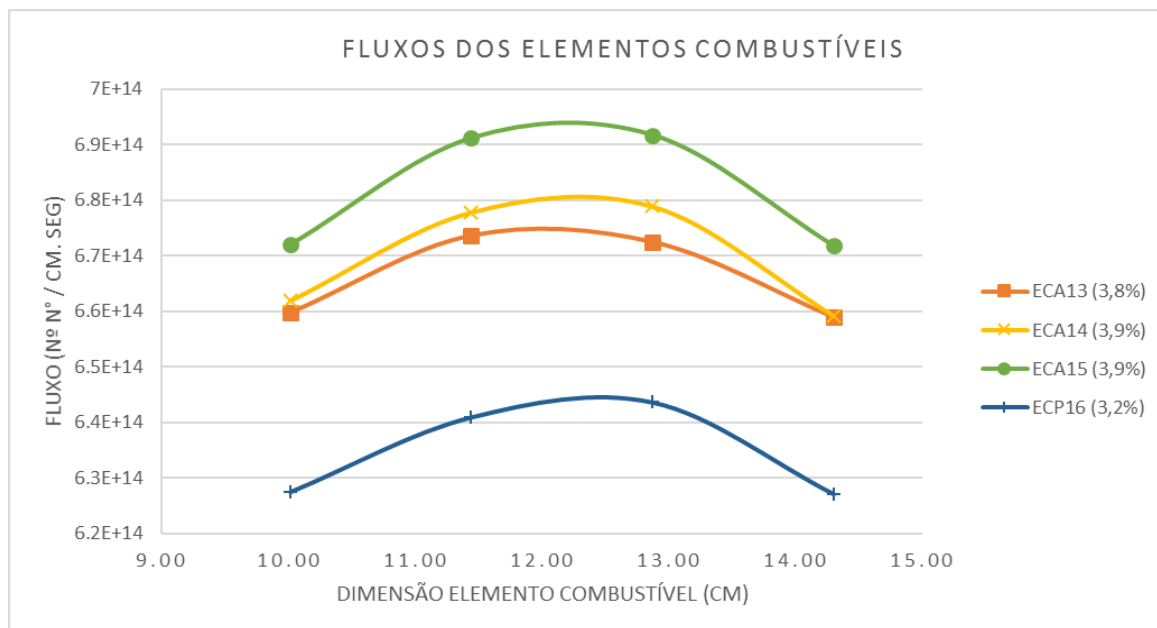


Figura 22: Gráfico comparativo fluxos dos Elementos Combustíveis (Ampliado).

Além das análises do fluxo neutrônico nos elementos combustíveis, também foram feitas análises do fluxo em uma célula do EC relativo à cada configuração. Esta célula corresponde à região do combustível, moderador e revestimento. Nas Figuras 23 e 26, estão apresentados os comportamentos dos fluxos dentro de uma célula do EC onde o termo CEL 16 se refere à célula do ECP 16, CEL 15 é relativo ao ECA 15 e assim sucessivamente. Também, as Figuras 27 e 28 mostram o perfil do fluxo no eixo central da célula do elemento combustível. Em tais Figuras, o erro relativo do código apresenta-se em média no valor de 0,0041. Conforme esperado, a CEL 16 possui um perfil diferente das demais configurações. Enquanto CEL 16 possui um pico na região central, as outras configurações apresentam um pico em formato anelar. Tal comportamento é gerado pelas diferentes zonas de combustíveis as quais provocam valores de máximos de fluxo em tais posições. Entre os casos avaliados, a CEL16 apresenta maior valor de fluxo na região do material físsil.

Em relação aos combustíveis anelares, a CEL 13 e a CEL 15 apresentam, respectivamente o maior e o menor fluxo na região de combustível. Há uma evidente diminuição do fluxo associado ao canal interno de refrigeração. Entre as varetas anelares, a CEL 13 possui maior diâmetro interno e esta característica altera os parâmetros de moderação/fissão dos nêutrons no sistema em estudo.

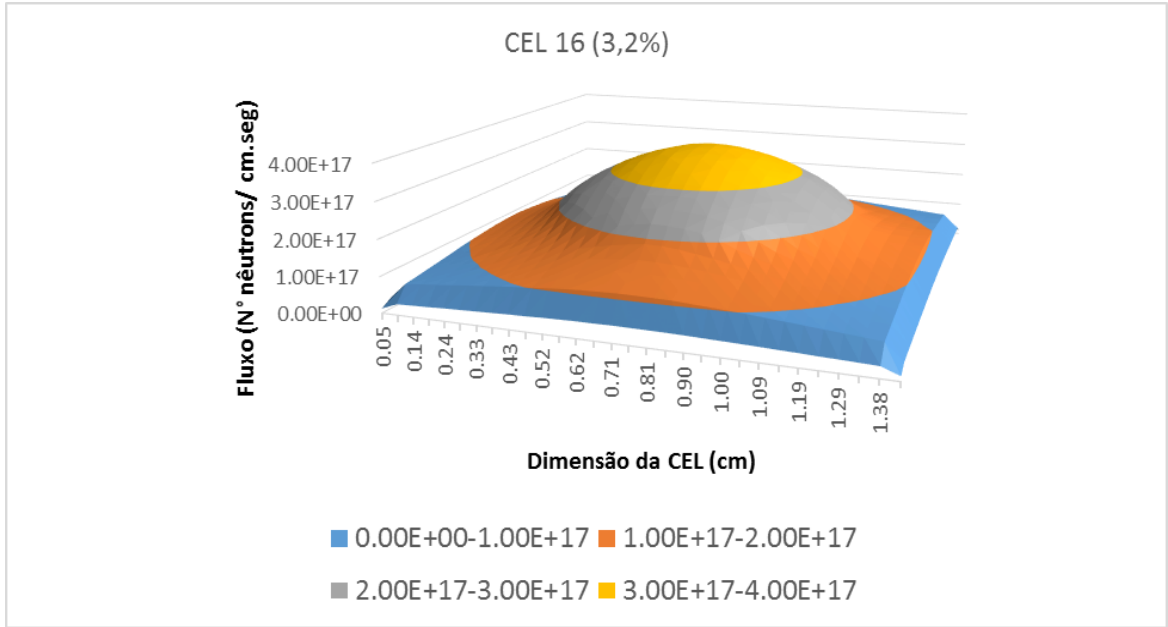


Figura 23: Fluxo CEL 16 (3,2%).

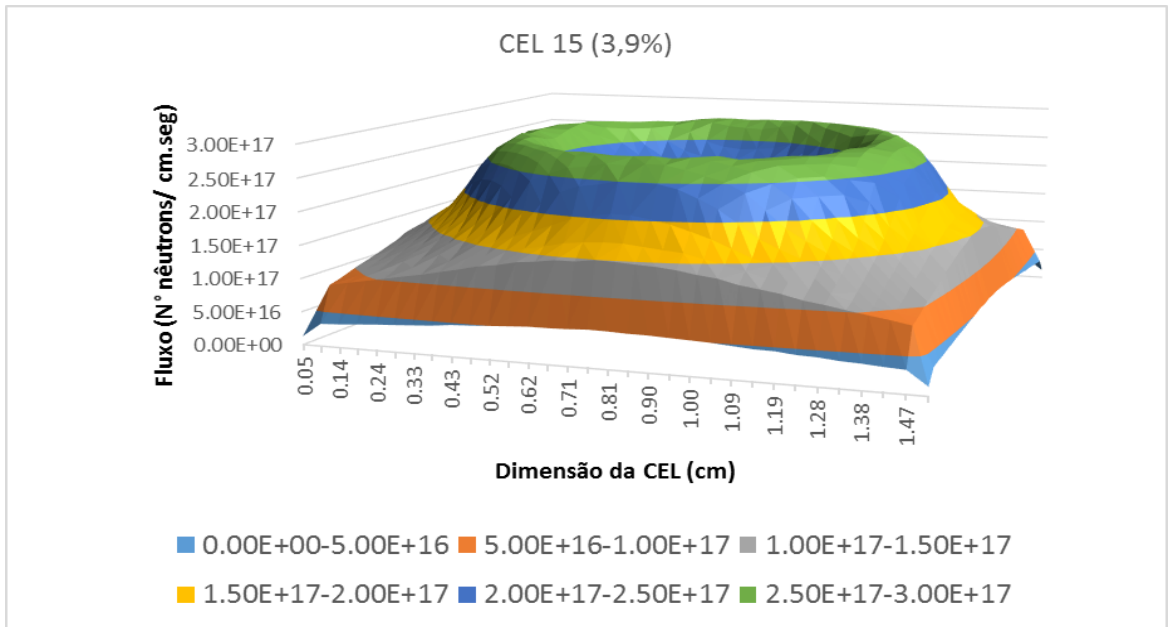


Figura 24: Fluxo CEL 15 (3,9%).

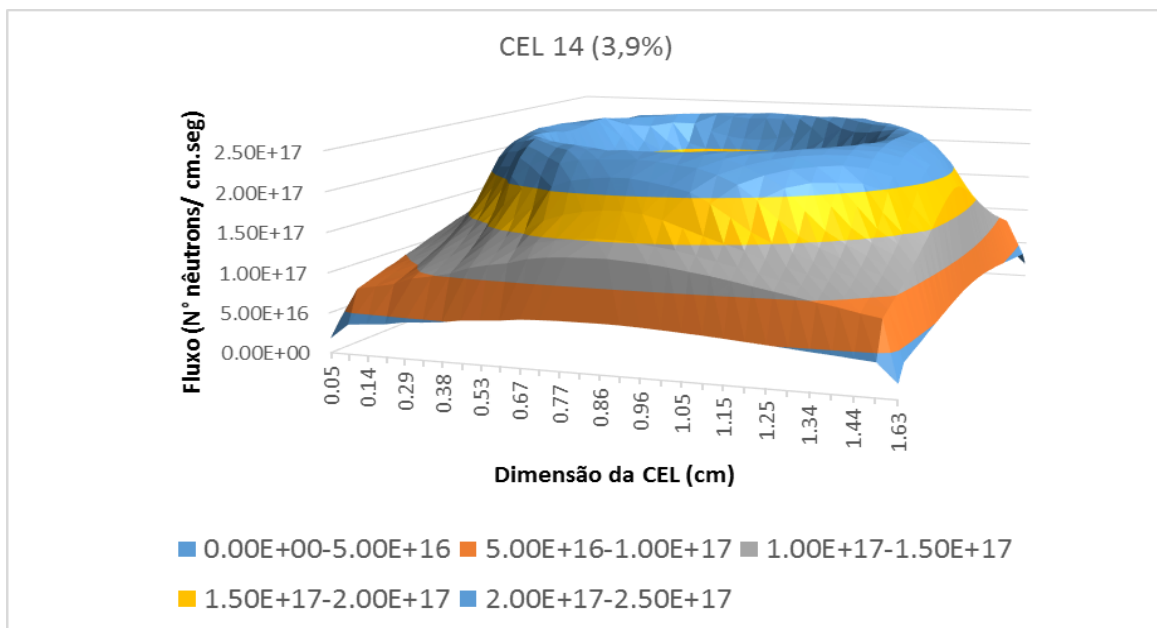


Figura 25: Fluxo CEL 14 (3,9%).

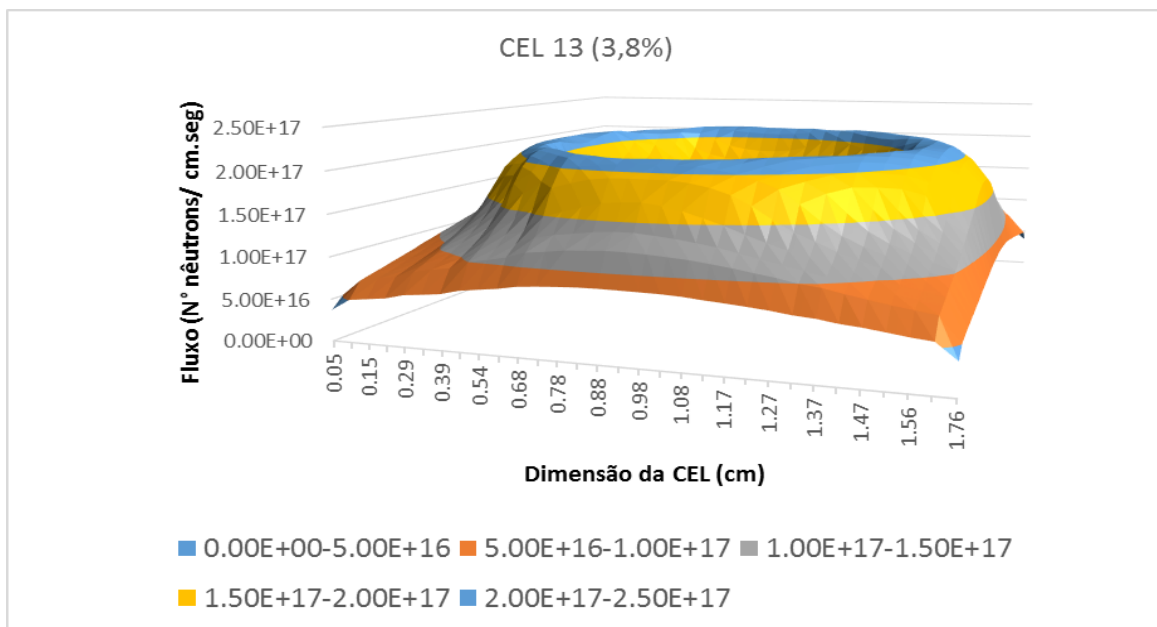


Figura 26: Fluxo CEL 13 (3,8%).

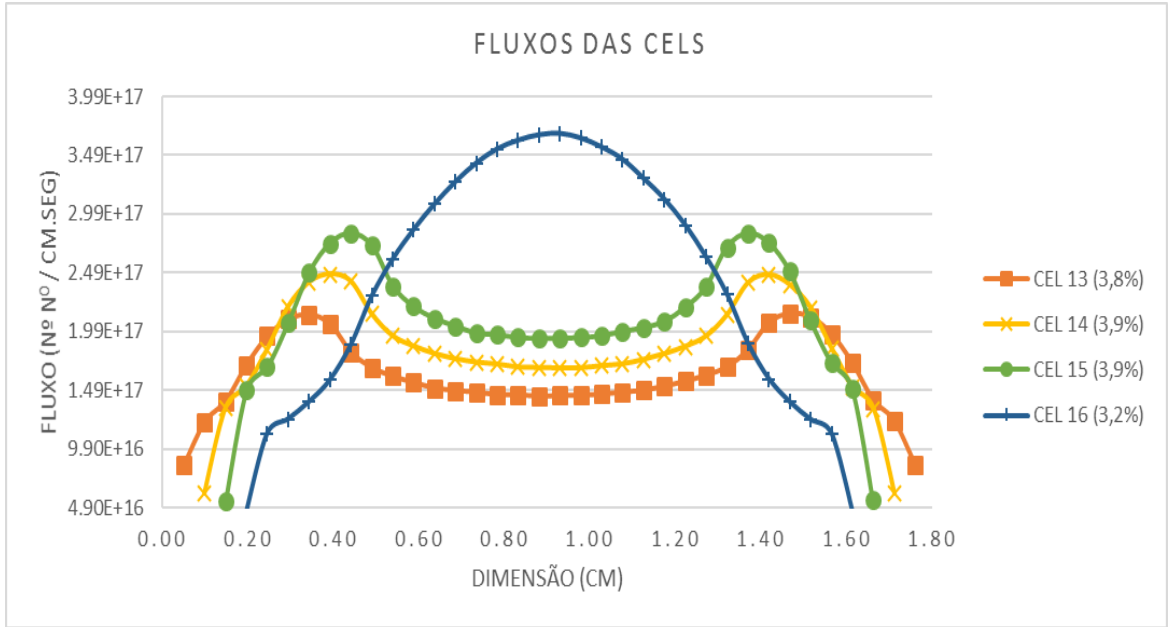


Figura 27: Gráfico comparativo dos fluxos dentro das CELS.

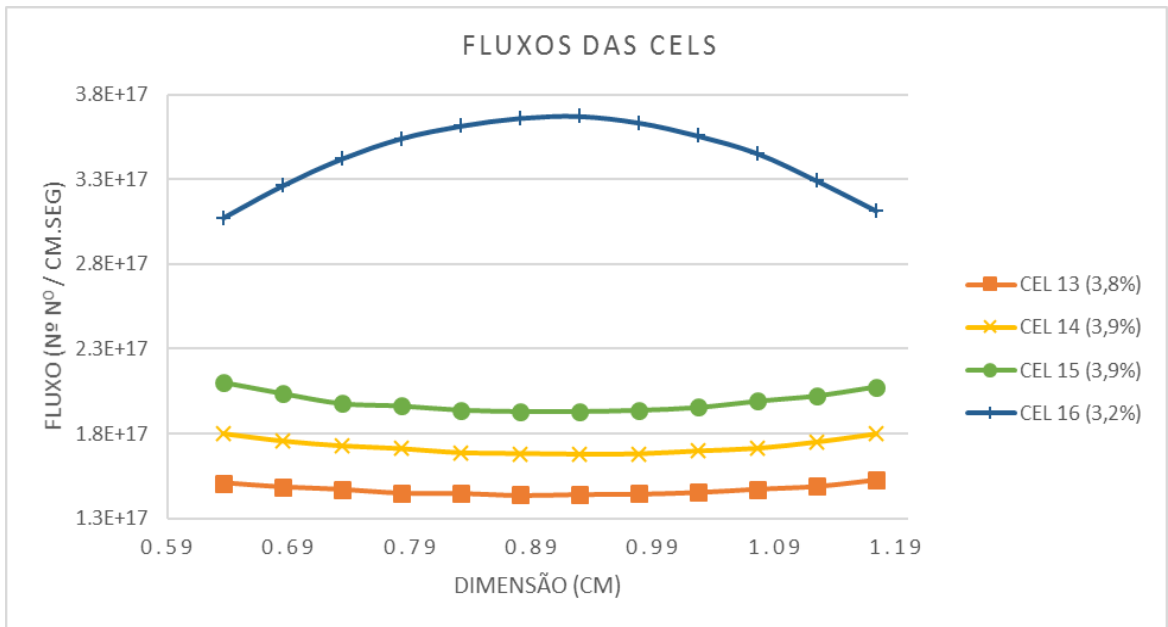


Figura 28: Gráfico comparativo dos fluxos na região central das células (Ampliado).

4.2.3. ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA

Nas Figuras 29 a 32, são mostradas as distribuições radial de potência para o ECP 16, o ECA 15, o ECA 14 e o ECA 13. As posições das barras de controle estão evidenciadas nas depressões apresentadas em tais figuras. Conforme o esperado, a potência relativa na posição das barras de controle é nula. O erro relativo médio nas simulações de distribuição de potência axiais é de 0,0095 dos valores apresentados.

Entre os elementos combustíveis anelares, o ECA 13 se mostraram com maiores picos de valores na região central do elemento combustível. Esta característica demandando a presença de absorvedores nessa área. Entre todos os casos analisados, os ECA 14 e ECA 15 demonstraram as maiores uniformidades de distribuição de potência radiais.

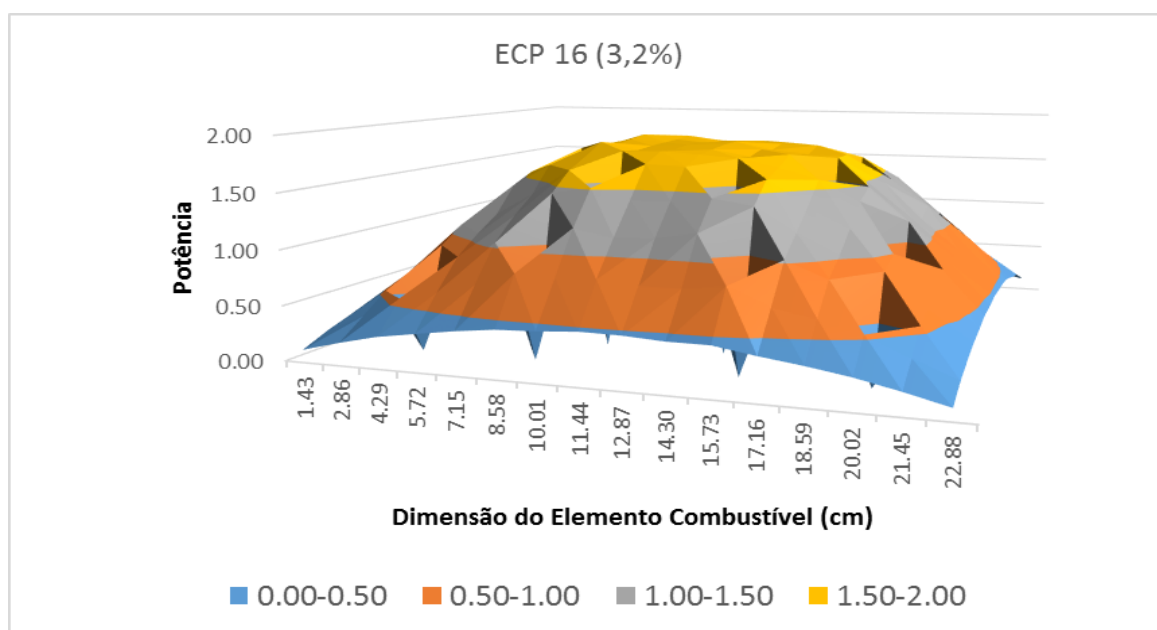


Figura 29: Distribuição de potência ECP 16 (3,2%).

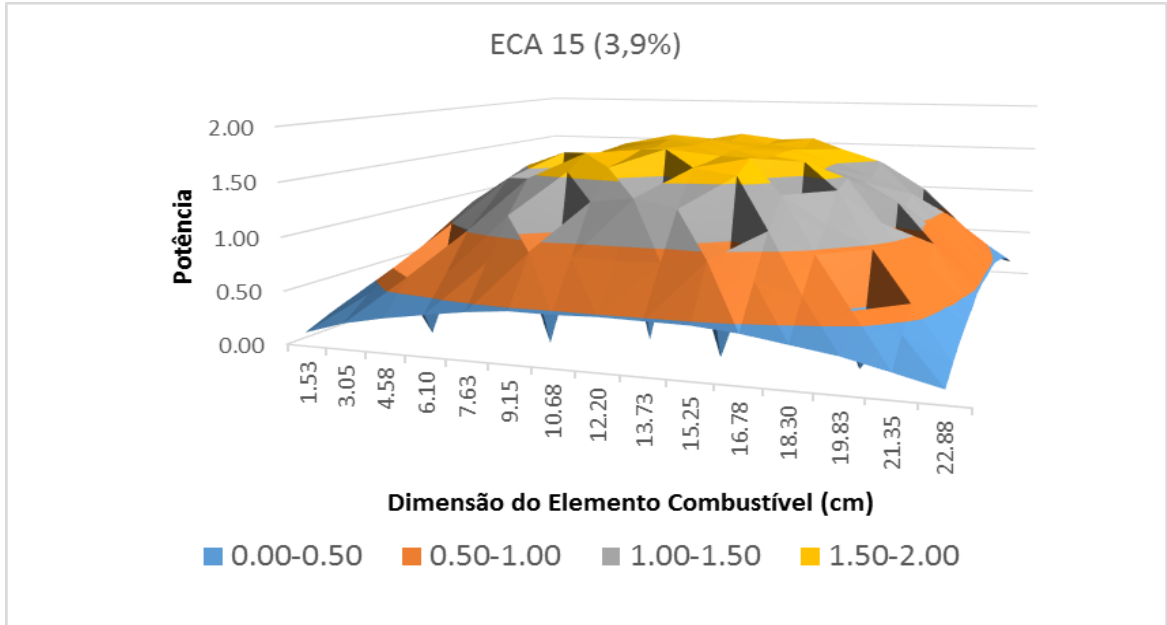


Figura 30: Distribuição de potência ECA 15 (3,9%).

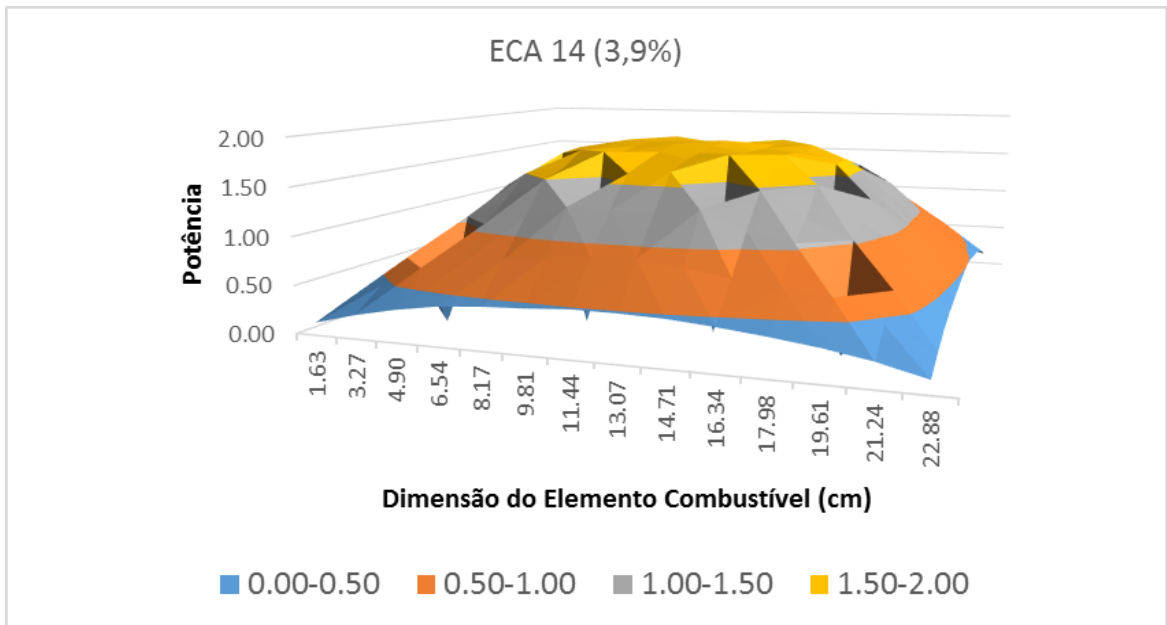


Figura 31: Distribuição de potência ECA 14 (3,9%).

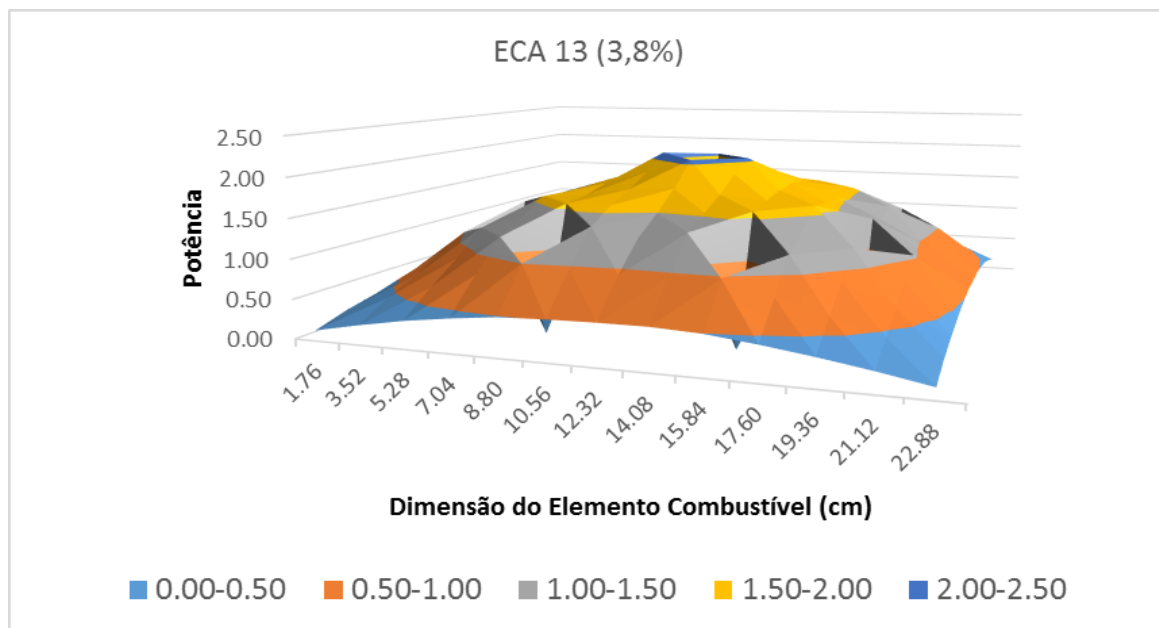


Figura 32: Distribuição de potência ECA 13 (3,8%).

Na Figura 33, os valores de distribuição axial de potência são mostrados para o ECP 16, ECA 15, ECA, ECA 14 e ECA 13. Os valores estimados pelo código possuem erro relativo médio de 0,013. Conforme esperado os elementos combustíveis analisados apresentam um comportamento de distribuição axial de potência típico. Observa-se nos casos avaliados que esta distribuição se aproxima de um perfil cossenoidal. Entre os casos avaliados nota-se que as maiores diferenças são encontradas nas proximidades do comprimento ativo dos ECs. Nas extremidades, tais diferenças tendem a ser de menores.

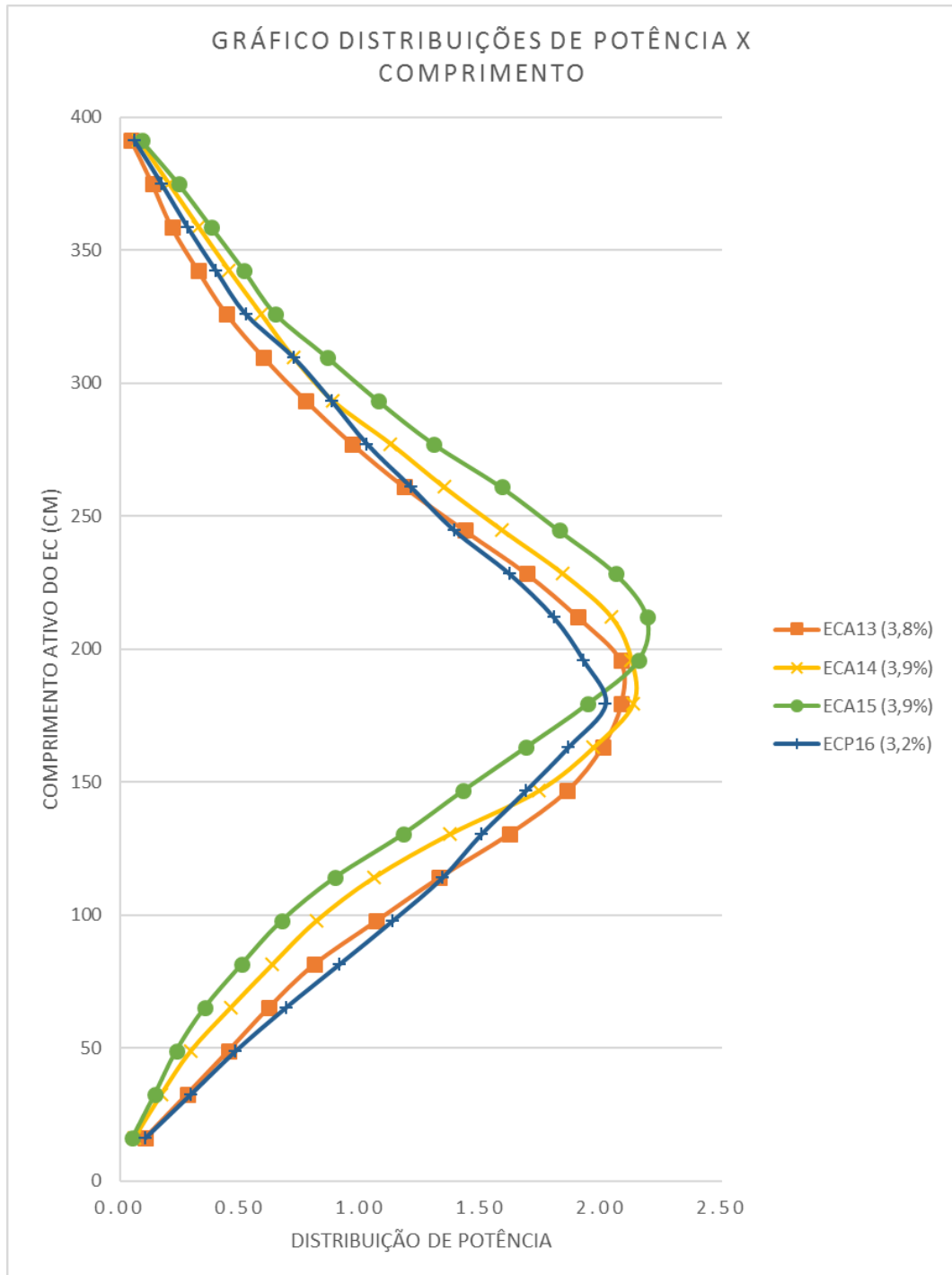


Figura 33: Gráfico comparativo das Distribuição axial de potência.

4.2.4. ANÁLISE DO FATOR DE PICO

Nas Tabelas 11 a 14, são apresentados os valores da razão ϕ_L/ϕ_{MS} para cada elemento combustível simulado. Nota-se que os maiores valores desta razão são encontrados nas regiões centrais das configurações. Este comportamento é previsto, pois conforme

verificado anteriormente, o fluxo local (ϕ_L) apresenta valores máximos no centro dos ECs. Portanto, é esperado que o Fator Pico de Potência (F_{PP}) esteja localizado na região central dos elementos combustíveis simulados. Observa-se também que, entre os casos avaliados, não há grandes variações do F_{PP} , pois tal fator varia 1,80 a 1,83.

Tabela 11: Tabela fator de pico ECP 16 (3,2%).

Malha de valores de fator de pico do ECP 16 (3,2%)																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0,20	0,29	0,37	0,44	0,50	0,54	0,57	0,59	0,58	0,57	0,54	0,50	0,44	0,38	0,29	0,20
2	0,29	0,44	0,56	0,67	0,75	0,82	0,86	0,89	0,89	0,86	0,82	0,76	0,66	0,56	0,44	0,29
3	0,37	0,56	0,70	0,86	0,97	1,04	1,12	1,14	1,13	1,11	1,04	0,98	0,86	0,71	0,56	0,37
4	0,44	0,66	0,85	1,02	1,16	1,26	1,33	1,36	1,36	1,32	1,26	1,16	1,02	0,86	0,66	0,44
5	0,50	0,75	0,97	1,16	1,32	1,43	1,49	1,54	1,54	1,48	1,43	1,32	1,16	0,97	0,75	0,50
6	0,55	0,82	1,03	1,26	1,43	1,56	1,64	1,67	1,68	1,64	1,56	1,43	1,26	1,04	0,82	0,55
7	0,57	0,86	1,12	1,33	1,48	1,65	1,73	1,77	1,77	1,73	1,63	1,47	1,33	1,11	0,86	0,57
8	0,59	0,89	1,15	1,36	1,55	1,68	1,78	1,82	1,82	1,77	1,68	1,54	1,37	1,14	0,88	0,58
9	0,58	0,88	1,15	1,37	1,55	1,69	1,77	1,81	1,82	1,78	1,68	1,55	1,36	1,14	0,88	0,58
10	0,57	0,87	1,12	1,34	1,48	1,64	1,73	1,78	1,78	1,74	1,64	1,47	1,32	1,11	0,86	0,56
11	0,54	0,83	1,04	1,27	1,44	1,56	1,63	1,68	1,69	1,65	1,56	1,42	1,25	1,04	0,82	0,54
12	0,50	0,75	0,97	1,16	1,32	1,43	1,48	1,54	1,55	1,47	1,43	1,30	1,16	0,97	0,75	0,50
13	0,44	0,66	0,86	1,02	1,15	1,26	1,33	1,36	1,36	1,32	1,26	1,15	1,01	0,85	0,66	0,44
14	0,37	0,56	0,71	0,86	0,97	1,03	1,11	1,13	1,13	1,11	1,03	0,97	0,85	0,71	0,56	0,38
15	0,29	0,44	0,56	0,67	0,76	0,82	0,86	0,88	0,88	0,86	0,82	0,75	0,66	0,56	0,44	0,29
16	0,20	0,29	0,37	0,44	0,50	0,54	0,57	0,58	0,58	0,57	0,54	0,50	0,44	0,37	0,29	0,20

Tabela 12: Tabela fator de pico ECA 15 (3,9%).

Malha de valores de fator de pico do ECA 15 (3,9%)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0,21	0,31	0,40	0,47	0,53	0,57	0,60	0,61	0,60	0,57	0,53	0,47	0,40	0,31	0,21
2	0,32	0,47	0,60	0,71	0,80	0,87	0,91	0,92	0,91	0,87	0,80	0,71	0,61	0,47	0,31
3	0,40	0,60	0,76	0,92	1,04	1,11	1,17	1,18	1,17	1,09	1,04	0,91	0,76	0,60	0,40
4	0,47	0,71	0,92	1,09	1,24	1,34	1,39	1,38	1,39	1,32	1,23	1,09	0,92	0,72	0,47
5	0,53	0,80	1,03	1,23	1,36	1,49	1,57	1,59	1,57	1,49	1,35	1,23	1,03	0,80	0,53
6	0,57	0,86	1,09	1,32	1,48	1,61	1,69	1,71	1,69	1,61	1,49	1,32	1,09	0,87	0,57
7	0,59	0,90	1,16	1,37	1,55	1,68	1,77	1,80	1,77	1,68	1,56	1,38	1,17	0,90	0,59
8	0,60	0,91	1,18	1,40	1,58	1,71	1,79	1,82	1,79	1,71	1,58	1,40	1,17	0,91	0,60
9	0,59	0,90	1,16	1,38	1,56	1,69	1,76	1,79	1,77	1,68	1,56	1,38	1,16	0,90	0,59
10	0,57	0,86	1,09	1,32	1,49	1,61	1,69	1,71	1,69	1,62	1,49	1,32	1,09	0,87	0,56
11	0,53	0,80	1,03	1,23	1,36	1,51	1,57	1,59	1,56	1,49	1,36	1,23	1,03	0,80	0,52
12	0,47	0,71	0,92	1,09	1,24	1,34	1,40	1,39	1,39	1,33	1,23	1,09	0,92	0,71	0,46
13	0,40	0,60	0,76	0,92	1,04	1,10	1,18	1,21	1,18	1,10	1,03	0,91	0,75	0,60	0,39
14	0,31	0,47	0,60	0,71	0,81	0,88	0,91	0,93	0,91	0,88	0,80	0,71	0,60	0,47	0,31
15	0,21	0,31	0,40	0,47	0,53	0,58	0,60	0,61	0,59	0,58	0,53	0,47	0,40	0,32	0,21

Tabela 13: Tabela fator de pico ECA 14 (3,9%).

Malha de valores de fator de pico do ECA 14 (3,9%)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0,22	0,32	0,41	0,49	0,55	0,59	0,61	0,61	0,59	0,54	0,49	0,41	0,33	0,22
2	0,32	0,50	0,64	0,76	0,85	0,91	0,95	0,95	0,91	0,84	0,76	0,65	0,50	0,33
3	0,41	0,64	0,80	0,97	1,10	1,19	1,22	1,22	1,18	1,10	0,98	0,82	0,64	0,42
4	0,49	0,75	0,97	1,16	1,31	1,38	1,46	1,45	1,38	1,31	1,16	0,98	0,76	0,50
5	0,54	0,84	1,10	1,31	1,47	1,57	1,63	1,62	1,57	1,47	1,31	1,11	0,85	0,55
6	0,59	0,90	1,18	1,37	1,57	1,69	1,75	1,75	1,68	1,57	1,37	1,19	0,91	0,59
7	0,61	0,93	1,22	1,45	1,62	1,75	1,80	1,81	1,74	1,63	1,45	1,23	0,95	0,61
8	0,60	0,94	1,22	1,45	1,62	1,75	1,80	1,80	1,75	1,63	1,46	1,23	0,95	0,61
9	0,59	0,91	1,18	1,38	1,58	1,69	1,75	1,74	1,69	1,58	1,38	1,19	0,92	0,59
10	0,55	0,85	1,10	1,31	1,47	1,58	1,64	1,63	1,58	1,47	1,31	1,10	0,85	0,55
11	0,49	0,76	0,99	1,18	1,31	1,38	1,45	1,46	1,38	1,32	1,17	0,98	0,76	0,49
12	0,42	0,64	0,82	0,99	1,10	1,19	1,23	1,22	1,19	1,11	0,98	0,82	0,65	0,42
13	0,33	0,50	0,64	0,76	0,85	0,91	0,94	0,94	0,91	0,86	0,76	0,64	0,50	0,33
14	0,22	0,33	0,42	0,49	0,55	0,59	0,61	0,61	0,59	0,55	0,49	0,42	0,32	0,22

Tabela 14: Tabela fator de pico ECA 13 (3,8%).

Malha de valores de fator de pico do ECA 13 (3,8%)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0,22	0,34	0,44	0,52	0,58	0,61	0,62	0,61	0,58	0,52	0,44	0,34	0,22
2	0,34	0,53	0,68	0,82	0,91	0,96	0,97	0,96	0,90	0,81	0,69	0,53	0,34
3	0,44	0,69	0,89	1,06	1,15	1,24	1,27	1,25	1,16	1,06	0,89	0,69	0,44
4	0,52	0,82	1,06	1,24	1,38	1,47	1,51	1,47	1,39	1,25	1,06	0,81	0,52
5	0,58	0,91	1,15	1,39	1,55	1,65	1,69	1,65	1,55	1,39	1,15	0,91	0,58
6	0,62	0,97	1,26	1,48	1,64	1,76	1,80	1,75	1,64	1,48	1,25	0,96	0,62
7	0,63	0,98	1,28	1,51	1,69	1,80	1,80	1,79	1,68	1,51	1,27	0,98	0,63
8	0,62	0,97	1,25	1,47	1,65	1,75	1,79	1,77	1,65	1,48	1,25	0,96	0,61
9	0,58	0,91	1,16	1,39	1,55	1,65	1,68	1,66	1,55	1,39	1,15	0,91	0,58
10	0,52	0,82	1,06	1,26	1,40	1,48	1,51	1,49	1,39	1,25	1,05	0,82	0,52
11	0,44	0,68	0,90	1,06	1,16	1,25	1,27	1,26	1,16	1,06	0,89	0,68	0,44
12	0,35	0,53	0,69	0,82	0,91	0,97	0,99	0,97	0,92	0,82	0,68	0,53	0,34
13	0,23	0,34	0,44	0,53	0,58	0,62	0,63	0,62	0,59	0,52	0,44	0,34	0,22

4.3. AVALIAÇÃO DA QUEIMA DO COMBUSTÍVEL ANELARES E PADRÃO

As análises em estado estacionário mostram que os elementos combustíveis anelares apresentam comportamento neutrônico similar. Entretanto, o ECA 14 (3,9%) e o ECA 15 (3,9%) possui distribuição de potência mais uniforme do que o ECA 13 (3,8%). Assim, apenas o ECA 14 (3,9%) e o ECA 15 (3,9%) foram considerados no estudo da queima.

A Figura 34 mostra o comportamento do k_{inf} em função da queima dos elementos combustíveis selecionados para a simulação. As curvas possuem comportamento semelhantes inclinações no decorrer do processo. Em BOC (*Beginning Of Cycle*) os valores de k_{inf} são maiores, mas no decorrer do ciclo tais valores reduzem. Este é um comportamento esperado, pois no durante a queima há redução na quantidade de material físsil provocando diminuição nos valores de k_{inf} . Entretanto, nota-se que a redução de tais valores é maior para o ECP 16, embora a criticalidade em BOC ser muito próxima entre os casos avaliados. Este fato pode ser devido a diferenças de geometria, de temperatura de operação e de enriquecimento entre os ECAs e ECP 16.

A Figura 35 mostra a evolução do ^{235}U durante o ciclo. Como esperado, há uma redução deste isótopo durante a queima; entretanto, sendo que os ECAs possuem maior enriquecimento, tais elementos apresentam maior concentração de ^{235}U durante a queima.

Este comportamento pode estar relacionado com os maiores valores de k_{inf} no final do ciclo (EOC).

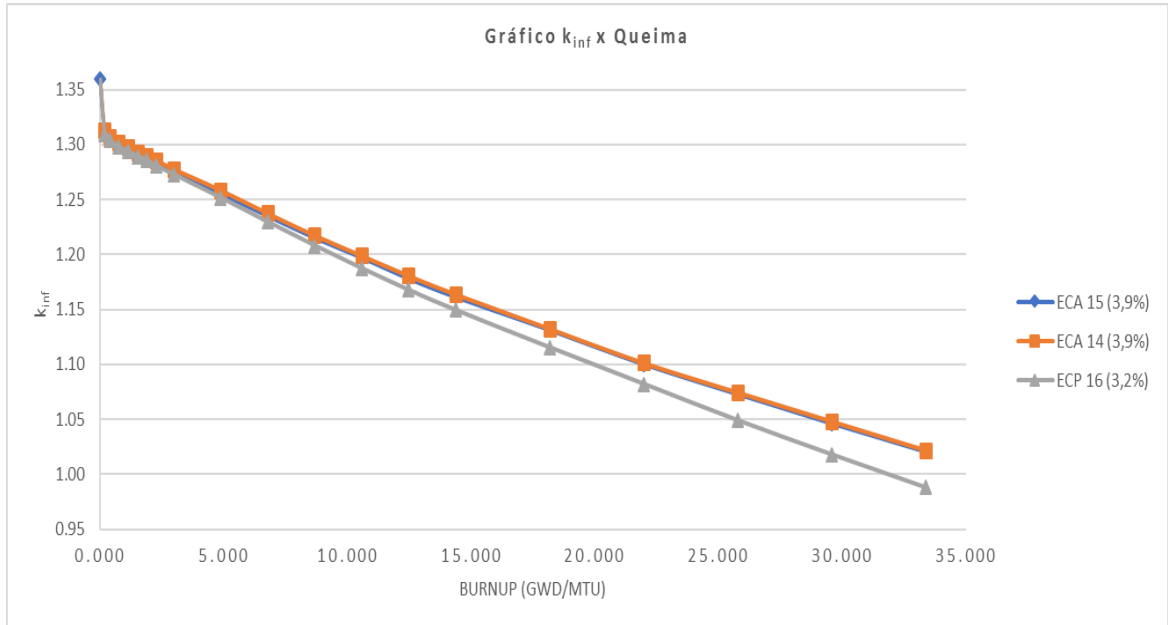


Figura 34: Queima dos Elementos combustíveis.

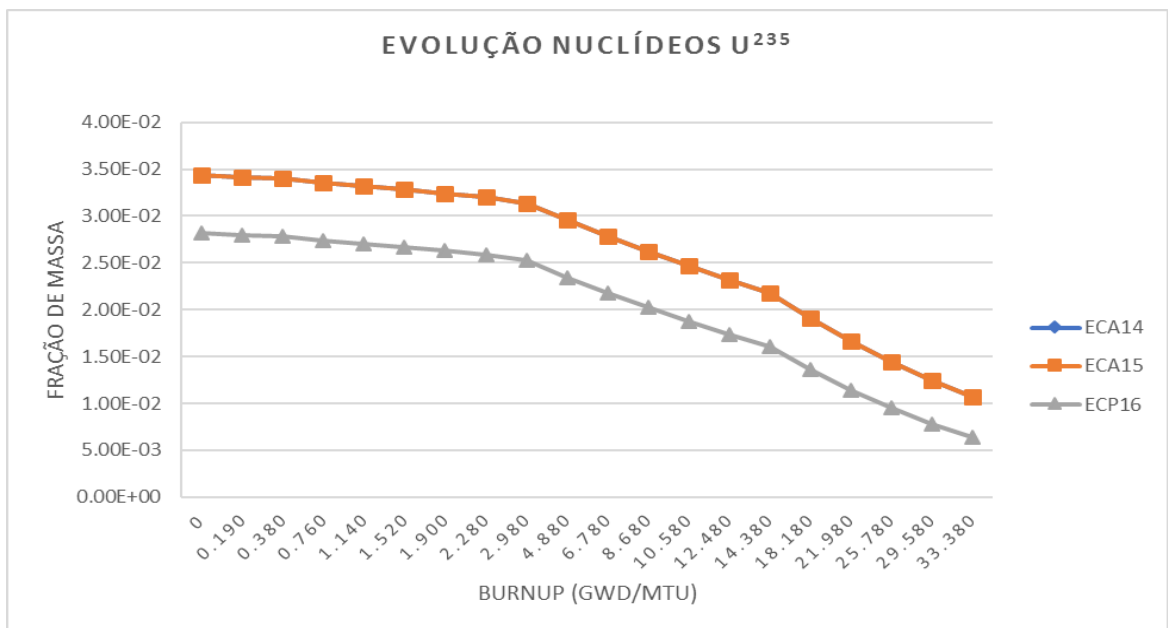
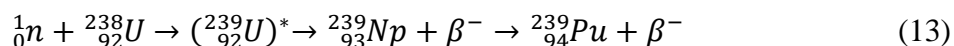


Figura 35: Evolução do isótopo ^{235}U durante a queima.

A Figura 36 apresenta a variação da concentração isotópica do ^{238}U e ^{239}Pu para os elementos combustíveis simulados. Tais elementos foram escolhidos para análise, pois estão presentes em uma das séries de decaimento mais importante do reator. A equação a seguir mostra a transmutação do ^{238}U em ^{239}Pu :



Desta forma, durante o ciclo de operação de um reator nuclear, há redução de ^{238}U e acréscimo de ^{239}Pu nuclear. A Figura 36 mostra este comportamento para os casos avaliados.

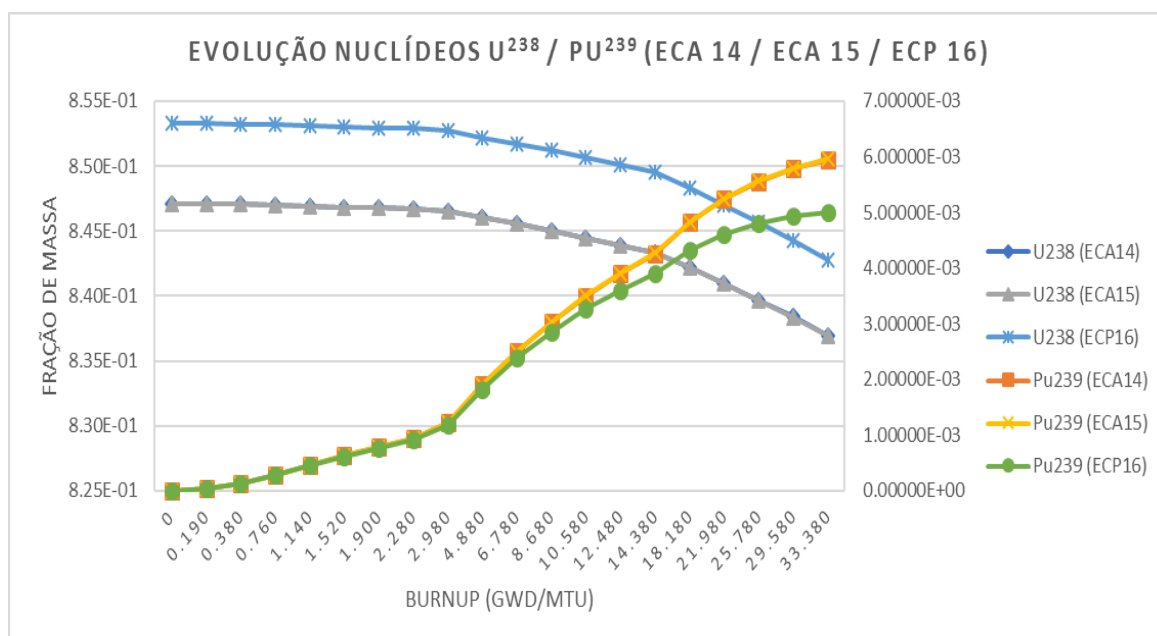


Figura 36: Evolução dos isótopos 238 do urânio e 239 do plutônio na queima.

De modo geral, as curvas relacionadas ao comportamento ^{238}U se mostram com semelhantes tendências de diminuição para os ECAs e o ECP 16. Entretanto, a maior concentração desse isótopo é encontrada no ECP 16, pois tal caso apresenta menor enriquecimento do combustível. Em relação ao ^{239}Pu , todos os elementos combustíveis apresentam um acréscimo da concentração deste isótopo. Os valores se mostram semelhantes até metade do ciclo de queima, mas após 8,7 GWD/MTU a diferença entre os ECAs e ECP 16 aumenta. As maiores concentrações finais são encontradas para os ECAs. Tal comportamento pode ser explicado através do enriquecimento de ^{239}Pu nas faces do

combustível próximas ao moderador. Esse efeito possui comum ocorrência para varetas combustíveis anelares (MATZKE, 1996).

Na Tabela 15, são apresentados as variações nas concentrações de actínídeos e os principais produtos de fissão durante a queima. Esta variação, ΔC , foi calculada através da seguinte equação:

$$\Delta C = C - C_0 \quad (14)$$

Onde C_0 e C representam as respectivas concentrações isotópicas do combustível no início e no final do ciclo. Neste cálculo, os valores de C_0 são aqueles apresentados na Tabela 4 e 9 e os valores de C foram estimados pelo MCNPX 2.6.0.

Tabela 15: Concentração de actínídeos e principais produtos de fissão após a queima
(Fração de massa).

Isótopos	ΔC (Fração de massa)		
	ECP 16 (3,2%)	ECA 15 (3,9%)	ECA 14 (3,9%)
²³⁴ U	2,34E-06	2,80E-06	2,78E-06
²³⁵ U	-1,88E-02	-2,01E-02	-2,01E-02
²³⁶ U	3,25E-03	3,54E-03	3,54E-03
²³⁷ U	8,93E-06	8,95E-06	8,83E-06
²³⁸ U	-1,21E-02	-1,23E-02	-1,21E-02
²³⁹ U	5,93E-07	5,96E-07	5,89E-07
²³⁶ Np	2,09E-09	2,30E-09	2,26E-09
²³⁷ Np	3,54E-04	3,59E-04	3,56E-04
²³⁸ Np	1,07E-06	9,44E-07	9,37E-07
²³⁹ Np	8,55E-05	8,58E-05	8,49E-05
²³⁸ Pu	9,84E-05	8,85E-05	8,76E-05
²³⁹ Pu	6,23E-03	7,36E-03	7,27E-03
²⁴⁰ Pu	1,70E-03	1,60E-03	1,59E-03
²⁴¹ Pu	1,04E-03	1,11E-03	1,10E-03
²⁴² Pu	2,54E-04	2,07E-04	2,06E-04
¹³⁴ Cs	1,16E-04	1,10E-04	1,10E-04
¹³⁷ Cs	1,07E-03	1,07E-03	1,08E-03
¹⁴⁷ Pm	1,23E-04	1,33E-04	1,33E-04
⁹⁹ Tc	6,61E-04	6,76E-04	6,76E-04
¹²⁹ I	1,27E-04	1,25E-04	1,25E-04
¹³⁸ Ba	1,16E-03	1,16E-03	1,15E-03
¹⁴⁷ Sm	4,56E-05	4,90E-05	4,91E-05
¹⁴⁹ Sm	1,67E-06	2,33E-06	2,33E-06
¹³⁵ Xe	1,27E-07	1,74E-07	1,73E-07

Como os parâmetros de queima são os mesmos em todas as simulações, os elementos combustíveis analisados possuem comportamentos semelhantes em relação à variação da concentração isotópica. Conforme o esperado nota-se uma redução de ^{235}U e ^{238}U e um acréscimo dos demais isótopos. Dentre os actínídeos, o ^{239}Pu apresenta maior concentração em EOC o qual se caracteriza como sendo um dos principais isótopos físséis da família do plutônio. Os produtos de fissão selecionados para análises em seguida, foram associados à queima do combustível fresco de UO_2 , enriquecido a 3,2% com uma extensão de 33 GWd/ton durante um período de 3 anos (SALOMÉ, 2016). Dentre os produtos de fissão avaliados, podemos citar os elementos ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{147}Pm , ^{99}Tc , ^{129}I e ^{147}Sm , os quais possuem meia vida de média curta à longa na composição do combustível queimado (IAEA, 2014). Os nuclídeos (produtos de fissão) ^{135}Xe e ^{149}Sm também foram avaliados na evolução do combustível, por possuírem alta seção de choque de absorção e provocar a redução da criticalidade de reatores LWR (LAMARSH, 1975). Entre os ECAs a variação da concentração de produtos de fissão de modo geral se mantiveram semelhantes. Já comparando os ECAs e ECP 16, observa-se que as concentrações apresentam diferenças que variam de $4,8\text{E}-08$ a $1,5\text{E}-02$.

Sendo que o enriquecimento dos ECAs é o mesmo, os valores de ΔC para tais casos são semelhantes. Entretanto, devido a diferenças de geometria e de enriquecimento o ECP 16 apresenta diferentes valores de ΔC quando comparado ao ECAs. Apesar disso, para qualquer isótopo ΔC possui a mesma ordem de grandeza.

5. CONCLUSÃO

Esse trabalho foi desenvolvido objetivando analisar alternativas de elementos combustíveis contendo varetas anelares ao elemento típico PWR de arranjo 16x16. Para tal finalidade, diversas simulações computacionais foram executadas empregando o código MCNPX 2.6.0 com objetivo de estimar parâmetros neutrônicos que contribuíssem para avaliar cada caso.

Inicialmente o trabalho foi desenvolvido objetivando avaliar diferentes configurações de elementos combustíveis contendo varetas anelares através de simulações neutrônicas. Durante todo o processo, um elemento combustível padrão típico PWR (16x16) de Angra II, foi utilizado como referência de comparação. As dimensões externas e a razão V_M/V_F deste elemento combustível foram mantidas nas novas propostas de simulações de elementos combustíveis anelares. Os valores de enriquecimentos empregados nos ECAs, foram estabelecidos visando equiparar o k_{inf} referente a um padrão de referência. Após simulações, verificou-se que os valores de enriquecimentos foram estabelecidos em 3,8% para o elemento combustível anelar (13x13) e 3,9% para os elementos combustíveis anelares (14x14) e (15x15). Parâmetros neutrônicos relacionados à criticalidade, fluxo neutrônico, distribuição de potência, fator pico de potência e queima foram realizados visando comparar os comportamentos neutrônicos entre ambos tipos de elementos combustíveis trabalhados.

Os valores de criticalidades em função da temperatura analisadas para os ECAs 13, 14 e 15 e ECP 16, se apresentaram em concordância com o Efeito *Doppler*; isto é, um aumento na temperatura do combustível provoca uma redução dos valores de k_{inf} .

Nesse cenário, as simulações mostraram que os fluxos neutrônicos dos ECAs 13, 14 e 15 apresentaram semelhantes comportamentos no eixo central dos ECs. Em relação ao fluxo nas células combustíveis, os maiores valores foram encontrados nas configurações CEL 15, 14 e 13 respectivamente. Tal fato, relaciona a diminuição do fluxo neutrônicos em relação ao canal interno de refrigeração da geometria.

Em relação a distribuição de potência radial, os ECAs 14 e 15 apresentaram semelhantes uniformidades de potência. Ao contrário do ECA 13, no qual, apresentou um pico de potência na região central do elemento combustível. Esta característica, a princípio, desqualificaria tal elemento combustível para queima. No entanto, alterações relacionadas à composição e / ou geometria poderiam alterar essa questão discordante em relação à

distribuição de potência radial do ECA 13. No caso da distribuição de potência axial, todos os elementos combustíveis mostraram-se um perfil cossenoidal esperado nas simulações.

Os fatores de picos analisados mostraram que maiores razões foram localizadas na região central dos elementos combustíveis. Foi observado também que para todos os casos analisados não houve grandes variações de tais valores encontrados.

Abordando o contexto da queima, os ECAs 14 e 15 mostraram-se semelhantes valores de k_{inf} em uma extensão de queima estabelecida de 33 GWd/ton e densidade específica de potência de 38 W/gU. Ambos apresentaram valores finais de k_{inf} supercríticos, ou seja, maiores que 1,0. Em comparação com o padrão utilizado, ambos elementos combustíveis anelares possuem, de forma geral, maiores valores de k_{inf} do que o ECP 16.

Em relação a evolução da variação de concentração isotópica do combustível, há uma redução dos valores de ^{235}U nos ECAs, visto que tais ECs possuem maiores valores (em relação ao padrão) de k_{inf} no final da queima. No que se trata dos núclídeos ^{238}U e ^{239}Pu , os ECAs mostram maiores índices de transmutação de ^{238}U em ^{239}Pu , possivelmente causados pelo maior enriquecimento de isótopos de plutônio nas bordas do combustível faceada pelo moderador. Em relação aos produtos de fissão avaliados, os elementos ^{137}Cs e ^{138}Ba apresentaram maiores concentrações em todos ECs simulados. Tais isótopos possuem a característica relacionada ao intenso decaimento do combustível queimado retirado e armazenado do reator. De modo geral os produtos de fissão ^{134}Cs , ^{147}Pm , ^{99}Tc , ^{129}I e ^{147}Sm , ^{135}Xe e ^{149}Sm não apresentam consideráveis variações de concentração na composição do combustível entre os elementos combustíveis simulados.

Nesse contexto, considerando as vantagens dos parâmetros avaliados, o ECA 14 (3,9%) e ECA 15 (3,9%) mostraram-se propícios a continuidade das pesquisas. Dentre os parâmetros mais representativos para tal, podemos citar as seguintes conclusões abaixo para ambos elementos combustíveis anelares simulados.

- Maior uniformidade na distribuição de potência radial;
- Maior achatamento na curva de fluxo relacionada ao elemento combustível;
- Menor fluxo relacionada à região do material físsil; e
- Extensões dos processos de queima;

Apesar dos ECA 14 (3,9%) e ECA 15 (3,9%) se apresentarem como os mais indicados para possíveis alternativas ao elemento combustíveis típicos PWR, demais (outros)

parâmetros neutrônicos como coeficiente de temperatura e cálculos de valores das varetas controles deverão ser utilizados, visando complementar as análises. Além disso, este trabalho foi direcionado para uma análise neutrônica. No entanto, análises termo-hidráulica associadas às temperaturas do refrigerante nos canais internos e externos de refrigeração e as temperaturas axiais e radiais do combustível, gap e revestimento também propendem a colaborar com análises mais representativas da tecnologia relacionada às varetas. Demais códigos também contribuirão para a comparação dos parâmetros estudados, objetivando maior confiabilidade a pesquisa. Por fim, os estudos devem ser feitos considerando não somente elementos combustíveis, mas também o núcleo de um reator PWR.

REFERÊNCIAS

- Amin Mozafari, M.; F. Faghihi. Design of annular fuels for a typical VVER-1000 core: Neutronic investigation, pitch optimization and MDNBR calculation. In: *Annals of Nuclear Energy* 60., 2013. p. 226-234.
- Ansarifar, G. R. and M. Ebrahimian. Design and neutronic investigation of the Nano fluids application to VVER-1000 nuclear reactor with dual cooled annular fuel. In: *Annals of Nuclear Energy* 87., 2016. p. 39-47.
- Blinkov, V. N., E. A. Boltenko, I. V. Elkin, O. I. Melikhov and S. L. Solov'ev. Prospects for using annular fuel elements in nuclear power engineering. **Thermal Engineering**, v. 57, n. 3, p. 213-218, 2010.
- D. B. Pelowitz, ed., "MCNPX User's Manual, Version 2.6.0," LA-CP-07-1473 (April 2008).
- Deokule, A. P., A. K. Vishnoi, K. Umasankari, D. K. Chandraker and P. K. Vijayan. Reactor Physics and Thermal Hydraulic Analysis of Annular Fuel Rod Cluster for Advanced Heavy Water Reactor. **Energy Procedia**, v. 71, p. 52-61, 2015.
- DUDERSTADT, James J. et al. Nuclear Reactor Analysis by James J. Duderstadt and Louis J. Hamilton. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 24, n. 4, p. 1983-1983, 1977.
- EL BAKKARI, B. et al. Development of an MCNP-tally based burnup code and validation through PWR benchmark exercises. **Annals of Nuclear Energy**, v. 36, n. 5, p. 626-633, 2009.
- EL BAKKARI, B. et al. Accuracy assessment of a new Monte Carlo based burnup computer code. **Annals of Nuclear Energy**, v. 45, p. 29-36, 2012.
- Ellis, T. S. Advanced design concepts for PWR and BWR high-performance annular fuel assemblies, Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- Feng, D., P. Hejzlar and M. S. Kazimi. Thermal-hydraulic design of high-power-density annular fuel in PWRs. **Nuclear Technology**, v. 160, n. 1, p. 16-44, 2007.
- HAMID, Badrun Nahar et al. Modelling an Unprotected Loss-of-Flow Accident in Research Reactors using the Eureka-2/Rr Code. **Journal of Physical Science**, v. 26, n. 2, p. 73, 2015.
- Hendricks, J.S., et al., April 2008. "MCNPX 2.6.0 Extensions," LA-UR-08e2216.
- 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. **Vol. II, Sect. F7 of SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, NUREG/CR-0200, Rev**, v. 6, 1995.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IAEA. 2014. **Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards**. IAEA Safety Standards, series N° GSR Part 3, 2014.
- Kazimi, M. S., P. Hejzlar, D. M. Carpenter, D. Feng, G. E. Kohse, W. J. Lee, P. Morra, H. C. No, Y. Ostrovsky and Y. Otsuka. High performance fuel design for next generation PWRs: Final report, Massachusetts Institute of Technology. Center for Advanced Nuclear Energy Systems. Nuclear Fuel Cycle Program, 2006.

KIM, Hyoung Tae et al. **Performance of internally and externally cooled annular fuel in a loss of coolant accident**. American Nuclear Society, 555 North Kensington Avenue, La Grange Park, IL 60526 (United States), 2002.

KIM, Sung-Min; KIM, Myung Hyun. A study on MCNPX-CINDER90 system for activation analysis. In: **Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting Pyeongchang, Korea Google Scholar**. 2014.

Kwon, Y., Y. Yang, J. Kim and S. Kwon. A study on the flow characteristics in an annular type fuel pellet of PWR. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 27, n. 1, p. 257-261, 2013.

Lahoda, E., H. Feinroth, M. Salvatore, D. O. Russo and H. Hamilton. High-power-density annular fuel: Manufacturing viability. **Nuclear Technology**, v. 160, n. 1, p. 100-111, 2007.

LAMARSH, John R. Introduction to nuclear engineering. 1975.

MATZKE, HJ. Radiation damage in nuclear fuel materials: the “rim” effect in UO₂ and damage in inert matrices for transmutation of actinides. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, v. 116, n. 1-4, p. 121-125, 1996.

MOZAFARI, M. Amin; FAGHIHI, F. Design of annular fuels for a typical VVER-1000 core: neutronic investigation, pitch optimization and MDNBR calculation. **Annals of Nuclear Energy**, v. 60, p. 226-234, 2013.

Nascimento, J. A. d.; avaliacao neutrônica de reator carregado com combustível metálico e refrigerado por chumbo, 2000, 198f. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, São Paulo, 2000.

NIA, A. Erfani; FAGHIHI, F.; HADAD, K. Prompt and power reactivity coefficients for the next generation VVER-1000 reactor including hexagonal assemblies and annular fuels. **Progress in Nuclear Energy**, v. 61, p. 41-47, 2012.

Oguma, M. Cracking and relocation behavior of nuclear fuel pellets during rise to power. **Nuclear Engineering and Design**, v. 76, n. 1, p. 35-45, 1983.

ORNL/TM-2005/39, SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluations, Version 6. Available from Radiation Safety Information Computational Center at Oak Ridge National Laboratory as CCC-750, v. I-III, 2009.

Paiva, G. V; aplicação de um sistema especialista para o diagnóstico em tempo real das condições limite de operação em usinas nucleares, 2015. 55f. Monografia – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

REARDEN, Bradley T. et al. Monte Carlo capabilities of the SCALE code system. **Annals of Nuclear Energy**, v. 82, p. 130-141, 2015.

RIO DE JANEIRO (Estado) Eletrobrás Termonuclear, S. **Final Safety Analysis Report-FSAR Angra 2**. Eletronuclear, Rio de Janeiro, 1999.

Saidinezhad, M.; S. Hamieh. A 13×13 annular fuel assembly 1000MWe PWR response to a reactivity excursion. In: *Annals of Nuclear Energy* 47., 2012. p. 155-159.

SALOMÉ, J. A. D.. Participação em banca de Maria Elizabeth Scari. Estudos Termo-Hidráulicos de Reatores Nucleares Avançados de Alta Temperatura Utilizando o RELAP5-3D. 2017. 178 f. Tese (Doutorado em Ciências Técnicas Nucleares) – Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais. 2016.

Savchenko, A. M., A. V. Vatulin, G. V. Kulakov, K. V. Lipkina, V. I. Sorokin, A. V. Morozov, S. A. Ershov, O. I. Uferov, E. V. Mainikov and A. Kozlov. Peculiarities of fuel cycle with advanced composite fuel for thermal reactors. **Progress in Nuclear Energy**, v. 72, p. 119-125, 2014.

Shin, C.-H., T.-H. Chun, D.-S. Oh and W.-K. Thermal hydraulic performance assessment of dual-cooled annular nuclear fuel for OPR-1000. **Nuclear Engineering and Design**, v. 243, p. 291-300, 2012.

VELOSO, Marcelo Antonio. **Simulação computacional de eventos termo-hidraulicos transitorios em multicircuitos com multibombas**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campínas.

WILSON, W. B. et al. Recent Development of the CINDER90 Transmutation Code and Data Library for Actinide Transmutation Studies. Los Alamos National Lab., NM (United States), 1995.

Yang, Y. S., C. H. Shin, T. H. Chun and K. W. Song. Evaluation of a dual-cooled annular fuel heat split and temperature distribution. **Journal of nuclear science and technology**, v. 46, n. 8, p. 836-845, 2009.

ANEXO 1

Em termos termo-hidráulicos, importantes fatores relacionados aos reatores de potência são a transferência e distribuição de calor, dos quais, podemos citar os parâmetros DNB e DNBR, que devem ser observados principalmente em casos de eventos do tipo LOCA (*Loss of Coolant Accident*) e LOFA (*Loss of Flow Accident*), onde limites de fluxo do calor crítico podem ser atingidos. Tais características influenciam diretamente a eficiência da planta e alteram, consideravelmente, custos associados a projetos e manutenção das usinas (Shin, et al. 2012).

O termo DNB conhecido na literatura por “partida da ebulição nucleada”, é um importante fator termo-hidráulico relacionado à transferência de calor nos reatores refrigerados a água leve. Consiste na formação de bolhas na interface entre o revestimento e o refrigerante, interferindo no processo de transferência de calor. Caso o calor da superfície do revestimento supere valores críticos, um filme de vapor pode cobrir esta superfície aumentando demasiadamente a temperatura. É fundamental possuir conhecimento do fluxo de calor crítico para o qual acontecerá o DNB, tal determinação está diretamente relacionada ao formato do canal, propriedades físicas do refrigerante, condições de fluxos, e entre outros fatores (VELOSO, 2003).

Nos reatores PWR, mesmo com menores probabilidades de ocorrência por trabalhar com água leve pressurizada, a temperatura do revestimento pode exceder a temperatura de saturação do refrigerante proporcionando a formação de bolhas pequenas e localizadas ao longo das paredes. Tal característica contribui para a maior eficiência da transferência de calor e é denominada na literatura de ebulição sub-resfriada. Nos reatores BWR, ao contrário do PWR, a ebulição saturada do refrigerante é alcançada no processo, resultando na formação considerável de vapor no sistema, no qual, se baseia o princípio básico de funcionamento desse tipo específico de reator (VELOSO, 2003).

Por possuir duas superfícies refrigeradas, as varetas anelares possuirão um aumento da superfície de refrigeração por massa de combustível resultando no aumento significativo do DNB. A diminuição da temperatura do material físsil neste específico tipo de vareta, fornece vantagens relacionadas à baixa temperatura do revestimento (Kwon, et al. 2013).

Na maior parte dos casos estudados, os canais internos e externos de refrigeração das varetas anelares se apresentam com valores de DNB maiores em relação à típica vareta PWR sólida. Tal característica apresentaria um considerável potencial para o aumento total

de potência produzida no reator com elementos combustíveis anelares (Mozafari and Faghihi, 2013).

A razão DNBR possui como função definir a razão mínima de fluxo de calor crítico para o fluxo de calor obtido no núcleo como a razão DNB. Para a superfície refrigerada por um fluido no regime de ebulição nucleada, a transferência de calor será alta e a energia térmica será removida com pequenas diferenças de temperatura entre as superfícies (revestimento e refrigerante). No entanto, essa transferência não possui a característica ilimitada, pois, o fluxo de calor não possui necessariamente um limite e esse excesso pode formar uma camada de vapor sobre a superfície deteriorando o mecanismo das varetas. De modo geral, atualmente os projetos de reatores são executados para que o DNBR não permaneça abaixo do valor estabelecido no sistema transitório, restringindo tal razão $> 1,3$ (VELOSO, 2003).

O considerável aumento desta razão devido à redução do fluxo de calor da superfície das varetas, permite o substancial aumento de densidade de potência em até 50% em relação ao mesmo parâmetro utilizando a tradicional vareta PWR sólida (Kim, 2002).

Fatores relacionados ao sistema de refrigeração do reator também são diretamente associados às varetas anelares. O evento do tipo LOFA pode ocorrer no reator devido a vários motivos, dentre eles falha da bomba, perda de energia externa, obstrução de tubos de refrigeração e fechamento de válvulas dentre outros. É prejudicial à integridade do combustível, devido a altos valores de temperaturas identificados e baixo coeficiente de transferência de calor. Possui característica de acidente relacionada a erro de projeto que não propõe estabilidade ao fluxo de transferência de calor (HAMID, 2015).

Espera-se que eventos do tipo LOCA, tenham consequências menores no decorrer da queima do combustível com diminuição do pico de temperatura do material físsil. Com o aumento da superfície quente das varetas anelares, o fluxo de calor tende a diminuir, possibilitando que os valores de DNBR aumentem.