

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES**

**PROPOSTA DE UM REATOR RÁPIDO DE PEQUENO PORTE PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA**

Maurício Gilberti

BELO HORIZONTE

DEZEMBRO 2015

G465p Gilberti, Mauricio.
Proposta de um reator rápido de pequeno porte para geração de energia [manuscrito] / Mauricio Gilberti. – 2015.
143 f., enc.: il.

Orientadora: Cláudia Pereira Bezerra Lima.

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

Anexos: f. 131-143.

Bibliografia: f. 128-130.

1. Engenharia nuclear - Teses. 2. Reatores rápidos - Teses.
3. Reatores nucleares - Resfriamento a sódio - Teses. I. Lima, Cláudia Pereira Bezerra. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.039(043)



FOLHA DE APROVAÇÃO

PROPOSTA DE UM REATOR RÁPIDO DE PEQUENO PORTE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

MAURICIO GILBERTI

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


Aprovada em 17 de dezembro de 2015, pela banca constituída pelos membros:


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


Profa. Antonella Lombardi Costa
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG


Dra. Graiciany de Paula Barros
CNEN


Dra. Maritza Rodriguez Gual
CDTN/CNEN


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

Belo Horizonte, 17 de dezembro de 2015.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências e Técnicas Nucleares.

Área de concentração: Engenharia Nuclear e da Energia

Orientadora: Cláudia Pereira Bezerra Lima

BELO HORIZONTE

DEZEMBRO 2015

AGRADECIMENTOS

- A minha orientadora Cláudia Pereira Bezerra Lima pela oportunidade, sua generosidade de ter compartilhado seu conhecimento, e sua competência que tornou possível a realização deste trabalho.
- A minha esposa pela paciência, apoio e abdicção durante esse tempo.
- Ao meu Pai pelo incentivo e empenho que sempre me forneceu aos estudos.
- Aos meus irmãos Gustavo, Fernando e Breno pelo incentivo.
- Aos professores e funcionários do DEN pela sua competência e dedicação ao trabalho e que me propiciou a oportunidade de participar do programa de pós-graduação.
- A ELETROBRÁS TERMONUCLEAR – ELETRONUCLEAR, pelo apoio e incentivo a capacitação de seus colaboradores para formação contínua de quadro técnico altamente qualificado.
- Ao CNPq, CAPES, FAPEMIG, CNEN pelo financiamento dos projetos de interesse deste trabalho.
- Aos colegas do departamento pela colaboração contínua e auxílio a elaboração do trabalho.

RESUMO

O *4S Reactor (Super-Safe, Small and Simple Reactor)* desenvolvido pela Toshiba Corporation e pela *Central Research Institute of Electric Power Industry – CRIEPI*, Japão, foi extensivamente estudado e analisado suas características de operação neste trabalho. Através da modelagem do núcleo e reator equivalente foram determinados e avaliados parâmetros neutrônicos tais como coeficientes de reatividade, queima e evolução do combustível, eficiência e desempenho ao longo do ciclo de operação. O modelo desenvolvido mostrou-se capaz de representar adequadamente o projeto e de determinar as características de operação do núcleo.

A partir destes resultados, uma série de alterações no projeto foram executadas baseadas em novos conceitos de otimização do ponto de vista de melhoria da performance e dos coeficientes de reatividade do núcleo. Os resultados demonstram que há um enorme espaço para otimização do projeto permitindo remodelar o núcleo e reator conforme as características desejadas de eficiência e dos parâmetros intrínsecos de segurança do núcleo.

Todo o estudo foi realizado utilizando o código nuclear MCNPX 2.6.0.

ABSTRACT

The 4S Reactor (Super Safe, Small and Simple Reactor) developed by Toshiba Corporation and the Central Research Institute of Electric Power Industry-CRIEPI Japan, was extensively studied and analyzed their operating characteristics in this work. Through of the a equivalent core reactor model were determined and evaluated the neutronics parameters such as reactivity coefficients, fuel evolution and burnup, the reactor efficiency and performance over the operating cycle. The developed reactor model was able to adequately represent the project and determine the core operating characteristics.

From these results, a series of changes in the project were executed based on new concepts optimization from the standpoint of improving the performance and core reactivity coefficients. The results demonstrate that there is a huge space for optimization of the project allowing remodel the core and reactor as characteristics desired of the efficiency and of the intrinsic parameters of core security.

All study was performed using nuclear code MCNPX 2.6.0.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4-1. Representação do Elemento Combustível e Disposição das Varetas.....	33
Figura 4-2. Representação Axial e Radial com os Principais Componentes do Reator.	34
Figura 4-3. Representação Axial e Radial do elemento Combustível.	35
Figura 4-4. Representação Axial e Radial da Vareta de Combustível.	36
Figura 4-5. Representação Axial e Radial do Subelemento Central.....	37
Figura 4-6. Representação Axial e Radial dos Elementos Absorvedores.	38
Figura 4-7. Vista Axial do Reator (Imagem obtida do MCNPX 2.6.0).....	39
Figura 4-8. Vista Radial do Reator (Imagem obtida do MCNPX 2.6.0).....	40
Figura 4-9. Variação de keff e fluxo ao longo do ciclo.	45
Figura 4-10. Queima longo do ciclo	47
Figura 4-11. Composição em massa e percentual isotópico do combustível metálico U-Zr no início do ciclo.....	49
Figura 4-12. Variação em massa e percentual isotópico do combustível metálico U-Zr no final do ciclo.	49
Figura 4-13. Variação em massa e distribuição relativa dos transurânicos no final do ciclo de operação.....	50
Figura 4-14. Variação em massa e distribuição relativa do conteúdo de plutônio, e actínídeos menores, no final do ciclo de operação.	50
Figura 4-15. Composição isotópica do combustível no início do ciclo e variação no final do ciclo de operação, em termos do percentual de isótopos físseis e fissionáveis de actínídeos e transurânicos presentes no combustível.	51
Figura 4-16. Enriquecimento do combustível no início do ciclo e variação no final do ciclo de operação (w/o % de isótopos físseis).....	52
Figura 4-17. Composição inicial em massa dos principais actínídeos no início do ciclo, e variação no final do ciclo de operação.....	52
Figura 4-18. Vista Axial do Reator em Configurações Típicas de Operação.	62
Figura 4-19. Variação da Reatividade com Movimentação do Refletor, Início do Ciclo, FPZ, Xe = 0.....	66
Figura 4-21. Reatividade em Função da Temperatura do Combustível, Início do Ciclo, FPZ, Xe = 0.....	68
Figura 4-22. Reatividade em Função da Temperatura do Refletor, Início do Ciclo, FPZ, Xe = 0.	70
Figura 4-23. Reatividade em Função da Densidade do Refrigerante, Início do Ciclo, FPZ, Xe = 0.	72

Figura 4-24. Reatividade em Função da Temperatura do Refrigerante, Início do Ciclo, FPZ, Xe = 0.....	74
Figura 4-25. Reatividade em Função da Expansão Axial do combustível, Início do Ciclo, FPZ, Xe = 0.....	76
Figura 4-26. Reatividade dos principais coeficientes nucleares em função da temperatura e densidade do refrigerante.....	79
Figura 5-1. Vista axial do reator Mod 2 com incorporação dos absorvedores axiais e radiais (Imagem obtida do MCNPX 2.6.0).....	84
Figura 5-2. Vista radial do reator modificado com incorporação dos absorvedores axiais e radiais (Imagem obtida do MCNPX 2.6.0).....	85
Figura 5-3. Vista em corte das camadas de plenum e absorvedora superior em inferior, e detalhes da modelagem do plenum Na (Imagem obtida do MCNPX 2.6.0).	86
Figura 5-4. Variação de k_{eff} e fluxo ao longo do ciclo, Mod 1.	88
Figura 5-5. Vista em corte da distribuição das varetas com moderador (azul claro) nos elementos combustíveis (Imagem obtida do MCNPX 2.6.0).	91
Figura 5-6. Variação de k_{eff} e fluxo ao longo do ciclo, Mod 2.	93
Figura 5-7. Vista axial em corte do reator, Mod 3 (Imagem obtida do MCNPX 2.6.0).	98
Figura 5-8. Comparativo entre o enriquecimento e queima do combustível entre os modelos.	100
Figura 5-9. Variação de k_{eff} e fluxo ao longo do ciclo, Mod 3.	102
Figura 5-10. Variação e percentual em massa do combustível metálico para os modelos analisados, EOL.....	104
Figura 5-11. Variação em massa e percentual isotópico dos transurânicos para os modelos analisados, EOL.....	105
Figura 5-12. Variação em massa e distribuição relativa do conteúdo de plutônio, e actínídeos menores, para os modelos analisados, EOL.....	106
Figura 5-13. Variação percentual de isótopos de TRU e Actínídeos totais, físseis e fissionáveis presentes na composição do combustível para todos os modelos analisados, EOL.	108
Figura 5-14. Enriquecimento do combustível para início e fim do ciclo, e variação percentual para todos os modelo analisados (w/o % de isótopos físseis).....	108
Figura 5-15. Variação em massa dos principais actínídeos do combustível, nas zonas internas e externas do núcleo, para todos os modelos analisados, EOL.	109
Figura 5-16. Razão de Conversão (C) para o combustível nas zonas internas e externas do núcleo em todos os modelos analisados, EOL.	110

Figura 5-17. Comparação entre os coeficientes de temperatura do combustível para todos os modelos analisados.....	112
Figura 5-18. Comparação entre os coeficientes de temperatura do refletor para todos os modelos analisados.....	113
Figura 5-19. Comparação entre os coeficientes de temperatura do refrigerante para todos os modelos analisados.....	114
Figura 5-20. Comparação entre os coeficientes de vazio do refrigerante para todos os modelos analisados.....	115
Figura 5-21. Valor de reatividade dos principais coeficientes nucleares em função da queima e densidade do refrigerante, para os modelos analisados.....	117
Figura 5-22. Valor de reatividade total associado aos nucleares analisados, para todos os modelos.....	118
Figura 6-1. Proposta de modificação do projeto original, Mod A (a direita) e Mod B (a esquerda).....	125
Figura I-1. Seção de corte vertical do Reator 4S.....	135
Figura I-2. Seção de corte vertical com descrição dos principais componentes do reator 4S, 150 W _t	136
Figura I-3. Seção de corte vertical do Vaso de Proteção (Guard Vassel).....	137

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4-1. Parâmetros básicos do modelo do núcleo.....	27
Tabela 4-2. Descrição dos materiais e geometria do modelo.	28
Tabela 4-3. Composição Isotópica do Combustível no Início do Ciclo, Reator Quente Potência Plena, Xe = 0.....	53
Tabela 4-4. Valores de reatividade dos elementos de controle, BOL Ciclo 1, CZP, Xe = 0.	64
Tabela 4-5. Coeficientes de reatividade ao longo do ciclo.	78
Tabela 5-1. Parâmetros básicos do combustível, Modificação I.....	83
Tabela 5-7. Parâmetros básicos do combustível, Mod 3.....	97
Tabela 5-8. Comportamento da queima do combustível.....	100
Tabela 5-9. Valores de reatividade dos elementos de controle, BOL, Mod 3.....	103
Tabela 5-10. Coeficientes de reatividade ao longo do ciclo, Mod. 1.....	119
Tabela 5-11. Coeficientes de reatividade ao longo do ciclo, Mod 2.....	119
Tabela 5-12. Coeficientes de reatividade ao longo do ciclo, Mod 3.....	119
Tabela 5-13. Variação nominal de reatividade ao longo do ciclo, Mod 1.	120
Tabela 5-14. Variação nominal de reatividade ao longo do ciclo, Mod 2.	120
Tabela 5-15. Variação nominal de reatividade ao longo do ciclo, Mod 3.	120
Tabela II-10. Características principais de operação e projeto do 4S [4].	141
Tabela II-11. Características Físicas-Neutrônicas do 4S [4].....	142
Tabela II-12. Principais Parâmetros do Núcleo e Combustível do 4S [4].....	142
Tabela II-13. Características Termohidráulicas do 4S [10].....	142
Tabela II-14. Balanço de massa do combustível do 4S [10].....	143

NOMECLATURAS, SIMBOLOS, TERMOS E DEFINIÇÕES

$\phi(E)$	<i>Fluxo neutrônico</i>
$\sigma_{AX}(E)$	<i>Seção de choque microscópica da reação x para determinado nuclídeo A</i>
Γ_C	<i>Coefficiente de Temperatura do Combustível</i>
Γ_{Na}	<i>Coefficiente de Temperatura do Refrigerante</i>
Γ_R	<i>Coefficiente de Temperatura do Refletor</i>
Γ_V	<i>Coefficiente de Vazio do Refrigerante</i>
$\Gamma_{comb/iso}$	<i>Coefficiente Temperatura Combinado / Isotérmico</i>
F_q	<i>Fator limite de canal quente</i>
N_A	<i>Densidade atômica do nuclídeo A</i>
RR_{AX}	<i>A taxa de reação x para determinado nuclídeo A</i>
k_{eff}	<i>Fator de multiplicação efetivo</i>
DNB	<i>Departure from nucleate boiling</i>
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
NPPs	<i>Nuclear Power Plant</i>
PWR	<i>Power Water Reactor</i>
LWR	<i>Light Water Reactor</i>
ADS	<i>Accelerator Driven System</i>
FR	<i>Fast Reactor</i>
ABS	<i>Absorvedor Fixo</i>
APT	<i>Accelerator Production of Tritium</i>
CEM	<i>Cascade-Exciton Model</i>
DEPP	<i>Dias Efetivos a Plena Potência</i>
EC	<i>Elemento Combustível</i>
FA	<i>Fuel Assembly</i>
FPZ	<i>Reator Frio a Potência Zero</i>
LAQGSM	<i>Los Alamos Quark-Gluon String Model</i>

MA	<i>Minnor Actinides</i>
MCNPX	<i>Monte Carlo N-Particle eXtended</i>
MCNP5	<i>Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5</i>
Q	<i>Energia liberada por fissão</i>
QPP	<i>Reator Quente Potência Plena</i>
RFL	<i>Refletor Móvel de Grafite</i>
RSICC	<i>Radiation Safety Information Computational Center</i>
SHT	<i>Barra de Desligamento</i>
SMRs	<i>Small and Medium Sized Reactors</i>
TRU	<i>Transurânico</i>
ctm	<i>Computer time minutes</i>
q'	<i>Densidade linear de potência</i>
ν	<i>Número médio de nêutrons produzidos por fissão</i>
ρ	<i>Reatividade</i>
SMRs	<i>Small and Medium Sized Reactors</i>
NPP	<i>Nuclear Power Plant</i>
4S	<i>Super-Safe, Small and Simple</i>
CRIEPI	<i>Central Research Institute of Electric Power Industry</i>
FBRs	<i>Sodium-Cooled Fast Breeder Reactors</i>
JAEA	<i>Japan Atomic Agency</i>
JNC	<i>Japan Nuclear Cycle Development Institute</i>
JAERI	<i>Japan Atomic Energy Research Institute</i>
R&D	<i>Research & Development</i>
FCA	<i>Fast Critical Assembly</i>
ANL	<i>Argonne National Laboratory</i>
INL	<i>Idaho National Laboratory</i>
ENHS	<i>O Encapsulated Nuclear Heat Source</i>

STAR-LM	<i>Secure Transportable Autonomous Reactor - Liquid Metal</i>
RV	<i>Reactor Vessel</i>
IHX	<i>Intermediate Heat Exchanger</i>
EM	<i>Electromagnetic Pump</i>
GV	<i>Guard Vessel</i>
IFR	<i>Integral Fast Reactor Program</i>
EBR-II	<i>Experimental Breeder Reactor-II</i>
SFR	<i>Sodium Fast Reactor</i>
EC	<i>Elementos Combustíveis</i>
FA	<i>Fuel Assembly</i>
BOL	<i>Begin Of Life</i>
EOL	<i>End Of Life</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OVERVIEW DA TECNOLOGIA DE REATORES DE PEQUENO E MÉDIO PORTE	19
2.1. 4S REACTOR.....	20
3. METODOLOGIA	23
4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO EQUIVALENTE	26
4.1. DESCRIÇÃO DO NÚCLEO.....	26
4.2. EVOLUÇÃO DO COMBUSTÍVEL	41
4.2.1. Resultados	43
4.3. REATIVIDADE.....	57
4.3.1. Condições de Simulação.....	61
4.3.2. Reatividade dos Elementos de Controle	63
4.3.3. Coeficientes de Reatividade Início do Ciclo.....	65
4.3.4. Coeficientes de Reatividade ao Longo do Ciclo	77
5. MODIFICAÇÕES NO MODELO EQUIVALENTE	81
5.1. ALTERAÇÕES AO PROJETO	81
5.2. INSERÇÃO DE ABSORVEDORES AXIAIS E RADIAIS, ALTERAÇÃO DO COMBUSTÍVEL....	82
5.2.1. Descrição do Núcleo.....	82
5.2.2. Comportamento da Queima	87
5.2.3. Reatividades dos Elementos de Controle.....	89
5.3. INSERÇÃO DE VARETAS COM MODERADOR NOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS.....	90
5.3.1. Descrição do Núcleo.....	90
5.3.2. Comportamento da Queima	92
5.3.3. Reatividades dos Elementos de Controle.....	93
5.4. ALTERAÇÃO DA RELAÇÃO ALTURA DIÂMETRO DO NÚCLEO.....	95
5.4.1. Descrição do Núcleo.....	96
5.4.2. Comportamento da Queima	99
5.4.3. Reatividades dos Elementos de Controle.....	102
5.4.4. Evolução do combustível.....	103
5.4.5. Coeficientes de Reatividade ao Longo do Ciclo	110
6. TRABALHOS FUTUROS	125
7. CONCLUSÕES	122

BIBLIOGRAFIA	128
ANEXO I	131
I.1 SUPER-SAFE, SMALL AND SIMPLE REACTOR, 4S	131
I.2. CONCEPÇÃO GERAL DO 4S REACTOR.....	132
I.3. COMBUSTÍVEL	133
ANEXO II	141

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho se insere no contexto do desenvolvimento de reatores nucleares inovadores, Geração IV, com a melhoria da segurança nuclear, gerenciamento racional dos recursos, ciclo do combustível fechado com reprocessamento e redução do inventário isotópico, resistência à proliferação e redução dos custos de construção das centrais nucleares.

As pesquisas desenvolvidas em todo o mundo em novas propostas de reatores inovadores são o futuro da geração termonuclear. A massa de dados acumuladas nos últimos anos, somando-se a incorporação de novas tecnologias, têm demonstrado novamente que a tecnologia de refrigeração a sódio desponta como uma das prováveis tecnologias para os novos reatores no futuro.

Entre diferentes propostas analisadas de reatores rápidos, o projeto do *4S Reactor* [1] a [6] despertou grande interesse, pelo potencial de viabilidade do projeto. O *4S Reactor* é um projeto inovador, de espectro rápido, refrigerado a metal líquido, de pequeno porte, que incorpora o estado da arte da tecnologia de *Fast Sodium Reactor* – FSR, sistemas de refrigeração passiva e operação simples e autônoma.

A simplicidade do projeto, operação autônoma, baixo custo de implementação, dimensões reduzidas do núcleo e reator, potência desenvolvida, ciclos com extensão superior a 30 anos sem necessidade de recarregamento, possibilita o uso do projeto para construção *in-site*, como potencial para sistemas embarcados ou outdoor submersíveis para geração de energia. Estas características atrativas e aspectos econômicos podem permitir um rápido avanço e redução na resistência na incorporação das novas tecnologias de reatores de Geração IV.

Este trabalho foi baseado na tecnologia de FSR e do projeto do *4S Reactor*. Seu desenvolvimento segue dois objetivos; caracterizar e modelar o núcleo do *4S Reactor* e, incorporar novas modificações ao projeto que melhorem as características de segurança dos parâmetros neutrônicos do núcleo:

- I. O 1º objetivo deste trabalho é demonstrar a viabilidade e capacidade de modelar e simular o núcleo equivalente do *4S Reactor*, utilizando-se de informações básicas que estão disponibilizadas na literatura sobre o tema. Obtido o modelo equivalente, os principais parâmetros neutrônicos como coeficientes de reatividade e depleção do combustível, em diferentes etapas do ciclo de operação serão analisados.
- II. O 2º objetivo do trabalho é aplicar uma série de modificações ao núcleo que possibilitem a melhorias nos parâmetros neutrônicos com vistas à segurança, como a redução da reatividade de vazio do refrigerante e do combustível ao longo de todo o ciclo de operação. Um novo modelo de núcleo foi proposto, o qual acreditamos incorporar melhorias em relação ao núcleo original do *4S Reactor*.

Para a construção do modelo e simulações foi utilizado o sistema de códigos MCNPX (*Monte Carlo N-Particle eXtended*) acoplado ao código de queima CINDER90 para cálculo de evolução de composição isotópica do combustível [7] a [9]. O uso do MCNPX para simulação dos parâmetros do *4S Reactor* é inédito e não se encontram publicações equivalentes na literatura. O código demonstrou capacidade de simular a geometria do núcleo e as características singulares de controle de reatividade do projeto, através da redução dos termos de fuga de nêutrons com a utilização de refletores móveis radiais. Entretanto, sua arquitetura de uso geral provoca grandes dificuldades na obtenção dos resultados, e também algumas limitações.

Não se encontram publicações na literatura com descrição detalhada da geometria do reator e núcleo do 4S, como também informações detalhadas dos parâmetros neutrônicos, como coeficientes de reatividade, valor de reatividade dos elementos de controle e desempenho do núcleo, ao longo do ciclo de operação. Não há literatura ou publicações no país relacionadas ao tema. O novo modelo do núcleo desenvolvido baseado no modelo padrão do 4S é inédito e incorpora características já conhecidas em FSR, assim como estudos recentes na literatura [10] a [13].

2. OVERVIEW DA TECNOLOGIA DE REATORES DE PEQUENO E MÉDIO PORTE

Conforme a classificação adotada pela IAEA, são classificados de pequenos os reatores capazes de disponibilizar energia elétrica inferior a 300 MWe, e classificados como de médio porte os reatores com disponibilidade entre 200 a 700 MWe [1]. O foco no desenvolvimento de novas usinas nucleares (*Nuclear Power Plant - NPP*), têm se modificado nos últimos anos do padrão de construção de unidades cada vez maiores, que foi o foco a partir da década de 70, para novas centrais com várias unidades no mesmo local, com faixa de produção de energia elétrica entre 600 e 1000 MWe. Esses novos projetos possuem uma gestão mais racional ao compartilhar esforços e estruturas entre as unidades, permitem o compartilhamento da estrutura de transmissão, otimizam os custos na obtenção de licenças, reduzem os custos de construção associado aos fatores de escala, custos de implementação de infraestrutura auxiliar, e compartilhamento e gestão de pessoal na operação das unidades.

A proposta de desenvolvimento e aplicações de reatores de pequenas e médias escalas (*Small and Medium Sized Reactors - SMRs*), está em linha com o desenvolvimento de novas e evolucionárias usinas nucleares, e incorpora tecnologias avançadas, além de oferecer economia de escala. O foco destes projetos inovadores está em prover o aumento do benefício nas áreas de segurança, gerenciamento de rejeitos nucleares, economia na gestão de recursos, oferecendo uma variedade de produtos e flexibilidade no projeto e no ciclo do combustível [1].

Muitos destes novos projetos são de pequenos reatores sem recarregamento in-loco, também conhecidos como reatores tipo baterias nucleares, que podem operar sem recarregamento e *shuffling* (rearranjo do núcleo) por longos períodos, entre 5 e 25 anos ou mais. Os principais atrativos nos SMR são o baixo investimento em capital, redução da complexidade de equipamentos e sistemas, redução do impacto de fatores humanos, simplicidade de operação incluindo a opção por operação autônoma, utilização modular e capacidade expansível em site.

A publicação IAEA 2007 - *Status of Small Reactor Designs Without On-Site Refuelling* [1] apresenta uma análise completa do estado atual de concepção dos SMRs e dos principais projetos atuais em diversas nações, entre os projetos podemos destacar:

- Reatores baseados em combustível TRISO: PFPWR50 (Japão), VKR-MT (Rússia), AFPR (USA), FBNR (Brasil).
- Reatores de espectro rápido refrigerados a sódio: 4S Toshiba (Japão), 4S-LMR CRIEPI (Japão), MBRU-12 (Rússia), BN GT-300 (Rússia).
- Reatores de espectro rápido refrigerados a liga eutética de chumbo-bismuto: SVBR-75/100 (Rússia), ENHS (USA), LSPR (Japão), SPINNOR/VSPINNOR (Indonésia), PBWFR (Japão), SSTAR (USA) e STAR-LM (USA).

2.1. 4S REACTOR

Entre as diversas propostas estudadas de reatores modulares de pequeno e médio porte, o projeto do Reator 4S, desenvolvido pela *Toshiba Corporation* e pelo *Central Research Institute of Electric Power Industry* – CRIEPI, Japão, despertou maior interesse devido às características inovadoras do projeto, pelo fato de se encontrar em estágio avançado de desenvolvimento e ter incorporado uma base sólida de conhecimento da tecnologia de reatores rápidos refrigerados a sódio. Aspectos relacionados à segurança passiva, operação autônoma, construção modular, aplicações diversificadas como - aquecimento, produção de hidrogênio, dessalinização, e geração de energia em locais remotos, somado à simplicidade com baixa necessidade de manutenção e ciclos de queima superiores a 30 anos sem necessidade de recarregamento, também são grandes atrativos ao projeto.

O Anexo I apresenta o descritivo do projeto do 4S Reactor, assim como aspectos importantes do núcleo e projeto relacionados ao contexto deste trabalho.

Do ponto de vista neutrônico, o 4S é um *Fast Sodium Reactor* tipo piscina, que opera no espectro rápido de energia dos nêutrons. O espectro endurecido possibilita o uso mais flexível de operação de reatores, como conversores, regeneradores (*Breeder*) ou super-regeneradores, maiores densidades de potência, maior queima do combustível e por consequência maior aproveitamento energético [14] [15]. O espectro rápido de nêutrons também favorece a redução do inventário isotópico do combustível com menor geração de TRU, especialmente MA (Neptúnio, Amerício e Cúrio), e isótopos não-físséis de plutônio. Entre todos os esquemas de operação baseados em ciclos abertos, parcialmente fechados ou ciclos fechados, também é o que permite a menor radiotoxicidade associada aos rejeitos de alto-nível¹ do combustível queimado [16].

Em contrapartida, a operação no espectro rápido necessita de maior inventário físsil na partida². O espectro também reduz o percentual de nêutrons atrasados β , o reator possui maiores excursões de reatividade, menor período de resposta e maior desafio para a análise de segurança. O uso de refrigerantes baseados em metais líquidos apresentam grandes vantagens com relação à transferência de energia, à remoção de calor do núcleo, à temperatura e pressão de operação, e possibilitam a utilização de sistema passivos de refrigeração. Contudo devem ser considerados as implicações e problemas relacionados à compatibilidade do refrigerante com os materiais estruturais e com o meio, problemas relacionados à corrosão, ativação neutrônica e coeficiente de vazão do refrigerante³ [10].

A avaliação dos parâmetros neutrônicos é de suma importância na análise de reatores nucleares. Deve-se garantir que os parâmetros neutrônicos estabeleçam uma condição de

¹ A publicação *Accelerator-driven Systems - ADS and Fast Reactors - FR in Advanced Nuclear Fuel Cycles A Comparative Study NUCLEAR ENERGY*, OECD/NEA [16], apresenta uma extensiva análise das tecnologias e ciclos de operação de combustíveis, gerenciamento de rejeitos nucleares, e desempenho dos sistemas nucleares baseados em FR, LWR e ADS, para redução do inventário isotópico.

² O elevado percentual de enriquecimento, por outro lado, permite a obtenção de arranjos críticos com um núcleo mais compacto.

³ Em *Handbook of Nuclear Engineering* [10], Capítulo 21 Seção 3, é apresentada análise abrangente do sódio, assim como propostas que envolvem o uso de fluidos refrigerantes não reativos.

operação intrinsecamente segura, através da obtenção de coeficientes de reatividade negativos que permitam a realimentação negativa e estável de excursões de potência no núcleo. Para reatores operando no espectro rápido, coeficientes positivos são aceitáveis em determinadas condições de operação, desde que as somatórias dos parâmetros sejam negativos e levem ao retorno das condições de estabilidade. As análises de segurança devem prever a condição de operação segura e o desligamento do núcleo em qualquer condição operacional ou nos eventos postulados de acidentes.

3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do modelo e as simulações neutrônicas do reator 4S foi utilizado o sistema de códigos MCNPX (*Monte Carlo N-Particle eXtended*) acoplado intrinsicamente ao código de queima CINDER90 para cálculo de evolução da composição isotópica dos materiais [8] [9].

Baseado nas informações do projeto do reator e núcleo do 4S obtidas em diferentes publicações [1] a [6], foi construído um modelo do núcleo e reator equivalente, utilizando a maior correspondência às informações disponíveis. Contudo, há uma grande limitação de detalhes técnicos e de geometria fazendo com que fosse necessário interpolar informações disponíveis em de forma difusa na literatura sobre o tema⁴.

Através do modelo equivalente foram levantados os parâmetros de queima e evolução do núcleo. E a partir destes resultados, as novas composições do combustível foram utilizadas para análises dos coeficientes de reatividade em diferentes etapas do ciclo de operação.

Em um segundo momento foram geradas uma série de modificações ao projeto original, incorporando modificações ao núcleo de forma a obter uma melhoria dos parâmetros de reatividade. Estes dados são comparados ao projeto original. Também são avaliadas as alterações nas composições do combustível durante a queima, assim como o impacto na extensão do ciclo, e dos coeficientes de reatividade do núcleo.

A descrição detalhada da representação do modelo, assim como da metodologia de análise é apresentada em maiores detalhes junto com a discussão dos resultados. O trabalho é dividido em duas partes:

- I. No Capítulo 4 são apresentados os resultados da análise e simulação do modelo equivalente do 4S Reactor.
 - i. Descrição detalhada da geometria do modelo e descrição dos materiais utilizados.
 - ii. Cálculos da queima e evolução do combustível.
 - iii. Reatividade dos elementos de controle do núcleo.
 - iv. Cálculo dos principais parâmetros nucleares.

- II. No Capítulo 5 são apresentados os resultados referentes às modificações efetuadas no modelo do núcleo.
 - i. Substituição da liga binária de combustível metálico baseada em Zr para liga ternária a base de Nb e, inserção de absorvedores axiais e radiais ao núcleo.

⁴ O projeto do Reator 4S têm sido submetidos a diversas alterações ao longo dos últimos anos [6] [4], no qual se observa desde alterações no núcleo, *pitch* (passo) dos EC, como no seu comprimento nas regiões internas e externas. Alguns valores durante o desenvolvimento do modelo foram obtidos através de realimentações e otimizações nos parâmetros, como enriquecimento do combustível e dimensionais do Absorvedor Fixo e Barra de Desligamento.

- ii. Inserção de pinos de moderação ao combustível.
- iii. Mudança da relação altura/diâmetro do núcleo.

O trabalho se restringe a obtenção dos parâmetros nucleares (coeficientes de reatividade, reatividade dos elementos de controle, queima do combustível e evolução da composição). Informações que envolvem distribuição de potência locais q' , fatores limites de canal quente F_q , limites de queima na estrutura de Elementos Combustíveis – EC (*Fuel Assembly - FA*) e varetas, entre outros, não serão discutidos, por envolver cálculos termohidráulicos em sistemas de códigos acoplados e otimizados para o modelo e que fogem do contexto deste trabalho.

4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO EQUIVALENTE

4.1. DESCRIÇÃO DO NÚCLEO

Os critérios estabelecidos para a modelagem do reator e núcleo foram a de busca de uma melhor aproximação aos valores descritos na literatura. Entretanto, alguns parâmetros de geometria e de materiais utilizados não foram encontrados, a exemplo do que se refere ao absorvedor fixo e barra de desligamento. Para esses, a geometria foi ajustada conforme os resultados de criticalidade (fator de multiplicação para início do ciclo) e de reatividade (valor de trabalho da barra de desligamento e absorvedor fixo). O ajuste gerou uma série de simulações e alterações de parâmetros até se obter valores que fossem coerentes para um modo de operação (i.e., manutenção da margem de desligamento do núcleo em $\sim 3\% dk/kk'$, $k_{eff} \cong 1.00000$ na posição crítica inicial de operação).

Algumas simplificações geométricas foram incorporadas ao modelo, desde que estas não interferissem nos resultados, como exemplo a homogeneização da blindagem do núcleo e simplificação do refletor móvel para apenas uma zona. Algumas informações não disponibilizadas em detalhes foram inferidas como a exemplo da largura da blindagem e do *downcomer* do reator.

Abaixo são descritos alguns dos parâmetros nucleares obtidos a partir da simulação do modelo desenvolvido:

- O ciclo é predito para terminar em 35 anos ou 12.775 DEPP (Dias Efetivos a Plena Potência), acumulando o burnup médio de 154,37 GWd/THM, com potência de simulação de 215 MWe.
- O núcleo de arranjo hexagonal é constituído no total de 18 Elementos Combustíveis - EC divididos em duas Zonas.
 - Zona Interna - 6 EC totalizando 1.626 Varetas Combustíveis.
 - Zona Externa - 12 EC totalizando 3.252 Varetas de Combustíveis.
 - 1 Subelemento Central disponível para a inserção e remoção do Absorvedor Fixo e da Barra de Desligamento (*ultimate shutdown rod* - SHT).
- O percentual de enriquecimento entre a Zona Externa / Zona Interna é aproximadamente 1,54, com enriquecimento médio do combustível 12,51%.
- O enriquecimento nominal e massa de metais pesados no núcleo nas duas zonas são mostrados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1. Parâmetros básicos do modelo do núcleo.

Região Núcleo	Número de EC	Enriquecimento Inicial [w/o ²³⁵ U]	Massa Inicial de U por EC [kg]	Massa Total de ²³⁵ U por EC [kg]	Massa Total de U por Zona [kg]
Zona Interna	6	9,2	900,6	81,1	5.404
Zona Externa	12	14,16	900,6	132,4	10.808

Alguns dos parâmetros do projeto que envolvem o núcleo e o Elemento Combustível:

- Distância entre redes do EC - *pitch* = 259 mm.
- Número de varetas por EC $n^{\circ} = 271$.
- Comprimento da área ativa do EC 2500 mm.

Alguns dos principais parâmetros da Vareta combustível:

- Diâmetro externo do revestimento 14 mm.
- Espessura do revestimento 1,1 mm.
- Diâmetro combustível 10,4 mm.
- *Gap* entre o combustível e revestimento 1,25 mm.
- Smear density (densidade da mescla) $\cong 78\%$.

A Tabela 4.2 apresenta uma série de dados do modelo desenvolvido. O Anexo II, apresenta os dados dos principais parâmetros do projeto do 4S *Reactor* obtidos da literatura. As Figuras 4-1 a 4-6 apresentam o esquema simplificado do modelo desenvolvido, indicando os dimensionais dos principais componentes do núcleo, enquanto as Figuras 4-7 e 4-8 mostram as vistas em corte axial e radial do modelo gerado através do MCNPX, respectivamente.

Tabela 4-2. Descrição dos materiais e geometria do modelo.

1. Reator	Unidade	Valor / Parâmetro
Potência Térmica	MW	215
Pressão Operação	Bar	1
Temperatura Simulação		
Frio Potência Zero (FPZ)	K	293,6
Quente Potência Plena (QPP)	K	800
Refrigerante		Na
Moderador		Não Possui
Duração Ciclo	Dias	12.775
	Anos	35
Burnup	GWd/THM	154
Densidade Mássica de Potência Média (Combustível)	KW/kgU	12,21
Densidade Volumétrica Potência Média (Núcleo)	MW/m ³	24,1
Elementos de Controle		Barra de Desligamento
		Absorvedor Fixo
		Refletor Móvel Axial
Número de Elementos Combustíveis		18
Zona Interna		6
Zona Externa		12
Lattice		Hexagonal
Material Estrutural		HT-9
Dimensional		
Raio Externo Vaso Reator	m	1,73
Raio Interno Vaso Reator	m	1,75
Diâmetro Vaso Reator	m	3,50
Espessura do <i>Downcomer</i>	m	0,30
Raio Externo da Blindagem	m	1,43
Raio Externo Refletor	m	0,987
Espessura do Refletor	m	0,30
Espessura Blindagem	m	0,44
Raio Externo Núcleo	m	0,685

Raio Interno Núcleo	m	0,665
Diâmetro do Núcleo	m	1,37
Comprimento do Núcleo	m	6,39
Comprimento da área ativa do Núcleo	m	2,5
Comprimento da Blindagem	m	7,19
Espessura Difusor Inferior	m	0,10
Materiais		
Vaso, Barreira	HT-9	Fe 84,36%; Cr 11,94%; Ni 0,62%; W 0,48%; Mo 1,03%; Mn 0,69%; Si 0,30%; V 0,30%; C 0,21%
Densidade	g/cm ³	7,75
Blindagem	HT-9, Na	Geometria Homogeneizada Liga 92% HT-9; 8% Na
Densidade	g/cm ³	7,207
Difusor	HT-9, Na	Geometria Homogeneizada Liga 20% HT-9 20%; 80% Na
Densidade	g/cm ³	2,324
DownConner	Na	100% Na
Densidade	g/cm ³	0,968

2. Refletor	Unidade	Valor / Parâmetro
Dimensional		
Raio Externo do Refletor	cm	98,70
Raio Interno do Refletor	cm	68,70
Espessura Refletor	cm	30
Comprimento Refletor	cm	270
Geometria		Geometria Axial 1 Setor
Material		
Refletor	Grafite	100% C _{nat}
Densidade	g/cm ³	2,267

3. Absorvedor Fixo	Unidade	Valor / Parâmetro
Dimensional		
Raio Externo Revestimento	cm	11,14
Raio Interno Revestimento	cm	10,99
Comprimento Material Absorvedor	cm	250
Geometria		Hexagonal 1 Setor, com Orifício Central
Raio Centro Externo	cm	10,81
Raio Centro Interno	cm	10,66
Material		
Absorvedor		100% Hf _{nat}
Densidade	g/cm ³	13,31
Revestimento		HT-9

4. Barra de Desligamento	Unidade	Valor / Parâmetro
Dimensional		
Geometria		Cluster Radial com 7 Varetas Absorvedoras
Pitch	cm	7,00
Raio Externo Revestimento Barra	cm	3,50
Raio Interno Revestimento Barra	cm	3,40
Espessura Revestimento	cm	0,10
Raio material absorvedor	cm	3,30
Comprimento Material Absorvedor	cm	250
Comprimento Vareta de Material Absorvedor	cm	497
Material		
Absorvedor		B ₄ C, 90% ¹⁰ B
Densidade	g/cm ³	2,4214
Revestimento		HT-9

5. Elemento Combustível	Unidade	Valor / Parâmetro
Número Elementos Combustíveis (EC)		18
Zona Interna		6
Zona Externa		12
Número de Varetas Combustíveis por EC		271
Número Total de Varetas		4.878
Elemento Combustível Dimensionais		
Geometria		Hexagonal
Pitch	cm	25,80
Raio Externo	cm	12,85
Raio Interno	cm	12,65
Espessura Parede	cm	0,20
Comprimento	cm	639
Vareta Combustível		
Geometria		Radial
Pitch	cm	1,52
Raio Externo Revestimento	cm	0,700
Raio Interno Revestimento	cm	0,645
Raio Combustível	cm	0,520
Comprimento Vareta Combustível	cm	497

Comprimento Área Ativa	cm	250
Razão Volume Plenum / Combustível		0,92
Comprimento de Al ₂ O ₃ Isolante Superior / Inferior	cm	7,00
Raio Externo Al ₂ O ₃	cm	0,520
Raio Furo Central Al ₂ O ₃	cm	0,208
Smeared Density		0,78
Materiais		
Combustível		90% U-10% Zr
Enriquecimento Médio ²³⁵ U	w/o	12,51
Zona Interna	q	9,2
Zona Externa	w/o	14,16
Densidade	g/cm ³	17,796
Massa Total Urânio	kg	17.687
Massa ²³⁵ U Zona Interna	kg	729
Massa ²³⁵ U Zona Externa	kg	1.458
Revestimento		HT-9
Isolante		Al ₂ O ₃
Densidade	g/cm ³	3,95

Figura 4-1. Representação simplificada do Elemento Combustível e Disposição das Varetas.

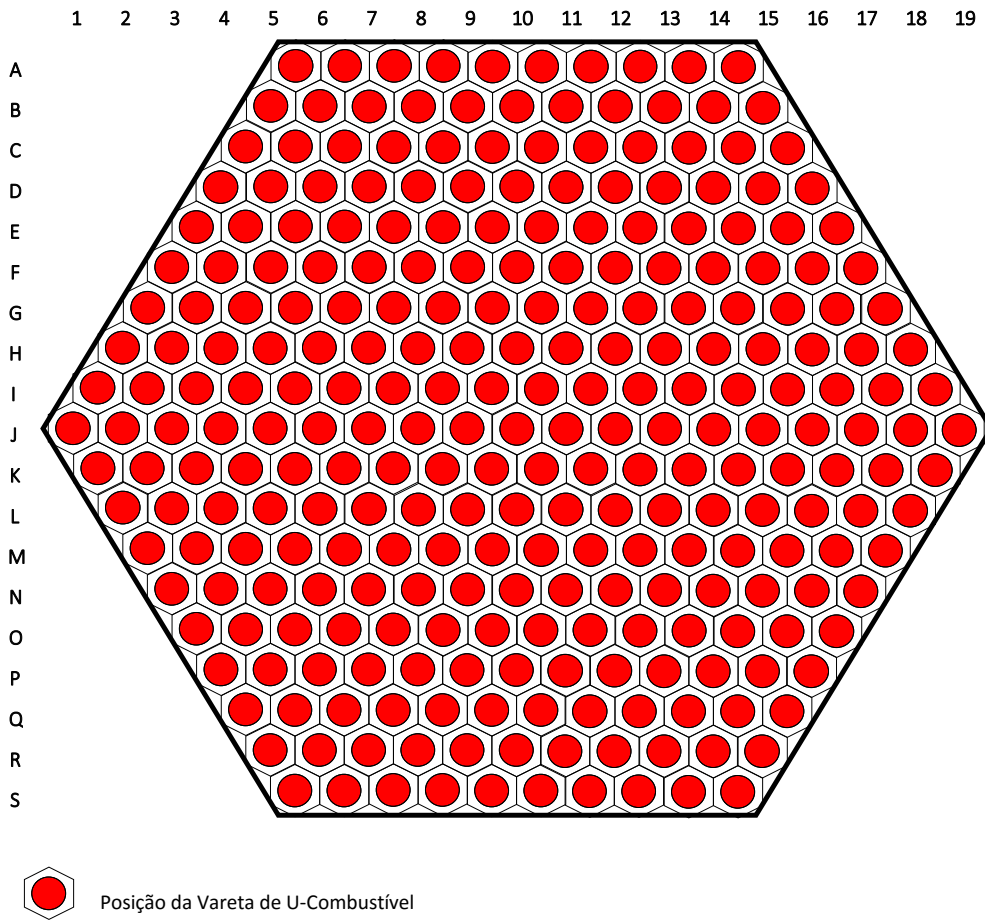


Figura 4-2. Representação Axial e Radial com os Principais Componentes do núcleo do Reator.

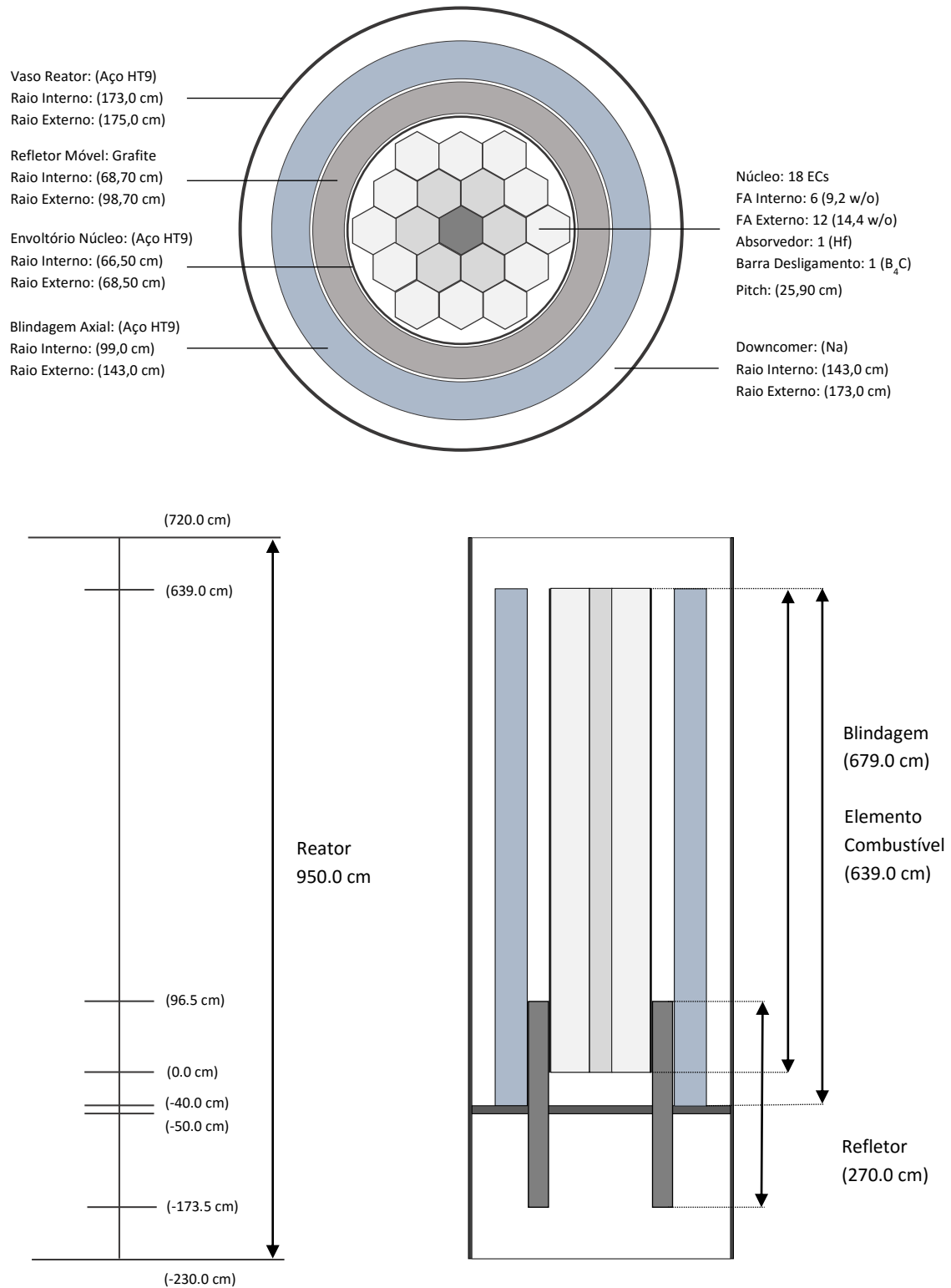


Figura 4-3. Representação Axial e Radial do elemento Combustível.

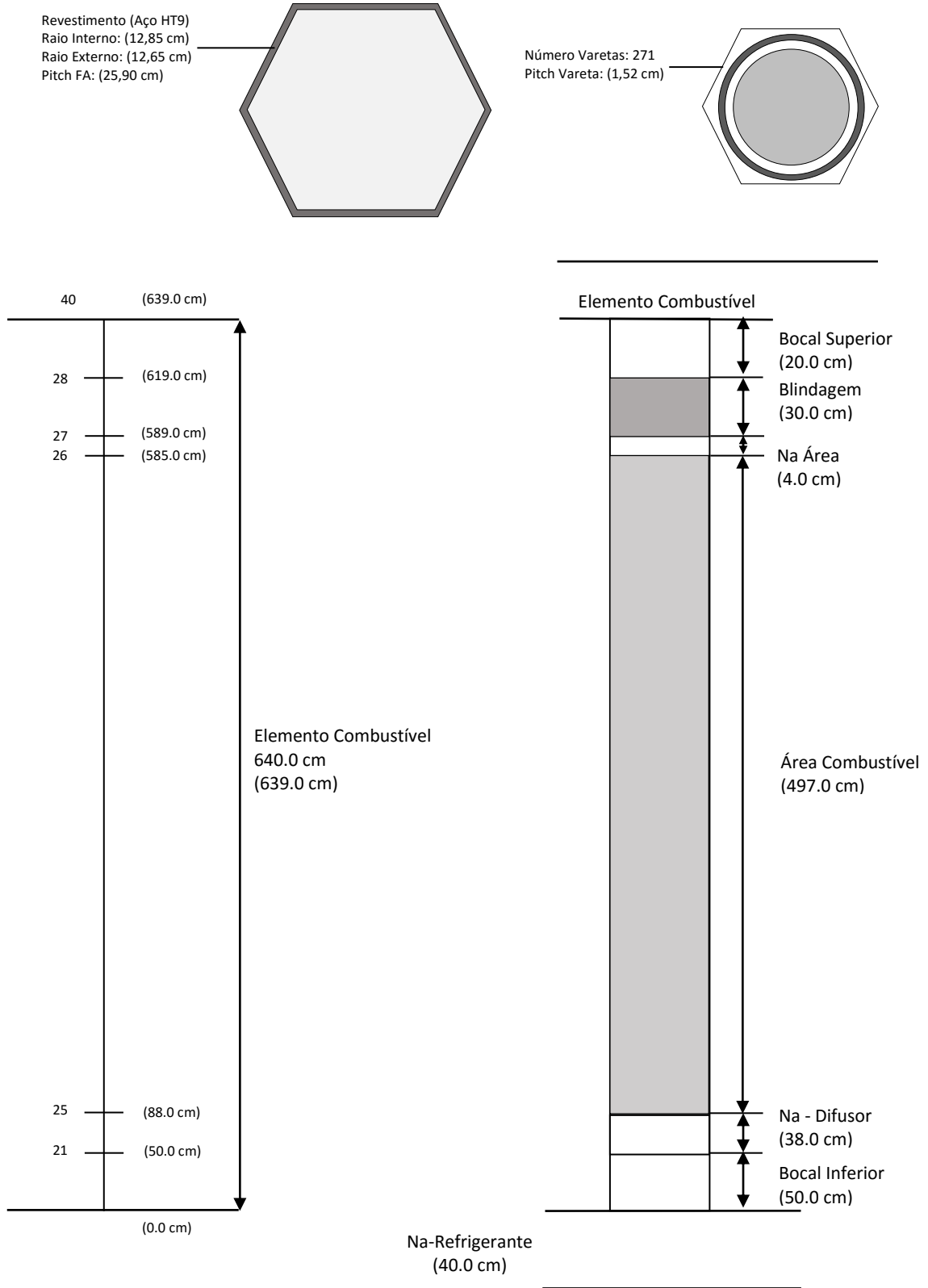


Figura 4-4. Representação Axial e Radial da Vareta de Combustível.

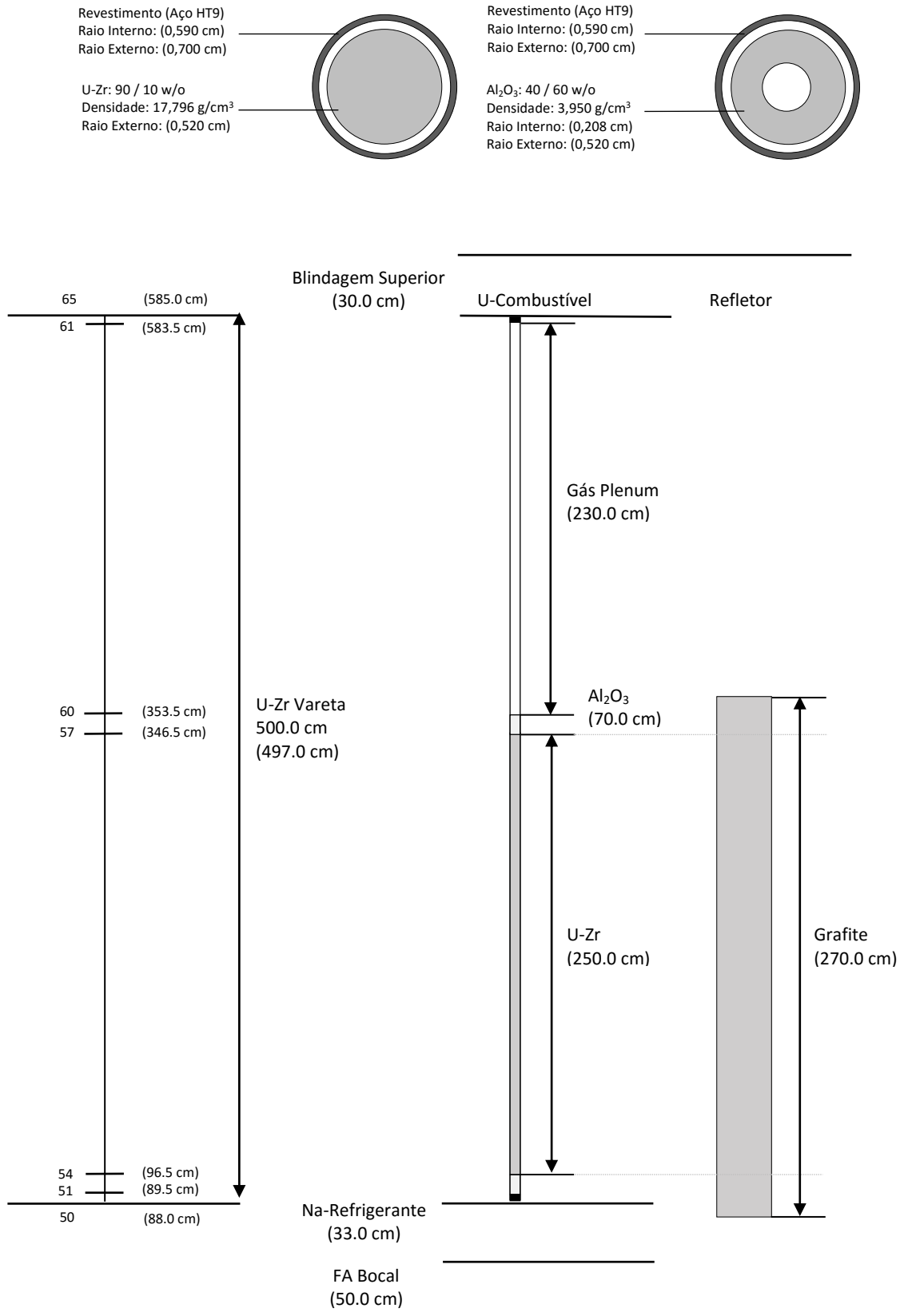


Figura 4-5. Representação Axial e Radial do Subelemento Central.

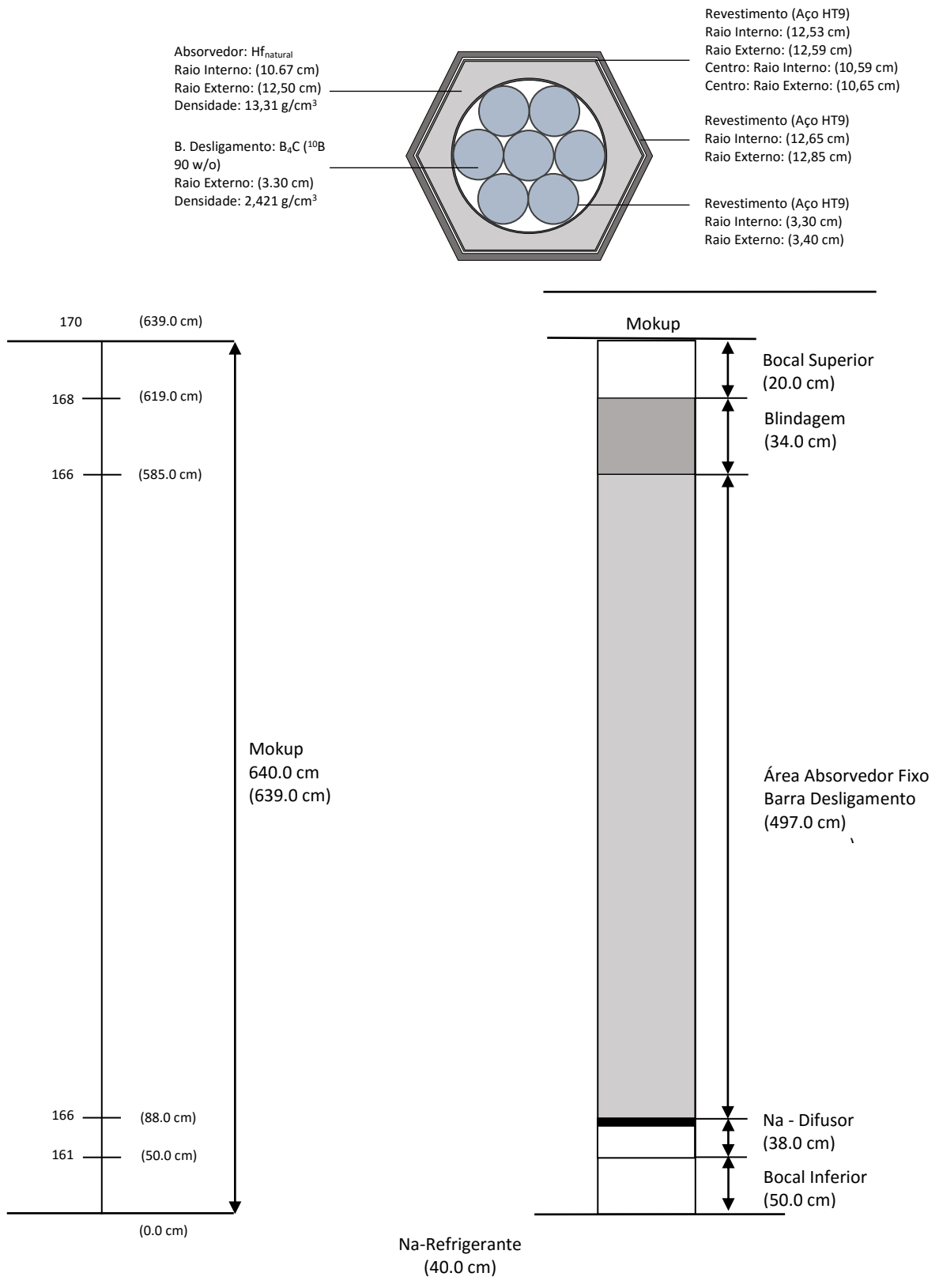


Figura 4-6. Representação Axial e Radial dos Elementos Absorvedores.

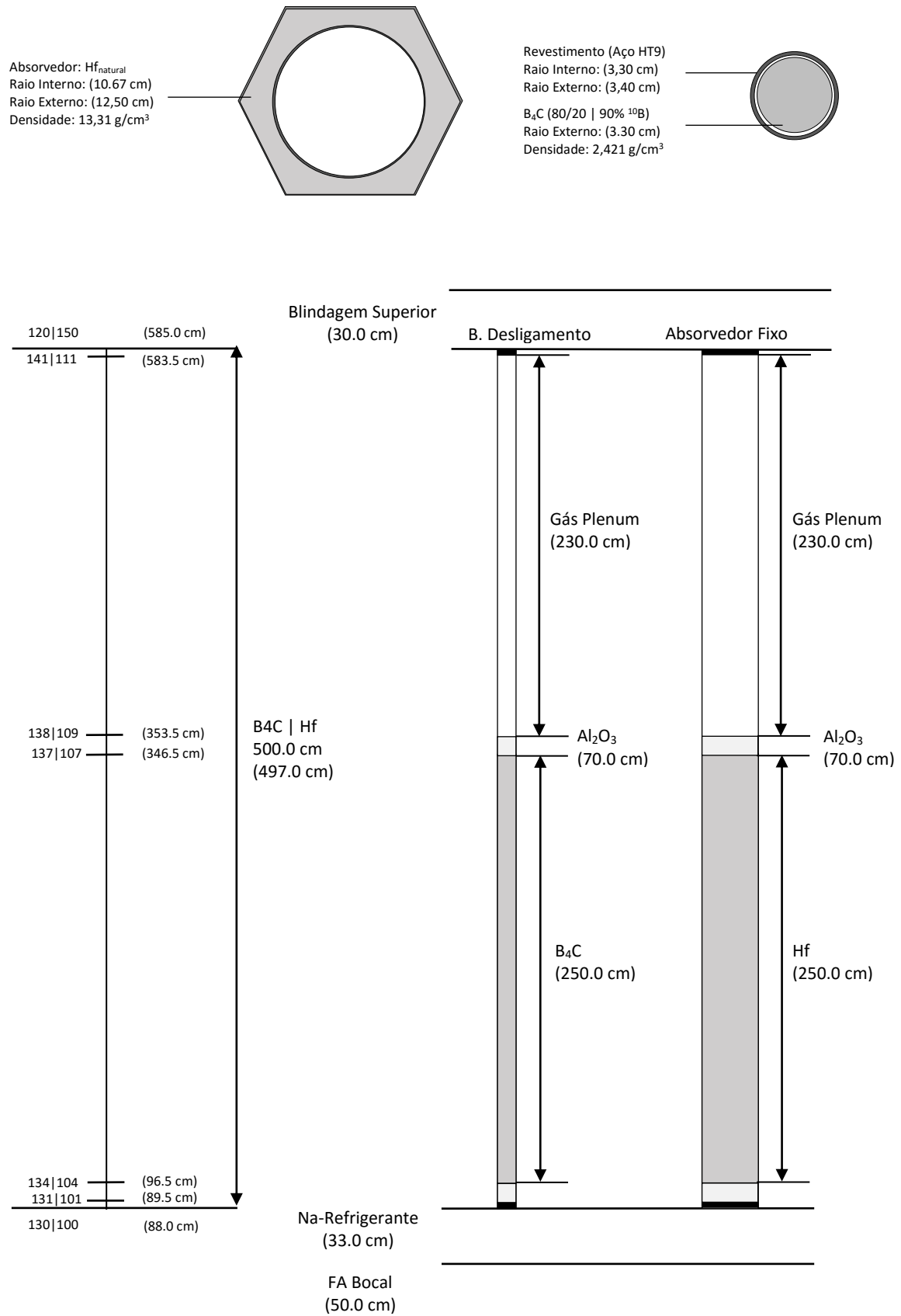


Figura 4-7. Vista Axial do Núcleo do Reator (Imagem obtida do MCNPX 2.6.0).

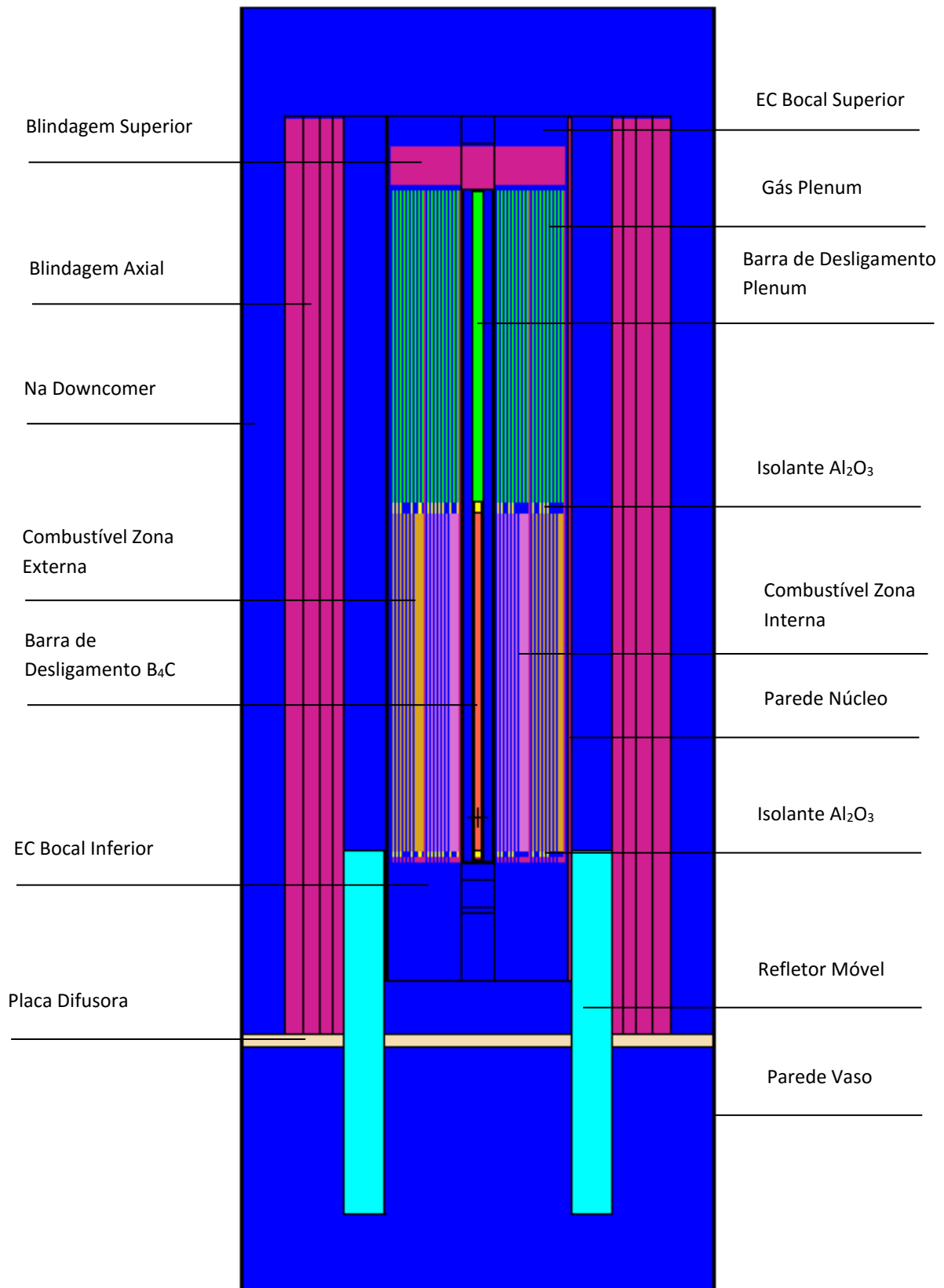
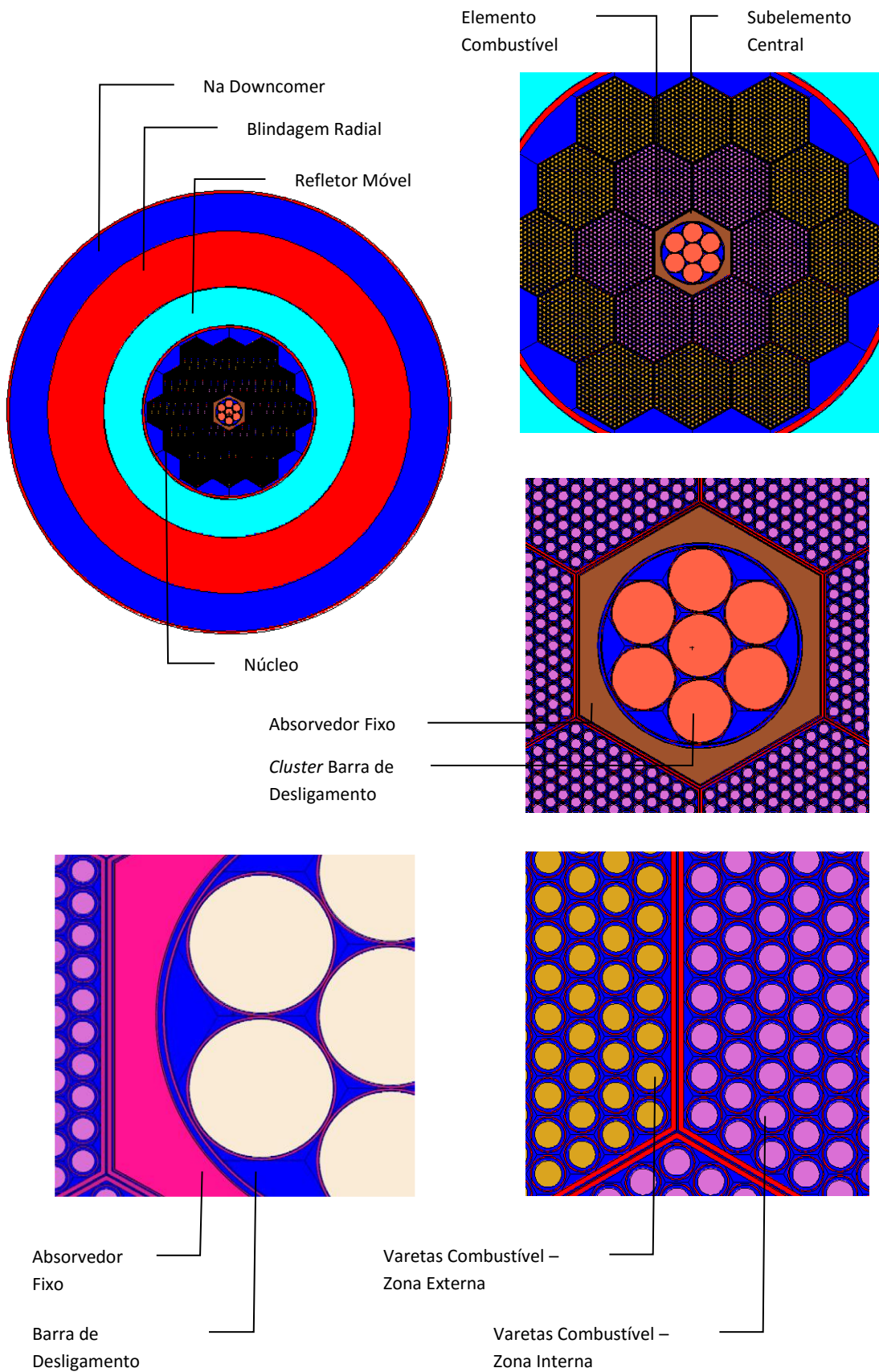


Figura 4-8. Vista Radial do Núcleo Reator (Imagem obtida do MCNPX 2.6.0).



4.2. EVOLUÇÃO DO COMBUSTÍVEL

O cálculo de queima realizado na versão do código MCNPX 2.6.0 é um processo integrado envolvendo o cálculo do fluxo em estado-estacionário no módulo MCNPX e a evolução da composição através do módulo CINDER90. O MCNPX partindo dos resultados obtidos da biblioteca contínua obtém os autovalores, autovetores, taxas de reação, número médio de nêutrons produzidos por fissão (ν) e energia liberada por fissão (valor Q) para 63 grupos de energia. Os valores são transferidos ao módulo CINDER90 que realiza o cálculo da evolução do combustível gerando nova composição para realimentação na próxima etapa. Novamente o MCNPX gera outro conjunto de grandezas a partir dos novos parâmetros de entrada. O processo se repete até o último intervalo de tempo especificado na entrada do cartão de queima [17] [8].

A taxa de reação (RR_{AX}) para um determinado tipo de interação X e nuclídeo A é definida como

$$RR_{AX} = N_A \int \phi(E) \sigma_{AX}(E) dE, \quad \text{Eq. B-1}$$

Em que:

N_A = densidade atômica do nuclídeo A ;

$\phi(E)$ = fluxo neutrônico;

$\sigma_{AX}(E)$ = seção de choque microscópica da reação X para o nuclídeo A .

O MCNPX calcula os parâmetros dos materiais que são listados nos dados de entrada, produzidos pelo algoritmo gerador de isótopos, ou selecionados pelos dados específicos dos produtos de fissão. Quando a informação não é especificada no MCNPX, o módulo CINDER90 calcula as taxas de reações de até 3.400 isótopos utilizando as seções de choque de sua biblioteca. Para isótopos que não possuem seções de choque de transporte, o MCNPX calcula o fluxo para 63 grupos de energia, o qual é enviado para o CINDER90, que integra as seções de choque para os 63 grupos de energia e calcula as taxas de reação (RR_{AX}) para cada nuclídeo [17].

O MCNPX possui algumas limitações importantes no cálculo de queima que necessitam ser mencionadas:

- O método estocástico do MCNPX demanda enorme esforço computacional, o que torna o resultado final muito dependente do número de partículas transportadas e do intervalo entre os passos de queima.
 - A simulação do modelo utilizou o transporte inicial de 8.000 partículas, distribuídas em 985 posições ao longo do núcleo ao longo de todo o comprimento ativo, axial e radial do núcleo.
 - O valor elevado de erro nas estimativas produz o aspecto serrilhado na curva do fator de multiplicação. É necessário uma quantidade muito elevada de

partículas iniciais transportadas para redução do erro, o que eleva significativamente o tempo de processamento computacional para obtenção dos resultados. O erro para k_{eff} para o final do 1º ciclo de queima foi inferior a 100 pcm, enquanto para o final do 2º ciclo foi de aproximadamente 300 pcm (função do maior número de isótopos no combustível).

- Em função da baixa potência térmica do reator e, por consequência, a grande extensão do ciclo de queima, foi determinado o passo de 365 dias para cada intervalo de queima.
- O MCNPX não possui vasta biblioteca de seção de choque para diferentes temperaturas. O código também não possui modelo de cálculo para estimativas das seções de choque em função da temperatura. A limitação demanda que o usuário tenha que gerar novas bibliotecas para diferentes energias e carregadas no MCNPX.
 - A simulação do modelo utilizou a temperatura de 800 K para cálculo da queima, considerando somente as bibliotecas para o refletor de $C_{natural}$, refrigerante de $Na_{natural}$, isótopos ^{235}U , ^{238}U e ^{239}Pu .
- O MCNPX calcula a evolução do combustível somente até a 2ª geração de núclídeos filhos, isso faz com que as estimativas de composição e massa diverjam dos resultados corretos com o aumento da extensão do intervalo de queima. Há a necessidade de realimentação do cartão de entrada considerando os resultados de composição obtidos com a intervenção do usuário. Isso provoca o aumento do tempo necessário para obter os resultados, grande esforço, possibilidades de erros com inserção de parâmetros errados e avaliações erradas na simplificação das composições.
 - Em função da implicação de simplificações mal avaliadas e de inserção de erros, o modelo foi realimentado somente na troca de configuração entre os ciclos 1 e 2. Essa estratégia melhora as estimativas dos cálculos de não-actínídeos (“venenos”), reduzindo as simplificações nas realimentações com exclusão de núclídeos, que se reflete nas estimativas do fator de multiplicação (“efeito dente de serra”), fluxo e, por consequência na queima. Positivamente, há a melhor estimativa do conteúdo de plutônio na evolução do combustível.
 - O principal impacto na redução de realimentação no cálculo de queima é nas estimativas dos actínídeos menores, principalmente Amerício e Cúrio, formados a partir da depleção do Plutônio.
- A versão do MCNPX 2.6.0 utilizada, com o módulo CINDER 90, não é otimizada para estimativa do conteúdo de MA no cálculo de queima. Para estimativas de MA é necessário considerar intervenções no cartão de entradas com realimentações de composição.

- Para a simulação foram utilizados 97 nuclídeos na realimentação, a partir dos resultados obtidos no primeiro ciclo de queima.

4.2.1. Resultados

O cálculo de queima foi gerado com núcleo carregado com a matriz de combustível metálico urânio-zircônio, com enriquecimento de 9.2 w/o e 14.16 w/o, na zona interna e zona externa, respectivamente. São considerados somente a depleção do material combustível (elementos estruturais e absorvedores não são considerados). O intervalo de queima foi de 365 dias com a potência de 215 MW em todos os passos. A duração do primeiro ciclo de queima foi de 19 anos, 6.935 dias, atingindo o Burnup médio de 84,34 GWd/THM. O segundo ciclo de queima com duração de 16 anos, totaliza o comprimento de ciclo total de 35 anos, 12.775 dias, atingindo o Burnup total de 154,37 GWd/THM.

▪ **Variação de k_{eff} e fluxo ao longo do ciclo**

Como descrito no Anexo II, o projeto do *4S Reactor* utiliza-se do absorvedor fixo central para permitir a extensão do ciclo de queima. A presença de um material absorvedor na região de maior intensidade de fluxo neutrônico, é compensada com a elevação do enriquecimento médio do combustível, permite-se assim, um excesso de reatividade no núcleo compensado pela perda de nêutrons. O absorvedor fixo é extraído após a primeira queima do combustível, desta forma o reator opera em dois regimes do ciclo: No primeiro ciclo de queima o absorvedor fixo é mantido inserido no núcleo enquanto o refletor se move para cima compensando o burnup do combustível. Esgotada a queima, o refletor retorna a sua posição inicial, e o absorvedor fixo é totalmente extraído; um segundo ciclo se inicia, com o refletor novamente refazendo a movimentação em torno do núcleo.

O excesso de reatividade do segundo ciclo é função do valor de trabalho exercido pelo absorvedor fixo. Os gráficos da Figura 4.9 mostra o degrau dos dois regimes de operação.

A simulação é executada na condição de inserção total do refletor na posição superior da região ativa do núcleo, posição final de maior reatividade, e acompanhado o *burnup* e redução do fator de multiplicação até se atingir a condição de subcriticalidade. O segundo ciclo é iniciado com a extração do absorvedor fixo, a realimentação da composição do combustível a partir dos resultados de depleção e novamente acompanhado os termos de redução com o refletor na posição superior de maior reatividade. Os gráficos da Figura 4.9 apresentam comportamento do fator de multiplicação e do fluxo neutrônico e ao longo do 1º e 2º ciclos de queima.

Para o início do ciclo, o valor de $k_{eff} = 1.02818 \pm 0.00067$ é atingido com a inserção do refletor de grafite na posição superior do núcleo, totalizando o excesso de reatividade de 2.871 pcm. A reatividade é consumida a uma taxa média de 151,5 pcm/ano, o que representaria em média, a movimentação do refletor em cerca de 1,2 cm por semana. O valor de subcriticalidade é atingido transcorridos 6.965 dias de operação ou 19 anos. O segundo ciclo de queima possui duração de 5.840 dias ou 16 anos de operação, o que totaliza o comprimento total de ciclo de 12.775 dias ou 35 anos.

O aspecto serrilhado da curva de decaimento a partir do 2º ciclo se dá através do aumento da estimativa de erro e sua elevação ocorre pelo aumento do esforço computacional para realizar o cálculo de transporte, com a composição diversificada de isótopos no combustível. O erro médio é de 66 pcm para o primeiro ciclo e de 223 pcm para o segundo ciclo de queima.

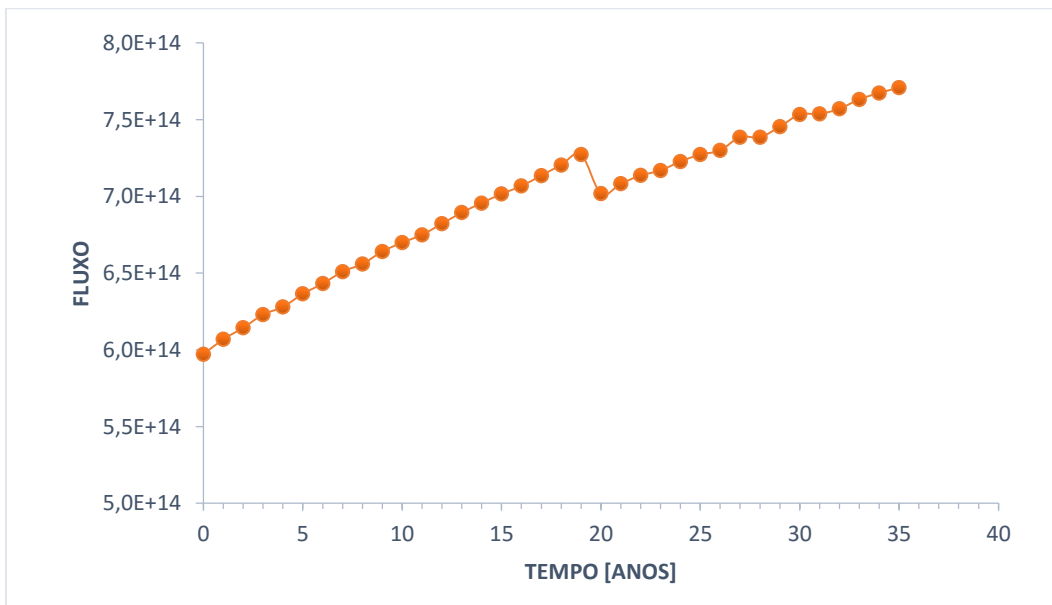
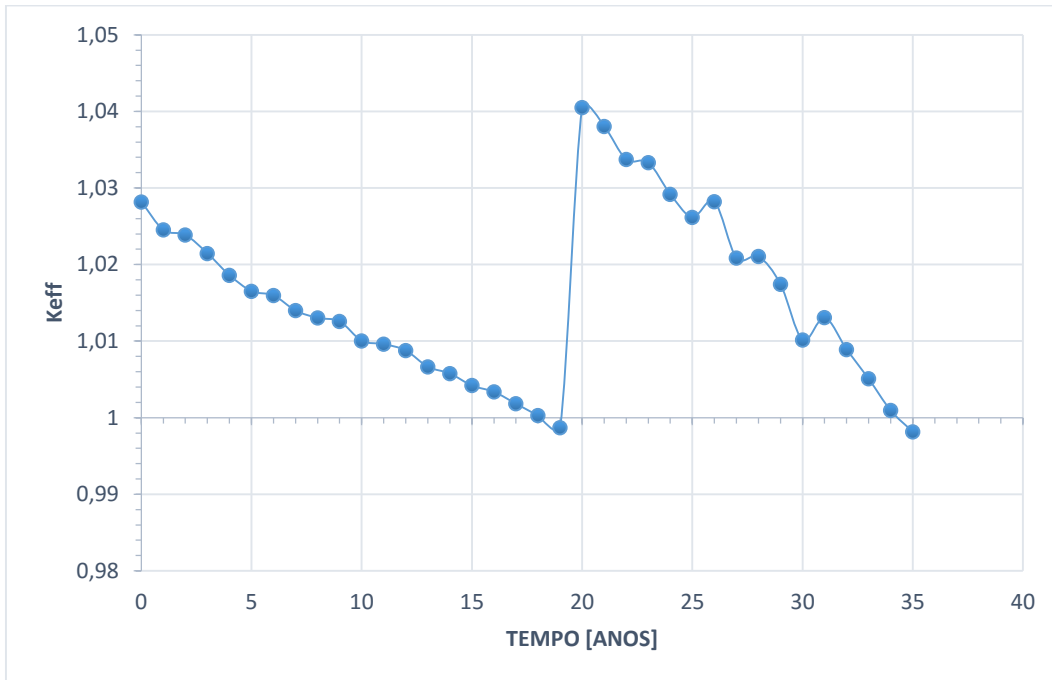
O segundo ciclo inicia-se com valor k_{eff} superior ao primeiro ciclo, isso ocorre principalmente em função do erro inicial nas estimativas do fator de multiplicação, gerado pela não utilização das bibliotecas de seção de choque com correção de temperatura para os diferentes isótopos da nova composição do combustível, que foi gerada pelo cálculo de depleção no primeiro ciclo. São considerados na nova composição todos os isótopos com fração superior a 10^{-5} . No universo de mais de 60 isótopos considerados, somente os principais isótopos de urânio e de plutônio foram corrigidos para a temperatura de simulação de 800 K.

A avaliação nas estimativas de k_{eff} refletem de maneira diferente na estimativa de extensão do tempo de ciclo, a taxa de queima é mais acentuada no segundo ciclo, cerca de 253 pcm/ano. O combustível queima com taxa mais alta, pois a reatividade no segundo ciclo é inferior ao primeiro (massa de isótopos físeis menor, e presença de venenos no combustível). Isso ocorre porque, apesar da estimativa superior para k_{eff} em função da ausência das bibliotecas corrigidas para a temperatura de operação, o excesso de reatividade introduzido pela remoção do absorvedor fixo tem um valor inferior a essa estimativa⁵.

O fluxo neutrônico cresce acompanhando a queima do combustível, e a geração principalmente, de grande quantidade de ^{239}Pu .

⁵ Na Seção 4.3 são apresentados os valores de trabalho, reatividade, do absorvedor fixo e dos demais elementos de controle do núcleo.

Figura 4-9. Variação de k_{eff} e fluxo ao longo do ciclo.



▪ Queima ao longo do ciclo

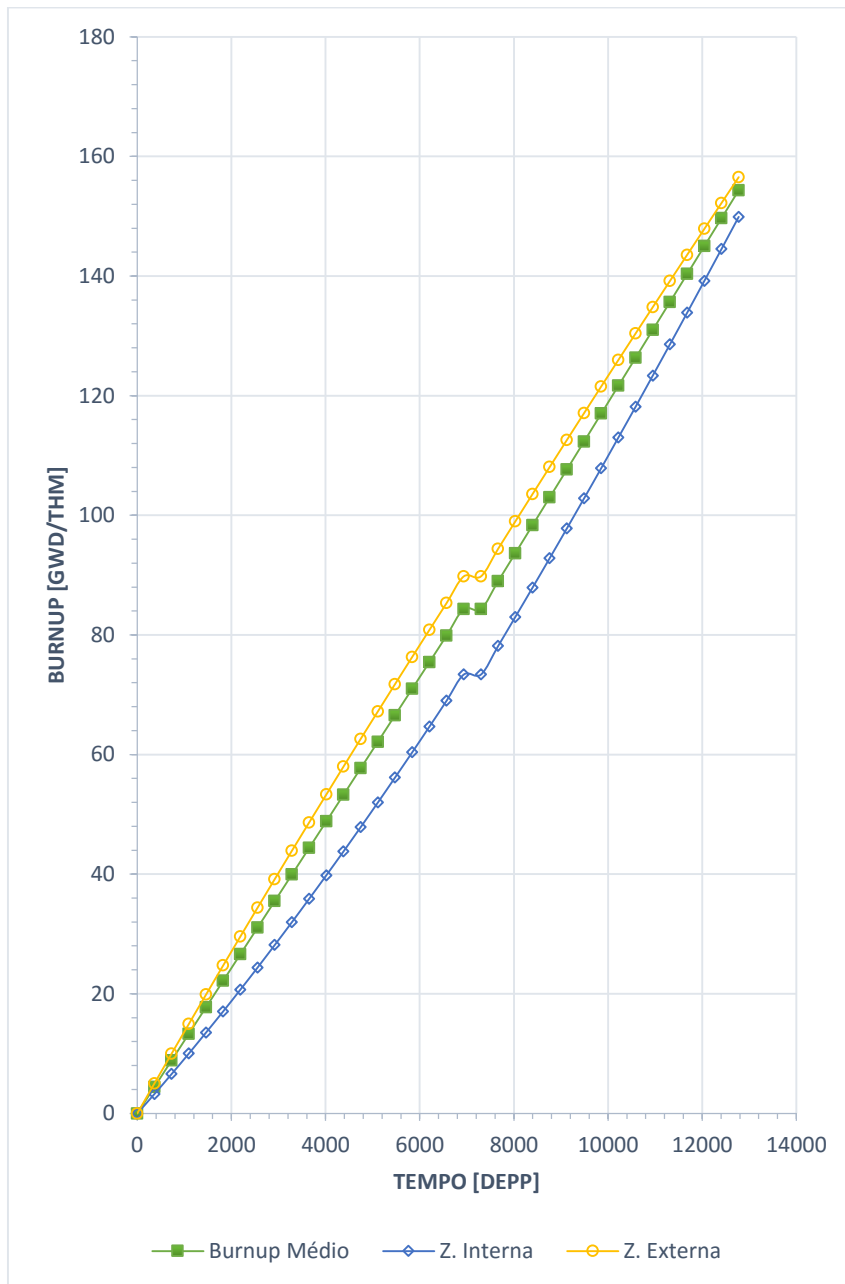
A queima média ao longo do primeiro ciclo corresponde a 84,34 GWD/THM, aproximadamente 4,4 GWD/THM /ano. Para o combustível na Zona Interna e Zona Externa do núcleo, o valor de queima corresponde, respectivamente a 73,19 GWD/THM e 89,80 GWD/THM.

A queima média ao longo do segundo ciclo corresponde a 70,03 GWD/THM, aproximadamente 4,67 GWD/THM /ano. Para o combustível na Zona Interna e Zona Externa do núcleo, o valor de queima corresponde, respectivamente a 76,53 GWD/THM e 66,75 GWD/THM.

Os resultados da simulação apresentam uma queima média elevada de 154,37 GWD/THM, muito acima do valor mencionado na literatura 90.0 GWD/THM (ver Anexo II). Este valor está coerente com as estimativas calculadas considerando a redução de massa de combustível, com o tempo de duração do ciclo, a potência gerada e excesso de reatividade inicial do núcleo. O valor correspondente para a potência *standard* de 135 MWt é de 78,04 GWD/THM primeiro ciclo, e 67,76 GWD/THM segundo ciclo, totalizando 145,8 GWD/THM para o combustível.

O valor de *burnup* do reator é elevado, muito acima do publicado na literatura apesar do enriquecimento também inferior ao publicado. Este valor demonstra uma alta eficiência de queima do reator, contudo o *burnup* é um dos principais parâmetros de limitação de segurança do núcleo, sendo valor limite estrutural dos elementos e varetas combustíveis. Também é limite de integridade operacional do combustível. Estes valores de *burnups* são mencionados nas literaturas do SuperPhenix e do Monju, como valores possíveis de serem atingidos [10] mesmo com a utilização de combustíveis óxidos – UO₂, contudo a base de dados do *4S Reactor* utiliza-se principalmente da larga base de dados obtidas dos experimentos com combustíveis metálicos efetuadas no EBR-II [6] (Anexo I). A literatura relacionada ao EBR-II e aos limites estruturais envolvidos no combustível não foram estudados neste trabalho.

Figura 4-10. Queima longo do ciclo



TEMPO [DIAS]	BURNUP [GWD/TWM]
0	0.00
365	4.44
730	8.88
1095	13.32
1460	17.76
1825	22.19
2190	26.63
2555	31.07
2920	35.51
3285	39.95
3650	44.39
4015	48.83
4380	53.27
4745	57.71
5110	62.14
5475	66.58
5840	71.02
6205	75.46
6570	79.90
6935	84.34
7300	84.34
7665	89.01
8030	93.67
8395	98.35
8760	103.01
9125	107.68
9490	112.35
9855	117.02
10220	121.69
10585	126.36
10950	131.03
11315	135.69
11680	140.36
12045	145.03
12410	149.70
12775	154.37

▪ **Variação da massa de actínídeos ao longo da queima**

As Figuras 4-11 a 4-14 mostram a composição do combustível para o início e final do ciclo de queima. Os dados são apresentados em termos da massa inicial, percentual isotópico no início do ciclo; e através da variação em massa e percentual relativo dos principais isótopos transurânicos gerados no final do ciclo.

O alto valor de burnup atingido pelo combustível ao longo do ciclo de operação leva a uma significativa redução da massa de urânio. Da massa total de urânio, BOL Ciclo 1, são convertidos 3.298 kg aproximadamente ~94 kg/ano, desse valor 45,6 kg/ano são de ^{235}U e 56,6 kg/ano são de ^{238}U . O ^{235}U residual representa ~24,5% de sua massa inicial.

Para o Pu a geração em massa é significativa 1.164,9 kg, ou 5,34% da composição do combustível. O principal isótopo gerado é o físsil ^{239}Pu com 1.014 kg ou 4,65%, o que representa quase metade da massa inicial de ^{235}U utilizada no início do ciclo, como também 87% do conteúdo de Pu gerado.

A massa de MA gerada é baixa 39,12 kg, apenas 0,18% da composição total do combustível. O principal MA gerado é o Np com 0,16% ou 35,38 Kg, sendo o restante constituído de Am com 0,0166%, 3,65 Kg, e Cm com apenas 0,092%, 92 gramas.

Do ponto de vista do ciclo do combustível, a geração de rejeito de longa-vida através de MA é significativamente baixa. A geração de plutônio é elevada principalmente de isótopos físseis. O que ocorre em função do espectro de energia proporcionado pelo uso do refrigerante a sódio e do alto fluxo neutrônico. O refletor a grafite, que possui alto poder de moderação, tem pouca influência no espectro de energia; de fato, atua como um refletor e não como moderador. Os resultados da geração de Pu e MA estão em linha os dados de operação de FR [16].

Figura 4-11. Composição em massa e percentual isotópico do combustível metálico U-Zr no início do ciclo.

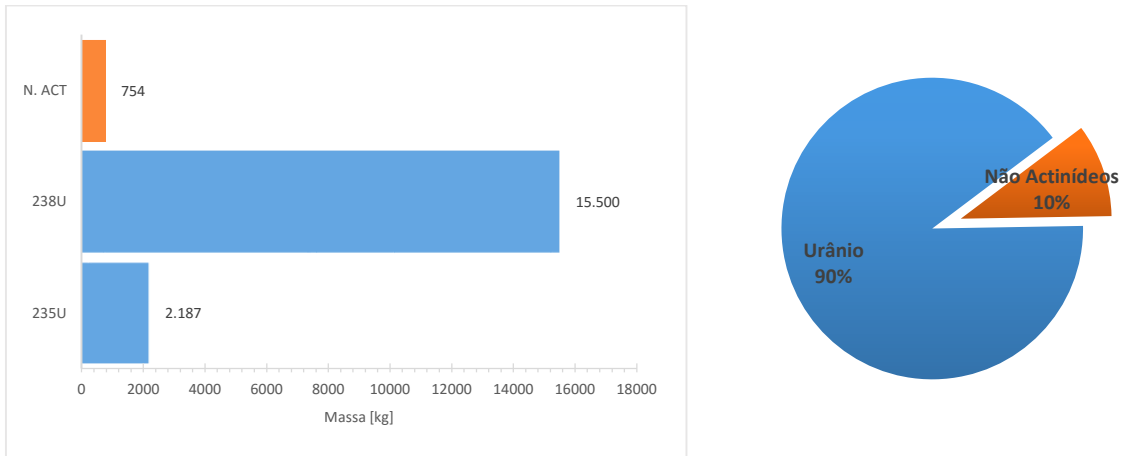


Figura 4-12. Variação em massa e percentual isotópico do combustível metálico U-Zr no final do ciclo.

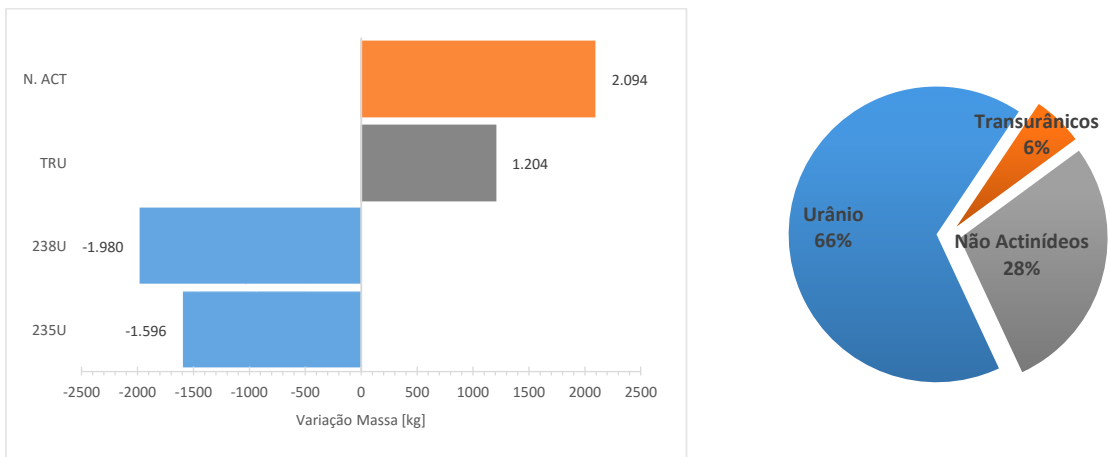


Figura 4-13. Variação em massa e distribuição relativa dos transurânicos no final do ciclo de operação.

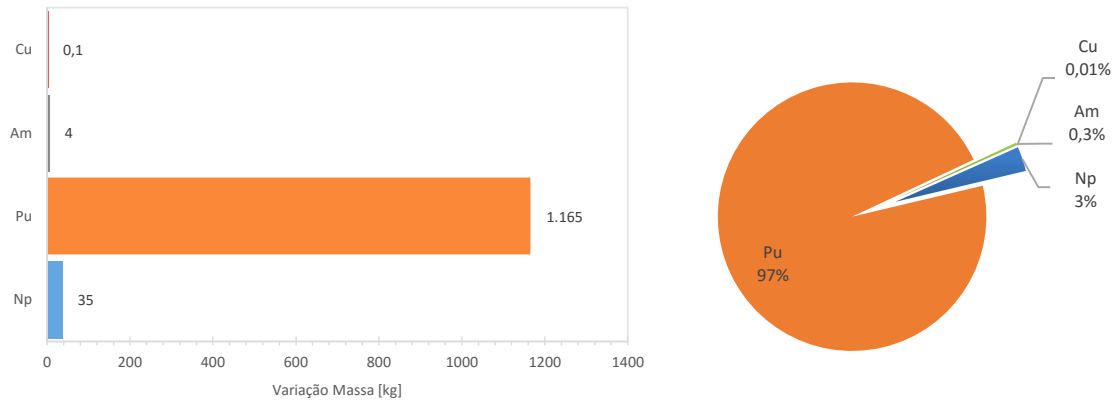
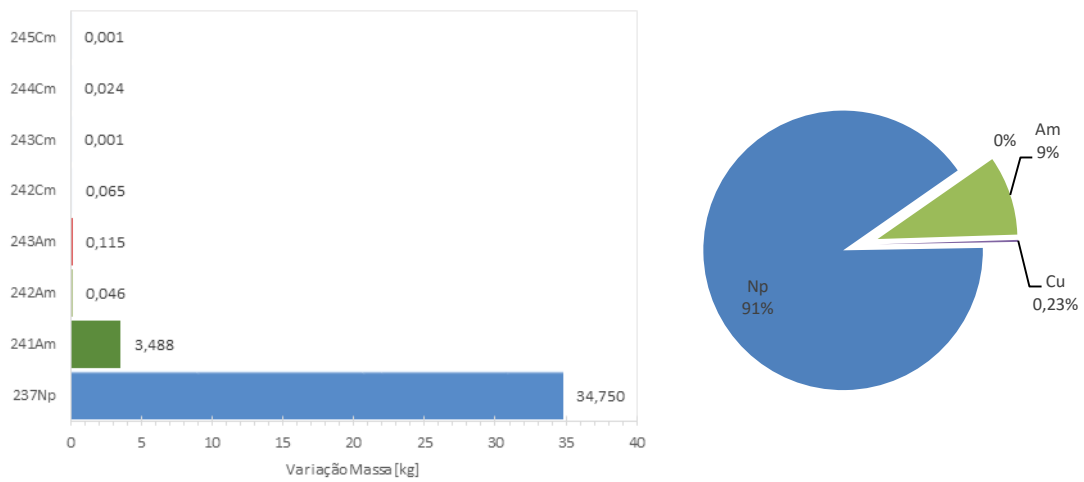
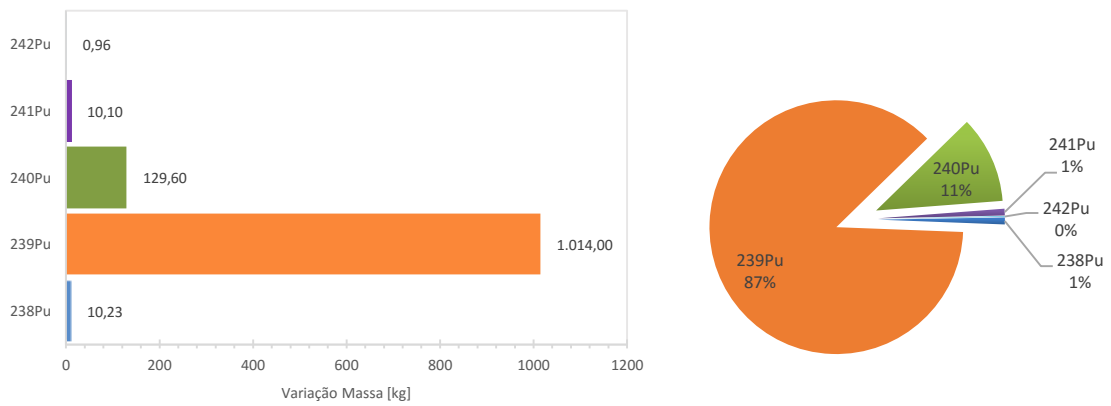


Figura 4-14. Variação em massa e distribuição relativa do conteúdo de plutônio, e actínides menores, no final do ciclo de operação.



▪ Variação da massa de actínídeos ao longo da queima

As Figuras 4-15 a 4-17, apresentam a variação percentual e a variação de massa de material físsil e fissionável no combustível, para o início e final do ciclo de operação.

A redução do percentual de isótopos físsis no combustível é de -2,01 %, valor baixo apesar da queima elevada de ^{235}U . A redução é compensada pela geração elevada de ^{239}Pu , o que faz com que combustível residual da queima permaneça com alto conteúdo de material físsil. A Razão de Conversão média para o núcleo é de $C=0,52$ ($C=0,53$ e $C=0,49$ para a zona externa e interna do núcleo, respectivamente).

O percentual de TRU físsis representa 4,70% da composição isotópica do combustível, os fissionáveis representam apenas 0,82%, em massa 1.024,2 kg e 179,2 kg, respectivamente. A relação de geração físsil/fissionável é 5,7. Dos isótopos fissionáveis gerados, a maior parte é constituída de ^{240}Pu 0,59% e ^{237}Np 0,16%.

Figura 4-15. Composição isotópica do combustível no início do ciclo e variação no final do ciclo de operação, em termos do percentual de isótopos físsis e fissionáveis de actínídeos e transurânicos presentes no combustível.

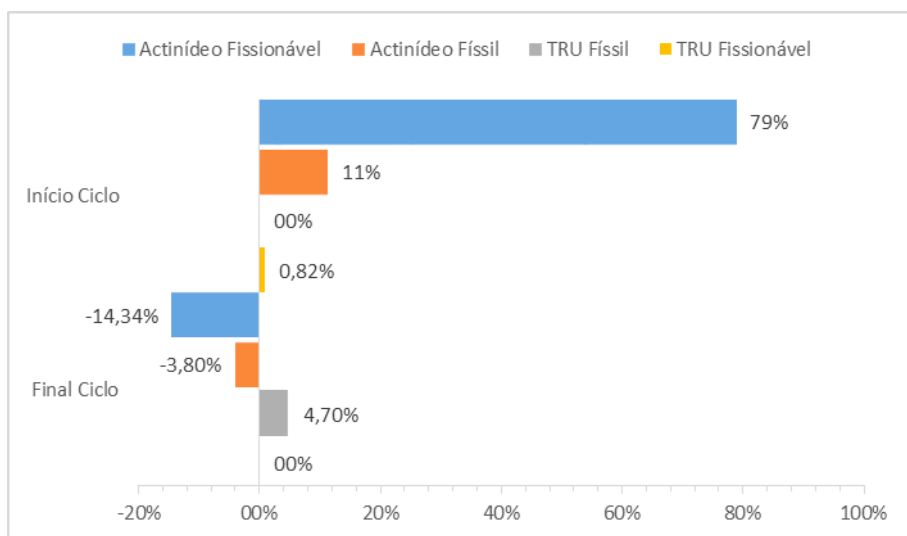


Figura 4-16. Enriquecimento do combustível no início do ciclo e variação no final do ciclo de operação (w/o % de isótopos físséis).

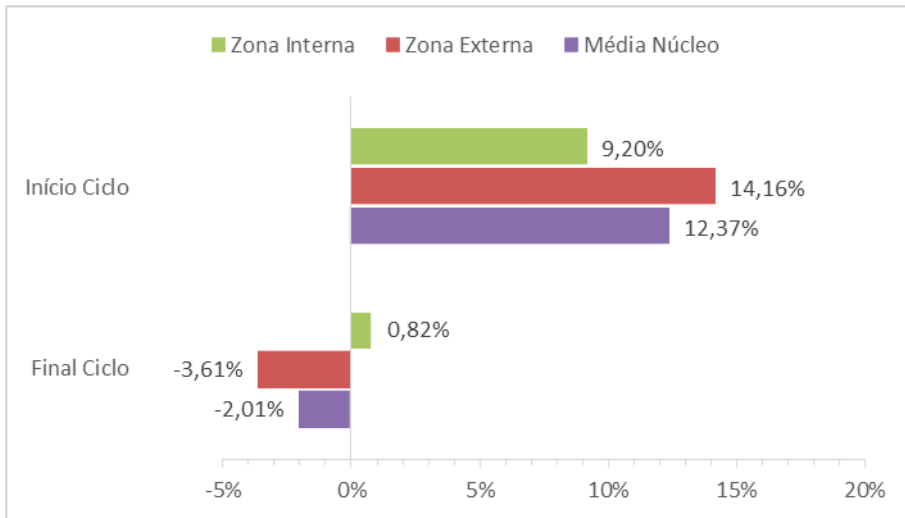


Figura 4-17. Composição inicial em massa dos principais actínídeos no início do ciclo, e variação no final do ciclo de operação.



▪ **Composição Isotópica do Combustível no Início do Ciclo, Reator Quente Potência Plena, Xe = 0**

A Tabela 4-3 fornece a composição do combustível e biblioteca de seção de choque utilizada (i.e. temperaturas e percentuais envolvidos) para o cálculo de queima do combustível e determinação dos coeficientes de reatividade do núcleo. (ver seção 4.3).

As bibliotecas de seção de choque para a temperatura de 800K são usadas para apenas os isótopos mais importantes do combustível⁶, como também para o refletor e refrigerante.

Tabela 4-3. Composição Isotópica do Combustível no início do primeiro ciclo, BOL Ciclo 1, Reator Quente Potência Plena, Xe = 0

Zona Interna:

Isótopo	Fração Atômica	Percentual [%]
U238	0.8172	81,72
U235	0.0828	8,28
Zr	0.10	10

Zona Externa:

Isótopo	Fração Atômica	Percentual [%]
U238	0.77256	77,256
U235	0.12744	12,744
Zr	0.10	10

⁶ Os dados contidos nas Tabela 4-3 a 4-5, tem objetivo de registro e consulta.

▪ **Composição Isotópica do Combustível no Início e Fim do 2º Ciclo, Reator Quente Potência Plena, Xe em Equilíbrio**

A Tabela 4-4 apresenta os percentuais isotópicos do combustível utilizado para o cálculo de queima no ciclo 2, como também na obtenção dos parâmetros neutrônicos de reatividade para EOL Ciclo 1 (Reator na condição Quente Potência Plena – QPP) Xe em equilíbrio; e BOL Ciclo 2 (Reator na Condição Frio Potência Zero – FPZ) zero Xe. Os dados correspondem ao percentual isotópico dos actínidos e não-actínidos gerados na saída do passo 19, EOL Ciclo 1.

Para EOL Ciclo 2, os dados são apresentados na Tabela 4-5.

A realimentação da composição do combustível para análise dos coeficientes de reatividade e para novo ciclo de queima, é uma ação importante e meticulosa que pode introduzir erro ou a avaliação incorreta, como simplificações ou exclusões mal avaliadas, o que pode acarretar na invalidação de todos os resultados futuros. Em função disto, foram tomados cuidados e utilizados alguns critérios de simplificação para a recomposição do combustível neste trabalho:

- i. Por simplificação, todos os isótopos com percentual acima de $1E-5$ são considerados. A biblioteca preferencial utilizada é a ENDF-B VI, porém caso não esteja disponível para algum isótopo relacionado é utilizada outra. Apenas os isótopos que não possuem biblioteca de seção de choque listadas no MCNPX são excluídos⁷.
- ii. Para o reator na condição QPP, são mantidas as concentrações de Xe e Sm, assim como é utilizada a temperatura de 800 K para os principais isótopos do combustível, também para refletor e refrigerante.
- iii. Para o reator na condição FPZ são zeradas as concentrações de Xe e Sm, e utilizada a temperatura de $293,6\text{ K}$ como referência.
- iv. A concentração de actínidos é mantida invariável, não são feitas normalizações de concentração ou exclusões de nenhum isótopo.
- v. A composição dos não-actínidos é normalizada de forma que o somatório final do percentual de todos os isótopos presentes na composição do combustível seja unitário. Desta forma procura-se evitar o cálculo de normalização automática do MCNPX que ocasionaria no ajuste também das concentrações dos actínidos.

⁷ Outra técnica seria a utilização apenas dos isótopos que possuem seção de choque significativa e, percentual representativo no combustível.

Tabela 4-4. Composição Isotópica do Combustível no início do segundo ciclo, BOL Ciclo 2, QPP, Xe em Equilíbrio

Zona Interna:

Isótopo	Fração Atômica	Percentual [%]	Isótopo	Fração Atômica	Percentual [%]
U238	7.40E-01	74.0200%	Pd106	9.07E-04	0.0907%
U235	4.17E-02	4.1670%	Sm147	8.43E-04	0.0843%
Pu239	3.83E-02	3.8290%	Sm149	5.71E-04	0.0571%
U236	6.96E-03	0.6957%	Kr084	4.83E-04	0.0483%
Pu240	1.81E-03	0.1809%	Rb085	4.47E-04	0.0447%
Np237	6.53E-04	0.0653%	I129	4.38E-04	0.0438%
Pu238	8.89E-05	0.0089%	Zr090	4.35E-04	0.0435%
Pu241	5.38E-05	0.0054%	Pd108	4.02E-04	0.0402%
Np239	3.29E-05	0.0033%	Pm147	2.96E-04	0.0296%
U234	2.47E-05	0.0025%	Sm152	2.61E-04	0.0261%
U237	2.10E-06	0.0002%	Sm151	2.55E-04	0.0255%
Pu242	1.67E-06	0.0002%	Kr083	2.49E-04	0.0249%
Np236	2.49E-08	0.0000%	Ag109	2.08E-04	0.0208%
Th232	1.83E-09	0.0000%	Pd104	2.01E-04	0.0201%
Pu237	2.67E-10	0.0000%	Eu153	1.23E-04	0.0123%
			Sm150	1.21E-04	0.0121%
Zr	9.85E-02	9.8539%	I127	1.21E-04	0.0121%
Xe134	4.35E-03	0.4354%	Pd110	1.01E-04	0.0101%
Cs135	3.84E-03	0.3842%	Br081	9.01E-05	0.0090%
Xe136	3.70E-03	0.3700%	Cs134	5.72E-05	0.0057%
Ba138	3.61E-03	0.3612%	Cd111	4.54E-05	0.0045%
Cs133	3.56E-03	0.3560%	Gd156	3.54E-05	0.0035%
Zr096	3.30E-03	0.3305%	Ru103	3.21E-05	0.0032%
Tc099	3.20E-03	0.3201%	Cd112	2.78E-05	0.0028%
Zr094	3.14E-03	0.3139%	Xe130	2.47E-05	0.0025%
Mo095	3.08E-03	0.3084%	Gd155	2.25E-05	0.0023%
Pr141	3.07E-03	0.3066%	Eu155	2.11E-05	0.0021%
Zr093	3.05E-03	0.3049%	Cd113	1.87E-05	0.0019%
Cs137	2.95E-03	0.2953%	Eu154	1.83E-05	0.0018%
Ru101	2.89E-03	0.2893%	Gd157	1.61E-05	0.0016%
Nd143	2.88E-03	0.2881%	Eu151	1.14E-05	0.0011%
Zr092	2.80E-03	0.2797%	Cd110	1.11E-05	0.0011%
Xe132	2.64E-03	0.2641%	Gd158	9.62E-06	0.0010%
Zr091	2.59E-03	0.2587%	Gd154	7.86E-06	0.0008%
Y089	2.01E-03	0.2014%	Kr082	7.73E-06	0.0008%
Nd145	2.00E-03	0.2001%	Xe128	5.97E-06	0.0006%

Xe131	1.70E-03	0.1697%	Nd147	3.82E-06	0.0004%
Pd105	1.36E-03	0.1362%	Eu152	1.71E-06	0.0002%
Rb087	1.14E-03	0.1137%	Gd160	1.65E-06	0.0002%
Nd148	9.58E-04	0.0958%	Gd152	1.11E-06	0.0001%
Kr086	9.16E-04	0.0916%			

Zona Externa:

Isótopo	Fração Atômica	Percentual [%]	Isótopo	Fração Atômica	Percentual [%]
U238	7.02E-01	70.2200%	Nd148	1.18E-03	0.1184%
U235	6.46E-02	6.4630%	Sm147	9.76E-04	0.0976%
Pu239	3.09E-02	3.0920%	Pd106	9.14E-04	0.0914%
U236	1.10E-02	1.0990%	Kr084	6.35E-04	0.0635%
Pu240	2.19E-03	0.2190%	Sm150	6.23E-04	0.0623%
Np237	8.39E-04	0.0839%	Zr090	6.12E-04	0.0612%
Pu241	1.93E-04	0.0193%	Rb085	6.03E-04	0.0603%
Pu238	1.40E-04	0.0140%	I129	4.89E-04	0.0489%
U234	3.78E-05	0.0038%	Pd104	4.60E-04	0.0460%
Np239	2.64E-05	0.0026%	Pd108	3.62E-04	0.0362%
Pu242	9.25E-06	0.0009%	Sm152	3.35E-04	0.0335%
U237	2.68E-06	0.0003%	Kr083	3.20E-04	0.0320%
Np236	2.96E-08	0.0000%	Pm147	3.16E-04	0.0316%
Th232	2.94E-09	0.0000%	Sm151	2.47E-04	0.0247%
Pu237	3.87E-10	0.0000%	Sm149	2.05E-04	0.0205%
Pu236	1.07E-10	0.0000%	Ag109	1.81E-04	0.0181%
			Eu153	1.53E-04	0.0153%
Zr	9.81E-02	9.8104%	I127	1.32E-04	0.0132%
Xe134	5.44E-03	0.5443%	Br081	1.16E-04	0.0116%
Cs135	4.64E-03	0.4636%	Pd110	9.30E-05	0.0093%
Xe136	4.61E-03	0.4609%	Cs134	9.03E-05	0.0090%
56138	4.57E-03	0.4565%	Gd156	5.83E-05	0.0058%
Cs133	4.34E-03	0.4341%	Cd111	4.31E-05	0.0043%
Zr096	4.21E-03	0.4206%	Eu154	3.41E-05	0.0034%
Zr094	4.11E-03	0.4111%	Xe130	3.19E-05	0.0032%
Tc099	3.99E-03	0.3990%	Ru103	3.06E-05	0.0031%
Mo095	3.97E-03	0.3968%	Cd112	2.72E-05	0.0027%
Zr093	3.95E-03	0.3950%	Gd158	2.00E-05	0.0020%
Pr141	3.86E-03	0.3856%	Cd110	1.88E-05	0.0019%
Zr092	3.70E-03	0.3697%	Eu155	1.61E-05	0.0016%
60143	3.64E-03	0.3642%	Gd154	1.55E-05	0.0015%
Cs137	3.63E-03	0.3625%	Gd155	1.37E-05	0.0014%

Ru101	3.55E-03	0.3553%	Kr082	1.11E-05	0.0011%
Zr091	3.45E-03	0.3451%	Eu151	8.87E-06	0.0009%
Xe132	3.28E-03	0.3278%	Xe128	8.70E-06	0.0009%
Y089	2.73E-03	0.2728%	Cd113	7.76E-06	0.0008%
Nd145	2.50E-03	0.2503%	Gd157	6.07E-06	0.0006%
Xe131	1.99E-03	0.1994%	Nd147	4.08E-06	0.0004%
Rb087	1.53E-03	0.1526%	Eu152	3.01E-06	0.0003%
Pd105	1.40E-03	0.1402%	Gd152	2.00E-06	0.0002%
Kr086	1.24E-03	0.1236%	Gd160	1.52E-06	0.0002%

Tabela 4-5. Composição isotópica do combustível no final do segundo ciclo, EOL Ciclo 2, QPP, Xe em Equilíbrio.

Zona Interna:

Isótopo	Fração Atômica	Percentual [%]	Isótopo	Fração Atômica	Percentual [%]
U238	6.30E-01	62.9900%	Xe131	4.02E-03	0.4015%
Pu239	5.43E-02	5.4290%	Pd105	3.67E-03	0.3665%
U235	1.75E-02	1.7510%	Rh103	3.41E-03	0.3413%
U236	9.39E-03	0.9389%	Pd106	3.07E-03	0.3069%
Pu240	6.13E-03	0.6134%	Rb087	2.36E-03	0.2358%
Np237	1.43E-03	0.1426%	Nd148	2.18E-03	0.2184%
Pu238	3.95E-04	0.0395%	Kr086	1.89E-03	0.1888%
Pu241	3.23E-04	0.0323%	Sm147	1.86E-03	0.1855%
Am241	9.36E-05	0.0094%	Pd108	1.41E-03	0.1405%
U234	5.03E-05	0.0050%	Sm149	1.13E-03	0.1132%
Np239	3.58E-05	0.0036%	I129	1.10E-03	0.1102%
Pu242	2.50E-05	0.0025%	Kr084	1.04E-03	0.1039%
U237	3.11E-06	0.0003%	Rb085	9.20E-04	0.0920%
Cm242	1.68E-06	0.0002%	Zr090	8.40E-04	0.0840%
Am243	1.12E-06	0.0001%	Sm152	7.60E-04	0.0760%
Am242	1.11E-06	0.0001%	Ag109	7.25E-04	0.0725%
Cm244	1.56E-07	0.000016%	Sm150	5.40E-04	0.0540%
Np236	8.43E-08	0.000008%	Kr083	5.22E-04	0.0522%
Cm243	3.33E-08	0.000003%	Sm151	5.19E-04	0.0519%
U233	1.31E-08	0.000001%	Pd104	4.89E-04	0.0489%
Cm245	8.61E-09	0.000001%	Pm147	3.90E-04	0.0390%
Th232	5.05E-09	0.000001%	Pd110	3.48E-04	0.0348%
Th230	1.46E-09	0.000000%	I127	3.21E-04	0.0321%
Pu237	1.20E-09	0.000000%	Eu153	2.90E-04	0.0290%
			Br081	1.89E-04	0.0189%
Zr	1.15E-01	11.4520%	Cs134	1.87E-04	0.0187%

Xe134	1.01E-02	1.0067%	Cd111	1.51E-04	0.0151%
Cs135	9.14E-03	0.9140%	Xe130	1.35E-04	0.0135%
Xe136	8.75E-03	0.8750%	Gd156	1.27E-04	0.0127%
Ba138	8.32E-03	0.8324%	Cd112	9.64E-05	0.0096%
Cs133	7.96E-03	0.7962%	Cd110	8.46E-05	0.0085%
Zr096	7.41E-03	0.7408%	Gd155	7.49E-05	0.0075%
Tc099	6.96E-03	0.6959%	Eu154	7.03E-05	0.0070%
Zr094	6.96E-03	0.6957%	Cd113	5.50E-05	0.0055%
Pr141	6.91E-03	0.6905%	Gd157	5.12E-05	0.0051%
Mo095	6.65E-03	0.6651%	Gd154	5.01E-05	0.0050%
Zr093	6.60E-03	0.6599%	Ru103	4.97E-05	0.0050%
Xe132	6.39E-03	0.6390%	Eu155	4.74E-05	0.0047%
Ru101	6.33E-03	0.6332%	Gd158	3.55E-05	0.0035%
Nd143	6.22E-03	0.6224%	Xe128	3.46E-05	0.0035%
Cs137	6.15E-03	0.6149%	Cd114	3.08E-05	0.0031%
Zr092	5.97E-03	0.5974%	Eu151	3.04E-05	0.0030%
Zr091	5.38E-03	0.5385%			
Nd145	4.29E-03	0.4288%			
Y089	4.15E-03	0.4147%			

Zona Externa:

Isótopo	Fração Atômica	Percentual [%]	Isótopo	Fração Atômica	Percentual [%]
U238	6.19E-01	61.9400%	Nd145	4.44E-03	0.4443%
Pu239	4.27E-02	4.2660%	Xe131	3.76E-03	0.3763%
U235	3.26E-02	3.2570%	Pd105	3.01E-03	0.3013%
U236	1.46E-02	1.4590%	Rb087	2.70E-03	0.2704%
Pu240	5.82E-03	0.5817%	Rh103	2.40E-03	0.2404%
Np237	1.70E-03	0.1699%	Pd106	2.35E-03	0.2354%
Pu241	5.28E-04	0.0528%	Nd148	2.21E-03	0.2214%
Pu238	5.10E-04	0.0510%	Kr086	2.19E-03	0.2185%
Am241	1.91E-04	0.0191%	Sm147	1.80E-03	0.1796%
U234	7.14E-05	0.0071%	Sm150	1.27E-03	0.1275%
Pu242	5.28E-05	0.0053%	Kr084	1.16E-03	0.1160%
Np239	2.48E-05	0.0025%	Rb085	1.06E-03	0.1056%
Am243	7.21E-06	0.0007%	Zr090	9.99E-04	0.0999%
Cm242	3.54E-06	0.0004%	I129	9.72E-04	0.0972%
U237	3.30E-06	0.0003%	Pd108	9.56E-04	0.0956%
Am242	2.56E-06	0.0003%	Sm152	7.39E-04	0.0739%
Cm244	1.56E-06	0.0002%	Pd104	7.06E-04	0.0706%
Cm245	9.09E-08	0.000009%	Kr083	5.59E-04	0.0559%

Np236	8.24E-08	0.000008%	Ag109	4.95E-04	0.0495%
Cm243	8.23E-08	0.000008%	Sm151	4.05E-04	0.0405%
U233	1.84E-08	0.000002%	Pm147	3.16E-04	0.0316%
Th232	8.02E-09	0.000001%	Eu153	3.02E-04	0.0302%
Th230	2.04E-09	0.000000%	Sm149	3.02E-04	0.0302%
Cm246	1.91E-09	0.000000%	I127	2.74E-04	0.0274%
Pu237	1.08E-09	0.000000%	Pd110	2.52E-04	0.0252%
Zr	1.13E-01	11.3350%	Br081	2.01E-04	0.0201%
Xe134	1.03E-02	1.0285%	Cs134	1.78E-04	0.0178%
Cs135	8.90E-03	0.8900%	Gd156	1.61E-04	0.0161%
Xe136	8.83E-03	0.8832%	Xe130	1.15E-04	0.0115%
56138	8.61E-03	0.8606%	Cd111	1.13E-04	0.0113%
Cs133	7.92E-03	0.7918%	Eu154	8.59E-05	0.0086%
Zr096	7.79E-03	0.7793%	Cd110	8.59E-05	0.0086%
Zr094	7.60E-03	0.7604%	Cd112	7.16E-05	0.0072%
Tc099	7.17E-03	0.7168%	Gd154	7.06E-05	0.0071%
Zr093	7.14E-03	0.7136%	Gd158	5.44E-05	0.0054%
Pr141	7.13E-03	0.7132%	Cd114	3.77E-05	0.0038%
Mo095	7.13E-03	0.7128%	Gd155	3.70E-05	0.0037%
Zr092	6.67E-03	0.6669%	Ru103	3.56E-05	0.0036%
Nd143	6.50E-03	0.6501%	Kr082	3.54E-05	0.0035%
Xe132	6.44E-03	0.6441%	Xe128	3.24E-05	0.0032%
Ru101	6.42E-03	0.6420%	Eu155	2.68E-05	0.0027%
Zr091	6.12E-03	0.6117%	Eu151	1.86E-05	0.0019%
Cs137	6.04E-03	0.6040%	Gd157	1.58E-05	0.0016%
Y089	4.80E-03	0.4805%			

4.3. REATIVIDADE

O fator de multiplicação k de um reator é o balanço entre a produção de nêutrons através das reações de fissões, contra a perda em função das reações de absorção ou das fugas do sistema. A condição de estabilidade no qual o balanço entre as perdas e criação de nêutrons no reator é mantido constante é referenciado como criticalidade ($k = 1$). A reatividade ρ é uma medida do afastamento do reator em relação a sua criticalidade, em qualquer instante de tempo. Esta é uma variável global do núcleo e é uma medida relativa do excesso de nêutrons no reator. A operação do reator em regime estacionário é representada pelo valor de reatividade $\rho = 0$. O coeficiente de reatividade descreve as variações na reatividade causadas por mudanças nos parâmetros do sistema, o qual controla o balanço de nêutrons na operação do reator. Estes são definidos pelo quociente $\Delta\rho/\Delta x$, em que x é o respectivo parâmetro variável [18].

A temperatura do refrigerante e do combustível, a pressão e a fração de vazio do refrigerante, a temperatura do moderador e concentração de venenos são as mais importantes variáveis do sistema. Os coeficientes de reatividade são afetados pelas condições de operação, especialmente com a movimentação do refletor e queima do combustível, na qual o enriquecimento médio do núcleo e composição isotópica variam ao longo da operação.

Dois importantes aspectos na operação do reator são a queima do combustível e o excesso de reatividade existente no início de operação. A queima permite relacionar a massa de combustível convertida em potência térmica pelo núcleo do reator MWd/THM , que é uma medida da eficiência de conversão do reator, sua capacidade de converter o potencial energético existente no combustível em energia útil, sendo um parâmetro dependente das variáveis do sistema que influenciam na magnitude do fluxo e no espectro de energia dos nêutrons. O excesso de reatividade $\rho > 0$, em termo de queima pode ser interpretado como a quantidade de energia que pode ser convertida pelo reator ao longo do ciclo.

A potência, ou energia gerada pelo reator é limitada pelos parâmetros termohidráulicos que definem a relação entre a quantidade de calor gerado pelas reações nucleares e a energia que pode ser extraída do núcleo pelo sistema de refrigeração, sem que os limites máximos de segurança dos elementos estruturais sejam ultrapassados, como a fluência, limites de corrosão do revestimento, aumento de temperatura no combustível, densidades de potência locais, aumento de entalpia, DNB entre outros.

O valor da queima é principalmente afetado pelo enriquecimento do combustível utilizado, pelo fluxo de nêutrons e pelo espectro de energia no núcleo do reator. A duração do ciclo é afetada pela quantidade de excesso de reatividade disponível, uma vez já estabelecidas as condições operacionais do reator. Esse excesso de reatividade disponível no início do ciclo deve ser contrabalanceado através do balanço de reatividade de forma que as perdas de nêutrons por fuga e absorção nos elementos estruturais e de controle, estabeleçam a condição de subcriticalidade necessária à operação no início do ciclo e de desligamento seguro. A otimização da queima e tempo de operação devem ser buscados, desde que sejam respeitados os limites de segurança operacionais do reator.

4.3.1. Condições de Simulação

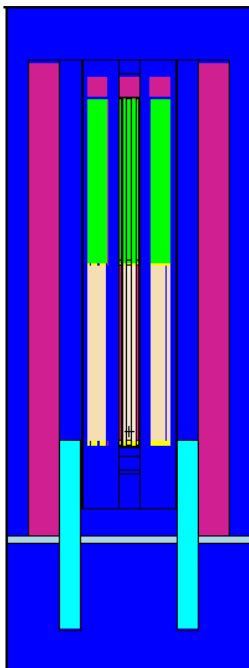
A Figura 4-18 apresenta a visão em corte axial do reator em diferentes configurações típicas de operação, que foram utilizadas como referências para a simulação e análise dos parâmetros nucleares.

O controle de reatividade neste reator é efetuado pela movimentação dos três elementos de controle: Refletor Móvel de Grafite (RFL), Absorvedor Fixo (ABS) e Barra de Desligamento (SHT). O Refletor excursiona por toda a área ativa do núcleo ($z = 0 \text{ cm}$ a $z = 250 \text{ cm}$) da posição de repouso inferior de -10 cm , à posição crítica inicial 0 cm , até a posição final superior 10 cm acima da zona ativa ($z = 260 \text{ cm}$). O Absorvedor Fixo e Barra de Desligamento, são movimentadas com extração total do núcleo, ou com a inserção total de -250 cm até a posição inicial do núcleo ($z = 0 \text{ cm}$)

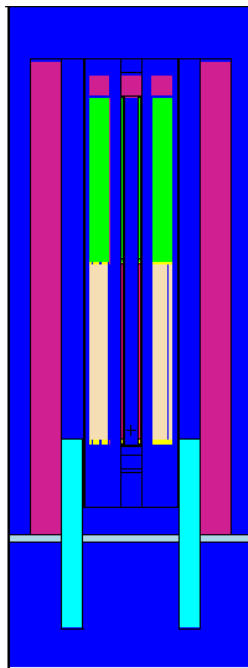
A figura mostra as posições dos elementos de controle do reator nas principais configurações utilizadas nas simulações:

- **Reator Subcrítico:** Posição Subcrítica inicial, reator desligado, Refletor na posição $z = -10 \text{ cm}$, Barra de Desligamento e absorvedor Fixo inseridos.
- **Reator Crítico / BOL Ciclo 1:** Posição Crítica inicial, reator crítico, Refletor na posição $z = 0 \text{ cm}$, Barra de Desligamento removida e Absorvedor Fixo inserido.
- **EOL Ciclo 1:** Posição de Queima 1º Ciclo, reator supercrítico, Refletor inserido na posição $z = 260 \text{ cm}$, Barra de Desligamento removida e Absorvedor Fixo inserido.
- **BOL Ciclo 2:** Posição Subcrítica Quente início 2º Ciclo, reator ligeiramente subcrítico, Refletor na posição $z = 0 \text{ cm}$, Barra de Desligamento e Absorvedor Fixo Removidos.
- **EOL Ciclo 2:** Posição de Queima 2º Ciclo, reator supercrítico, Refletor inserido na posição $z = 260 \text{ cm}$, Barra de Desligamento e Absorvedor Fixo removidos.

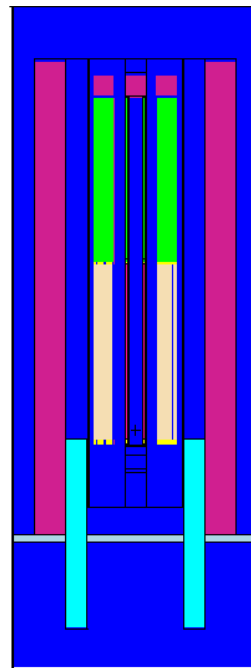
Figura 4-18. Vista Axial do Reator em Configurações Típicas de Operação.



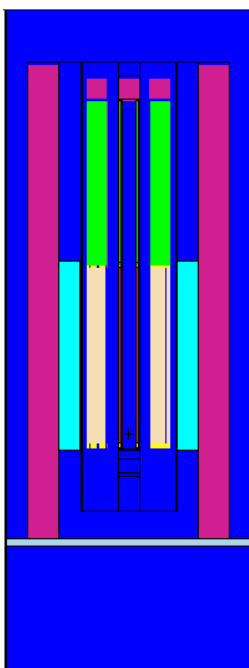
Reator Subcrítico:
 RLF = -10 cm [OUT]
 ABS = -250 cm [IN]
 SHT = -250 cm [IN]



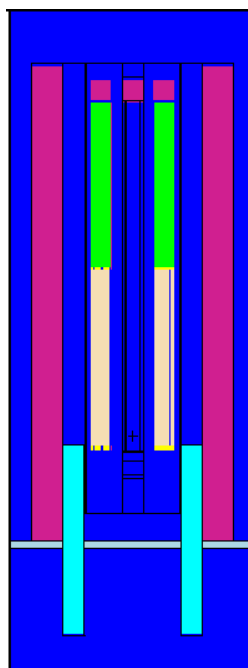
Reator Crítico:
 RLF = 0 cm [OUT]
 ABS = -250 cm [IN]
 SHT = [OUT]



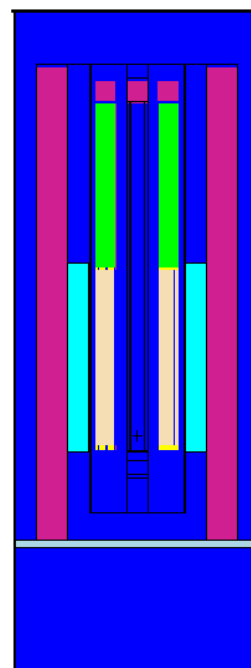
BOL Ciclo 1:
 RLF = 0 cm [OUT]
 ABS = -250 cm [IN]
 SHT = [OUT]



EOL Ciclo 1:
 RLF = 260 cm [IN]
 ABS = -250 cm [IN]
 SHT = [OUT]



BOL Ciclo 2:
 RLF = 0 cm [OUT]
 ABS = [OUT]
 SHT = [OUT]



EOL Ciclo 2:
 RLF = 260 cm [IN]
 ABS = [OUT]
 SHT = [OUT]

4.3.2. Reatividade dos Elementos de Controle

Os dados apresentados na Tabela 4-4 resumem os resultados de dezenas de simulações e ajustes de parâmetros para a obtenção de valores coerentes com os dados esperados de operação para o reator. Em função da indisponibilidade dos valores detalhados da geometria e composição dos materiais do núcleo, foram necessárias diversas adequações na composição isotópica e dimensional dos elementos absorvedores. Os requisitos operacionais usados como critério foram a margem de subcriticalidade inferior a $< 3\%$ (3000 pcm) na condição inicial, frio a potência zero; fator de multiplicação próximo a unidade ($k_{eff} \cong 1.00000$), para o início do ciclo com a barra desligamento extraída, refletor fora do núcleo na posição 0 cm, frio a potência zero; e reatividade do absorvedor fixo próximo a valor de reatividade do refletor.

A configuração crítica do reator com $k_{eff} = 1.00074 \pm 0.00016$ para o início do ciclo foi atingida com o ajuste de enriquecimento em 9.2 w/o Zona Interna e 14.16 w/o Zona externa, barra de desligamento extraída, refletor fora do núcleo e Absorvedor Fixo inserido (o valor de (margem de $\rho < 100$ pcm foi considerado aceitável como estimativas).

Como mencionado anteriormente, há uma lacuna de informações nas literaturas quanto aos detalhes da composição e do dimensional da barra de desligamento e absorvedor fixo. Esses parâmetros tiveram que ser ajustados no modelo.

Como é mostrado nas Figuras 4-5, 4-6 e 4-8, o subelemento central serve como suporte para a inserção e extração do absorvedor fixo e da barra de desligamento. O absorvedor fixo possui geometria hexagonal com um furo central, os limites externos são definidos pela estrutura do subelemento, e os limites internos através do dimensional da circunferência que corresponde a área ocupada para a barra de desligamento. O ajuste de dimensional da barra de controle afeta a área interna do absorvedor fixo, que por consequência, altera o volume e massa de absorvedores no núcleo afetando o fator de multiplicação e tornando-se necessário novo acerto de enriquecimento do material combustível para se manter a condição crítica inicial do núcleo. O acerto de dimensional e composição dos absorvedores e enriquecimento do combustível deve, portanto, ser executado de forma associada.

O valor alvo para margem de subcriticalidade $< 3\%$ foi estabelecido com o uso de 7 feixes, de diâmetro 6 cm de Carbetto de Boro a 90% de ^{10}B , levando a $k_{eff} = 0.96618 \pm 0.00016$ com a inserção da barra de desligamento no núcleo (Tabela 4-4).

Com o acerto de dimensional o valor obtido para fator de multiplicação do absorvedor fixo através de sua extração do núcleo foi de $k_{eff} = 1.02584 \pm 0.00014$, sendo o valor compatível para a inserção do refletor de grafite no núcleo $k_{eff} = 1.02496 \pm 0.00015$.

Os valores de reatividade são obtidos através da movimentação dos elementos de controle mantendo-se fixas as demais configurações. O desvio de k_{eff} entre o valor de criticalidade e o valor de desvio gerado pela movimentação dos elementos de controle corresponde a reatividade, valor de trabalho, do elemento de controle.

O excesso de reatividade no núcleo para o modelo, ou seja, a reatividade total exercida pelo refletor mais o absorvedor fixo, corresponde a 4934 pcm, ou 4,9%. Esse valor, juntamente com o burnup determina o comprimento total do ciclo de queima.

Considerando o valor de $\beta_{eff} = 370$ pcm o excesso de reatividade corresponde a $\sim \$13,3$, superior ao valor mencionado na literatura para o 4S Reactor $\sim \$10$ [5] (Tabela II-11 Anexo II). O percentual de enriquecimento utilizado no modelo é inferior aos dados informados na literatura 12/18 w/o para zona interna e externa, respectivamente, contra o valor de 9.2 e 14.16 w/o obtidos neste modelo. A massa de urânio utilizada no modelo é de 17,6 t, sendo 2,19 t de ^{235}U , contra 16,2 t e 2,58 t de ^{235}U informadas na literatura (Tabela II-14), respectivamente. As diferenças nos valores utilizados de densidade do combustível e do grafite do refletor, podem talvez ser responsáveis pela diferença entre as massas de urânio deste modelo comparadas ao 4S Reactor, contudo o alto enriquecimento informado na literatura, valor inferior de burnup e valor inferior para o excesso de reatividade, não são compatíveis com as características do físicas de dimensional e de material do núcleo (pitch, dimensional das varetas e elementos combustíveis, densidade e volume dos absorvedores, entre outros). Nas simulações executadas, pequenos aumentos no enriquecimento são muito significativos; os resultados mostram que não é possível obter arranjos críticos com os valores mencionados de enriquecimento na literatura, nem obter queimas “baixas” de burnup.

Tabela 4-4. Valores de reatividade dos elementos de controle, BOL Ciclo 1, CZP, Xe = 0.

Parâmetro ^[1]	Fator de Multiplicação $k_{eff} \pm \sigma$ ^[2]	Reatividade ρ [pcm] ^[2] $\rho = \left(1 - 1/k_{eff}\right)$
Condição Subcrítica	0.96618 \pm 0.00016	3500 \pm 16
Condição Crítica	1.00074 \pm 0.00016	74 \pm 16
Trabalho Barra Desligamento	0.96618 \pm 0.00016	3500 \pm 16
Trabalho do Absorvedor Fixo	1.02584 \pm 0.00014	2519 \pm 14
Trabalho do Refletor	1.02496 \pm 0.00015	2435 \pm 15

^[1] T_{Combustível} = 293,6 K, T_{Refletor} = 293,6 K, T_{Refrigerante} = 293,6 K

^[2] Enriquecimento Inicial: Zona Interna = 9.2 w/o, Zona Externa = 14.16 w/o

4.3.3. Coeficientes de Reatividade Início do Ciclo

As Figuras 4-19 a 4-24, apresentam as curvas de comportamentos dos coeficientes de reatividade no início do ciclo de operação. Os valores do fator de multiplicação são avaliados para diferentes faixas de temperatura ou densidades dos materiais.

▪ **Varição da Reatividade com Movimentação do Refletor.**

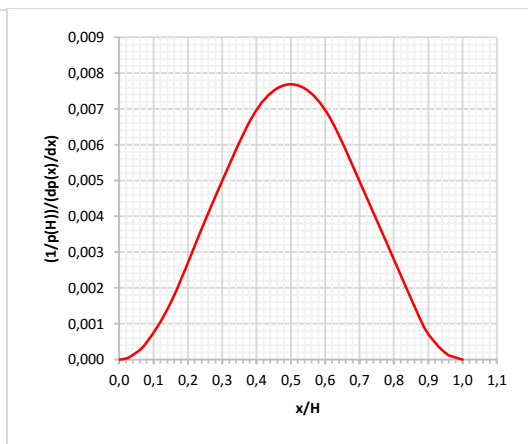
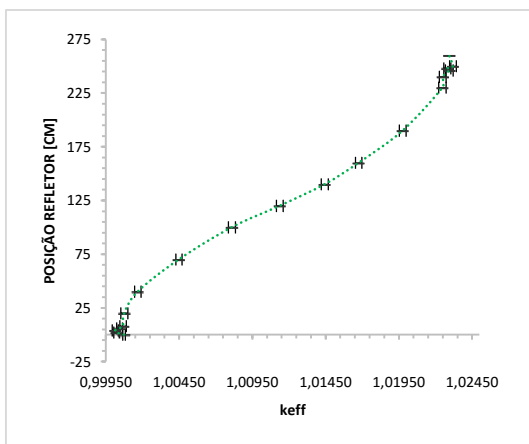
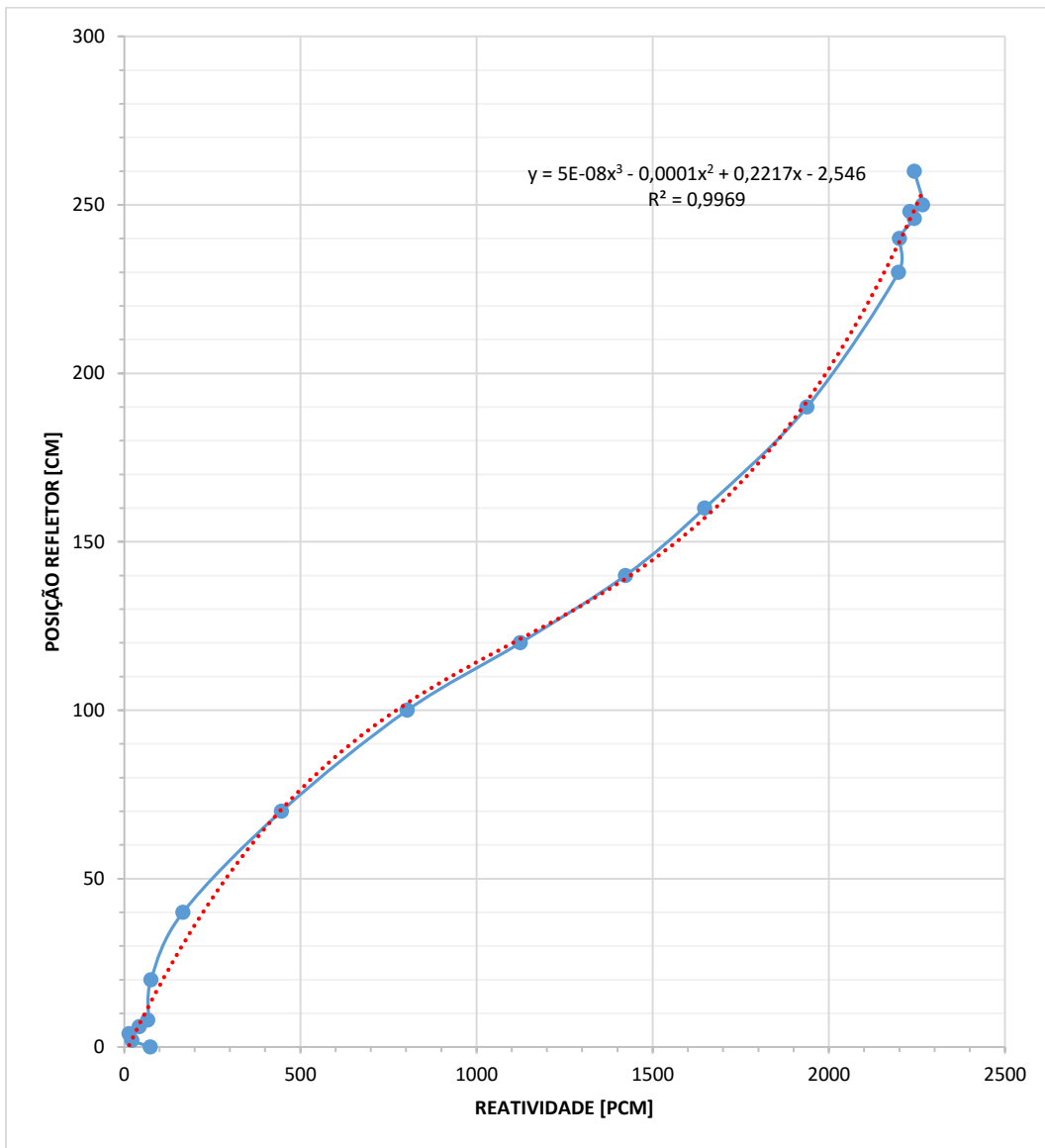
Os gráficos da Figura 4-19 mostram a variação de reatividade do refletor em várias posições de inserção no núcleo. A Figura apresenta os gráficos de comportamento da reatividade em função da posição de inserção do refletor, do comportamento do fator de multiplicação com erro associado (< 25 pcm) e, comportamento da fração da taxa de variação do valor do refletor em função da fração de inserção [14]:

$$\frac{1}{\rho(H)} \frac{d\rho(x)}{dx} = \frac{1}{H} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{H}\right) \right] \quad \text{Eq. (4.1)}$$

Sendo $\rho(x)$ o valor da reatividade do refletor inserido a uma distância x , paralelamente ao eixo de um reator cilíndrico de altura H , e seja $\rho(H)$ o seu valor quando está totalmente inserido. A expressão Equação 4.1 fornece a fração da taxa de variação da reatividade por unidade de comprimento do movimento da barra [14].

O refletor possui comportamento igual e reverso à variação de reatividade que é verificada para a inserção de uma barra de controle no núcleo. Enquanto o Refletor reduz os termos de fuga de nêutrons uma barra de controle tem ação inversa de aumento da absorção e redução no fluxo de nêutrons. Inicialmente há uma baixa influência no fluxo neutrônico com a inserção do Refletor, que atinge o valor máximo no centro do núcleo (região de maior fluxo neutrônico) reduzindo novamente na extremidade superior.

Figura 4-19. Variação da Reatividade com Movimentação do Refletor, BOL Ciclo 1, FPZ, Xe = 0.



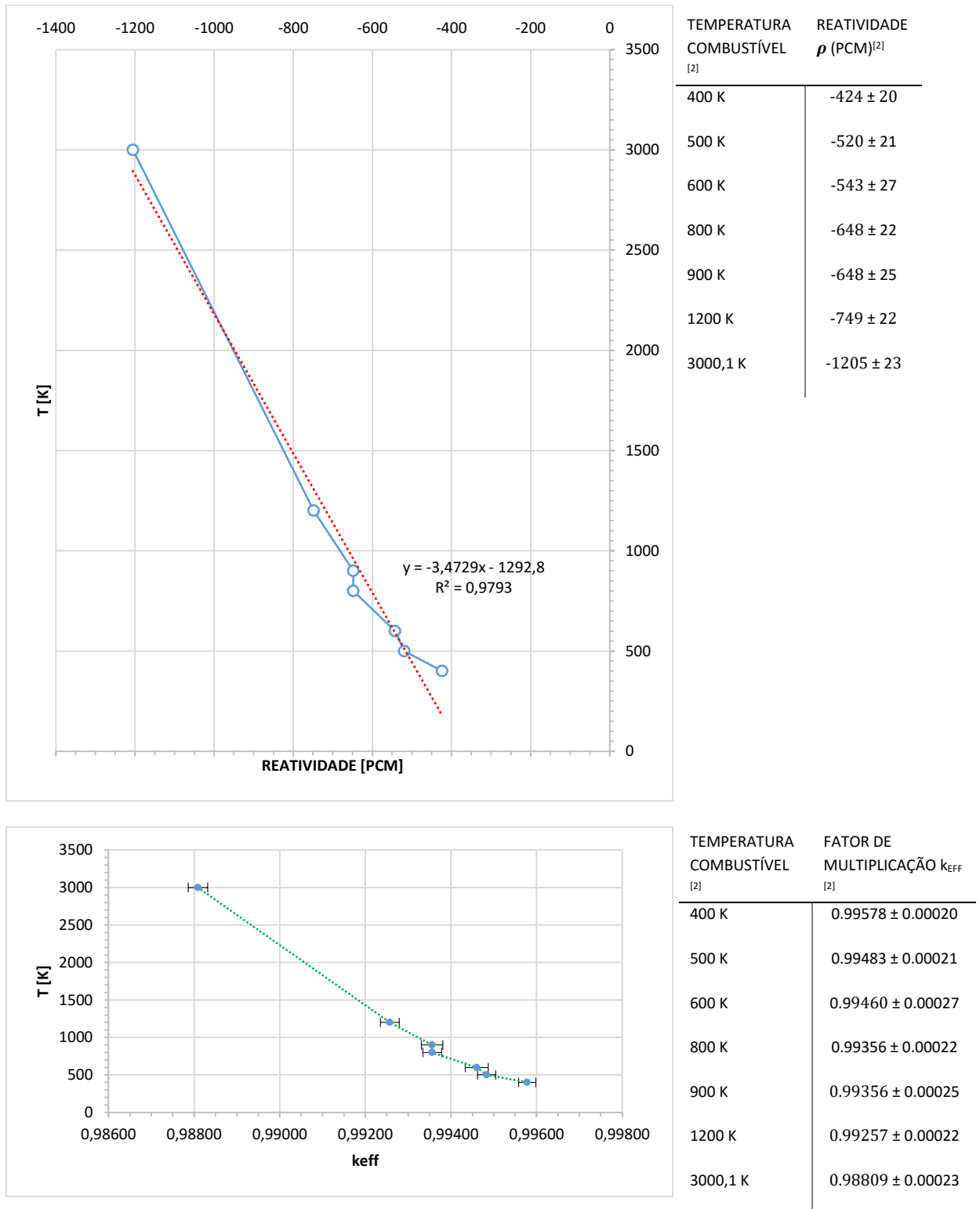
- **Reatividade em Função da Temperatura do Combustível.**

A Figura 4-21 mostra o gráfico da reatividade do combustível com aumento da temperatura, e apresenta curva de redução de reatividade para todos os patamares. O valor de aproximação para o coeficiente de temperatura do combustível é de $\Gamma_C = -0,41$ [pcm/K].

Os dados foram obtidos através da variação da temperatura do combustível entre 400 K a 3000,1 K como mostrado na figura. Os demais parâmetros são mantidos fixos.

Como mostrado no gráfico, o erro associado às estimativas de k_{eff} são baixos, a curva possui uma relação aproximadamente linear com o aumento da temperatura do combustível.

Figura 4-20. Reatividade em Função da Temperatura do Combustível, BOL Ciclo 1, FPZ, zero Xe.



^[2] Biblioteca Seção de Choque para o Combustível ENDF-B VI.2

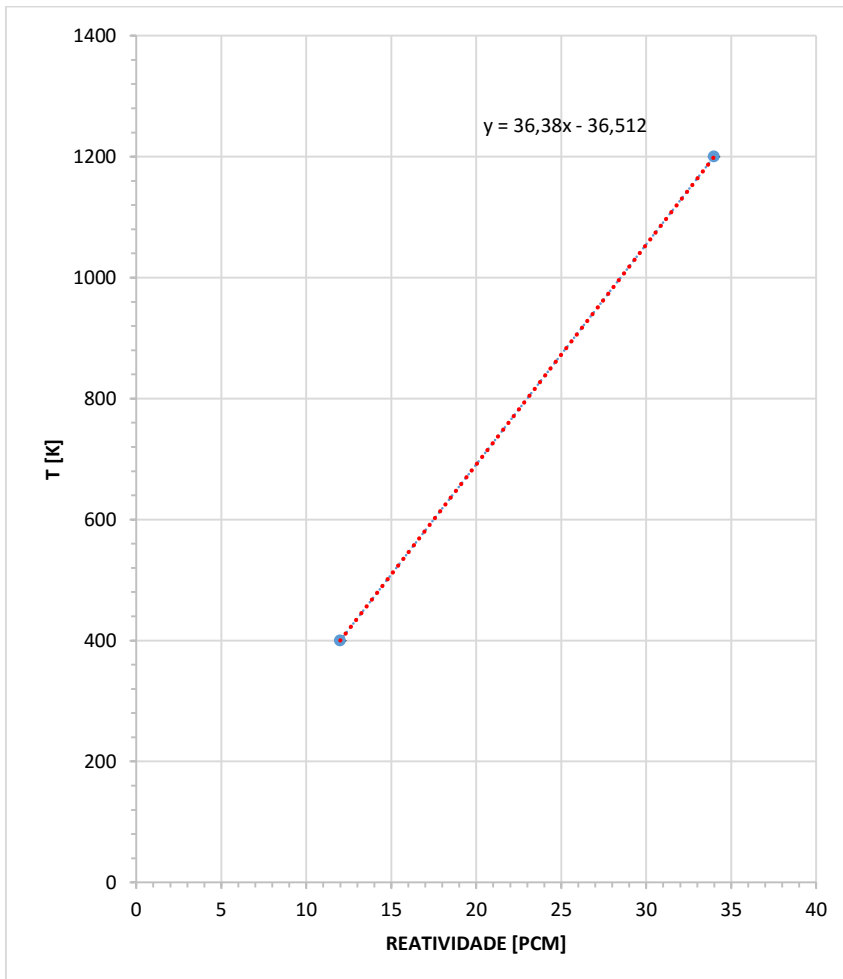
^[3] Enriquecimento Inicial: Zona Interna = 9.2 w/o, Zona Externa = 14.16 w/o

- **Reatividade em Função da Temperatura do Refletor.**

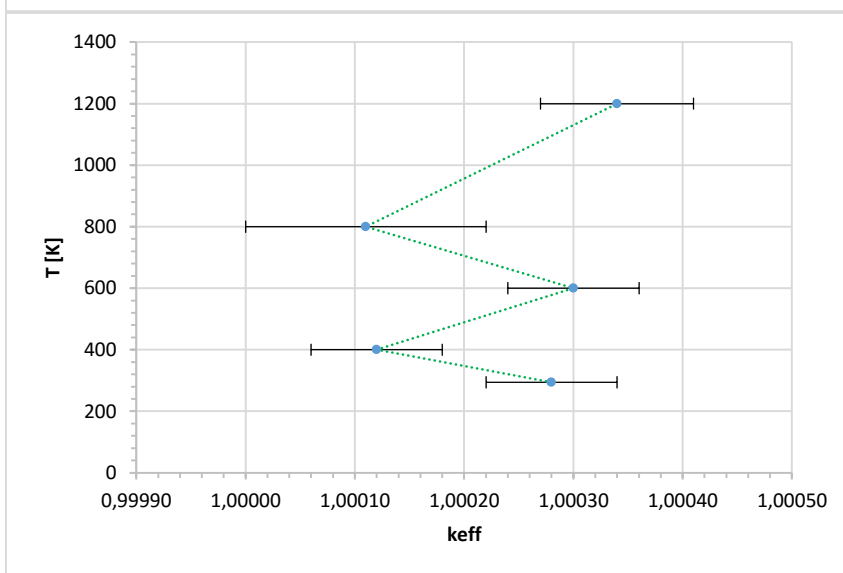
O gráfico da Figura 4-22 apresenta o aumento de reatividade com a elevação de temperatura do Refletor. A variação no fator de multiplicação é muito pequena de forma que a dispersão nos dados obtidos tornou o erro considerável. A avaliação do coeficiente de temperatura do Refletor é feita apenas para os valores extremos o que fornece $\Gamma_R = 0,027$ [pcm/K].

Os dados foram obtidos através da variação da temperatura do refletor entre 294 K a 1200 K, mantendo-se fixos os demais parâmetros. A estimativa de erro foi obtida para o transporte de 1×10^6 partículas iniciais, em 80 ciclos ativos (120 ciclos totais). O tempo de processamento para cada medida foi superior a $ctm = 2100$ minutos.

Figura 4-21. Reatividade em Função da Temperatura do Refletor, BOL Ciclo 1, FPZ, zero Xe.



TEMPERATURA REFLETOR ^[2]	REATIVIDADE ρ (PCM) ^[2]
400 K	12 ± 6
1200 K	34 ± 7



TEMPERATURA REFLETOR ^[2]	FATOR DE MULTIPLICAÇÃO k_{EFF} ^[2]
294 K	1,00028 ± 0.00006
400 K	1.00012 ± 0.00006
600 K	1.00030 ± 0.00006
800 K	1.00011 ± 0.00011
1200 K	1.00034 ± 0.00007

^[2] Biblioteca Seção de Choque para o Grafite ENDF-B VI.5 com bibliotecas de correção térmica.

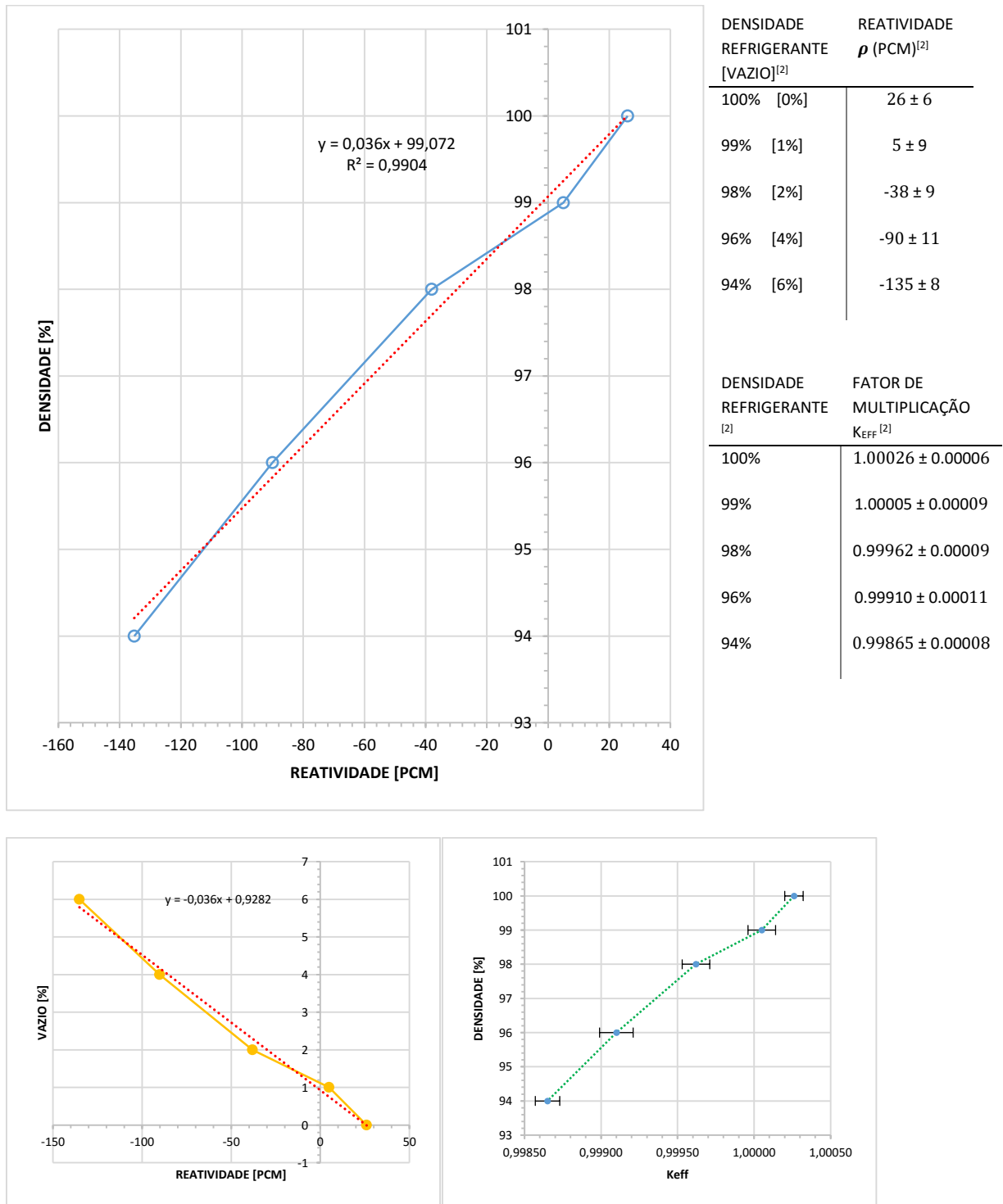
^[3] Enriquecimento Inicial: Zona Interna = 9.2 w/o, Zona Externa = 14.16 w/o

- **Reatividade em Função da Densidade do Refrigerante.**

A Figura 4-23 apresenta o comportamento da reatividade em função da redução da densidade do refrigerante. A redução da densidade, aumento do vazio, do refrigerante é acompanhada pela diminuição da reatividade. O valor de aproximação para o coeficiente de vazio do refrigerante no início do ciclo é baixo $\Gamma_V = -26,86$ [pcm/% Vazio].

Os dados foram obtidos através da variação da densidade do refrigerante, mantendo-se fixo os demais parâmetros.

Figura 4-22. Reatividade em Função da Densidade do Refrigerante, BOL Ciclo 1, FPZ, Zero Xe.



^[2] Biblioteca Seção de Choque para o Refrigerante ENDF-B VI.5

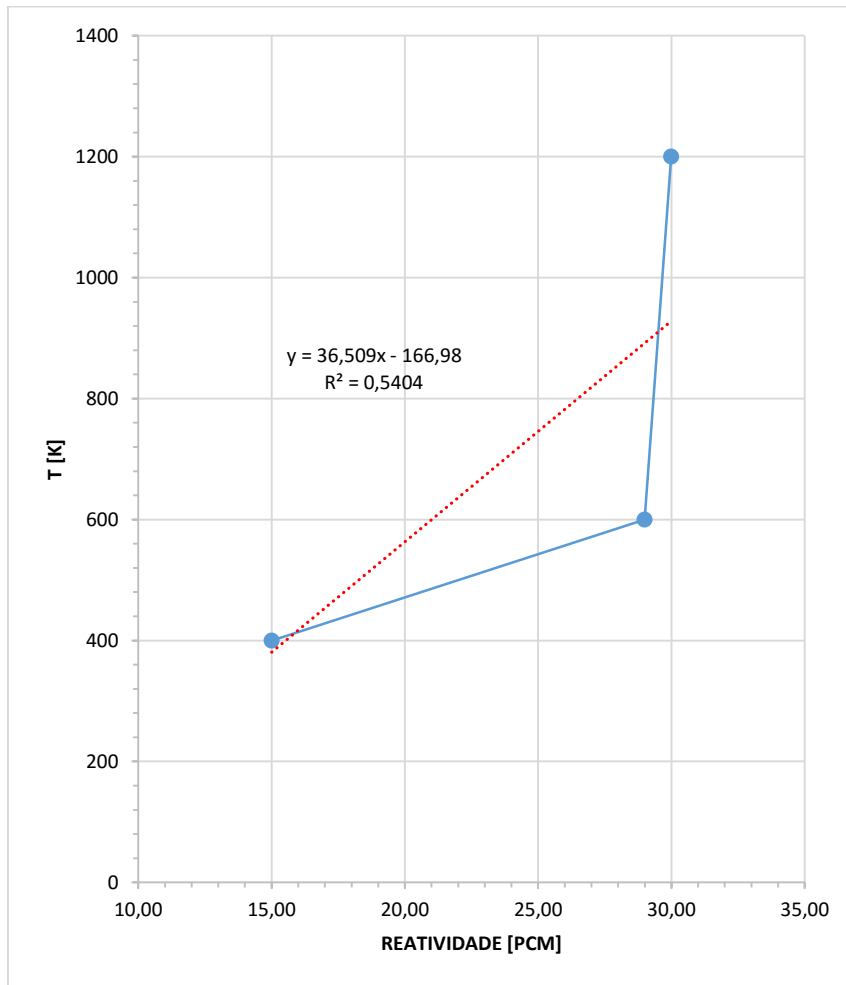
^[3] Enriquecimento Inicial: Zona Interna = 9.2 w/o, Zona Externa = 14.16 w/o

- **Reatividade em Função da Temperatura do Refrigerante.**

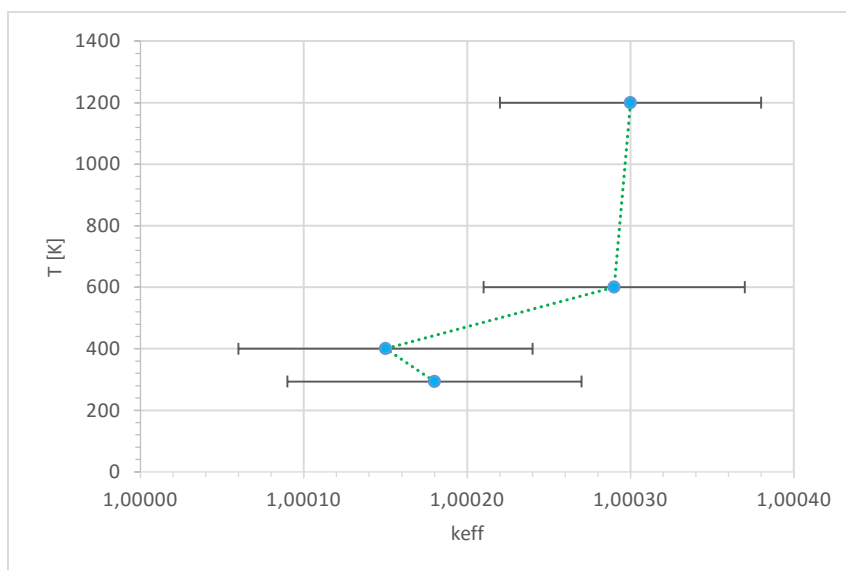
O gráfico da Figura 4-24 apresenta o comportamento da reatividade com a elevação da temperatura do Refrigerante. Semelhante ao Refletor, a variação no fator de multiplicação é muito pequena e positiva de forma que a dispersão nos dados obtidos torna o erro considerável. A avaliação do coeficiente de temperatura do Refrigerante considerou apenas três valores para a estimativa do $\Gamma_{Na} = 0,019$ [pcm/K].

Os dados foram obtidos através da variação da temperatura do Refrigerante de 400 K a 1200 K, mantendo-se fixo os demais parâmetros. A estimativa de erro foi obtida para o transporte de 6×10^5 partículas iniciais, e 80 ciclos. Tempo de processamento para cada medida superior a $ctm = 1000$ minutos.

Figura 4-23. Reatividade em Função da Temperatura do Refrigerante, BOL Ciclo 1, FPZ, zero Xe.



TEMPERATURA REFRIGERANTE [2]	REATIVIDADE ρ (PCM) ^[2]
400 K	15 ± 9
600 K	29 ± 8
1200 K	30 ± 8



TEMPERATURA REFRIGERANTE [2]	FATOR DE MULTIPLICAÇÃO k_{EFF} [2]
293,6 K	1.00018 ± 0.00009
400 K	1.00015 ± 0.00009
600 K	1.00029 ± 0.00009
1200 K	1.00030 ± 0.00008

^[2] Biblioteca Seção de Choque para o Refrigerante ENDF-B VI

^[3] Enriquecimento Inicial: Zona Interna = 9.2 w/o, Zona Externa = 14.16 w/o

▪ **Reatividade em Função da Expansão Axial do combustível.**

O coeficiente de expansão térmica do combustível metálico pode ser calculado pela fórmula [10]:

$$\alpha_{fuel} \times 10^6 = 19,41 + 12,67 \cdot C_{Pu} - 13,37 \cdot C_{Zr} \quad (mm/mm - k) \quad \text{Eq.(4.2)}$$

Onde C_{Pu} e C_{Zr} representam a concentração de Pu e Zr em fração atômica.

Utilizando a Equação 4.2 para calcular o α_{fuel} em função das concentrações de Pu e Zr, obtidas pela queima do combustível (Tabelas 4.3 a 4.5), a dilatação axial do combustível foi calculada pela fórmula clássica da dilatação linear.

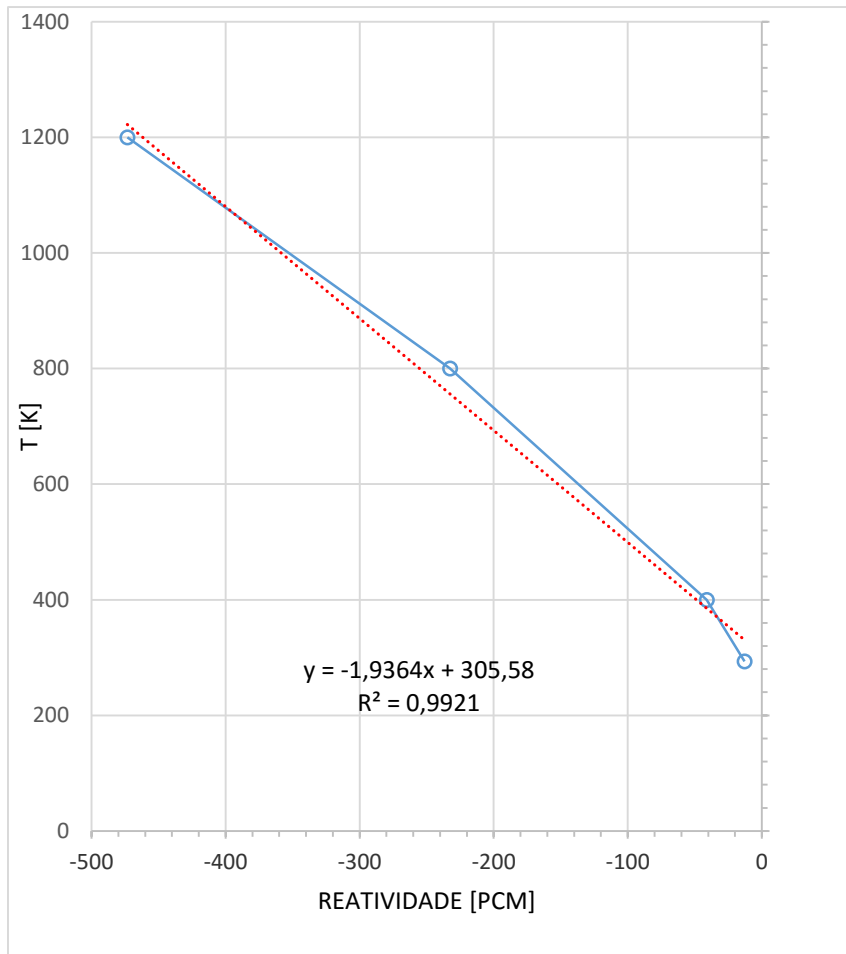
$$\Delta L_{fuel} = \alpha_{fuel} \cdot L_0 \cdot \Delta T \quad \text{Eq.(4.3)}$$

Com os novos valores de comprimento axial do combustível, obtemos as novas densidades do combustível para várias faixas de temperatura. Os novos valores de densidade são então utilizados para realimentação do cartão de entrada.

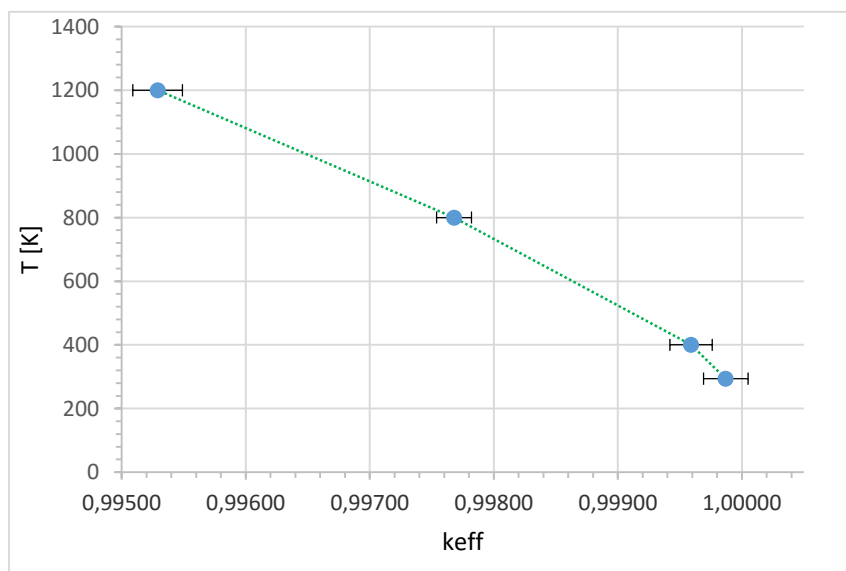
O coeficiente de expansão axial do combustível Γ_{axial} é mostrado na Figura 4-25, em função da temperatura do combustível. As modificações nos parâmetros do modelo são feitas através da alteração na densidade do combustível e do comprimento da área ativa do núcleo. A temperatura (biblioteca de seção de choque) do combustível é mantida constante o que possibilita desacoplar as duas variáveis envolvidas no combustível com a elevação da temperatura, o coeficiente de expansão axial e o coeficiente doppler (coeficiente de temperatura) do combustível Γ_{axial} e Γ_C .

A expansão axial do combustível gerada pela elevação de temperatura provoca a redução da sua densidade, que tem por efeito uma forte realimentação de reatividade negativa. A queda de reatividade segue uma tendência linear negativa para todos os patamares de temperatura. O valor de aproximação para o coeficiente de expansão axial do combustível é de $\Gamma_{axial} = -0,52$ [pcm/K].

Figura 4-24. Reatividade em Função da Expansão Axial do combustível, BOL Ciclo 1, FPZ, zero Xe.



TEMPERATURA COMBUSTÍVEL [2]	REATIVIDADE ρ (PCM) ^[2]
293.6 K	-13.0 ± 18
400 K	-41.0 ± 17
800 K	-232.5 ± 14
1200 K	-473.2 ± 20



TEMPERATURA COMBUSTÍVEL [2]	FATOR DE MULTIPLICAÇÃO k_{EFF} [2]
293.6 K	0.99987 ± 0.00018
400 K	0.99959 ± 0.00017
800 K	0.99768 ± 0.00014
1200 K	0.99529 ± 0.00020

[2] Biblioteca Seção de Choque para o Refrigerante ENDF-B VI

[3] Enriquecimento Inicial: Zona Interna = 9.2 w/o, Zona Externa = 14.16 w/o

4.3.4. Coeficientes de Reatividade ao Longo do Ciclo

A Tabela 4-5 sintetiza os resultados obtidos para os coeficientes de reatividade ao longo da queima, em diferentes etapas do ciclo, enquanto a Tabela 4-6 apresenta os mesmos resultados em termos de variação de reatividade.

- Início do ciclo de queima, FPZ, zero Xe, *Begin Of Life* - BOL Ciclo 1.
- Final do 1º ciclo de queima, QPP, Xe em equilíbrio, *End Of Life* - EOL Ciclo 1.
- Início do 2º ciclo de queima, FPZ, zero Xe, BOL Ciclo 2.
- Final do 2º ciclo de queima, QPP, Xe em equilíbrio, EOL Ciclo 2.

Em todas as etapas foram consideradas a temperatura e evolução da composição do combustível para realimentação dos cartões de entrada.

A Figura 4-26 apresenta os gráficos com resultados de reatividade dados pela Tabela 4-6. As informações representam a reatividade em função da temperatura de 400 K a 1200 K, e de densidade, para os coeficientes.

Coeficiente de Temperatura do Combustível Γ_C

O coeficiente de Temperatura para o combustível metálico U-Zr é negativo ao longo do ciclo, e reduz seu valor em módulo em função da queima. A concentração de produtos de fissão, e a geração significativa de Pu afetam seu valor.

Coeficiente de Temperatura do Refletor Γ_R

O coeficiente de temperatura do refletor possui valor positivo para todas as condições de operação. Possui valor significativamente baixo próximo a zero no início do ciclo, com refletor recuado. O aumento apenas da temperatura do refletor tem um impacto forte na realimentação positiva de reatividade do núcleo. O valor tem pouca dependência com a queima do combustível.

Coeficiente de Temperatura do Refrigerante Γ_{Na}

O coeficiente de temperatura para o refrigerante é significativamente baixo, próximo a zero e pouco dependente da queima do combustível.

Coeficiente de Vazio Refrigerante Γ_V

O coeficiente de vazio possui valor elevado e negativo para o início do ciclo, contudo torna-se muito positivo com a inserção do Refletor. O valor também é dependente da queima do combustível, embora a contribuição do refletor seja muito mais significativa. Não há relação de dependência importante entre a área coberta do combustível pelo refletor e o valor do

coeficiente, apenas pequenas inserções do refletor já contribuem para a elevação do coeficiente de reatividade que se estabiliza em um patamar elevado e positivo.

Coeficiente de Expansão Axial do Combustível Γ_{axial}

O coeficiente de expansão axial do combustível tem uma forte importância na realimentação negativa de reatividade do núcleo. Seu valor é elevado e negativo durante todo o ciclo, a queima do combustível exerce pouca influência no valor do coeficiente.

As características mais vantajosas do combustível metálico são sua alta condutividade, que resulta em menor temperatura e menor coeficiente de reatividade, conseqüentemente uma menor amplitude de oscilação da reatividade com a queima, e um alto coeficiente de expansão axial com levando a uma alta realimentação negativa de reatividade. Entretanto, o coeficiente de vazio do sódio é mais alto para núcleos com combustível metálico, contudo a segurança resulta da baixa temperatura do combustível e da forte realimentação negativa de reatividade da expansão axial, fazendo com que o núcleo possa trabalhar em segurança, apesar da contribuição de vazio ser mais elevada, isso também faz com que a reatividade não caia com o burnup do combustível. Portanto, o tamanho do núcleo torna-se um dos mais importantes parâmetros do projeto, sendo admissíveis altos valores para o trabalho de reatividade de vazio (superiores a $\$7$) do ponto de vista da segurança. Outras medidas de projeto podem ser utilizadas para minimizar o efeito de reatividade de vazio, como o uso de plenum de sódio no local do cobertor axial e a redução da fração de volume de sódio no núcleo [10].

Tabela 4-5. Coeficientes de reatividade ao longo do ciclo.

Parâmetros	BOL Ciclo 1 FPZ, zero Xe ^[1]	EOL Ciclo 1 QPP, Xe equilíbrio ^[2]	BOL Ciclo 2 FPZ, zero Xe ^[3]	EOL Ciclo 2 QPP, Xe equilíbrio ^[4]
Coeficiente Temperatura Combustível Γ_c [pcm/K]	-0.29	-0.26	-0.14	-0.24
Coeficiente Temperatura Refletor Γ_R [pcm/K]	0.025	0.83	0.05	0.73
Coeficiente Temperatura Refrigerante Γ_{Na} [pcm/K]	-0.52	-0.53	-0.55	-0.49
Coeficiente Vazio Refrigerante Γ_v [pcm/% Vazio]	0.023	0.002	0.04	-0.03
Coeficiente Expansão Axial do Combustível Γ_{axial} [pcm/K]	-27.78	23.26	-4.22	29.33

^[1] Início Ciclo, Burnup Médio = 0 GWD/THM

^[2] Fim do 1º Ciclo, Burnup Médio = 84,34 GWD/THM

^[3] Início do 2º Ciclo, Burnup Médio = 84,34 GWD/THM

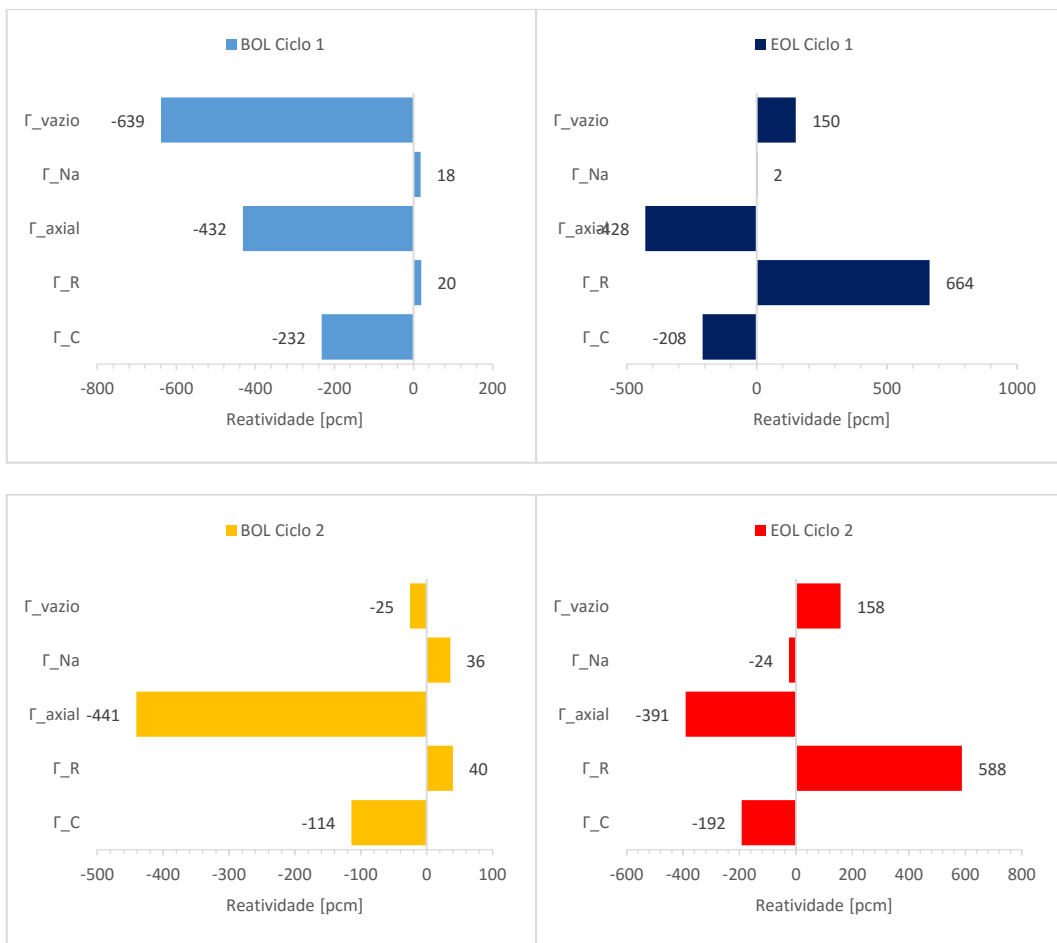
^[4] Início do 2º Ciclo, Burnup Médio = 154,37 GWD/THM

Tabela 4-6. Variação nominal de reatividade ao longo do ciclo.

Parâmetros ^[1]	BOL Ciclo 1 FPZ, zero Xe	EOL Ciclo1 QPP, Xe equilíbrio	BOL Ciclo 2 FPZ, zero Xe	EOL Ciclo 2 QPP, Xe equilíbrio
$\Delta T_C (1200 - 400)K$ [pcm]	-232	-208	-112	-192
$\Delta T_R (1200 - 400)K$ [pcm]	20	664	40	584
$\Delta T_{AXIAL} (1200 - 400)K$ [pcm]	-416	-424	-440	-392
$\Delta T_{Na} (1200 - 400)K$ [pcm]	18.4	1.6	32	-24
$\Delta \%_{VAZIO} (24 - 1)\%$ [pcm]	-639	535	-97	675

^[1] Valores calculados para dois intervalos de variação.

Figura 4-25. Reatividade dos principais coeficientes nucleares em função da temperatura e densidade do refrigerante.



5. MODIFICAÇÕES NO MODELO EQUIVALENTE

Até o presente momento objetivou-se a construção de um modelo equivalente ao núcleo do projeto *4S Reactor* e, a partir do modelo, a avaliação dos parâmetros neutrônicos que caracterizam este projeto. Os resultados obtidos mostram que o modelo é capaz de fornecer dados operacionais válidos para a queima do combustível e para os coeficientes nucleares ao longo de todo o ciclo de operação.

O objetivo a partir deste ponto é remodelar o núcleo introduzindo novos conceitos explorados na literatura para FSR, através de modificações a sua geometria e aos materiais, analisando o impacto ao projeto ao longo do ciclo.

Alguns novos conceitos têm mostrado aspectos favoráveis do ponto de vista da segurança para núcleos de FSR, como redução do coeficiente de vazio e a reatividade Doppler, entretanto também afetam a queima e o desempenho. A pergunta é qual o impacto da introdução destas alterações ao projeto do *4S Reactor*, e se é possível remodelar o núcleo com a finalidade de se obter coeficientes de reatividade mais favoráveis do ponto de vista de segurança passiva. E quais são as implicações destas modificações no desempenho, na queima, na extensão do ciclo e na evolução da composição do combustível.

Diferentes novos trabalhos têm apresentado novas propostas de otimização das características do núcleo de FSR, estudos que envolvem alterações na composição de materiais como; avaliação de novas bases de combustíveis, como uso de óxidos, nitretos, carbetos e metálicos [10], usos de novos materiais absorvedores como Európio [10], uso de combustíveis metálicos de liga ternária de U-Nb-Zr [11], entre outras. Modificações na geometria do núcleo como; redução da razão altura / diâmetro do núcleo (H/D) [10], [12], redução de volume de sódio no núcleo [10], uso de varetas com material moderador [12], entre outras⁸.

O projeto do *4S Reactor* já tem incorporado uma série de novos conceitos ao longo dos últimos anos de desenvolvimento, como o uso de uma base sólida de conhecimento em combustíveis metálicos [6], substituição do cobertor fértil por plenum de sódio para compensação da altura do núcleo, uso de varetas com sódio-ligadas (substituição de gás He por Na como material de junção entre o combustível e o revestimento) [10], e utilização de sistemas passivos de remoção do calor residual.

5.1. ALTERAÇÕES AO PROJETO

As análises executadas nesta parte do trabalho são feitas através da incorporação de alterações ao modelo original, e a avaliação dos parâmetros ao longo do ciclo. As modificações são executadas de maneira gradual comparando os resultados com o projeto original.

⁸ Alguns dos conceitos já são bem caracterizados e encontrados em diversas literaturas sobre o tema. Aqui são citadas apenas algumas referências as quais foram utilizadas como base neste trabalho.

A cada conjunto de modificações são avaliados os novos parâmetros neutrônicos e comparados aos resultados já obtidos. Os conjuntos de alterações incorporadas ao modelo original foram:

- I. Substituição da liga de combustível metálico U-10%Zr para liga ternária de base de nióbio U-5%Nb-2%Zr [19] [20] [10] [11], e interposição de plenum de sódio e camada absorvedora de Hf, acima e abaixo da região ativa do núcleo [12]. Inserção de camada absorvedora de B₄C a blindagem radial - **Modificação 1** (Mod. 1).
- II. Inserção de varetas moderadoras de grafite aos elementos combustíveis – **Modificação 2** (Mod. 2).
- III. Redução da razão H/D do núcleo – **Modificação 3** (Mod. 3).

5.2. INSERÇÃO DE ABSORVEDORES AXIAIS E RADIAIS, ALTERAÇÃO DO COMBUSTÍVEL.

O primeiro conjunto de modificações insere uma camada de plenum de sódio entre absorvedores axiais e radiais ao núcleo, e altera a composição do combustível de liga binária 90%U-10%Zr, para liga ternária 93%U-5%Nb-2%Zr.

Ligas de combustível metálico de base de nióbio U-Nb-Zr têm sido estudadas nos últimos anos pelo seu potencial como alternativa de combustível metálico a liga binária U-Zr. O Nb e Zr possuem baixas seções de choque e permitem atingir uma alta densidade para o combustível, a adição de Zr aumenta a temperatura do combustível, auxilia na redução da interação revestimento-combustível e na estabilização para uma larga faixa de temperatura. A adição de Nb ao U permite um grande aumento da resistência a corrosão, auxilia na redução da difusão de produtos de fissão no combustível e melhora consideravelmente a resistência ao inchaço de ligas de U com o burnup (estabilidade a irradiação). Em contrapartida, a adição de Nb aumenta o nível radiação do combustível. A quantidade total de Nb e Zr adicionado deve ser restringida ao máximo de 7 wt%, já que adições superiores resultam em decréscimo da taxa de regeneração do combustível [21].

A inserção de camadas de absorvedores axiais interpostas ao plenum de Na, tem o potencial de aumentar os termos de fuga de nêutrons com a redução da densidade do refrigerante, contribuindo de maneira a reduzir o coeficiente de vazio do núcleo. A incorporação de camada absorvedora a blindagem radial, tem por objetivo ampliar o efeito do plenum radial de sódio, que substitui o cobertor radial no projeto do 4S.

5.2.1. Descrição do Núcleo

A Figura 5-1 apresenta a visão em corte axial do reator com a incorporação das camadas de plenum e absorvedoras. Comparado ao modelo original (Figura 4-7) observa-se a alteração da

blindagem radial do núcleo, a inserção da camada absorvedora superior a vareta combustível e inferior ao EC, assim como o aumento e alteração do isolante de Al_2O_3 . A visão radial em corte é mostrada na Figura 5-2, em que se nota a utilização de uma geometria vazada para o isolante Al_2O_3 , permitindo aumentar o volume de sódio entre a área ativa do combustível e a camada absorvedora.

A inserção dos absorvedores axiais e radiais ao núcleo modificaram as condições de reatividade reduzindo o fator de multiplicação k_{eff} , em função do aumento da perda de nêutrons. A compensação da redução de reatividade para se atender aos critérios de operação para o BOL (valor de $k_{eff} \cong 1.00000$ na posição crítica inicial, e manutenção da margem de desligamento em $\sim 3\%$ dk/kk com a inserção da barra de desligamento) foi executada através do aumento percentual de enriquecimento de ^{235}U no combustível, sem alterar as dimensões da área ativa.

O aumento do enriquecimento afeta o balanço de reatividade do núcleo e interfere no valor de reatividade do absorvedor fixo e da barra de desligamento. A Tabela 5.1 compara os parâmetros básicos do combustível com os obtidos para o modelo original.

Tabela 5-6. Parâmetros básicos do combustível, Modificação I.

Modelo	Região Núcleo	Enriquecimento Inicial [w/o ^{235}U]	Massa Inicial de U por EC [kg]	Massa Total de ^{235}U por EC [kg]	Massa Total de U por Zona [kg]
Original U-10%Zr	Zona Interna	9,2	900,6	81,1	5.404
	Zona Externa	14,16	900,6	132,4	10.808
Mod. I U-5%Nb-2%Zr	Zona Interna	9,8	1020,9	98,9	6.125
	Zona Externa	14,52	1022,7	146,8	12.272

Figura 5-1. Vista axial do reator Mod. 2 com incorporação dos absorvedores axiais e radiais (Imagem obtida do MCNPX 2.6.0).

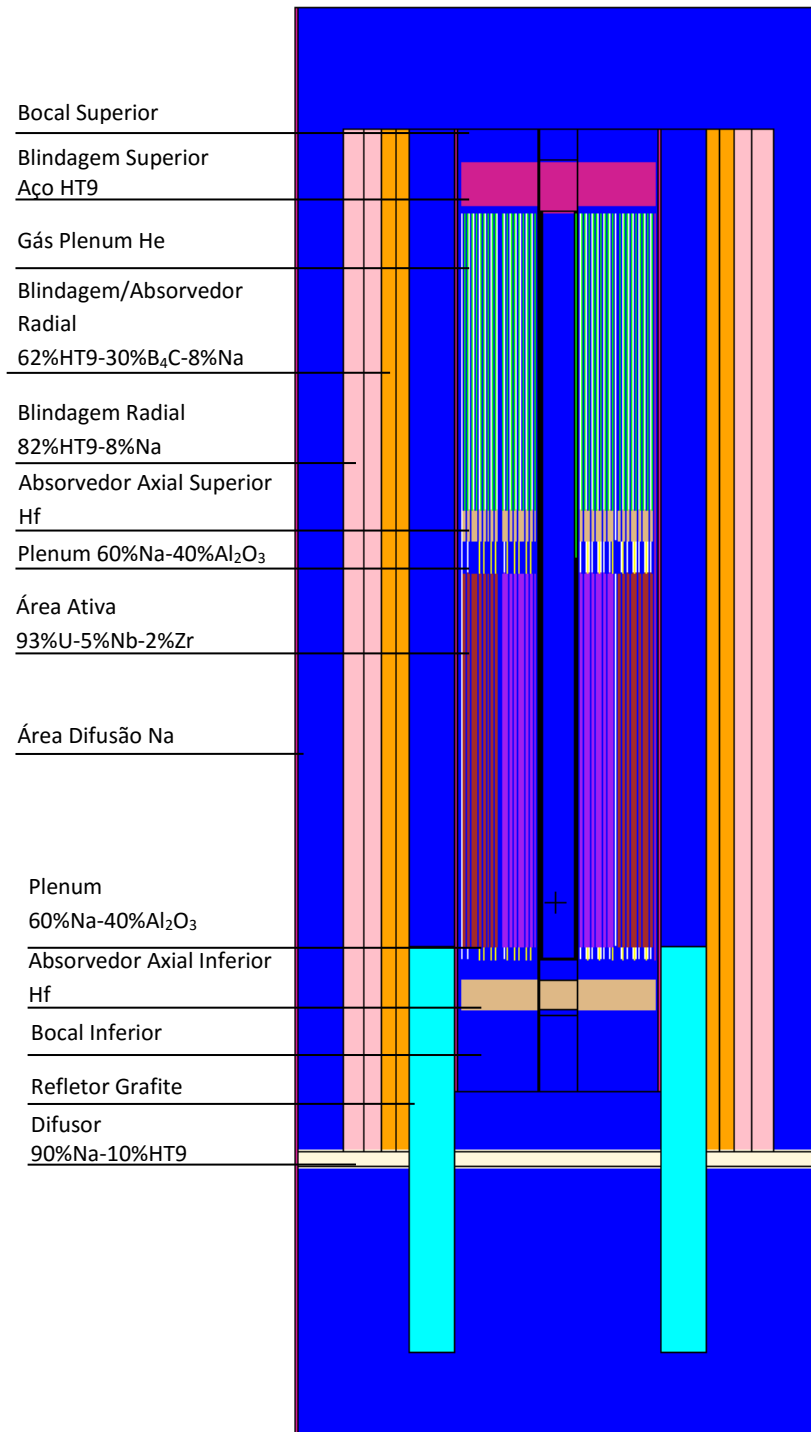
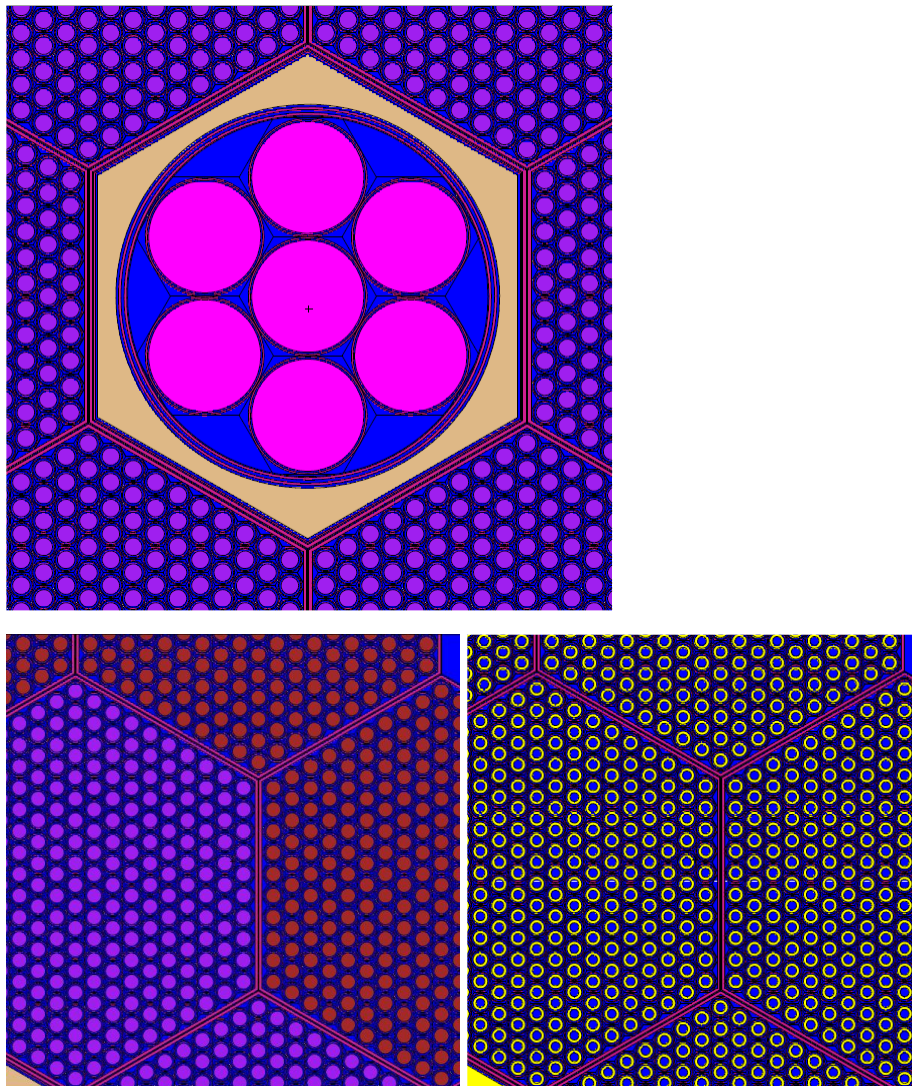


Figura 5-2. Vista radial do reator modificado com incorporação dos absorvedores axiais e radiais (Imagem obtida do MCNPX 2.6.0).



- **Modificação da blindagem e inserção do absorvedor radial**

A blindagem homogeneizada do modelo original é composta de 92%HT9–8%Na com espessura total de 44 cm, é substituída por duas camadas, a interna constituindo de aço inox HT9 com carbeto de boro 62%HT9–30% B4C–8%Na (utilizando B natural – 19,9%¹⁰B), e espessura de 18 cm; a camada mais externa, com 26 cm de espessura, é mantida a composição de 92%HT – 8%Na.

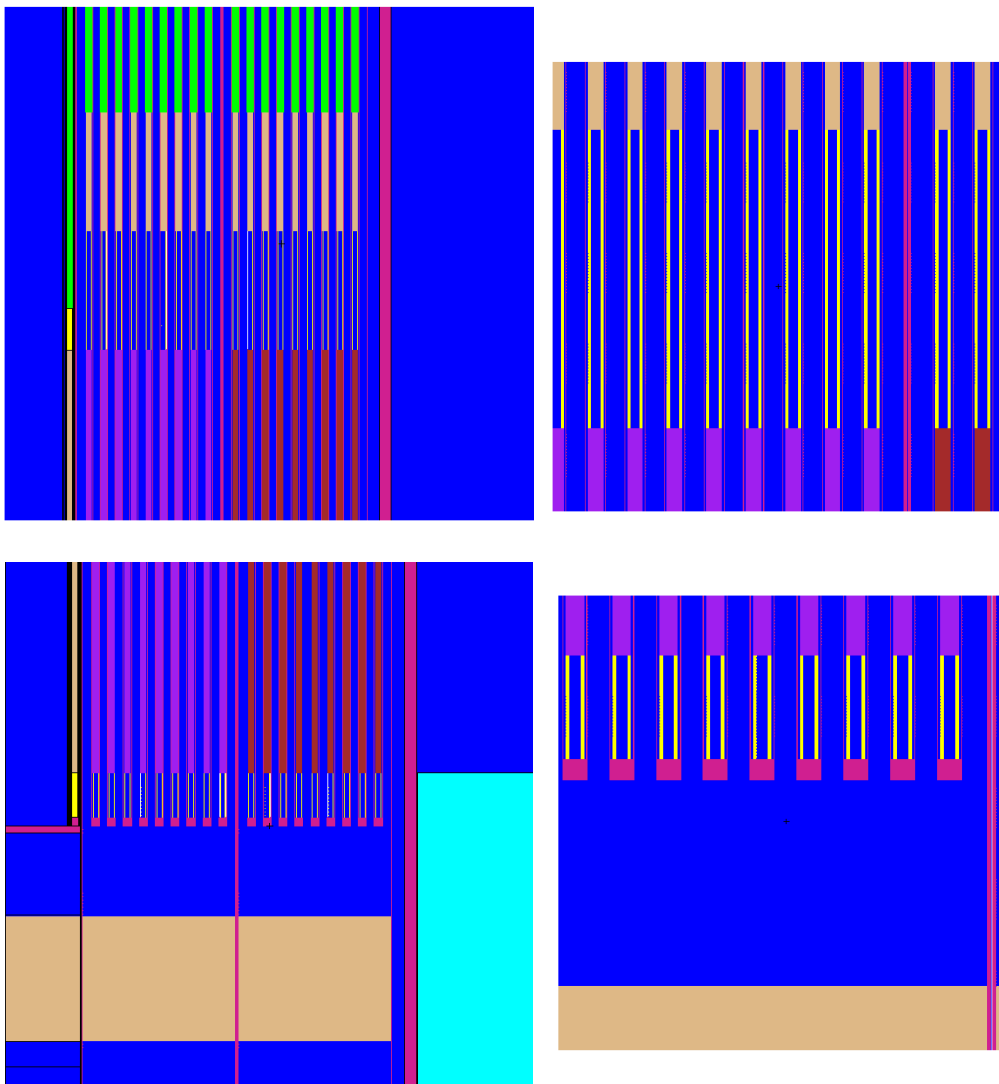
- **Inserção de absorvedores axiais**

Acima da região ativa na vareta combustível, separado pelo plenum de Na, é inserida uma camada absorvedora de Hf natural com 20 cm comprimento. Abaixo da região ativa é inserida uma camada absorvedora de Hf natural de 20 cm comprimento, localizada no elemento combustível entre o bocal inferior e as varetas de combustível.

- **Inserção do plenum de Na**

Dois plenums de sódio são interpostos entre a região ativa do combustível e as camadas absorvedoras. O plenum superior possui 20 *cm* de comprimento sendo modelado com o uso de estrutura anelar para o isolante Al_2O_3 . O anel possui razão 0,6 entre o diâmetro e o furo central, sendo preenchido com sódio. O plenum inferior é modelado no EC com o uso de uma área de difusão de sódio acima do bocal superior de 14 *cm*, e uma camada anelar de Al_2O_3 com 7 *cm* na parte inferior da vareta combustível, Figura 5-3⁹.

Figura 5-3. Vista em corte das camadas de plenum e absorvedora superior em inferior, e detalhes da modelagem do plenum Na (Imagem obtida utilizando o MCNPX 2.6.0).



⁹ Observação: neste trabalho não foi avaliada a otimização da relação entre o comprimento do plenum / camada absorvedora. O objetivo é analisar a influência da inserção destas camadas nos coeficientes de reatividade.

5.2.2. Comportamento da Queima

Os cálculos de queima do núcleo são gerados da mesma forma do que a executada para o modelo original, com intervalo de queima de 365 dias e potência de 215 MW em todos os passos. A duração do Ciclo 1 foi de 26 anos, atingindo o burnup médio de 110,9 GWd/THM. O Ciclo 2 tem duração de 12 anos e burnup 55,47 GWd/THM; a extensão da queima é de 38 anos, ou 13.870 dias, com burnup total de 166,37 GWd/THM.

A Tabela 5-2 compara os resultados com o modelo original. O aumento do enriquecimento do combustível elevou a extensão do ciclo em 3 anos, e aumento do burnup em 12 GWd/THM.

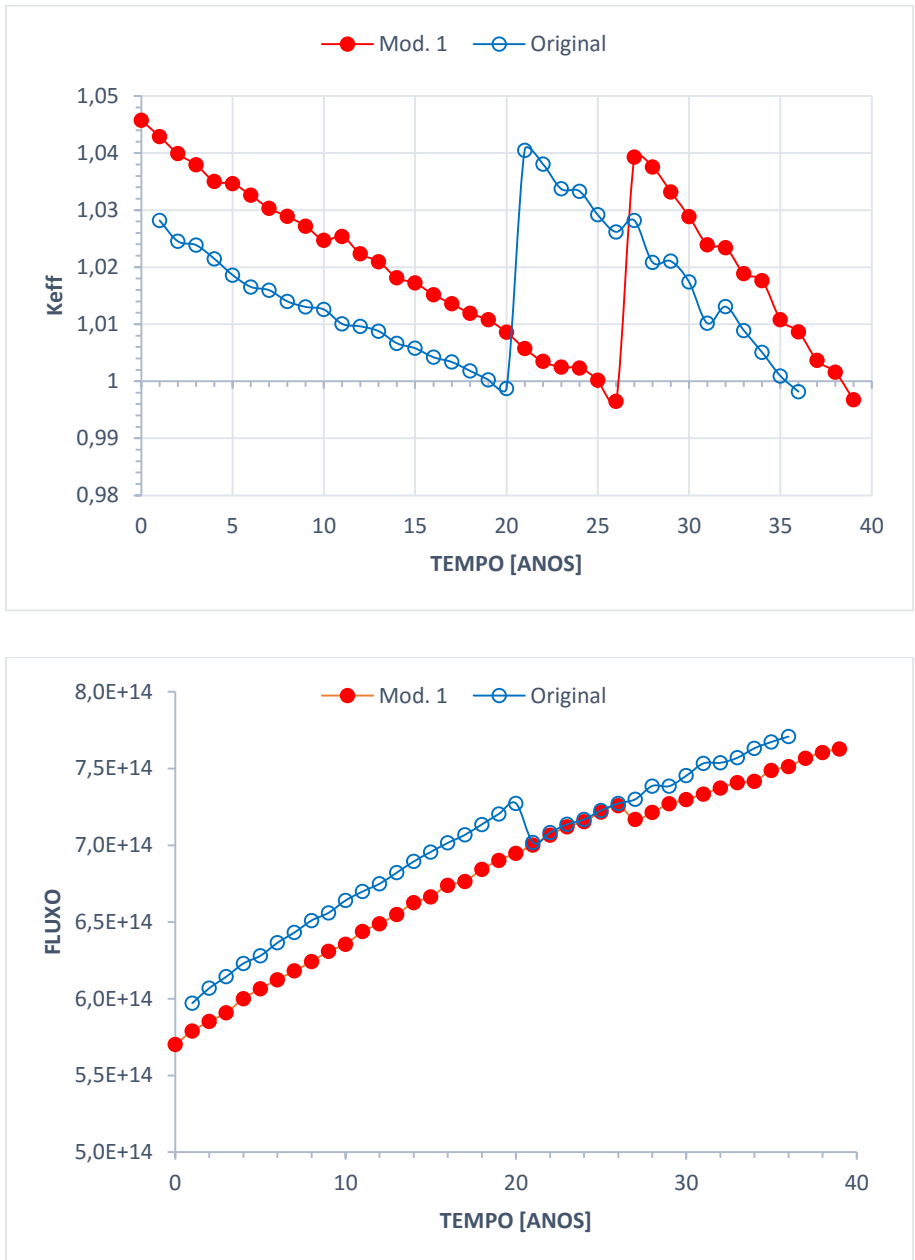
Tabela 5-2. Parâmetros da queima do combustível.

Modelo	Enriquecimento Inicial		Burnup Total [MWd/THM]	Duração Ciclo [anos]
	Zonas Interna / Externa	[w/o ²³⁵ U]		
Original	9,2 / 14,16		154,37	35
Mod.I	9,8 / 14,56		166,37	38

A Figura 5-4, apresenta a variação de k_{eff} e fluxo ao longo do ciclo para a Modificação 1 – Mod 1, e para o modelo Original. Pode-se observar que a reatividade para a modificação 1 no início do ciclo 2, BOL Ciclo 2, $k_{eff} = 1,03931$ é inferior ao início do ciclo, BOL Ciclo 1, com $k_{eff} = 1,04574$, função principalmente do ajuste de reatividade em função do aumento do enriquecimento, com isso se estabelece a relação ideal $\rho_{RFL} > \rho_{ABS}$. Apesar do maior enriquecimento, em função do aumento de absorvedores ao núcleo, o fluxo do Mod 1 é inferior ao observado para o modelo Original.

O acompanhamento da evolução do combustível e dos coeficientes de reatividade ao longo do ciclo não são avaliados nesta seção, a análise é formada de maneira conjunta com as demais modificações mais à frente no trabalho.

Figura 5-4. Variação de k_{eff} e fluxo ao longo do ciclo, Mod 1.



5.2.3. Reatividades dos Elementos de Controle

A Tabela 5-3 sintetiza os valores de reatividade obtidos através do ajuste dos parâmetros. Em função da alteração dos valores de enriquecimento, as margens de reatividade da barra de desligamento e do absorvedor fixo são modificadas.

Tabela 5-3. Valores de reatividade dos elementos de controle, BOL, Mod I.

Parâmetro	Fator de Multiplicação $k_{eff} \pm \sigma$	Reatividade ρ [pcm] $\rho = \left(1 - \frac{1}{k_{eff}}\right)$
Condição Subcrítica	0.96318 \pm 0.00018	3822 \pm 18
Condição Crítica	1.00045 \pm 0.00017	44 \pm 17
Trabalho Barra Desligamento	0.96318 \pm 0.00018	3822 \pm 18
Trabalho do Absorvedor Fixo	1.02650 \pm 0.00018	2581 \pm 18
Trabalho do Refletor	1.04325 \pm 0.00018	4145 \pm 18

O aumento de 6,5% enriquecimento na Zona Interna e 2,5% para a Zona Externa, somada a diferença percentual de 3% de U entre os combustíveis (90%U-Zr, 93%U-Nb-Zr) representam um aumento significativo de massa urânio ao núcleo, 2.185 Kg. O aumento se reflete no excesso de reatividade do núcleo 6726 pcm ou \$18,2, contra \$13,3 do modelo original (atribuindo $B_{eff} = 370$ pcm).

Observando a tabela, a condição $\rho_{RFL} > \rho_{ABS}$ é estabelecida, entretanto ainda há uma margem de cerca de 800 pcm para otimização do valor de reatividade do absorvedor fixo, através a redução da reatividade da barra de desligamento $\rho_{SHT} = 3822$ pcm (o que equivale a ~3 anos de aumento na extensão de operação).

5.3. INSERÇÃO DE VARETAS COM MODERADOR NOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS

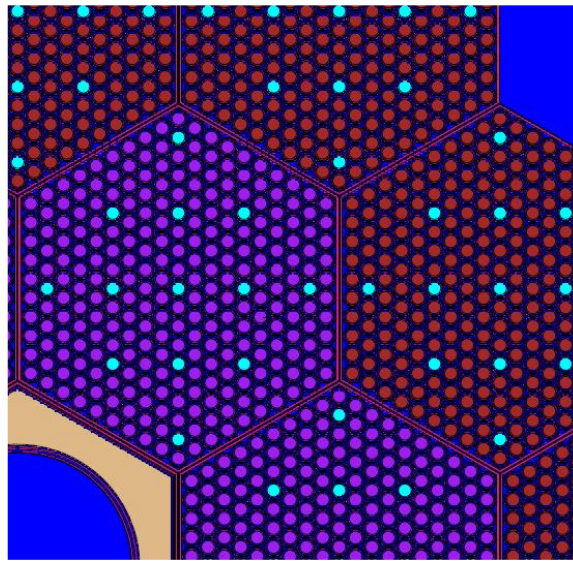
O segundo conjunto de modificações se baseia nas análises apresentadas na publicação de Kaichao Sun Et. Al. [12], com a inserção de pinos de moderação aos elementos combustíveis. A análise é feita com a inserção de 3 diferentes quantidades de varetas moderadoras (3, 7 e 13 varetas) a cada ECs utilizando moderador de ZrH_2 . O núcleo em tal estudo corresponde a um conceito de FSR de 3600 MWth proposto pela francesa CEA, com EC de 271 varetas, sendo avaliado apenas para a condição de início do ciclo e ciclo em equilíbrio. A resposta do reator com a inserção das varetas de moderador é a redução da reatividade Doppler, redução da reatividade de vazio e redução do fator regeneração (*breeder*) do combustível, conforme se aumenta a quantidade de varetas com moderador no núcleo.

Utilizando a metodologia aplicada em [12] avaliou-se a resposta do modelo incorporando as varetas de moderação aos ECs nas zonas internas e externas do núcleo, ao longo do ciclo de operação. Como moderador é utilizado o grafite (o moderador de ZrH_2 possui além da baixa temperatura de fusão possui outro fator negativo que é a liberação de H_2 em condições de acidente). A avaliação é feita somente para uma condição de análise com a inserção de 13 varetas de moderação aos elementos combustíveis. Não foram feitos estudos para otimização destes parâmetros.

5.3.1. Descrição do Núcleo

O modelo da segunda modificação – Mod 2, incorpora a inserção das varetas com moderador utilizando o modelo anterior. As varetas são distribuídas em todos os 18 ECs do núcleo conforme é mostrado na Figura 5-5. O moderador preenche a área ativa de todo o comprimento axial da vareta, as demais estruturas são mantidas inalteradas.

Figura 5-5. Vista em corte da distribuição das varetas com moderador (azul claro) nos elementos combustíveis do Mod. 2 (Imagem obtida do MCNPX 2.6.0).



Para o arranjo o valor do fator de multiplicação ajustado para início do ciclo em $k_{eff} = 1,00013 \pm 0,0001$, sendo necessário correções no valor do enriquecimento do combustível das regiões internas e externas para a compensação pela redução da reatividade, em função da inserção do total de 234 varetas com moderador. A substituição das varetas de combustível por moderador correspondente a redução de massa de 873 kg urânio ao núcleo, como mostra a Tabela 5-4, quando comparado ao anterior, Mod 1. Apesar do aumento percentual de enriquecimento a massa de ^{235}U é ligeiramente inferior ao Mod 1 em aproximadamente 30 kg.

Tabela 5-4. Parâmetros básicos do combustível, Mod 2.

Modelo	Região Núcleo	Enriquecimento Inicial [w/o ^{235}U]	Massa Inicial de U por EC [kg]	Massa Total de ^{235}U por EC [kg]	Massa Total de U por Zona [kg]
Original U-10%Zr	Zona Interna	9,2	900,6	81,1	5.404
	Zona Externa	14,16	900,6	132,4	10.808
Mod. 1 U-5%Nb-2%Zr	Zona Interna	9,8	1020,9	98,9	6.125
	Zona Externa	14,52	1022,7	146,8	12.272
Mod. 2 U-5%Nb-2%Zr	Zona Interna	10,05	973,6	96,7	5.841
	Zona Externa	15,1	973,6	145,4	11.683

5.3.2. Comportamento da Queima

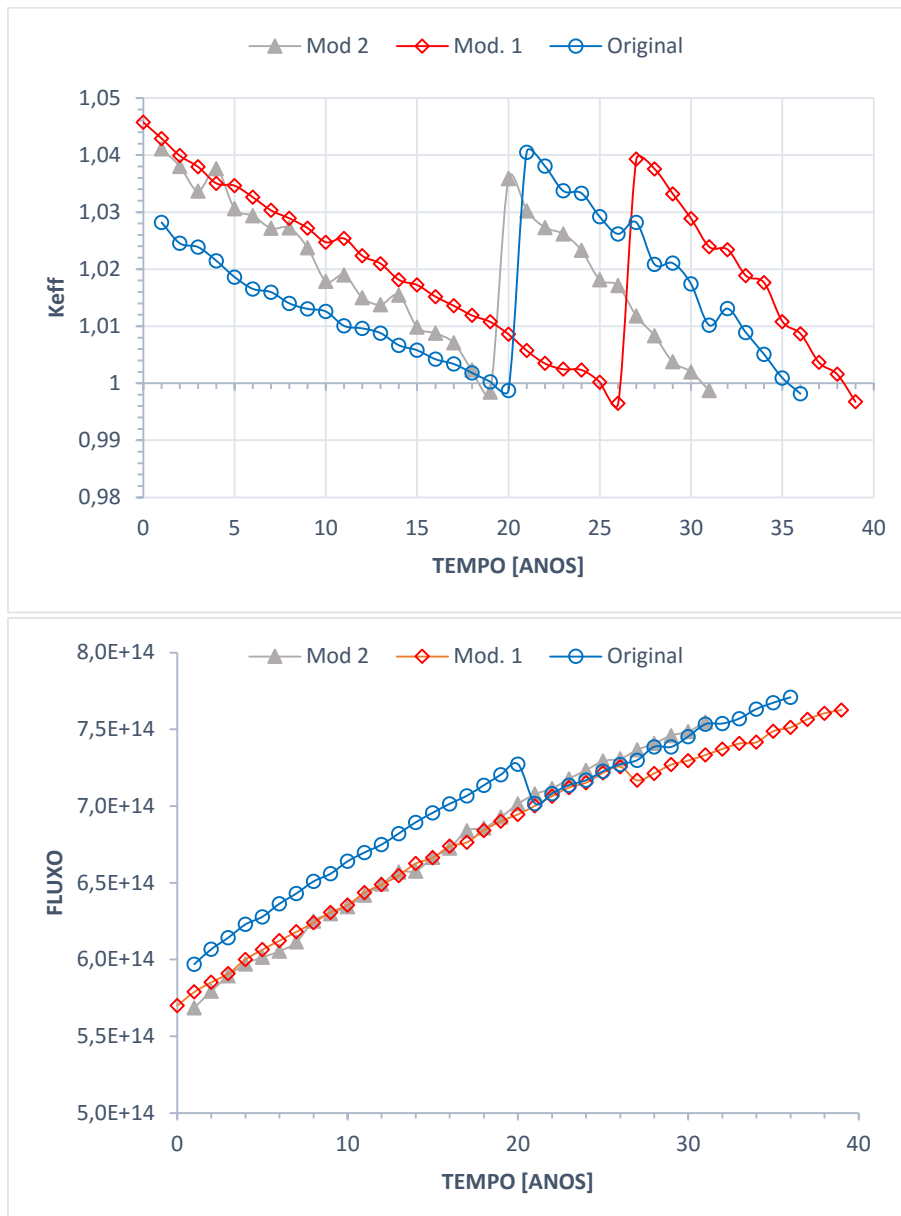
Todos os cálculos são executados como nos modelos anteriores. A duração do Ciclo 1 foi de 18 anos, atingindo o burnup médio de 80,62 GWd/THM. O Ciclo 2 com duração de 11 anos e burnup médio de 52,5 GWd/THM; a extensão total da queima é de 30 anos, ou 10.950 dias, com burnup total de 133,16 GWd/THM.

A Tabela 5-5 compara os resultados com os demais modelos. O Mod 2 possui massa de ^{235}U e ^{238}U no BOL Ciclo 1, ligeiramente inferior ao Mod 1, e superior ao modelo original, o percentual de enriquecimento também é o mais elevado entre os modelos. A incorporação das varetas com moderador no núcleo leva a redução significativa do burnup médio do combustível, como também a duração do ciclo é reduzida em 6 anos. A Figura 5-6 apresenta a variação de k_{eff} e fluxo ao longo do ciclo. O fator de multiplicação para BOL Ciclo 1 reator QPP, $k_{eff} = 1,04219$, é superior ao valor de início do segundo ciclo, BOL Ciclo 2 reator QPP, $k_{eff} = 1,03589$. A diferença no valor de k_{eff} é função principalmente do ajuste de reatividade gerado com o aumento do enriquecimento do combustível, e mantendo se fixo as dimensões da barra de desligamento e absorvedor fixo como nos demais modelos, por consequência a relação $\rho_{RFL} > \rho_{ABS}$ é mantida para o Mod 2. O valor inferior de reatividade do absorvedor fixo ρ_{ABS} , é o principal fator responsável pela menor extensão da queima no ciclo 2. Embora o valor da extensão do ciclo e o valor de burnup médio do combustível seja inferior no Mod 2 indicando o impacto no desempenho e eficiência de queima do núcleo, o valor do fluxo de nêutrons é semelhante aos demais modelos.

Tabela 5-5. Parâmetros da queima do combustível, Mod 2.

Modelo	Enriquecimento Inicial Zonas Interna / Externa [w/o ^{235}U]	Burnup Total [MWd/THM]	Duração Ciclo [anos]
Original	9,2 / 14,16	154,37	35
Mod I	9,8 / 14,56	166,37	38
Mod 2	10,05 / 15,1	136,16	30

Figura 5-6. Variação de k_{eff} e fluxo ao longo do ciclo, Mod 2.



5.3.3. Reatividades dos Elementos de Controle

Os dados de reatividade obtidos através do ajuste dos parâmetros são sintetizados na Tabela 5-6. Em função da incorporação das varetas com moderador e da alteração do massa de combustível e enriquecimento utilizado, o balanço de massa do núcleo é alterado. Como no modelo Mod 1, os dados dimensionais e a composição dos elementos de controle não são modificados. Os critérios de margem de desligamento $\rho_{ABS} < 3\%$, e $k_{eff} \cong 1.00000$ são atendidos.

Tabela 5-6. Valores de reatividade dos elementos de controle, BOL Ciclo 1, Mod 2.

Parâmetro	Fator de Multiplicação $k_{eff} \pm \sigma$	Reatividade ρ [pcm] $\rho = \left(1 - \frac{1}{k_{eff}}\right)$
Condição Subcrítica	0.96338 ± 0.00017	-3801 ± 18
Condição Crítica	1.00013 ± 0.00018	13 ± 17
Trabalho Barra Desligamento	0.96338 ± 0.00017	-3801 ± 18
Trabalho do Absorvedor Fixo	1.02700 ± 0.00018	2629 ± 18
Trabalho do Refletor	1.04382 ± 0.00020	4198 ± 18

A reatividade total disponível no núcleo é de 6827 pcm ou \$18,5, próximo ao valor de \$18,2 para o Mod 1 e superior ao valor de \$13,3 do modelo original. Os valores são próximos aos parâmetros da Tabela 5-3 referentes ao Mod 1. Como no modelo anterior a condição $\rho_{RFL} > \rho_{ABS}$ é estabelecida, contudo existindo ainda uma margem também de cerca de 800 pcm para otimização do valor de reatividade do absorvedor fixo.

5.4. ALTERAÇÃO DA RELAÇÃO ALTURA DIÂMETRO DO NÚCLEO

O terceiro e último conjunto de modificações, altera a relação altura / diâmetro $(H/D)^{10}$ do núcleo, objetivando a avaliação do comportamento da queima e dos parâmetros neutrônicos, principalmente a influência na reatividade e coeficiente de vazio do refrigerante. A relação H/D é conhecimento bem determinado e descrito na literatura para SFR, na qual a redução da altura do núcleo favorece a diminuição da reatividade de vazio do refrigerante [10] [12] [16]. Uma relação ótima da relação H/D deve considerar as margens de conversão desejadas para o combustível, assim como o diâmetro do vaso e a altura necessária para os componentes internos dos vasos (trocadores de calor, bombas, instrumentações etc.). A redução da relação H/D favorece a redução da reatividade de vazio do refrigerante e potencializa o efeito esperado do plenum axial de Na, em contrapartida reduz o ganho de conversão do combustível [10] [12].

O projeto do *4S Reactor* possui a razão H/D muito elevada ($H/D \sim 1,93$), bem acima do padrão típico utilizado para projetos de SFR ($H/D \leq 0,59$), o que impacta em um alto valor para o coeficiente de vazio do refrigerante na condição de operação QPP, refletor inserido no núcleo, como já apresentado neste trabalho. Esse parâmetro é em parte compensado com a utilização de um núcleo de pequeno diâmetro e a inexistência de cobertor fértil radial ou axial ao combustível, fazendo com que a área ativa do combustível, na região central de maior fluxo, esteja exposta diretamente a região de plenum de sódio promovendo o aumento da fuga de nêutrons do núcleo. Em contrapartida a movimentação do refletor trabalha justamente para redução dos termos de fuga de nêutrons, deslocando o fluxo de forma a produzir o aumento da densidade de potência na posição de inserção do refletor. Essa movimentação anula os efeitos positivos da existência do plenum radial, já que a região de maior densidade de potência está encoberta pelo refletor, invertendo assim o valor do coeficiente de vazio do núcleo já para pequenas inserções do refletor, como foi observado no capítulo anterior na análise do modelo equivalente do *4S Reactor*. A resposta do núcleo é muito dependente das características do refletor, como a exemplo do coeficiente de temperatura Γ_R que possui uma dependência positiva com a temperatura ao longo de todo o ciclo.

Com respeito a reatividade, o sódio possui dois comportamentos importantes; sua (seção de choque macroscópica) Σ_t é baixa, fazendo com que elevações de temperatura no Na tenham pouca influência na reatividade do núcleo. Entretanto, o Na sofre grande variação de densidade com a temperatura [22], isto faz com que a densidade reduza significativamente com a elevação de temperatura do refrigerante. No núcleo, a redução da densidade de sódio, provoca o endurecimento do espectro aumentando o número de nêutrons gerados por fissão ν , o aumento das reações de absorção no ^{238}U , e a redução das perdas por absorção pelo sódio, estes efeitos geram o aumento do fluxo de nêutrons e uma realimentação positiva de reatividade. Em contrapartida, na periferia do núcleo, a redução da densidade do Na amplifica o termos de fuga de nêutrons reduzindo o fluxo e a reatividade de vazio do refrigerante.

¹⁰ Razão entre a altura ativa do núcleo H , e o diâmetro do núcleo D .

A remoção do conteúdo de sódio no núcleo e a redução da altura com o aumento do diâmetro, tem efeito positivo para a perda de nêutrons na periferia do núcleo com a elevação da temperatura. No *4S Reactor* o efeito de exposição da região central de maior fluxo, do núcleo de altura elevada sem cobertor radial, tem o efeito anulado pela presença do refletor móvel.

Esta terceira modificação - Mod 3, avalia o impacto da alteração da relação H/D no tempo de extensão do ciclo, na queima, na reatividade dos elementos de controle e nos coeficientes de reatividade. A modificação incorpora os resultados obtidos nos modelos anteriores, e introduz pequenas correções de materiais e dimensionais ao núcleo de forma a permitir a comparação dois parâmetros operacionais.

Observa-se como nas demais análises, não foram feitos estudos de otimização dos parâmetros. O objetivo é analisar o impacto da redução significativa e pontual da razão H/D no comportamento global do modelo e confrontar com os resultados já obtidos.

5.4.1. Descrição do Núcleo

Para a avaliação do comportamento do modelo foi atribuído a redução de 40% da área ativa do núcleo, o que corresponde a alteração de 2,5 m para 1,5 m do comprimento ativo do combustível, o que fornece a nova razão $H/D \sim 1,16$. O núcleo corresponde a descrição do modelo Mod 2, incorporando as modificações, e sendo aplicada a correção na geometria para adequação aos novos valores de dimensional do combustível para os demais elementos do núcleo e reator. A Figura 5-7 apresenta a vista em corte axial do reator, nota-se a redução no dimensional do núcleo, do refletor móvel e da blindagem radial.

Em projetos típicos de SRF a redução na razão H/D é gerada através da diminuição da altura da área ativa de combustível e o aumento do diâmetro com a incorporação de mais elementos combustíveis ao núcleo. Na alteração executada no Mod 3, o diâmetro do núcleo e demais componentes do reator são mantidos inalterados. A modificação é executada somente no comprimento axial dos elementos. A compensação em função da redução da massa de urânio é com a redução da área ativa, é feita através do aumento da margem de enriquecimento disponível no projeto. Os dados dimensionais do absorvedor fixo e da barra de desligamento são ajustados a manutenção do balanço de reatividade do modelo, afim de se atender aos parâmetros operacionais para BOL Ciclo 1, $k_{eff} \cong 1.00000$ na posição crítica inicial e manutenção da margem de desligamento em $\sim 3\% dk/kk$.

Em outras palavras a compensação da redução do laplaciano geométrico B_g^2 é compensada com o aumento do laplaciano material B_m^2 , através do enriquecimento, mantendo a relação crítica $B_m^2 = B_g^2$ para o núcleo do modelo.

O impacto da redução da altura ativa e aumento do enriquecimento na distribuição e densidade de potência do núcleo não são analisados neste trabalho.

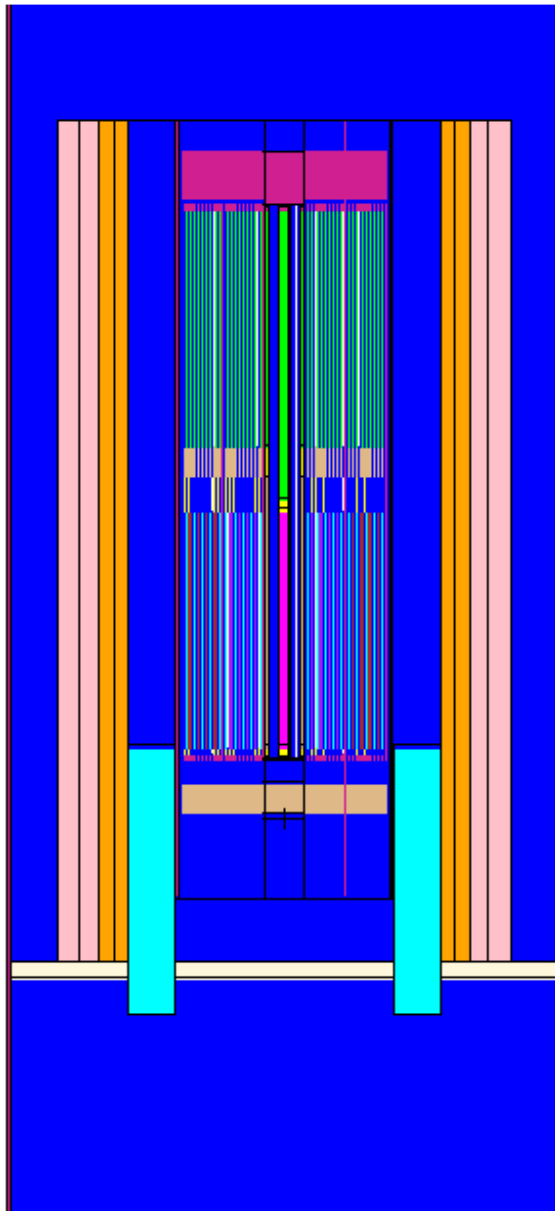
A Tabela 5-13 apresenta os dados básicos do combustível utilizado na modificação 3 – Mod 3, comparando com os demais modelos.

Tabela 5-7. Parâmetros básicos do combustível, Mod 3, comparados aos demais modelos.

Modelo	Região Núcleo	Enriquecimento Inicial [w/o ²³⁵ U]	Massa Inicial de U por EC [kg]	Massa Total de ²³⁵ U por EC [kg]	Massa Total de U por Zona [kg]
Original U-10%Zr	Zona Interna	9,2	900,6	81,1	5.404
	Zona Externa	14,16	900,6	132,4	10.808
Mod 1 U-5%Nb-2%Zr	Zona Interna	9,8	1020,9	98,9	6.125
	Zona Externa	14,52	1022,7	146,8	12.272
Mod 2 U-5%Nb-2%Zr	Zona Interna	10,05	973,6	96,7	5.841
	Zona Externa	15,1	973,6	145,4	11.683
Mod 3 U-5%Nb-2%Zr	Zona Interna	11,15	613,1	67,6	3.679
	Zona Externa	16,0	613,1	97,1	7.358

Comparando ao Mod 2, há o aumento do enriquecimento médio do combustível de 7,6%, 10,9% e 6% para a zona interna e externa, respectivamente, para compensação da reatividade. A massa total de urânio da Mod 3 é de 11.037 *kg*, contra 17.524 *kg* da Mod 2, uma redução de 6.847 *kg* de U. Para o isótopo ²³⁵U a redução de massa é de 2.162 *kg* ou cerca de 37% de redução.

Figura 5-7. Vista axial em corte do reator, Mod 3 (Imagem obtida do MCNPX 2.6.0).



▪ **Modificações na vareta combustível**

O comprimento ativo de combustível (e moderador) foi reduzido de 250 *cm* para 150 *cm*, o comprimento do plenum de gás reduzido de 197 *cm* para 150 *cm*. O absorvedor superior e o plenum de sódio não sofreram alterações, assim como os demais dimensionais da vareta combustível.

▪ **Modificações no elemento combustível e subelemento central**

O comprimento do elemento combustível acompanha as modificações na vareta combustível, sendo reduzido de 639 *cm* para 492 *cm*. O subelemento central também

segue as mesmas reduções aplicadas ao elemento combustível. As demais características e dimensionais, como plenum de sódio e absorvedor inferior, são mantidos inalterados.

- **Modificações no refletor móvel e blindagem radial**

O comprimento do refletor é reduzido de 270 *cm* para 170 *cm*, acompanhando a redução da área ativa da vareta de combustível. A blindagem segue as alterações do elemento combustível com a altura reduzida de 679 *cm* para 572 *cm*.

- **Modificações na barra de desligamento e absorvedor fixo**

Com as alterações, o valor obtido para a reatividade da barra de desligamento atinge o valor de $\sim 4\% dk/kk$ em função do aumento do enriquecimento. Os dimensionais são então ajustados para se estabelecer um valor próximo da margem de desligamento $3\% dk/kk$. O diâmetro das varetas absorvedoras, da barra de desligamento, é reduzido de 7 *cm* para 6,4 *cm*. O absorvedor fixo segue a modificação do diâmetro da barra de desligamento e tem o raio do furo central reduzido de 11,29 *cm* para 10,39 *cm*, que corresponde ao aumento de área para o absorvedor de Hf de 62,5% (84,6 *cm*² para 135,3 *cm*²).

5.4.2. Comportamento da Queima

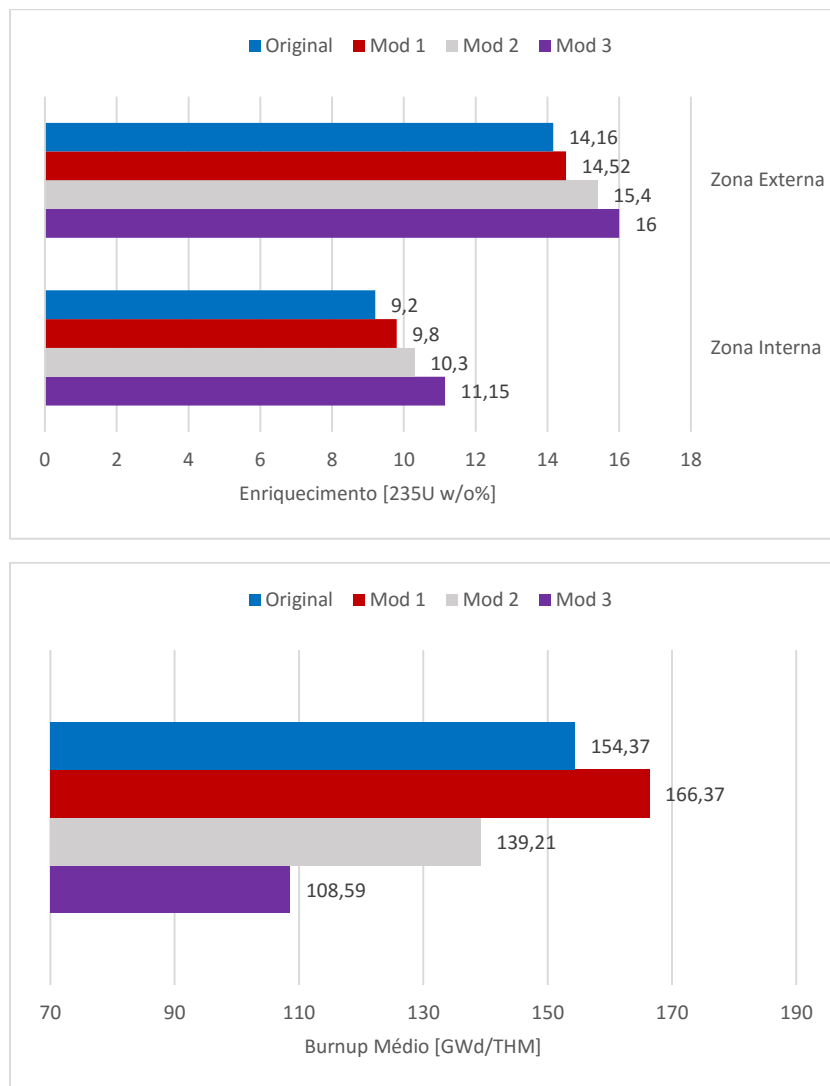
Todos os cálculos são novamente executados como nos modelos anteriores. O Ciclo 1 tem duração de 8 anos, atingindo o burnup médio de 56,9 GWd/THM. O Ciclo 2 tem duração de 7 anos e burnup 51,8 GWd/THM; a extensão total da queima é de 16 anos, ou 5.840 dias, com burnup total de 108,71 GWd/THM.

A Tabela 5-9 compara parâmetros de queima e enriquecimento entre os modelos, os dados são apresentados graficamente na Figura 5-8. A redução do burnup segue o decréscimo da massa de urânio no combustível, assim como a presença de 254 pinos com moderador, como na Mod 2. O balanço de reatividade dos modelos foi gerado com o aumento gradual do enriquecimento, em função da inserção de absorvedores ao núcleo Mod 1, incremento de varetas com moderador em substituição as varetas de combustível Mod 2, e a redução da área ativa do núcleo Mod 3, sem a contrapartida com o aumento da massa de urânio.

Tabela 5-8. Parâmetros da queima do combustível.

Modelo	Enriquecimento Inicial Zonas Interna / Externa [w/o ²³⁵ U]	Burnup Total [MWd/THM]	Duração Ciclo [anos]
Original	9,2 / 14,16	154,37	35
Mod 1	9,8 / 14,56	166,37	38
Mod 2	10,2 / 15,4	139,21	33
Mod 3	11,15 / 16,0	108,71	16

Figura 5-8. Comparativo entre o enriquecimento e queima do combustível entre os modelos.



Há ainda uma margem disponível de cerca de 4% para o limite legal de enriquecimento ao núcleo (20%), entretanto não é possível compensar a elevação de reatividade com o aumento de área ou massa do absorvedor de Hf. A inserção de varetas com gadolínio poderiam ser exploradas como forma de possibilitar aumentar o enriquecimento do núcleo.

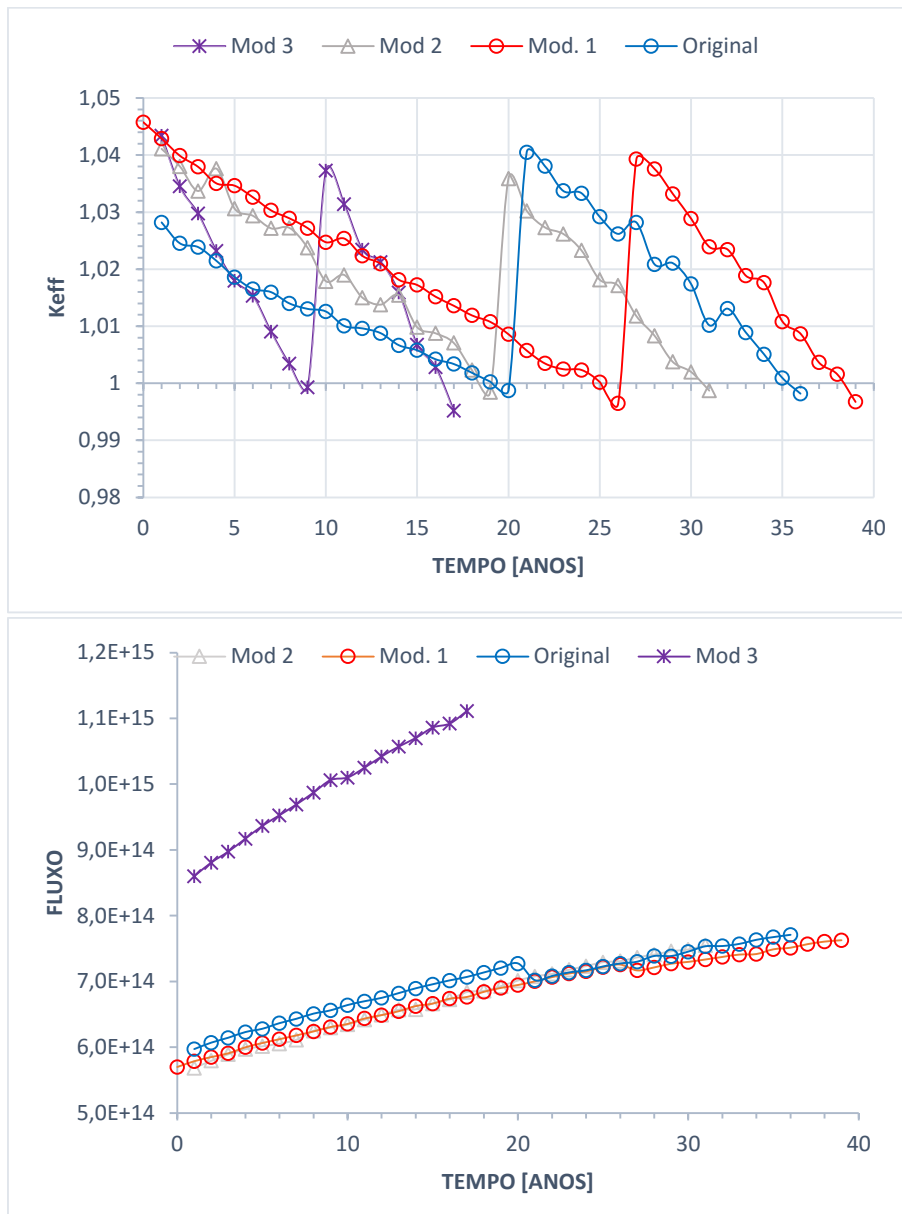
A Figura 5-9 apresenta a variação de k_{eff} e fluxo ao longo do ciclo. O fator de multiplicação para BOL Ciclo 1 reator QPP, $k_{eff} = 1,03919$, superior ao valor de início do segundo ciclo, BOL Ciclo 2 reator QPP, $k_{eff} = 1,03677$. A condição é estabelecida em função da relação $\rho_{RFL} > \rho_{ABS}$ estabelecida.

Analisando as curvas para a variação do k_{eff} pode-se observar que:

- A inserção dos absorvedores axiais e radial, tem impacto positivo no aumento da extensão do ciclo, ao permitir a elevação do enriquecimento ao aumento do excesso de reatividade disponível no núcleo.
- A inserção de varetas com moderador aos ECs reduz o comprimento do ciclo, assim como na redução significativa do burnup do combustível. As curvas da Mod 1 e Mod 2 se diferem majoritariamente pela presença ou não das varetas com moderador, a presença de absorvedores nas duas modificações permite que a extensão do ciclo no Mod 2 não seja muito inferior ao modelo original. A diferença de massa de $\sim 4,7\%$ para o U total e de $\sim 1,3\%$ para o ^{235}U , entre a Mod 2 e a Mod 1, indica não ser o fator responsável pela diferença de 13% entre o comprimento dos ciclos e, de 16% entre os valores de burnup.
- A mudança na extensão do ciclo é muito significativa para a Mod 3, o comprimento de ciclo é muito inferior a todos os demais modelos, o qual ocorre devido à redução de massa de urânio no núcleo. Pode se notar na curva para a Mod 3 que o ajuste de reatividade do absorvedor fixo torna próximo o comprimento dos dois ciclos de queima, o que contribui para a otimização e a extensão do ciclo.

Como analogia as avaliações que foram executadas no modelo original, capítulo 4, se a potência for reduzida para 135 MWt, têm-se como resultado para a queima da Mod 3: extensão do ciclo de queima de 26 anos, ou 9.490 dias, e burnup total do combustível de 116,1 GWd/THM . Apesar da perda de eficiência com a redução da massa de combustível na Mod 3, os resultados são ainda satisfatórios quando comparados aos dados disponibilizados na literatura para o *4S Reactor*.

Figura 5-9. Variação de k_{eff} e fluxo ao longo do ciclo, Mod 3.



5.4.3. Reatividades dos Elementos de Controle

Os valores de reatividade dos elementos de controle para o Mod 3, são sintetizados na Tabela 5-15. A redução da altura ativa de combustível e a conseqüente redução da massa, foi em parte compensada através do aumento do enriquecimento do combustível e do ajuste das dimensões dos absorvedores para se manter as condições operacionais. A margem de desligamento obtida é de 2,92%, inferior a 3% porém dentro da margem de erro tolerada de 100 pcm para avaliação dos parâmetros neutrônicos do modelo. O excesso de reatividade do núcleo corresponde a 7203 pcm ou ~\$19,5, superior a Mod 2 com \$18,5 em função principalmente do ajuste de dimensional, i.e. reatividade, do absorvedor fixo. O valor segue um aumento crescente em relação ao modelo original com ~\$13 em função da crescente elevação do valor de enriquecimento nas modificações. A condição condição $\rho_{RFL} > \rho_{ABS}$ é

mantida com margem de 838 pcm, o valor de reatividade da barra de desligamento sinaliza que há margem para otimização e redução dessa diferença.

O excesso de reatividade do núcleo se contrapõem a taxa elevada de queima de 7.110 pcm/ano, como exposto nos gráficos da Figura 5-11 para a redução de k_{eff} . Essa taxa leva a um rápido esgotamento da reatividade do combustível, é muito provável que as densidades de potência relacionadas ao núcleo sejam proibitivas para essa condição de potência de operação.

Tabela 5-9. Valores de reatividade dos elementos de controle, BOL, Mod 3.

Parâmetro	Fator de Multiplicação $k_{eff} \pm \sigma$	Reatividade ρ [pcm] $\rho = \left(1 - \frac{1}{k_{eff}}\right)$
Condição Subcrítica	0.97119 ± 0.00023	-2917 ± 23
Condição Crítica	0.99951 ± 0.00029	-49 ± 29
Trabalho Barra Desligamento	0.97119 ± 0.00023	-2917 ± 23
Trabalho do Absorvedor Fixo	1.03235 ± 0.00022	3183 ± 22
Trabalho do Refletor	1.04136 ± 0.00023	4021 ± 23

5.4.4. Evolução do combustível

Os gráficos das Figuras 5-10 a 5-12 apresentam os resultados da evolução da composição do combustível para o final do ciclo de queima, EOL Ciclo 2, comparando todas as modificações executadas.

O gráfico da Figura 5-10, apresenta os dados de variação e percentual em relação a massa inicial, para final do ciclo de operação. Observa-se para todos os modelos analisados uma dependência direta entre a redução dos isótopos ^{235}U e ^{238}U , e valor queima atingido para o combustível. Esse comportamento também é esperado para o aumento de não actínídeos e para a geração de transurânicos.

Os gráficos da Figura 11 também sinalizam a dependência na geração de TRU com o burnup do combustível, a geração de TRU é significativamente inferior para a Mod 3, em função do valor inferior de queima. Os dados de queima são mostrados para os principais isótopos de Pu e MA na Figura 12. Considerando os principais isótopos de TRU em massa ^{239}Pu , ^{238}Pu , ^{241}Pu , ^{241}Am e ^{237}Np , observa-se que a Mod 3 apresenta um maior percentual de geração de isótopos físeis, indicando o espectro mais endurecido.

Figura 5-10. Variação e percentual em massa do combustível metálico para os modelos analisados, EOL.



Figura 5-11. Variação em massa e percentual isotópico dos transurânicos para os modelos analisados, EOL.

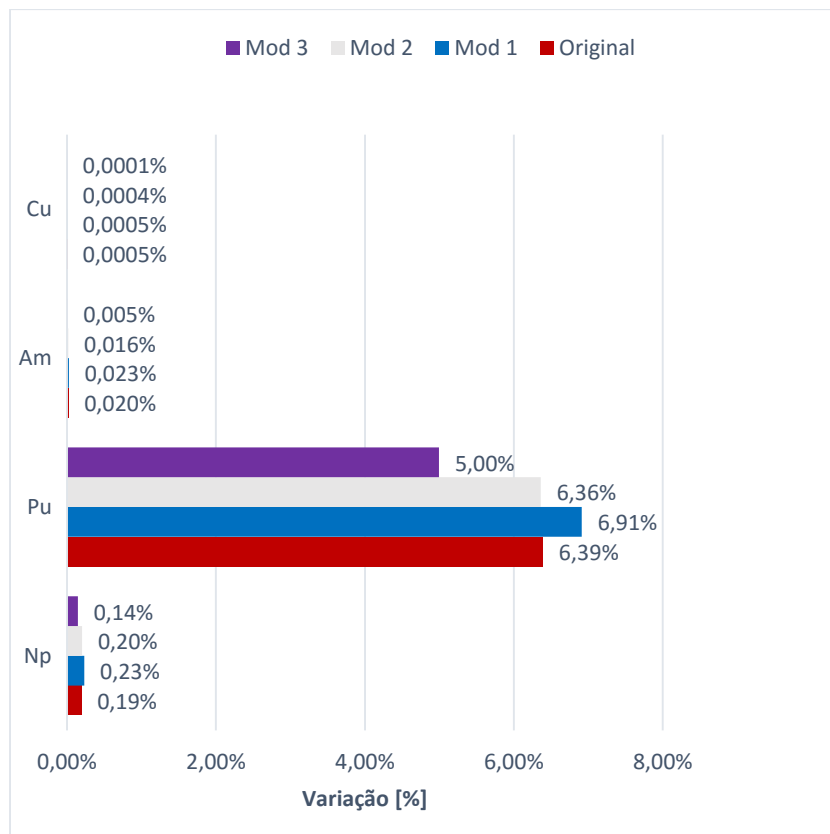
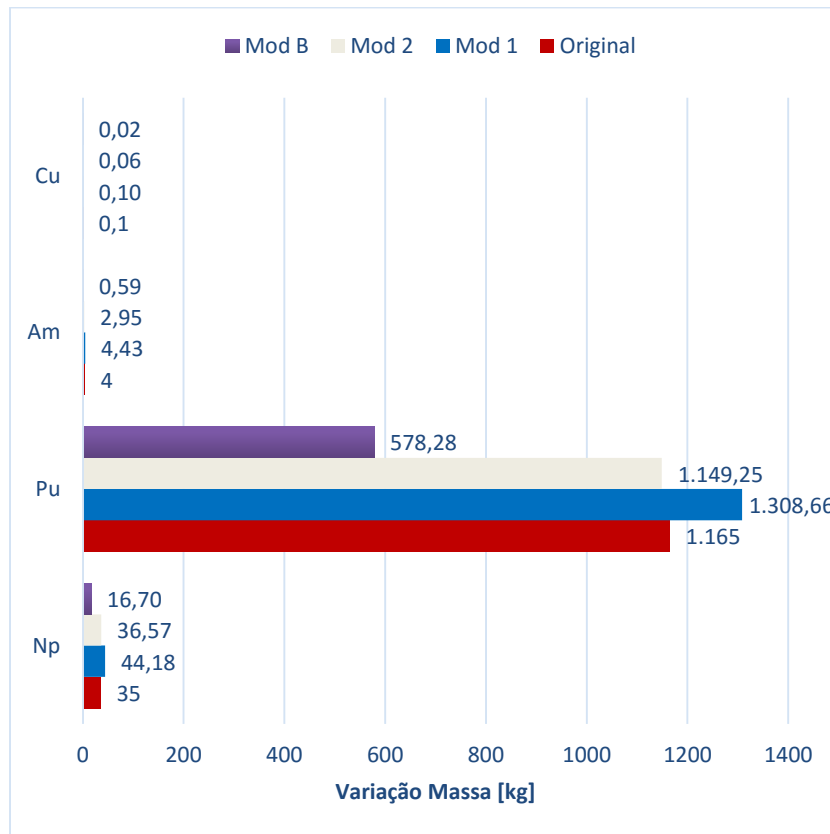
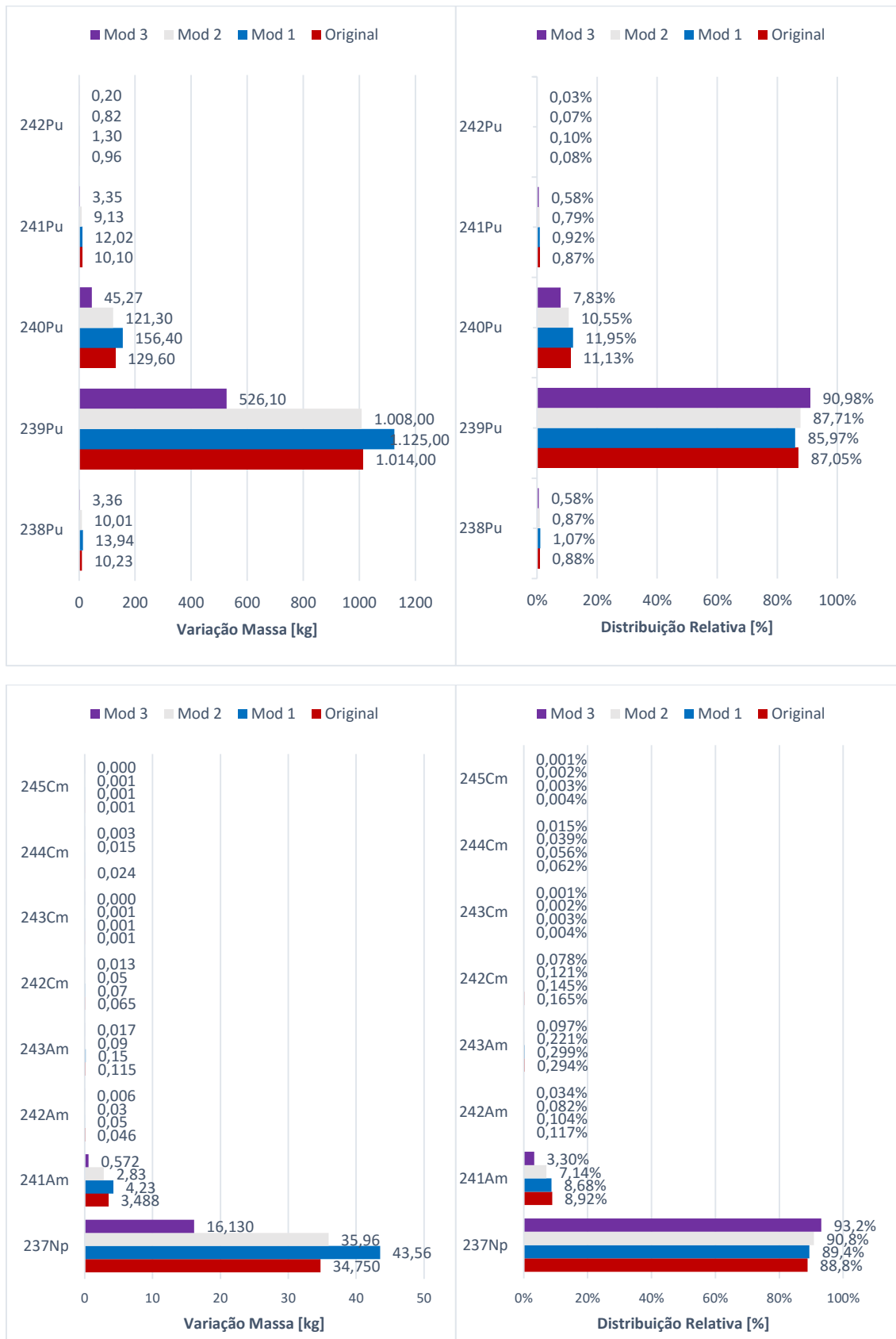


Figura 5-12. Variação em massa e distribuição relativa do conteúdo de plutônio, e actínídeos menores, para os modelos analisados, EOL.



Os gráficos das Figuras 5-13 a 5-16, apresentam os dados de variação e de percentuais em massa, para o início e final do ciclo de operação considerando a relação de isótopos físeis e fissionáveis no combustível.

A Figura 5-13 mostra a variação percentual de TRU e actínídeos para o início e final de ciclo de operação. Observa-se a relação de redução ou aumento de massa com o valor de burnup do combustível. A geração de isótopo físeis de TRU é consideravelmente mais alta do que a do que para isótopos fissionáveis. A variação da massa de actínídeos fissionáveis segue a redução do isótopo ^{238}U , enquanto a redução de actínídeos físeis é dependente da redução de ^{235}U e o crescimento de ^{239}Pu . Há uma maior tendência de redução do percentual de ^{235}U no combustível com o aumento do enriquecimento, gerado para a compensação da redução da massa de combustível nas modificações Mod 2 e Mod 3. Essa relação também é indicada na Figura 5-14, através da redução do percentual de isótopos físeis no combustível, como também através dos gráficos Figura 5-15.

A redução do isótopo ^{235}U é compensada em grande parte pela geração de grande quantidade de ^{239}Pu no combustível, como pode ser observado para a zona interna do núcleo. A massa superior de combustível na zona externa, assim como o maior percentual de enriquecimento correspondem também a maior redução da massa ^{235}U e ^{238}U .

O gráfico da Figura 5-16 mostra que o fator de conversão é mais elevado para a zona externa do núcleo. Apesar dos melhores parâmetros neutrônicos (k_{eff} e queima) para a Mod 1, a inserção dos absorvedores e das varetas de moderação na Mod 2 provocam a redução no fator de conversão do combustível. Entretanto a Mod 3 possui comportamento muito diferente ao esperado, a redução da altura do núcleo e redução da massa de combustível sendo compensado em parte pelo aumento enriquecimento, tem efeito positivo no fator de conversão no núcleo. Com a redução da massa de combustível para se manter a mesma potência de operação, é necessário manter as mesmas as taxas de reação no combustível, assim a densidade de potência necessariamente é mais elevada, assim como o fluxo neutrônico (Figura 5-9). É também esperado um fluxo neutrônico mais endurecido para a Mod 3 em função do aumento da fuga de nêutrons e do menor espalhamento gerado pelo combustível (manutenção do diâmetro e redução altura do núcleo e massa de combustível). Essas relações também provocam a redução da extensão do ciclo de operação.

Figura 5-13. Variação percentual de isótopos de TRU e Actínídeos totais, físseis e fissonáveis presentes na composição do combustível para todos os modelos analisados, EOL.

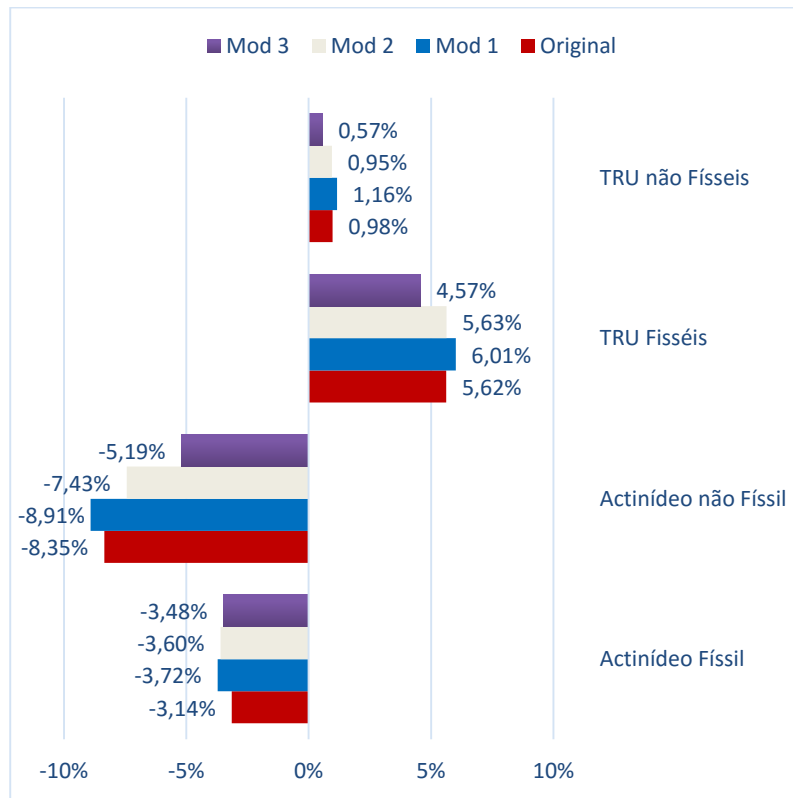


Figura 5-14. Enriquecimento do combustível para início e fim do ciclo, e variação percentual para todos os modelo analisados (w/o % de isótopos físseis).

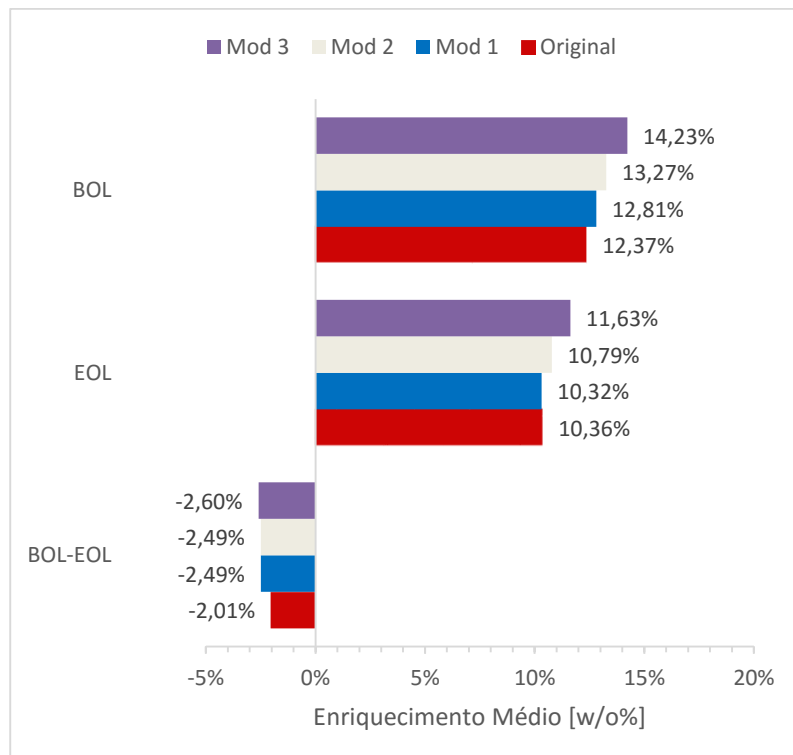


Figura 5-15. Variação em massa dos principais actínídeos do combustível, nas zonas internas e externas do núcleo, para todos os modelos analisados, EOL.

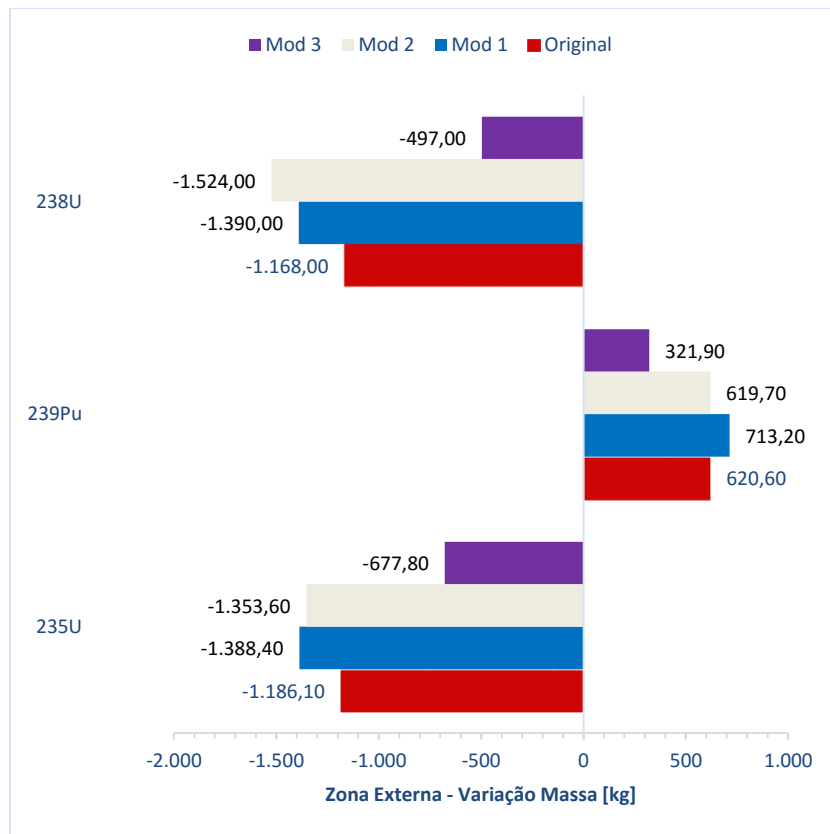
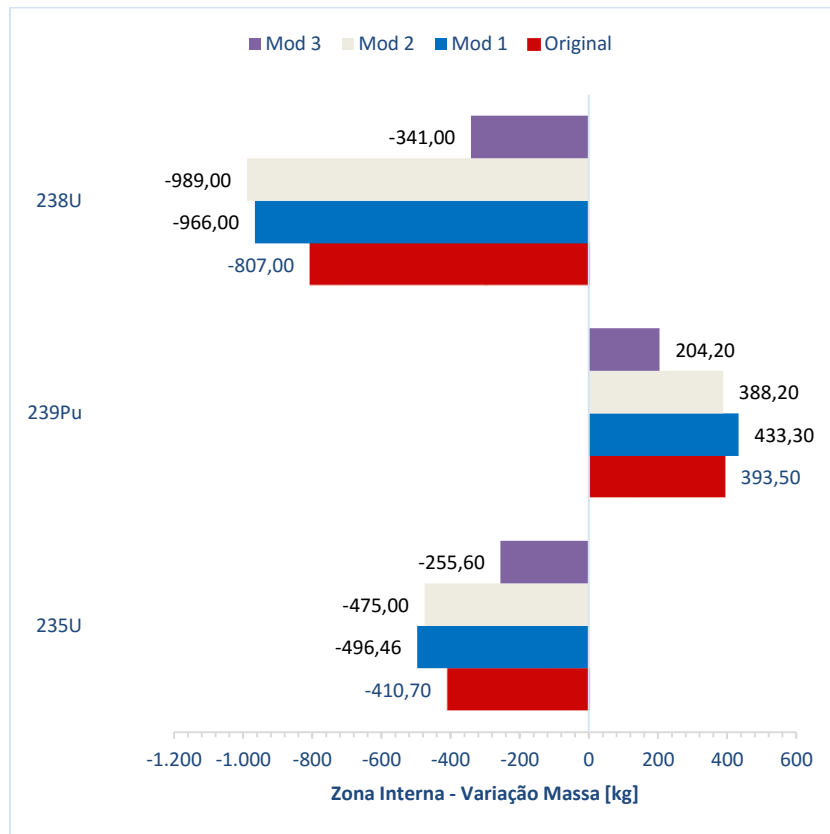
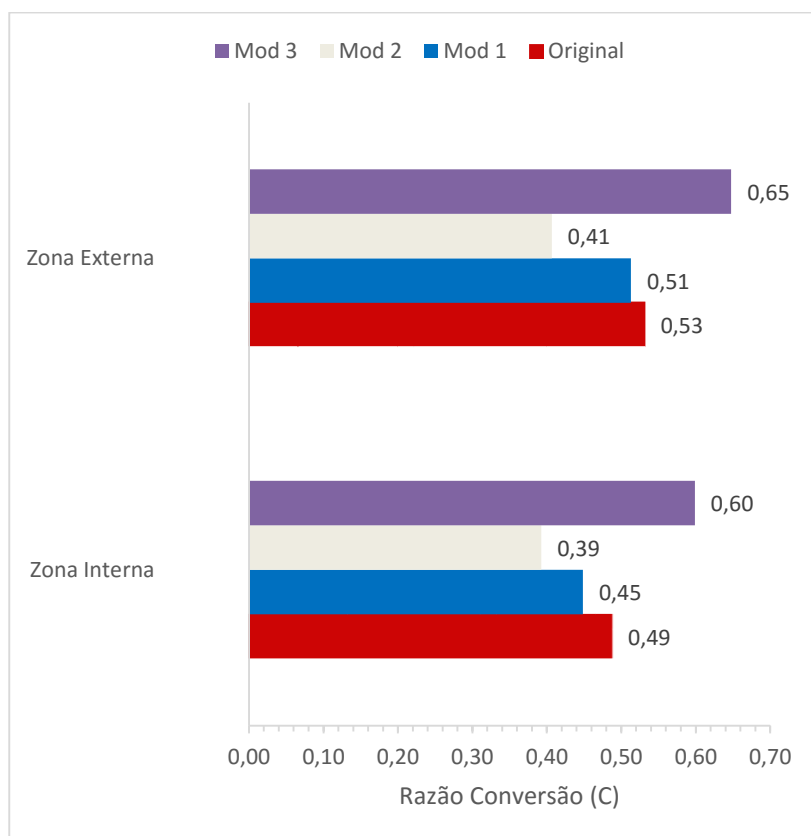


Figura 5-16. Razão de Conversão (C) para o combustível nas zonas internas e externas do núcleo em todos os modelos analisados, EOL.



5.4.5. Coeficientes de Reatividade ao Longo do Ciclo

As análises dos coeficientes de reatividade são feitas de maneira análoga as realizadas para o modelo original, os dados são avaliados por simplificação através de dois intervalos de temperatura $400K$ e $1200K$, que também correspondem ao intervalos de variação da densidade do refrigerante.

Por simplificação os resultados dos coeficientes para todas as modificações são analisados e comparados de forma conjunta com modelo equivalente, através das Figuras 5-17 a 5-21. Os respectivos valores são apresentados nas Tabelas 5-10 a 5-15 para registro e consulta.

O coeficiente de expansão axial do combustível não foi avaliado para as modificações Mod 1, 2 e 3; que utilizam o combustível metálico ternário de base de Nb. No desenvolvimento do trabalho não foram encontradas referências com informações do coeficiente de expansão térmica para este tipo de combustível. A Equação 4.2 é empírica e válida somente para combustíveis metálicos com base de Zr com ou sem inserção de Pu.

A Figura 5-17 apresenta os resultados do coeficiente de temperatura do combustível, ao longo do ciclo de operação, para todos os modelos analisados. O valor de Γ_C é próximo entre o modelo original e a Mod 1, demonstrando como esperado que não há dependência entre o fluxo interno do núcleo ou mudança no espectro de nêutrons, com a inserção de absorvedores na periferia do núcleo. A mudança de composição do combustível de matriz binária de Zr para matriz ternária de Nb mostra pouca influência no valor do Γ_C , contudo é necessário considerar

o aumento do percentual de isótopo ^{235}U para a Mod 1. A principal diferença entre os modelos ocorre para BOL Ciclo 1.

A incorporação das varetas de moderação ao núcleo influencia de maneira significativa o valor do Γ_C , Mod 2 e Mod 3. A redução do coeficiente é favorável do ponto de vista de segurança. A redução da relação H/D também contribui para o valor inferior de Γ_C . Em termos gerais as modificações implementadas, apesar de elevarem o percentual de enriquecimento, favorecem a redução do coeficiente de temperatura do combustível.

A figura 5-18 mostra os resultados para o coeficiente de temperatura do refletor entre os modelos analisados. Como já mencionado Γ_R tem pequena influência no início do ciclo com o refletor recuado. O valor se torna muito positivo já com pequenas inserções no núcleo. A inserção dos absorvedores externos tem influência favorável para redução do Γ_R , e superior a contribuição positiva ao coeficiente com o aumento do enriquecimento. A redução de Γ_R é em parte anulada com a inserção de varetas com moderador ao núcleo (nesta análise o efeito Doppler do grafite no refletor e nas varetas com moderador foram avaliados por simplificação de forma conjunta), o aumento da massa de grafite no núcleo contribui para a elevação do coeficiente.

A Figura 5-19 apresenta os resultados para o coeficiente de temperatura do refrigerante para os modelos analisados. Como já abordado ao longo do trabalho, o Γ_{Na} possui baixo valor em módulo e pouca influência na reatividade do núcleo, seu valor permanece baixo em todos os modelos. Em função do baixo valor, o erro associado também é elevado o que acarreta em flutuações nos resultados.

A Figura 5-20 apresenta os resultados para o coeficiente de vazio do refrigerante para os modelos analisados. A inserção das camadas de plenum antepostas aos absorvedores periféricos ao núcleo mostram uma influência nula para o valor do Γ_V , o que sugere alta razão H/D do núcleo torna insignificante o efeito potencial dos absorvedores externos. O coeficiente para a Mod 1, sugere que o valor sofre influência somente do aumento do enriquecimento do combustível, o qual foi elevado para compensar a incorporação dos absorvedores. Para início de ciclo, BOL, há uma redução favorável de Γ_V em função da ação do absorvedor radial sobre o fluxo de nêutrons. Essa relação é anulada devido ao “sombreamento” do absorvedor com a inserção do refletor ao núcleo.

A inserção de varetas com moderador ao núcleo, e a redução da razão H/D , tem forte impacto na redução do Γ_V , o que contribui significativamente para a redução da reatividade positiva ao núcleo. Contudo a influência da presença dos absorvedores periféricos deve ser reavaliada na Mod 3, já que a mudança de geometria pode ou não potencializar a sua influência.

Figura 5-17. Comparação entre os coeficientes de temperatura do combustível para todos os modelos analisados.

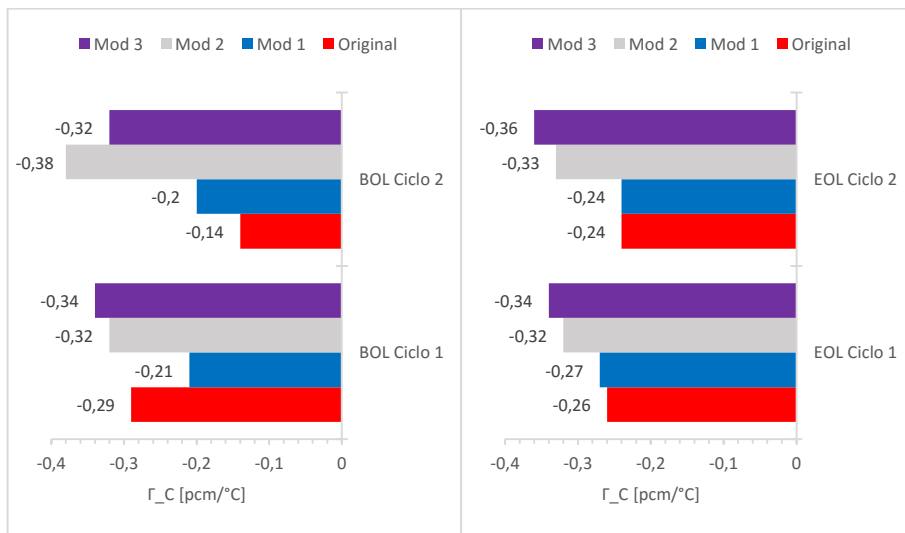
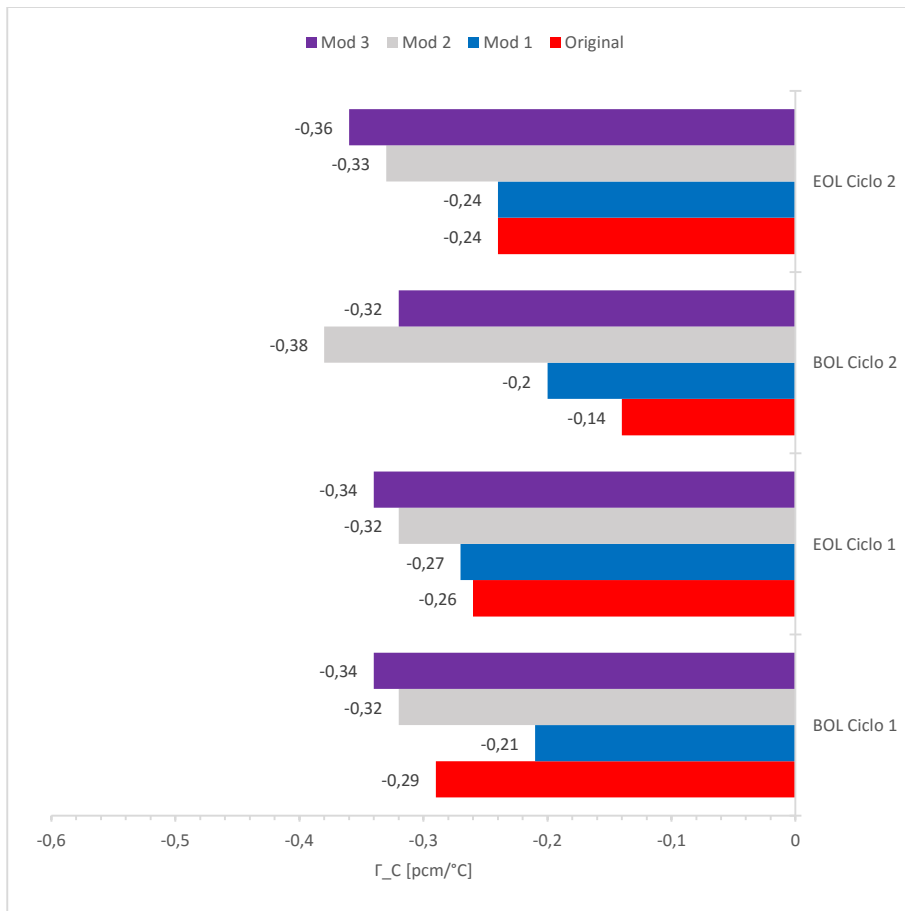


Figura 5-18. Comparação entre os coeficientes de temperatura do refletor para todos os modelos analisados.

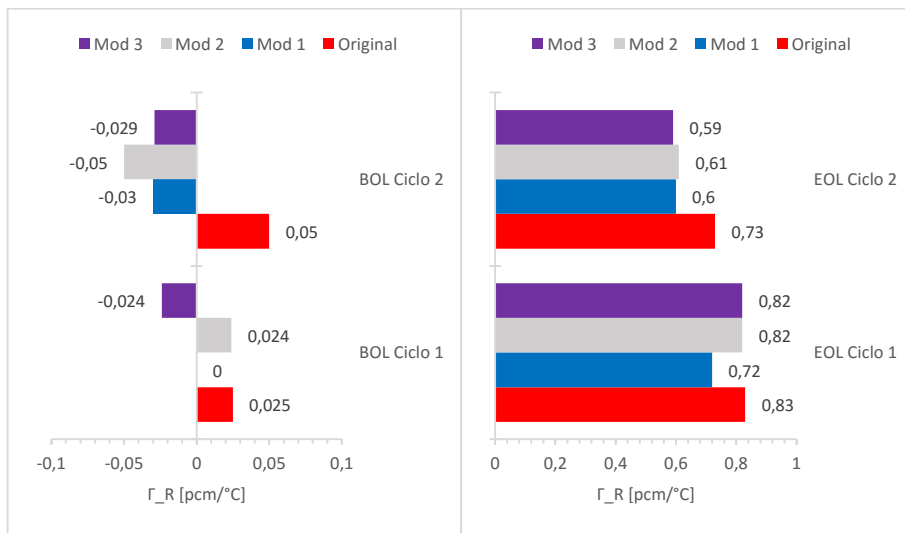
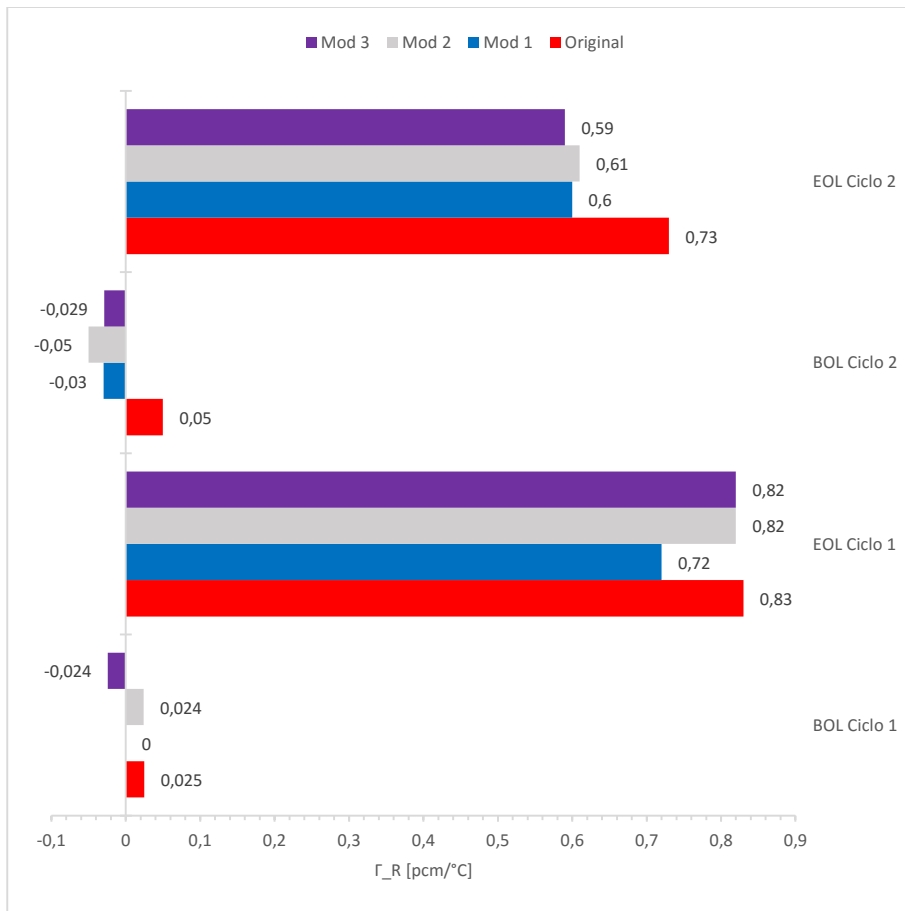


Figura 5-19. Comparação entre os coeficientes de temperatura do refrigerante para todos os modelos analisados.

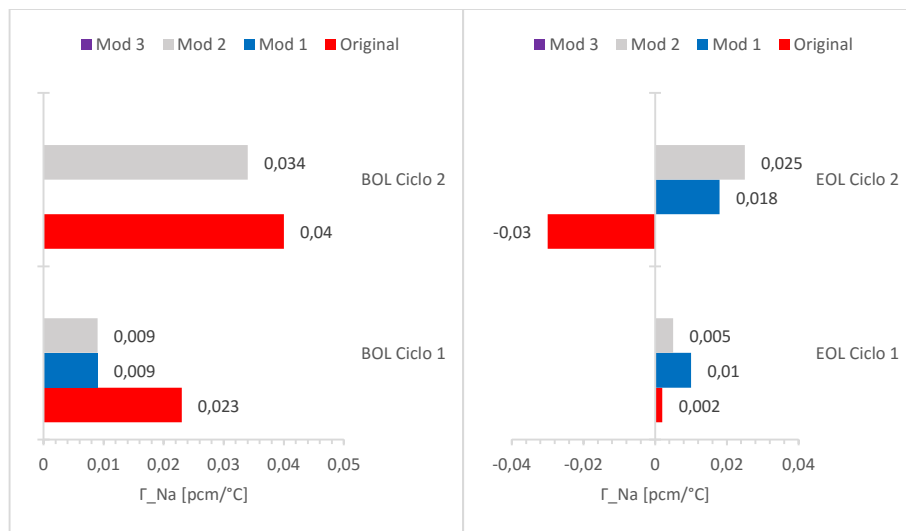
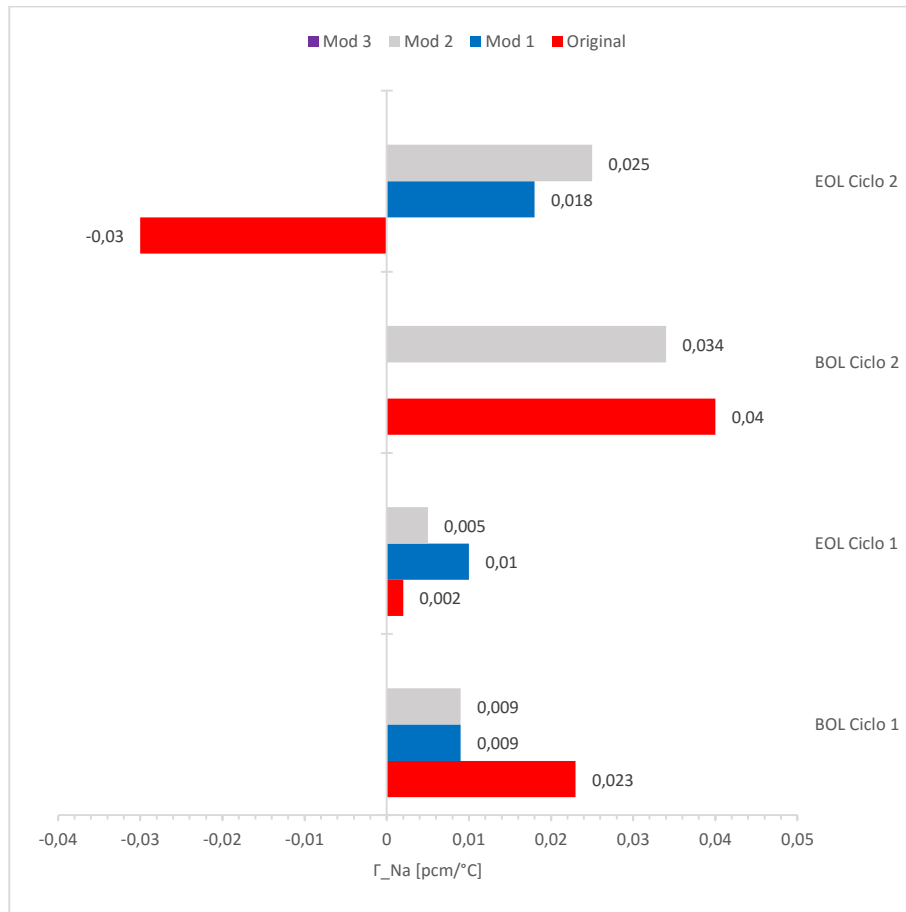
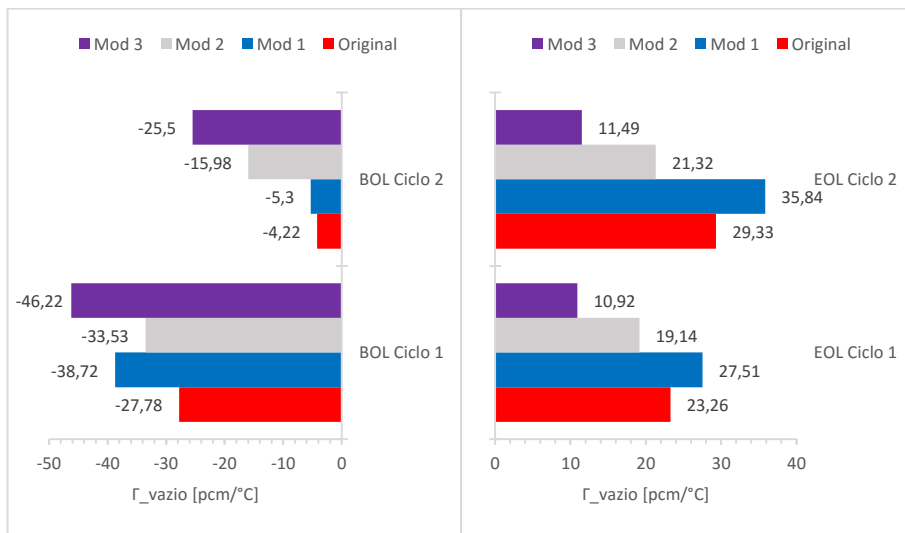
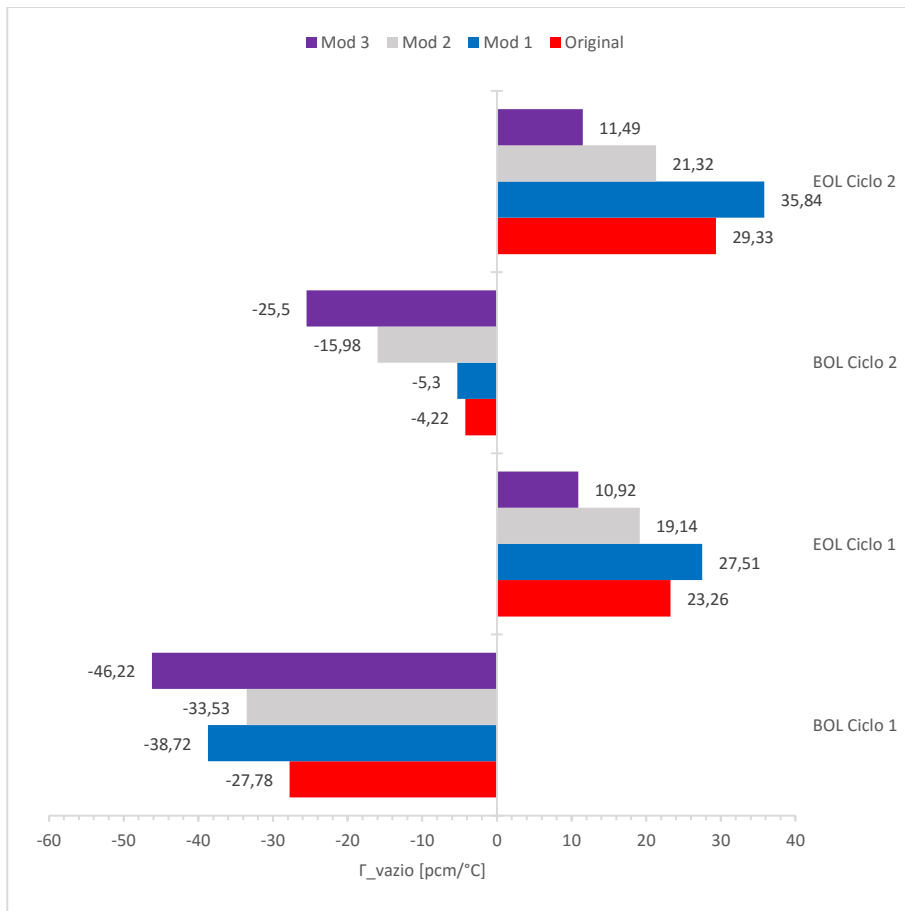


Figura 5-20. Comparação entre os coeficientes de vazio do refrigerante para todos os modelos analisados.



A Figura 5-21 mostra o valor de reatividade dos coeficientes analisados, para todos os modelos. Os valores são calculados para o intervalo de temperatura de 400 K a 1200 K ($\Delta T = 800\text{ K}$), que corresponde a redução da densidade do refrigerante de $0,9583\text{ g/cm}^3$ a $0,7357\text{ g/cm}^3$ ($\Delta\rho = 23\%$). Em termos gerais, em todos os cenários avaliados, há uma significativa redução do valor de reatividade associado a uma excursão de temperatura (causada por elevação da potência ou perda de refrigeração no núcleo), com as modificações executadas no modelo equivalente do *4S Reactor*. Os valores são mais significativos para o núcleo com redução da relação H/D o qual também incorpora as demais modificações.

A Figura 5-22 contabiliza a reatividade total, de forma simplificada, considerando somente os coeficientes analisados, são desconsiderando os demais coeficientes envolvidos na reatividade do núcleo como o coeficiente de expansão axial do combustível, coeficiente de potência e o coeficiente de expansão do núcleo. Em linhas gerais o valor de reatividade total é reduzido com a incorporação das modificações ao modelo.

A Mod 1, não acompanha o comportamento de redução de reatividade para as condições de final de ciclo de operação, em função da elevação do Γ_V pelos motivos já descritos.

Figura 5-21. Valor de reatividade dos principais coeficientes nucleares em função da queima e densidade do refrigerante, para os modelos analisados.

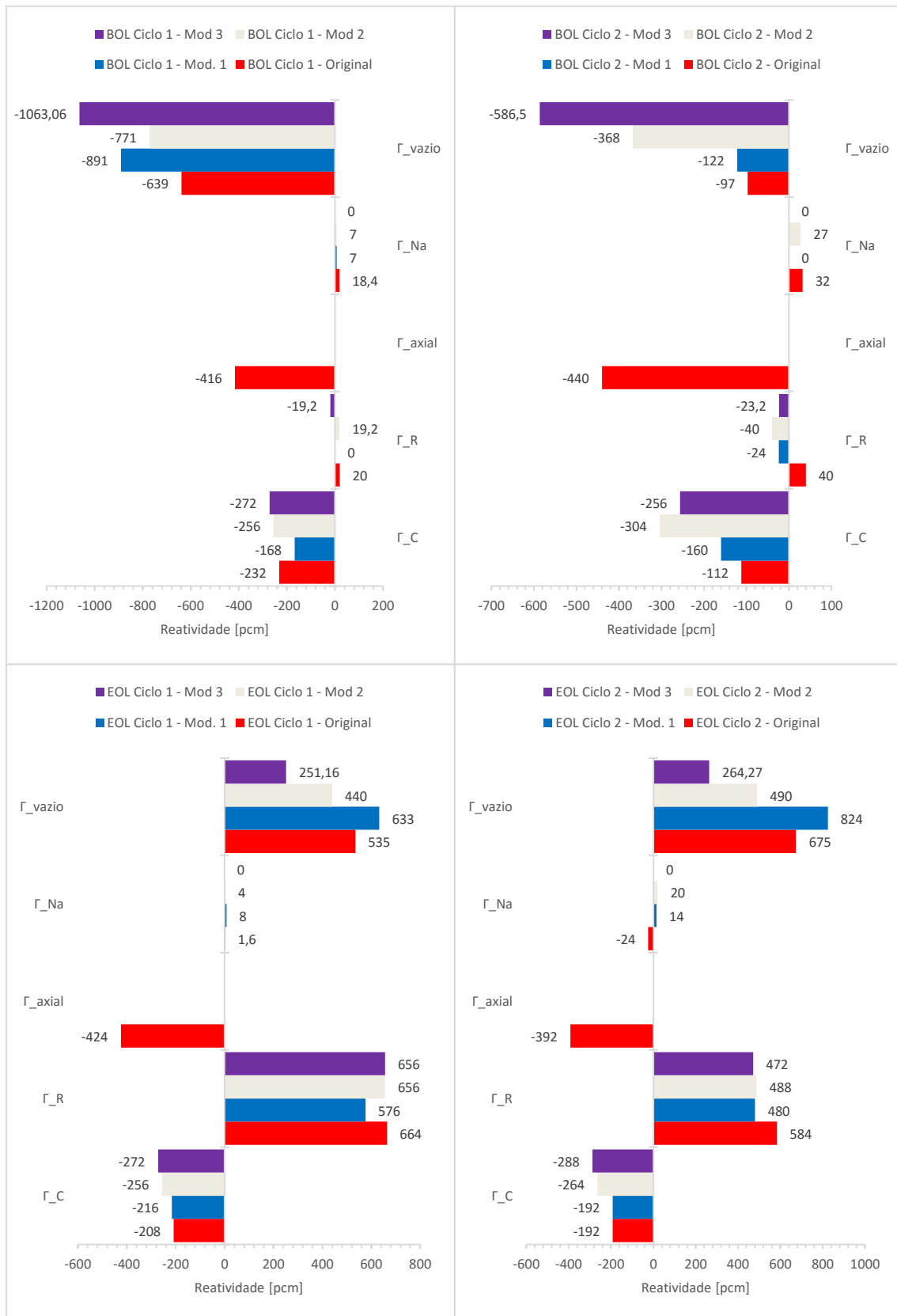


Figura 5-22. Valor de reatividade total associado aos nucleares analisados, para todos os modelos.

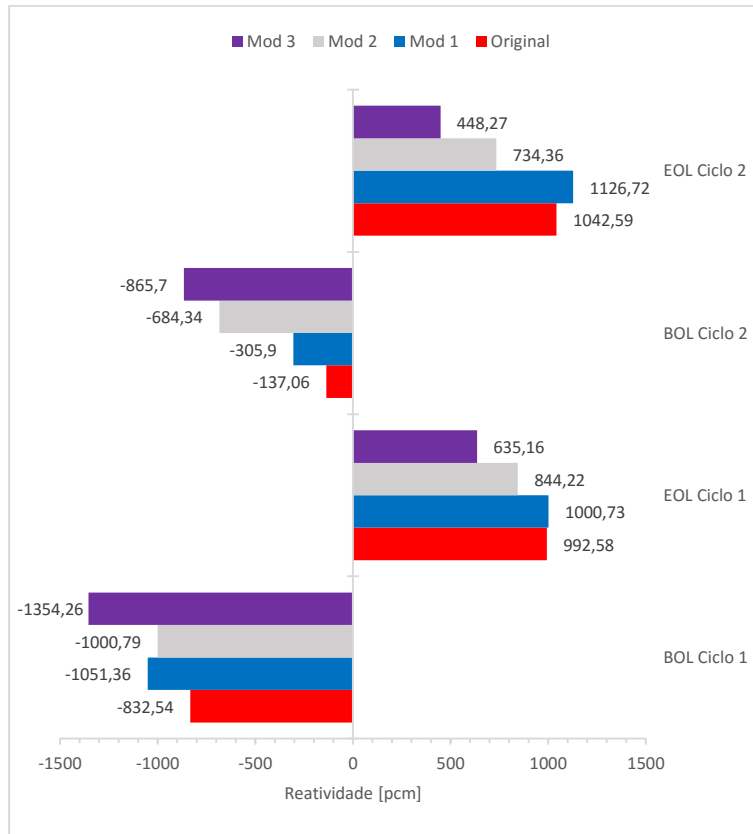


Tabela 5-10. Coeficientes de reatividade ao longo do ciclo, Mod. 1.

Parâmetros	BOL Ciclo 1 FPZ, Zero Xe	EOL Ciclo 1 QPP, Xe equilíbrio ¹	BOL Ciclo 2 FPZ, Zero Xe	EOL Ciclo 2 QPP, Xe equilíbrio
Coeficiente Temperatura Combustível Γ_C [pcm/K]	-0,21	-0,27	-0,20	-0,24
Coeficiente Temperatura Refletor Γ_R [pcm/K]	0,000	0,72	-0,03	0,60
Coeficiente Temperatura Refrigerante Γ_{Na} [pcm/K]	0,009	0,010		0,018
Coeficiente Vazio Refrigerante Γ_V [pcm/% Vazio]	-38,72	27,51	5,10	32,77

Tabela 5-11. Coeficientes de reatividade ao longo do ciclo, Mod 2.

Parâmetros	BOL Ciclo 1 FPZ, Zero Xe	EOL Ciclo 1 QPP, Xe equilíbrio ¹	BOL Ciclo 2 FPZ, Zero Xe	EOL Ciclo 2 QPP, Xe equilíbrio
Coeficiente Temperatura Combustível Γ_C [pcm/K]	-0,32	-0,32	-0,38	-0,33
Coeficiente Temperatura Refletor Γ_R [pcm/K]	-0,24	0,82	-0,05	0,61
Coeficiente Temperatura Refrigerante Γ_{Na} [pcm/K]	0,009	0,005	0,034	0,025
Coeficiente Vazio Refrigerante Γ_V [pcm/% Vazio]	-33,53	19,14	-15,98	21,32

Tabela 5-12. Coeficientes de reatividade ao longo do ciclo, Mod 3.

Parâmetros	BOL Ciclo 1 FPZ, Zero Xe	EOL Ciclo 1 QPP, Xe equilíbrio]	BOL Ciclo 2 FPZ, Zero Xe	EOL Ciclo 2 QPP, Xe equilíbrio
Coeficiente Temperatura Combustível Γ_C [pcm/K]	-0,34	-0,34	-0,32	-0,36
Coeficiente Temperatura Refletor Γ_R [pcm/K]	-0,024	0,82	-0,029	0,59
Coeficiente Temperatura Refrigerante Γ_{Na} [pcm/K]				
Coeficiente Vazio Refrigerante Γ_V [pcm/% Vazio]	-46,22	10,92	-25,50	11,49

Tabela 5-13. Variação nominal de reatividade ao longo do ciclo, Mod 1.

Parâmetros	BOL Ciclo 1 FPZ, zero Xe	EOL Ciclo 1 QPP, Xe equilíbrio	BOL Ciclo 2 FPZ, zero Xe	EOL Ciclo 2 QPP, Xe equilíbrio
$\Delta T_C (1200 - 400)K$ [pcm]	-232	-208	-114	-192
$\Delta T_R (1200 - 400)K$ [pcm]	20	664	40	588
$\Delta T_{Na} (1200 - 400)K$ [pcm]	18,4	2	36	-24
$\Delta \%_{VAZIO} (24 - 1)\%$ [pcm]	-639	602	-101	631

Tabela 5-14. Variação nominal de reatividade ao longo do ciclo, Mod 2.

Parâmetros	BOL Ciclo 1 FPZ, zero Xe	EOL Ciclo 1 QPP, Xe equilíbrio	BOL Ciclo 2 FPZ, zero Xe	EOL Ciclo 2 QPP, Xe equilíbrio
$\Delta T_C (1200 - 400)K$ [pcm]	-256	-256	-304	-264
$\Delta T_R (1200 - 400)K$ [pcm]	-192	656	-40	488
$\Delta T_{Na} (1200 - 400)K$ [pcm]	7	4	27	20
$\Delta \%_{VAZIO} (24 - 1)\%$ [pcm]	-771	440	-368	490

Tabela 5-15. Variação nominal de reatividade ao longo do ciclo, Mod 3.

Parâmetros	BOL Ciclo 1 FPZ, zero Xe	EOL Ciclo 1 QPP, Xe equilíbrio	BOL Ciclo 2 FPZ, zero Xe	EOL Ciclo 2 QPP, Xe equilíbrio
$\Delta T_C (1200 - 400)K$ [pcm]	-272	-272	-256	-288
$\Delta T_R (1200 - 400)K$ [pcm]	-19.2	656	-23.2	472
$\Delta T_{Na} (1200 - 400)K$ [pcm]				
$\Delta \%_{VAZIO} (24 - 1)\%$ [pcm]	-1063.06	251.16	-586.5	264.27

6. CONCLUSÕES

As análises demonstram que foi possível obter um resultado satisfatório na construção do modelo equivalente do *4S Reactor* a partir das informações disponíveis nas publicações sobre o tema. A resposta do modelo está consonante com o comportamento operacional esperado. O MCNPX foi capaz de simular adequadamente o *4S Reactor*, principalmente, suas características singulares de geometria e de operação, sendo possível obter os parâmetros neutrônicos apesar das limitações no código que tornam a obtenção dos resultados difícil e com alguma complexidade. Os parâmetros que envolvem o modelo não foram otimizados, contudo acreditamos que os resultados são válidos e espelham o comportamento do reator em diferentes situações operacionais.

A partir da caracterização do reator 4S, novos conceitos explorados na literatura foram incorporados através de modificações no modelo equivalente, sendo obtidos e analisados o comportamento da queima e evolução da composição do combustível, dos coeficientes de reatividade ao longo do ciclo, avaliação dos parâmetros de reatividade dos elementos de controle e desempenho do núcleo.

Os resultados mostram que em todos os cenários avaliados, o projeto do *4S Reactor* possui uma alta eficiência de queima do combustível atingindo valores de queima muito elevados e superiores aos dados divulgados na literatura. A geração de MAs é muito baixa, sendo quase exclusivamente de neptúnio, enquanto a geração de TRU é composta quase que na totalidade de plutônio principalmente isótopos físséis ^{239}Pu e ^{241}Pu , o que é um aspecto muito vantajoso em termos de gerenciamento do ciclo do combustível.

As análises demonstram que as modificações implementadas contribuem para a redução dos coeficientes de reatividade associados o reator, e possibilitam a melhoria dos parâmetros de segurança. As modificações também impactam no desempenho e devem assim ser avaliados em conjunto permitindo obter um arranjo mais favorável de operação. Os resultados demonstram que a despeito de um ótimo projeto, há ainda um enorme espaço para otimização do núcleo. Essas informações permitem remodelar o projeto do núcleo e do reator, conforme as características desejadas para parâmetros neutrônicos e de eficiência para o núcleo do reator. Um novo design de núcleo pode ser obtido possuindo características de operação mais favoráveis do que o projeto original do *4S Reactor*.

O trabalho se dedicou a avaliar apenas as características neutrônicas relacionadas ao *4S Reactor*, contudo a análise dos parâmetros termohidráulicos é essencial para o projeto do núcleo, e para definição das condições de contorno associadas aos limites operacionais e de segurança para o núcleo.

A utilização de varetas com moderador ao núcleo devem ser avaliadas com critério, uma vez que a sua inserção reduz o desempenho - burnup, extensão do ciclo e fator de conversão; contudo a sua inserção produz uma favorável redução dos coeficientes de temperatura do combustível e de vazio para o refrigerante.

Otimizações e análises ainda precisam ser avaliadas para a utilização do plenum axial de sódio e dos absorvedores periféricos ao núcleo.

Os resultados mostram que os coeficientes de segurança do núcleo são significativamente melhorados com a alteração da razão H/D do núcleo, entretanto a perda de desempenho com a redução da massa de combustível necessita de ser compensada para obtenção de núcleo ao menos com desempenho equivalente ao projeto original, e incorporando as melhorias nas características neutrônicas no modelo.

7. TRABALHOS FUTUROS

Neste ponto é possível afirmar que um novo modelo de núcleo pode ser proposto com características mais favoráveis do que as do modelo original do *4S Reactor*. Dois novos modelos podem ser propostos utilizando um núcleo mais plano (*flatness*), com menor razão H/D e incorporando absorvedores externos.

Utilizando um pouco de álgebra e usando a relação crítica para o laplaciano $B_m^2 = B_g^2$, na qual é considerando somente a variação do laplaciano geométrico com a redução da área ativa do núcleo (B_m^2 desconsiderado), afim de manter o mesmo valor de laplaciano para o modelo original e a modificação com a redução de altura, temos:

$$B_{g_1}^2 = B_{g_2}^2 \quad \text{Eq. (5.1)}$$

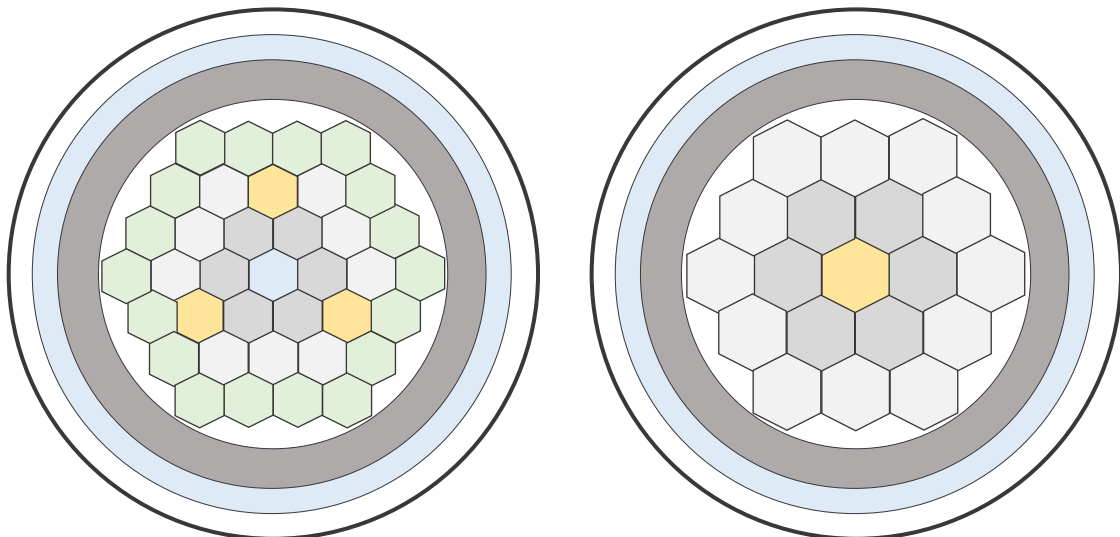
Em que $B_{g_1}^2$ representa o laplaciano geométrico do modelo original e $B_{g_2}^2$ o laplaciano geométrico do modelo com modificação da altura ativa do núcleo. O laplaciano geométrico para um núcleo com geometria cilíndrica é dado pela fórmula [14]:

$$B_g^2 = \left(\frac{\pi}{H}\right)^2 + \left(\frac{2,405}{R}\right)^2 \quad \text{Eq. (5.2)}$$

Sendo a altura H a área ativa do núcleo e R o raio interno do núcleo. Para o modelo original $H_1 = 2,5 \text{ m}$ e $R_1 = 0,665 \text{ m}$. Definindo a redução da altura da área ativa de combustível para $H_2 = 1,5 \text{ m}$, e utilizando a equação Eq. 5.2, é encontrado o valor para raio $R_2 = 0,75 \text{ m}$. Ou seja, desconsiderando B_m^2 , a redução da altura ativa H_1 pode ser compensada com o respectivo aumento do raio R_2 do núcleo. A princípio a manutenção do volume e massa de combustível, tem o potencial de inibir a perda de eficiência do núcleo através da redução do burnup e extensão do ciclo de queima com a redução da área ativa.

Dois modelos podem ser propostos incorporando os resultados obtidos neste trabalho:

Figura 7-1. Proposta de modificação do projeto original, Mod A (a direita) e Mod B (a esquerda).



Ambas as modificações Mod A e Mod B, mantêm o mesmo diâmetro do vaso externo, não alterando as características e disposição dos componentes interno do vaso do reator. O aumento do raio R_2 é compensado com redução da blindagem radial, incorporando o absorvedor radial, aço-borado (HT9-B₄C), em substituição ao feixes de aço HT9 utilizados no projetos original do *4S Reactor*. Os feixes de aço-borado permitem manter a funcionalidade do blindagem radial apesar da redução na espessura, que é proteger o vaso do reator do fluxo neutrônico.

A Mod A, reduz o diâmetro do EC, de pitch 25,9 cm para 19,8 cm incorporando uma terceira zona de combustível, e distribuindo de 1 subelemento central para 3 subelementos. O número de varetas combustíveis passa de 271 para 207 por EC. A modificação aumenta a complexidade no núcleo, entretanto permite maior flexibilidade no ajuste de enriquecimento dos elementos combustíveis, e na distribuição de potência no núcleo.

A Mod B, mantém a simplicidade do núcleo elevando o diâmetro do EC, de pitch 25,9 cm para 28,9 cm mantendo duas zonas de combustível e 1 subelemento central. O número de varetas combustíveis passa de 271 para 303 por EC. A modificação permite a maior simplicidade para operação e ajuste dos parâmetros, entretanto podem causar redução dos limites de operação devido a fatores de pico nas varetas combustíveis.

Em ambas as modificações são mantidos o volume de Na no núcleo, assim como o diâmetro das varetas combustíveis. Os modelos são apenas proposições considerando os resultados das análises realizadas, a sua viabilidade deve ser avaliada.

BIBLIOGRAFIA

1. IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Status of Small Reactor Designs Without On-Site Refuelling**. VIENNA, p. 870. 2007.
2. KAZUO ARIE, T. G. **4S Reactor, Super-Safe, Small and Simple**. [S.I.]. 2009.
3. NOBUYUKI UEDA, I. K. A. M. S. K. T. Y. A. S. M. SODIUM COOLED SMALL FAST LONG-LIFE REACTOR "4S". **Progress in Nuclear Energy**, v. 47, n. 1-4, p. 222-230, 2005.
4. TOSHIBA CORPORATION POWER SYSTEMS COMPANY. **Overview of fast reactor development of Toshiba – 4S and TRU burner**. ICAPP. Charlotte: [s.n.]. 2014.
5. TOSHIBA CORPORATION AND CENTRAL RESEARCH INSTITUTE OF ELECTRIC POWER INDUSTRY. **SUPER-SAFE, SMALL AND SIMPLE REACTOR (4S, TOSHIBA DESIGN)**. Japan. 2013.
6. YACOUT, A. M. **LONG-LIFE METALLIC FUEL FOR THE SUPER SAFE, SMALL AND SIMPLE (4S) REACTOR**. Nuclear Engineering Division. [S.I.]. 2008.
7. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY. **Monte Carlo N-Particle Transport Code System for Multiparticle and High Energy Applications**. [S.I.]. 2008.
8. LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY. **MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5**. [S.I.]. 2003.
9. LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY. **MCNPX User's Manual Version 2.6.0**. [S.I.]. 2008.
10. (ED.), D. G. C. **Handbook of Nuclear Engineering**. [S.I.]: Springer, v. I, 2010. 3642 p.
11. CREEP STUDIES ON U-7%ZR, U. A. U. R. U. A. Kaushik Ghoshal, T.R.G. Kutty, Sudhir Mishra, Arun Kumar. **Journal of Nuclear Materials**, v. 432, p. 20-22, 2013.
12. KAICHAO SUN, J. K. K. M. R. C. A neutronics study for improving the safety and performance parameters of a 3600 MWth Sodium-cooled Fast Reactor. **Annals of Nuclear Energy**, v. 53, p. 464-475, 2013.
13. KAZUMI IKEDA, R. A. K. H. M. S. K. Enhancing TRU burning and Am transmutation in Advanced Recycling Reactor. **Nuclear Engineering and Design**, v. 241, p. 1438-1453, 2011.
14. LAMARSH, J. R. **Introduction To Nuclear Reactor Theory**. 3. ed. [S.I.]: Addison-Wesley Publishing Company, 1983/2001.
15. JAMES J. DUDERSTADT, L. J. H. **Nuclear Reactor Analysis**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1976.

16. OECD/NEA. **Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles A Comparative Study** NUCLEAR ENERGY. OECD/NEA. Paris. 2002.
17. SILVA, C. A. M. D. Desenvolvimento de uma metodologia para simulação de reatores refrigerados a gás com propósito de transmutação. **Departamento de Engenharia Nuclear, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais**, Belo Horizonte, 2009.
18. HO JIN RYU, B. O. L. S. J. O. J. H. K. C. B. L. Performance of FCCI barrier foils for U–Zr–X metallic fuel. **Journal of Nuclear Materials**, v. 392, p. 206-212, 2009.
19. IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Advanced Reactor Technology Options for Utilization and Transmutation of Actinides in Spent Nuclear Fuel**. VIENNA. 2009.
20. R. OCHOA, M. V. F. Á.-V. F. M.-F. N. G.-H. D. C. A comparative study of Monte Carlo-coupled depletion codes applied to a Sodium Fast Reactor design loaded with minor actinides. **Annals of Nuclear Energy**, v. 577, p. 32-40, 2013.
21. E. FRIDMAN, E. S. Modeling of SFR cores with Serpent–DYN3D codes sequence. **Annals of Nuclear Energy**, v. 53, p. 354-363, 2013.
22. R. RACHAMIN, C. W. E. F. Neutronic analysis of SFR core with HELIOS-2, Serpent, and DYN3D codes. **Annals of Nuclear Energy**, v. 55, p. 194-204, 2013.
23. KENNETH S. ALLEN, T. W. K. C. M. R. J. Design of an equilibrium core 1000 MWt Sodium-Cooled Heterogeneous. **Nuclear Engineering and Design**, v. 242, p. 108-114, 2012.
24. KAMIL TUCEK, J. C. D. V. H. W. Comparative study of minor actinide transmutation in sodium and lead-cooled fast reactor cores. **Progress in Nuclear Energy**, v. 50, p. 382-388, 2008.
25. K. RUSSELL DEPRIEST, P. J. C. A. E. J. P. **Annular, MCNP/MCNPX Model of the Core Research Reactor**. Albuquerque. 2006.
26. MANDARANO, M. **Angra-2 / Ciclo 10, Core Design Report (CDR)**. Eletronuclear. Rio de Janeiro, p. 149. 2011. (BN/2/1151/11054).

ANEXO I

I.1 SUPER-SAFE, SMALL AND SIMPLE REACTOR, 4S

O 4S (*super-safe, small and simple*) é um pequeno reator refrigerado a sódio sem recarregamento em site, sendo desenvolvido como uma fonte de energia distribuída para aplicações multi-propósitos. O 4S tem sido desenvolvido em dois projetos, para carga de 30 MWt e 135MWt.

O projeto tem sido desenvolvido pela Toshiba Corporation e pelo *Central Research Institute of Electric Power Industry* – CRIEPI, Japão. O projeto faz parte do plano nacional de longo prazo do Japão para introdução *Sodium-Cooled Fast Breeder Reactors* – FBRs. Para este objetivo, o *Sodium Cooled Experimental Reactor JOYO*, tem sido construído e utilizado pela *Japan Atomic Agency* – JAEA, uma organização que combina o antigo *Japan Nuclear Cycle Development Institute* – JNC, e o *Japan Atomic Energy Research Institute* – JAERI, em 2005.

O protótipo FBR MONJU foi construído pelo antigo JNC para demonstrar a geração elétrica por FBRs e construir uma base de experiência suficiente com plantas refrigeradas a sódio, para futura comercialização. O ganho através do desenvolvimento de tecnologias através destas experiências foi o suporte base para o projeto do 4S como um reator refrigerado a sódio. A parte do protótipo FBR MONJU, outras pesquisas e desenvolvimentos (*Research & Development* - R&D) tem sido geradas para completar o projeto e demonstração FBR, patrocinadas por nove *utilites* Japonesas, *Electric Power development Co., Ltd.*, e o *Japan Atomic Power Company*. A R&D incluem o desenvolvimento de novos equipamentos para reatores refrigerados a sódio, como bombas eletromagnéticas de alta confiabilidade e tubos de duplo revestimento para uso em geradores de vapor com sistemas de detecção de fugas [5] [4].

Desde 2002, o CRIEPI, JAERI, *Osaka University*, e a *University of Tokyo* tem realizado R&D focada nas tecnologias do núcleo do reator 4S, combustível e Refletores, patrocinadas pelo Ministério Japonês da Educação, Cultura, Esportes, Ciências e Tecnologia. Experimentos críticos para o 4S tem sido gerados no *Fast Critical Assembly* - FCA em Tokai-mura. O *Argonne National Laboratory* – ANL e o *Idaho National Laboratory* – INL, têm desenvolvido a tecnologia do combustível metálico, o qual é uma peça crucial para se atingir as características desejadas do 4S. Outros experimentos com combustíveis metálicos têm sido adquiridos através da operação do EBR-II Reactor nos EUA. O projeto do 4S tem sido conduzido pela Toshiba, CRIEPI, Westinghouse Electric Company e ANL [4].

O *Encapsulated Nuclear Heat Source* - ENHS e *Secure Transportable Autonomous Reactor - Liquid Metal* - STAR-LM, são conceitos de SMR similares ao 4S [1] [4].

1.2. CONCEPÇÃO GERAL DO 4S REACTOR

A descrição aqui apresentada mostram apenas um *overview* do Design; as referências [1], [5], [4], [6] [3] [18], descrevem em maiores detalhes o projeto. O Anexo II apresenta os parâmetros de referência do 4S para comparativos.

Apesar de operar com o espectro de nêutrons rápidos, o 4S não é um *breeder reactor* não possuindo cobertor com urânio empobrecido ao redor do núcleo para absorção dos nêutrons de fuga. O 4S é projetado para operar sem recarregamento no site por um período superior a 30 anos. Refletores móveis ao redor do núcleo gradualmente se movem axialmente compensando a perda de reatividade por burnup do combustível ao longo do ciclo de operação. A Figura 1-1 e apresenta a visão de corte vertical do reator 4S.

O reator é do tipo piscina – *pool type (integral type)* com todos os componentes primários instalados dentro do vaso do reator (*Reactor Vessel - RV*). Os principais componentes primários são o Trocador de Calor Intermediário (*Intermediate Heat Exchanger – IHX*), bombas eletromagnéticas (*Electromagnetic Pump – EM*), refletores móveis que formam o sistema de controle de reatividade primária, a barra de desligamento central (*Ultimate Shutdown Rod*) é o backup para o desligamento, elementos de blindagem radial, placa de suporte do núcleo, módulos de admissão de refrigerante e elementos combustíveis, como ilustra a Figura 1-2.

O IHX é responsável pela transferência de calor do refrigerante de sódio ativado do primário para o loop de sódio secundário. As bombas eletromagnéticas do primário estão localizadas abaixo do IHX ligadas em série, consistem de duas unidades com arranjo em série assegurando redundância de circulação em caso de falha única. Uma cobertura de gás de argônio preenche a região entre a superfície do sódio primário e a parte inferior da tampa de blindagem. O vaso de proteção (*Guard Vessel – GV*) - Figura 1-3, provê um segundo limite do sódio do primário do lado externo do vaso do reator (*Reactor Vessel – RV*).

Para remoção do calor residual no desligamento do reator, dois sistemas passivos independentes são previstos o RVACS e IRACS. O RVACS é completamente passivo e remove o calor residual através da superfície do GV, utilizando circulação natural do ar. Não há válvulas, *dampers* ou dispositivos ativos no caminho do fluxo de ar, portando o RVACS está sempre em operação, mesmo quando operado em potência o IRACS remove o calor de decaimento via circuito secundário. Em condições normais de desligamento, o calor é removido por circulação forçada e convecção natural do ar, conectado à rede suplementar de alimentação elétrica. O IRACS também é capaz de atender aos requisitos de remoção de calor unicamente através de circulação natural por ambos ar e sódio em caso de acidentes postulados.

O reator opera com dois sistemas independentes de desligamento. O sistema primário de desligamento é fornecido pela queda de vários setores do refletor, e o sistema de backup provê a inserção, queda, da barra de desligamento central.

O núcleo é projetado para eliminar a necessidade de recarregamento durante o tempo de extensão do ciclo, aproximadamente 30 anos, tendo todos os coeficientes de temperatura negativos ou próximos de zero. O controle de reatividade é executado pela movimentação dos refletores móveis, compensando o burnup até atingirem toda a extensão ativa do núcleo. Para

possibilitar a maior extensão do ciclo de queima, o núcleo contém um absorvedor fixo central que é removido após o término da reatividade do núcleo, atingida a posição superior do refletor, próximo a metade do ciclo. Após a remoção do absorvedor, se inicia a segunda parte do ciclo de queima com novamente a compensação do *burnup* com a elevação dos refletores móveis.

I.3. COMBUSTÍVEL

O projeto do combustível do 4S é baseado na liga metálica binária U-10Zr, com revestimento da vareta combustível em aço HT9. Em geral, combustíveis metálicos consistem de liga base de urânio com Pu ou outros elementos ligantes (i.e. Zr ou Mo), possuindo número favorável de características que permitam o melhoramento dos aspectos físicos e químicos do combustível, como melhoria da performance térmica, aumento da temperatura de fusão, maior condutividade térmica, e mais favoráveis características relacionadas a segurança, como melhoria da integridade estrutural, menor migração de produtos de fissão e redução da interação entre combustível e o revestimento [6].

O combustível metálico é considerado o futuro dos SRFs devido ao seu alto potencial de regeneração, em função da alta densidade atômica do combustível metálico, espectro endurecido e fácil fabricação. Combustíveis metálicos favorecem os métodos avançados de reprocessamento como o método pirometalúrgico. Comparado às demais alternativas, combustíveis óxidos, carbetos, e nitretos, os combustíveis metálicos possuem a mais alta densidade de massa, alta condutividade térmica e maior potencial de regeneração¹¹. A característica vantajosa do combustível metálico é a condutividade térmica, o qual resulta em menor temperatura, menor coeficiente de reatividade e conseqüentemente menor oscilação de reatividade no *burnup*, alto coeficiente de expansão axial e alto coeficiente de realimentação negativa de reatividade. Entretanto, o trabalho exercido pela reatividade de vazio do sódio é mais elevado em núcleos com combustível metálico. A elevação da segurança é obtida através da baixa temperatura do combustível e da realimentação de reatividade devido forte expansão axial do combustível, o que faz com que a segurança do núcleo com combustível metálico seja obtida ainda que o valor do coeficiente de vazio do sódio seja alto. A baixa temperatura de operação, ainda que não seja favorável do ponto de vista de eficiência termodinâmica, leva a uma alta margem de vazio para o sódio. Outras medidas de projeto que podem ser consideradas em direção a minimizar o efeito de reatividade de vazio do sódio são o uso de um sódio plenum no lugar do cobertor axial e a redução a fração de volume do sódio núcleo [10].

Em geral, o ponto de fusão de ligas binárias é inferior e também há a formação de compostos eutéticos com o material de revestimento a uma temperatura inferior. Para contornar essas características, normalmente Zr é adicionado em pequenas quantidades a liga, ou na forma de revestimento de sacrifício ao redor do combustível. O zircônio também melhora a compatibilidade química entre o combustível e o aço austenítico do revestimento, suprimindo

¹¹ Em *Handbook of Nuclear Engineering* [10], Capítulo 21, é apresentada uma abordagem abrangente entre as principais propostas de combustíveis para uso em FR.

a inter-difusão de compostos do combustível no revestimento. Entretanto a adição de Zr reduz a relação de regeneração.

Como parte do U.S. *Integral Fast Reactor Program* – IFR que estendeu de 1984 a 1994, acima de 16.000 varetas com combustível binário U-10Zr foram irradiadas no *Experimental Breeder Reactor-H* – EBR-II. Também foram irradiados no EBR-II neste período mais de 600 varetas experimentais de U-xPu-Zr. Em adição, acima de 800 varetas binárias de U-10Zr foram irradiadas no *Fast Flux Test Facility* – FFTF durante os finais dos anos de 1980 e início de 1990 como parte do plano de conversão do núcleo do FFTF de combustível óxido para combustível metálico. Todos os pinos irradiados com revestimento de HT9 completaram a irradiação nos dois reatores com *burnups* acima de 20% do limite operacional, sem ruptura do revestimento. Várias configurações experimentais para investigar certos aspectos de fabricação com a indução de defeitos foram executados, sendo identificados e corrigidos no decorrer do programa. Esta larga base de dados experimentais provê uma base estatística sólida de dados que cobre um largo range de condições operacionais, e fornece um case de confiabilidade deste combustível para uso em sistemas de reatores rápidos como o 4S Reactor.

A Figura I.5 mostra o elemento e vareta combustível do 4S. A vareta combustível consiste do combustível envolvido por revestimento de aço inox austenítico HT9, com um largo volume de plenum no topo da *slug* (tarugo) de combustível que acomoda os gases liberados de fissão. Um preenchimento de sódio ("*sodium bond*") entre o combustível *slug* e o revestimento melhora a transferência de calor do combustível ao revestimento. A vareta possui 2,5 metros de comprimento ativo, composto de várias *slug fuel* empilhados verticalmente. A porção do plenum possui quase o mesmo comprimento da área ativa, o revestimento em aço HT9 com *smear density* ~78% (relação entre a área de combustível e a área total combustível mais gap).

Figura I-1. Seção de corte vertical do Reator 4S (Dan G. Cacuci, 2010, [6]).



Figura I-2. Seção de corte vertical com descrição dos principais componentes do reator 4S, 150 W_t (Dan G. Cacuci, 2010, [6]).

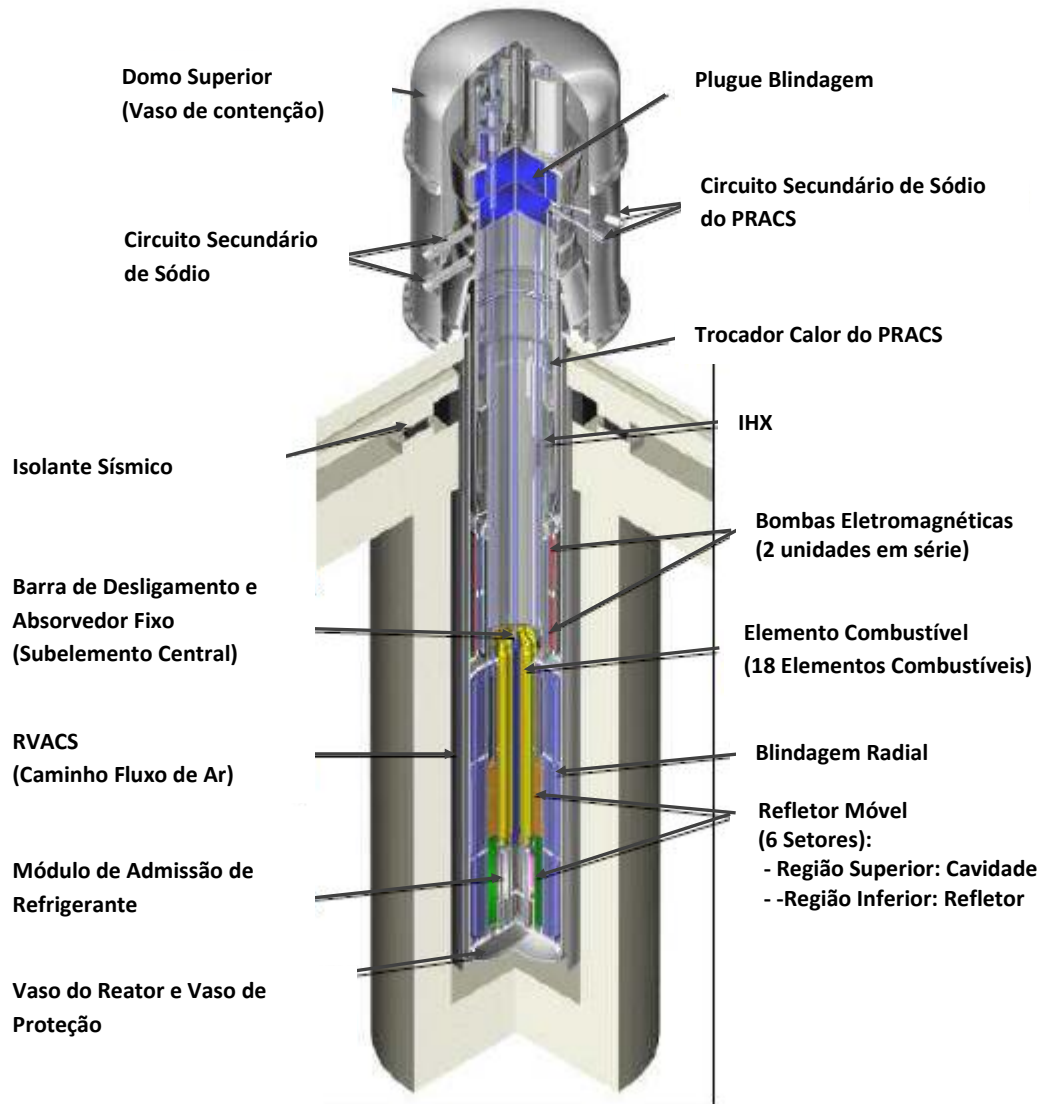


Figura I-3. Seção de corte vertical do Vaso de Proteção - *Guard Vessel* (Dan G. Cacuci, 2010, [6]).

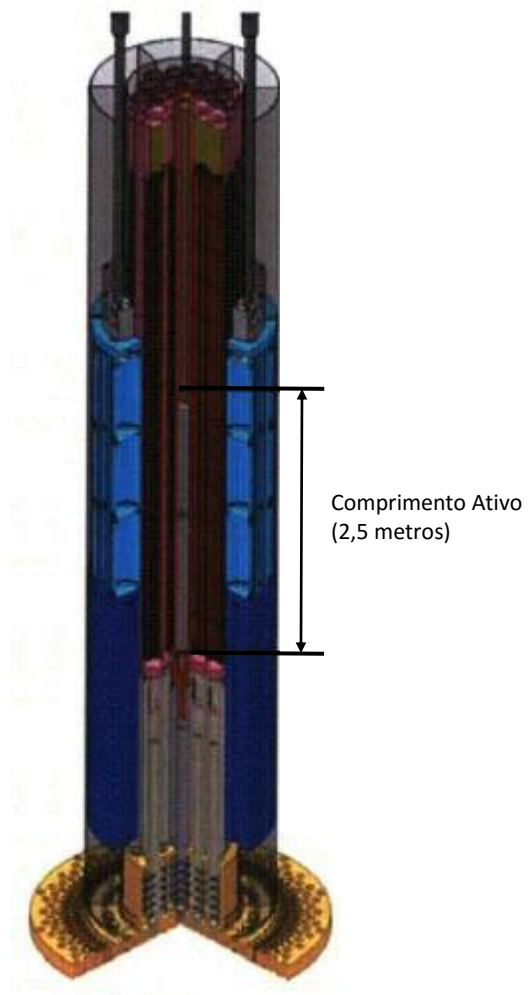


Figura I-4. Seção de Corte Radial do Reator 4S (Dan G. Cacuci, 2010, [6]).

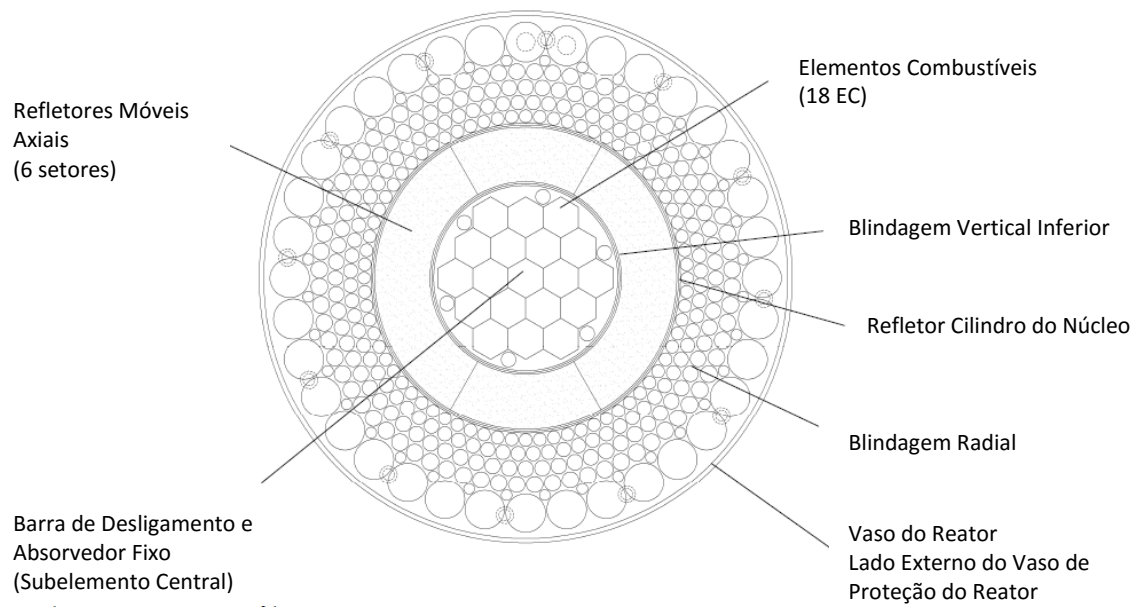
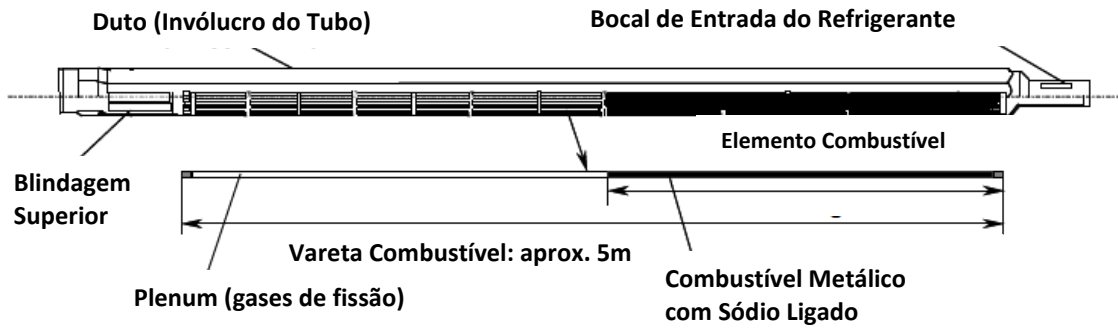


Figura I-5. Elemento combustível do Reator 4S (Dan G. Cacuci, 2010, [6]).



ANEXO II

Tabela II-16. Características principais de operação e projeto do 4S [4].

ATRIBUTOS	PARTICULARIDADES DE PROJETO	
Classificação térmica	30 MWth	135 MWth
Saída elétrica	10 MWe	50 MWe
Modo de operação	Carga de Base ou seguidor de Carga	
Fator de carga	> 95%	
Tipo Reator	Tipo piscina (tipo integral)	
Material Combustível	Combustível metálico (liga U-Zr) baseado em urânio enriquecido	
Refrigerante	Sódio	
Espectro de energia dos nêutrons	Rápido	
Tempo de vida do núcleo	30 anos	
Sistema de Controle Reatividade	Refletores móveis axiais / Absorvedores Fixos	
Tipo refletor	Tipo cilíndrico dividido em 6 setores	
Sistema de desligamento primário	Refletor móvel axial de 6 setores	
Sistema de desligamento segurança	1 Barra de desligamento final	
Sistema desligamento inerente	Características inerentes baseadas em realimentação de reatividade	
Tipo bomba do primário	2 bombas eletromagnéticas em série	
Diâmetro do vaso do reator	Aproximadamente 2,8 m	Aproximadamente 3,6 m
Sistema de remoção de calor residual (1)	Sistema de resfriamento auxiliar do vaso do reator (RVACS)	
Sistema de remoção de calor residual (2)	Sistema de resfriamento auxiliar intermediário do reator (IRACS)	Sistema de resfriamento auxiliar primário do reator (PRACS)
Fronteira para o sódio do primário	Dupla fronteira: vaso do reator e vaso de proteção	
Sistema de contenção	1 Circuito de Sódio: transporte de calor através do trocador de calor intermediário (IHx) para o gerador de vapor (SG)	
Tipo de bomba do secundário	Bomba Eletromagnética	
Número de geradores de vapor	1	
Tipo de gerador de vapor	Tipo Helicoidal	
Tipo de tubo no gerador de vapor	Tubos de parede dupla com sistema de detecção de fugas	

Tabela II-17. Características Físicas-Neutrônicas do 4S [4].

Saída Elétrica, MWe	10	50
Número de zonas enriquecidas com urânio	2 (interna / externa)	2 (interna / externa)
Enriquecimento de urânio (% do peso)	17.0 / 19.0	12.0 / 18.0
Taxa de calor linear médio (W/cm)	39	110
Taxa de conversão	0.45	0.53
Burnup médio (GWd/THM)	34	90
Balanço de reatividade do burnup (% dk/kk')	5.5	10
Reatividade de vazio do refrigerante (% dk/kk')	-0.4	0

Tabela II-18. Principais Parâmetros do Núcleo e Combustível do 4S [4].

Atributos	Particularidades de Projeto	
Classificação Térmica	10 MWe	50 MWe
Altura ativa do núcleo	2,5 m	2,5 m
Diâmetro equivalente do núcleo	0,95 m	1,2 m
Configuração do Núcleo	Forma Cilíndrica	
Número de Elementos combustíveis	18	
Tipo de Elemento Combustível	Seção Hexagonal	
Número de varetas por Elemento Comb.	169	271
Passo do arranjo (<i>pitch</i>) Elemento Comb.	206 mm	259 mm

Tabela II-19. Características Termohidráulicas do 4S [10].

Potência Elétrica, MWe	10	50
Circulação Primária: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Operação Normal ▪ <i>Unprotected loss of flow</i> (ULOF) 	Circulação Forçada (2 Bombas EM em série) Fluxo com movimento de inercia com circulação natural	
Sistema Refrigeração primária: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura refrigerante ▪ Pressão ▪ Perda pressão no EC ▪ Fluxo Refrigerante 	355°/510°C (entrada / saída) 0,3MPa Inferior a 0.1 MPa 152 kg/s	355°/510°C (entrada / saída) 0,3MPa Inferior a 0.2 MPa 152 kg/s
Máxima Temperatura no Revestimento	650°C ponto quente	
Sistema de Refrigeração secundário: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura refrigerante ▪ Pressão ▪ Fluxo Refrigerante 	310°/485°C 0,55MPa 134 kg/s	
Sistema água / vapor: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura refrigerante ▪ Pressão 	210°/453°C 10,5 MPa	

Tabela II-20. Balanço de massa do combustível do 4S [10].

Potência Elétrica, MWe	Unidade	10	50
Inventário de U	tons	9,23	16,2
Inventário Físsil ²³⁵ U	tons	1,69	2,58
Fluxo anual médio:			
▪ Metais pesados (U)	Kg/ano	308	539
▪ Materiais Físseis (²³⁵ U)	Kg/ano	56	86
Fluxo anual médio por MWe:			
▪ Metais pesados (U)	Kg/ano/MWe	31	11
▪ Materiais Físseis (²³⁵ U)	Kg/ano/MWe	6	2
Burnup médio	GWd/THM	34	90
Inventário de materiais após 30 anos:			
▪ Metais pesados totais	tons	8,90	14,7
▪ U	tons	8,75	14,1
▪ ²³⁵ U	tons	1,36	1,36
▪ Pu	tons	0,15	0,65
▪ MA	kg	2	17

