

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

Fidélis Bitencourt Gonzaga Louzada e Estanislau

**Inserção do ciclo do tório e combustíveis reprocessados em reatores de água  
pressurizada no sistema energético nacional**

Belo Horizonte

2023

Fidéllis Bitencourt Gonzaga Louzada e Estanislau

**Inserção do ciclo do tório e combustíveis reprocessados em reatores de água  
pressurizada no sistema energético nacional**

**Tese**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciências e Técnicas Nucleares

Área de Concentração: Engenharia Nuclear e da Energia

Orientadora: Profa. Dra. Antonella Lombardi Costa

Coorientadora: Profa. Dra. Cláudia Pereira B. Lima

Belo Horizonte

2023

E79i

Estanislau, Fidélis Bitencourt Gonzaga Louzada e.

Inserção do ciclo do tório e combustíveis reprocessados em reatores de água pressurizada no sistema energético nacional [recurso eletrônico] / Fidélis Bitencourt Gonzaga Louzada e Estanislau. -2023.

1 recurso online (109 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Antonella Lombardi Costa.

Coorientador: Cláudia Pereira Bezerra Lima.

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

Anexos: f. 92-109.

Bibliografia: f. 83-91.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia nuclear - Teses. 2. Combustíveis nucleares. 3. Reatores nucleares - Teses. 4. Reatores de água pressurizada. I. Costa, Antonella Lombardi. II. Lima, Cláudia Pereira Bezerra. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.039(043)



## FOLHA DE APROVAÇÃO

### **INSERÇÃO DO CICLO DO TÓRIO E COMBUSTÍVEIS REPROCESSADOS EM REATORES DE ÁGUA PRESSURIZADA NO SISTEMA ENERGÉTICO NACIONAL**

### **FIDÉLLIS BITENCOURT GONZAGA LOUZADA E ESTANISLAU**

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

Aprovada em 27 de fevereiro de 2023, pela banca constituída pelos membros:

Prof(a). Antonella Lombardi Costa - Orientadora  
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof(a). Cláudia Pereira Bezerra Lima - Coorientadora  
Universidade Federal de Minas Gerais

Dra. Maritza Rodriguez Gual  
Amazônia Azul Tecnologias de Defesa S.A

Prof. Gustavo Nikolaus Pinto de Moura  
Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Carlos Eduardo Velasquez Cabrera  
Universidade Federal de Minas Gerais

  
Prof. Dr. Giovanni Laranjo de Stefani  
IME - Instituto Politécnico - UFRRJ  
16679-1200333

Prof. Giovanni Laranjo de Stefani  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Belo Horizonte, 27 de fevereiro de 2023.

## AGRADECIMENTOS

Deixo minha gratidão à Professora Antonella Lombardi Costa e à Professora Cláudia Pereira pelo apreço, orientação e liberdade no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também ao amigo e Professor Carlos Eduardo Velasquez, por todo apoio, trabalhos em conjunto e convivência para além dos portões da Universidade. A todos os Mestres que desde a minha graduação me incentivaram a percorrer o caminho da academia, em especial ao Professor Antonio Francisco Neto e à Professora Auxiliadora Maria Moura Santi. Ao DEN/UFMG e a todos os Professores que contribuíram para a minha formação. Aos amigos do DEN/UFMG pelas conversas, cafés, momentos de lazer e entretenimento e inúmeras contribuições para a realização deste trabalho. Aos demais amigos que sempre participaram das alegrias e frustrações da vida acadêmica. Aos meus pais e a minha irmã pelo apoio sempre incondicional. Às agências de fomento que permitem que a pesquisa e desenvolvimento científico aconteça no Brasil, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), e em especial à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), pela concessão da bolsa de doutorado e pelo apoio financeiro necessário.

**“Nada na vida deve ser temido, somente compreendido.  
Agora é hora de compreender mais  
para temer menos.”**

**Marie Curie**

## RESUMO

Como resposta à ameaça do aquecimento global e das mudanças climáticas, os sistemas de energia de forma geral estão mudando. A energia nuclear figura, cada vez mais, como uma importante opção na matriz energética global devido às suas características de baixo carbono, e ciclos do combustível alternativos poderiam contribuir com a redução do uso de recursos naturais, no gerenciamento de rejeitos e na redução das emissões de gases de efeito estufa. Dado o contexto, esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar e comparar a utilização de ciclos de combustíveis nucleares alternativos em reatores de água pressurizada baseados no sistema de energia nuclear brasileiro por meio de indicadores que avaliem, simultaneamente, os *trade-offs* entre fatores de consumo de recursos naturais, desempenho do ciclo do combustível e custos do combustível. A avaliação dos ciclos dos combustíveis é feita por meio do modelo MESSAGE e a comparação entre eles é realizada através de uma análise multicritério com o uso da ferramenta KIND-ET para determinar os melhores cenários. Resultados da avaliação mostram o consumo de recursos naturais, acúmulo ou utilização do combustível queimado, necessidades de processos, rejeitos nucleares, emissões de gases de efeito estufa e custos dos combustíveis nucleares. Os combustíveis reprocessados apresentam tendências de menores necessidades de extração de recursos naturais, menores quantidades de combustível queimado e rejeitos gerados com características que os tornam mais interessantes ao serem gerenciados, além de menores emissões de gases de efeito estufa. Já os ciclos abertos de combustível apresentam menores custos, garantindo maior viabilidade econômica. Dentro das premissas adotadas, o combustível de óxido misto de urânio e plutônio, MOX, aparece como o mais promissor. Por outro lado, as análises de sensibilidade realizadas para capturar as incertezas mostram que caso os custos tenham uma importância maior que 55% para as decisões sobre a escolha do ciclo do combustível, o combustível convencional UOX aparece como o mais vantajoso. Combustíveis transurânicos têm destaques intermediários e ainda podem ser opções dependendo das intenções dos tomadores de decisão.

Palavras-chave: ciclo do combustível nuclear, combustíveis alternativos, análise multicritério, MESSAGE, KIND-ET

## ABSTRACT

In response to the threat of global warming and climate change, the energy systems are changing. Nuclear energy is increasingly becoming an important option in the global energy matrix due to its low carbon characteristics and alternative fuel cycles could contribute to reducing the use of natural resources, managing waste and reducing greenhouse gas emissions. Given the context, this research proposes to evaluate and compare the use of alternative nuclear fuel cycles in pressurized water reactors based on the Brazilian nuclear energy system through indicators that simultaneously evaluate the trade-offs between aspects of natural resources consumption, fuel cycle performance and fuel costs. The evaluation of the fuel cycles is done using the MESSAGE model and the comparison between them is performed through a multicriteria analysis using the KIND-ET tool to determine the best scenarios. Assessment results show consumption of natural resources, accumulation or use of spent fuel, requirements of processes, nuclear waste, greenhouse gas emissions and costs of nuclear fuels. Reprocessed fuels tend to have fewer needs for extracting natural resources, lower amounts of spent fuel and waste generated with characteristics that make them more interesting to manage, in addition to lower greenhouse gas emissions. Open fuel cycles, on the other hand, have lower costs, ensuring greater economic viability. Within the adopted assumptions, the mixed oxide fuel, MOX, appears as the most promising. On the other hand, the sensitivity analysis carried out to capture the uncertainties shows that if costs have an importance greater than 55% for the decisions on the choice of the fuel cycle, the conventional fuel UOX appears as the most advantageous. Transuranic fuels have intermediate highlights and may still be options depending on the decision-makers intentions.

Keywords: nuclear fuel cycle, alternative fuels, multi-criteria analysis, MESSAGE, KIND-ET



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo aberto do combustível UOX [29] .....	23
Figura 2. Radiotoxicidade de um combustível queimado de um PWR e seus componentes. Adaptado de [7, 34].....	24
Figura 3. Ciclo fechado. Adaptado de [29] .....	26
Figura 4. Ciclo Th-232/U-233 [7] .....	28
Figura 5. Ciclo U-238/Pu-239 [7].....	28
Figura 6. Redução da radiotoxicidade com o tempo. Adaptado de [43] .....	31
Figura 7. Principais entradas e saídas do MESSAGE. Adaptado de [56] .....	36
Figura 8. Árvore de objetivos do KIND-ET. Adaptado de [66] .....	41
Figura 9. Esquema da análise realizada [Elaboração própria] .....	42
Figura 10. Estrutura da árvore de objetivos [Elaboração própria] .....	46
Figura 11. Esquema do ciclo do combustível UOX [Elaboração própria] .....	48
Figura 12. Esquema do ciclo do combustível MOX [Elaboração própria].....	49
Figura 13. Esquema do ciclo do combustível TRU-Th [Elaboração própria] .....	51
Figura 14. Esquema do ciclo do combustível TRU-U [Elaboração própria].....	52
Figura 15. Esquema do ciclo do combustível Th-U [Elaboração própria].....	53
Figura 16. Oferta de eletricidade do sistema de energia nuclear [Elaboração própria] .....	57
Figura 17. Consumo acumulado de recursos naturais [Elaboração própria] .....	59
Figura 18. Requisitos anuais de conversão de urânio [Elaboração própria] .....	60
Figura 19. Requisitos de SWU para enriquecimento [Elaboração própria] .....	61
Figura 20. Requisitos anuais de reprocessamento [Elaboração própria] .....	62
Figura 21. Inventários de urânio empobrecido [Elaboração própria].....	64
Figura 22. Consumo acumulado de combustível queimado [Elaboração própria].....	66
Figura 23. Rejeitos gerados no reprocessamento [Elaboração própria].....	66

Figura 24. Combustível queimado produzido [Elaboração própria].....	68
Figura 25. Redução de UOX queimado externo ao ciclo do combustível [Elaboração própria] .....	69
Figura 26. Despesas anuais com o ciclo do combustível: (a) Th-U; (b) TRU-Th; (c) TRU-U; (d) MOX; (e) UOX [Elaboração própria] .....	72
Figura 27. Custo nivelado do combustível para o período de 2019 a 2060 [Elaboração própria] .....	74
Figura 28. Desempenho dos ciclos do combustível conforme indicadores [Elaboração própria] .....	75
Figura 29. <i>Ranking</i> para os ciclos dos combustíveis usando a ferramenta KIND-ET [Elaboração própria] .....	77
Figura 30. Pontuações detalhadas para os ciclos dos combustíveis: (a) Objetivos de alto nível; (b) Áreas de avaliação [Elaboração própria] .....	77
Figura 31. Análise de sensibilidade realizada variando os fatores de ponderação de consumo [Elaboração própria].....	78
Figura 32. Análise de sensibilidade realizada variando os fatores de ponderação de desempenho [Elaboração própria] .....	79
Figura 33. Análise de sensibilidade realizada variando os fatores de ponderação de custo [Elaboração própria] .....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Reservas de tório e de urânio por país (2016) [39] .....	27
Tabela 2. Capacidade de reprocessamento comercial no mundo (toneladas/ano). Adaptado de [35] .....	30
Tabela 3. Matriz de avaliação de decisão multicritério por soma ponderada [64] .....	38
Tabela 4. Características técnicas e econômicas dos reatores [68, 70-73] .....	43
Tabela 5. Características gerais dos ciclos do combustível analisados [15, 16, 36, 37] .....	47
Tabela 6. Dados econômicos referentes ao combustível UOX [25, 30, 76] .....	48
Tabela 7. Composição do combustível UOX queimado [16, 17] .....	49
Tabela 8. Percentual recuperado após reprocessamento por PUREX [Elaboração própria] .....	50
Tabela 9. Percentual recuperado após reprocessamento por UREX+ [Elaboração própria] .....	50
Tabela 10. Emissões de GEE para ciclos aberto e fechado do combustível. Adaptado de [42] .....	55
Tabela 11. Pesos para a matriz de multicritério de soma ponderada [Elaboração própria] .....	56
Tabela 12. Matriz de decisão multicritério de soma ponderada para as emissões de GEE .....	70
Tabela 13. Fatores de ponderação [Elaboração própria] .....	74
Tabela 14. Oferta de eletricidade do sistema de energia nuclear (MW) .....	92
Tabela 15. Consumo acumulado de recursos naturais (t) .....	93
Tabela 16. Requisitos anuais de conversão de urânio (t) .....	94
Tabela 17. Requisitos anuais de SWU para enriquecimento (t) .....	95
Tabela 18. Requisitos anuais de combustível fresco - por tipo (t) .....	96
Tabela 19. Requisitos anuais de reprocessamento (t) .....	97
Tabela 20. Inventário acumulado de urânio empobrecido (t) .....	98

Tabela 21. Consumo acumulado de combustível queimado (t).....	99
Tabela 22. Acumulado de rejeitos gerados no reprocessamento (t) .....	100
Tabela 23. Quantidade de combustível queimado produzido - por tipo de combustível (t).....	101
Tabela 24. Redução de UOX queimado externo ao ciclo do combustível (t) .....	102
Tabela 25. Custos anuais com o ciclo do combustível Th-U (milhões de dólares)..	103
Tabela 26. Custos anuais com o ciclo do combustível TRU-Th (milhões de dólares) .....	104
Tabela 27. Custos anuais com o ciclo do combustível TRU-U (milhões de dólares) .....	105
Tabela 28. Custos anuais com o ciclo do combustível MOX (milhões de dólares) .	106
Tabela 29. Custos anuais com o ciclo do combustível UOX (milhões de dólares)..	107

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAIN – *Calculation of Actinide Inventory* (Cálculo do inventário de Actinídeo)

GEE – Gases de efeito estufa

HLW – *High level waste* (Rejeito de alto nível)

HTGR – *High-temperature gas-cooled reactor* (Reator refrigerado a gás de alta temperatura)

IAEA – *International Atomic Energy Agency* (Agência Internacional de Energia Atômica)

IIASA – *International Institute for Applied Systems Analysis* (Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados)

KIND-ET – *Key Indicators for Innovative Nuclear Energy Systems – Evaluation Tool*

LCA – *Life Cycle Analysis* (Análise de ciclo de vida)

LCOE – *Levelized unit cost of energy* (Custo nivelado de energia)

LMFBR – *Liquid-metal fast breeder reactor* (Reator rápido refrigerado a metal líquido)

LUAC – *Levelized unit life cycle amortization cost* (Custo nivelado de amortização)

LUFC – *Levelized unit life cycle fuel cost* (Custo nivelado do combustível)

LUOM – *Levelized unit life cycle O&M cost* (Custo nivelado de O&M)

LWR – *Light Water Reactor* (Reatores de água leve)

MAVT – *Multi-Attribute Value Theory* (Teoria do Valor Multiatributo)

MESSAGE – *Model for Energy Supply System Alternatives and their General Environmental Impacts*

MOX – Óxido misto de urânio e plutônio

MSBR – *Molten-salt breeder reactor* (Reator a sal fundido)

PHWR – *Pressurized heavy-water reactor* (Reator pressurizado de água pesada)

PRIS – *Power Reactor Information System*

PWR – *Pressurized Water Reactor* (Reator de água pressurizada)

SWU – *Separative work unit* (unidade de trabalho separativo)

Th-U – Óxido misto de tório e urânio enriquecido

TRU-Th – Óxido misto de transurânico reprocessado diluído em tório

TRU-U – Óxido misto de transurânico reprocessado diluído em urânio empobrecido

UOX – Óxido de urânio

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>4</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>6</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>7</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>8</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>10</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	<b>12</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>14</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>22</b>
2.1 CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR .....	22
2.1.1 Combustíveis a base de tório.....	26
2.1.2 Combustíveis reprocessados .....	29
2.2 CUSTO NIVELADO DE ENERGIA.....	32
2.3 EMISSÕES DE GEE DA TECNOLOGIA NUCLEAR.....	33
2.4 FERRAMENTAS .....	34
2.4.1 MESSAGE .....	34
2.4.2 Decisão multicritério.....	37
2.4.2.1 Método da soma ponderada.....	37
2.4.2.2 Teoria do Valor Multiatributo e KIND-ET .....	38
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>42</b>
3.1 CICLOS DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR .....	47
3.1.1 UOX.....	47
3.1.2 MOX .....	48
3.1.3 TRU-Th .....	50

<b>3.1.4 TRU-U .....</b>	<b>52</b>
<b>3.1.5 Th-U .....</b>	<b>53</b>
<b>3.2 EMISSÕES DE GEE PARA AS TECNOLOGIAS NUCLEARES .....</b>	<b>54</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>57</b>
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>81</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>
<b>ANEXO I – RESULTADOS DOS CICLOS DOS COMBUSTÍVEIS .....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXO II – PUBLICAÇÕES RELACIONADAS .....</b>	<b>108</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Entre muitas das nações desenvolvidas, é consenso o importante papel da energia nuclear no século XXI e sua maior relevância nas próximas décadas. A energia nuclear figura, cada vez mais, como uma importante opção na matriz energética global devido ao crescimento da demanda de energia, sobretudo no setor elétrico, às políticas internacionais para mitigação dos efeitos das mudanças climáticas e à tendência mundial de descarbonização da economia [1-3].

Várias tendências sugerem que o sistema energético global está mudando, mas são necessários esforços políticos para acelerar e orientar essa transição. As matrizes energéticas de vários países estão sendo redefinidas. A partir de 2016, as adições de energia renovável atenderam a metade do crescimento da demanda global, e a energia nuclear registrou seu maior crescimento desde 1993. Do lado da demanda, novas tecnologias de transporte e padrões de vida crescentes aumentarão a demanda por eletricidade [4].

Com o objetivo principal de manter o aquecimento global abaixo dos 2°C acima dos níveis pré-industriais até 2100, o Acordo de Paris foi assinado em 2015, em resposta à ameaça do aquecimento global e das mudanças climáticas [5]. A transformação sustentável e a descarbonização das matrizes energéticas dos países são fundamentais na mitigação das emissões antrópicas de gases de efeito estufa para atingir tal objetivo. Todas as tecnologias de baixo carbono, como fontes renováveis, nucleares e fósseis com captura e armazenamento de carbono (CCS) desempenharão papel importante e devem ser avaliadas como opções para o sistema energético dos países [2].

Está comprovado que nos últimos 50 anos o uso da energia nuclear reduziu as emissões de CO<sub>2</sub> em mais de 60 Gt [6]. A energia nuclear, juntamente com as energias renováveis e outras tecnologias inovadoras, pode contribuir significativamente para alcançar os objetivos de energia sustentável e de aprimoramento da segurança energética. Para isso, devem ser adotadas políticas que visam a estimular a extensão da vida útil de usinas já existentes, bem como a construção de novas usinas com tecnologias inovadoras [6].

Apesar de configurar como uma tecnologia de baixo carbono, que não emite gases de efeito estufa (GEE) durante a operação, a energia nuclear é passível de emissões de poluentes durante as demais etapas do ciclo do combustível. Portanto, ela não está imune às transformações do sistema global de energia, devendo aprimorar-se para manter sua competitividade em relação às demais fontes de energia. A busca pela redução dos impactos ambientais deve ser contínua, contribuindo para uma transformação sustentável da matriz energética global.

Embora o maior interesse tenha se mantido nos combustíveis a base de urânio e seus ciclos de combustível, desde a década de 1950, com o nascimento da indústria de energia nuclear, iniciaram-se também estudos sobre o uso do tório e outros elementos, originalmente com o objetivo de expandir a base de recursos naturais para além das reservas de urânio. Porém, as novas descobertas de depósitos de urânio, a viabilidade da sua extração e o domínio da tecnologia aliadas ao baixo preço do urânio no mercado, bem como o desenvolvimento de tecnologias militares de produção de plutônio e a tecnologia de reatores PWR (*Pressurized Water Reactor*) para propulsão de submarinos, levaram a políticas de investimento em tecnologias baseadas em combustíveis de urânio [7]. Por outro lado, novos desafios, como o crescimento da demanda energética e as mudanças de mercado, associados ao desenvolvimento tecnológico e à redução de impactos socioambientais fizeram ressurgir o interesse em combustíveis alternativos e podem progredir tornando ciclos de combustíveis alternativos economicamente e ambientalmente atraentes. Dentre esses ciclos alternativos estão compreendidos os ciclos de combustíveis reprocessados e os ciclos de combustíveis a base de tório.

O interesse recente na retomada dos estudos do uso do tório como combustível também pode ser evidenciado pela realização do primeiro *workshop* realizado no Brasil sobre o tório, intitulado “1º Workshop Nacional: Desafios e Perspectivas do Uso do Tório”, durante a IV Semana de Engenharia Nuclear e Ciências das Radiações (IV SENCIR), em 2018, com a participação de instituições nacionais renomadas, a saber, a Universidade Federal de Minas Gerais, a Universidade Federal do ABC e o Instituto Militar de Engenharia do Rio de Janeiro [8]. Posteriormente, o assunto também teve destaque internacional com o “*First International Workshop on Thorium (ITHOR-WS)*”

e mesa redonda sobre a utilização do tório (“*Round Table on Thorium Utilization*”), respectivamente, em 2019 e 2021, no *International Nuclear Atlantic Conference* (INAC) [9, 10]. Outro destaque foi a criação da Rede Nacional de Pesquisa em tório incentivada pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), bem como a criação de uma pasta orçamentária para a mesma. Tal rede envolve pelo menos nove instituições diferentes, dentre as quais podemos citar UFRJ, IME, UFABC, IPEN, UFMG, ITA, CRCN, USP e UFPE [11].

A decisão pela adoção do uso da tecnologia para utilização comercial de tais combustíveis alternativos depende, além dos aspectos políticos, sociais e ambientais, da sua viabilidade técnica, segurança e economia. A viabilidade técnica de tais combustíveis já foi demonstrada amplamente na literatura [12-14] e em diversos trabalhos desenvolvidos no próprio Departamento de Engenharia Nuclear da UFMG, desde a década de 1970 até os dias atuais, como em [7, 15-18]. Outro trabalho de destaque é o trabalho realizado pelo Brasil em uma atividade conjunta da KFA, NUCLEBRAS/CDTN, Siemens Group KWU e NUKEM para utilizar o combustível de tório em reatores PWR [19]. Apesar dos inúmeros trabalhos, o foco destes visam a estudar o comportamento desses combustíveis nos reatores e sua viabilidade de aplicação. Outros trabalhos fazem análises generalizadas sobre os benefícios da utilização do ciclo do tório [1, 20, 21] e, quando são utilizados modelos para comparar o uso dos ciclos de tório, urânio, ou ciclos contendo reprocessamento, os modelos são sempre de cenários genéricos [22-25]. Partindo desse preceito, procurou-se investigar e comparar a utilização de combustíveis alternativos em PWR e seus impactos se implementados em um sistema energético de forma comercial, neste caso, usando como base o sistema de energia nuclear brasileiro com os pressupostos necessários.

Vale ressaltar que a utilização do combustível MOX nos atuais reatores PWR já acontece comercialmente desde a década de 1980. Atualmente, mais de 30 reatores no Japão e na França utilizam o combustível MOX. No total, cerca de 40 reatores na Europa, em países como Bélgica, Suíça, Alemanha e França possuem licença para operar com o combustível. Geralmente usa-se o combustível MOX de forma conservadora, carregando apenas um terço dos núcleos dos reatores PWR que operam com esse combustível [26].

Comparações quantitativas acerca das contribuições ou implicações dos ciclos de combustíveis baseados em tório e reprocessados contrapostos aos ciclos dos combustíveis convencionais em PWR ainda não foram realizadas a níveis globais ou mesmo regionais. O potencial energético de geração a partir das reservas de tório ainda não foi discutido na literatura, e a análise dos custos da utilização desses ciclos de combustíveis alternativos e sua comparação com o ciclo do urânio ainda não foi abordada na literatura. São praticamente inexistentes os estudos orientados para o planejamento energético e análise do ciclo de vida do uso de tais ciclos operando de forma comercial, bem como análises de seus impactos e custos.

Apesar das tentativas de transição para uma matriz energética mundial baseada em fontes renováveis, a intermitência da energia solar e eólica e a sensibilidade das hidrelétricas ao clima não permitem que o planejamento energético exclua a geração termelétrica do mix energético. Em muitos países, a geração de energia nuclear é vista como uma opção para enfrentar as mudanças climáticas, o crescimento da demanda e a confiabilidade do sistema energético [27]. No Brasil em particular, embora apenas duas usinas nucleares estejam em operação, elas desempenham um papel importante dentro do Sistema Interligado Nacional garantindo estabilidade entre os dois maiores centros de carga. Além disso, o país possui o domínio total do ciclo do combustível nuclear e grandes reservas de urânio, que permitem uma independência energética no setor [28].

A análise dos sistemas de geração de energia é essencial para compreender melhor as tecnologias futuras e presentes que compõem a matriz energética e para subsidiar as decisões relacionadas às estratégias de longo prazo para o planejamento energético da expansão do sistema [29]. A avaliação desses sistemas pode ser realizada por modelos energéticos especializados, como o *Model for Energy Supply System Alternatives and their General Environmental Impacts* (MESSAGE) [30].

O MESSAGE é uma ferramenta aplicada extensivamente nas análises e projeções da expansão de sistemas energéticos. Sua utilização é apropriada para a modelagem de sistemas de energia nuclear uma vez que, foi adquirido pela Agência Internacional de

Energia Atômica (*International Atomic Energy Agency* – IAEA) e ampliado para avaliação aprofundada desses sistemas.

Dado o contexto, de forma a trazer melhor compreensão sobre as tecnologias utilizadas, esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar e comparar a utilização de diferentes ciclos de combustíveis nucleares baseados em tório, urânio e combustíveis reprocessados em reatores PWR existentes, usando a experiência já adotada nos reatores PWR com a utilização do MOX. Particularmente, os combustíveis estudados são: UOX (óxido de urânio), MOX (óxido misto de urânio e plutônio), (TRU-Th)O<sub>2</sub> (Óxido misto de transurânico reprocessado diluído em tório), (TRU-U)O<sub>2</sub> (Óxido misto de transurânico reprocessado diluído em urânio empobrecido) e (Th-U)O<sub>2</sub> (Óxido misto de tório e urânio enriquecido).

Mais especificamente, os ciclos do combustível serão avaliados buscando resultados que identifiquem para cada ciclo:

- Utilização de recursos naturais;
- Requisitos necessários e/ou evitados de cada etapa do ciclo do combustível;
- Quantidades de rejeitos gerados;
- Emissões de GEE;
- Despesas totais do ciclo de combustível;
- Custos nivelados de geração de eletricidade.

Tais resultados são obtidos através da modelagem dos casos propostos com o uso do modelo MESSAGE. O sistema é representado com os dados técnicos, econômicos e os fluxos de material de todos os processos de transformação desde a mineração do urânio até o armazenamento do combustível queimado.

Por fim, uma abordagem de decisão multicritério baseada na Teoria do Valor Multiatributo (MAVT) é utilizada para classificar os ciclos do combustível a partir dos resultados com auxílio da ferramenta *Key Indicators for Innovative Nuclear Energy Systems – Evaluation Tool* (KIND-ET).

Assim, o trabalho se divide do seguinte modo: uma revisão bibliográfica sobre os diferentes ciclos de combustível nuclear, os aspectos econômicos da tecnologia nuclear e as ferramentas utilizadas no trabalho são apresentados no Capítulo 2; a metodologia utilizada no trabalho é descrita no Capítulo 3; no Capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados; por fim, as conclusões e as propostas para trabalhos futuros são salientadas no Capítulo 5.

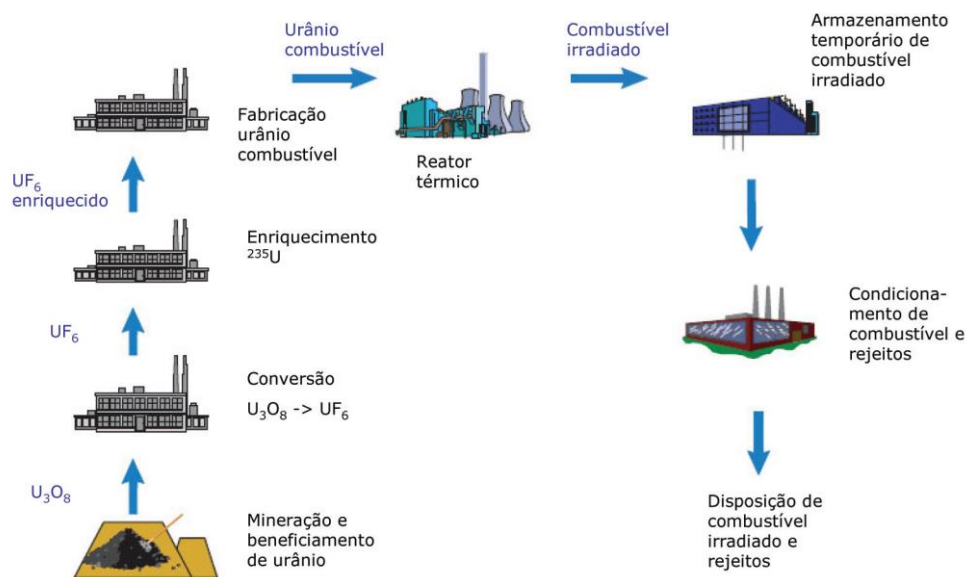
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR

O processo de extração do urânio natural até a disposição final dos rejeitos é denominado de ciclo do combustível nuclear. Existem muitas possibilidades de caracterização de um ciclo de combustível nuclear. As variações dependem se o ciclo é aberto ou fechado, da composição do combustível, do espectro de nêutrons e do tipo do reator, de quantas vezes o combustível queimado é reprocessado, do material físsil e fértil, entre outros. Todas essas opções estão inter-relacionadas quando a estrutura do ciclo do combustível é definida [31]. Neste trabalho, atemo-nos a dois tipos genéricos de ciclo do combustível, o ciclo aberto e o ciclo fechado, para reatores PWR utilizando cinco diferentes combustíveis.

O ciclo aberto pode ser compreendido como o ciclo em que os recursos naturais passam pelos processos de transformação de modo a serem utilizados para o seu objetivo fim - no caso para a geração de energia - e após seu uso são destinados à disposição final, sem reutilização do seu potencial energético e econômico remanescente. O ciclo aberto convencional, baseado no combustível de óxido de urânio, UOX, compreende a mineração e beneficiamento do urânio na forma de  $U_3O_8$  (*yellowcake*). O urânio é então convertido em  $UF_6$  e enriquecido até a concentração de U-235 específica para cada reator. Do processo de enriquecimento produz-se urânio empobrecido que fica armazenado como um rejeito deste processo. É feita a reconversão do  $UF_6$  para  $UO_2$  que é utilizado para a fabricação do combustível. Depois de irradiado, ou seja, utilizado para gerar energia, o combustível queimado vai para o armazenamento refrigerado nas piscinas no próprio sítio do reator. Posteriormente, este combustível queimado ainda pode ser armazenado temporariamente em unidades de armazenamento a seco. Por fim, é dada uma destinação final a esses rejeitos gerados durante a operação da usina [32]. O esquema do ciclo aberto do combustível UOX pode ser observado na Figura 1.

Figura 1. Ciclo aberto do combustível UOX [29]

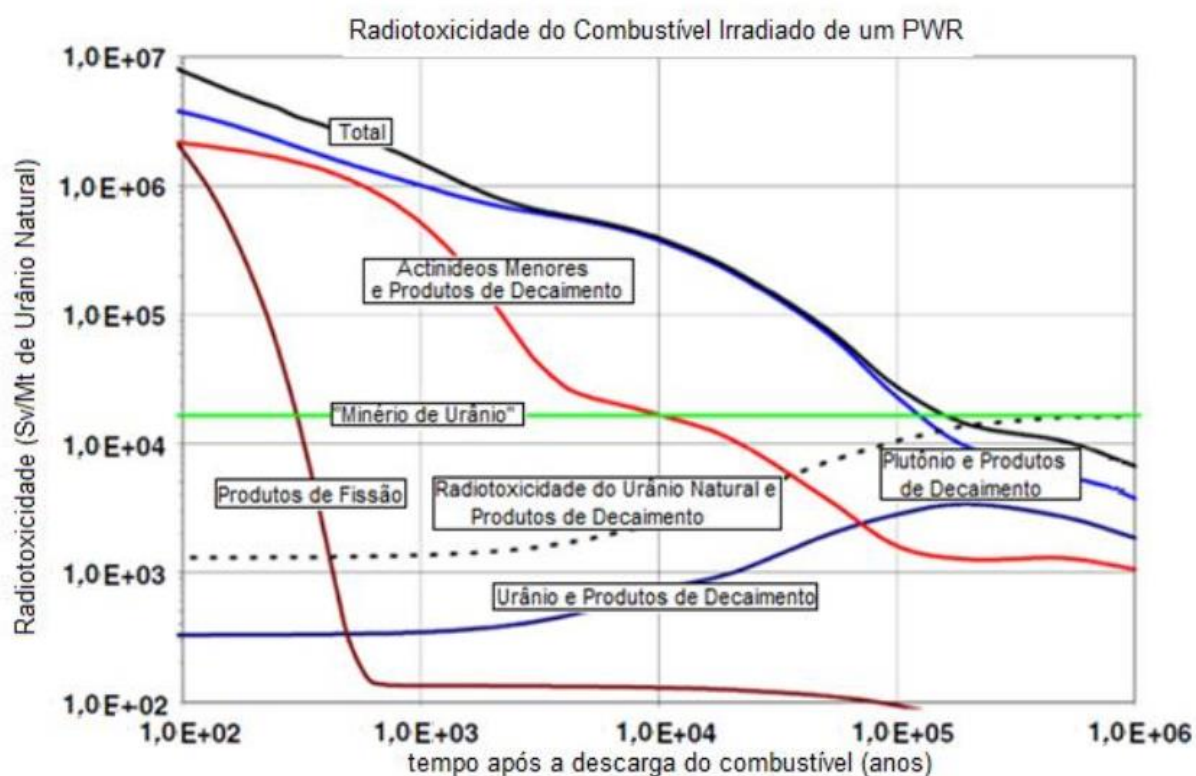


O combustível queimado, retirado dos reatores, possui uma composição que depende de fatores como o enriquecimento inicial, a extensão da queima (*burnup*) e o tipo do reator no qual foi queimado. Em uma queima típica em um PWR, estes combustíveis queimados possuem 93,4% de U, em que aproximadamente 0,8% é U-235, 1,2% de Pu, 0,2% de actinídeos menores (AM - Am, Np, e Cm) e 5,2% de produtos de fissão (PF) [33].

Entre os elementos do combustível queimado, os transurânicos, apesar de representarem uma pequena porção na mistura (cerca de 1% no UOX queimado [17]) são os principais responsáveis pela radiotoxicidade de longo prazo do rejeito como pode ser observado na Figura 2. Em geral, a influência na radiotoxicidade derivada dos produtos de fissão reduz rapidamente uma vez que a maioria possui meia vida curta, diminuindo para o nível de referência de radiotoxicidade natural em cerca de 300 anos. Já a radiotoxicidade de longo prazo é dominada por actinídeos, principalmente isótopos de plutônio e amerício. Entre 100 a 1.000 anos, a radiotoxicidade é dominada pelo Am-241 que é produto de decaimento do Pu-241 (Figura 5), de 1.000 a 10.000 anos pelo Pu-240, após 10.000 anos pelo Pu-239 e depois de 100.000 anos pelos descendentes do Am-241 [34].



Figura 2. Radiotoxicidade de um combustível queimado de um PWR e seus componentes.  
Adaptado de [7, 34]



Parte dos isótopos presentes no combustível queimado ainda possui potencial energético. Esse potencial representa oportunidade de economia de recursos naturais uma vez que esses isótopos são reciclados e reutilizados como combustível em reatores. Além disso, existem preocupações com o risco de proliferação devido aos isótopos físséis do plutônio presentes nos rejeitos. A destinação deste material é uma preocupação de governos e da opinião pública devido ao temor de acidentes ou desvios [7]. Assim, no ciclo fechado, o potencial econômico e energético do combustível, após ser utilizado para seu objetivo fim, é reaproveitado.

Para ser reaproveitado, o combustível queimado deve passar pelo reprocessamento que separa os isótopos úteis que podem ser reutilizados. O reprocessamento tem como alguns de seus objetivos: diminuir a quantidade de recurso natural necessária para manter a produção de energia, reduzir o volume de rejeitos de alta radiotoxicidade e buscar soluções para o problema de proliferação. Existem várias técnicas para fazer a separação dos radionuclídeos de interesse para a fabricação do

novo combustível, como por exemplo, o PUREX (*Plutonium Uranium Refining Extraction*) e o UREX+ (*Uranium Extration*).

O método de reprocessamento PUREX é um processo hidro-metalúrgico que separa urânio e plutônio dos demais produtos de fissão de forma muito eficaz. É o único implantado em escala comercial. Envolve a dissolução dos elementos combustíveis em ácido nítrico concentrado. A separação química de urânio e plutônio é então realizada por etapas de extração com solvente. O Pu e o U podem ser devolvidos à entrada do ciclo do combustível – o urânio para a usina de conversão antes do reenriquecimento e o plutônio direto para a fabricação do combustível MOX [35].

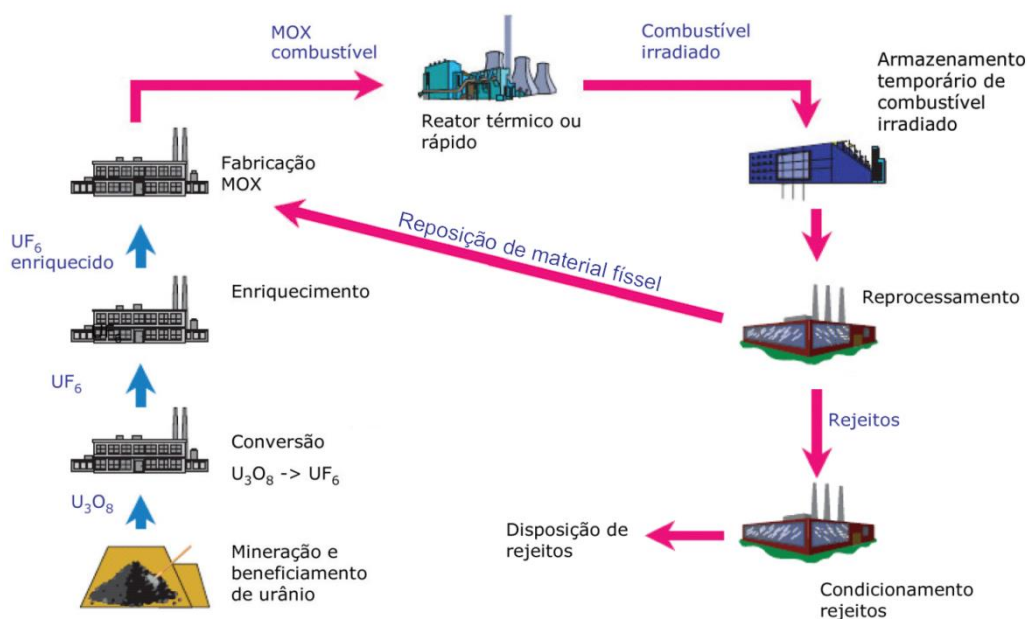
Uma versão modificada do PUREX que não envolve o isolamento da matriz de plutônio é o conjunto de processos UREX. O Departamento de Energia dos Estados Unidos desenvolveu os processos UREX+, em que apenas o urânio e depois o tecnécio são recuperados inicialmente (na fase de extração com solvente orgânico) para reciclagem; depois o rejeito é tratado de várias maneiras possíveis para recuperar plutônio com outros transurânicos. Nesta técnica de reprocessamento, os produtos da fissão compreendem a maior parte dos rejeitos finais com alto nível de radioatividade. A característica central desse sistema é aumentar a resistência à proliferação mantendo o plutônio com outros transurânicos [35].

Os transurânicos (TRU) reprocessados por meio da técnica UREX+ são compostos pela matriz de plutônio, neptúnio, amerício e cúrio. Em termos gerais, o TRU sai do reprocessamento com uma quantidade de material físsil de 62,4% e podem ser diluídos para a fabricação de um novo combustível. Tanto o urânio empobrecido (com 0,2% de U-235) ou o tório podem ser utilizados para tal diluição, resultando nos combustíveis TRU-U e TRU-Th, respectivamente [36, 37]. Tais combustíveis serão objeto deste estudo. Ambos combustíveis reprocessados, tanto pela técnica PUREX quanto pela técnica UREX+ podem sofrer mais de um reprocessamento, denominado múltiplos ciclos. Em geral, esses combustíveis podem passar até 5 vezes pelo processo de múltiplos ciclos [38].

O ciclo fechado mais usual – empregado comercialmente – configura no reprocessamento do combustível de óxido de urânio (UOX) queimado, separando

principalmente o plutônio para fabricação de um novo combustível MOX (óxido misto de urânio e plutônio). Pode haver ou não a reciclagem do urânio do reprocessamento. O ciclo fechado do combustível MOX pode ser observado na Figura 3.

Figura 3. Ciclo fechado. Adaptado de [29]



### 2.1.1 Combustíveis a base de tório

A utilização do tório como combustível para reatores procura trazer diversos benefícios, principalmente no ciclo do combustível nuclear, frente à utilização do combustível convencional fabricado a partir do urânio. Pode-se citar a abundância de tório, na crosta terrestre, de três a quatro vezes maiores que a de urânio, o que garantiria a extensão da utilização da energia nuclear e a redução dos requisitos de enriquecimento no ciclo de combustível. Na Tabela 1, são mostradas as reservas de tório e de urânio por país. Vale ressaltar que o tório é um subproduto de exploração e suas reservas são estimadas em relação ao urânio e terras raras, o que indica que uma prospecção do recurso ainda aumentará consideravelmente as reservas totais [1, 39].

Tabela 1. Reservas de tório e de urânio por país (2016) [39]

País	Toneladas Th	País	Toneladas U
Índia	846.000	Austrália	1.664.100
Brasil	632.000	Cazaquistão	745.300
Austrália	595.000	Canadá	509.000
EUA	595.000	Rússia	507.800
Egito	380.000	África do Sul	322.400
Turquia	374.000	Nigéria	291.500
Venezuela	300.000	Brasil	276.800
Canadá	172.000	China	272.500
Rússia	155.000	Namíbia	267.000
África do Sul	148.000	Mongólia	141.500
China	100.000	Uzbequistão	130.100
Noruega	87.000	Ucrânia	115.800
Groelândia	86.000	Botswana	73.500
Finlândia	60.000	EUA	62.900
Suécia	50.000	Tanzânia	58.100
Cazaquistão	50.000	Jordânia	47.700
Outros	1.725.000	Outros	232.400
<b>Total</b>	<b>6.355.000</b>	<b>Total</b>	<b>5.718.400</b>

O ciclo do combustível de tório pode gerar energia produzindo menores quantidades de plutônio e actínídeos menores (Np, Am, Cm), o que resultaria em rejeitos com menor radiotoxicidade quando comparado com o ciclo do combustível de urânio convencional, e ainda pode ser utilizado para queimar plutônio de origem militar ou civil. O combustível baseado em tório tem resistência intrínseca à proliferação devido à formação de U-232, que é um significativo emissor gama com meia vida de 73,6 anos, o que propicia a facilidade de detecção e dificulta a manipulação e o desvio. As melhores propriedades térmicas e neutrônicas do combustível de tório podem, ainda, ser potencialmente úteis para sistemas de energia nuclear [1, 22]. A condutividade térmica do ThO<sub>2</sub> a 773 K é de 6,2 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> enquanto a do UO<sub>2</sub> é de 4,8 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>. Dependendo da faixa de energia de nêutrons para a operação do reator, O Th-232

pode ser um material fértil mais interessante neutronicamente do que o U-238 devido a sua maior seção de choque de absorção de nêutrons térmicos, 7,4 e 2,7 barns, respectivamente, permitindo maior taxa de regeneração de combustível obtida na conversão Th-232/U-233 que a obtida na conversão U-238/Pu-239 [1, 40]. Portanto, um dos principais objetivos da utilização de um combustível de tório-urânio (Th-U) é gerar U-233 para reuso posterior. Na Figura 4, é apresentado de forma esquemática o ciclo Th-232/U-233 e, na Figura 5, é apresentado o ciclo U-238/Pu-239.

Figura 4. Ciclo Th-232/U-233 [7]

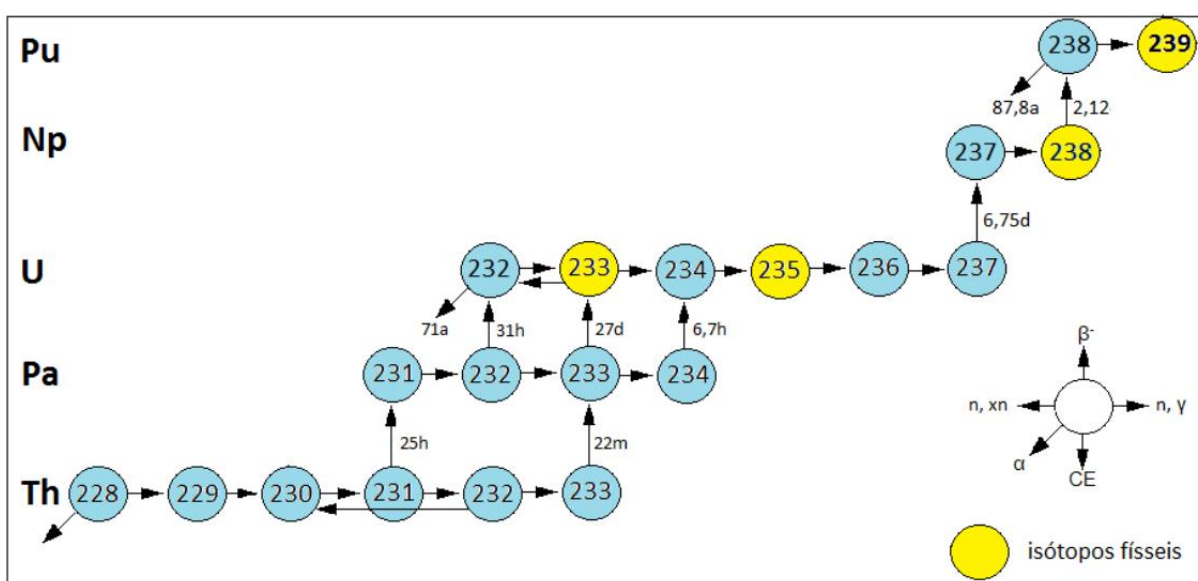
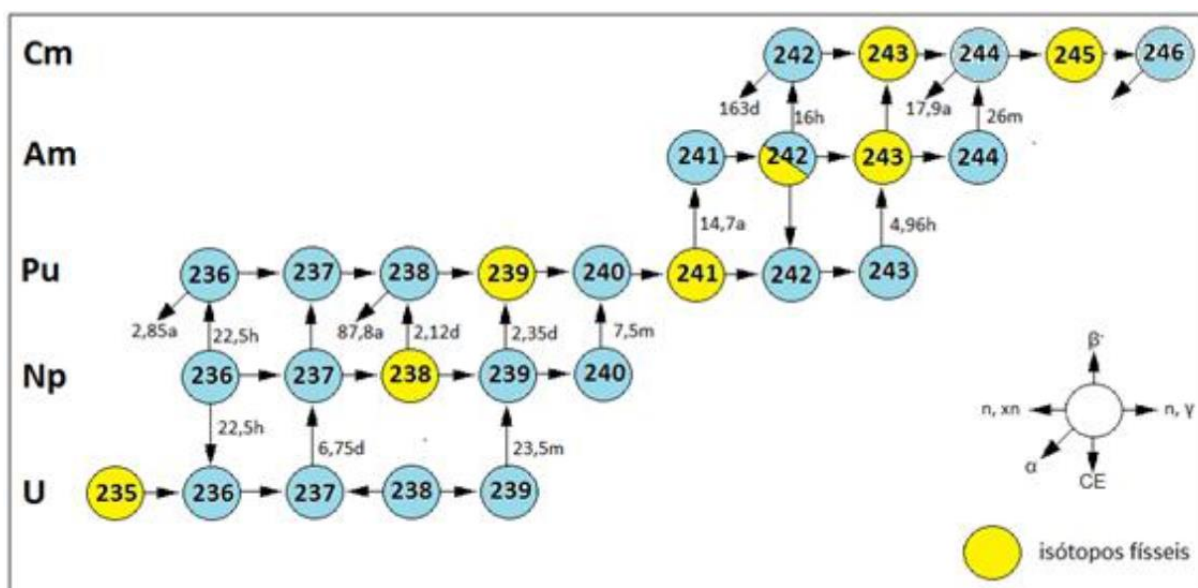


Figura 5. Ciclo U-238/Pu-239 [7]



Devem-se mencionar também os desafios significativos existentes em um ciclo de combustível de tório, por exemplo, a necessidade de se manusear remotamente o combustível queimado devido às altas emissões gama provenientes da cadeia de decaimento do U-232, as dificuldades tecnológicas para a fabricação do combustível e a experiência limitada do ciclo de combustível de tório em comparação com os combustíveis UOX e MOX [1, 41].

Historicamente, investigações acerca do potencial de utilização do Th-232 como combustível para reatores nucleares começaram paralelamente com os primeiros estudos da utilização do urânio e plutônio. A viabilidade técnica da utilização do tório já foi demonstrada em reatores refrigerados a gás de alta temperatura (HTGR), reatores de água leve (LWR), reatores pressurizados de água pesada (PHWR), reatores rápidos refrigerados a metal líquido (LMFBR) e reatores a sal fundido (MSBR). Estes trabalhos, já bem documentados, foram desenvolvidos por diversos países como Canadá, China, Índia, França, Coreia, Rússia, Eslováquia, Ucrânia e a Comissão Europeia [41]. O Brasil, particularmente, com a segunda maior reserva estimada de tório [39], também participou de estudos da utilização de tório em PWR em cooperação com a Alemanha [19].

### **2.1.2 Combustíveis reprocessados**

O combustível queimado pode ser reprocessado para recuperar isótopos físséis e férteis para fabricar um combustível novo para usinas nucleares existentes e futuras. Vários países europeus, Rússia, China e Japão têm políticas para reprocessar combustível nuclear usado, embora as políticas governamentais em muitos outros países ainda não tenham chegado a ver o combustível queimado como uma reserva em vez de um resíduo.

O reprocessamento e o desenvolvimento de técnicas de aprimoramento do processo vêm acontecendo desde a década de 1940, originalmente para fins militares, quando se recuperava plutônio para fabricação de armas nucleares. Atualmente, a razão para o reprocessamento de combustível queimado é recuperar plutônio e urânio não utilizados ganhando cerca de 25% a 30% mais energia dos recursos em relação ao ciclo aberto. Uma razão secundária é reduzir o volume de material a ser descartado

como rejeito de alto nível (*high level waste* - HLW) para cerca de um quinto. Além disso, o nível de radioatividade nos rejeitos do reprocessamento é menor e após cerca de 100 anos cai mais rapidamente do que no combustível queimado [35].

O reprocessamento torna a mineração de urânio natural menos significativa; e combustíveis como MOX e TRU-U contribuem para a redução dos grandes estoques de urânio empobrecido provenientes do enriquecimento - cerca de 1,2 milhão de toneladas de urânio empobrecido estavam estocadas no final de 2018, nos países que operaram ou ainda operam plantas de enriquecimento [35].

Outra grande mudança diz respeito aos rejeitos recuperados. Na década de 2010, cresceu o interesse em recuperar todos os actínídeos de vida longa para reciclá-los para que acabem como produtos de fissão de vida curta [35]. Essa política é impulsionada por dois fatores: reduzir a radiotoxicidade de longo prazo em rejeitos de alto nível e reduzir a possibilidade do plutônio ser desviado do uso civil – aumentando assim a resistência à proliferação do ciclo do combustível. Essa é exatamente a ideia por trás da técnica UREX+ que recupera uma matriz com plutônio e actínídeos menores (AM) de vida longa para a fabricação de novos combustíveis. Por outro lado, a técnica PUREX é a única empregada comercialmente, com capacidade de reprocessamento de 3.860 toneladas por ano como apresentado na Tabela 2.

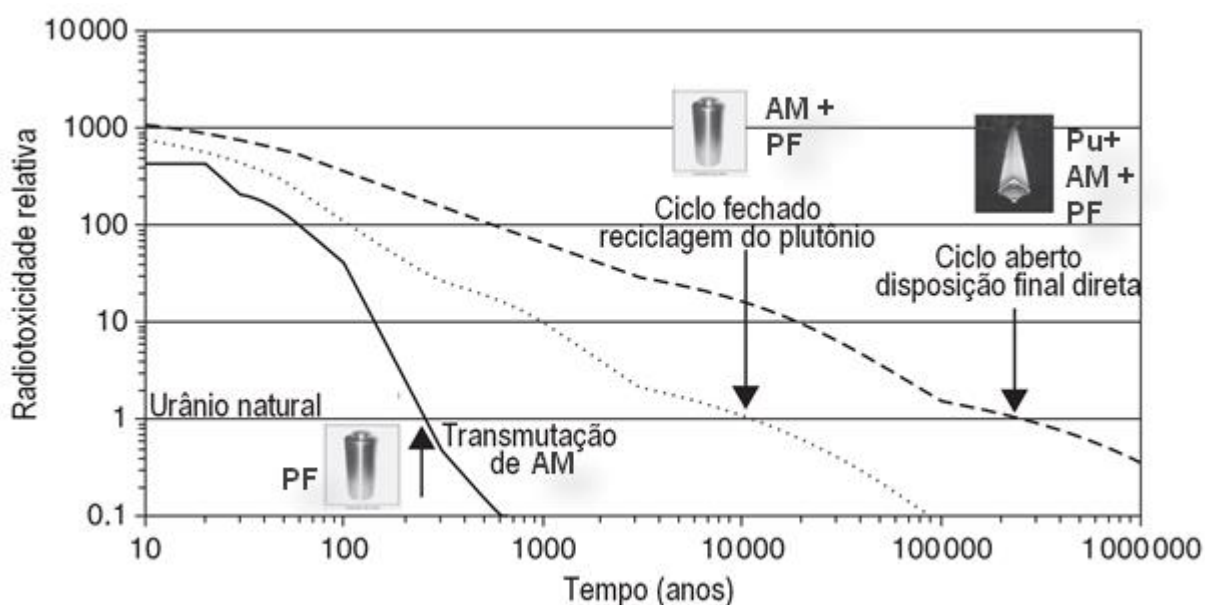
Tabela 2. Capacidade de reprocessamento comercial no mundo (toneladas/ano). Adaptado de [35]

Combustível LWR	França, La Hague	1.700
	Rússia, Ozersk (Mayak)	400
	Japão (Rokkasho)	800
	Total LWR (aprox.)	<b>2.100</b>
Outros combustíveis nucleares	Reino Unido (Magnox)	1.500
	Índia (PHWR, 4 plantas)	260
	Total outros (aprox.)	<b>1.760</b>
Capacidade civil total		<b>3.860</b>

Além disso, como os HLW representam 96% da radiotoxicidade total dos rejeitos, a diminuição do seu inventário tem uma influência significativa e positiva na radiotoxicidade final dos rejeitos em longo prazo. A radiotoxicidade relativa do HLW

produzido pelo ciclo de combustível fechado é de apenas 4% da radiotoxicidade relativa do HLW do ciclo de combustível aberto [42]. Ademais, ao comparar a radiotoxicidade calculada com a radiação natural, pode-se observar que, com a transmutação de actínídeos de vida longa, o rejeito pode apresentar menos radiotoxicidade que o minério de urânio natural após aproximadamente trezentos anos. Em comparação, com um ciclo de combustível aberto, ele leva mais de 200.000 anos para conseguir atingir a radiação natural [43]. Um exemplo típico pode ser observado na Figura 6.

Figura 6. Redução da radiotoxicidade com o tempo. Adaptado de [43]



Assim, o reprocessamento e a reutilização do combustível queimado, maximizando a reciclagem dos actínídeos menores em um ciclo fechado, trazem um grande benefício para a sociedade, reduzindo a radiotoxicidade do rejeito a ser gerenciado, e garantindo que as gerações futuras não tenham que lidar com rejeitos que demorem milhares de anos para atingir uma radiotoxicidade relativa à do urânio natural. Além disso, essa reutilização também ajuda a resolver o problema da proliferação, uma vez que os isótopos reprocessados serão usados para fins pacíficos.



## 2.2 CUSTO NIVELADO DE ENERGIA

O custo tem papel de grande importância na tomada de decisão de qual tecnologia será adotada, inclusive como um fator para direcionar o desenvolvimento de uma tecnologia em detrimento de outra. O custo não é fator decisório e único. Questões políticas, sociais e ambientais também fazem parte dessa decisão.

Com o objetivo de comparar os custos de diferentes tecnologias, um indicador amplamente utilizado é o custo nivelado de energia (*Levelized Cost of Energy - LCOE*). Ele corresponde a uma medida geral dos custos de produção de energia elétrica que explicita os custos da geração de 1 kWh de eletricidade ao longo da vida útil da usina. O LCOE pode ser calculado de forma aproximada como o valor presente líquido de todos os custos durante a vida útil do ativo dividido pela produção total de energia elétrica do ativo, ou ainda como a soma do custo nivelado de amortização (*Levelized unit life cycle amortization cost - LUAC*), custo nivelado de O&M (operação e manutenção) (*Levelized unit life cycle O&M cost - LUOM*) e custo nivelado do combustível (*Levelized unit life cycle fuel cost - LUFC*) [44].

$$LCOE = LUAC + LUOM + LUFC \quad (1)$$

Sendo:

$$LUAC = \frac{\sum_{t_i}^{t_f} \frac{CI_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t_i}^{t_f} \frac{P_t \times 8760 \times Lf_t}{(1+r)^t}} \quad (2)$$

$$LUOM = \frac{\sum_{t_i}^{t_f} \frac{O\&M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t_i}^{t_f} \frac{P_t \times 8760 \times Lf_t}{(1+r)^t}} \quad (3)$$

$$LUFC = \frac{\sum_{t_i}^{t_f} \frac{F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t_i}^{t_f} \frac{P_t \times 8760 \times Lf_t}{(1+r)^t}} \quad (4)$$

Sendo:

$CI_t$  = Custos de capital investido no ano t;

$O\&M_t$  = Custos de O&M no ano t;

$F_t$  = Custos de combustível no ano t;

$P_t$  = Potência elétrica líquida do sistema nuclear considerado no ano t;

8760 = Número total de horas em um ano;

$Lf_t$  = Fator de capacidade da planta no ano t;

$r$  = taxa de desconto.

Ressalta-se que o custo nivelado da eletricidade pode não ser indicativo de preços nos mercados, uma vez que a formação de custos e preços são dois processos distintos.

### 2.3 EMISSÕES DE GEE DA TECNOLOGIA NUCLEAR

A energia nuclear é uma tecnologia de baixo carbono fundamental para descarbonização da economia, dado o desafio global de reduzir significativamente as emissões de GEE, oficializado pelo Acordo de Paris em 2015 [5]. A energia nuclear também já demonstrou sua capacidade de produzir eletricidade de base a um custo baixo, previsível e estável devido à sua baixa dependência do preço do urânio [27, 45].

A avaliação das emissões e dos impactos das diferentes fontes de energia e pelo uso de diferentes tecnologias é feita por meio da análise do ciclo de vida (*Life Cycle Analysis* - LCA). A LCA é a principal base de indicadores para comparar as diferentes fontes e tecnologias tentando buscar a mais “sustentável”. Alguns estudos trataram do caso específico da energia nuclear, com uma ampla gama de resultados, dependendo do cenário do ciclo do combustível nuclear escolhido. Segundo o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) as emissões médias de GEE da energia nuclear são de 15,5 gCO<sub>2e</sub>/kWh [46]. Para tecnologias específicas de reatores ou ciclos de combustível, temos que: segundo Kadiyala *et al.* (2016) a média das emissões, para reatores PWR, é de 11,87 gCO<sub>2e</sub>/kWh [47]; dependendo do cenário analisado, as emissões médias para o sistema de energia nuclear brasileiro ficam entre 14,03 gCO<sub>2e</sub>/kWh e 19,24 gCO<sub>2e</sub>/kWh [48, 49]; para a tecnologia de reatores AP1000 a média das emissões é de 8,4 gCO<sub>2e</sub>/kWh [50]; para os ciclos aberto e

fechado do sistema de energia nuclear da França, as médias das emissões são, respectivamente, 5,45 gCO<sub>2e</sub>/kWh e 5,29 gCO<sub>2e</sub>/kWh [42]. Além desses existem vários outros autores que avaliam tais emissões [51-53].

Através das LCA percebe-se que fatores mais importantes que influenciam os futuros níveis de CO<sub>2</sub> da energia nuclear envolvem o ciclo do combustível nuclear. Estes incluem a quantidade e o teor de minério do urânio, a eficiência da tecnologia de enriquecimento, os requisitos de enriquecimento de combustível e a intensidade de carbono da eletricidade usada nas diferentes etapas do processo no ciclo de vida [54].

## 2.4 FERRAMENTAS

Enquanto alguns países buscam apenas utilizar a tecnologia nuclear, outros buscam desenvolver todo o sistema de geração nuclear e suas tecnologias associadas. Em ambos os casos, o desenvolvimento de uma estratégia apropriada requer uma análise detalhada e quantitativa das capacidades e prazos das várias instalações nucleares a serem construídas, a quantidade de material nuclear a ser processado, os volumes e as características do rejeito nuclear a ser gerenciado, e outros requisitos para as várias etapas do sistema de geração nuclear. Essa análise requer modelagem matemática dos sistemas de energia nuclear, representando todos os detalhes técnicos, parâmetros de desempenho, materiais envolvidos e custos. Para isso, são utilizadas ferramentas como MESSAGE [30].

### 2.4.1 MESSAGE

O MESSAGE fornece uma plataforma conveniente para modelagem de sistemas de geração nuclear. O MESSAGE foi originalmente desenvolvido na década de 1980 pelo *International Institute for Applied Systems Analysis* (IIASA) como um modelo para a avaliação abrangente e flexível dos principais desafios energéticos e tem sido amplamente utilizado no desenvolvimento de cenários energéticos e na identificação de estratégias de resposta socioeconômica e tecnológica para esses desafios [55]. Posteriormente, foi adquirido pela IAEA e expandido para a modelagem de sistemas de energia nuclear, particularmente para a análise de fluxo de materiais, para apoiar

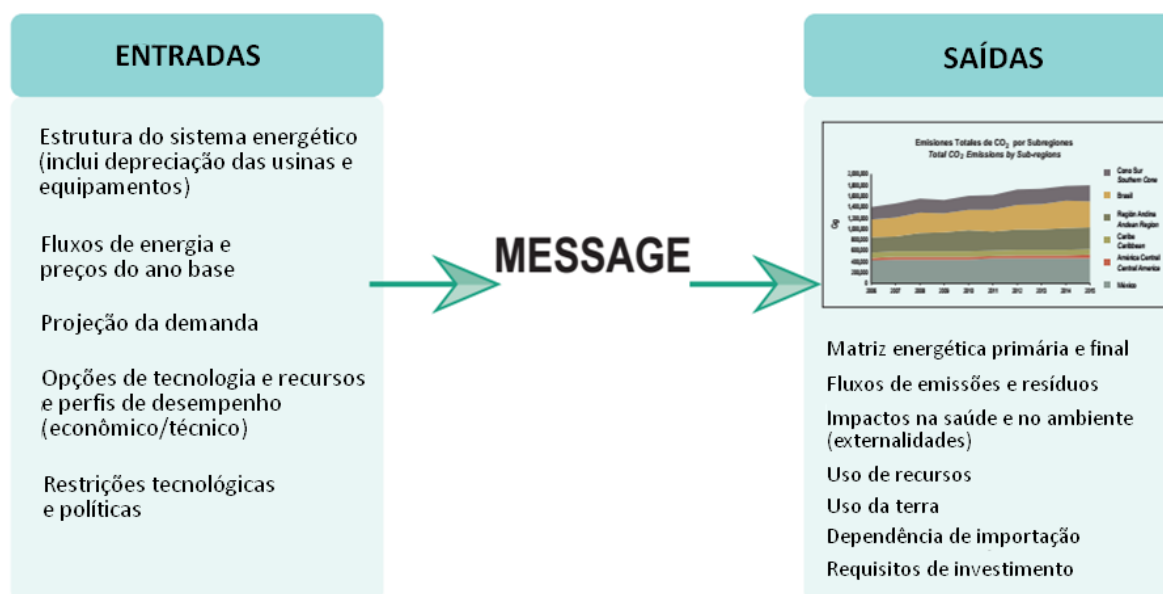
na avaliação de sistemas de energia nuclear devido à necessidade de planejamento da expansão elétrica a fim de desenvolver estratégias sustentáveis para o setor [56].

Trata-se de um modelo de livre acesso para fins acadêmicos, sendo que um acordo entre o IIASA e a IAEA permite seu uso na IAEA e em seus países membros. A estrutura de modelagem e os resultados do MESSAGE fornecem insumos essenciais para grandes avaliações internacionais e estudos de cenários, como o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o Conselho Mundial de Energia (WEC), o Conselho Consultivo Alemão sobre Mudanças Globais (WBGU), a Comissão Europeia e a Avaliação Global de Energia (GEA) [55].

Essa ferramenta é um modelo de otimização utilizada para o planejamento da expansão de médio e longo prazo de sistemas de energia, análise de políticas para mudanças climáticas e desenvolvimento de cenários a nível nacional, sub-regional ou regional. O modelo fornece uma estrutura para representar as diversas cadeias energéticas, desde a extração de recursos, importações e exportações, conversão, transporte e distribuição, até a provisão de serviços de uso final de energia. Dada essa informação e outros recursos de cenário, como a demanda por serviços de energia, o modelo busca satisfazer a demanda minimizando os custos operacionais e de manutenção de todo o sistema energético para o horizonte de tempo estudado, fornecendo as capacidades instaladas de tecnologias, saídas e entradas de energia, requisitos de energia em vários estágios dos sistemas de energia, custos, emissões, entre outros [55-57]. Portanto, pode ser usado na avaliação do ciclo de vida para realizar análises de integrações energéticas mais sofisticadas, identificando o uso de recursos, os fluxos de materiais e oportunidades de mitigação de GEE [30, 57].

Vários trabalhos já foram realizados avaliando geração nuclear em diferentes regiões do mundo, como [45, 58-61]. Porém, observa-se que praticamente toda literatura avalia sistemas de energia nuclear com ciclos convencionais e utilizados comercialmente. A análise de ciclos de combustíveis nucleares alternativos, com potencial viabilidade técnica e possíveis vantagens sobre os sistemas convencionais é quase inexistente, sendo que este trabalho pretende contribuir no sentido de ampliar esse conhecimento. As entradas e saídas típicas do MESSAGE são mostradas na Figura 7.

Figura 7. Principais entradas e saídas do MESSAGE. Adaptado de [56]



Mais especificamente, a otimização do modelo utiliza a programação linear para minimizar uma função objetivo sujeita às restrições impostas ao modelo. A função objetivo compreende a somatória dos custos associados à geração do sistema energético incorridos durante o período do estudo. A formulação matemática do MESSAGE, incluindo todas as suas variáveis, restrições e a forma geral da função objetivo, pode ser vista em [62].

Os modelos energéticos criam imagens simplificadas de sistemas de energia reais traduzindo os componentes, a estrutura e os fluxos em formulações matemáticas tratáveis. Portanto, o MESSAGE, como um modelo energético *bottom-up*, também apresenta as fraquezas deste tipo de modelagem, como, por exemplo, as simplificações da estrutura dos sistemas energéticos, as restrições impostas, os cenários e as premissas consideradas, a qualidade dos dados fornecidos ao modelo, a informação resultante complexa que necessita ser interpretada para utilização pelos tomadores de decisão, entre outros. Além disso, o MESSAGE é um modelo de código fechado, não sendo possível fazer alterações no mesmo. Portanto, deve-se adaptar o problema de estudo ao modelo, e não o contrário.

### 2.4.2 Decisão multicritério

Sabe-se que o processo decisório envolve a escolha de alternativas ou cursos de ação. Porém, os decisores geralmente possuem diferentes juízos de valores e pontos de vista conflitantes. Os métodos multicritério de apoio à decisão surgem como uma opção para a integração dessas divergências e diversidades. Assim, os processos de tomada de decisão complexos podem ser facilitados quando se utiliza o enfoque multicritério.

Não existe um método de decisão multicritério ideal para todos os problemas. Várias escolas de pensamento, técnicas e métodos foram desenvolvidos para apoiar a tomada de decisão. O estudo cuidadoso da natureza do problema a ser analisado conduzirá à escolha do método multicritério mais adequado. Portanto, a escolha de qual método utilizar depende das características do problema enfrentado [63].

Assim, dois métodos de decisão multicritério serão utilizados para fins específicos no trabalho. O primeiro é o método da soma ponderada e o segundo é a aplicação da MAVT com auxílio da ferramenta KIND-ET.

#### 2.4.2.1 Método da soma ponderada

O método da soma ponderada (*Weighted Sum Model* - WSM) é o método mais conhecido e mais simples de análise de decisão multicritério para avaliar várias alternativas em termos de vários critérios de decisão. Em casos unidimensionais, em que todas as unidades são iguais, o WSM pode ser usado sem dificuldade. Como é sabido, os critérios não têm sempre a mesma importância, então é útil definir um peso ( $w_j$ ) associado a cada critério  $j$ . Tais pesos representam a força ou a importância desse critério [64]. A matriz de avaliação é representada pela Tabela 3.

Tabela 3. Matriz de avaliação de decisão multicritério por soma ponderada [64]

Ações	Critérios			Soma ponderada
	$C_1$	$C_2$	$C_m$	
	$w_1$	$w_2$	$w_m$	
$A_1$	$E_{1,1}$	$E_{1,2}$	$E_{1,m}$	$S_1$
$A_2$	$E_{2,1}$	$E_{2,2}$	$E_{2,m}$	$S_2$
$A_n$	$E_{n,1}$	$E_{n,2}$	$E_{n,m}$	$S_n$

Suponha que um determinado problema seja definido em  $n$  alternativas e  $m$  critérios de decisão. Em seguida, suponha que  $w_j$  denota o peso relativo de importância do critério  $C_j$  e  $E_{ij}$  é o valor de desempenho da alternativa  $A_i$  quando ela é avaliada em termos do critério  $C_j$ . Então, a importância total, quando todos os critérios são considerados simultaneamente, da alternativa  $A_i$ , denotada como  $S_i$ , é definida da seguinte forma:

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^m E_{i,j} w_j}{\sum_{j=1}^m w_j} \quad (5)$$

A melhor opção entre as ações será aquela que apresentar o maior (ou menor) valor e é necessário que as avaliações tenham o mesmo sentido em todos os critérios. Esse método apresenta limitações quanto à sensibilidade à mudança de escala e a compensação entre critérios.

#### 2.4.2.2 Teoria do Valor Multiatributo e KIND-ET

Outro método de avaliação multicritério é o MAVT. Ele é um método comparativo de análise de decisão multicritério baseado em combinar diferentes medidas em termos de custos, riscos e benefícios medidos/avaliados em uma pontuação geral usando funções de valor de múltiplos atributos que levam em consideração a opinião de especialistas e a força de preferência do tomador de decisão. Dentro do MAVT, funções de valor de atributo único são avaliadas para cada indicador, transformando os valores dos diversos indicadores em uma escala universal e adimensional. As funções de valor de atributo único para cada indicador são moldadas em sua faixa de variação de acordo com sua significância para o avaliador [65].

Os problemas considerados pelo MAVT são tipicamente enunciados da seguinte forma: dado um conjunto de  $m$  alternativas e  $n$  indicadores para sua avaliação, é preciso supor que cada uma das alternativas foi avaliada por cada um dos indicadores, seja por especialistas ou por meio de cálculos objetivos. Uma regra deve ser derivada das preferências dos especialistas, que permitirá que as alternativas sejam classificadas de acordo com seu valor e que a melhor entre elas seja identificada. As pontuações gerais, ou seja, agregadas, indicam as classificações das alternativas: a alternativa preferida terá a pontuação geral mais alta, que é a classificação mais alta.

MAVT tem sido aplicado a uma ampla gama de problemas de tomada de decisão na área de avaliação comparativa multicritério de reatores nucleares, com relação a ciclos de combustível nuclear e sistemas de energia nuclear [65, 66]. A utilização de formas simplificadas, aditivas ou multiplicativas, da equação geral do MAVT permite que diferentes preferências possíveis dos tomadores de decisão sejam refletidas no processo de avaliação comparativa de sistemas de energia nuclear.

Em uma situação em que indicadores atribuídos a diferentes áreas de interesse são considerados simultaneamente, pode ser razoável implementar a forma aditiva da função valor multiatributo. Intuitivamente, essa simplificação se justifica em situações em que há concordância entre os especialistas de que a escolha entre duas alternativas com valores comuns para alguns atributos precisa focar apenas nos demais atributos que possuem valores diferentes. Essa intuição pode ser formalizada como uma “suposição de independência” que muitas vezes é satisfeita na prática [65]. Desde que o método MAVT seja aplicado corretamente, ele identificará todos os pontos fortes e fracos de desempenho dos sistemas de energia nuclear que estão sendo comparados.

A forma aditiva da função de valor multiatributo que é amplamente aplicada em muitos estudos tem a seguinte forma [65]:

$$u(x) = \sum_{i=1}^n w_i u_i(x_i) \quad (6)$$



Sendo:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (7)$$

Em que  $u_i(x_i)$  é a função de valor de atributo único para o indicador  $i$  escalado de 0 a 1, e  $w_i$  é o peso do indicador  $i$ .

Assim, o KIND-ET é uma ferramenta baseada na teoria do valor multiatributo desenvolvida pelo projeto colaborativo *International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles* (INPRO), por intermédio da IAEA. O KIND-ET é uma ferramenta adaptada para a avaliação comparativa das perspectivas, benefícios e riscos associados ao desenvolvimento de tecnologias nucleares, incluindo opções para um futuro relativamente distante [65].

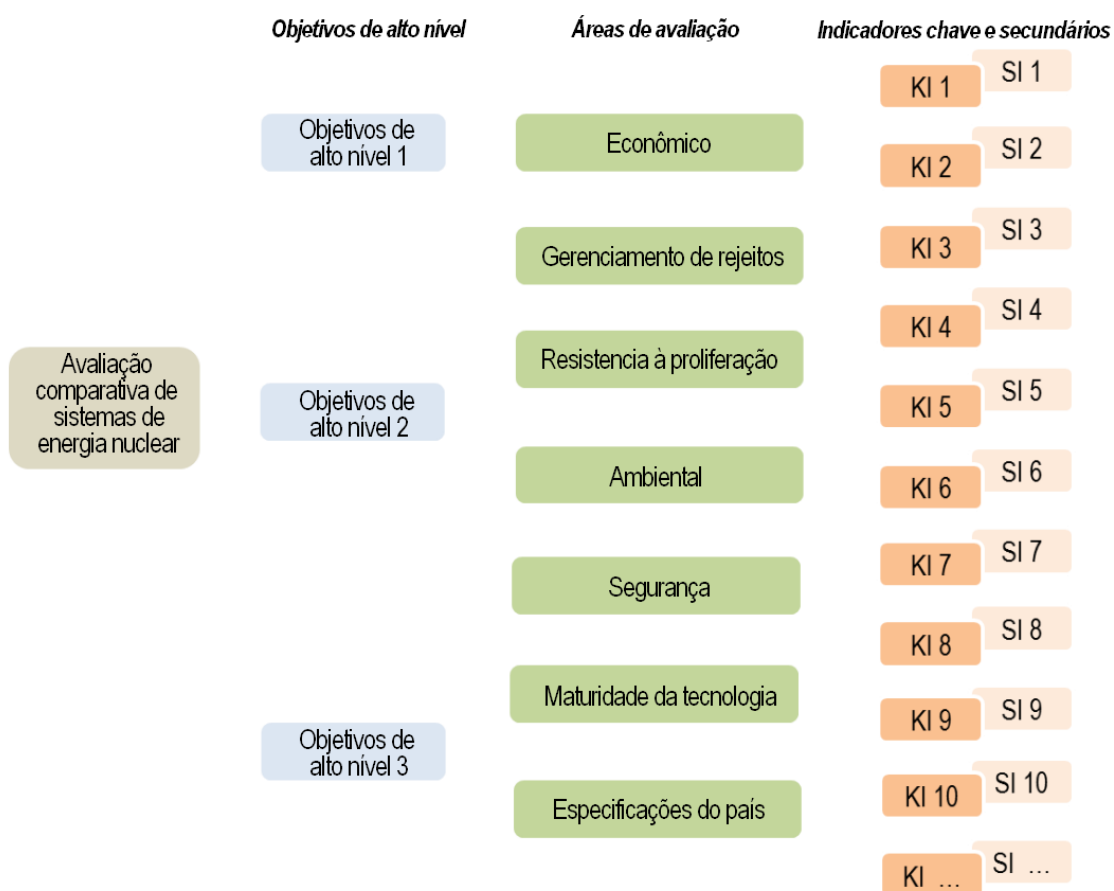
Para realizar uma comparação multicritério usando o método MAVT, que foi escolhido como o principal método para a abordagem KIND, é necessário:

- (1) Preparar uma tabela de desempenho;
- (2) Determinar funções de valor de atributo único para cada indicador;
- (3) Avaliar fatores de ponderação;
- (4) Realizar análise de sensibilidade;
- (5) Interpretar os resultados do *ranking* e formular recomendações.

Com sua arquitetura e os recursos funcionais do KIND-ET, os usuários podem modificar facilmente essa ferramenta para considerar suas preferências. O KIND-ET pode ajudar a identificar os méritos e deméritos das tecnologias nucleares que são comparadas em diferentes circunstâncias e avaliar seus alcances gerais levando em consideração o desempenho do sistema de energia nuclear, bem como os julgamentos e preferências de especialistas e tomadores de decisão.

A classificação geral de uma opção ou cenário é construída no KIND-ET como uma árvore de objetivos de vários níveis usando vários indicadores-chave e indicadores secundários para vários atributos ou áreas de avaliação, conforme mostrado na Figura 8.

Figura 8. Árvore de objetivos do KIND-ET. Adaptado de [66]



O KIND-ET usa funções de valor de atributo único para quantificar os principais indicadores para cada uma das áreas de avaliação e uma função de valor aditiva de múltiplos atributos para calcular a pontuação geral de cada opção ou cenário. A ferramenta é desenvolvida como um modelo baseado em planilha que pode ser modificado ou ajustado de acordo com o escopo de uma tarefa de avaliação e a estrutura do sistema de energia nuclear avaliado.

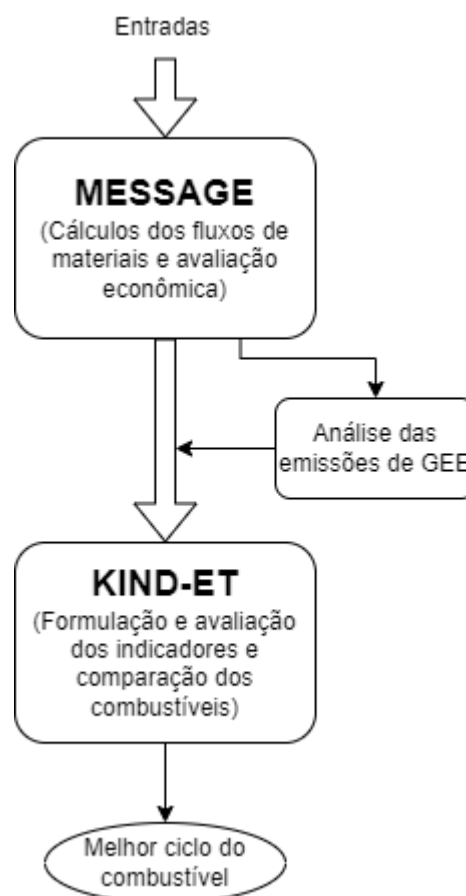
Existem grandes incertezas nas estimativas quantitativas dos indicadores-chave, as funções de valor de vários atributos e os fatores de ponderação que representam o julgamento dos especialistas e as preferências dos tomadores de decisão. A escolha dos conjuntos de dados de entrada usados para comparações de opções ou cenários alternativos de sistemas de energia nuclear pode influenciar significativamente os resultados. Portanto, análises de sensibilidade e incerteza devem ser realizadas para capturar as incertezas nas estimativas quantitativas.

### 3 METODOLOGIA

Com o objetivo de avaliar e comparar os diferentes ciclos de combustível nuclear e seus impactos, bem como para a verificação dos resultados obtidos pelo uso das ferramentas, utilizou-se como ferramenta de modelagem o MESSAGE, descrito na seção 2.4.1.

Os impactos avaliados pelo uso dos diferentes ciclos foram divididos em três grupos, que serão utilizados para classificar os ciclos por meio da decisão multicritério baseada na MAVT, utilizando o KIND-ET: consumo, desempenho e custos. Consumo corresponde ao consumo acumulado de recursos naturais – urânio e tório. Desempenho consiste nos requerimentos, rejeitos produzidos e impactos de emissões de GEE. Custos representam os custos dos ciclos do combustível representados pelos custos nivelados. A relação entre as ferramentas utilizadas neste trabalho está resumida de forma esquemática na Figura 9.

Figura 9. Esquema da análise realizada [Elaboração própria]



De modo a possibilitar a comparação dos ciclos do combustível nuclear, utilizou-se como base o sistema de energia nuclear brasileiro, considerando algumas premissas. O horizonte de tempo analisado vai de 2019 a 2060. Considerou-se a extensão da vida útil de Angra 1 até 2044 [67]. A operação de Angra 2 é prevista até 2040, considerando sua vida útil de 40 anos. Angra 3 teve o início de sua construção em 2010, de acordo com o *Power Reactor Information System* (PRIS) [68] e assume-se que o início de sua operação ocorreria em 2026, segundo declarações do governo brasileiro na 63ª conferência geral da IAEA, em 2019 [69]. Os reatores das três usinas são do tipo PWR e os reatores de Angra 2 e Angra 3 idênticos, com tecnologia alemã Siemens/KWU (hoje, Areva ANP) [70]. Como o reator de Angra 3 é idêntico ao reator de Angra 2 consideraram-se as mesmas características técnicas para ambos os reatores, com ressalva para a capacidade líquida total gerada de acordo com os dados do PRIS [68]. O fator de capacidade considerado corresponde ao fator de capacidade médio dos últimos 10 anos das usinas. Os dados técnicos considerados neste trabalho, referentes a cada uma das três usinas, encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4. Características técnicas e econômicas dos reatores [68, 70-73]

Item	Unidade	Angra 1	Angra 2	Angra 3
Capacidade líquida	MW(e)	626	1275	1245
Fator de capacidade	%	83,7	90,4	90,4
Eficiência térmica	-	0,342	0,358	0,358
<i>Discharge Burnup</i>	GWd/t HM	33	33	33
Tempo de residência	dias	1168	1168	1168
Tempo de construção	anos	10	19	16
Vida útil da usina	anos	60	40	40
Custo de investimento*	US\$/kW(e)	1893,6	1890,21	4295,79
Custos fixos de O&M*	US\$/kW ano	268,74	127,97	127,97
Custos variáveis de O&M*	US\$/kW ano	63,86	24,37	24,37
Custos de armazenamento	US\$/kg HM/ano	5	5	5

\*Valores referentes a 2019. Conversão para dólar cotado a R\$ 4,02 em 31/12/2019 [74].

Apesar de os combustíveis reprocessados, que operam em ciclo fechado, podem sofrer múltiplos ciclos, ou seja, passar pelo reprocessamento até 5 vezes, em um primeiro momento, considerou-se apenas um ciclo de reprocessamento tanto pela técnica PUREX quanto pela técnica UREX+. Além disso, de forma conservadora, os combustíveis alternativos ao UOX, geralmente são introduzidos parcialmente no núcleo dos reatores, correspondendo a 1/4 ou 1/3 do núcleo total, como ocorre, por

exemplo, na utilização do MOX [36]. Portanto, todos os combustíveis alternativos ao UOX, avaliados nesse trabalho, irão compor 1/3 do núcleo dos reatores.

Todas as etapas do ciclo de combustível precisam ser representadas no modelo MESSAGE com seus respectivos parâmetros técnicos. As etapas podem ser representadas como instalações ou como serviços que podem ser comprados a um determinado custo. Portanto, o fluxo de material nuclear precisa ser calculado para preparar o conjunto de dados de entrada.

Apesar de se saber que existem perdas de processo, assume-se que as perdas de material no processo do ciclo do combustível são nulas a fim de calcular os fluxos de materiais [32]. Como as perdas são pequenas e esse pressuposto é feito para todos os combustíveis, os impactos dessas perdas são insignificantes nas comparações realizadas.

As equações utilizadas para estimar os fluxos anuais de materiais no ciclo do combustível [32, 75] são apresentadas abaixo:

- i. Carregamento anual de combustível fresco:

$$FF = \frac{365 \times NC \times CF}{Eff \times Bu} \quad (8)$$

Em que, NC é capacidade líquida; CF é o fator de capacidade; Eff é a eficiência térmica e Bu é o *discharge burnup*.

- ii. Primeiro carregamento de combustível:

$$FuelInCore = \frac{FF \times Tr}{365 \times CF} \quad (9)$$

Em que, Tr é o tempo de residência e FF é o carregamento anual de combustível fresco.

- iii. Consumo anual de urânio natural:

$$NatU = FF \times \frac{(Enr - Ta)}{0,007114 - Ta} \quad (10)$$

Em que,  $Enr$  é o enriquecimento;  $Ta$  é o rejeito e  $0,007114$  é a quantidade de  $^{235}\text{U}$  no urânio natural

iv. Conversão:

$$Cn = NatU \quad (11)$$

v. Unidade de trabalho separativo:

$$SWU = FF \times \left[ V(Enr) + V(Ta) \frac{(Enr - 0,007114)}{0,007114 - Ta} - V(0,007114) \frac{(Enr - Ta)}{0,007114 - Ta} \right] \quad (12)$$

sendo  $V(x) = (1 - 2x) \ln \left( \frac{1-x}{x} \right)$

vi. Produção de urânio empobrecido:

$$DepU = FF \times \frac{(Enr - 0,007114)}{0,007114 - Ta} \quad (13)$$

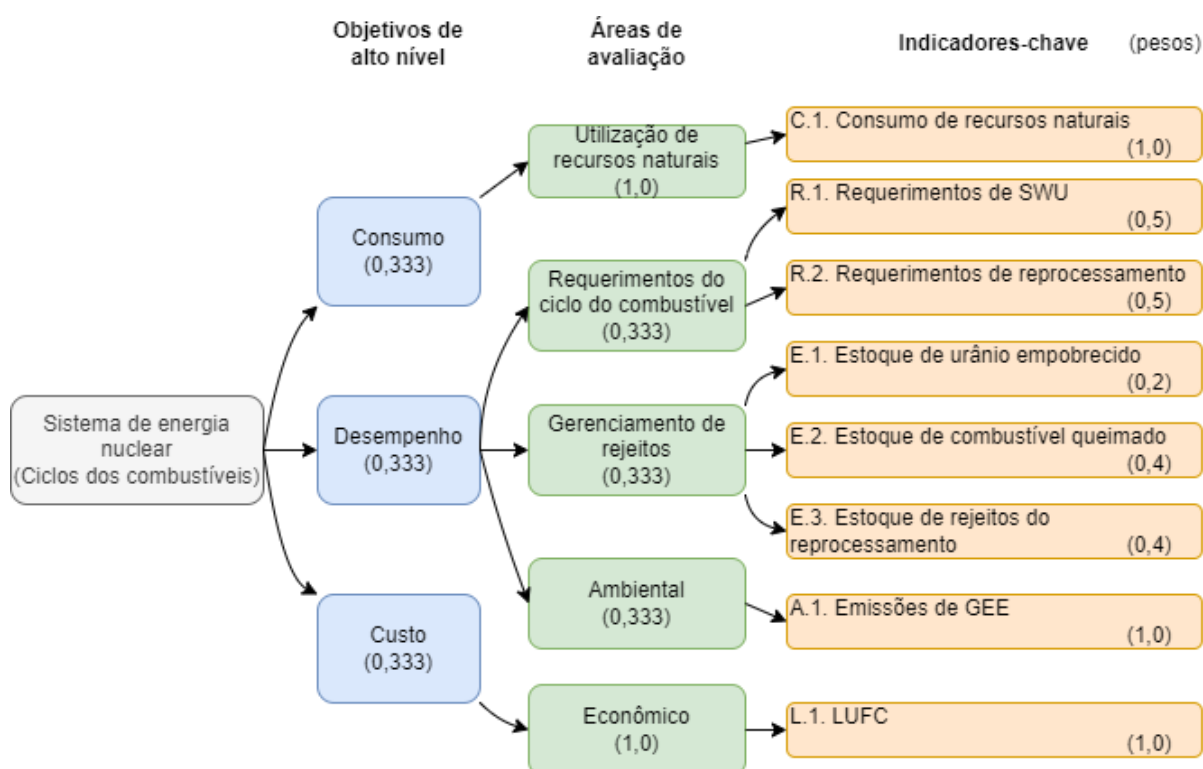
vii. Descarga do combustível queimado:

$$SFD = FF \quad (14)$$

Assim, com sua descrição técnica, além dos parâmetros econômicos definidos para cada ciclo do combustível e os fluxos de materiais, o sistema de geração nuclear foi representado no MESSAGE. Isso incluiu uma análise detalhada de todas as etapas do ciclo do combustível nuclear (extração, conversão, enriquecimento, fabricação do combustível, geração de eletricidade, reprocessamento e armazenamento do combustível queimado), a definição das formas de energia consideradas, como por exemplo, energia primária e energia final e as tecnologias associadas aos processos de transformação com suas entradas e saídas.

Os resultados de consumo, desempenho e custos obtidos como saída do MESSAGE são utilizados como entrada para formar os objetivos de alto nível utilizados na abordagem de decisão multicritério baseada na Teoria do Valor Multiatributo, utilizando a ferramenta KIND-ET. Os três objetivos de alto nível se dividem nas áreas de avaliação e cada área de avaliação se divide nos indicadores-chave, apresentados na Figura 10, cada um com seus respectivos pesos.

Figura 10. Estrutura da árvore de objetivos [Elaboração própria]



Para o resultado geral, foram atribuídos pesos idênticos para cada um dos objetivos principais, bem como entre as áreas de avaliação e os indicadores-chave. A exceção ocorre nos pesos dos indicadores chave para o gerenciamento de rejeitos, no qual o gerenciamento do estoque de urânio empobrecido recebe peso menor que os gerenciamentos dos estoques de combustível queimado e de rejeitos do reprocessamento, uma vez que o gerenciamento do urânio empobrecido é menos complexo que os demais.

Por fim, uma análise de sensibilidade para cada um dos objetivos de alto nível foi realizada, com a finalidade de capturar as incertezas das estimativas quantitativas dos indicadores de cada ciclo do combustível. Assim, consegue-se chegar a uma conclusão mais precisa sobre qual é o melhor ciclo do combustível, levando em consideração tais incertezas.

### 3.1 Ciclos de combustível nuclear

Na Tabela 5, são apresentadas as características gerais dos ciclos do combustível analisados. Cada ciclo do combustível é apresentado em detalhes nas subseções que se seguem.

Tabela 5. Características gerais dos ciclos do combustível analisados [15, 16, 36, 37]

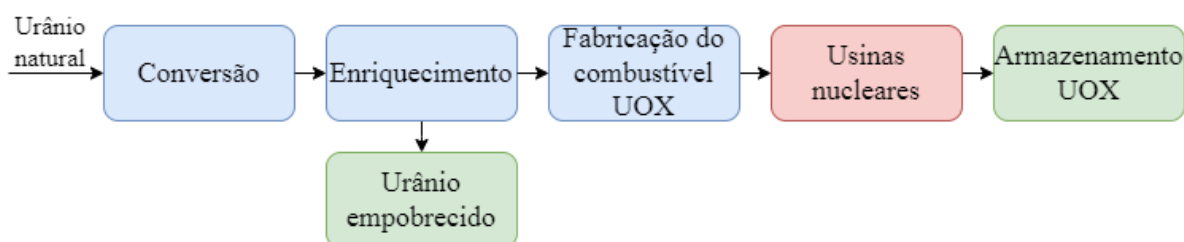
<b>Ciclo do combustível</b>	<b>Combustível no núcleo dos reatores</b>	<b>Composição do combustível</b>	<b>Reprocessamento</b>
UOX	100% de UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub> com 3,1% de enriquecimento em U-235/U-238	-
MOX	1/3 de MOX 2/3 de UOX	MOX com 7,23% de Pu e 92,77% de urânio empobrecido	PUREX
TRU-Th	1/3 de TRU-Th 2/3 de UOX	TRU-Th com 16% de transurânicos e 84% de Th natural	UREX+
TRU-U	1/3 de TRU-U 2/3 de UOX	TRU-U com 19,7% de transurânicos e 80,3% de urânio empobrecido	UREX+
Th-U	1/3 de Th-U 2/3 de UOX	Th-U com 75% de Th natural e 25% de U enriquecido em 16% de U-235/U-238	-

#### 3.1.1 UOX

O sistema de energia nuclear operando com o óxido de urânio, UO<sub>2</sub> ou UOX, representa o ciclo de combustível nuclear convencional típico de um PWR. É um ciclo aberto, em que o urânio natural passa por uma planta de conversão, depois é enriquecido em 3,1% U-235, e o combustível é fabricado. A planta de enriquecimento gera urânio empobrecido - o grau de empobrecimento de U-235 neste rejeito é de 0,002 [37]. Depois que o combustível é queimado nas usinas, ele vai para o armazenamento. O fluxo do ciclo do combustível UOX é apresentado pelo esquema da Figura 11.



Figura 11. Esquema do ciclo do combustível UOX [Elaboração própria]



Os custos, em dólares, relacionados à extração do urânio natural, conversão, enriquecimento e fabricação do combustível são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Dados econômicos referentes ao combustível UOX [25, 30, 76]

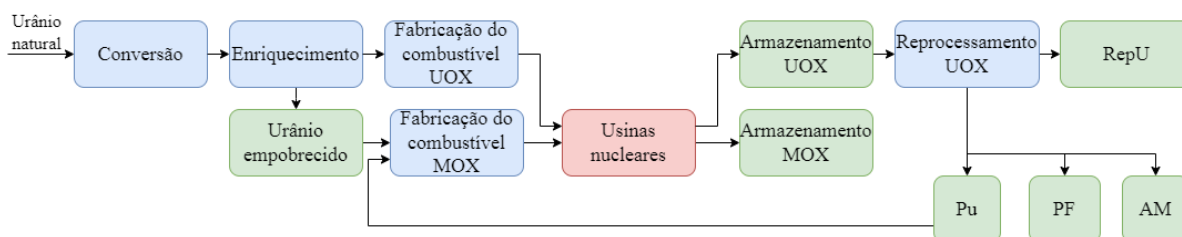
Item	Unidade	Custo
Conversão	US\$/kgU	6,75
Enriquecimento	US\$/kg SWU	60
Fabricação de combustível	US\$/kg HM	275
Urânio natural	US\$/kg	40

### 3.1.2 MOX

O combustível de óxido misto, MOX, é fabricado a partir da mistura do urânio empobrecido, gerado a partir do enriquecimento do urânio natural, com uma matriz de plutônio. O reprocessamento do plutônio é feito através da técnica PUREX reprocessando um combustível UOX queimado de um PWR típico com enriquecimento inicial de 3,1% e *burnup* de 33 GWd/t HM [16]. O combustível MOX consiste em 7,23% de plutônio e 92,77% de urânio empobrecido, o que é equivalente ao UOX enriquecido a cerca de 4,5%, assumindo-se que a matriz de plutônio tem cerca de dois terços de isótopos físseis [15, 26]. Essa composição garante um fator de multiplicação infinito próximo ao do *benchmark* do combustível MOX [36].

Assumiu-se que os reatores usam um terço de MOX e dois terços de UOX no núcleo. Neste caso, apenas o combustível UOX queimado é reprocessado, enquanto o MOX queimado é armazenado. O urânio reprocessado (RepU), os produtos de fissão (PF) e os actinídeos menores (AM) do reprocessamento não são reintroduzidos no sistema e vão para o armazenamento. Portanto, considerou-se apenas um ciclo de reprocessamento. Na Figura 12, é apresentado o fluxo do ciclo do combustível MOX.

Figura 12. Esquema do ciclo do combustível MOX [Elaboração própria]



Os dados técnicos e econômicos dos reatores e do combustível UOX são os mesmos apresentados anteriormente na Tabela 4 e Tabela 6, respectivamente. Os custos de reprocessamento e de fabricação do combustível MOX são, respectivamente, US\$ 600/kg HM e US\$ 1200/kg HM [30].

Para calcular os dados de entrada com a opção de reprocessamento de combustível UOX queimado, é necessário especificar a composição isotópica do combustível irradiado descarregado do reator. A composição do UOX queimado depois de cinco anos em armazenamento refrigerado e um ano no sítio de reprocessamento é mostrada na Tabela 7.

Tabela 7. Composição do combustível UOX queimado [16, 17]

Nuclídeo	Fração em peso	Nuclídeo	Fração em peso
U-233	2,03E-09	Pu-240	1,62E-03
U-234	1,52E-04	Pu-241	1,53E-03
U-235	7,88E-03	Pu-242	5,76E-04
U-236	4,02E-03	Am-243	1,11E-04
U-237	5,73E-06	Am-241	8,11E-05
U-238	9,57E-01	Am-242	1,50E-07
Np-237	4,66E-04	Cm-242	2,52E-05
Np-238	7,63E-07	Cm-244	2,90E-05
Np-239	4,81E-05	Cm-245	1,01E-06
Pu-238	1,81E-04	Outros	1,18E-06
Pu-239	4,75E-03	PF	2,16E-02

Uma vez que a técnica de reprocessamento PUREX envolve a recuperação de 99,9% de urânio (U) e 99,8% de plutônio (Pu) [37], os dados do percentual recuperado, por grupo de nuclídeos, após o reprocessamento por meio da técnica PUREX são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Percentual recuperado após reprocessamento por PUREX [Elaboração própria]

Componente	U	Pu	AM	PF
Fator	$9,68 \times 10^{-1}$	$8,64 \times 10^{-3}$	$1,75 \times 10^{-3}$	$2,16 \times 10^{-2}$

### 3.1.3 TRU-Th

O combustível óxido misto de transurânico reprocessado diluído em tório (TRU-Th) $O_2$  é um combustível reprocessado por meio da técnica UREX+. Assim como para o MOX, os elementos são recuperados de um combustível de óxido de urânio típico de um PWR com enriquecimento inicial de 3,1% e queima de 33 GWd/t HM depois de cinco anos em armazenamento refrigerado e um ano na instalação de reprocessamento [16]. A composição do combustível UOX queimado é apresentada na Tabela 7.

A técnica de reprocessamento UREX+ envolve a recuperação de 99,95% de urânio (U), 99,5% de plutônio (Pu), 71% de neptúncio (Np), 98% de amerício (Am) e 79% de cúrio (Cm) [36]. Os dados do percentual recuperado, por grupo de núclídeos, após o reprocessamento são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Percentual recuperado após reprocessamento por UREX+ [Elaboração própria]

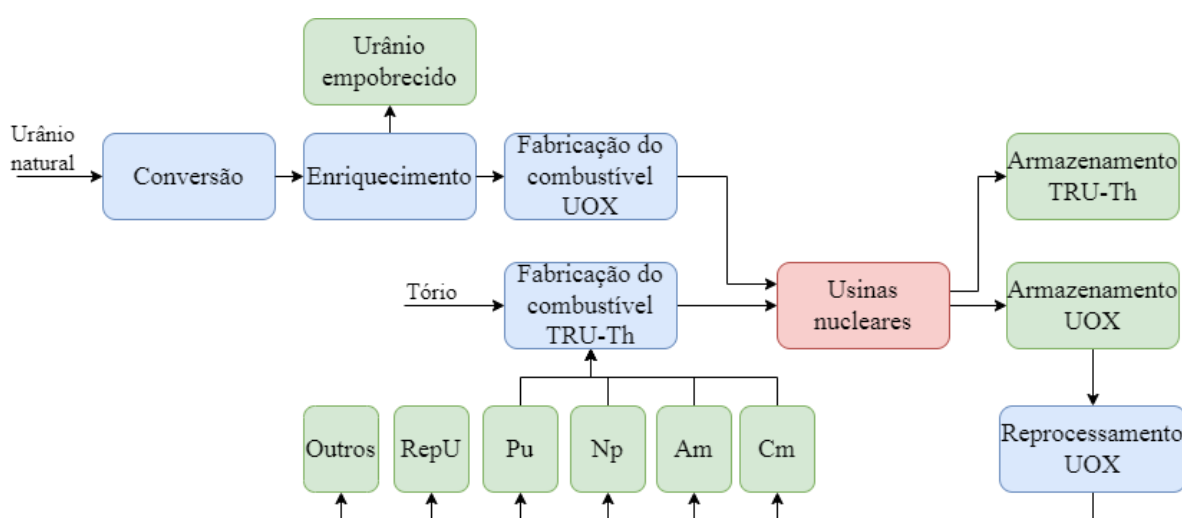
Componente	U	Np	Am	Pu	Cm	outros
Fator	$9,69 \times 10^{-1}$	$3,65 \times 10^{-4}$	$1,88 \times 10^{-4}$	$8,61 \times 10^{-3}$	$4,36 \times 10^{-5}$	$2,22 \times 10^{-2}$

Os isótopos recuperados, Pu, Np, Am e Cm, são utilizados na fabricação do combustível transurânico, ou seja, compõem a matriz do TRU, e posteriormente são diluídos em uma base, neste caso o tório (TRU-Th).

A composição do combustível transurânico diluído em tório, (TRU-Th) $O_2$ , é de 16% TRU e 84% Th em uma base de metal pesado, resultando em 10% em peso de material físsil [36]. Essa composição garante um fator de multiplicação infinito próximo ao *benchmark* de combustível MOX [77].

De forma conservadora, assumiu-se que os reatores usam um terço de TRU-Th e dois terços de UOX no núcleo. O ciclo do combustível  $(\text{TRU-Th})\text{O}_2$  consiste no reprocessamento do combustível UOX queimado previamente acumulado e na extração e beneficiamento do tório para a fabricação do combustível. Vale ressaltar que, para este caso, considerou-se a realização de apenas um ciclo de reprocessamento, ou seja, o combustível UOX queimado é reprocessado uma vez e não há reprocessamento do TRU-Th queimado. O urânio reprocessado não é reciclado e após a etapa de reprocessamento é armazenado, juntamente com os outros actinídeos e produtos de fissão que não são utilizados para a fabricação do combustível. Por fim, após a operação da usina, o combustível queimado vai para o armazenamento refrigerado. O esquema do ciclo do combustível  $(\text{TRU-Th})\text{O}_2$  é apresentado na Figura 13.

Figura 13. Esquema do ciclo do combustível TRU-Th [Elaboração própria]



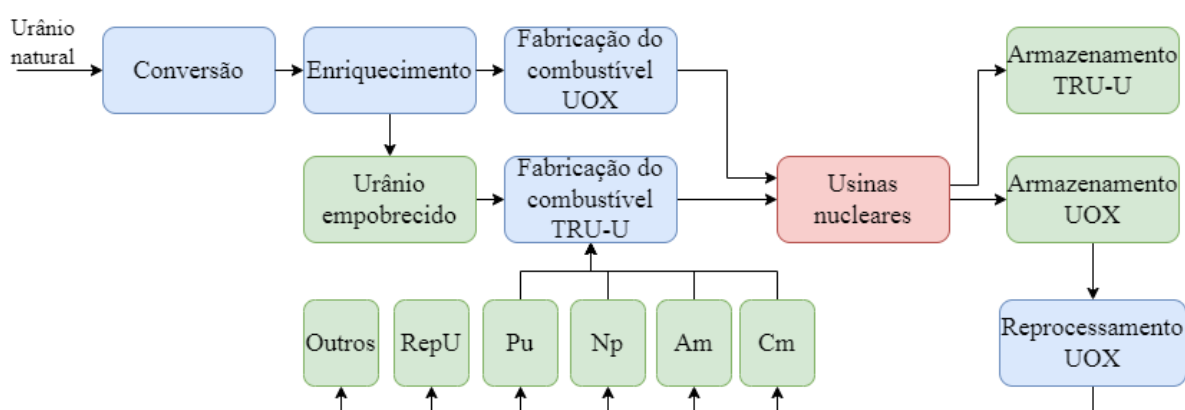
O custo de extração e beneficiamento do tório é US\$ 50/kg [78]. Assumiu-se que os custos de reprocessamento e de fabricação do combustível, respectivamente, US\$ 600/kg HM e US\$ 1200/kg HM, são os mesmos para as duas técnicas de reprocessamento, PUREX e UREX+ [30, 79]. Vale ressaltar que por serem técnicas diferentes, esses custos podem variar dependendo da complexidade, do número de processos e do desenvolvimento comercial de cada uma delas. Apesar de a técnica UREX+ não ser ainda utilizada de forma comercial, ela tende a ser relativamente menos complexa que o PUREX, por conter menos etapas de processos unitários.

### 3.1.4 TRU-U

O combustível óxido misto de transurânico reprocessado diluído em urânio empobrecido, (TRU-U) $O_2$ , assim como o TRU-Th, é um combustível reprocessado por meio da técnica UREX+. A matriz do TRU também é recuperada de um combustível de óxido de urânio típico de um PWR com enriquecimento inicial de 3,1% e queima de 33 GWd/t HM depois de cinco anos em armazenamento refrigerado e um ano na instalação de reprocessamento [16], cuja composição é apresentada na Tabela 7. O percentual dos elementos recuperados pelo UREX+ é o mesmo apresentado na Tabela 9.

O que difere o TRU-U do TRU-Th é que a matriz de transurânico (Pu, Np, Am e Cm) é diluída em urânio empobrecido. A composição do (TRU-U) $O_2$  é de 19,7% TRU e 80,3% U em uma base de metal pesado, totalizando em 12,5% em peso de material físsil [36]. Neste caso, o ciclo é similar ao do (TRU-Th) $O_2$ , mas não há extração de tório, uma vez que se utiliza o urânio empobrecido, gerado pelo processo de enriquecimento, para diluir a matriz de transurânico. Também se considera, de forma conservadora, que os reatores usam um terço de TRU-U e dois terços de UOX no núcleo. Os custos de reprocessamento e fabricação de combustível são os mesmos apresentados para os demais combustíveis reprocessados. O esquema do ciclo do combustível (TRU-U) $O_2$  é apresentado na Figura 14. Assim como nos demais ciclos fechados, considerou-se apenas um ciclo de reprocessamento neste primeiro momento.

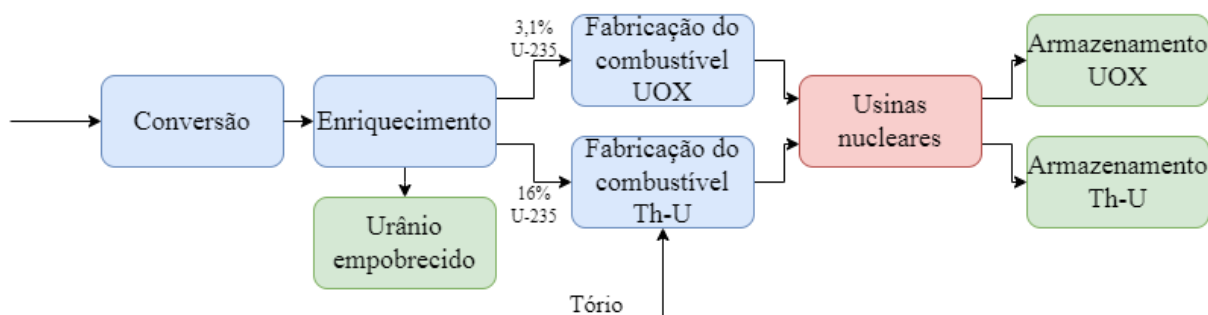
Figura 14. Esquema do ciclo do combustível TRU-U [Elaboração própria]



### 3.1.5 Th-U

O combustível de óxido misto de tório e urânio enriquecido (Th-U)O<sub>2</sub>, assim como o UOX, opera em ciclo aberto. Assume-se que o núcleo do reator é composto por um terço de Th-U e dois terços de UOX. O ciclo do Th-U consiste na extração e beneficiamento de urânio e tório. Após o beneficiamento, o urânio segue para a conversão e então para o enriquecimento. O urânio enriquecido em 16% de U-235 é diluído em tório e o combustível é fabricado. Após a operação da usina, o combustível queimado segue para o armazenamento. O esquema do ciclo do combustível (Th-U)O<sub>2</sub> é apresentado na Figura 15.

Figura 15. Esquema do ciclo do combustível Th-U [Elaboração própria]



O combustível (Th-U)O<sub>2</sub> consiste em 75% Th e 25% U em uma base de metal pesado (HM). O urânio é enriquecido em 16% U-235, resultando em um enriquecimento total de 3,985% U-235 em metal pesado total [15]. O custo de extração e beneficiamento do tório é US\$ 50/kg [78] e os demais custos são os mesmos apresentados para o UOX (Tabela 6).

Ressalta-se, mais uma vez que, um dos principais objetivos da utilização de um combustível tório-urânio (Th-U) é produzir U-233, no combustível queimado, para que este seja reprocessado e reutilizado como combustível em reatores nucleares. Entretanto, salienta-se que este novo combustível reprocessado, a partir do Th-U, não será foco do presente trabalho. Portanto, a análise feita se baseará somente no ciclo aberto do combustível Th-U.

### 3.2 Emissões de GEE para as tecnologias nucleares

Uma vez que nem todas as tecnologias alternativas de ciclo do combustível nuclear analisadas são empregadas comercialmente ou, até mesmo, ainda estejam somente no campo teórico, julga-se que uma avaliação qualitativa das emissões seja mais apropriada. Para os casos dos ciclos de combustível nuclear utilizados apenas em reatores de pesquisa, protótipos ou teóricos, a análise do ciclo de vida pode ser inviável ou imprecisa, fazendo com que os dados quantitativos de emissões não apresentem confiabilidade adequada. Sendo assim, tomaram-se como base os dados apresentados em Poinssot *et al.* (2014) [42] e classificaram-se qualitativamente as emissões, por meio da análise multicritério por soma ponderada, os ciclos do combustível estudados, considerando as particularidades de cada ciclo e as premissas necessárias.

O trabalho “*Assessment of the environmental footprint of nuclear energy systems: Comparison between closed and open fuel cycles*” [42] apresenta e compara as emissões de gases de efeito estufa entre os ciclos aberto e fechado do combustível nuclear, utilizando os combustíveis UOX e MOX, respectivamente. Os reatores considerados para a quantificação das emissões são do mesmo tipo que os considerados no estudo, ou seja, PWR. Além disso, os dados de emissões são subdivididos para cada etapa do ciclo: mineração, conversão, enriquecimento, fabricação do combustível, operação dos reatores, reprocessamento e disposição final. Assim, tal segmentação das emissões por etapa e a participação de cada etapa nas emissões totais foram usadas para avaliar as emissões dos ciclos dos combustíveis considerados. Os dados de emissões para os ciclos aberto e fechado podem ser vistos na Tabela 10.

Tabela 10. Emissões de GEE para ciclos aberto e fechado do combustível. Adaptado de [42]

	Ciclo fechado MOX	Ciclo aberto UOX
	GEE (gCO <sub>2</sub> eq./kWh <sub>e</sub> )	GEE (gCO <sub>2</sub> eq./kWh <sub>e</sub> )
Mineração	1,1704	2,037
Conversão	0,278	0,308
Enriquecimento	0,626	0,696
Fabricação UOX	0,035	0,039
Reator	2,140	2,141
Reprocessamento	0,376	
Fabricação MOX	0,027	
Disposição final	0,104	0,227
<b>Total</b>	<b>5,29</b>	<b>5,45</b>

As principais contribuições, por ordem decrescente de emissões, vêm da operação de reatores, atividades de mineração, enriquecimento, reprocessamento, conversão, disposição final e fabricação do combustível. Além disso, pode-se inferir que a utilização do combustível MOX, quando comparado ao combustível UOX, reduz as emissões das demais etapas do ciclo aberto mais do que aumenta as emissões pela introdução das etapas de reprocessamento e fabricação do combustível MOX. Sendo assim, para cada ciclo do combustível analisado, utilizam-se as seguintes premissas, baseadas nos dados apresentados na Tabela 10, a fim de comparar as emissões entre eles:

- Não há distinção entre as emissões dos diferentes tipos de reprocessamento para MOX e TRU.
- Ciclos com reprocessamento reduzem as necessidades de recursos naturais e conseqüentemente as emissões da mineração.
- Quanto menor a quantidade de urânio enriquecido, menores as emissões na conversão e enriquecimento.
- As emissões da disposição final são menores quanto menor a quantidade de rejeitos.
- Emissões na mineração são equivalentes entre tório e urânio.

Definidas as premissas, os pesos na matriz de multicritério de soma ponderada serão as proporções que cada etapa do ciclo do combustível fechado representa no total de



emissões. Uma vez que o reprocessamento tem um poder de redução maior das emissões do ciclo aberto do que na introdução das novas etapas do ciclo, um fator de correção é utilizado quando o combustível não tiver reprocessamento. Assim, os atributos analisados com seus respectivos pesos são apresentados na tabela X.

Tabela 11. Pesos para a matriz de multicritério de soma ponderada [Elaboração própria]

Etapas do ciclo	Peso
Mineração	0,322
Conversão	0,053
Enriquecimento	0,118
Fabricação UOX	0,006
Reator	0,405
Reprocessamento	0,071
Fabricação MOX	0,005
Disposição final	0,020
Fator de correção	1,030

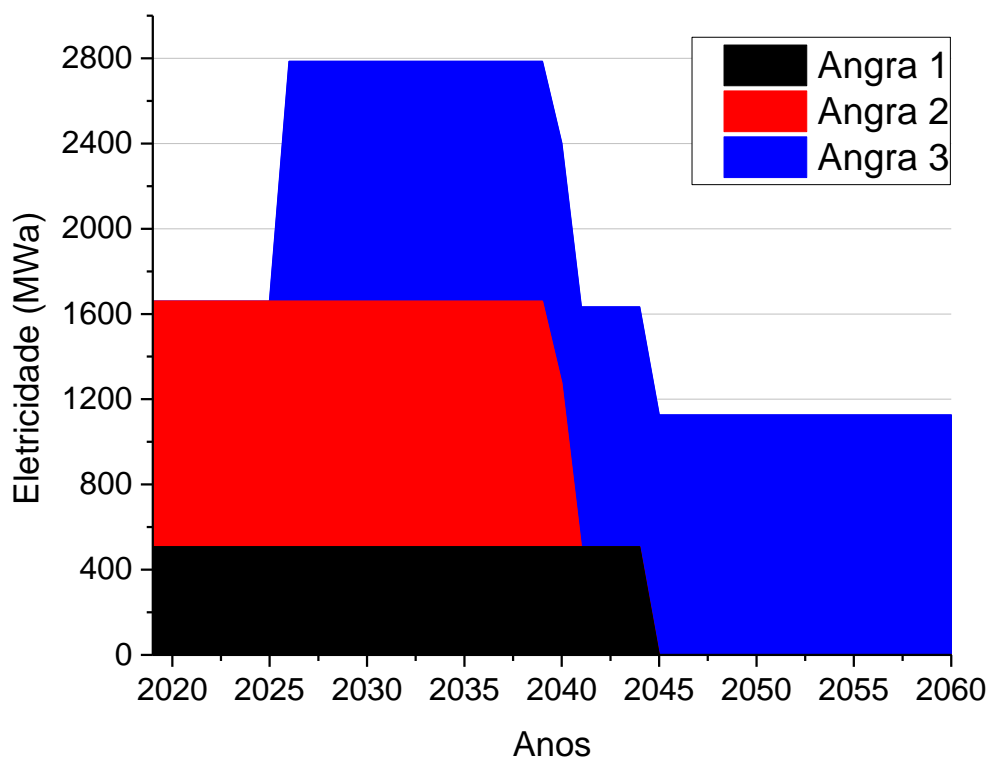
Os valores de cada atributo para cada ciclo do combustível são as quantidades de material processada em cada etapa, transformadas em valores adimensionais. Ou seja, divide-se cada valor de cada atributo pelo maior valor. Assim, por exemplo, o ciclo de combustível que minera mais recurso natural terá maior valor no atributo mineração. Portanto, o combustível que possuir maior soma ponderada é o que possuirá maiores emissões de GEE.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados com os dados detalhados, relativos a cada ciclo do combustível modelado estão expostos no Anexo I. Serão apresentados neste capítulo os resultados de modo a facilitar a comparação entre os ciclos dos combustíveis nucleares.

A oferta de eletricidade do sistema de energia nuclear brasileiro, utilizado como base para comparação dos usos de diferentes combustíveis, está apresentada na Figura 16. Até 2025, a oferta média de eletricidade do sistema de energia nuclear é de 1,66 GWa. Pode-se observar um aumento na oferta total em 2026, devido a entrada de Angra 3 no sistema nuclear nacional, com uma média anual de 2,8 GWa. Uma queda também é perceptível na década de 2040, quando Angra 1 e Angra 2 serão desativadas e a oferta total tornar-se-á equivalente à oferta de Angra 3, igual a 1,13 GWa.

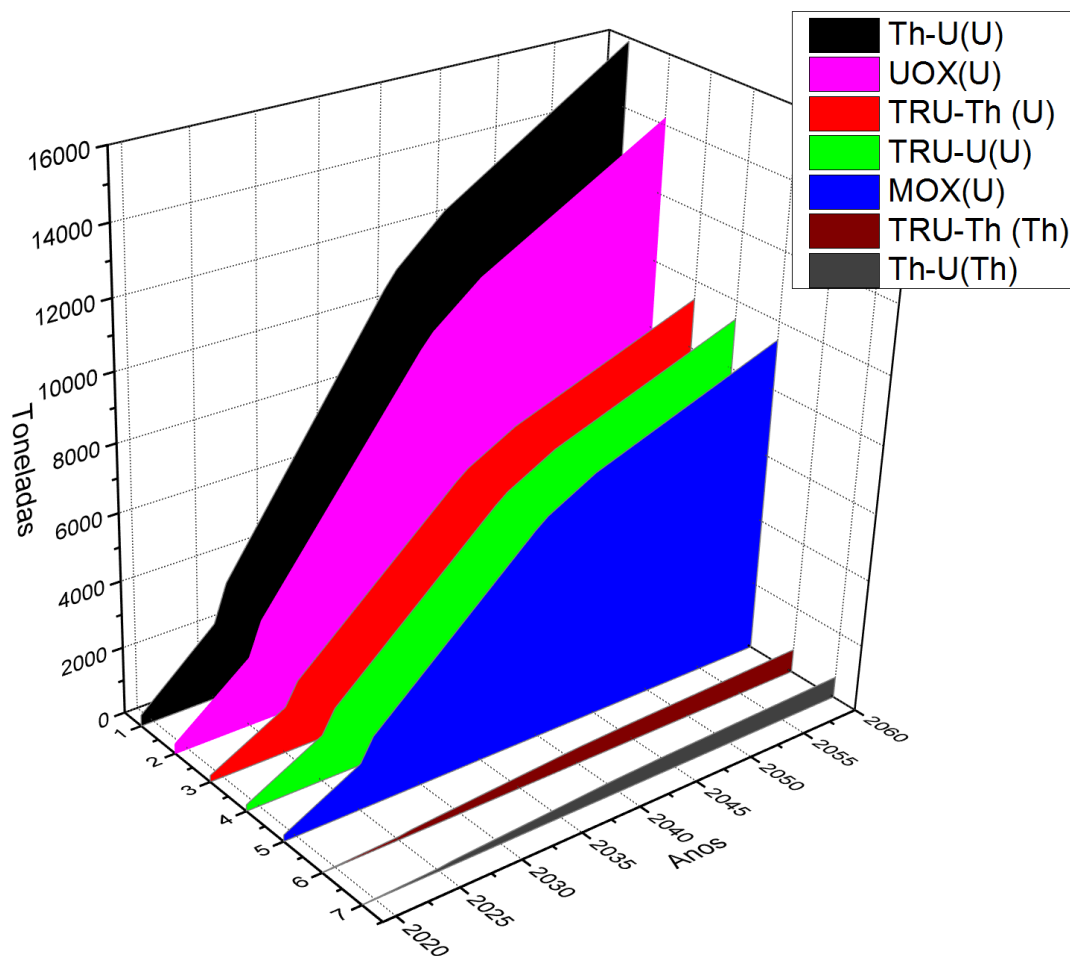
Figura 16. Oferta de eletricidade do sistema de energia nuclear [Elaboração própria]



Os ciclos dos combustíveis analisados se dividem entre os que consomem um ou dois tipos de recursos naturais. Os recursos naturais consumidos diretamente por meio da necessidade de mineração e beneficiamento são o urânio (U) e o tório (Th). Os combustíveis TRU-U, MOX e UOX consomem apenas urânio natural e os combustíveis TRU-Th e Th-U consomem ambos os recursos naturais. Vale ressaltar que os combustíveis MOX e TRU-U, por si só, não consomem diretamente nenhum recurso natural, uma vez que a matriz reprocessada é diluída em urânio empobrecido, material que já foi minerado e está estocado como rejeito, portanto, acaba-se com a necessidade de mineração para a utilização desses combustíveis. O consumo de urânio natural nesses ciclos ocorre devido aos dois terços do núcleo que são compostos de UOX, cerca de 9,5 mil toneladas até 2060. Portanto, tanto o ciclo do MOX quanto do TRU-U são os que menos geram impactos na exploração de recursos naturais e ainda apresentam a vantagem de consumir rejeitos provenientes da etapa de enriquecimento do ciclo de combustível UOX. O consumo acumulado de recursos naturais, por ciclo do combustível nuclear, é apresentado na Figura 17.

Fica evidente, a partir da observação dos resultados, que o combustível que mais gera impactos em relação à exploração de recursos naturais é o Th-U, uma vez que ele é o que mais consome recursos naturais. Entre os demais combustíveis, o Th-U apresenta o maior consumo de urânio (15,9 mil toneladas), além de consumir cerca de 626 toneladas de tório. Seu consumo total de recursos naturais no final do período chega a aproximadamente 16,5 mil toneladas. O combustível UOX aparece logo abaixo, com o segundo maior consumo, chegando a um consumo acumulado de urânio de cerca de 14,2 mil toneladas. O ciclo do TRU-Th, assim como no MOX e no TRU-U, consome urânio devido aos dois terços do núcleo compostos de UOX (9,5 mil toneladas até 2060). Porém o TRU-Th também consome tório para diluir a matriz de TRU, aproximadamente 701 toneladas, totalizando no consumo de 10,2 mil toneladas de recursos naturais.

Figura 17. Consumo acumulado de recursos naturais [Elaboração própria]

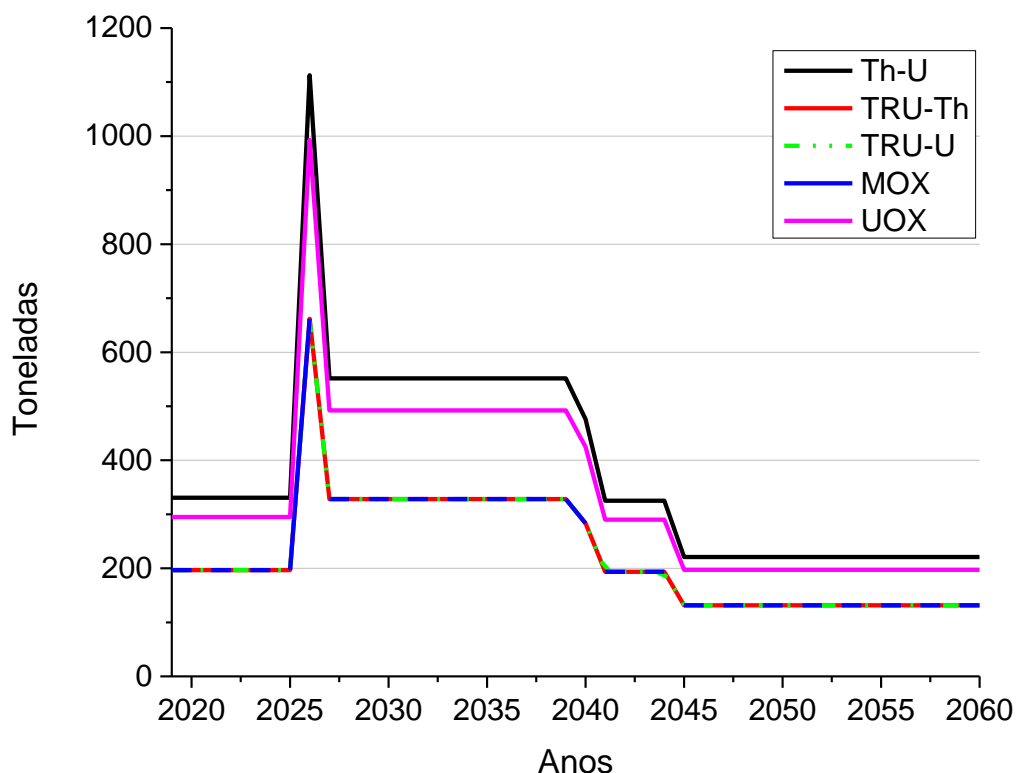


Entre os ciclos dos combustíveis analisados, os ciclos com reprocessamento (MOX, TRU-U e TRU-Th) possuem o processo de conversão do urânio apenas para os dois terços de UOX no núcleo. Já os ciclos do Th-U e UOX necessitam da conversão para todo o combustível. Os requisitos anuais de conversão são apresentados na Figura 18. No início da operação da usina nuclear Angra 3, quando há o primeiro carregamento do núcleo, são necessárias maiores quantidades de combustível, e, portanto, de maiores requisitos de conversão, o que é representado pelo pico no gráfico.

Pode-se observar, em concordância com os dados relativos ao consumo acumulado de urânio, que o combustível que possui maior necessidade de  $U_3O_8$  convertido em  $UF_6$  é o Th-U seguido pelo UOX. As necessidades de conversão para o combustível Th-U são em média 12% maiores que as necessidades para o UOX. Os ciclos dos

combustíveis MOX, TRU-U e TRU-Th possuem os menores requisitos de conversão, aproximadamente 9,5 mil toneladas para todo o período, sendo em média 40,5% menor que os requisitos de conversão para o Th-U. Além disso, os requisitos de conversão para os três ciclos de combustíveis reprocessados são 33,3% menores que para o ciclo do UOX, como esperado, uma vez que nestes combustíveis um terço do combustível total não passa pela etapa de conversão.

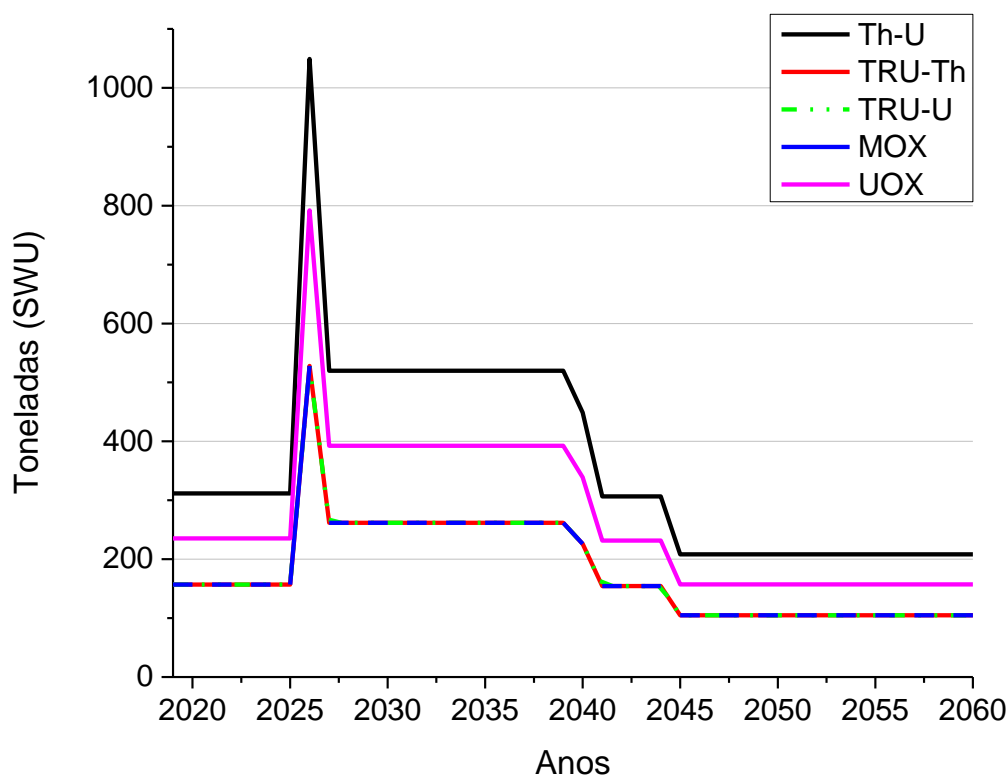
Figura 18. Requisitos anuais de conversão de urânio [Elaboração própria]



Do mesmo modo, as quantidades anuais de unidades de trabalho separativo (SWU) para enriquecimento, para os ciclos dos combustíveis seguem a mesma ordem da conversão. As quantidades anuais de urânio enriquecido para cada um dos ciclos são apresentadas na Figura 19. O resíduo de U-235 no urânio empobrecido é de 0,2%. Assim como na conversão, quando há o primeiro carregamento do núcleo são necessárias maiores quantidades de combustível e, portanto, de enriquecimento, o que é representado pelo pico no gráfico com a introdução de Angra 3.

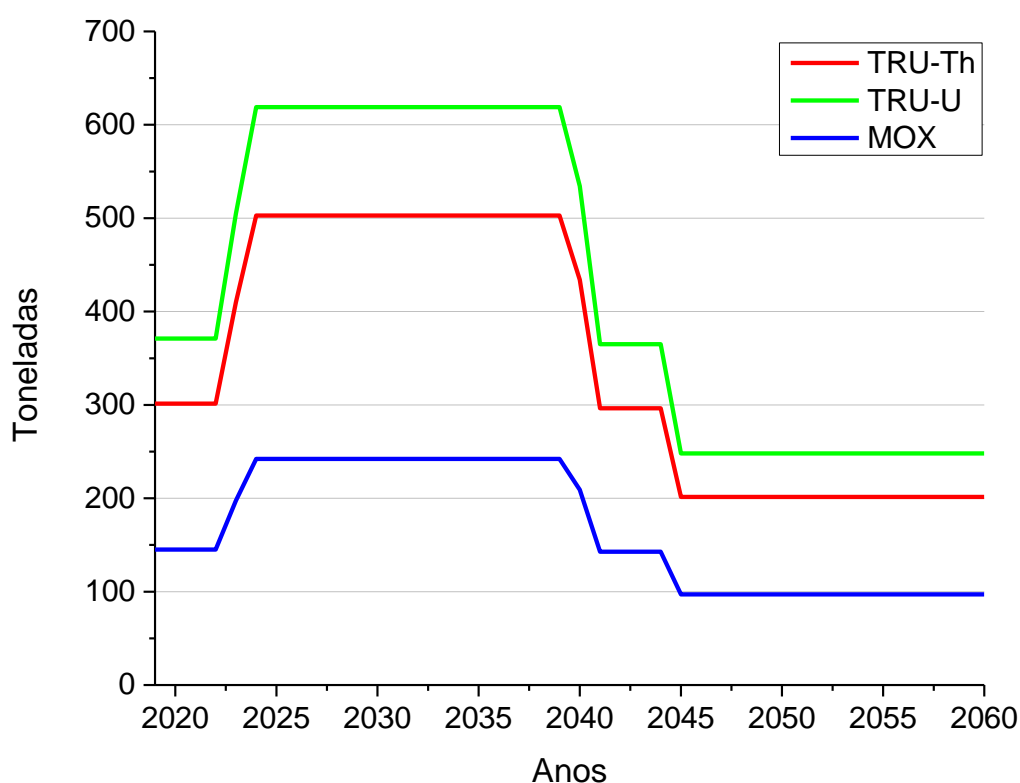
Os maiores requisitos de SWU aparecem no ciclo do combustível Th-U. Lembrando que dois terços do núcleo são compostos por UOX que é enriquecido em 3,1% de U-235 e um terço do núcleo é composto por Th-U, em que o urânio é enriquecido em 16% de U-235. Desse fato, já se esperam altos volumes de urânio empobrecido gerado pelo enriquecimento do urânio para a fabricação do combustível Th-U. Em segunda posição, com maiores necessidades de SWU para enriquecimento, aparece o UOX, uma vez que todo o combustível do núcleo dos reatores é enriquecido em 3,1%. Nesse caso, o ciclo do combustível UOX apresenta 24,5% menos requisitos de SWU que o ciclo do Th-U. Assim como na etapa de conversão, os requisitos de SWU para enriquecimento do urânio para os ciclos com reprocessamento (MOX, TRU-U e TRU-Th) são 33% menores que para o ciclo do combustível UOX, uma vez que um terço do material físsil nesses ciclos provém do reprocessamento. Comparando os ciclos com reprocessamento com o ciclo do combustível Th-U, as necessidades de SWU para o enriquecimento dos combustíveis reprocessados é 49,7% menor que para o Th-U.

Figura 19. Requisitos de SWU para enriquecimento [Elaboração própria]



Os requisitos anuais de reprocessamento, ou seja, as quantidades anuais de combustível queimado que são reprocessados são apresentadas na Figura 20. Podemos observar que o combustível com maior requisito de reprocessamento é o TRU-U chegando a 619 toneladas anuais. Lembrando que a matriz de transurânico representa 19,7% da base de metal pesado do combustível TR-U e não recicla o urânio – que representa maior parte da composição do combustível queimado. Isso faz com que a quantidade de combustível queimado a ser reprocessado seja grande para suprir a necessidade do combustível TRU-U. Por outro lado, o MOX possui os menores requisitos anuais de reprocessamento, chegando a cerca de 242 toneladas anuais entre 2024 e 2040. Isso ocorre pela matriz de plutônio compor pouco mais de 7% no MOX. Já, os requisitos de reprocessamento para o TRU-Th ficam entre o TRU-U e o MOX, uma vez que a matriz de TRU compõe 16% do TRU-Th, chegando a aproximadamente 503 toneladas anuais.

Figura 20. Requisitos anuais de reprocessamento [Elaboração própria]



Os combustíveis que utilizam o urânio natural e enriquecem o mesmo geram o urânio empobrecido (com um resíduo de 0,2% de U-235) como rejeito do processo de

enriquecimento, e alguns combustíveis reprocessados utilizam esse rejeito (urânio empobrecido) com a finalidade de produzir novos combustíveis. Portanto, os inventários de urânio empobrecido, para cada ciclo do combustível são apresentados na Figura 21.

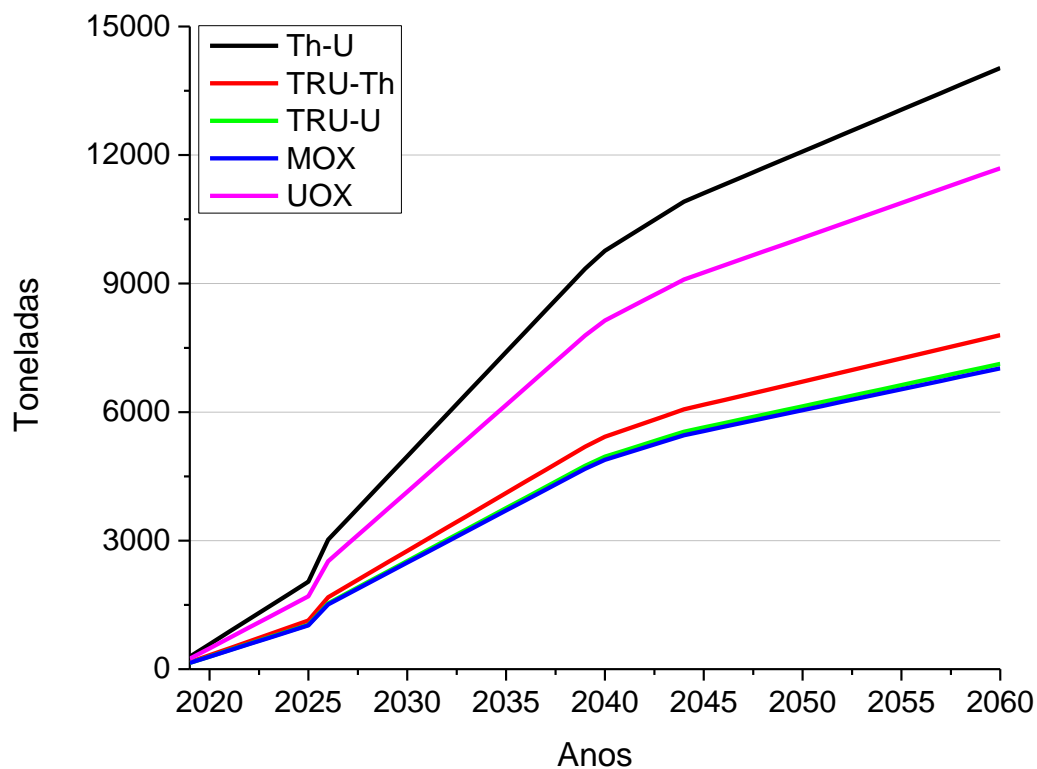
Como esperado, os combustíveis que operam em ciclo aberto e não reutilizam o urânio empobrecido, possuem maiores inventários de urânio empobrecido no final do período analisado. Os combustíveis Th-U e UOX apenas geram urânio empobrecido decorrente do enriquecimento do urânio. Portanto, pode-se observar que os maiores acúmulos desse rejeito ocorrem no emprego desses dois combustíveis. O Th-U é o que mais gera urânio empobrecido devido ao alto grau de enriquecimento de urânio, 16% U-235/U. O acúmulo de urânio empobrecido no ciclo do combustível Th-U é de aproximadamente 14 mil toneladas em 2060. O ciclo do combustível UOX aparece logo em seguida com um acúmulo de cerca de 11,7 mil toneladas de urânio empobrecido.

O ciclo do combustível TRU-Th também não utiliza urânio empobrecido para fabricação do combustível. Apesar de não gerar urânio empobrecido na fabricação do TRU-Th, que compõe um terço do núcleo dos reatores, esse ciclo produz urânio empobrecido devido aos dois terços de combustível UOX. Portanto, o acúmulo de urânio empobrecido para o ciclo do combustível TRU-Th se deve unicamente ao UOX utilizado nos reatores. Aproximadamente 7,8 mil toneladas de urânio empobrecido são acumuladas nesse caso.

Por outro lado, os ciclos dos combustíveis TRU-U e MOX utilizam o urânio empobrecido para diluir a matriz de reprocessamento que é usada para fabricar o combustível. Porém, tanto o ciclo do combustível TRU-U quanto o MOX também geram urânio empobrecido decorrente do enriquecimento do urânio para fabricação do UOX, que compõe um terço do núcleo dos reatores. Para ambos os ciclos, a geração de urânio empobrecido é maior que o consumo do mesmo, portanto, há acúmulo de urânio empobrecido no sistema. Para o TRU-U, o acúmulo é de aproximadamente 7,1 mil toneladas. Por fim, para o MOX, o acúmulo é de cerca de 7 mil toneladas apresentando o menor inventário de urânio empobrecido entre os ciclos dos combustíveis analisados.



Figura 21. Inventários de urânio empobrecido [Elaboração própria]



Devido ao reprocessamento nos ciclos dos combustíveis TRU-Th, TRU-U e MOX, há consumo de combustível queimado, mostrado na Figura 22. Se há reprocessamento, há rejeitos de alto nível provenientes desse processo; assim, na Figura 23, são apresentados os rejeitos derivados do reprocessamento.

Pode-se notar que o ciclo do combustível TRU-U é o que mais consome e reprocessa combustível queimado devido à matriz de TRU compor 19,7% do TRU-U. Portanto, ele é, também, o que mais gera rejeitos no reprocessamento. Ao final do período, foram reprocessadas 17,85 mil toneladas de combustível queimado gerando 17,69 mil toneladas de rejeitos, majoritariamente compostos por urânio reprocessado. Isso equivale a um aproveitamento de cerca de 0,9% do combustível queimado, em que foram reutilizados o Pu, Np, Am e Cu. Por outro lado, destaca-se que os transurânicos, que são os principais responsáveis pela radiotoxicidade de longo prazo do rejeito, são reutilizados no novo combustível, e o rejeito do reprocessamento, composto,

sobretudo por uma matriz de urânio, é um rejeito menos complexo, o que facilita seu manuseio e disposição final.

O combustível TRU-Th é o segundo a consumir maiores quantidades de combustível queimado e a gerar mais rejeitos no reprocessamento, uma vez que a matriz de TRU compõe 16% do TRU-Th. A quantidade de combustível queimado que passou por reprocessamento foi de 14,50 mil toneladas, deixando aproximadamente 14,37 mil toneladas de rejeito. Do mesmo modo que o TRU-U, por utilizar a mesma técnica de reprocessamento (UREX+), o aproveitamento do combustível queimado é de cerca de 0,9%.

Por outro lado, o combustível MOX é o que menos consome combustível queimado e o que menos gera rejeitos. Por reutilizar apenas o plutônio para a fabricação do novo combustível, o aproveitamento do combustível queimado é menor que o dos combustíveis que utilizam a técnica UREX+. O aproveitamento equivale a 0,86%. Os rejeitos são compostos, em ordem decrescente, por urânio reprocessado, produtos de fissão e actínídeos menores. Ao final do período, foram reprocessadas 6,98 mil toneladas de combustível queimado gerando cerca de 6,92 mil toneladas de rejeitos.

Figura 22. Consumo acumulado de combustível queimado [Elaboração própria]

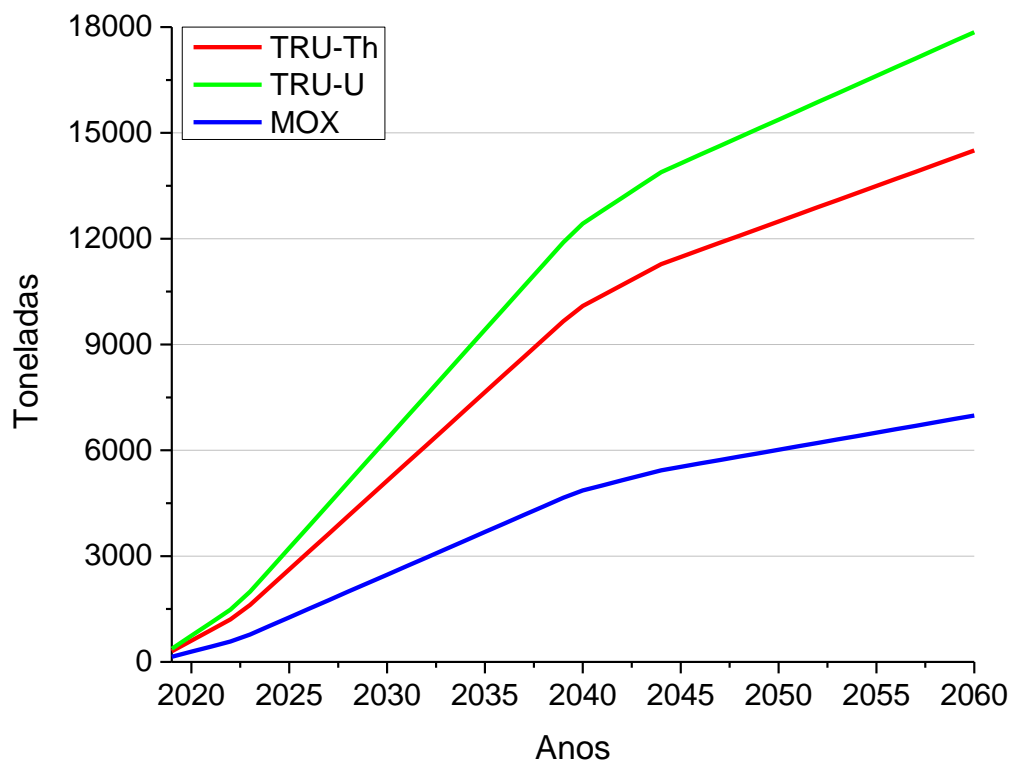
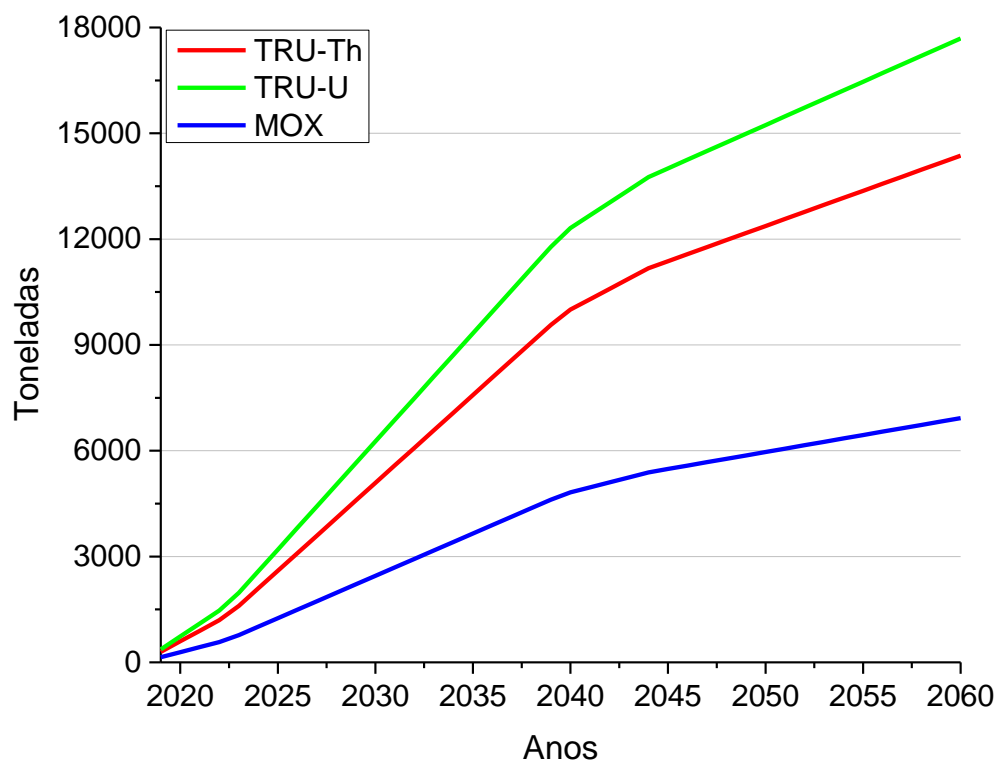


Figura 23. Rejeitos gerados no reprocessamento [Elaboração própria]



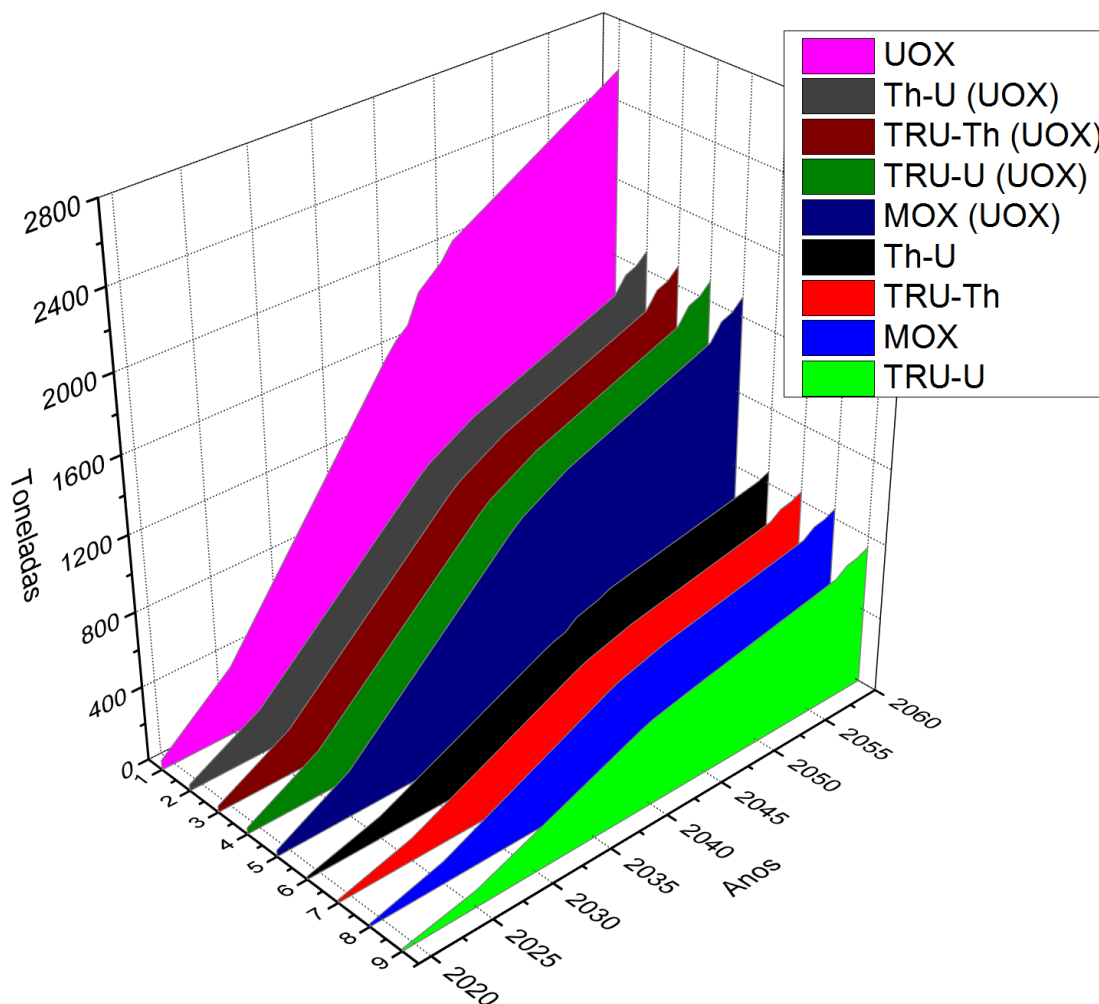
As quantidades de combustível queimado que devem ser armazenadas e gerenciadas para cada ciclo do combustível são mostradas na Figura 24.

Para os ciclos dos combustíveis que operam com dois terços de UOX no núcleo (Th-U, TRU-Th, TRU-U e MOX), os resultados acerca das quantidades de combustível queimado são separados entre o combustível em questão e o UOX. As quantidades de UOX produzidas são iguais chegando a 1,7 mil toneladas ao final do período analisado. As quantidades de combustíveis Th-U, TRU-Th e MOX acumulados, em 2060, são muito próximas, respectivamente, 864 toneladas, 848 toneladas e 851 toneladas. Já a quantidade de TRU-U acumulada corresponde a aproximadamente 741 toneladas.

Por outro lado, o ciclo do combustível UOX, opera apenas com o combustível UOX. O acúmulo total de combustível queimado acumulado para este ciclo é de 2.553,37 toneladas.

Ressalta-se que cada um dos combustíveis queimados possui composições finais diferentes, e, portanto, exigem diferentes gerenciamentos de rejeitos. Todos eles continuam gerando actínídeos menores, de acordo com a taxa de regeneração de combustível obtida na conversão Th-232/U-233 e/ou U-238/Pu-239, com potencial para reprocessamento e reuso. O combustível UOX, MOX e TRU-U geram, principalmente, actínídeos menores do ciclo U-238/Pu-239; o Th-U dos ciclos Th-232/U-233 e U-238/Pu-239; e o TRU-Th do ciclo Th-232/U-233.

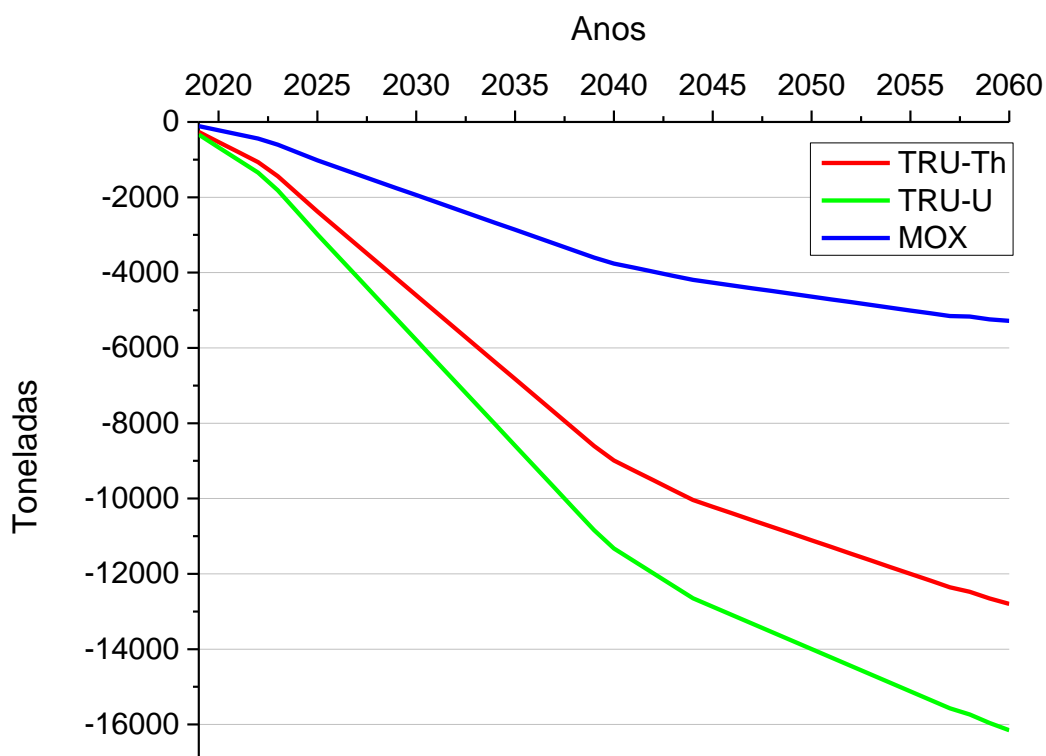
Figura 24. Combustível queimado produzido [Elaboração própria]



Porém, os combustíveis que operam em ciclo fechado (TRU-Th, TRU-U e MOX), reprocessam o UOX queimado gerado nos seus respectivos ciclos. Analisando o consumo de combustível queimado (Figura 22) e a produção de combustível queimado (Figura 24), percebe-se que o consumo de UOX queimado é maior do que a produção em todos eles. Portanto, é necessário reprocessar UOX externo aos ciclos, de modo a atender as necessidades de combustível. Assim, a redução de UOX queimado externo ao ciclo do combustível é apresentada na Figura 25.

Assim, o TRU-U além de reprocessar todo o UOX queimado no seu ciclo, ainda reprocessa 16,2 mil toneladas de combustível queimado externo. Já, o TRU-Th reduz estoques externos de UOX queimado em 12,8 mil toneladas. O MOX possui as menores necessidades de UOX externo ao seu ciclo, aproximadamente 5,3 mil toneladas.

Figura 25. Redução de UOX queimado externo ao ciclo do combustível [Elaboração própria]



A partir dos resultados apresentados e dos fluxos de materiais, obteve-se a matriz de decisão multicritério de soma ponderada, apresentada na Tabela 12, para as emissões de GEE de cada ciclo do combustível.

Como a operação dos reatores é igual para todos os ciclos do combustível, os atributos que mais influenciam nas emissões de GEE são decorrentes da mineração e do enriquecimento, seguidos pelo reprocessamento. Pode-se observar que os ciclos fechados do combustível, ou seja, os que fazem reprocessamento são promissores para uma redução nas emissões de GEE para novas tecnologias nucleares uma vez que possuem menores requisitos em mineração, conversão e enriquecimento. O MOX se sai melhor entre os reprocessados, sendo o combustível mais promissor.

Os combustíveis transurânicos, TRU-Th e TRU-U, aparecem bem próximos ao MOX em relação às menores emissões de GEE, ambos com a mesma pontuação. Apesar de serem todos ciclos fechados, os ciclos dos combustíveis TRU-Th e TRU-U

possuem, principalmente, maiores requisitos de reprocessamento em relação ao MOX, fazendo com que suas emissões sejam maiores nessa etapa.

O combustível UOX aparece em penúltima posição em relação às emissões de GEE devido aos altos requisitos de mineração, enriquecimento e conversão. Esses requisitos só não são maiores que os do combustível Th-U. O Th-U é o combustível que apresenta os maiores requisitos em todas as etapas do ciclo aberto: mineração, conversão, enriquecimento, fabricação do combustível e disposição final. Portanto, ele é o combustível que se apresenta como o maior emissor de GEE dentre todos os analisados.

Tabela 12. Matriz de decisão multicritério de soma ponderada para as emissões de GEE

Ações	Critérios									SOMA PONDERADA
	Mineração	Conversão	Enriquecimento	Fabricação	Reatores	Reprocessamento	Fabricação reprocessado	Disposição	Não reprocessado (Fator de correção)	
Ações	0,322	0,053	0,118	0,006	0,405	0,071	0,005	0,02	1,03	
<b>Th-U</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	1,03	<b>0,95</b>
<b>TRU-Th</b>	0,61	0,59	0,50	0,67	1,00	0,81	0,84	0,99	1	<b>0,78</b>
<b>TRU-U</b>	0,57	0,59	0,50	0,67	1,00	1,00	0,96	0,95	1	<b>0,78</b>
<b>MOX</b>	0,57	0,59	0,50	0,67	1,00	0,39	1,00	0,99	1	<b>0,74</b>
<b>UOX</b>	0,86	0,89	0,76	1,00	1,00	0,00	0,00	0,99	1,03	<b>0,87</b>

Uma vez que as usinas operando com cada um dos combustíveis são as mesmas, os custos de investimento, operação e manutenção podem ser considerados os mesmos para todos os casos. Assim, o que difere são os custos do ciclo do combustível nuclear. Os custos para cada um dos ciclos dos combustíveis são apresentados na Figura 26. Os picos em todos os ciclos representam a entrada de Angra 3 em operação, quando são necessários maiores requisitos de combustível para o primeiro carregamento do núcleo, e, portanto, geram maiores custos.

Os custos variam significativamente dependendo do ciclo de combustível analisado. Em geral, os custos com o armazenamento, nos ciclos abertos, começam

representando uma pequena parcela dos custos, porém no final do período modelado, eles têm representação significativa. Já nos ciclos fechados, os maiores custos são sem dúvidas referentes ao reprocessamento.

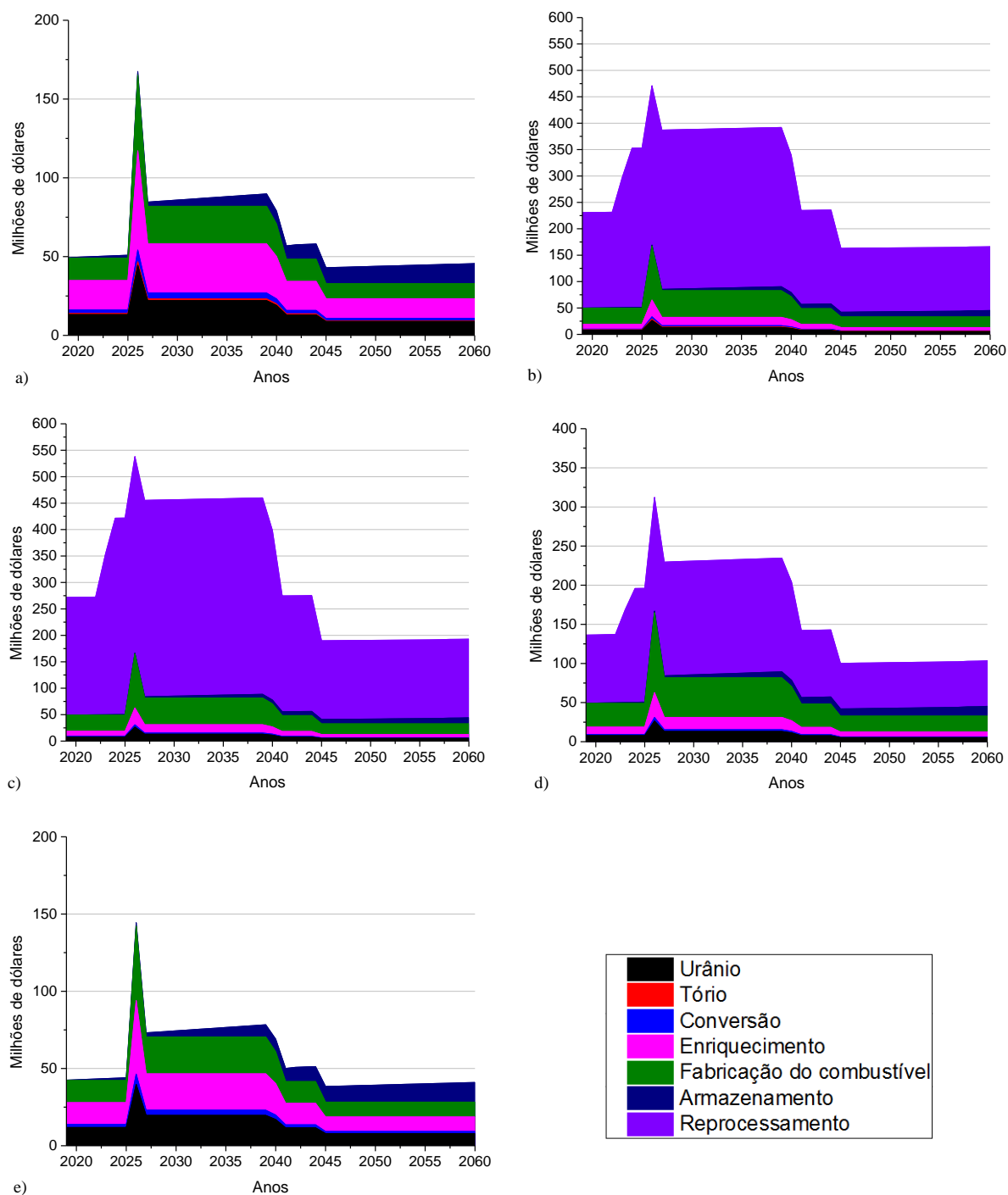
O ciclo do combustível TRU-U apresenta as maiores despesas anuais com o ciclo do combustível, chegando a até cerca de US\$ 450 milhões, após a usina Angra 3 entrar em operação, enquanto o segundo ciclo com maiores custos, o TRU-Th, chega a cerca de US\$ 400 milhões. Nota-se que para os dois ciclos, o principal custo é proveniente do reprocessamento. Os demais custos do ciclo do combustível são semelhantes entre o TRU-U e o TRU-Th.

O ciclo do combustível MOX apesar de reprocessar combustível queimado, apresenta custos de reprocessamento menores que o TRU-U e TRU-Th. Isso se deve à quantidade de combustível reprocessado que é significativamente menor que nos outros dois ciclos, como visto anteriormente. Nesse caso, os maiores custos são do processo de fabricação do combustível. Além disso, o MOX também apresenta os demais custos do ciclo do combustível comparáveis aos dois combustíveis transurânicos.

Para os combustíveis que operam em ciclo aberto, Th-U e UOX, pode-se observar que os custos de fabricação de combustível são semelhantes, porém todos os demais custos do ciclo do combustível são menores para o UOX. Para o UOX, os maiores custos são de fabricação do combustível e enriquecimento seguido pelos custos de recursos naturais. Por outro lado, para o Th-U, os custos de enriquecimento são os mais representativos, seguido pelos custos de fabricação do combustível e recursos naturais.



Figura 26. Despesas anuais com o ciclo do combustível: (a) Th-U; (b) TRU-Th; (c) TRU-U; (d) MOX; (e) UOX [Elaboração própria]



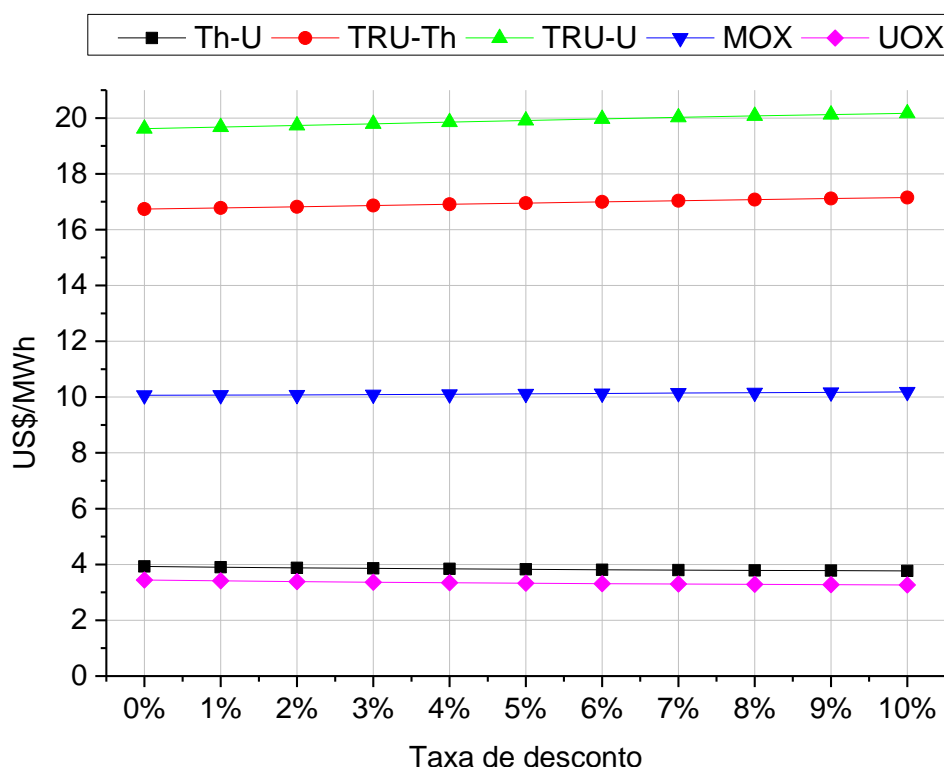
Por fim, na Figura 27, é apresentado o custo nivelado do combustível (LUFC) para o período de 2019 a 2060, ou seja, é o custo unitário do combustível para produzir uma unidade de energia. Ressalta-se mais uma vez que apenas o LUFC foi considerado para a comparação entre os ciclos, dado que o custo nivelado de amortização (LUAC)

e o custo nivelado de O&M (LUOM) de todos os ciclos são iguais, pois consideram um mesmo sistema energético. Portanto, esse resultado permite comparar os custos unitários dos diferentes ciclos do combustível para gerar uma mesma quantidade de energia. Além disso, para entender o possível efeito que diferentes taxas de desconto exercem sobre os custos dos ciclos dos combustíveis, foi realizada uma análise de sensibilidade utilizando um grande intervalo de taxas de desconto reais, variando de 0% a 10%.

Independente da taxa de desconto aplicada, os ciclos dos combustíveis que apresentam os menores LUFC são em ordem crescente: UOX, Th-U, MOX, TRU-Th e TRU-U. Os custos nivelados de combustível considerando a taxa de desconto de 0% são, respectivamente, US\$ 3,44/MWh, US\$ 3,93/MWh, US\$ 10,06/MWh, US\$ 16,74/MWh e US\$ 19,62/MWh. Portanto, percebe-se que os combustíveis reprocessados têm, no geral, maiores custos em relação aos combustíveis de ciclo aberto. Como tanto o UOX quanto o MOX são empregados comercialmente, percebe-se a viabilidade econômica principalmente para o uso do ciclo do combustível Th-U.

Como pode ser observado na Figura 27, o incremento nas taxas de desconto leva a uma redução do LUFC para os ciclos de combustíveis abertos. Por outro lado, um incremento nas taxas de desconto leva a um aumento no LUFC para os ciclos fechados do combustível nuclear. Em geral, o impacto da alteração das taxas de desconto nos custos do ciclo do combustível não é significativo.

Figura 27. Custo nivelado do combustível para o período de 2019 a 2060 [Elaboração própria]



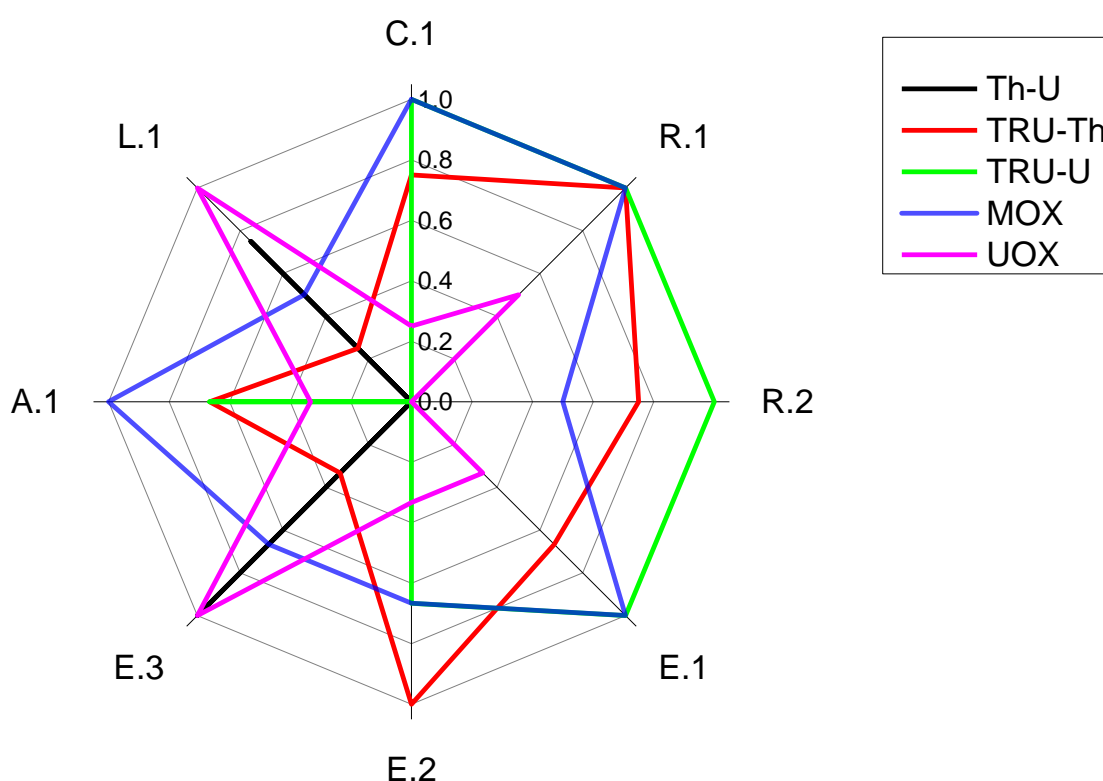
Aplicando a MAVT com auxílio da ferramenta KIND-ET e dos pressupostos considerados para os indicadores, chega-se aos fatores de ponderação para cada indicador-chave, como apresentado na Tabela 13, que ilustra o procedimento de ponderação hierárquica. Pode-se observar que os fatores de ponderação para cada área de avaliação e para os pesos finais obtidos satisfazem a condição de que sua soma seja igual a um.

Tabela 13. Fatores de ponderação [Elaboração própria]

Objetivos de alto nível	Peso dos objetivos	Áreas de avaliação	Peso das áreas	Indicadores-chave	Peso dos indicadores	Peso final
Consumo	0,333	Utilização de recursos naturais	1	C.1	1,0	0,333
		Requerimentos do ciclo do combustível	0,333	R.1	0,5	0,056
R.2	0,5			0,056		
Desempenho	0,333	Gerenciamento de rejeitos	0,333	E.1	0,2	0,022
				E.2	0,4	0,044
				E.3	0,4	0,044
		Ambiental	0,333	A.1	1,0	0,111
Custo	0,333	Econômico	1	L.1	1,0	0,333

Os resultados finais que caracterizam o desempenho de cada ciclo do combustível para cada indicador chave são mostrados de forma sintetizada na Figura 28. Pelo gráfico, pode-se avaliar qualitativamente o desempenho dos ciclos dos combustíveis, como, por exemplo, percebe-se que o MOX tem um bom desempenho em vários indicadores enquanto o Th-U só possui um bom desempenho em relação ao estoque de rejeitos de reprocessamento, E.3, e um desempenho razoável no LUFC, L.1. Portanto, é possível avaliar qual o melhor, ou melhores combustíveis para indicadores específicos.

Figura 28. Desempenho dos ciclos do combustível conforme indicadores [Elaboração própria]



C.1 - Consumo de recursos naturais - R.1 - Requerimentos de SWU - R.2 - Requerimentos de reprocessamento  
 E.1 - Estoque de urânio empobrecido - E.2 - Estoque de combustível queimado  
 E.3 - Estoque de rejeitos do reprocessamento - A.1 - Emissões de GEE - L.1 - LUFC

A partir dos pesos finais e dos desempenhos de cada ciclo para cada indicador, obtém-se a pontuação final para cada ciclo do combustível, como apresentado na Figura 29. Os resultados mostram que o ciclo do combustível com melhor desempenho global, ou seja, a alternativa mais desejável para implementação, é o ciclo do combustível do MOX, considerando os pesos iguais para cada um dos

objetivos principais. Para melhor avaliação dos resultados, a pontuação final para cada ciclo pode ser mais bem analisada quando são consideradas as pontuações detalhadas para cada objetivo de alto nível e as áreas de avaliação desses objetivos, como pode ser observado na Figura 30.

Os benefícios do MOX em relação aos demais combustíveis podem ser analisados pela diferença entre sua pontuação geral em relação aos demais ciclos. Sua pontuação é 34% maior que do segundo colocado, o ciclo do combustível TRU-Th. O comportamento do MOX é melhor em desempenho e consumo, porém perde para os ciclos abertos do combustível no custo. De forma mais detalhada, pode-se concluir que seu bom desempenho ocorre principalmente na utilização de recursos naturais, juntamente com o TRU-U. Outro ponto de destaque para o MOX aparece nas áreas de avaliação ambiental, devido às menores emissões de GEE, e gerenciamento de rejeitos.

O TRU-Th aparece com desempenho mediano nos objetivos de alto nível e nas áreas de avaliação, o que o coloca na segunda posição, porém com pontuação próxima ao terceiro e quarto no ranking. O combustível TRU-U aparece na terceira posição, entre o TRU-Th e o UOX, com pontuações muito próximas. Apesar de possuírem pontuações gerais próximas, quando se avalia em detalhes, pode-se observar que seus desempenhos positivos vêm de objetivos e áreas de avaliação distintas. Enquanto a pontuação do UOX é aumentada devido ao baixo custo do combustível, a do TRU-U tem a pior pontuação nessa área, o que o coloca na terceira posição, e o TRU-Th também apresenta uma pontuação baixa. Já no consumo, o TRU-U apresenta a maior pontuação junto com o MOX, o TRU-Th também apresenta uma boa pontuação, porém, o UOX tem pontuação baixa nessa área. O TRU-U também apresenta a melhor pontuação em requerimentos do ciclo do combustível,

Por outro lado, o Th-U, mesmo com o segundo melhor LUFC, apresenta os piores desempenhos em consumo e desempenho o que o coloca com a pior pontuação, e, portanto, o pior combustível entre os analisados.

Figura 29. Ranking para os ciclos dos combustíveis usando a ferramenta KIND-ET [Elaboração própria]

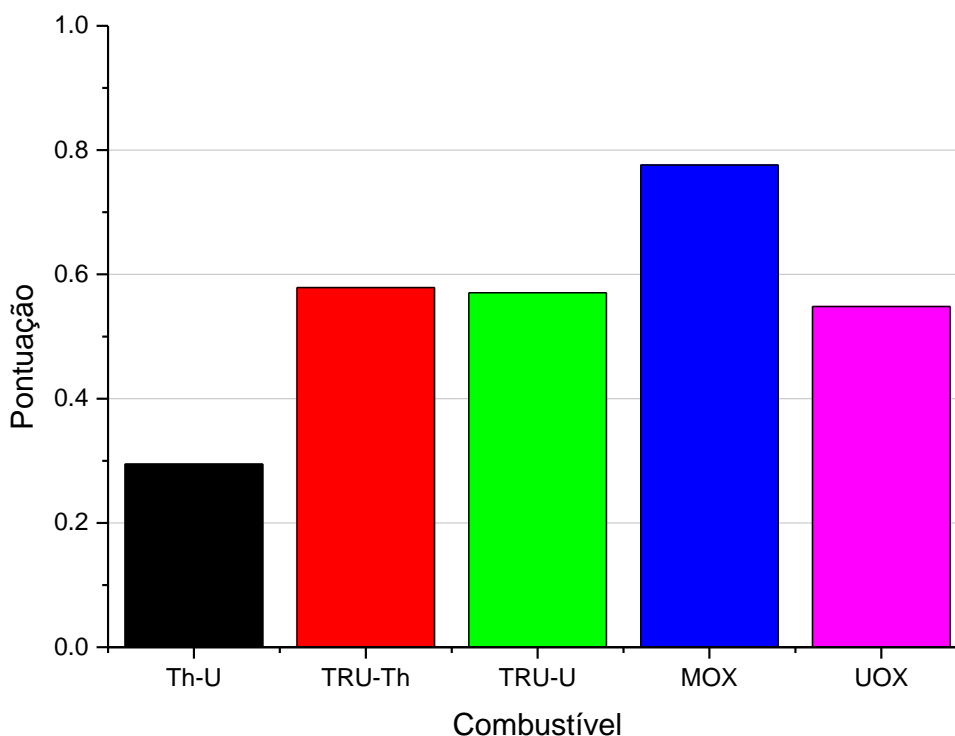
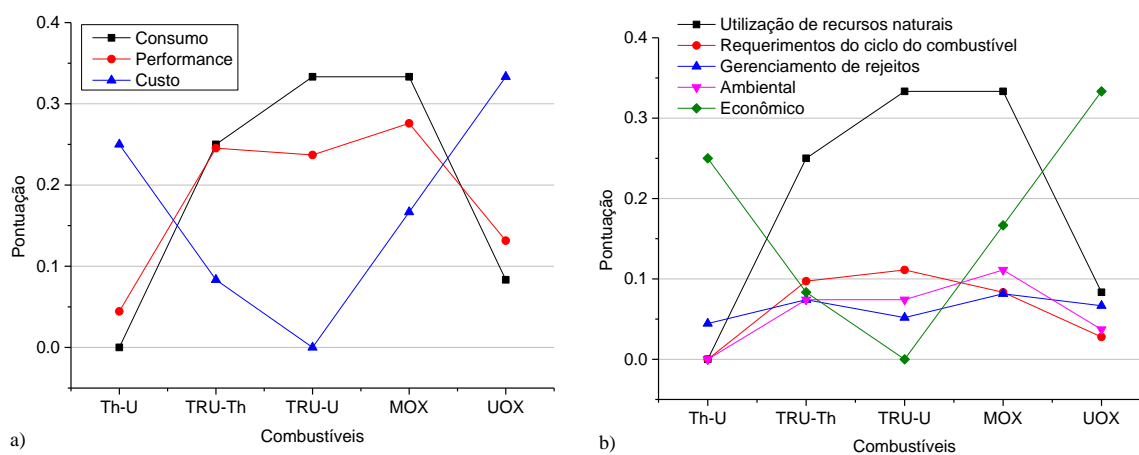


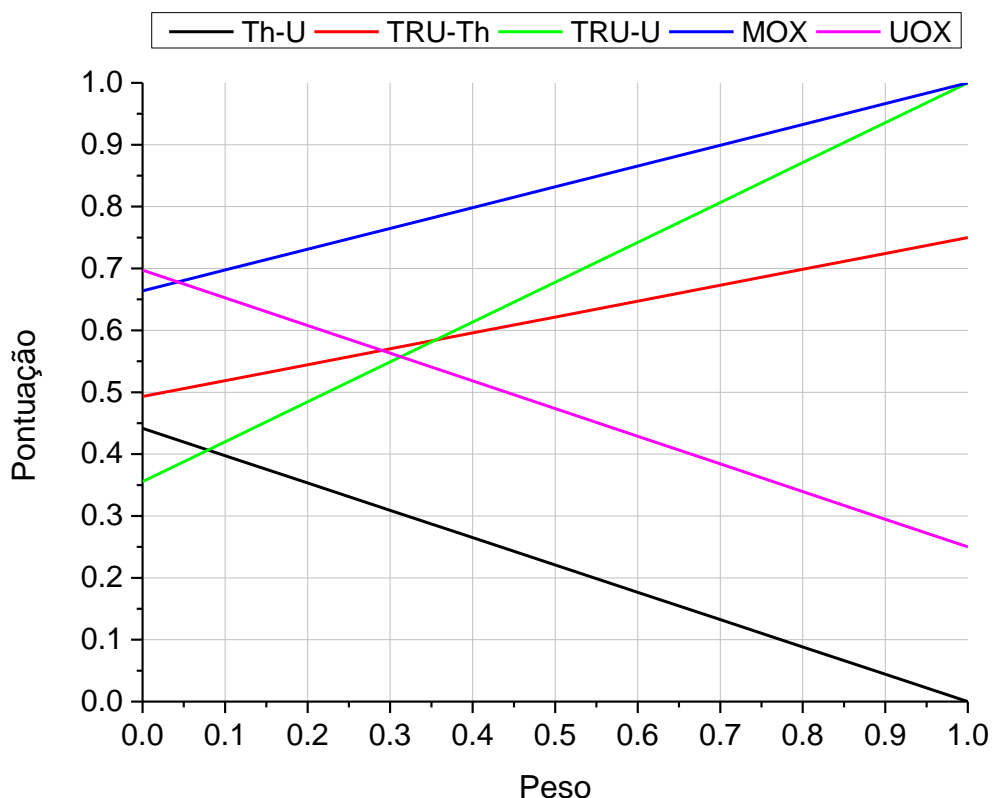
Figura 30. Pontuações detalhadas para os ciclos dos combustíveis: (a) Objetivos de alto nível; (b) Áreas de avaliação [Elaboração própria]



Por fim, a análise de sensibilidade para cada um dos objetivos foi realizada a fim de reduzir as incertezas que podem ser causadas pelos pesos de cada objetivo. A análise de sensibilidade para o consumo é apresentada na Figura 31.

Os combustíveis reprocessados, MOX, TRU-U e TRU-Th, são mais bem avaliados quanto maior é a importância (peso) do consumo de recursos naturais para a avaliação do combustível. Ou seja, quanto maior a preocupação em não minerar novos recursos naturais, mais vantajoso será o uso desses combustíveis. De modo contrário, temos os combustíveis que operam em ciclo aberto. Quanto menos a preocupação com consumo de recursos naturais, mais vantajosos se tornam o UOX e Th-U. Observa-se que caso a importância para o consumo seja próxima de zero, o ciclo do combustível UOX, pode ser o mais vantajoso. Para pesos maiores que 0,05 para o consumo, o combustível MOX se mantém como a melhor alternativa, mas caso somente o consumo tenha importância, o TRU-U também seria a melhor opção juntamente com o MOX. O Th-U aparece como o menos vantajoso a partir do peso 0,09 para o consumo.

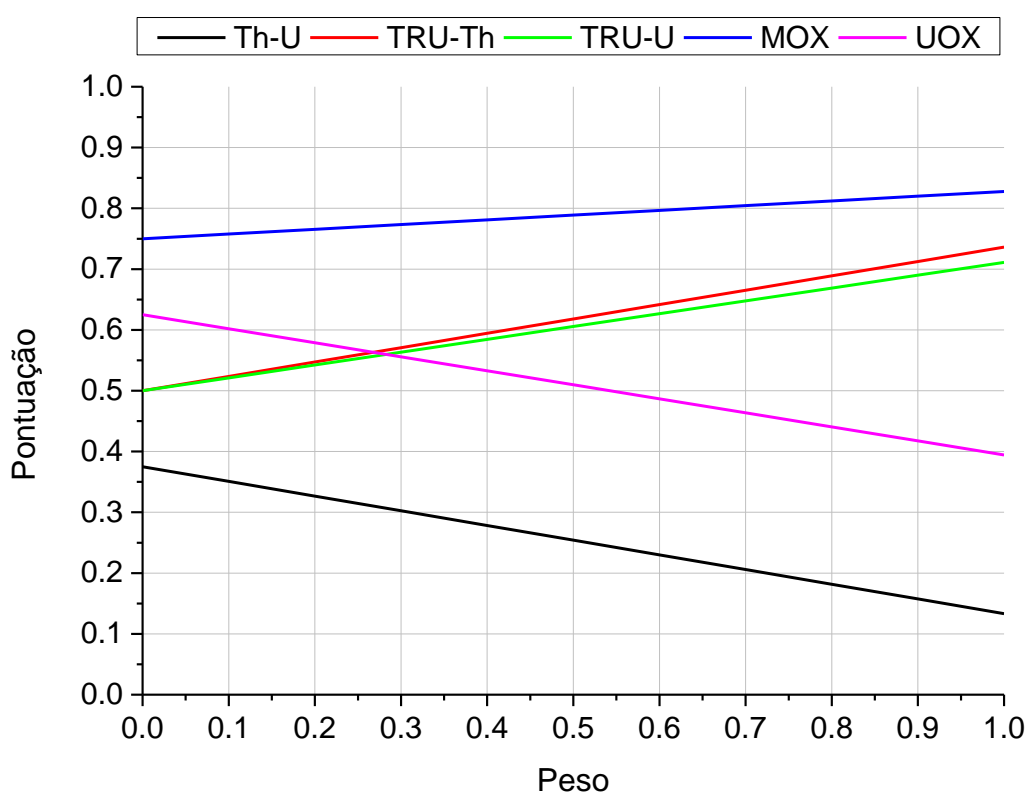
Figura 31. Análise de sensibilidade realizada variando os fatores de ponderação de consumo [Elaboração própria]



A análise de sensibilidade para a desempenho é apresentada na Figura 32. Independente do peso para a desempenho, o combustível MOX se mantém como a

melhor alternativa e o Th-U como a pior. Do mesmo modo que para o consumo, quanto maior a importância do desempenho, os combustíveis UOX e Th-U perdem vantagem. Já os combustíveis MOX, TRU-Th e TRU-U tornam mais promissores quanto maior for o peso do desempenho.

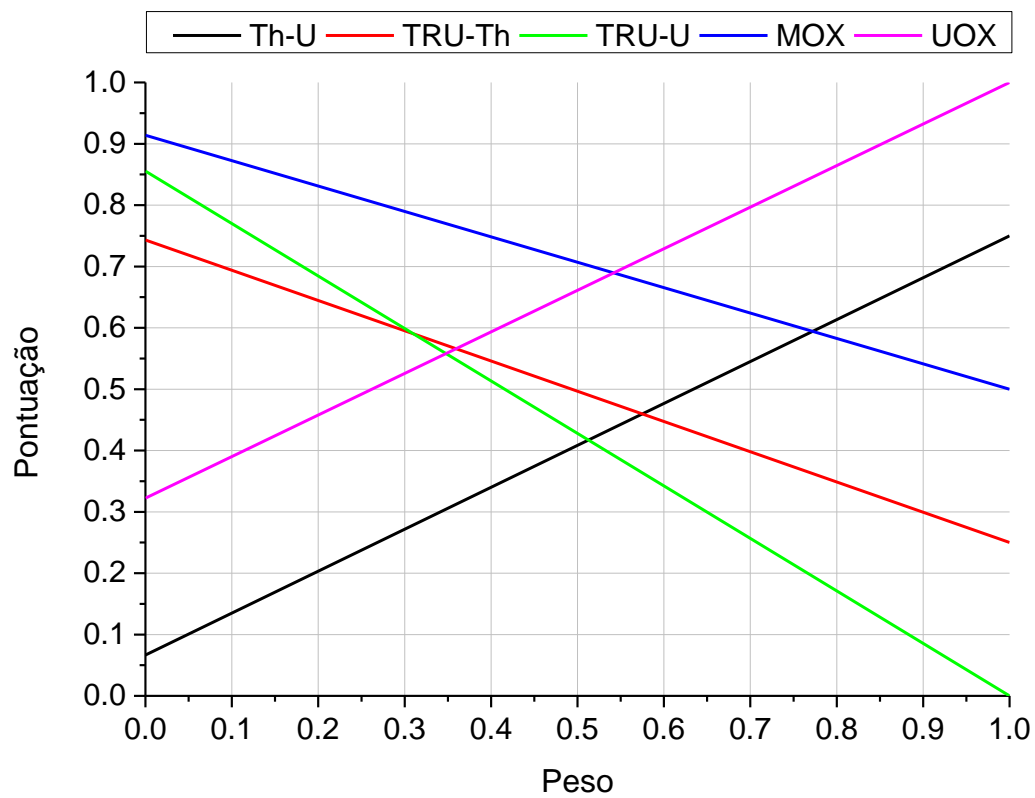
Figura 32. Análise de sensibilidade realizada variando os fatores de ponderação de desempenho [Elaboração própria]



A análise de sensibilidade para o custo é a que apresenta maiores variações como pode ser observado na Figura 33, ou seja, o peso dos custos para a escolha dos combustíveis tem grande importância, o que também pode ser observado pelas inclinações das retas. Caso o custo tenha uma importância maior que 55%, o UOX passa a ser a melhor alternativa. O Th-U, por possuir um custo nivelado de combustível baixo, pode ir para a segunda posição caso uma importância maior que 78% seja dada ao custo. De modo contrário, o TRU-U por possuir um custo de combustível alto em relação aos outros combustíveis, perde vantagem quanto maior o peso do custo. Pode-se observar que os combustíveis reprocessados, no geral, se tornam menos promissores quanto maior a importância dos custos.



Figura 33. Análise de sensibilidade realizada variando os fatores de ponderação de custo [Elaboração própria]



## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho buscou avaliar e comparar diferentes ciclos de combustíveis nucleares considerando diferentes perspectivas e características. O uso do MESSAGE como ferramenta de modelagem permitiu uma análise técnica e econômica dos ciclos de combustíveis e seus resultados serviram de base para avaliar as emissões de GEE e realizar a comparação entre os diferentes combustíveis por meio da análise multicritério com auxílio do *KIND Evaluation Tool*. Os resultados encontrados são essenciais nas definições de estratégias de longo prazo para os sistemas de energia nuclear.

Em se tratando do consumo de recursos naturais e dos impactos diretos, causados ao meio ambiente, decorrentes da mineração, ficam evidentes as desvantagens dos ciclos abertos de combustível nuclear, UOX e Th-U. Além disso, dadas as necessidades de processamento os recursos naturais, os requisitos do ciclo do combustível também são maiores para o UOX e Th-U. Por outro lado, quanto maior a reutilização do combustível queimado, menores são as necessidades de extrair novos recursos naturais o que traz vantagens para os combustíveis reprocessados.

Os combustíveis reprocessados apresentam uma tendência de gerarem menores quantidades de combustível queimado e os rejeitos de reprocessamentos, em geral, apresentam características que os tornam mais simples de serem gerenciados, dada a redução da radiotoxicidade desses rejeitos. Outra vantagem apresentada pelos combustíveis reprocessados diz respeito às emissões de gases de efeito estufa. Devido aos maiores requisitos de processamento dos ciclos abertos de combustível, esses apresentam maiores quantidades de emissões.

Pelo lado dos custos, o combustível convencional, UOX, é o que apresenta o menor custo nivelado de combustível. Os custos de combustível do Th-U são comparáveis ao do UOX, demonstrando a possibilidade de ser viável economicamente. Apesar dos custos maiores para os combustíveis reprocessados, sua viabilidade pode ocorrer devido às características de redução do consumo de recursos naturais e gerenciamento de rejeitos facilitado, além das menores emissões de GEE.

Por fim, entre os combustíveis, o MOX aparece como o mais promissor pela análise multicritério. As análises de sensibilidade mostram a superioridade do combustível em duas das áreas avaliadas, consumo e desempenho. Por outro lado, caso os custos tenham uma importância maior que 55%, para as decisões de qual ciclo do combustível escolher, o combustível convencional UOX, aparece como o mais vantajoso. Combustíveis como TRU-U e TRU-Th apresentam-se em posições intermediárias, juntamente com o UOX, e ainda podem ser opções dependendo das intenções dos tomadores de decisão.

Espera-se que trabalhos futuros possam incluir as análises de ciclos fechados de combustíveis baseados em tório, como, por exemplo, o Th-U, uma vez que a utilização deste combustível gera U-233 para ser reutilizado nos reatores, além de ciclos de combustíveis com múltiplos reciclos que podem apresentar novas alternativas viáveis. Trabalhos futuros também podem explorar outras tecnologias de reatores, além dos PWRs, e construir sistemas de energia com reatores rápidos para melhor aproveitamento do combustível reprocessado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IAEA, International Atomic Energy Agency, *Thorium fuel cycle - Potential benefits and challenges: IAEATECDOC-1450*, Vienna: IAEA, 2005.
- [2] IAEA, International Atomic Energy Agency, *Climate Change and Nuclear Power 2016*, Vienna, 2016.
- [3] IAEA, International Atomic Energy Agency, *Nuclear power and sustainable development*, Vienna: International Atomic Energy Agency, 2016.
- [4] IEA, International Energy Agency, *Energy Technology Perspectives 2017: Catalysing Energy Technology Transformations*, OECD, 2017.
- [5] Paris Agreement, *United nations framework convention on climate change*, Paris, France, 2015.
- [6] IEA, International Energy Agency, *Nuclear Power in a Clean Energy System*, OECD Publishing, Paris, 2019.
- [7] Â. F. M. Ferreira, *Transurânicos em reator à gás de alta temperatura*, Tese (Doutorado em Ciências e Técnicas Nucleares) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2014.
- [8] “1° Workshop Nacional: Desafios e Perspectivas do Uso do Tório,” em *Quarta Semana de Engenharia Nuclear e Ciências das Radiações*, Belo Horizonte, Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.
- [9] INAC 2019, “International Nuclear Atlantic Conference, 2019,” em *Proceedings of the INAC 2019, Nuclear new horizons: fueling our future*, 21 - 25 october, Santos, Brazil, 2019.
- [10] INAC 2021, “International Nuclear Atlantic Conference, 2021,” em *Proceedings of the INAC 2021, Nuclear technology: Reducing our carbon footprint and increasing quality of life*, 29 november - 2 december, Brazil, 2021.

- [11] CNEN, Comissão Nacional de Energia Nuclear, *Processo n° 01341,003928/2021-81. Criação de uma rede nacional de pesquisa em tório*, Rio de Janeiro, 2021.
- [12] IAEA, International Atomic Energy Agency, *Thorium-based Nuclear Fuel: Current Status and Perspectives. IAEA-TECDOC-412*, Vienna, 1987.
- [13] IAEA, International Atomic Energy Agency, *Thorium Fuel Utilization: Options and Trends*, Vienna, 2002.
- [14] R. Liu, Y. Yang, L. Zheng, Z. Liu, S. Feng, X. Lu, L. Jiang, M. Wang e J. Wen, Benchmark experiments on breeding properties of thorium, *Fusion Engineering and Design*, vol. 131, pp. 119-124, 2018.
- [15] J. P. Achilles, F. Cardoso, V. F. Castro, C. Pereira e M. A. F. Veloso, Criticality safety analysis of spent fuel pool for a PWR using UO<sub>2</sub>, MOX, (Th-U)O<sub>2</sub> and (TRU-Th)O<sub>2</sub> fuels, *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, vol. 7, n° 3, pp. 1-16, 2019.
- [16] F. B. A. Monteiro, R. B. d. Faria, Â. Fortini, C. A. M. d. Silva e C. Pereira, Assessment of the Insertion of Reprocessed Fuels and Combined Thorium Fuel Cycles in a PWR System, *MRS Proceedings*, vol. 1769, p. 13, 2015.
- [17] S. Cota e C. Pereira, Neutronic evaluation of the non-proliferating reprocessed nuclear fuels in pressurized water reactors, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 14, n° 10, pp. 829-834, 1997.
- [18] V. F. Castro, C. E. Velasquez e C. Pereira, Criticality and depletion analysis of reprocessed fuel spiked with thorium in a PWR core, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 360, p. 110514, 2020.
- [19] R. Pinheiro, F. LAMEIRAS, M. PEEHS e V. MALY, *Program of Research and Development on the Thorium Utilization in PWR: Final Report (1979-1988); German-Brazilian Cooperation in Scientific Research and Technological Development*, KFA, 1988.

- [20] National Nuclear Laboratory, *Comparison of Thorium and Uranium Fuel Cycles*, Seascale, UK, 2012.
- [21] V. Knapp, M. Matijević, D. Pevec, B. Crnobrnja e D. Lale, Long Term Fuel Sustainable Fission Energy Perspective Relevant for Combating Climate Change, *Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 10, pp. 651-659, 2016.
- [22] IAEA, International Atomic Energy Agency, *Nuclear Energy Development in the 21st Century: Global Scenarios and Regional Trends*, Vienna: IAEA, 2010.
- [23] IAEA, International Atomic Energy Agency, *Role of Thorium to Supplement Fuel Cycles of Future Nuclear Energy*, Vienna: IAEA, 2012.
- [24] IAEA, International Atomic Energy Agency, *Framework for Assessing Dynamic Nuclear Energy Systems for Sustainability, Final Report of the INPRO Collaborative Project on Global Architectures of Innovative Nuclear Energy Systems with Thermal and Fast Reactors and a Closed Nuclear Fuel Cycle (GAINS)*, Vienna, 2013.
- [25] IAEA, International Atomic Energy Agency, *Experience in Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: Country Case Studies*, Vienna, 2018.
- [26] World Nuclear Association, MOX - Mixed Oxide Fuel, 2017. [Online]. Available: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuel-mox.aspx>. [Acesso em 21 janeiro 2022].
- [27] M. T. Tolmasquim, *Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear*, 1 ed., Rio de Janeiro: EPE, 2016.
- [28] M. Heider, Mineração de Energia, em *Economia Mineral do Brasil*, Brasília, DNPM, 2009, pp. 27-94.
- [29] EPE, Empresa de Pesquisa Energética, *Plano Nacional de Energia 2030 – PNE 2030*, vol. 15, Rio de Janeiro: EPE/MME, 2007, p. 2010.

- [30] IAEA, International Atomic Energy Agency, *Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: A User's Guide*, Viena, 2016.
- [31] G. Zhang, D. Niu, Y. Shi, G. Xu, G. Li, H. Zhang, J. Li, L. Cao, Z. Guo, Z. Wang e Y. Qiu, Nuclear fuel cycle modelling using MESSAGE, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 311, nº 2, pp. 1435-1440, 2017.
- [32] R. G. Cochran, E. E. Lewis, N. Tsoulfanidis e W. F. Miller, *The nuclear fuel cycle: analysis and management*, La Grange Park: American Nuclear Society, 1990.
- [33] H. Feiveson, Z. Mian, M. Ramana e F. v. Hippel, *Managing Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Experience and Lessons from Around the World*, International Panel on Fissile Material, 2011.
- [34] M. Salvatores e G. Palmiotti, Radioactive waste partitioning and transmutation within advanced fuel cycles: Achievements and challenges, *Progress in Particle and Nuclear Physics*, vol. 66, nº 1, pp. 144-166, 2011.
- [35] World Nuclear Association, Reprocessing of Used Nuclear Fuel, 2020. [Online]. Available: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/processing-of-used-nuclear-fuel.aspx>. [Acesso em 07 janeiro 2022].
- [36] J. A. Pimentel, *Spent fuel pool analysis for a pwr using different nuclear fuels*, Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2019.
- [37] W. A. Coloma, C. E. Velasquez, G. P. Barros, C. Pereira, M. A. F. Veloso e A. L. Costa, Reprocessing Techniques of LWR Spent Fuel for Reutilization in Hybrid Systems and IV Generation Reactors, *Proceedings of the Eighth International Nuclear Atlantic Conference 2017*, 22-27 de outubro, 2017.
- [38] C. Pereira e M. E. Leite, Non-Proliferating Reprocessed Nuclear Fuels In Pressurized Water Reactors: Fuel Cycle Options, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 25, nº 12, pp. 937-962, 1998.

- [39] OECD/NEA; IAEA, *Uranium 2016: Resources, Production and Demand*, OECD, 2016.
- [40] G. P. Barros, *Combustíveis para ADS*, Tese (Doutorado em Ciências e Técnicas Nucleares) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2014.
- [41] IAEA, International Atomic Energy Agency, *Role of Thorium to Supplement Fuel Cycles of Future Nuclear Energy Systems*. Nuclear Energy Series No. NF-T-2.4, Vienna: IAEA, 2012.
- [42] C. Poinssot, S. Bourg, N. Ouvrier, N. Combernoux, C. Rostaing, M. Vargas-Gonzalez e J. Bruno, Assessment of the environmental footprint of nuclear energy systems: Comparison between closed and open fuel cycles, *Energy*, vol. 69, pp. 199-211, 2014.
- [43] M. Salvatores, Partitioning and transmutation of spent nuclear fuel and radioactive waste, em *Nuclear Fuel Cycle Science and Engineering*, Woodhead Publishing Series in Energy, Woodhead Publishing, 2012, pp. 501-530.
- [44] A. V. Zrodnikov, V. M. Dekusar e O. S. Gurskaya, System levelized fuel cost of electricity generation in a two-component nuclear energy system with a closed uranium-plutonium NFC, *Nuclear Energy and Technology*, vol. 7, nº 4, pp. 303-309, 2021.
- [45] F. B. G. L. Estanislau, A. L. Costa, C. E. Velasquez e C. Pereira, Integrated analysis of the Brazilian nuclear energy system, *International Journal of Energy Research*, vol. 45, pp. 11526-11537, 2021.
- [46] O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer e C. von Stechow, IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation, *Prepared By Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2011.



- [47] A. Kadiyala, R. Kommalapati e Z. Huque, Quantification of the lifecycle greenhouse gas emissions from nuclear power generation systems, *Energies*, vol. 9, nº 11, p. 863, 2016.
- [48] F. B. G. L. Estanislau, *Avaliação de cenários de sistemas de energia nuclear utilizando o MESSAGE*, Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2019.
- [49] F. B. G. L. Estanislau, C. E. Velasquez, A. L. Costa e C. Pereira, Greenhouse gas emissions from nuclear power generation in the Brazilian electricity matrix, *Proceedings of the air pollution conference Brazil 4th CMAS South America*, pp. 6-9, 22-24 de julho, 2019.
- [50] T. S. Carless, W. M. Griffin e P. S. Fischbeck, The environmental competitiveness of small modular reactors: A life cycle study, *Energy*, vol. 114, pp. 84-99, 2016.
- [51] S. M. Rashad e F. H. Hammad, Nuclear power and the environment: comparative assessment of environmental and health impacts of electricity-generating systems, *Applied Energy*, vol. 65, nº 1-4, pp. 211-229, 2000.
- [52] R. Frischknecht, *Life Cycle Inventory Analysis for Decision-Making: Scope-Dependent Inventory System Models and Context-Specific Joint Product Allocation*, Zurich: Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 1998, p. 256.
- [53] V. M. Fthenakis e H. C. Kim, Greenhouse-gas Emissions from Solar Electric- and Nuclear Power: A Life-cycle Study, *Energy Policy*, vol. 35, nº 4, pp. 2549-2557, 2007.
- [54] T. J. SKONE e P. S. E. ENGINEER, *Role of Alternative Energy Sources: Nuclear Technology Assessment*, Department of Energy, NET Laboratory, 2012.

- [55] IIASA, International Institute for Applied Systems Analysis, Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact, [Online]. Available: <https://iiasa.ac.at/models-and-data/model-for-energy-supply-strategy-alternatives-and-their-general-environmental>. [Acesso em 02 Janeiro 2022].
- [56] IAEA, Internacional Atomic Energy Agency, *Message: Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts - User Manual*, International Atomic Energy Agency, Viena, 2007.
- [57] OLADE, The Latin American Energy Organization, *Energy Planning Manual*, 2 ed., Quito, Equador: OLADE, 2017.
- [58] F. B. G. L. e. Estanislau, C. E. Velasquez, A. L. Costa e C. Pereira, Evaluation of the Brazilian nuclear energy system based on once-through and closed nuclear fuel cycles, *Proceedings of the International Nuclear Atlantic Conference 2019*, p. 11, 21-25 de outubro, 2019.
- [59] C. E. Velasquez, F. B. e. Estanislau, A. L. Costa, M. A. F. Veloso e C. Pereira, Scenarios of nuclear energy for countries with different options of nuclear fuel cycle: Utilization and perspective, *Progress in Nuclear Energy*, vol. 136, p. 103747, 2021.
- [60] C. E. Velasques Cabrera, F. B. G. L. e. Estanislau, A. L. Costa, M. A. F. Veloso e C. Pereira, UK nuclear energy system study from 1956 to 2035, *Revista Tecnologia e Sociedade (online)*, vol. 15, p. 360, 2019.
- [61] C. E. Velasquez, F. B. L. e. Estanislau, A. L. Costa e C. Pereira, Assessment of the French nuclear energy system – A case study, *Energy Strategy Reviews*, vol. 30, p. 100513, 2020.
- [62] IIASA, International Institute for Applied Systems Analysis, MESSAGE core formulation, [Online]. Available: [https://docs.messageix.org/en/stable/model/MESSAGE/model\\_core.html](https://docs.messageix.org/en/stable/model/MESSAGE/model_core.html). [Acesso em 15 março 2021].

- [63] C. Romero, *Análisis de las decisiones multicriterio*, Madrid: Isdefe, 1996.
- [64] E. Triantaphyllou, Multi-Criteria Decision Making Methods, em *Multi-criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*, vol. 44, Bonston, MA, Springer, 2000.
- [65] IAEA, International Atomic Energy Agency, *Application of multi-criteria decision analysis methods to comparative evaluation of nuclear energy system options: final report of the INPRO collaborative project KIND*, Vienna, 2019.
- [66] IAEA, International Atomic Energy Agency, *USER INSTRUCTIONS FOR KIND-ET (KIND-EVALUATION TOOL): A multi-attribute value theory based Excel-template for the INPRO project on Key Indicators for Innovative Nuclear Energy Systems (KIND)*, Vienna, 2017.
- [67] Eletronuclear, Eletronuclear e Westinghouse assinam carta de intenções, 2020. [Online]. Available: <https://www.eletronuclear.gov.br/Imprensa-e-Midias/Paginas/Eletronuclear-e-Westinghouse-assinam-carta-de-inten%C3%A7%C3%B5es.aspx#>. [Acesso em 14 julho 2020].
- [68] IAEA, International Atomic Energy Agency, Power reactor information system (PRIS), [Online]. Available: <http://www.iaea.org/pris>. [Acesso em 06 janeiro 2020].
- [69] Canal Energia, Operação de Angra 3 em 2026 é uma das frentes de atuação do Brasil na área nuclear, diz ministro, 2020. [Online]. Available: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53112100/operacao-de-angra-3-em-2026-e-uma-das-frentes-de-atuacao-do-brasil-na-area-nuclear-diz-ministro>. [Acesso em 14 07 2020].
- [70] Eletronuclear, Angra 3, [Online]. Available: <https://www.eletronuclear.gov.br/Nossas-Atividades/Paginas/Angra-3.aspx>. [Acesso em 14 julho 2020].

- [71] Eletronuclear, Informações de Angra 1, [Online]. Available: <http://www.eletronuclear.gov.br/Nossas-Atividades/Paginas/Informacoes-de-Angra-1.aspx>. [Acesso em 26 janeiro 2020].
- [72] Eletronuclear, Informações de Angra 2, [Online]. Available: <http://www.eletronuclear.gov.br/Nossas-Atividades/Paginas/Informacoes-de-Angra-2.aspx>. [Acesso em 26 janeiro 2020].
- [73] Eletrobras Eletronuclear, *Guia Eletrobras Eletronuclear de Pronta Resposta, Coordenação de Relacionamento com a Mídia*, Rio de Janeiro, 2015.
- [74] Reuters, Currencies, [Online]. Available: <https://www.reuters.com/finance/currencies>. [Acesso em 17 janeiro 2020].
- [75] J. J. Duderstadt e L. J. Hamilton, *Nuclear reactor analysis*, vol. 84, New York: Wiley, 1976.
- [76] UxC, The Nuclear Fuel Price Reporter, [Online]. Available: <https://www.uxc.com/>. [Acesso em 02 janeiro 2020].
- [77] G. O'Connor e P. Liem, *Burn-up Credit Criticality Benchmark, Phase IV-B: Results and Analysis of MOX Fuel Depletion Calculations*, France, 2003.
- [78] S. Ashley, B. Lindley, G. Parks, W. Nuttall, R. Gregg, K. Hesketh, U. Kannan, P. Krishnani, B. Singh, A. Thakur, M. Cowper e A. Talamo, Fuel cycle modelling of open cycle thorium-fuelled nuclear energy systems, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 69, pp. 314-330, 2014.
- [79] IAEA, International Atomic Energy Agency, *Spent Fuel Reprocessing Options*, Vienna, 2008.

## ANEXO I – RESULTADOS DOS CICLOS DOS COMBUSTÍVEIS

Tabela 14. Oferta de eletricidade do sistema de energia nuclear (MW)

Ano	Angra 1	Angra 2	Angra 3	Ano	Angra 1	Angra 2	Angra 3
2019	507.22	1152.6	0	2040	507.22	768.4	1125.48
2020	507.22	1152.6	0	2041	507.22	0	1125.48
2021	507.22	1152.6	0	2042	507.22	0	1125.48
2022	507.22	1152.6	0	2043	507.22	0	1125.48
2023	507.22	1152.6	0	2044	507.22	0	1125.48
2024	507.22	1152.6	0	2045	0	0	1125.48
2025	507.22	1152.6	0	2046	0	0	1125.48
2026	507.22	1152.6	1125.48	2047	0	0	1125.48
2027	507.22	1152.6	1125.48	2048	0	0	1125.48
2028	507.22	1152.6	1125.48	2049	0	0	1125.48
2029	507.22	1152.6	1125.48	2050	0	0	1125.48
2030	507.22	1152.6	1125.48	2051	0	0	1125.48
2031	507.22	1152.6	1125.48	2052	0	0	1125.48
2032	507.22	1152.6	1125.48	2053	0	0	1125.48
2033	507.22	1152.6	1125.48	2054	0	0	1125.48
2034	507.22	1152.6	1125.48	2055	0	0	1125.48
2035	507.22	1152.6	1125.48	2056	0	0	1125.48
2036	507.22	1152.6	1125.48	2057	0	0	1125.48
2037	507.22	1152.6	1125.48	2058	0	0	1125.48
2038	507.22	1152.6	1125.48	2059	0	0	1125.48
2039	507.22	1152.6	1125.48	2060	0	0	1125.48

Tabela 15. Consumo acumulado de recursos naturais (t)

Ano	Th-U		TRU-Th		TRU-U	MOX	UOX
	Urânio	Tório	Urânio	Tório	Urânio	Urânio	Urânio
2019	330.56	13.00	196.64	14.56	196.64	196.64	294.96
2020	661.11	26.01	393.28	29.13	393.28	393.28	589.91
2021	991.67	39.01	589.91	43.69	589.91	589.92	884.87
2022	1322.22	52.01	786.55	58.26	786.55	786.56	1179.83
2023	1652.78	65.02	983.19	72.82	983.19	983.20	1474.79
2024	1983.33	78.02	1179.83	87.38	1179.83	1179.83	1769.74
2025	2313.89	91.03	1376.47	101.95	1376.47	1376.47	2064.70
2026	3426.68	134.80	2038.43	150.98	2038.43	2038.44	3057.65
2027	3978.21	156.50	2366.53	175.28	2366.53	2366.54	3549.79
2028	4529.75	178.19	2694.62	199.58	2694.62	2694.63	4041.93
2029	5081.29	199.89	3022.72	223.88	3022.72	3022.73	4534.08
2030	5632.82	221.59	3350.81	248.18	3350.81	3350.82	5026.22
2031	6184.36	243.28	3678.90	272.48	3678.90	3678.92	5518.36
2032	6735.90	264.98	4007.00	296.78	4007.00	4007.01	6010.50
2033	7287.43	286.68	4335.09	321.08	4335.09	4335.11	6502.64
2034	7838.97	308.37	4663.19	345.38	4663.19	4663.20	6994.78
2035	8390.51	330.07	4991.28	369.68	4991.28	4991.30	7486.92
2036	8942.05	351.77	5319.37	393.98	5319.37	5319.39	7979.06
2037	9493.58	373.46	5647.47	418.28	5647.47	5647.49	8471.20
2038	10045.12	395.16	5975.56	442.58	5975.56	5975.58	8963.34
2039	10596.66	416.86	6303.66	466.88	6303.66	6303.68	9455.49
2040	11072.76	435.59	6586.88	487.86	6586.88	6586.90	9880.31
2041	11397.99	448.38	6780.35	502.19	6780.35	6780.37	10170.52
2042	11723.22	461.17	6973.82	516.51	6973.82	6973.84	10460.73
2043	12048.45	473.97	7167.29	530.84	7167.29	7167.31	10750.93
2044	12373.68	486.76	7360.76	545.17	7360.76	7360.78	11041.14
2045	12594.66	495.46	7492.21	554.91	7492.21	7492.24	11238.32
2046	12815.65	504.15	7623.67	564.65	7623.67	7623.70	11435.50
2047	13036.63	512.84	7755.12	574.38	7755.12	7755.15	11632.69
2048	13257.61	521.53	7886.58	584.12	7886.58	7886.61	11829.87
2049	13478.59	530.23	8018.04	593.85	8018.04	8018.06	12027.05
2050	13699.57	538.92	8149.49	603.59	8149.49	8149.52	12224.24
2051	13920.56	547.61	8280.95	613.33	8280.95	8280.98	12421.42
2052	14141.54	556.31	8412.40	623.06	8412.40	8412.43	12618.60
2053	14362.52	565.00	8543.86	632.80	8543.86	8543.89	12815.79
2054	14583.50	573.69	8675.32	642.54	8675.32	8675.34	13012.97
2055	14804.48	582.39	8806.77	652.27	8806.77	8806.80	13210.15
2056	15025.47	591.08	8938.23	662.01	8938.23	8938.26	13407.33
2057	15246.45	599.77	9069.68	671.74	9069.68	9069.71	13604.52
2058	15467.43	608.47	9201.14	681.48	9201.14	9201.17	13801.70
2059	15688.41	617.16	9332.60	691.22	9332.60	9332.62	13998.88
2060	15909.39	625.85	9464.05	700.95	9464.05	9464.08	14196.07

Tabela 16. Requisitos anuais de conversão de urânio (t)

Ano	Th-U	MOX	UOX	TRU-Th	TRU-U
2019	330.56	196.64	294.96	196.64	196.64
2020	330.56	196.64	294.96	196.64	196.64
2021	330.56	196.64	294.96	196.64	196.64
2022	330.56	196.64	294.96	196.64	196.64
2023	330.56	196.64	294.96	196.64	196.64
2024	330.56	196.64	294.96	196.64	196.64
2025	330.56	196.64	294.96	196.64	196.64
2026	1112.79	661.97	992.95	661.97	661.97
2027	551.54	328.10	492.14	328.09	328.09
2028	551.54	328.10	492.14	328.09	328.09
2029	551.54	328.10	492.14	328.09	328.09
2030	551.54	328.10	492.14	328.09	328.09
2031	551.54	328.10	492.14	328.09	328.09
2032	551.54	328.10	492.14	328.09	328.09
2033	551.54	328.10	492.14	328.09	328.09
2034	551.54	328.10	492.14	328.09	328.09
2035	551.54	328.10	492.14	328.09	328.09
2036	551.54	328.10	492.14	328.09	328.09
2037	551.54	328.10	492.14	328.09	328.09
2038	551.54	328.10	492.14	328.09	328.09
2039	551.54	328.10	492.14	328.09	328.09
2040	476.10	283.22	424.83	283.22	283.22
2041	325.23	193.47	290.21	193.47	193.47
2042	325.23	193.47	290.21	193.47	193.47
2043	325.23	193.47	290.21	193.47	193.47
2044	325.23	193.47	290.21	193.47	193.47
2045	220.98	131.46	197.18	131.46	131.46
2046	220.98	131.46	197.18	131.46	131.46
2047	220.98	131.46	197.18	131.46	131.46
2048	220.98	131.46	197.18	131.46	131.46
2049	220.98	131.46	197.18	131.46	131.46
2050	220.98	131.46	197.18	131.46	131.46
2051	220.98	131.46	197.18	131.46	131.46
2052	220.98	131.46	197.18	131.46	131.46
2053	220.98	131.46	197.18	131.46	131.46
2054	220.98	131.46	197.18	131.46	131.46
2055	220.98	131.46	197.18	131.46	131.46
2056	220.98	131.46	197.18	131.46	131.46
2057	220.98	131.46	197.18	131.46	131.46
2058	220.98	131.46	197.18	131.46	131.46
2059	220.98	131.46	197.18	131.46	131.46
2060	220.98	131.46	197.18	131.46	131.46

Tabela 17. Requisitos anuais de SWU para enriquecimento (t)

Ano	Th-U	MOX	UOX	TRU-Th	TRU-U
2019	311.62	156.86	235.28	156.86	156.86
2020	311.62	156.86	235.28	156.86	156.86
2021	311.62	156.86	235.28	156.86	156.86
2022	311.62	156.86	235.28	156.86	156.86
2023	311.62	156.86	235.28	156.86	156.86
2024	311.62	156.86	235.28	156.86	156.86
2025	311.62	156.86	235.28	156.86	156.86
2026	1049.05	528.04	792.06	528.04	528.04
2027	519.95	261.72	392.57	261.72	261.72
2028	519.95	261.72	392.57	261.72	261.72
2029	519.95	261.72	392.57	261.72	261.72
2030	519.95	261.72	392.57	261.72	261.72
2031	519.95	261.72	392.57	261.72	261.72
2032	519.95	261.72	392.57	261.72	261.72
2033	519.95	261.72	392.57	261.72	261.72
2034	519.95	261.72	392.57	261.72	261.72
2035	519.95	261.72	392.57	261.72	261.72
2036	519.95	261.72	392.57	261.72	261.72
2037	519.95	261.72	392.57	261.72	261.72
2038	519.95	261.72	392.57	261.72	261.72
2039	519.95	261.72	392.57	261.72	261.72
2040	448.83	225.92	338.88	225.92	225.92
2041	306.60	154.33	231.49	154.33	154.33
2042	306.60	154.33	231.49	154.33	154.33
2043	306.60	154.33	231.49	154.33	154.33
2044	306.60	154.33	231.49	154.33	154.33
2045	208.32	104.86	157.29	104.86	104.86
2046	208.32	104.86	157.29	104.86	104.86
2047	208.32	104.86	157.29	104.86	104.86
2048	208.32	104.86	157.29	104.86	104.86
2049	208.32	104.86	157.29	104.86	104.86
2050	208.32	104.86	157.29	104.86	104.86
2051	208.32	104.86	157.29	104.86	104.86
2052	208.32	104.86	157.29	104.86	104.86
2053	208.32	104.86	157.29	104.86	104.86
2054	208.32	104.86	157.29	104.86	104.86
2055	208.32	104.86	157.29	104.86	104.86
2056	208.32	104.86	157.29	104.86	104.86
2057	208.32	104.86	157.29	104.86	104.86
2058	208.32	104.86	157.29	104.86	104.86
2059	208.32	104.86	157.29	104.86	104.86
2060	208.32	104.86	157.29	104.86	104.86



Tabela 18. Requisitos anuais de combustível fresco - por tipo (t)

Ano	Th-U (Th-U)	Th-U (UOX)	TRU-Th (Th)	TRU-Th (UOX)	TRU-Th (TRU)	TRU-U (U)	TRU-U (TRU)	TRU-U (UOX)	MOX (U)	MOX (Pu)	UOX
2019	17.34	34.68	14.56	34.68	2.77	13.92	3.42	34.68	34.68	17.34	52.01
2020	17.34	34.68	14.56	34.68	2.77	13.92	3.42	34.68	34.68	17.34	52.01
2021	17.34	34.68	14.56	34.68	2.77	13.92	3.42	34.68	34.68	17.34	52.01
2022	17.34	34.68	14.56	34.68	2.77	13.92	3.42	34.68	34.68	17.34	52.01
2023	17.34	34.68	14.56	34.68	2.77	13.92	3.42	34.68	34.68	17.34	52.01
2024	17.34	34.68	14.56	34.68	2.77	13.92	3.42	34.68	34.68	17.34	52.01
2025	17.34	34.68	14.56	34.68	2.77	13.92	3.42	34.68	34.68	17.34	52.01
2026	58.37	116.74	49.03	116.74	9.34	46.87	11.50	116.74	116.74	58.37	175.10
2027	28.93	57.86	24.30	57.86	4.63	23.23	5.70	57.86	57.86	28.93	86.79
2028	28.93	57.86	24.30	57.86	4.63	23.23	5.70	57.86	57.86	28.93	86.79
2029	28.93	57.86	24.30	57.86	4.63	23.23	5.70	57.86	57.86	28.93	86.79
2030	28.93	57.86	24.30	57.86	4.63	23.23	5.70	57.86	57.86	28.93	86.79
2031	28.93	57.86	24.30	57.86	4.63	23.23	5.70	57.86	57.86	28.93	86.79
2032	28.93	57.86	24.30	57.86	4.63	23.23	5.70	57.86	57.86	28.93	86.79
2033	28.93	57.86	24.30	57.86	4.63	23.23	5.70	57.86	57.86	28.93	86.79
2034	28.93	57.86	24.30	57.86	4.63	23.23	5.70	57.86	57.86	28.93	86.79
2035	28.93	57.86	24.30	57.86	4.63	23.23	5.70	57.86	57.86	28.93	86.79
2036	28.93	57.86	24.30	57.86	4.63	23.23	5.70	57.86	57.86	28.93	86.79
2037	28.93	57.86	24.30	57.86	4.63	23.23	5.70	57.86	57.86	28.93	86.79
2038	28.93	57.86	24.30	57.86	4.63	23.23	5.70	57.86	57.86	28.93	86.79
2039	28.93	57.86	24.30	57.86	4.63	23.23	5.70	57.86	57.86	28.93	86.79
2040	24.97	49.94	20.98	49.94	4.00	20.05	4.92	49.94	49.94	24.97	74.92
2041	17.06	34.12	14.33	34.12	2.73	13.70	3.36	34.12	34.12	17.06	51.18
2042	17.06	34.12	14.33	34.12	2.73	13.70	3.36	34.12	34.12	17.06	51.18
2043	17.06	34.12	14.33	34.12	2.73	13.70	3.36	34.12	34.12	17.06	51.18
2044	17.06	34.12	14.33	34.12	2.73	13.70	3.36	34.12	34.12	17.06	51.18
2045	11.59	23.18	9.74	23.18	1.85	9.31	2.28	23.18	23.18	11.59	34.77
2046	11.59	23.18	9.74	23.18	1.85	9.31	2.28	23.18	23.18	11.59	34.77
2047	11.59	23.18	9.74	23.18	1.85	9.31	2.28	23.18	23.18	11.59	34.77
2048	11.59	23.18	9.74	23.18	1.85	9.31	2.28	23.18	23.18	11.59	34.77
2049	11.59	23.18	9.74	23.18	1.85	9.31	2.28	23.18	23.18	11.59	34.77
2050	11.59	23.18	9.74	23.18	1.85	9.31	2.28	23.18	23.18	11.59	34.77
2051	11.59	23.18	9.74	23.18	1.85	9.31	2.28	23.18	23.18	11.59	34.77
2052	11.59	23.18	9.74	23.18	1.85	9.31	2.28	23.18	23.18	11.59	34.77
2053	11.59	23.18	9.74	23.18	1.85	9.31	2.28	23.18	23.18	11.59	34.77
2054	11.59	23.18	9.74	23.18	1.85	9.31	2.28	23.18	23.18	11.59	34.77
2055	11.59	23.18	9.74	23.18	1.85	9.31	2.28	23.18	23.18	11.59	34.77
2056	11.59	23.18	9.74	23.18	1.85	9.31	2.28	23.18	23.18	11.59	34.77
2057	11.59	23.18	9.74	23.18	1.85	9.31	2.28	23.18	23.18	11.59	34.77
2058	11.59	23.18	9.74	23.18	1.85	9.31	2.28	23.18	23.18	11.59	34.77
2059	11.59	23.18	9.74	23.18	1.85	9.31	2.28	23.18	23.18	11.59	34.77
2060	11.59	23.18	9.74	23.18	1.85	9.31	2.28	23.18	23.18	11.59	34.77

Tabela 19. Requisitos anuais de reprocessamento (t)

Ano	TRU-Th	TRU-U	MOX
2019	301.31	370.99	145.15
2020	301.31	370.99	145.15
2021	301.31	370.99	145.15
2022	301.31	370.99	145.15
2023	410.05	504.88	197.51
2024	502.75	619.01	242.18
2025	502.75	619.01	242.18
2026	502.75	619.01	242.18
2027	502.75	619.01	242.18
2028	502.75	619.01	242.18
2029	502.75	619.01	242.18
2030	502.75	619.01	242.18
2031	502.75	619.01	242.18
2032	502.75	619.01	242.18
2033	502.75	619.01	242.18
2034	502.75	619.01	242.18
2035	502.75	619.01	242.18
2036	502.75	619.01	242.18
2037	502.75	619.01	242.18
2038	502.75	619.01	242.18
2039	502.75	619.01	242.18
2040	433.98	534.34	209.06
2041	296.46	365.02	142.81
2042	296.46	365.02	142.81
2043	296.46	365.02	142.81
2044	296.46	365.02	142.81
2045	201.43	248.01	97.04
2046	201.43	248.01	97.04
2047	201.43	248.01	97.04
2048	201.43	248.01	97.04
2049	201.43	248.01	97.04
2050	201.43	248.01	97.04
2051	201.43	248.01	97.04
2052	201.43	248.01	97.04
2053	201.43	248.01	97.04
2054	201.43	248.01	97.04
2055	201.43	248.01	97.04
2056	201.43	248.01	97.04
2057	201.43	248.01	97.04
2058	201.43	248.01	97.04
2059	201.43	248.01	97.04
2060	201.43	248.01	97.04

Tabela 20. Inventário acumulado de urânio empobrecido (t)

Ano	Th-U	TRU-Th	TRU-U	MOX	UOX
2019	291.55	161.96	148.04	145.86	242.94
2020	583.09	323.92	296.08	291.73	485.89
2021	874.64	485.89	444.12	437.59	728.83
2022	1166.18	647.85	592.16	583.55	971.77
2023	1457.72	809.81	740.20	729.41	1214.72
2024	1749.27	971.77	888.24	875.28	1457.66
2025	2040.81	1133.73	1036.27	1021.14	1700.60
2026	3022.28	1678.97	1534.64	1512.28	2518.45
2027	3508.73	1949.20	1781.64	1755.61	2923.81
2028	3995.17	2219.44	2028.65	1999.05	3329.16
2029	4481.62	2489.67	2275.65	2242.39	3734.51
2030	4968.07	2759.91	2522.66	2485.82	4139.87
2031	5454.52	3030.15	2769.67	2729.26	4545.22
2032	5940.96	3300.38	3016.67	2972.60	4950.58
2033	6427.41	3570.62	3263.68	3216.03	5355.93
2034	6913.86	3840.85	3510.68	3459.47	5761.29
2035	7400.31	4111.09	3757.69	3702.81	6166.64
2036	7886.75	4381.33	4004.70	3946.26	6571.99
2037	8373.20	4651.56	4251.70	4189.56	6977.35
2038	8859.65	4921.80	4498.71	4433.06	7382.70
2039	9346.09	5192.03	4745.71	4676.46	7788.06
2040	9766.01	5425.31	4958.94	4886.56	8137.97
2041	10052.90	5584.66	5104.59	5030.06	8377.00
2042	10339.70	5744.02	5250.26	5173.56	8616.03
2043	10626.60	5903.37	5395.91	5317.06	8855.06
2044	10913.40	6062.72	5541.56	5460.66	9094.09
2045	11108.30	6170.99	5640.52	5558.16	9256.50
2046	11303.20	6279.27	5739.49	5655.66	9418.91
2047	11498.10	6387.54	5838.46	5753.16	9581.32
2048	11693.00	6495.82	5937.43	5850.76	9743.73
2049	11887.90	6604.09	6036.39	5948.26	9906.14
2050	12082.80	6712.37	6135.37	6045.76	10068.60
2051	12277.70	6820.64	6234.33	6143.26	10231.00
2052	12472.60	6928.91	6333.29	6240.86	10393.40
2053	12667.50	7037.19	6432.26	6338.36	10555.80
2054	12862.40	7145.46	6531.23	6435.86	10718.20
2055	13057.30	7253.74	6630.20	6533.36	10880.60
2056	13252.20	7362.01	6729.16	6630.96	11043.00
2057	13447.10	7470.28	6828.12	6728.46	11205.40
2058	13642.00	7578.56	6927.10	6825.86	11367.80
2059	13836.90	7686.83	7026.06	6923.46	11530.30
2060	14031.80	7795.11	7125.03	7020.96	11692.70

Tabela 21. Consumo acumulado de combustível queimado (t)

Ano	TRU-Th	TRU-U	MOX
2019	301.30	371.00	145.10
2020	602.60	742.00	290.30
2021	903.90	1113.00	435.40
2022	1205.30	1484.00	580.60
2023	1615.30	1988.80	778.10
2024	2118.00	2607.80	1020.30
2025	2620.80	3226.90	1262.50
2026	3123.50	3845.90	1504.70
2027	3626.30	4464.90	1746.80
2028	4129.00	5083.90	1989.00
2029	4631.80	5702.90	2231.20
2030	5134.50	6321.90	2473.40
2031	5637.30	6940.90	2715.60
2032	6140.00	7559.90	2957.70
2033	6642.80	8178.90	3199.90
2034	7145.50	8797.90	3442.10
2035	7648.20	9416.90	3684.30
2036	8151.00	10035.90	3926.50
2037	8653.70	10654.90	4168.70
2038	9156.50	11273.90	4410.80
2039	9659.20	11892.90	4653.00
2040	10093.20	12427.30	4862.10
2041	10389.70	12792.30	5004.90
2042	10686.10	13157.30	5147.70
2043	10982.60	13522.30	5290.50
2044	11279.00	13887.30	5433.30
2045	11480.50	14135.40	5530.40
2046	11681.90	14383.40	5627.40
2047	11883.30	14631.40	5724.40
2048	12084.80	14879.40	5821.50
2049	12286.20	15127.40	5918.50
2050	12487.60	15375.40	6015.50
2051	12689.10	15623.40	6112.60
2052	12890.50	15871.50	6209.60
2053	13091.90	16119.50	6306.60
2054	13293.40	16367.50	6403.70
2055	13494.80	16615.50	6500.70
2056	13696.20	16863.50	6597.70
2057	13897.70	17111.50	6694.80
2058	14099.10	17359.50	6791.80
2059	14300.50	17607.60	6888.90
2060	14502.00	17855.60	6985.90

Tabela 22. Acumulado de rejeitos gerados no reprocessamento (t)

Ano	TRU-Th	TRU-U	MOX
2019	298.54	367.58	143.89
2020	597.08	735.15	287.79
2021	895.61	1102.73	431.68
2022	1194.15	1470.31	575.57
2023	1600.43	1970.53	771.38
2024	2098.54	2583.84	1011.47
2025	2596.66	3197.14	1251.56
2026	3094.77	3810.45	1491.65
2027	3592.89	4423.75	1731.75
2028	4091.00	5037.06	1971.84
2029	4589.13	5650.37	2211.92
2030	5087.24	6263.67	2452.02
2031	5585.36	6876.98	2692.11
2032	6083.47	7490.28	2932.21
2033	6581.59	8103.59	3172.29
2034	7079.70	8716.90	3412.38
2035	7577.82	9330.21	3652.48
2036	8075.93	9943.51	3892.57
2037	8574.05	10556.85	4132.65
2038	9072.16	11170.12	4372.75
2039	9570.28	11783.39	4612.84
2040	10000.26	12312.88	4820.09
2041	10293.95	12674.50	4961.67
2042	10587.74	13036.12	5103.24
2043	10881.44	13397.84	5244.82
2044	11175.14	13759.46	5386.40
2045	11374.72	14005.18	5482.60
2046	11574.30	14250.90	5578.79
2047	11773.88	14496.62	5674.99
2048	11973.46	14742.44	5771.18
2049	12173.04	14988.15	5867.38
2050	12372.62	15233.87	5963.58
2051	12572.21	15479.59	6059.77
2052	12771.79	15725.31	6155.98
2053	12971.37	15971.02	6252.17
2054	13170.95	16216.74	6348.37
2055	13370.53	16462.46	6444.57
2056	13570.11	16708.28	6540.76
2057	13769.69	16954.00	6636.96
2058	13969.28	17199.71	6733.16
2059	14168.86	17445.43	6829.35
2060	14368.44	17691.15	6925.56

Tabela 23. Quantidade de combustível queimado produzido - por tipo de combustível (t)

Ano	Th-U (Th-U)	Th-U (UOX)	TRU-Th (TRU-Th)	TRU-Th (UOX)	TRU-U (TRU-U)	TRU-U (UOX)	MOX (MOX)	MOX (UOX)	UOX
2019	17.33	34.68	17.34	34.68	13.09	34.68	17.34	34.68	52.01
2020	34.67	69.35	34.68	69.35	26.17	69.35	34.68	69.35	104.03
2021	52.00	104.03	52.01	104.03	39.26	104.03	52.02	104.03	156.04
2022	69.33	138.70	69.35	138.70	52.34	138.70	69.35	138.70	208.06
2023	86.67	173.38	86.69	173.38	65.43	173.38	86.69	173.38	260.07
2024	104.00	208.06	104.03	208.06	78.51	208.06	104.03	208.06	312.09
2025	121.33	242.73	121.37	242.73	91.60	242.73	121.37	242.73	364.10
2026	150.26	300.59	150.30	300.59	116.28	300.59	150.30	300.59	450.89
2027	179.18	358.45	179.22	358.45	140.95	358.45	179.23	358.45	537.67
2028	208.10	416.31	208.15	416.31	165.63	416.31	208.16	416.31	624.46
2029	237.03	474.16	237.08	474.16	190.31	474.16	237.09	474.16	711.25
2030	265.95	532.02	266.01	532.02	214.98	532.02	266.02	532.02	798.03
2031	294.87	589.88	294.94	589.88	239.66	589.88	294.95	589.88	884.82
2032	323.80	647.74	323.87	647.74	264.34	647.74	323.88	647.74	971.60
2033	352.72	705.59	352.80	705.59	289.01	705.59	352.81	705.59	1058.39
2034	381.65	763.45	381.73	763.45	313.69	763.45	381.74	763.45	1145.18
2035	410.57	821.31	410.66	821.31	338.37	821.31	410.67	821.31	1231.96
2036	439.49	879.17	439.58	879.17	363.04	879.17	439.60	879.17	1318.75
2037	468.42	937.02	468.51	937.02	387.72	937.02	468.53	937.02	1405.54
2038	497.34	994.88	497.44	994.88	412.40	994.88	497.46	994.88	1492.32
2039	526.26	1052.74	526.37	1052.74	437.07	1052.74	526.39	1052.74	1579.11
2040	551.23	1102.68	551.34	1102.68	457.79	1102.68	551.36	1102.68	1654.03
2041	568.29	1136.80	568.40	1136.80	470.60	1136.80	568.42	1136.80	1705.20
2042	615.49	1170.92	585.46	1170.92	483.40	1170.92	585.48	1170.92	1846.82
2043	632.54	1205.04	602.52	1205.04	496.21	1205.04	602.54	1205.04	1898.00
2044	649.59	1239.15	619.58	1239.15	509.02	1239.15	619.60	1239.15	1949.17
2045	677.13	1262.33	631.17	1262.33	520.61	1262.33	631.19	1262.33	2031.79
2046	688.72	1285.52	642.76	1285.52	532.20	1285.52	642.78	1285.52	2066.56
2047	700.31	1308.70	654.35	1308.70	543.79	1308.70	654.37	1308.70	2101.33
2048	711.90	1331.88	665.94	1331.88	555.38	1331.88	665.96	1331.88	2136.10
2049	723.49	1355.06	677.53	1355.06	566.97	1355.06	677.55	1355.06	2170.88
2050	735.09	1378.24	689.12	1378.24	578.56	1378.24	689.14	1378.24	2205.65
2051	746.68	1401.42	700.71	1401.42	590.15	1401.42	700.74	1401.42	2240.42
2052	758.27	1424.60	712.30	1424.60	601.74	1424.60	712.33	1424.60	2275.19
2053	769.86	1447.79	723.89	1447.79	613.33	1447.79	723.92	1447.79	2309.96
2054	781.45	1470.97	735.49	1470.97	624.93	1470.97	735.51	1470.97	2344.74
2055	793.04	1494.15	747.08	1494.15	636.52	1494.15	747.10	1494.15	2379.51
2056	804.63	1517.33	758.67	1517.33	648.11	1517.33	758.69	1517.33	2414.28
2057	816.22	1540.51	770.26	1540.51	659.70	1540.51	770.28	1540.51	2449.05
2058	827.81	1623.99	812.00	1623.99	701.44	1623.99	812.02	1623.99	2483.83
2059	839.40	1647.17	823.59	1647.17	713.03	1647.17	823.61	1647.17	2518.60
2060	864.11	1702.25	848.30	1702.25	740.56	1702.25	851.15	1702.25	2553.37

Tabela 24. Redução de UOX queimado externo ao ciclo do combustível (t)

Ano	TRU-Th	TRU-U	MOX
2019	-266.62	-336.32	-110.42
2020	-533.25	-672.65	-220.95
2021	-799.87	-1008.97	-331.37
2022	-1066.60	-1345.30	-441.90
2023	-1441.92	-1815.42	-604.72
2024	-1909.94	-2399.74	-812.24
2025	-2378.07	-2984.17	-1019.77
2026	-2822.91	-3545.31	-1204.11
2027	-3267.85	-4106.45	-1388.35
2028	-3712.70	-4667.60	-1572.69
2029	-4157.64	-5228.74	-1757.04
2030	-4602.48	-5789.88	-1941.38
2031	-5047.42	-6351.02	-2125.72
2032	-5492.26	-6912.16	-2309.96
2033	-5937.21	-7473.31	-2494.30
2034	-6382.05	-8034.45	-2678.65
2035	-6826.89	-8595.59	-2862.99
2036	-7271.83	-9156.73	-3047.33
2037	-7716.68	-9717.88	-3231.67
2038	-8161.62	-10279.02	-3415.92
2039	-8606.46	-10840.16	-3600.26
2040	-8990.52	-11324.62	-3759.41
2041	-9252.90	-11655.50	-3868.10
2042	-9515.18	-11986.38	-3976.78
2043	-9777.56	-12317.26	-4085.46
2044	-10039.85	-12648.15	-4194.14
2045	-10218.17	-12873.07	-4268.06
2046	-10396.38	-13097.88	-4341.88
2047	-10574.60	-13322.70	-4415.70
2048	-10752.92	-13547.52	-4489.62
2049	-10931.14	-13772.34	-4563.43
2050	-11109.36	-13997.16	-4637.25
2051	-11287.68	-14221.98	-4711.17
2052	-11465.90	-14446.90	-4784.99
2053	-11644.11	-14671.71	-4858.81
2054	-11822.43	-14896.53	-4932.73
2055	-12000.65	-15121.35	-5006.55
2056	-12178.87	-15346.17	-5080.36
2057	-12357.19	-15570.99	-5154.28
2058	-12475.11	-15735.51	-5167.80
2059	-12653.33	-15960.43	-5241.72
2060	-12799.75	-16153.35	-5283.65

Tabela 25. Custos anuais com o ciclo do combustível Th-U (milhões de dólares)

Ano	Urânio	Tório	Conversão	Enriquecimento	Fabric. do combustível	Armazen.	Total
2019	13.22	0.65	2.23	18.70	14.30	0.26	49.36
2020	13.22	0.65	2.23	18.70	14.30	0.52	49.62
2021	13.22	0.65	2.23	18.70	14.30	0.78	49.88
2022	13.22	0.65	2.23	18.70	14.30	1.04	50.15
2023	13.22	0.65	2.23	18.70	14.30	1.30	50.41
2024	13.22	0.65	2.23	18.70	14.30	1.56	50.67
2025	13.22	0.65	2.23	18.70	14.30	1.82	50.93
2026	44.51	2.19	7.51	62.94	48.15	2.25	167.56
2027	22.06	1.08	3.72	31.20	23.87	2.69	84.62
2028	22.06	1.08	3.72	31.20	23.87	3.12	85.05
2029	22.06	1.08	3.72	31.20	23.87	3.56	85.49
2030	22.06	1.08	3.72	31.20	23.87	3.99	85.92
2031	22.06	1.08	3.72	31.20	23.87	4.42	86.36
2032	22.06	1.08	3.72	31.20	23.87	4.86	86.79
2033	22.06	1.08	3.72	31.20	23.87	5.29	87.22
2034	22.06	1.08	3.72	31.20	23.87	5.73	87.66
2035	22.06	1.08	3.72	31.20	23.87	6.16	88.09
2036	22.06	1.08	3.72	31.20	23.87	6.59	88.53
2037	22.06	1.08	3.72	31.20	23.87	7.03	88.96
2038	22.06	1.08	3.72	31.20	23.87	7.46	89.39
2039	22.06	1.08	3.72	31.20	23.87	7.90	89.83
2040	19.04	0.94	3.21	26.93	20.60	8.27	79.00
2041	13.01	0.64	2.20	18.40	14.07	8.53	56.84
2042	13.01	0.64	2.20	18.40	14.07	9.23	57.55
2043	13.01	0.64	2.20	18.40	14.07	9.49	57.80
2044	13.01	0.64	2.20	18.40	14.07	9.75	58.06
2045	8.84	0.43	1.49	12.50	9.56	10.16	42.99
2046	8.84	0.43	1.49	12.50	9.56	10.33	43.16
2047	8.84	0.43	1.49	12.50	9.56	10.51	43.33
2048	8.84	0.43	1.49	12.50	9.56	10.68	43.51
2049	8.84	0.43	1.49	12.50	9.56	10.85	43.68
2050	8.84	0.43	1.49	12.50	9.56	11.03	43.85
2051	8.84	0.43	1.49	12.50	9.56	11.20	44.03
2052	8.84	0.43	1.49	12.50	9.56	11.38	44.20
2053	8.84	0.43	1.49	12.50	9.56	11.55	44.38
2054	8.84	0.43	1.49	12.50	9.56	11.72	44.55
2055	8.84	0.43	1.49	12.50	9.56	11.90	44.72
2056	8.84	0.43	1.49	12.50	9.56	12.07	44.90
2057	8.84	0.43	1.49	12.50	9.56	12.24	45.07
2058	8.84	0.43	1.49	12.50	9.56	12.42	45.25
2059	8.84	0.43	1.49	12.50	9.56	12.59	45.42
2060	8.84	0.43	1.49	12.50	9.56	12.77	45.59



Tabela 26. Custos anuais com o ciclo do combustível TRU-Th (milhões de dólares)

Ano	Urânio	Tório	Conversão	Enriquec.	Fabric. do combustível	Armazen.	Reproc.	Total
2019	7.87	0.73	1.33	9.41	30.34	0.25	180.79	230.71
2020	7.87	0.73	1.33	9.41	30.34	0.49	180.79	230.95
2021	7.87	0.73	1.33	9.41	30.34	0.74	180.79	231.20
2022	7.87	0.73	1.33	9.41	30.34	0.98	180.79	231.45
2023	7.87	0.73	1.33	9.41	30.34	1.23	246.03	296.93
2024	7.87	0.73	1.33	9.41	30.34	1.46	301.65	352.78
2025	7.87	0.73	1.33	9.41	30.34	1.70	301.65	353.02
2026	26.48	2.45	4.47	31.68	102.14	2.11	301.65	470.98
2027	13.12	1.22	2.21	15.70	50.63	2.52	301.65	387.05
2028	13.12	1.22	2.21	15.70	50.63	2.93	301.65	387.46
2029	13.12	1.22	2.21	15.70	50.63	3.34	301.65	387.87
2030	13.12	1.22	2.21	15.70	50.63	3.75	301.65	388.28
2031	13.12	1.22	2.21	15.70	50.63	4.16	301.65	388.69
2032	13.12	1.22	2.21	15.70	50.63	4.58	301.65	389.10
2033	13.12	1.22	2.21	15.70	50.63	4.99	301.65	389.51
2034	13.12	1.22	2.21	15.70	50.63	5.40	301.65	389.93
2035	13.12	1.22	2.21	15.70	50.63	5.81	301.65	390.34
2036	13.12	1.22	2.21	15.70	50.63	6.22	301.65	390.75
2037	13.12	1.22	2.21	15.70	50.63	6.63	301.65	391.16
2038	13.12	1.22	2.21	15.70	50.63	7.04	301.65	391.57
2039	13.12	1.22	2.21	15.70	50.63	7.45	301.65	391.98
2040	11.33	1.05	1.91	13.56	43.70	7.81	260.39	339.74
2041	7.74	0.72	1.31	9.26	29.85	8.05	177.88	234.80
2042	7.74	0.72	1.31	9.26	29.85	8.29	177.88	235.04
2043	7.74	0.72	1.31	9.26	29.85	8.53	177.88	235.28
2044	7.74	0.72	1.31	9.26	29.85	8.77	177.88	235.52
2045	5.26	0.49	0.89	6.29	20.28	8.94	120.86	163.01
2046	5.26	0.49	0.89	6.29	20.28	9.10	120.86	163.17
2047	5.26	0.49	0.89	6.29	20.28	9.27	120.86	163.34
2048	5.26	0.49	0.89	6.29	20.28	9.43	120.86	163.50
2049	5.26	0.49	0.89	6.29	20.28	9.60	120.86	163.66
2050	5.26	0.49	0.89	6.29	20.28	9.76	120.86	163.83
2051	5.26	0.49	0.89	6.29	20.28	9.93	120.86	163.99
2052	5.26	0.49	0.89	6.29	20.28	10.09	120.86	164.16
2053	5.26	0.49	0.89	6.29	20.28	10.26	120.86	164.32
2054	5.26	0.49	0.89	6.29	20.28	10.42	120.86	164.49
2055	5.26	0.49	0.89	6.29	20.28	10.58	120.86	164.65
2056	5.26	0.49	0.89	6.29	20.28	10.75	120.86	164.82
2057	5.26	0.49	0.89	6.29	20.28	10.91	120.86	164.98
2058	5.26	0.49	0.89	6.29	20.28	11.53	120.86	165.60
2059	5.26	0.49	0.89	6.29	20.28	11.70	120.86	165.76
2060	5.26	0.49	0.89	6.29	20.28	12.08	120.86	166.15

Tabela 27. Custos anuais com o ciclo do combustível TRU-U (milhões de dólares)

Ano	Urânio	Conversão	Enriquec.	Fabric. do combustível	Armazen.	Reproc.	Total
2019	7.87	1.33	9.41	30.34	0.22	222.60	271.76
2020	7.87	1.33	9.41	30.34	0.44	222.60	271.98
2021	7.87	1.33	9.41	30.34	0.67	222.60	272.21
2022	7.87	1.33	9.41	30.34	0.89	222.60	272.43
2023	7.87	1.33	9.41	30.34	1.10	302.93	352.97
2024	7.87	1.33	9.41	30.34	1.31	371.40	421.66
2025	7.87	1.33	9.41	30.34	1.52	371.40	421.87
2026	26.48	4.47	31.68	102.14	1.91	371.40	538.08
2027	13.12	2.21	15.70	50.63	2.29	371.40	455.36
2028	13.12	2.21	15.70	50.63	2.68	371.40	455.75
2029	13.12	2.21	15.70	50.63	3.06	371.40	456.13
2030	13.12	2.21	15.70	50.63	3.44	371.40	456.51
2031	13.12	2.21	15.70	50.63	3.83	371.40	456.90
2032	13.12	2.21	15.70	50.63	4.21	371.40	457.28
2033	13.12	2.21	15.70	50.63	4.60	371.40	457.67
2034	13.12	2.21	15.70	50.63	4.98	371.40	458.05
2035	13.12	2.21	15.70	50.63	5.36	371.40	458.44
2036	13.12	2.21	15.70	50.63	5.75	371.40	458.82
2037	13.12	2.21	15.70	50.63	6.13	371.40	459.20
2038	13.12	2.21	15.70	50.63	6.52	371.40	459.59
2039	13.12	2.21	15.70	50.63	6.90	371.40	459.97
2040	11.33	1.91	13.56	43.70	7.23	320.61	398.33
2041	7.74	1.31	9.26	29.85	7.45	219.01	274.61
2042	7.74	1.31	9.26	29.85	7.67	219.01	274.83
2043	7.74	1.31	9.26	29.85	7.88	219.01	275.05
2044	7.74	1.31	9.26	29.85	8.10	219.01	275.27
2045	5.26	0.89	6.29	20.28	8.26	148.81	189.79
2046	5.26	0.89	6.29	20.28	8.43	148.81	189.96
2047	5.26	0.89	6.29	20.28	8.59	148.81	190.12
2048	5.26	0.89	6.29	20.28	8.75	148.81	190.28
2049	5.26	0.89	6.29	20.28	8.91	148.81	190.44
2050	5.26	0.89	6.29	20.28	9.08	148.81	190.61
2051	5.26	0.89	6.29	20.28	9.24	148.81	190.77
2052	5.26	0.89	6.29	20.28	9.40	148.81	190.93
2053	5.26	0.89	6.29	20.28	9.56	148.81	191.09
2054	5.26	0.89	6.29	20.28	9.73	148.81	191.26
2055	5.26	0.89	6.29	20.28	9.89	148.81	191.42
2056	5.26	0.89	6.29	20.28	10.05	148.81	191.58
2057	5.26	0.89	6.29	20.28	10.21	148.81	191.74
2058	5.26	0.89	6.29	20.28	10.37	148.81	191.90
2059	5.26	0.89	6.29	20.28	10.53	148.81	192.06
2060	5.26	0.89	6.29	20.28	10.69	148.81	192.22

Tabela 28. Custos anuais com o ciclo do combustível MOX (milhões de dólares)

Ano	Urânio	Conversão	Enriquec.	Fabric. do combustível	Armazen.	Reproc.	Total
2019	7.87	1.33	9.41	30.34	0.25	87.09	136.29
2020	7.87	1.33	9.41	30.34	0.51	87.09	136.54
2021	7.87	1.33	9.41	30.34	0.76	87.09	136.80
2022	7.87	1.33	9.41	30.34	1.02	87.09	137.05
2023	7.87	1.33	9.41	30.34	1.27	118.51	168.72
2024	7.87	1.33	9.41	30.34	1.52	145.31	195.77
2025	7.87	1.33	9.41	30.34	1.77	145.31	196.02
2026	26.48	4.47	31.68	102.14	2.19	145.31	312.27
2027	13.12	2.21	15.70	50.63	2.61	145.31	229.59
2028	13.12	2.21	15.70	50.63	3.04	145.31	230.01
2029	13.12	2.21	15.70	50.63	3.46	145.31	230.44
2030	13.12	2.21	15.70	50.63	3.88	145.31	230.86
2031	13.12	2.21	15.70	50.63	4.31	145.31	231.28
2032	13.12	2.21	15.70	50.63	4.73	145.31	231.71
2033	13.12	2.21	15.70	50.63	5.15	145.31	232.13
2034	13.12	2.21	15.70	50.63	5.58	145.31	232.56
2035	13.12	2.21	15.70	50.63	6.00	145.31	232.98
2036	13.12	2.21	15.70	50.63	6.42	145.31	233.40
2037	13.12	2.21	15.70	50.63	6.85	145.31	233.83
2038	13.12	2.21	15.70	50.63	7.27	145.31	234.25
2039	13.12	2.21	15.70	50.63	7.69	145.31	234.67
2040	11.33	1.91	13.56	43.70	8.06	125.43	203.99
2041	7.74	1.31	9.26	29.85	8.31	85.69	142.15
2042	7.74	1.31	9.26	29.85	8.56	85.69	142.40
2043	7.74	1.31	9.26	29.85	8.81	85.69	142.65
2044	7.74	1.31	9.26	29.85	9.06	85.69	142.90
2045	5.26	0.89	6.29	20.28	9.23	58.22	100.17
2046	5.26	0.89	6.29	20.28	9.40	58.22	100.34
2047	5.26	0.89	6.29	20.28	9.57	58.22	100.51
2048	5.26	0.89	6.29	20.28	9.74	58.22	100.68
2049	5.26	0.89	6.29	20.28	9.91	58.22	100.85
2050	5.26	0.89	6.29	20.28	10.08	58.22	101.02
2051	5.26	0.89	6.29	20.28	10.25	58.22	101.19
2052	5.26	0.89	6.29	20.28	10.42	58.22	101.36
2053	5.26	0.89	6.29	20.28	10.59	58.22	101.53
2054	5.26	0.89	6.29	20.28	10.76	58.22	101.70
2055	5.26	0.89	6.29	20.28	10.93	58.22	101.87
2056	5.26	0.89	6.29	20.28	11.10	58.22	102.04
2057	5.26	0.89	6.29	20.28	11.26	58.22	102.21
2058	5.26	0.89	6.29	20.28	11.89	58.22	102.83
2059	5.26	0.89	6.29	20.28	12.06	58.22	103.00
2060	5.26	0.89	6.29	20.28	12.47	58.22	103.41

Tabela 29. Custos anuais com o ciclo do combustível UOX (milhões de dólares)

Ano	Urânio	Conversão	Enriquec.	Fabric. do combustível	Armazen.	Total
2019	11.80	1.99	14.12	14.30	0.26	42.47
2020	11.80	1.99	14.12	14.30	0.52	42.73
2021	11.80	1.99	14.12	14.30	0.78	42.99
2022	11.80	1.99	14.12	14.30	1.04	43.25
2023	11.80	1.99	14.12	14.30	1.30	43.51
2024	11.80	1.99	14.12	14.30	1.56	43.77
2025	11.80	1.99	14.12	14.30	1.82	44.03
2026	39.72	6.70	47.52	48.15	2.25	144.35
2027	19.69	3.32	23.55	23.87	2.69	73.12
2028	19.69	3.32	23.55	23.87	3.12	73.55
2029	19.69	3.32	23.55	23.87	3.56	73.98
2030	19.69	3.32	23.55	23.87	3.99	74.42
2031	19.69	3.32	23.55	23.87	4.42	74.85
2032	19.69	3.32	23.55	23.87	4.86	75.29
2033	19.69	3.32	23.55	23.87	5.29	75.72
2034	19.69	3.32	23.55	23.87	5.73	76.15
2035	19.69	3.32	23.55	23.87	6.16	76.59
2036	19.69	3.32	23.55	23.87	6.59	77.02
2037	19.69	3.32	23.55	23.87	7.03	77.46
2038	19.69	3.32	23.55	23.87	7.46	77.89
2039	19.69	3.32	23.55	23.87	7.90	78.32
2040	16.99	2.87	20.33	20.60	8.27	69.07
2041	11.61	1.96	13.89	14.07	8.53	50.06
2042	11.61	1.96	13.89	14.07	9.23	50.76
2043	11.61	1.96	13.89	14.07	9.49	51.02
2044	11.61	1.96	13.89	14.07	9.75	51.28
2045	7.89	1.33	9.44	9.56	10.16	38.38
2046	7.89	1.33	9.44	9.56	10.33	38.55
2047	7.89	1.33	9.44	9.56	10.51	38.72
2048	7.89	1.33	9.44	9.56	10.68	38.90
2049	7.89	1.33	9.44	9.56	10.85	39.07
2050	7.89	1.33	9.44	9.56	11.03	39.25
2051	7.89	1.33	9.44	9.56	11.20	39.42
2052	7.89	1.33	9.44	9.56	11.38	39.59
2053	7.89	1.33	9.44	9.56	11.55	39.77
2054	7.89	1.33	9.44	9.56	11.72	39.94
2055	7.89	1.33	9.44	9.56	11.90	40.12
2056	7.89	1.33	9.44	9.56	12.07	40.29
2057	7.89	1.33	9.44	9.56	12.25	40.46
2058	7.89	1.33	9.44	9.56	12.42	40.64
2059	7.89	1.33	9.44	9.56	12.59	40.81
2060	7.89	1.33	9.44	9.56	12.77	40.98

## ANEXO II – PUBLICAÇÕES RELACIONADAS

Artigos publicados em periódicos:

- ESTANISLAU, FIDÉLLIS B. G. L.; VELASQUEZ, CARLOS E.; COSTA, ANTONELLA L.; PEREIRA, CLAUBIA. Long Term Comparison between Reprocessed Nuclear Fuel Cycles. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**. v.10, p. 1-12, 2022. [doi:10.15392/2319-0612.2022.1999]
- ESTANISLAU, FIDÉLLIS B. G. L.; COSTA, ANTONELLA L.; VELASQUEZ, CARLOS E.; PEREIRA, CLAUBIA. Integrated analysis of the Brazilian nuclear energy system. **International Journal of Energy Research**. v.45, p.1 - 12, 2021. [doi:10.1002/er.6452]
- VELASQUEZ, CARLOS E.; E ESTANISLAU, FIDÉLLIS B.G.L.; COSTA, ANTONELLA L.; VELOSO, MARIA AUXILIADORA F.; PEREIRA, CLAUBIA. Scenarios of nuclear energy for countries with different options of nuclear fuel cycle: Utilization and perspective. **Progress in Nuclear Energy**. v.136, p.103747, 2021. [doi:10.1016/j.pnucene.2021.103747]
- VELASQUEZ, CARLOS E.; E ESTANISLAU, FIDÉLLIS B.G. L.; COSTA, ANTONELLA L.; PEREIRA, CLAUBIA. Assessment of the French nuclear energy system - A case study. **Energy Strategy Reviews**. v.30, p.100513 , 2020. [doi:10.1016/j.esr.2020.100513]
- VELASQUEZ CABRERA, CARLOS EDUARDO; BITENCOURT G. L. E ESTANISLAU, FIDÉLLIS; LOMBARDI COSTA, ANTONELLA; F. VELOSO, MARIA AUXILIADORA; PEREIRA, CLAUBIA. UK nuclear energy system study from 1956 to 2035. **Revista Tecnologia e Sociedade (Online)**. v.15, p.360 - 370, 2019. [doi:10.3895/rts.v15n37.9647]

Artigos publicados em anais de congresso:

- ESTANISLAU, FIDÉLLIS B. G. L.; VELASQUEZ, CARLOS E.; COSTA, ANTONELLA L.; PEREIRA, CLAUBIA. Long Term Comparison between Reprocessed Nuclear Fuel Cycles. **Livros eletrônicos - INAC 2021**. 2021. p.103671

- A. R. DE ALMEIDA, HELOISA; BITENCOURT, FIDÉLLIS; M. FARIAS, ISADORA; E. VELASQUEZ, CARLOS; L. COSTA, ANTONELLA; PEREIRA, CLAUBIA. A evolução do mercado de urânio e as perspectivas futuras do setor. **Anais da Semana Nacional de Engenharia Nuclear e da Energia e Ciências das Radiações**. Even3, 2022. [doi: 10.29327/advs2021.459255]
- M. FARIAS, ISADORA; B. G. L. E ESTANISLAU, FIDÉLLIS; A. R. DE ALMEIDA, HELOISA; E. VELASQUEZ, CARLOS; L. COSTA, ANTONELLA; PEREIRA, CLAUBIA. Análise do sistema de energia nuclear baseado em diferentes ciclos de combustível. **Anais da Semana Nacional de Engenharia Nuclear e da Energia e Ciências das Radiações**. Even3, 2022. [doi: 10.29327/advs2021.459172]
- ESTANISLAU, F. B. G. L. E; VELASQUEZ, C. E.; COSTA, A. L.; PEREIRA, C. Greenhouse Gas Emissions from Nuclear Power Generation in the Brazilian Electricity Matrix. **Proceedings of the Air Pollution Conference Brazil 4th CMAS South America**. 2019. p.6 - 9
- ESTANISLAU, F. B. G. L. E; COSTA, A. L.; VELASQUEZ, C. E.; PEREIRA, C. Evaluation of the Brazilian Nuclear Energy System Based on Once-Through and Closed Nuclear Fuel Cycles. **Proceedings of the INAC 2019**. 2019.