



INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Desenvolvimento de estratégias para descomissionamento de reatores nucleares de
pequeno porte no Brasil**

ALVARO BRITO CALDAS NETO

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Reatores

Orientador:

Prof. Dr. Antonio Teixeira e Silva

São Paulo

2023

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Desenvolvimento de estratégias para descomissionamento de reatores nucleares de
pequeno porte no Brasil**

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

ALVARO BRITO CALDAS NETO

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Reatores

Orientador:
Prof. Dr. Antonio Teixeira e Silva

São Paulo
2023

IV

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Como citar:

CALDAS NETO, A. B. ***Desenvolvimento de estratégias para descomissionamento de reatores nucleares de pequeno porte no Brasil***. 2023. 290 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/>> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Caldas Neto, Alvaro Brito

Desenvolvimento de estratégias para descomissionamento de reatores nucleares de pequeno porte no Brasil / Alvaro Brito Caldas Neto; orientador Antonio Teixeira e Silva. -- São Paulo, 2023.

290 f.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Reatores) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2023.

1. Projetos e estratégias de descomissionamento. 2. Reatores nucleares de pequeno porte. 3. Gestão de rejeitos radioativos. 4. Gestão de Risco em projetos de descomissionamento. I. Silva, Antonio Teixeira e , orient.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Alvaro Brito Caldas Neto

Título: Desenvolvimento de estratégias para descomissionamento de reatores nucleares de pequeno porte no Brasil

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Data: 27/07/2023

Banca Examinadora

Prof. Dr. Antonio Teixeira e Silva

Instituição: IPEN/USP

Julgamento: APROVADO

Prof. Dr. João Manoel Lousada Moreira

Instituição: Universidade Federal do ABC

Julgamento: APROVADO

Prof. Dr. Deiglys Borges Monteiro

Instituição: Amazul Tecnologias de Defesa

Julgamento: APROVADO

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, em especial aos meus avós, Alvaro Brito Caldas e Dulce Moraes de Souza (*in memoriam*). Aos meus pais, Alvaro Martins Caldas e Ediflor de Souza Caldas, que sempre acreditaram na importância da educação e foram importantes na formação do meu caráter e valores como ser humano. A minha esposa, Dhiessica Vieira Reck, por todo o apoio incondicional que me concedeu ao longo deste trajeto, tornando possível a realização deste trabalho com seu amor e incentivo constantes. Às minhas filhas, Anna Laura e Maria Cecília, que com compreensão e amor, permitiram que eu me ausentasse em momentos importantes para a concretização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Sou profundamente grato a Deus pela dádiva da vida e por sua proteção divina que me acompanhou em todos os momentos da minha vida.

À Marinha do Brasil, por ter me proporcionado a oportunidade de expandir meu conhecimento e aprimorar minha capacitação profissional na área nuclear.

Ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/USP), pela excelência e aprimoramento científico constante ao longo do curso de mestrado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antônio Teixeira e Silva, por sua orientação e pela liberdade concedida para a realização deste trabalho. Além da confiança depositada em mim para estudar o assunto. Sua sabedoria e experiência foram uma motivação constante ao longo desse percurso acadêmico.

Aos Professores e colegas de trabalho, Dra. Claudia Giovedi Motta e Dr. Alfredo Abe, pela idealização do presente estudo e pelo apoio e incentivo constantes que duraram todo o processo até sua conclusão.

Aos Prof. Dr. João Manoel Lousada Moreira e ao Prof. Dr. Deiglys Borges Monteiro pela aceitação do convite de fazer parte da banca examinadora e pelas correções e sugestões fornecidas a este trabalho.

A todos os professores e profissionais que contribuíram de forma significativa para minha formação acadêmica e atingir o objetivo deste trabalho.

À Capitão de Corveta (EN) Leandra Bernabé Vieira por me garantir todo o suporte institucional necessário para a conclusão do curso.

À Capitão de Corveta (EN) Marina Côrtes Pires por ter me encorajado, enquanto minha chefe no Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP), a seguir por esse caminho acadêmico e buscasse o aprimoramento técnico-científico. Além de todo apoio e amizade transcorrido durante o curso.

Aos meus colegas e amigos da Marinha do Brasil, que sempre estiveram me apoiando, especialmente aqueles que navegaram juntos nesse desafio de realizar o aperfeiçoamento tecnológico no IPEN.

Aos meus colegas e amigos da Coordenação-Geral de Bens Sensíveis, do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação, pelas primeiras experiências e conhecimentos adquiridos na área nuclear, em destaque para o Sr. Sérgio Frazão, o Sr. Marcelo Monteiro, o Sr. Carlos Roberto, a CMG(S) Renata Grassini e o Ten Cel R/1 Evandro Nogueira.

A toda minha família, especialmente ao meu pai pelos seus preciosos conselhos que foram a bússola que me guiou em direção à realização dos meus objetivos de vida e a Ângela Maria Vieira Reck cuja presença foi constante durante o período do curso de mestrado, zelando pelo bem-estar e apoio à minha família.

EPIGRAFE

“Aquele que se empenha a resolver as dificuldades resolve-as antes que elas surjam. Aquele que se ultrapassa a vencer os inimigos triunfa antes que as suas ameaças se concretizem”

TZU, S. - A Arte da Guerra.

RESUMO

CALDAS NETO, A. B. Desenvolvimento de estratégias para descomissionamento de reatores nucleares de pequeno porte no Brasil. 2023. 290 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

Nos últimos anos, o Brasil tem se empenhado em fortalecer sua estrutura regulatória e o setor nuclear brasileiro como parte de sua visão estratégica para enfrentar os desafios futuros no setor energético. Um desses desafios é a busca por soluções sustentáveis e de baixa emissão de carbono, a fim de atingir as metas de descarbonização e mitigar os impactos das mudanças climáticas. Nesse contexto, o País vislumbra a possibilidade de investir em reatores nucleares como uma fonte eficiente de produção de energia. Todavia, esses reatores, ao término da fase de operação, seja pelo fim de sua vida útil, ou no caso de retirada precoce de operação por acidente, ou por decisão da organização operadora, são descomissionados, em um processo que envolve a descontaminação e o desmantelamento da estrutura e a gestão adequada dos rejeitos radioativos gerados. O processo de descomissionamento é composto por atividades técnicas e administrativas que visam desligar uma instalação nuclear, incluindo a remoção total ou parcial do controle regulatório. Em virtude da complexibilidade envolvida nesse processo, a AIEA recomenda que o descomissionamento de instalações nucleares deva ser executado como um projeto de engenharia, com a diferença que este envolve equipamentos e materiais radioativos que precisam ser manuseados e controlados conforme os pré-requisitos técnicos e regulatórios, colocando-os em condição que não represente um risco inaceitável. O projeto de descomissionamento de uma instalação nuclear começa com a elaboração de um plano preliminar de descomissionamento ainda na fase de projeto de construção da instalação, que acompanha toda a fase de construção e operação. Ao final da vida útil da instalação, é elaborado um plano final de descomissionamento, que deve ser aprovado pelo órgão regulador competente antes do início das atividades de descomissionamento. Assim, o descomissionamento pode levar décadas para ser planejado e executado, além de exigir um investimento significativo para alcançar seu objetivo. Nesse contexto, o projeto de descomissionamento deve ser conduzido por meio de uma estratégia específica, demonstrando sua viabilidade de implementação, alinhada com a estrutura regulatória e

considerações técnicas, administrativas, sociais, ambientais e econômicas do país em questão.

Com o aumento das atividades nucleares previstas nas políticas e estratégias nacionais e considerando as recentes mudanças regulatórias, foi desenvolvido nesse trabalho um conjunto de estratégias para o planejamento das atividades de descomissionamento de reatores nucleares de pequeno porte já na fase de projeto de construção. Essas estratégias, bem planejadas e sistemáticas, abrangem todo o ciclo de vida do reator desde a sua fase inicial de projeto até o seu descomissionamento e foram embasadas por meio de uma pesquisa bibliográfica sobre o tema e utilizando as técnicas do processo de avaliação de risco descritas na norma ABNT ISO/IEC 31010. Além disso, elas foram fundamentadas em boas práticas internacionais e em recomendações da AIEA, visando direcionar o descomissionamento de reatores nucleares de pequeno porte no Brasil.

Palavra-Chave: Projetos e estratégias de descomissionamento, instalações nucleares, reatores nucleares, gestão de rejeitos radioativos, gestão de risco.

ABSTRACT

CALDAS NETO, A. B. **Development of strategies for decommissioning small nuclear reactors in Brazil.** 2023. 290 p. Dissertation (Master in Nuclear Technology) - Institute of Energy and Nuclear Research - IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

In recent years, Brazil has been committed to strengthening its regulatory framework and the Brazilian nuclear sector as part of its strategic vision to address future challenges in the energy sector. One of these challenges is the pursuit of sustainable and low-carbon solutions to achieve decarbonization goals and mitigate the impacts of climate change. In this context, the country envisions the possibility of investing in nuclear reactors as an efficient source of energy production. However, these reactors, upon reaching the end of their operational phase, whether due to the end of their life, early shutdown due to accidents, or the operator's decision, are decommissioned in a process that involves decontamination, dismantling of the structure, and proper management of generated radioactive waste. The decommissioning process consists of technical and administrative activities aimed at shutting down a nuclear facility, including the complete or partial removal of regulatory control. Due to the complexity involved in this process, the IAEA recommends that decommissioning of nuclear facilities be executed as an engineering project, with the difference being that it involves equipment and radioactive materials that need to be handled and controlled according to technical and regulatory prerequisites, ensuring they are in a condition that does not pose an unacceptable risk. The decommissioning project of a nuclear facility begins with the development of a preliminary decommissioning plan during the construction phase of the facility, which continues throughout the construction and operation phases. At the end of the facility's life, a final decommissioning plan is prepared and must be approved by the relevant regulatory authority before the commencement of decommissioning activities. Thus, decommissioning can take decades to plan and execute, in addition to requiring significant investment to achieve its objective. In this context, the decommissioning project must be carried out through a specific strategy, demonstrating its feasibility of implementation, aligned with the regulatory framework, and considering the technical, administrative, social, environmental, and economic considerations of the country in question.

With the increase in nuclear activities envisaged in national policies and strategies, and considering recent regulatory changes, this work has developed a set of strategies for planning the decommissioning activities of small nuclear reactors during the construction phase. These well-planned and systematic strategies encompass the entire life cycle of the reactor, from its initial design phase to its decommissioning, and were based on a literature review on the subject and the use of risk assessment techniques described in the ABNT ISO/IEC 31010 standard. Additionally, they were based on international best practices and recommendations from the IAEA, aiming to guide the decommissioning of small nuclear reactors in Brazil.

Keywords: Decommissioning projects and strategies, nuclear facilities, nuclear reactors, radioactive waste management, risk management.

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1- Custos de projetos de descomissionamento nos EUA.....	44
Tabela 2- Pesquisa OCDE/NEA- tempo ideal de um projeto DECON.....	46
Tabela 3- Reatores 100% descomissionamentos.....	47
Tabela 4- Relação entre a década de desligamento e a estratégia adotada.....	48
Tabela 5 - Comparativo entre as dimensões dos vasos de pressão dos reatores PWR.....	60
Tabela 6- Informações de elementos de combustíveis de reatores PWR.....	67
Tabela 7- Transmutação de radionuclídeos por meio de absorção de venenos queimáveis	78
Tabela 8- Composição química das ligas de Zircônio.....	83
Tabela 9- Material da estrutura do vaso de pressão.....	83
Tabela 10- Composição química dos materiais do reator.....	84
Tabela 11- Material da blindagem biológica.....	84
Tabela 12- Composição química dos materiais da blind. biológica – parte do vergalhão ..	84
Tabela 13- Análise química do concreto de Rancho Seco.....	85
Tabela 14-Contaminação nos principais componentes do reator.....	89
Tabela 15- Radioatividade no reator.....	90
Tabela 16- Decaimento percentual da atividade do reator.....	93
Tabela 17- Decaimento percentual da atividade da blindagem.....	94
Tabela 18-Tempo para alcançar o limite de dispensa do vaso de pressão do reator.....	95
Tabela 19- Tempo para alcançar o limite de dispensa da blindagem biológica.....	96
Tabela 20- Valores de preços de TLC 2023.....	102
Tabela 21- Relação de documentos regulatórios com o descomissionamento.....	109
Tabela 22- Atividades de D&D e RR.....	111
Tabela 23- Fatores considerados para a seleção de uma estratégia de descom.....	113
Tabela 24- Classificações de Rejeitos em relação ao estudo de caso.....	132
Tabela 25- Requisitos de depósitos.....	138
Tabela 26- Principais diferenças entre as atividades de operação e descomissionamento	143
Tabela 27- Ferramentas e metodologias de estimativa de custo.....	150
Tabela 28- Pontuações dos fatores associados na Abordagem DD nº 1.....	164
Tabela 29- Ativação dos rejeitos da usina de Loviisa.....	166
Tabela 30- Pontuações dos fatores associados na Abordagem DD nº 2.....	166
Tabela 31- Pontuações dos fatores associados na Abordagem DD nº 3.....	168

Tabela 32- Pontuações dos fatores associados na Abordagem DD nº4.....	170
Tabela 33- Pontuações dos fatores associados na Abordagem RR nº 1	173
Tabela 34- Pontuações dos fatores associados na Abordagem RR nº 2	175
Tabela 35- Pontuações dos fatores associados na Abordagem RR nº 3	177
Tabela 36- Pontuações dos fatores associados na Abordagem RR nº 4	178
Tabela 37- Pontuações dos fatores associados na Abordagem de armazenamento nº 1....	179
Tabela 38- Pontuações dos fatores associados na Abordagem de armazenamento nº 2....	180
Tabela 39- Pontuações dos fatores associados na Abordagem armazenamento nº 3	181
Tabela 40- Pontuações dos fatores associados na Abordagem RH nº 1	183
Tabela 41- RH no descomissionamento de Loviisa.....	185
Tabela 42- Quantidades de RH no Plano de descomissionamento de Loviisa	186
Tabela 43- Pontuações dos fatores associados na Abordagem RH nº 2	187
Tabela 44- Pontuações dos fatores associados na Abordagem RH nº 3	188
Tabela 45- Pontuações dos fatores associados na Abordagem RH nº 4	190
Tabela 46- Pontuações dos fatores associados na Abordagem estimativa de custo nº 1 ...	192
Tabela 47- Pontuações dos fatores associados na Abordagem estimativa de custo nº 2 ...	193
Tabela 48- Pontuações dos fatores associados na Abordagem estimativa de custo nº 3 ...	194
Tabela 49- Pontuações dos fatores associados na Abordagem estimativa de custo nº 4 ...	195
Tabela 50- Simulação dos valores do custo e do fundo na abordagem nº 1	197
Tabela 51- Pontuações dos fatores associados na Abordagem de gestão de fundo nº 1....	198
Tabela 52- Simulação dos valores do custo e do fundo na abordagem nº 2	199
Tabela 53- Pontuações dos fatores associados na Abordagem de gestão de fundo nº 2...200	
Tabela 54- Simulação dos valores do custo e do fundo na abordagem nº 3	201
Tabela 55- Pontuações dos fatores associados na Abordagem de gestão de fundo nº 3....202	
Tabela 56- Pontuações dos fatores associados na Abordagem de gestão de fundo nº 4....202	
Tabela 57 - Grupo de abordagens técnicas de DD.....	207
Tabela 58- Grupo de abordagens técnicas de RR	207
Tabela 59- Grupo de abordagens técnicas de armazenamento	207
Tabela 60- Grupo de abordagens administrativa de RH	207
Tabela 61- Grupo de abordagens administrativas de estimativa de custo	208
Tabela 62- Grupo de abordagens administrativa de gestão de fundo	208
Tabela 63- Atividades necessárias ao Plano de descomissionamento	211
Tabela 64- Matriz de priorização	213
Tabela 65- Exemplo 1 - Selecionando abordagens técnicas de DD	214

Tabela 66- Exemplo 1 - Selecionando abordagens técnicas de RR.....	214
Tabela 67- Exemplo 1 - Selecionando abordagens técnicas de armazenagem.....	215
Tabela 68-Exemplo 1 - Selecionando abordagens administrativa de RH	215
Tabela 69- Exemplo 1 - Selecionando abordagens estimativa de custo	215
Tabela 70-Exemplo 1 - Selecionando abordagens gestão de fundo	215
Tabela 71- Alteração de valores de fatores correspondentes aos cenários atual e futuro..	221
Tabela 72- Classificação dos fatores e pesos da Estratégia 1	223
Tabela 73- Seleção de abordagens técnicas DD - Estratégia 1	224
Tabela 74- Seleção de abordagens técnicas gestão de RR - Estratégia 1	224
Tabela 75- Seleção de abordagens técnicas armazenamento - Estratégia 1	224
Tabela 76- Seleção de abordagens administrativas de gestão RH - Estratégia 1	224
Tabela 77- Seleção de abordagens administrativa estimativa de custo - Estratégia 1	225
Tabela 78- Seleção de abordagens administrativa gestão de fundo - Estratégia 1	225
Tabela 79- Classificação dos fatores e pesos da Estratégia 2	228
Tabela 80- Seleção de abordagens técnicas DD - Estratégia 2.....	229
Tabela 81- Seleção de abordagens técnicas gestão de RR - Estratégia 2	229
Tabela 82- Seleção de abordagens técnicas armazenamento - Estratégia 2	229
Tabela 83- Seleção de abordagens administrativas de gestão RH - Estratégia 2	229
Tabela 84- Seleção de abordagens administrativa estimativa de custo - Estratégia 2	230
Tabela 85- Seleção de abordagens administrativa gestão de fundo - Estratégia 2	230
Tabela 86- Classificação dos fatores e pesos da Estratégia 3	232
Tabela 87- Seleção de abordagens técnicas DD - Estratégia 3.....	233
Tabela 88- Seleção de abordagens técnicas gestão de RR - Estratégia 3	233
Tabela 89- Seleção de abordagens técnicas armazenamento - Estratégia 3	233
Tabela 90- Seleção de abordagens administrativas de gestão RH - Estratégia 3	233
Tabela 91- Seleção de abordagens administrativa estimativa de custo - Estratégia 3	234
Tabela 92- Seleção de abordagens administrativa gestão de fundo - Estratégia 3	234
Tabela 93- Classificação dos fatores e pesos da Estratégia 4.....	237
Tabela 94- Seleção de abordagens técnicas DD - Estratégia 4.....	237
Tabela 95- Seleção de abordagens técnicas gestão de RR - Estratégia 4	237
Tabela 96- Seleção de abordagens técnicas armazenamento - Estratégia 4	238
Tabela 97- Seleção de abordagens administrativas de gestão RH - Estratégia 4	238
Tabela 98- Seleção de abordagens administrativa estimativa de custo - Estratégia 4	238
Tabela 99- Seleção de abordagens administrativa gestão de fundo - Estratégia 4	238

Tabela 100- Classificação dos fatores e pesos da Estratégia 5	240
Tabela 101- Seleção de abordagens técnicas DD - Estratégia 5	240
Tabela 102- Seleção de abordagens técnicas gestão de RR - Estratégia 5	241
Tabela 103- Seleção de abordagens técnicas armazenamento - Estratégia 5	241
Tabela 104- Seleção de abordagens administrativas de gestão RH - Estratégia 5.....	241
Tabela 105- Seleção de abordagens administrativa estimativa de custo - Estratégia 5	241
Tabela 106- Seleção de abordagens administrativa gestão de fundo - Estratégia 5	242
Tabela 107- Classificação dos fatores e pesos da Estratégia 6	244
Tabela 108- Seleção de abordagens técnicas DD - Estratégia 6	244
Tabela 109- Seleção de abordagens técnicas gestão de RR – Estratégia 6.....	244
Tabela 110- Seleção de abordagens técnicas armazenamento - Estratégia 6	245
Tabela 111 - Seleção de abordagens administrativas de gestão RH - Estratégia 6.....	245
Tabela 112- Seleção de abordagens administrativa estimativa de custo - Estratégia 6	245
Tabela 113- Seleção de abordagens administrativa gestão de fundo - Estratégia 6	245
Tabela 114- Classificação dos fatores e pesos da Estratégia 7	247
Tabela 115- Seleção de abordagens técnicas DD - Estratégia 7	247
Tabela 116- Seleção de abordagens técnicas gestão de RR - Estratégia 7	248
Tabela 117- Seleção de abordagens técnicas armazenamento - Estratégia 7	248
Tabela 118- Seleção de abordagens administrativas de gestão RH - Estratégia 7.....	248
Tabela 119- Seleção de abordagens administrativa estimativa de custo - Estratégia 7	248
Tabela 120- Seleção de abordagens administrativa gestão de fundo - Estratégia 7	249
Tabela 121- Classificação dos fatores e pesos da Estratégia 8	250
Tabela 122- Seleção de abordagens técnicas DD - Estratégia 8	251
Tabela 123- Seleção de abordagens técnicas gestão de RR - Estratégia 8	251
Tabela 124- Seleção de abordagens técnicas armazenamento - Estratégia 8	251
Tabela 125- Seleção de abordagens administrativas de gestão RH - Estratégia 8.....	252
Tabela 126- Seleção de abordagens administrativa estimativa de custo - Estratégia 8	252
Tabela 127- Seleção de abordagens administrativa gestão de fundo - Estratégia 8	252
Tabela 128- Pesos atribuídos em cada fator por estratégia	256
Tabela 129- Resultado das abordagens selecionadas em cada estratégia	259
Tabela 130- Atração de fatores nas abordagens.....	261

LISTA DE FIGURA

	Página
Figura 1- Fases do descomissionamento	36
Figura 2- Gráfico de estratégias adotadas durante as décadas	48
Figura 3 - Seleção das estratégias durante as décadas NPP	49
Figura 4- Representação das premissas de duração de projetos de descomissionamento ...	50
Figura 5- Metodologia do trabalho	52
Figura 6- Visão geral do processo de avaliação de riscos	55
Figura 7- Ilustração comparativa entre os reatores PWR	60
Figura 8- Vista da estrutura do vaso de pressão do reator Westinghouse PWR.....	61
Figura 9- Componentes superior e inferior do núcleo do reator.....	63
Figura 10- Tamanho das pastilhas combustíveis	64
Figura 11- Falha devido a interação pastilha-revestimento	65
Figura 12- Visão esquemática de uma vareta de combustível.....	65
Figura 13- Elemento de Combustível típico de reator PWR	66
Figura 14- Pressurizador modelo Westinghouse	69
Figura 15- Gerador de Vapor (GV) modelo Westinghouse.....	71
Figura 16- Bomba de refrigeração modelo Westinghouse	72
Figura 17- Tubulações e válvulas modelos Westinghouse.....	73
Figura 18 - Blindagem biológica modelo Westinghouse.....	74
Figura 19- Fissão nuclear.....	76
Figura 20- Gráfico de fragmentos de fissão e linha de núcleo estáveis.....	77
Figura 21- Distribuição radial de nêutrons de três grupos de energia- Westinghouse	81
Figura 22-Gráfico seção de choque de absorção de nêutrons térmicos presente nos componentes do reator	86
Figura 23- Representação esquemática do reator BR-3.....	88
Figura 24- Decaimento da atividade do reator.....	92
Figura 25- Decaimento da atividade da blindagem biológica	93
Figura 26- Estrutura do setor nuclear brasileiro	101
Figura 27- Fluxograma de atividades técnicas de descomissionamento	112
Figura 28- As abordagens para elaboração de estratégias de descomissionamento	114
Figura 29- Instalação da planta de cimentação em preparação para o descom.	115

Figura 30- Imagem de funcionário realizando a caracterização radiológica <i>in loco</i>	116
Figura 31- Técnicas de desmantelamento	124
Figura 32- Processo MEDOC®	126
Figura 33- Gerador de vapor BR-3 conectado a planta MEDOC	127
Figura 34- Rejeito de um reator nuclear – resina de troca iônica	129
Figura 35- Rejeito de um reator nuclear – filtro cartucho.....	129
Figura 36- Rejeito de um reator nuclear – concentrado de evaporador	130
Figura 37 - Tambor de 200L armazenando rejeitos radioativos	134
Figura 38- Encapsulamento com cimento para imobilizar rejeitos líquidos e sólidos.....	134
Figura 39- Rejeitos sendo transportados.....	135
Figura 40- Ilustração de classificação e os tipos de armazenamentos	137
Figura 41- Ilustração do nível de opções de armaz. de rejeitos em relação ao solo	137
Figura 42- Depósito de rejeitos em aterro.....	138
Figura 43- Depósito de rejeitos em armazens.....	139
Figura 44- Depósito de rejeitos de baixo e médio níveis.....	139
Figura 45- Volumes de RR gerados pelo descom. de unidades PWR nos EUA em ft ³	140
Figura 46- Estrutura ISDC	151
Figura 47 - Exemplo de Abordagem D&D.....	158
Figura 48- Imagens do desmantelamento do vaso de pressão do reator BR-3	163
Figura 49- Gráfico de RH no plano de descomissionamento de Loviisa.....	186
Figura 50- ISDC - Custo de projetos de descomissionamento em US\$.....	193
Figura 51- Comportamento do fundo na abordagem nº 1	196
Figura 52- Comportamento do fundo na abordagem nº 2.....	199
Figura 53- Comportamento do fundo na abordagem nº3.....	201
Figura 54- Comportamento do fundo na abordagem extra com 1 ano de operação	203
Figura 55- Comportamento do fundo na abordagem extra com 10 ano de operação	204
Figura 56- Comportamento do fundo na abordagem extra com 30 ano de operação	204
Figura 57- Grupo de abordagens de descomissionamento.....	209
Figura 58- Representação da estratégia por meio do fluxograma.....	217
Figura 59- Estratégias de descomissionamento desenvolvidas.....	219
Figura 60- Fluxograma da Estratégia 1 desenvolvida.....	227
Figura 61- Fluxograma da Estratégia 2 desenvolvida.....	231
Figura 62- Fluxograma da Estratégia 3 desenvolvida.....	236
Figura 63- Fluxograma da Estratégia 4 desenvolvida.....	239

Figura 64 - Fluxograma da Estratégia 5 desenvolvida	243
Figura 65- Fluxograma da Estratégia 6 desenvolvida	246
Figura 66 - Fluxograma da Estratégia 7 desenvolvida	250
Figura 67- Fluxograma da Estratégia 8 desenvolvida	253
Figura 68- Gráfico radar - Estratégias no cenário 2023.....	257
Figura 69- Gráfico radar - Estratégias no cenário futuro.....	258

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACB	Análise de custo-benefício
AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
AIF	<i>Atomic Industrial Forum</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ALARA	<i>As Low As Reasonably Achievable</i>
AMAZUL	Amazônia Azul Tecnologias de Defesa S.A
ANSN	Autoridade Nacional de Segurança Nuclear
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CDPNB	Comitê de Desenvolvimento do Programa Nuclear Brasileiro
CDTN	Centro de Desenvolvimento e Tecnologia Nuclear
CE	Comissão Europeia
CIBES	Comissão Interministerial de Controle de Exportação de Bens Sensíveis
CM	Comando da Marinha
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CRCN-CO	Centro Regional de Ciências Nucleares do Centro Oeste
CRCN-NE	Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste
CSF	<i>Chernobyl Shelter Fund</i>
DD	Descontaminação e Desmantelamento
DECON	Estratégia de Desmantelamento imediato
DEWAN	<i>Decontamination and Waste Management in the Course of Research Reactors Decommissioning</i>
DGDNTM	Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha
DRS	Diretoria de Radioproteção e Segurança Nuclear (CNEN)
EAP	Estrutura Analítica do Projeto
EC	Elemento de combustível
ENBPar	Empresa Brasileira de Participações em Energia Nuclear e Binacional
ENTOMB	Estratégia de Confinamento
EUA	Estados Unidos da América
GSI/PR	Gabinete de Segurança Institucional da Presidência da República

GV	Gerador de Vapor
HH	Homem-hora
HLW	<i>High level waste</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ICRP	<i>International Commission on Radiological Protection</i>
ICT	Instituto de Ciência e Tecnologia
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEN	Instituto de Engenharia Nuclear
ILW	<i>Intermediate level waste</i>
INB	Indústrias Nucleares do Brasil
IOE	Indivíduos Ocupacionalmente Expostos
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IPWR	<i>Integral Pressurized-Water Reactor</i>
ISDC	<i>International Structure for Decommissioning Costing</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LLW	Low level waste
MB	Marinha do Brasil
MCTI	Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação
MD	Ministério da Defesa
MDCA	Análise de decisão por multicritério
MEDOC [®]	<i>Metal Decontamination by Oxidation with Cerium</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MOX	<i>Mixed-oxide fuel</i>
MSR	<i>Moisture separator reheaters</i>
NBR	Norma Brasileira
NEA	<i>Nuclear Energy Agency</i>
NIMBY	<i>Not In My Backyard</i>
NIMTOO	<i>Not In My Term of office</i>
NPP	<i>Nuclear Power Plant</i>

NR	Norma Regulatória
NRC	<i>U.S. Nuclear Regulatory Commission</i>
NUCLEP	Nuclebrás Equipamentos Pesados S.A.
NUREG	<i>Nuclear Regulatory Guide</i>
OEDC	<i>Organisation for Economic Cooperation and Development</i>
PCI	Interação pastilha-revestimento
PFD	Plano Final de Descomissionamento
PGQ	Programa de Garantia da Qualidade
PI	Propriedade Intelectual
PNB	Política Nuclear Brasileira
PNE	Plano Nacional de Energia
PPD	Plano Preliminar de Descomissionamento
PWR	<i>Pressurized-Water Reactor</i>
RBMN	Repositório Nacional de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis
RH	Recursos humanos
RPAS	Relatório Preliminar de Análise de Segurança
RR	Rejeitos radioativos
SAFSTOR	Estratégia de Desmantelamento protelado
SCK-CEN	<i>Belgian Nuclear Research Centre</i>
SDS	<i>Sustainable Development Scenario</i>
SecNSNQ	Secretaria Naval de Segurança Nuclear e Qualidade
SFP	<i>Spent Fuel Pool</i>
SIPRON	Sistema de Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro
SMR	<i>Small Modular Reactor</i>
SNRIU	Organização Reguladora Estatal Nuclear da Ucrânia
SSN-571	Submarino de propulsão nuclear USS Nautilus
SUS	Sistema único de Saúde
TLC	Taxa de licenciamento, controle e fiscalização de materiais e instalações nucleares
TLG	Thomas LaGuardia
US	<i>United States</i>
VLLW	<i>Very low level waste</i>
VSLW	<i>Very short lived waste</i>
VVER	<i>Water-water Energetic reactor</i>

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO.....	33
1.1 Objetivos	38
1.1.1 Objetivo geral	38
1.1.2 Objetivos específicos	38
1.2 Justificativa.....	39
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	40
2.1 Referencial teórico	40
2.2 Experiências em descomissionamento de reatores nucleares	40
2.3 Estratégia de descomissionamento	41
2.3.1 Fatores que afetam a seleção de uma estratégia	42
2.3.2 Motivos para a realização do descomissionamento	43
2.3.4 Seleção de estratégias de descomissionamento	43
2.3.5 Custos de projetos de descomissionamento	44
2.3.6 Interpretações das Estratégias	45
3 METODOLOGIA DO TRABALHO.....	51
3.1 Parte 1 – Estudos por meio de levantamentos bibliográficos	53
3.2 Parte 2 – Desenvolvendo a metodologia baseada na ABNT ISO/IEC 31010	54
3.3 Parte 3 – Desenvolvimento de estratégias de descomissionamento	56
4 REATORES NUCLEARES DO TIPO PWR.....	57
4.1 Componentes do circuito primário dos reatores nucleares PWR	58
4.1.1 Vaso de pressão do reator	59
4.1.2 Núcleo do reator.....	62
4.1.3 Elemento de Combustível (EC)	63
4.1.4 Pressurizador.....	68
4.1.5 Gerador de Vapor (GV)	70

4.1.6 Bomba de refrigeração do reator.....	71
4.1.7 Tubulações, válvulas e outros componentes	72
4.1.8 Blindagem Biológica.....	73
4.2 Componentes do circuito secundário dos reatores nucleares PWR.....	75
5 PROCESSO DE GERAÇÃO DE RADIONUCLÍDEOS NO REATOR	76
5.1 Liberação de radionuclídeos por meio de falhas no combustível	76
5.2 Geração de produtos ativados.....	80
5.2.1 Composição química do fluido refrigerante.....	82
5.2.2 Composição química dos materiais estruturais	82
5.2.3 Composição química da blindagem biológica	84
5.2.4 Análise de isótopos-alvos de ativação no reator	85
5.3 Processo de contaminação e ativação nos componentes do reator	87
5.4 Estudo de caso dos radionuclídeos nos componentes do reator nuclear.....	90
5.4.1 Decaimento radioativo dos radionuclídeos presentes nos componentes do reator	91
5.4.2 Análise dos limites de dispensa da norma CNEN 8.01 -relação ao estudo de caso....	94
6 POLÍTICA NUCLEAR E ESTRUTURA REGULATÓRIA BRASILEIRA.....	98
6.1 Breve resumo da Política Nuclear Brasileira.....	98
6.2 Estrutura do setor nuclear brasileiro.....	100
6.3 Estrutura regulatória brasileira	101
6.3.1 Constituição Federal de 1988.....	101
6.3.2 Lei nº 9.765/1998	102
6.3.3 Lei 10.308/2001	103
6.3.4 Decreto nº 5.935/2006.....	103
6.3.5 Normas Regulatórias (NR).....	103
6.3.5.1 CNEN NE 1.04	104
6.3.5.2 CNEN NE 1.16	104
6.3.5.3 CNEN NE 2.01	105

6.3.5.4 CNEN NN 2.01	105
6.3.5.5 CNEN NN 3.01	105
6.3.5.6 CNEN NE 5.02	106
6.3.5.7 CNEN NE 5.03	106
6.3.5.8 CNEN NN 5.01	106
6.3.5.9 CNEN NE 6.06	107
6.3.5.10 CNEN NN 6.09	107
6.3.5.11 CNEN NN 8.01	107
6.3.5.12 CNEN NN 8.02	107
6.3.5.13 CNEN NN 9.01	108
6.3.5.14 CNEN NN 9.02	108
6.3.6 Aderência dos doc. regulatórios com as atividades de descomissionamento	108
6.4 Política de gestão de rejeitos radioativos no Brasil.....	109
7 DESCOMISSIONAMENTO DE REATORES NUCLEARES	111
7.1 Atividades técnicas de descontaminação e desmantelamento (DD)	114
7.1.1 Considerações técnicas na fase de projeto de construção e na fase de operação.....	114
7.1.2 Considerações técnicas no período de transição	116
7.1.2.1 Caracterização radiológica.....	116
7.1.2.2 Remoção do combustível irradiado	117
7.1.2.3 Drenagem do refrigerante no c. primário e da piscina de comb. irradiados	120
7.1.2.4 Remoção de RR de operação	121
7.1.2.5 Descontaminação preliminar e limpeza inicial	121
7.1.3 Técnicas de descontaminação e desmantelamento (DD).....	122
7.1.3.1 Técnicas de descontaminação nos componentes	122
7.1.3.2 Técnicas de desmantelamento dos componentes	123
7.1.3.3 Técnicas de descontaminação e desmantelamento de estruturas de edifícios	124
7.1.3.4 Estudo de caso – Descontaminação dos componentes do reator BR-3	125

7.2 Atividades técnicas de gestão de rejeitos radioativos (RR)	127
7.2.1 Classificação de rejeitos radioativos	130
7.2.2 Características dos rejeitos de descomissionamento.....	132
7.2.3 Segregação, tratamento e acondicionamento de rejeitos radioativos.....	133
7.2.4 Transporte	134
7.2.5 Depósitos de rejeitos radioativos	135
7.2.6 Estudo de caso: Considerações sobre volumes de rejeitos radioativos nos EUA....	139
7.3 Atividades administrativas de gestão de RH e conhecimento	142
7.3.1 Plano de Gestão de Recursos Humanos para o descomissionamento.....	144
7.3.2 Plano de gestão de conhecimento para o descomissionamento	146
7.4 Atividades administrativas de gestão de recursos financeiros	148
7.4.1 Estimativa de custo para o projeto de descomissionamento	149
7.4.1.1 International Structure for Decom. Costing of Nuclear Installations (ISDC).....	150
7.4.1.2 Estrutura Analítica de Projeto (EAP).....	152
7.4.2 Gestão de fundos do projeto de descomissionamento	153
7.4.2.1 Captação de recursos financeiros	154
7.4.2.2 Gestão e controle.....	155
7.4.2.3 Investimento.....	155
7.4.2.4 Mecanismos para sacar os fundos	156
8 ABORDAGENS DE DESCOMISSIONAMENTO	158
8.1 Fatores associados as abordagens a serem analisados pela técnica MCDA	159
8.1.1 Tempo de execução (em anos).....	159
8.1.2 Custo da atividade (em milhões de U\$)	159
8.1.3 Volume de rejeitos radioativos (em m ³).....	159
8.1.4 Viabilidade técnica.....	160
8.1.5 Proteção Radiológica para o Indivíduo Ocupacionalmente Exposto (IOE)	160
8.1.6 Proteção Radiológica para o público	160

8.1.6 Riscos industriais	160
8.1.7 Incertezas no regulamento	161
8.1.8 Segurança Física	161
8.1.9 Disponibilidade de recursos humanos qualificados.....	161
8.1.10 Disponibilidade de conhecimento disponível da instalação	161
8.1.11 Proteção à propriedade intelectual (PI).....	161
8.1.12 Nível de precisão da estimativa de custo	162
8.1.13 Outros fatores.....	162
8.2 Abordagens técnicas de descontaminação e desmantelamento (DD).....	162
8.2.1 Abordagem N° 1	162
8.2.2 Abordagem N° 2	165
8.2.3 Abordagem N° 3	167
8.2.4 Abordagem N° 4	168
8.3 Abordagens técnicas de gestão de rejeitos radioativos (RR)	170
8.3.1 Abordagem N° 1	171
8.3.2 Abordagem N° 2	173
8.3.3 Abordagem N° 3	175
8.3.4 Abordagem N° 4	177
8.3.5 Abordagem de armazenamento N° 1	178
8.3.6 Abordagem de armazenamento N° 2	179
8.3.7 Abordagem de armazenamento N° 3	180
8.4 Abordagens administrativa de gestão de RH e conhecimento.....	181
8.4.1 Abordagem de RH N° 1	182
8.4.2 Abordagem de RH N° 2	183
8.4.3 Abordagem de RH N° 3	187
8.4.4 Abordagem de RH N° 4	188
8.5 Abordagens administrativa de gestão financeira.....	190

8.5.1 Abordagem de estimativa de custo N° 1	191
8.5.2 Abordagem de estimativa de custo N° 2	192
8.5.3 Abordagem de estimativa de custo N° 3	194
8.5.4 Abordagem de estimativa de custo N° 4	194
8.5.5 Abordagem de gestão de fundo N° 1	195
8.5.6 Abordagem de gestão de fundo N° 2	198
8.5.7 Abordagem de gestão de fundo N° 3	200
8.5.8 Abordagem de gestão de fundo N° 4	202
8.5.9 Abordagem de gestão de fundo Extra	203
9 APRESENTAÇÃO DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA	205
9.1 Análise de decisão por multicritérios (MCDA)	205
9.2 Grupo de abordagens	206
9.3 Priorização dos fatores	210
9.4 Desenvolvendo estratégias de descomissionamento no Brasil.....	210
9.4.1 Atividades que devem ser consideradas no plano de descomissionamento.....	211
9.4.2 Selecionando abordagens pela metodologia proposta	213
9.4.3 Definindo a estratégia	216
9.4.4 Análise da estratégia proposta.....	217
10 ESTRATÉGIAS DE DESCOMISSIONAMENTO PARA REATORES DE PEQUENO PORTE NO BRASIL	219
10.1 Critérios para priorização de fatores em cada estratégia	222
10.2 Estratégia 1 – DECON para alcançar usos restritos: Cenário 2023	223
10.2.1 Selecionando as abordagens para a Estratégia 1	223
10.2.2 Definindo a Estratégia 1	225
10.2.3 Análise da Estratégia 1	225
10.3 Estratégia 2 – DECON para alcançar usos irrestritos: Cenário 2023	227
10.3.1 Selecionando as abordagens para a Estratégia 2	228

10.3.2 Definindo a Estratégia 2	230
10.3.3 Análise da Estratégia 2	230
10.4 Estratégia 3 – SAFSTOR para alcançar usos restritos: Cenário 2023	232
10.4.1 Selecionando as abordagens para a Estratégia 3.....	232
10.4.2 Definindo a Estratégia 3	234
10.4.3 Análise da Estratégia 3	234
10.5 Estratégia 4 – SAFSTOR para alcançar usos irrestritos: Cenário 2023	236
10.5.1 Selecionando as abordagens para a Estratégia 4.....	236
10.5.2 Definindo a Estratégia 4	238
10.5.3 Análise da Estratégia 4	239
10.6 Estratégia 5 – DECON para alcançar usos restritos: Cenário futuro	239
10.6.1 Selecionando as abordagens para a Estratégia 5.....	240
10.6.2 Definindo a Estratégia 5	242
10.6.3 Análise da Estratégia 5	242
10.7 Estratégia 6 – DECON para alcançar usos irrestritos: Cenário futuro	243
10.7.1 Selecionando as abordagens para a Estratégia 6.....	243
10.7.2 Definindo a Estratégia 6	245
10.7.3 Análise da Estratégia 6	246
10.8 Estratégia 7 – SAFSTOR para alcançar usos restritos: Cenário futuro	247
10.8.1 Selecionando as abordagens para a Estratégia 7.....	247
10.8.2 Definindo a Estratégia 7	249
10.8.3 Análise da Estratégia 7	249
10.9 Estratégia 8 – SAFSTOR para alcançar usos irrestritos: Cenário futuro	250
10.9.1 Selecionando as abordagens para a Estratégia 8.....	250
10.9.2 Definindo a Estratégia 8	252
10.9.3 Análise da Estratégia 8	252
11 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	254

11.1 Resultados do trabalho	254
11.1.1 Resultados da Parte 1	254
11.1.2 Resultados da Parte 2	255
11.1.3 Resultados da Parte 3	255
11.2 Discussões.....	259
11.2.1 Abordagens não selecionadas ou não indicadas	259
11.2.2 Abordagens selecionadas	260
11.2.3 Mudanças de estratégias durante a operação	261
11.2.3 Outros fatores e abordagens e suas mudanças com o tempo	262
12 CONCLUSÃO	263
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	266
APÊNDICE A – Informações dos principais elementos químicos presentes nos componentes dos reatores.....	275
APÊNDICE B – Decaimento radioativo dos 40 principais radionuclídeos no vaso de pressão do reator até 300 anos	278
APÊNDICE C – Decaimento radioativo dos 40 principais radionuclídeos na blindagem biológica até 300 anos	280
APÊNDICE D – Classificação de Rejeitos Radioativos.....	282
APÊNDICE E – Escala de pontuação para nivelar as abordagens pela Análise de decisão por multicritérios (MCDA).....	285
APÊNDICE F – Abordagens para o descomissionamento.....	286
APÊNDICE G – Painel para o apoio às decisões estratégicas associadas à descontaminação e desmantelamento.....	288
ANEXO 1 - Níveis de dispensa para materiais sólidos contendo radionuclídeos da Norma CNEN 8.01/2014	289

1 INTRODUÇÃO

Após a década de 1950, diversos projetos de reatores nucleares de potência foram construídos, impulsionados principalmente pelas preocupações com a segurança energética decorrente do choque do petróleo. Os primeiros reatores nucleares de potência foram projetados e desenvolvidos com base na tecnologia do programa nuclear naval dos Estados Unidos da América (EUA), o qual resultou no lançamento do protótipo terrestre do primeiro submarino de propulsão nuclear, o USS Nautilus (SSN-571), em 1953 [1].

Em 1957, uma parceria entre a Marinha, a antiga Comissão de Energia Atômica dos EUA e a *Westinghouse Electric Corporation* resultou na construção do primeiro reator nuclear de potência refrigerado a água pressurizada (PWR) para geração e fornecimento de energia elétrica. O reator nuclear, que produzia 75MWe, foi instalado em Shippingport, Pensilvânia, nos Estados Unidos [1]. Projetos semelhantes foram desenvolvidos em outros países, como França, antiga Alemanha Ocidental, Japão e Coreia do Sul, além de uma versão especial na Rússia (VVER) [2].

Os primeiros reatores nucleares de potência desenvolvidos no mundo foram os reatores de pequeno porte, que segundo a classificação da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) têm potências inferiores a 300MWe [3]. A partir desses projetos menores, surgiram versões ampliadas de reatores de médio e grande porte.

De acordo com a publicação "*Nuclear Power Reactor in the World 2022*" da AIEA [4], até dezembro de 2021, haviam sido construídos 636 reatores nucleares de potência. Deste total, 169 foram descomissionados ou estão em processo de descomissionamento. Até o final do ano de 2022, 437 reatores de potência estavam em operação, com uma capacidade total de geração de energia de 389GWe [5]. A energia gerada por esses reatores é responsável por 10% de toda energia elétrica consumida no mundo, sendo a segunda maior fonte de energia de baixo carbono, ficando atrás apenas das hidrelétricas que geram 16% da eletricidade fornecida mundialmente [4].

Atualmente, a energia nuclear apresenta-se como uma alternativa às energias baseadas em combustíveis fósseis, contribuindo com as metas relacionadas à redução de emissões de gases de efeito estufa e aos objetivos da descarbonização descritos no Cenário de Desenvolvimento Sustentável (SDS) da Agência Internacional de Energia (IEA) [6]. Sendo assim, enquanto as usinas termoeletricas convencionais precisam consumir combustíveis fósseis para gerar energia e, conseqüentemente, produzir gases causadores do efeito estufa, as usinas nucleares geram energia por meio do calor gerado pelo processo de

fissão em cadeia autossustentada do combustível nuclear. Durante esse processo, são gerados rejeitos radioativos que devem ser devidamente manuseados e controlados, sem causar danos à população e ao meio ambiente.

Para cumprir com as metas do SDS, é necessário que a energia nuclear aumente sua capacidade de geração de energia de forma significativa e estenda a vida útil dos reatores nucleares em operação. No entanto, os avanços em termos de segurança e regulamentação resultaram em um aumento no tempo e nos custos de construção de novos reatores nucleares [7]. Além disso, a percepção e aceitação social de novos projetos nucleares após os acidentes de Three Mile Island, Chernobyl e Fukushima ainda são um obstáculo para atrair novos investimentos.

De forma a enfrentar esses desafios, formuladores de políticas vislumbram a possibilidade de voltar a priorizar a construção de reatores de pequeno porte, porém, adicionando conceitos de modularização, padronização e construção em série. Dessa maneira, entende-se que é possível reduzir os custos e minimizar o tempo de construção. Esses reatores de pequeno porte são conhecidos como *Small Modular Reactor (SMR)* [7].

Os SMR podem ser a solução para alcançar as metas de descarbonização e mitigar as mudanças climáticas. Suas principais vantagens decorrem de seu projeto compacto e modular, que permite que sejam instalados em áreas onde usinas maiores não seriam viáveis. Além disso, podem ser fabricados em série, transportados e instalados em diferentes locais, oferecendo maior flexibilidade no processo de construção.

De acordo com a publicação “*Advances in Small Modular Reactor Technology Developments 2022 edition*” da AIEA [8], até o ano de 2022, existiam 83 projetos de SMR em diferentes níveis de conceito de projeto e maturação. Desses estão: 4 em fase de operação (sendo 1 do tipo PWR embarcado); 1 em fase de licenciamento; 5 em fase de construção; e 73 em fase de projeto.

Os conceitos de SMR mais maduros propostos pela indústria nuclear são variantes evolutivas dos reatores de Geração II e III, com o tipo de refrigerante a base de água ou gás. Esses modelos de SMR se beneficiam de muitas décadas de experiência operacional e regulatória. Do total de projetos de SMR, esses contemplam 65%. Os outros 35% representam os SMR de Geração IV, na qual incorporam refrigerantes alternativos, como por exemplo, o metal líquido (chumbo, bismuto ou outros, como os sais fundidos) [8]. Porém, esses tipos de reatores não possuem os mesmos níveis de experiência operacional e regulatória e, ainda, não possuem níveis de maturidade operacional [7].

O Brasil adotará, provavelmente, a opção tecnológica PWR para a construção de SMR, devido à maturidade alcançada na regulamentação, no licenciamento e na segurança. Além disso, o Brasil tem uma grande experiência na operação de usinas nucleares do tipo PWR, o que aumenta a confiança na escolha dessa opção tecnológica.

A adoção de reatores SMR a partir de 2030 no Brasil, conforme consta no Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) [9], poderá trazer inúmeras vantagens em relação à geração de energia elétrica de outras fontes. Dentre elas, destaca-se a possibilidade de diversificar a matriz energética brasileira, reduzir a dependência de fontes fósseis e garantir a segurança energética do país a longo prazo.

Para tal, o país vem aprimorando a estrutura regulatória do setor nuclear, incluindo a criação da Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN) [10] e da Secretaria Naval de Segurança Nuclear e Qualidade (SecNSNQ) [11], responsáveis por monitorar, regular, fiscalizar e licenciar atividades nucleares no país, seguindo padrões internacionais de qualidade e transparência. Essa medida reforça os compromissos assumidos pelo país [12], além de garantir que todas as atividades nucleares sejam realizadas com o máximo de proteção e segurança.

Embora os reatores nucleares de potência, incluindo todos os reatores nucleares de pequeno porte, forneçam muitos benefícios na geração de energia, é importante lembrar que durante a sua operação eles produzem materiais radioativos que podem permanecer ativos por milhares de anos. A expectativa é que um reator nuclear possa operar, em média, no máximo, em torno de 60 anos. No final de sua vida útil, os reatores nucleares precisam passar pelo processo de descomissionamento, que envolve a descontaminação e o desmantelamento da estrutura e a gestão adequada dos rejeitos radioativos gerados.

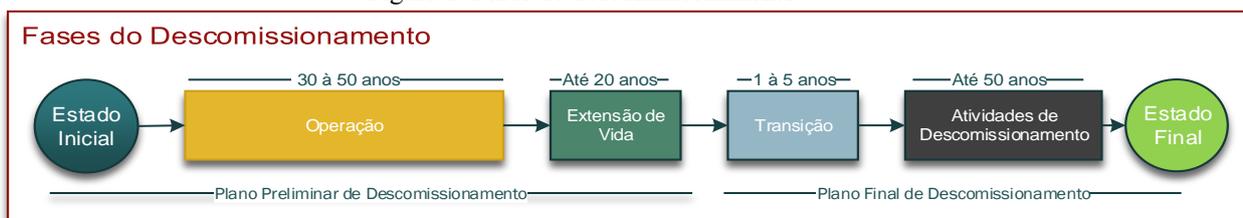
O processo de descomissionamento é composto por atividades técnicas e administrativas que visam o desligamento de uma instalação nuclear, incluindo a remoção total ou parcial do controle regulatório. O objetivo é garantir a segurança do local da instalação, a saúde dos trabalhadores e do público em geral e a proteção do meio ambiente.

Todas as atividades de descomissionamento são realizadas com base nos requisitos de saúde e segurança dos trabalhadores e do público, bem como nas implicações ambientais que essas atividades possam ter. Isso inclui a redução dos níveis de radiação a níveis tão baixos quanto razoavelmente exequível (*As Low As Reasonably Achievable-ALARA*) para que materiais e edifícios possam ser liberados e reutilizados sem restrições (usos irrestritos) ou com restrições (usos restritos).

O descomissionamento de reatores nucleares é um projeto que deve ser conduzido como qualquer outro projeto de engenharia, com a diferença de que envolve equipamentos e materiais radioativos que precisam ser manuseados e controlados em conformidade com os pré-requisitos técnicos e regulatórios, colocando-os em condição que não represente um risco inaceitável para a saúde, a segurança e o meio ambiente. Embora isso represente um desafio adicional, os princípios de gestão de projetos são os mesmos. É essencial ter uma visão clara do estado final desejado (restrito ou irrestrito) do projeto [13].

O projeto de descomissionamento é um projeto complexo que pode levar décadas para ser planejado e executado. Ele começa com a elaboração de um Plano Preliminar de Descomissionamento (PPD) ainda na fase de projeto de construção da instalação, que acompanha toda a fase de construção e operação. Ao final da vida útil da instalação, é elaborado um Plano Final de Descomissionamento (PFD), que deve ser aprovado pelo órgão regulador competente antes do início das atividades de descomissionamento. A aprovação do PFD é essencial para garantir que as atividades de descomissionamento sejam realizadas de forma segura. A fase de execução do descomissionamento começa após a aprovação do PFD e termina quando o desmantelamento, a descontaminação e a limpeza são concluídos e a licença pode ser rescindida [14]. Na Figura 1, são ilustradas as fases do projeto de descomissionamento.

Figura 1- Fases do descomissionamento



Fonte: Elaborado pelo autor com base na referência [15]

O projeto de descomissionamento é caracterizado por uma grande quantidade de incertezas e desafios, que precisam ser abordados desde o início do projeto de construção. O PPD é elaborado nessa fase inicial, mas pouco ou nenhum detalhe pode estar disponível, como as tecnologias de descontaminação e desmantelamento, a disponibilidade de depósitos de rejeitos radioativos, a disponibilidade financeira, os recursos humanos e entre outros.

Já o PFD está associado ao detalhamento de execução das atividades técnicas e administrativas e deve existir poucas incertezas. O PFD é usado para ditar a execução real dos trabalhos do descomissionamento e mapear os perigos envolvidos nesse processo.

Portanto, ambos os planos são importantes para o sucesso do projeto de descomissionamento, mas em fases distintas e com os mesmos objetivos.

Nesse sentido, a AIEA recomenda [16] que o projeto de descomissionamento seja conduzido de forma integrada e em consonância com a estrutura regulatória e as considerações técnicas, administrativas, sociais, ambientais e econômicas do país. De forma a alcançar um estado final desejado para a instalação, a AIEA sugere adotar uma das três estratégias de descomissionamento: desmantelamento imediato (DECON), desmantelamento protelado (SAFSTOR) e confinamento (ENTOMB). Todavia, somente as duas primeiras são aplicáveis. A estratégia de confinamento ou a opção de deixar a instalação após a operação aguardando o decaimento radioativo não são aceitáveis devido ao seu potencial impacto negativo nas gerações futuras. Face a isso, AIEA não recomenda o confinamento como opção [17].

Embora o descomissionamento de um reator nuclear seja uma tarefa desafiadora e complexa, ele é um passo importante no ciclo de vida de uma usina nuclear. O descomissionamento pode levar décadas e exigir um investimento financeiro significativo. Porém, é importante ressaltar que o descomissionamento bem-sucedido, executado por uma estratégia ótima é determinante para a restauração da confiança da sociedade a longo prazo na energia nuclear.

Desse modo, é importante mencionar que no Brasil não há experiência em execução de projetos de descomissionamento de reatores nucleares, o que pode resultar em lacunas a serem consideradas. Portanto, existe uma demanda no país pelo estudo e desenvolvimento de estratégias de descomissionamento para reatores nucleares de pequeno porte, a fim de obter informações mais detalhadas sobre técnicas e abordagens de descomissionamento que podem ser adotadas em conformidade com os requisitos técnicos e regulatórios nacionais, de modo a alcançar o estado final desejado do projeto de descomissionamento.

Visando o crescimento das atividades nucleares previstas no PNE2050 e levando em consideração as mudanças regulatórias recentes, torna-se importante propor estratégias para as atividades de descomissionamento para esses reatores no futuro. Dentre os diversos aspectos a serem considerados, destacam-se as atividades de descontaminação e desmantelamento, gestão de rejeitos radioativos, gestão de recursos humanos e conhecimento e gestão de recursos financeiros. É fundamental desenvolver planos que abordem de forma eficiente essas questões, demonstrando a viabilidade de ser implementada

e acompanhada durante todo o processo de descomissionamento de forma segura para alcançar o estado final desejado.

Nesse sentido e diante da complexidade das atividades de descomissionamento, é imperativo o desenvolvimento de estratégias bem planejadas e sistemáticas. Dessa forma, este trabalho pretende desenvolver estratégias para o descomissionamento de reatores nucleares de pequeno porte, que poderão ser construídos no Brasil em um futuro próximo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver estratégias para o descomissionamento de reatores nucleares de pequeno porte no Brasil, com base nas boas práticas internacionais, nas recomendações da AIEA e de acordo com os requisitos regulatórios estabelecidos pelo órgão regulador brasileiro. Esse processo levará em consideração as singularidades da realidade brasileira, a fim de garantir a segurança e a proteção do público e do meio ambiente durante o descomissionamento dessas instalações.

1.1.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, foram analisadas as experiências de descomissionamento retratadas em artigos e publicações internacionais e planos de descomissionamentos compartilhados em domínio público. Com o uso da técnica de gestão de riscos, foram realizadas análises comparativas dessas experiências de descomissionamentos, a fim de identificar as melhores práticas que podem ser aplicadas no contexto brasileiro. Também foram estudados e levados em consideração os requisitos legais e regulatórios aplicáveis ao descomissionamento de reatores nucleares no Brasil. Dessa forma, este trabalho têm os seguintes objetivos específicos:

- a) identificar e analisar os componentes e estruturas do reator que precisam ser descomissionados;
- b) realizar estudos sobre a produção de radionuclídeos no reator;
- c) identificar e desenvolver abordagens técnicas e administrativas para o descomissionamento de reatores nucleares;
- d) criar uma metodologia para desenvolver estratégias de descomissionamento usando as técnicas do processo de avaliação de risco; e

- e) propor estratégias de descomissionamento de reatores nucleares de pequeno porte no Brasil.

1.2 Justificativa

No Brasil, ainda não há experiência em execução de projetos de descomissionamento de reatores nucleares, o que torna relevante a realização de estudos de atividades técnicas e regulatórias para lidar com essa demanda emergente. Este trabalho poderá apoiar os projetos de descomissionamento de reatores nucleares no Brasil, de forma a atender à possível demanda para o país no futuro próximo. Ao final, serão propostas oito estratégias desenvolvidas para o descomissionamento de reatores de pequeno porte no Brasil, considerando as experiências internacionais e as particularidades locais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste trabalho, foi realizada, inicialmente, uma pesquisa bibliográfica com o objetivo principal de compreender os principais conceitos básicos, requisitos técnicos, requisitos regulatórios e experiências relatadas no campo do descomissionamento.

Posteriormente, foi conduzida uma pesquisa abrangendo experiências de descomissionamento e analisando essas estratégias por meio de técnica do processo de avaliação de risco descrita na norma ABNT ISO 31010. Essa abordagem prática permitiu o desenvolvimento de estratégias específicas para o descomissionamento de reatores nucleares de pequeno porte no Brasil.

2.1 Referencial teórico

Os principais referenciais teóricos utilizados neste trabalho foram obtidos através da consulta à base de dados de publicações científicas e técnicas da AIEA [18]. Essa base de dados contempla uma variedade de documentos, incluindo orientações internacionais de segurança, guias técnicos, atas de conferências e relatórios científicos. Além das publicações da AIEA, também foram consultadas as publicações da OCDE/NEA, mencionadas no decorrer deste trabalho, que fornecem informações relevantes e atualizadas sobre as melhores práticas e experiências no campo do descomissionamento. Adicionalmente, foram examinados artigos científicos internacionais de renomadas revistas a fim de obter perspectivas adicionais e contribuições acadêmicas de especialistas na área.

2.2 Experiências em descomissionamento de reatores nucleares

Apesar do foco deste trabalho estar direcionado ao descomissionamento de reatores nucleares de pequeno porte, foram realizadas pesquisas sobre experiências de descomissionamento de diversos tipos de reatores nucleares. Isso incluiu reatores de potência de médio e grande porte, bem como reatores nucleares de pesquisa. Embora a pesquisa tenha dado ênfase aos reatores do tipo PWR, outras experiências de descomissionamento, como o BWR também foram analisadas e incluídas na pesquisa.

Assim, o trabalho pôde identificar semelhanças, diferenças e aspectos importantes a serem considerados, mesmo ao tratar especificamente dos reatores nucleares de outros tipos que não são foco do trabalho. Essa abordagem tornou o estudo mais completo e permitiu uma compreensão melhor do tema do descomissionamento de reatores nucleares.

Adicionalmente, foram analisados outros estudos realizados na área de descomissionamento em nível nacional. Isso incluiu a análise de teses de doutorado e mestrado que abordavam o tema. Considerando que o Brasil não possui experiência na execução de projetos de descomissionamento de reatores, esses estudos foram examinados para identificar as estratégias propostas e adquirir conhecimentos relevantes.

Dentre os estudos analisados, é importante destacar o trabalho do Prof. Dr. Roberto Frajndlich [19], do Dr. Deiglys Borges Monteiro [20], do Dr. Yran Leite Maia [21], do Ms. Adalberto Rodrigues Sobreiro Junior [22] e do Ms. Ary de Souza Vivas [23]. A análise desses estudos nacionais permitiu obter uma perspectiva mais específica do contexto brasileiro e agregar informações relevantes para a compreensão das estratégias e desafios envolvidos no descomissionamento de reatores nucleares em um contexto nacional.

2.3 Estratégia de descomissionamento

A definição de estratégia para descomissionamento variou ao longo dos anos. No passado, as instalações nucleares incluía um sistema de referência a várias estratégias de descomissionamento, como etapas 1,2,3. Como as definições das etapas eram abertas à interpretação, não eram conveniente adotá-las. Desde 1996, essa nomenclatura não é mais usada nas publicações da AIEA, em vez disso, ela adotou três abordagens para estratégias de descomissionamento, que são: desmantelamento imediato (DECON); desmantelamento protelado (SAFSTOR) e confinamento (ENTOMB) [13].

No Brasil, a Norma regulamentadora CNEN NN 9.01, que trata de descomissionamento de usinas nucleoeletricas, define essas estratégias como [24]:

I - Desmantelamento imediato: nesta estratégia, equipamentos, estruturas e partes da usina contendo contaminantes radioativos são removidos ou descontaminados até níveis que permitam que o local seja liberado para uso irrestrito ou restrito, conforme critérios definidos ou aceitos pela CNEN. Esta estratégia implica em concluir o descomissionamento em um curto espaço de tempo e envolve a transferência do material e do rejeito radioativo para uma instalação licenciada, para seu processamento ou armazenamento ou deposição final, conforme aplicável;

II - Desmantelamento protelado: nesta estratégia, a usina é monitorada e mantida intacta por um período tal que permita o decaimento radioativo de itens contaminados ou ativados. Os

materiais radioativos inicialmente presentes são processados ou colocados em condição tal que possam ser armazenados e mantidos em segurança durante esse período. Findo este, a usina será submetida a um desmantelamento, da mesma forma que na estratégia de desmantelamento imediato; e

III – Confinamento: nesta estratégia, os contaminantes radioativos são contidos em uma estrutura de material suficientemente resistente até que a radioatividade decaia para níveis que permitam que o local seja liberado para uso irrestrito ou restrito.

A estratégia de confinamento ou a opção de deixar a instalação após a operação aguardando o decaimento radioativo não é aceitável devido ao seu potencial impacto negativo nas gerações futuras. Face a isso, AIEA não recomenda o confinamento como opção. Ainda assim, ela pode ser considerada como uma última opção para gerenciar instalações danificadas por um acidente ou inviabilidade técnicas para realizar o desmantelamento. Existem apenas 5 confinamentos de reatores nucleares na história, 4 confinamentos ocorreram na década de 60 e o de Chernobyl em 1986 [17].

2.3.1 Fatores que afetam a seleção de uma estratégia

Estudos de descomissionamento apontaram que considerações legais, técnicas, econômicas e radiológicas influenciam na decisão para seleção da estratégia de descomissionamento. Desta maneira, a AIEA identificou os principais fatores que afetam a seleção de uma estratégia de descomissionamento, que são [13]:

- a) o modelo da instalação e as infraestruturas próximas;
- b) o estado físico atual e o estado final desejado;
- c) as tecnologias disponíveis para o descomissionamento;
- d) a política nuclear e a estrutura regulatória;
- e) os aspectos de segurança nuclear;
- f) a capacitação técnica disponível de mão de obra especializada;
- g) o impacto ambiental da instalação e do seu desmantelamento;
- h) os fatores sociais e econômicos;
- i) a infraestrutura para gestão de rejeitos radioativos; e
- j) a disponibilidade de recursos humanos e financeiros.

Experiências demonstram que a seleção de uma estratégia de descomissionamento varia de instalação para instalação, seguindo um processo iterativo, e

deve-se basear em uma análise das várias opções. Essas análises devem levar em conta os princípios da proteção radiológica, os limites de dose, a segurança, a regulamentação, os recursos humanos, os recursos financeiros e as tecnologias da época [13]. A seleção de uma estratégia implica uma transferência de responsabilidade do descomissionamento para as futuras gerações.

2.3.2 Motivos para a realização do descomissionamento

Um estudo realizado na indústria nuclear em 2012 apontou os principais motivos pelas quais uma instalação nuclear é descomissionada, que são [25]:

- a) acidente que resulte em extensa contaminação e/ou danos estruturais (por exemplo: Chernobyl e Fukushima);
- b) atualizações de segurança podem não ser possíveis de serem executadas ou os custos para atualização sejam inviáveis;
- c) os custos das instalações se tornaram caros e antieconômicos;
- d) obsolescência técnica ou conclusões de pesquisas; e
- f) mudança na política do governo, como ocorreu recentemente na Alemanha após o acidente de Fukushima [26].

É possível que algumas das motivações acima poderiam resultar na decisão de reformar uma instalação e reiniciar a operação, em vez de desligá-la definitivamente. As melhorias operacionais podem ser ditadas pela oportunidade de obter maior eficiência da instalação, modificar um processo ou prolongamento da vida útil da planta por meio da reforma de componentes obsoletos ou envelhecidos. Nesse sentido, é importante que a estratégia a ser seguida dependerá de uma análise de custo-benefício, geralmente incluindo fatores financeiros [25].

2.3.4 Seleção de estratégias de descomissionamento

É importante ressaltar que a seleção de uma estratégia de descomissionamento é realizada após uma análise criteriosa das condições específicas de cada instalação nuclear e do contexto em que se encontra. Dessa forma, é necessário considerar os fatores que podem influenciar no processo de descomissionamento. Além disso, é importante avaliar se existem políticas específicas para a gestão de rejeitos radioativos e combustível irradiado, bem como a disponibilidade de um repositório nacional adequado para o armazenamento desses materiais [27]. A infraestrutura de transporte seguro de materiais radioativos e a disponibilidade de profissionais especializados na área nuclear também são fatores

importantes a serem considerados na escolha da estratégia mais adequada para o descomissionamento da instalação [27].

Por fim, é importante ressaltar que a experiência anterior em descomissionamento, tanto no país como em outros países, pode fornecer informações importantes para o processo de tomada de decisão e deve ser considerada na seleção da estratégia mais apropriada [28]. Dessa forma, a análise de todos esses fatores é fundamental para garantir que o descomissionamento seja realizado de forma segura e econômica.

Dessa forma, as estratégias precisam ser avaliadas minuciosamente para garantir que as abordagens “ótima” sejam adotadas, e posteriormente, seja selecionada uma estratégia. Para isso, é necessário, sempre que possível, realizar uma análise de risco de projetos de descomissionamento, seja no planejamento ou na execução, de modo a elaborar estratégias para alcançar o estado final no tempo definido e com segurança.

2.3.5 Custos de projetos de descomissionamento

O descomissionamento de reatores nucleares é um processo caro e demorado, estimativas atuais variam entre US\$ 400 milhões e US\$ 1 bilhão [29]. Os custos do descomissionamento não podem ser subestimados, independente do momento que será executado e da estratégia a ser adotada. Na Tabela 1, é apresentado os custos de projetos de descomissionamento de reatores nos EUA [30].

Tabela 1- Custos de projetos de descomissionamento nos EUA

NPP	Tipo	MWe	Vida Útil	Motivo do Encerramento	Custo Estimado U\$ milhões
Connecticut Yankee	PWR	582	28	Econômico	820
Yankee Rowe	PWR	167	30	Econômico, técnico e regulatório	608
Maine Yankee	PWR	840	25	Econômico e técnico	592
San Onofre 1	PWR	410	24	Econômico e técnico	622
Rancho Seco	PWR	913	14	Referendo público	466
Trojan	PWR	1130	16	Econômico e técnico	430
Zion units 1 and 2	PWR	1040	24	Econômico e técnico	1000 (2 unidades)
Three Mile Island unit 2	PWR	906	1,5	Acidente	893
Millstone unit 1	BWR	652	25	técnico e regulatório	422
Big Rock Point	BWR	67	35	Econômico e técnico	420

Fonte:[30].

Os órgãos reguladores dos países membros da AIEA adotam o princípio poluidor-pagador, que estabelece que as gerações que receberam o benefício da tecnologia nuclear devem ser responsáveis pelo descomissionamento da instalação. Dessa forma, evita-

se sobrecarregar as gerações futuras com a responsabilidade de pagar por algo que não usufruíram [31]. Para cumprir esse princípio ético, as gerações que receberam o benefício devem reservar os recursos financeiros necessários para o descomissionamento. Assim, quando chegar o momento, os recursos estarão disponíveis para executar o projeto de descomissionamento.

No Brasil, tem-se duas normas específicas sobre o descomissionamento, a norma CNEN NN 9.01, que regula o descomissionamento de usinas nucleoeletricas [24] e a norma CNEN NN 9.02, que regula a gestão dos recursos financeiros destinados ao descomissionamento das usinas nucleoeletricas [32]. A norma de descomissionamento estabelece como uma das etapas do processo de licenciamento de operação da instalação a apresentação do PPD, que deve contemplar a estratégia de descomissionamento a ser adotada “demonstrando que pode ser implementado de forma segura para alcançar o estado final previsto para o local e estruturas remanescentes” [24].

2.3.6 Interpretações das Estratégias

As interpretações entre as estratégias da AIEA pode variar entre os países, mesmo entre os membros da AIEA e da OCDE/NEA. De fato, os Padrões de Segurança da AIEA reconhecem apenas duas estratégias aplicáveis, o desmantelamento imediato e o protelado, recomendando a prioridade para a primeira opção sempre que possível [16].

No desmantelamento imediato, as ações começam logo após um breve período após o desligamento permanente (“*begin shortly after the permanent shutdown*”), enquanto, no desmantelamento protelado, a usina é colocada em condições que possam ser armazenados e mantidos os materiais radioativos em segurança por um certo período. Uma combinação entre as duas estratégias também é possível, depois do desligamento permanente, a organização operadora pode usar um curto período de desmantelamento protelado e, eventualmente, terminar os processos de descontaminação e desmantelamento em uma data posterior [13].

No entanto, devido à complexidade e à elevada ativação radioativa no reator das usinas nucleares, é necessário um curto período de transição entre o término da operação e o início das atividades de descomissionamento, que pode variar de 2 a 5 anos, de acordo com as considerações de segurança da AIEA [16]. Embora seja realizado após o desligamento, esse período ainda é considerado como parte da fase operacional. Portanto, o desmantelamento imediato não é possível em usinas nucleares sem levar em conta o período

de transição. Para este trabalho, é considerado o desmantelamento imediato como aquele em que as atividades começam logo após o período de transição.

Uma pesquisa realizada por alguns países membros da OCDE/NEA indicou o tempo ideal de duração de cada etapa em um projeto de descomissionamento, levando em consideração a adoção da estratégia do desmantelamento imediato. Os resultados da pesquisa podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2- Pesquisa OCDE/NEA- tempo ideal de um projeto DECON

País	Estado Final	Período de Transição (anos)	Desmantelamento (anos)	Descontaminação (anos)	Demolição Convencional e Restauração do Local (anos)
Finlândia	Restrito	2	2	3	Não incluído
França	Irrestrito	3	7	3	2
Eslováquia	Restrito	5	3	10	
Espanha	Irrestrito	2	4	3	
Suíça	Irrestrito	5	10 a 15		

Fonte:[28].

Conforme os dados apresentados na Tabela 2, esses países consideram que o processo de descomissionamento adotando a estratégia de desmantelamento imediato devem ser concluídas em torno de 5 e 15 anos após o período de transição. No entanto, na prática, é possível verificar que a duração dessas atividades é relativamente maior.

Por exemplo, na publicação “*Nuclear Power Reactor in the World 2022*” da AIEA [4], são listados 169 Plantas Nucleares de Potência (NPP) que foram descomissionadas ou estão em processo de descomissionamento até dezembro de 2021. De acordo com a OCDE/NEA, apenas 15 dessas 169 usinas concluíram o descomissionamento, sendo 12 nos EUA e 3 na Alemanha [28]. Esses documentos contêm informações sobre a estratégia adotada, o ano do desligamento e a conclusão do descomissionamento de cada usina. Na Tabela 3, é apresentada as informações dos 15 reatores nucleares com descomissionamento concluídos.

Tabela 3- Reatores 100% descomissionamentos

País	Unidade	Tipo Reator	Potência Elétrica	Estratégia	Ano de Desl.	Ano de Conclusão	Duração (Anos)
Alemanha	VAK KAHL	BWR	16 MWe	Imediato	1985	2010	25
Alemanha	GROSSWELZHEIM	Protótipo	27 MWe	Imediato	1971	1998	27
Alemanha	NIEDERAICHBACH	GCHWR	106 MWe	Protelado	1974	1995	21
EUA	SHIPPINGPORT	PWR	68 MWe	Imediato	1982	1989	7
EUA	ELK RIVER	BWR	24 MWe	Imediato	1968	1974	6
EUA	BIG ROCK POINT	BWR	71 MWe	Imediato	1997	2006	9
EUA	HADDAM NECK	PWR	603 MWe	Imediato	1996	2007	11
EUA	FORT ST. VRAIN	HTGR	342 MWe	Imediato	1989	1997	8
EUA	SHOREHAM	PWR	849 MWe	Imediato	1989	1995	6
EUA	PATHFINDER	BWR	63 MWe	Outros	1967	1993	26
EUA	SAXTON	PWR	3 MWe	Outros	1972	2005	33
EUA	YANKEE NPS	PWR	180 MWe	Outros	1991	2006	15
EUA	MAINE YANKEE	PWR	900 MWe	Outros	1997	2005	8
EUA	RANCHO SECO-1	PWR	917 MWe	Outros	1989	2009	20
EUA	TROJAN	PWR	1155MWe	Outros	1992	2005	13

Fonte: [4, 28].

Analisando as NPP em processo de descomissionamento citadas na publicação “*Nuclear Power Reactor in the World 2022*”, é possível notar uma mistura nas durações entre as estratégias adotadas. Por exemplo, há quatro reatores desligados na década de 1970 que indicaram a adoção da estratégia de desmantelamento imediato, porém, aproximadamente 50 anos depois, ainda não concluíram o processo de descomissionamento[4].

Levando em consideração os 5 anos máximos para o período de transição e mais 15 anos de desmantelamento imediato (total de 20 anos) como o tempo de duração ideal indicado por alguns países da OCDE/NEA, conforme a pesquisa apresentada na Tabela 2, podemos afirmar, com base nos dados da publicação “*Nuclear Power Reactor in the World 2022*” da AIEA, que existem 30 reatores que adotaram a estratégia de desmantelamento imediato e que possuem mais de 20 anos em processo de descomissionamento, o que corresponde a 52% do total de reatores que informaram ter adotado a estratégia imediata.

Na Tabela 4, é apresentada a relação entre a década em que a instalação foi desligada e o somatório da estratégia adotada pelas NPP, bem como um gráfico que

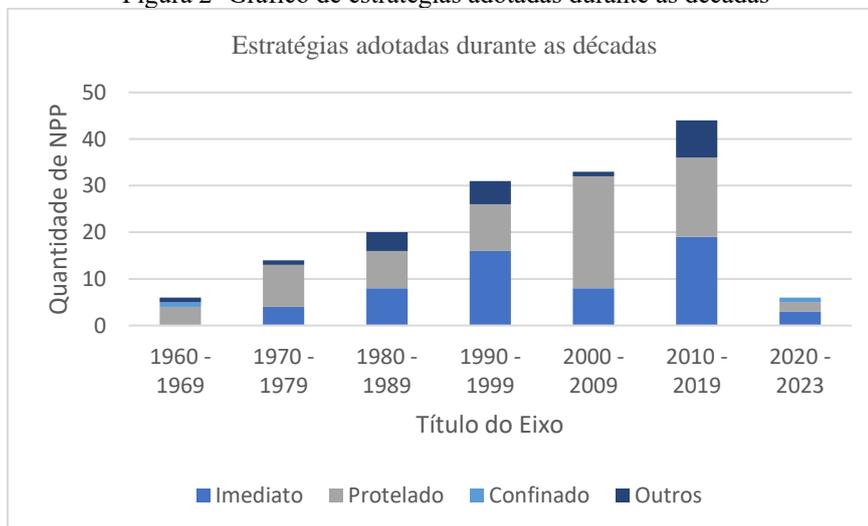
representa os dados, apresentado na Figura 2. Essas NPP ainda se encontram na fase de descomissionamento.

Tabela 4- Relação entre a década de desligamento e a estratégia adotada

Década do desligamento	Imediato	Protelado	Confinado	Outros
1960 - 1969	0	4	1	1
1970 - 1979	4	9	0	1
1980 - 1989	8	8	0	4
1990 - 1999	16	10	0	5
2000 - 2009	8	24	0	1
2010 - 2019	19	17	0	8
2020 - 2023	3	2	1	0

Fonte: [4].

Figura 2- Gráfico de estratégias adotadas durante as décadas

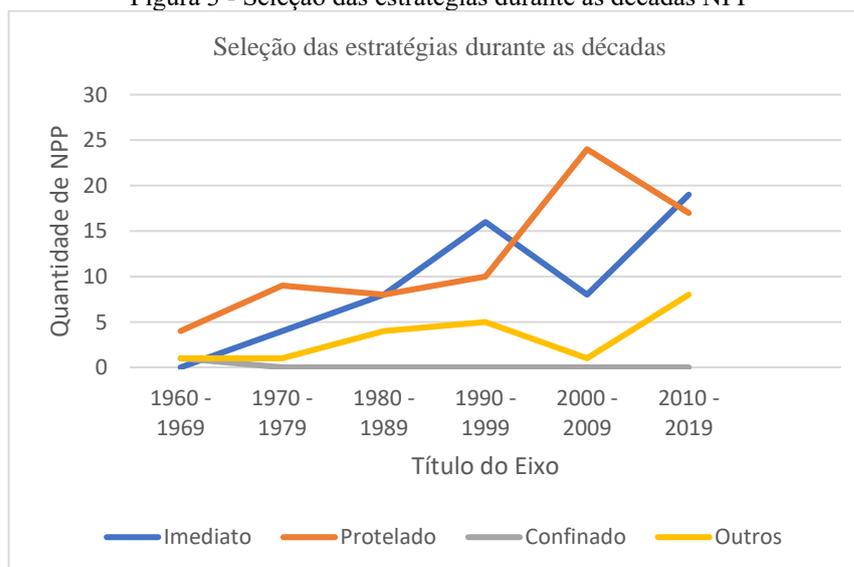


Fonte: [4].

Os dados também podem ser usados para analisar a variação das estratégias adotadas pelas usinas nucleares durante as décadas. Por exemplo, antes da década de 1990, a maioria das usinas nucleares adotava a estratégia protelada. Durante a década de 1990, a estratégia imediata tornou-se a mais utilizada, mas na década de 2000, a estratégia protelada voltou a ser a preferida. Já na década de 2010, a estratégia imediata voltou a ser a mais adotada.

Essa alternância pode ser explicada pelas políticas adotadas pelas usinas nucleares após os acidentes nucleares, como o acidente de Chernobyl em 1986 e o acidente de Fukushima em 2011. Geralmente, próximo das décadas em que ocorreram esses acidentes, as usinas nucleares adotaram a estratégia imediata como medida. Na Figura 3, é mostrado o gráfico que representa essa alternância de estratégia durante as décadas.

Figura 3 - Seleção das estratégias durante as décadas NPP



Fonte: [4].

Sendo assim, conforme o conceito de projeto, é necessário definir um início e um fim. A previsão de duração do projeto de descomissionamento é um dos parâmetros importantes e necessários para as estimativas de custos e de segurança e, conseqüentemente, influenciam nas elaborações das estratégias. Nesse sentido, a norma da CNEN 9.01 diz que o plano final de descomissionamento deve prever prazo de implementação inferior a 60 anos após o fim da operação comercial da usina [24].

De forma a padronizar os trabalhos em relação a duração no processo de descomissionamento, foram definidas as seguintes premissas a serem utilizadas ao longo desse trabalho.

a) as atividades de desmantelamento imediato terão início logo após o período de transição e devem ser finalizadas em até 15 anos;

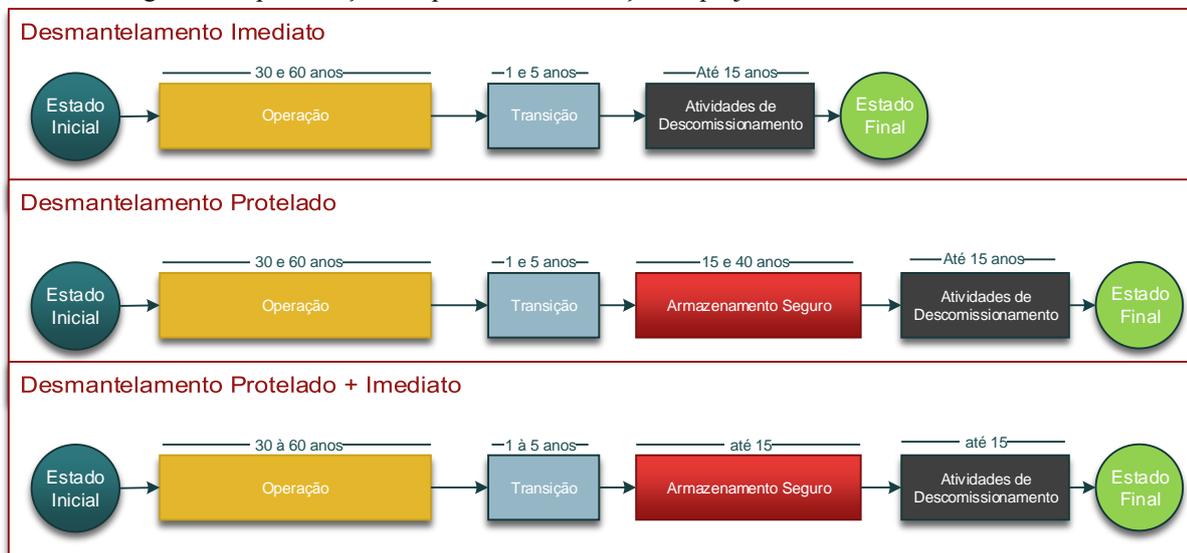
b) as atividades do desmantelamento protelado terá início em algum momento entre 15 e 40 anos de armazenamento seguro e devem ser concluídas em 15 anos de atividades de desmantelamento;

c) na estratégia combinada (DECON+SAFSTOR), foi definida, que o início do desmantelamento ocorrerá antes de 15 anos de armazenamento seguro e devem ser concluídas em até mais 15 anos de atividades de descomissionamento; e

d) as estratégias que ultrapassarem 60 anos serão consideradas como confinamento.

Para facilitar a compreensão das premissas definidas neste trabalho em relação à duração de cada estratégia de descomissionamento, é apresentado na Figura 4 uma ilustração desses dados.

Figura 4- Representação das premissas de duração de projetos de descomissionamento



Fonte: Autor.

3 METODOLOGIA DO TRABALHO

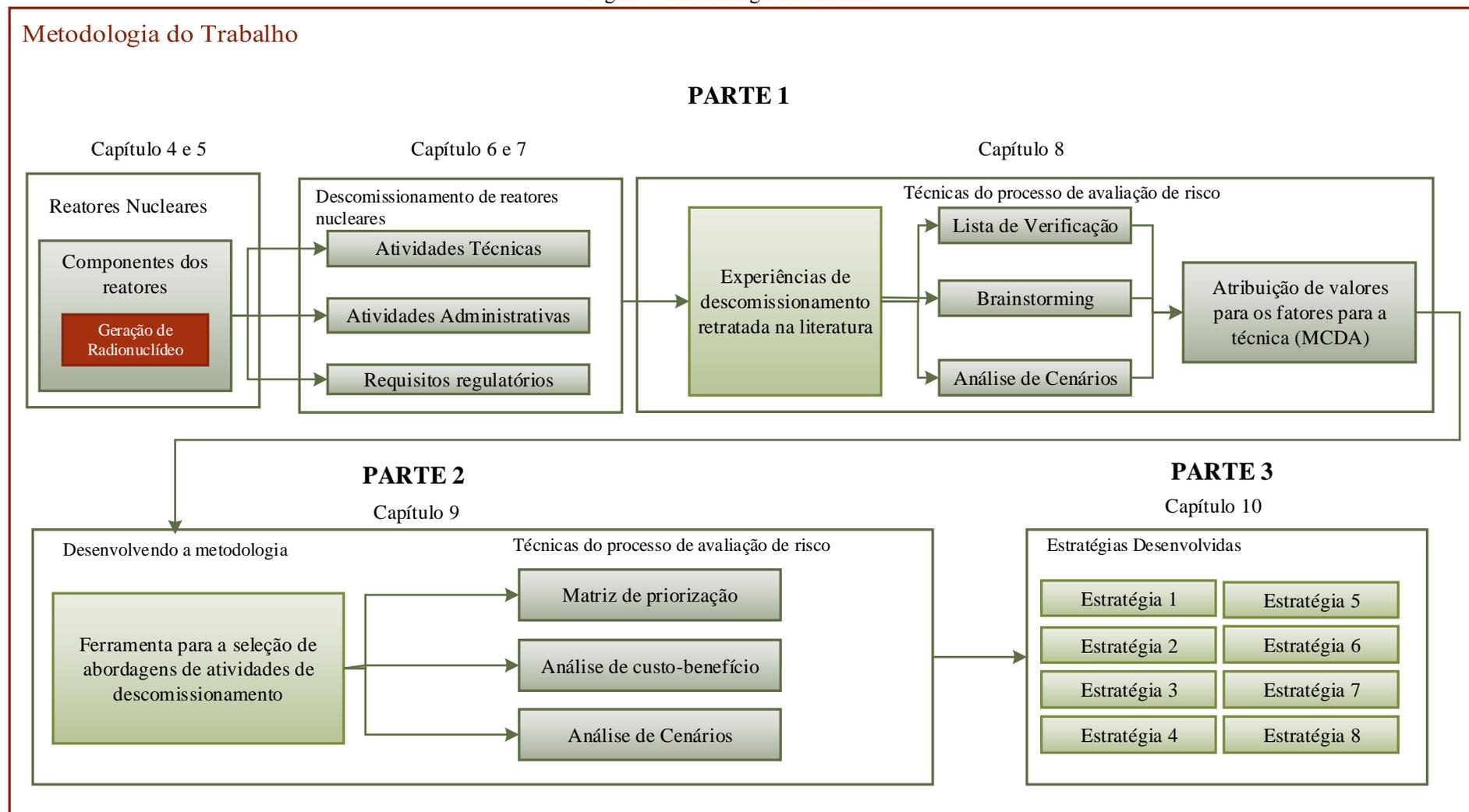
O trabalho foi dividido em três partes fundamentais. Na primeira, foi realizada uma pesquisa para estudar os assuntos relacionados ao descomissionamento de reatores nucleares e entender a problemática principal do tema. Nesse ponto, foi estudada a estrutura dos principais componentes do reator, as causas para sua contaminação e os processos necessários para o descomissionamento. A partir desse estudo, foram identificados os fatores, os requisitos técnicos e os requisitos regulatórios a serem considerados na elaboração de estratégias de descomissionamento.

Na segunda parte, foi realizada a análise das estratégias já adotadas ou propostas em outros projetos de descomissionamento, utilizando as técnicas do processo de avaliação de risco da norma ABNT NBR ISO/IEC 31010. Foram identificados, analisados e qualificados os principais fatores que afetam na decisão da estratégia e as abordagens de descomissionamento retratadas em artigos ou publicações internacionais. Por meio dessas técnicas, foi desenvolvido uma metodologia para o desenvolvimento de estratégias de descomissionamento de reatores nucleares no Brasil.

A terceira parte teve como objetivo aplicar a metodologia desenvolvida para o desenvolvimento de estratégias de descomissionamento de reatores de pequeno porte no Brasil. Foram desenvolvidas oito estratégias com diferentes objetivos para o cenário brasileiro no ano de 2023 e para o futuro.

Na Figura 5, é mostrado uma representação esquemática da metodologia utilizada neste trabalho.

Figura 5- Metodologia do trabalho



Fonte: Autor

3.1 Parte 1 – Estudos por meio de levantamentos bibliográficos

Inicialmente, foi estudado os conceitos técnicos e informações sobre reatores nucleares do tipo PWR, incluindo informações de projetos de reatores de pequeno e grande porte. Também foi estudado a composição química dos materiais utilizados na fabricação desses componentes. Foi dado ênfase aos componentes do circuito primário, que é onde a maior parte da contaminação radioativa é produzida. Nesse sentido, foram abordadas as principais características dos componentes que compõem o circuito primário, como o vaso de pressão, o núcleo do reator, os elementos de combustível, o pressurizador, o gerador de vapor, as bombas de circulação e as tubulações e válvulas que conectam esses componentes ao vaso de pressão do reator.

Para entender como ocorre a geração de radionuclídeos durante a operação do reator, foram estudadas as duas principais formas de contaminação: a primeira que é a liberação de produtos de fissão, transurânicos e isótopos de urânio que podem vazar do elemento de combustível, e a segunda é por meio da ativação radioativa, resultante da interação de nêutrons com a matéria presente no reator.

Além disso, neste capítulo foi analisado um estudo de caso realizado pela NRC, que traz dados sobre a ativação de componentes de reatores PWR. Foi realizada uma análise comparativa desses dados com a norma brasileira, a fim de identificar as possíveis implicações para a gestão de rejeitos radioativos no país.

Foi estudada, ainda, a política nuclear e a estrutura regulatória brasileira, com o objetivo de compreender os limites legais e os requisitos regulatórios para o cumprimento das atividades de descomissionamento de reatores nucleares no país e as autarquias envolvidas no processo. Para tanto, é apresentado um breve resumo dos principais documentos regulatórios que devem ser considerados na elaboração de estratégias de descomissionamento, como as normas da CNEN e as legislações pertinentes.

Adicionalmente, foi estudado os conceitos e estudos relacionados às atividades técnicas e administrativas de descomissionamento. Assim, é apresentada todas as etapas essenciais para a realização do processo de descomissionamento, com ênfase nas atividades técnicas de descontaminação e desmantelamento e gestão de rejeitos radioativos, e as atividades administrativas de gestão de recursos humanos e financeiros durante o processo de descomissionamento.

3.2 Parte 2 – Desenvolvendo a metodologia baseada na ABNT ISO/IEC 31010

A partir do conhecimento adquirido na Parte 1, foram aplicadas as técnicas do processo de avaliação de risco para desenvolver uma metodologia capaz de analisar as boas práticas de descomissionamento já aplicadas em outros países e adaptá-las ao contexto brasileiro de modo a demonstrar a viabilidade de ser implementada.

As atividades de descomissionamento envolvem uma série de premissas e riscos que devem ser gerenciados. Desse modo, a gestão de riscos apoia e permite o controle dessas premissas e riscos por meio de técnicas de processo de avaliação de riscos que envolvem a identificação, avaliação, tratamento e monitoramento desses riscos [14].

Conforme a publicação “*Safety Reports Series N° 97*” da AIEA, os benefícios associados na adoção de gestão de riscos no descomissionamento incluem [14]:

“identificar áreas críticas que requeiram ações para assegurar que os recursos apropriados estejam disponíveis; apoiar na tomada de decisão em condição de incerteza; melhorar a consciência organizacional dos riscos inerentes ao descomissionamento; e ajudar a estabelecer o diálogo mais eficaz com as partes interessadas demonstrando transparência nas informações” (tradução livre).

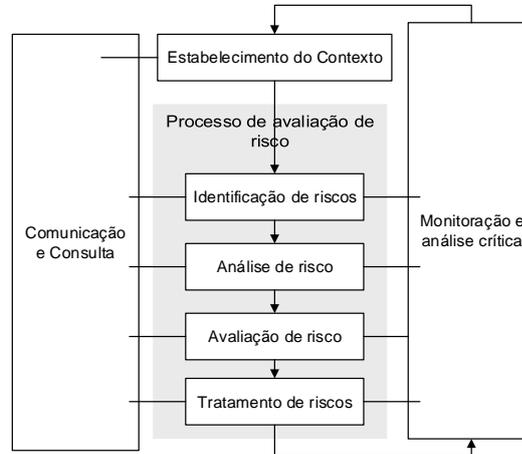
Dessa forma, existem diversas técnicas, sistemáticas, para realizar o processo de avaliação de risco. Conforme Norma ISO 31010, “o processo de avaliação de riscos é o processo global de identificação de riscos, análise de riscos e avaliação de riscos” [33]. Essa Norma fornece orientações sobre a seleção e aplicação de técnicas para o processo de avaliação de riscos.

Na Figura 6, é mostrado a visão geral do processo de avaliação de riscos [33]. Ao gerenciar riscos, é importante definir o escopo e os critérios para o processo de avaliação de riscos. O estabelecimento do contexto deve incluir os fatores externos e internos que cercam os objetivos organizacionais da instalação que são relevantes para avaliação de riscos. Os fatores de descomissionamento serão tratados nesse trabalho.

O processo de avaliação de riscos inicia-se na identificação, que é “o processo de encontrar, reconhecer e registrar riscos”. Após a identificação, o processo de avaliação de riscos analisará e avaliará os riscos identificados, possibilitando um entendimento dos

riscos, suas causas, consequências e probabilidades, proporcionando uma diretriz para decisões a serem tomadas [33].

Figura 6- Visão geral do processo de avaliação de riscos



Fonte: [33].

O processo de gestão de risco deve incluir a comunicação e consulta com as partes interessadas em todas as etapas do processo de avaliação de risco, de modo a mantê-las informadas sobre as decisões tomadas. Assim, é possível garantir a transparência do processo e assegurar às partes interessadas que as informações estão sendo compreendidas e consideradas [33]. Este processo deve ser continuamente monitorado para identificar novos riscos à medida que o status da instalação se altera, reavaliar mudanças no projeto e monitorar ações que estão sendo realizadas que possam ocasionar novos riscos.

As técnicas do processo de avaliação de risco usadas neste trabalho foram:

- a) lista de verificação – realizada por meio de dados e informações identificados na literatura;
- b) brainstorming – usado em conjunto com a lista de verificação para identificar e melhorar a exatidão das informações identificadas;
- c) análise de cenários – desenvolvimento de modelos descritivos para simular situações hipotética de um descomissionamento de um reator;
- d) análise de causa e consequência – usadas para simular ações e suas consequências futuras;
- e) análise de decisão por multicritérios (MCDA) - lista de fatores para avaliar um conjunto de opções entre as abordagens identificadas fornecendo um valor qualitativo para cada opção;

- f) matriz de priorização – meio de combinar as classificações qualitativas da análise MCDA; e
- g) análise de custo-benefício (ACB) – ponderação de custos.

A metodologia envolveu a identificação das abordagens nas atividades de descomissionamento encontradas nas estratégias retratadas na literatura, seguida por uma análise dessas abordagens e sua categorização em suas respectivas áreas de atividades de descomissionamento. Assim, foi realizada uma lista das abordagens identificadas em cada área de atividade de descomissionamento para, em seguida, qualificá-la de acordo com uma escala de fatores associados, como o tempo de execução, custo, dificuldades de implementar, entre outros. Com isso, é possível que o decisor possa selecionar a atividade que melhor se enquadra no cenário pré-estabelecido por uma análise de cenários.

Dessa forma, foi elaborada uma escala de avaliação de risco baseada na proposta da AIEA [14]. Essa escala considera os fatores relevantes que devem ser levados em conta na tomada de decisão para adotar uma abordagem específica. Para cada abordagem identificada, foram atribuídas pontuações (entre 1 e 5) correspondentes aos fatores relevantes, baseadas em informações provenientes de artigos e publicações.

Sendo assim, para realizar a comparação entre as abordagens identificadas, foi utilizada a técnica de Análise de Decisão por Multicritérios (MCDA). Essa técnica fornece uma ferramenta ao decisor capaz de avaliar os critérios relevantes para a tomada de decisão e comparar as alternativas com base nesses critérios, a fim de desenvolver uma estratégia de descomissionamento adequada.

3.3 Parte 3 – Desenvolvimento de estratégias de descomissionamento

Na parte três, foram desenvolvidas 8 estratégias que podem ser adotadas em projetos de descomissionamento de reatores de pequeno porte no Brasil para alcançar os usos restritos ou irrestritos, em dois cenários diferentes, um no cenário do ano de 2023 (ano de conclusão desse trabalho) e outro prospectando o cenário futuro. O cenário futuro foi motivado pelas recentes mudanças no setor regulatório brasileiro e propostas que estão em discussões no Congresso Nacional e de atividades que estão em andamento relacionadas com a política de gestão de rejeitos radioativos.

Nessa parte, é mostrado os detalhes da aplicação da técnica, os cálculos realizados por meio da técnica MCDA, os fatores considerados como prioritários para a seleção das abordagens e conseqüentemente a estratégia desenvolvida.

4 REATORES NUCLEARES DO TIPO PWR

Os reatores nucleares de potência tem como finalidade gerar energia elétrica. O funcionamento é similar a uma usina convencional de combustível fóssil, operada em um ciclo de vapor (denominado ciclo de Rankine), englobando duas partes distintas: o sistema de geração de vapor e o sistema para a geração de energia elétrica. As usinas se diferem, essencialmente, no modo como o vapor é produzido. Se por um lado, a usina termoeletrica precisa queimar combustível fóssil (carvão mineral, gás natural, óleo combustível) para produzir o vapor, por outro, as usinas nucleares produzem o vapor por meio do calor gerado pelo processo de fissão em cadeia autossustentada do combustível nuclear. O vapor gerado é canalizado para as turbinas, convertendo a energia térmica em mecânica, que posteriormente, é convertida em energia elétrica [34].

Existem uma grande variedade de tipos de reatores de potência, empregando diferentes escolhas do combustível, do refrigerante, do moderador e da energia do nêutron. As principais características para classificar esses reatores são [2]:

- a) refrigerante – principal meio de remoção de calor – H_2O , CO_2 , He, Sódio;
- b) moderador - material para diminuir a energia do nêutron - H_2O , 2H_2O e grafite;
- c) material físsil – material presente no combustível – urânio natural, urânio enriquecido em ^{235}U , ^{239}Pu , ^{233}U ; e
- d) energia cinética dos nêutrons - faixa de energia do nêutron - Térmico ($< 1eV$) ou rápidos (em média aproximadamente = $2MeV$).

De acordo com a AIEA, os reatores de pequeno porte têm uma capacidade de produção de energia elétrica de até 300 MWe. Essa categoria engloba tanto os reatores não-SMR quanto os SMR. Os reatores de pequeno porte não-SMR incluem aqueles que foram construídos no início do desenvolvimento dos reatores nucleares, além os do tipo “protótipo” usados para treinamento e para propulsão naval. Já os reatores SMR são variantes evolutivas dos reatores de potência, herdaram conceitos de operação, regulação e mecanismos de segurança, mas se distinguem pelo processo de construção em série e implantação.

O Brasil optou por adotar a tecnologia PWR para seus reatores nucleares em operação e em construção. Tal escolha é motivada pela maturidade alcançada nos processos de regulamentação, licenciamento, operação e segurança dessa tecnologia. Este trabalho busca aprofundar os conceitos de projetos de reatores nucleares PWR, abordando seus principais componentes, que são [35]:

- a) no circuito primário – o elemento de combustível, o núcleo, o vaso de pressão, os geradores de vapor, o pressurizador, as bombas de refrigeração e as tubulações e válvulas que conectam esses componentes ao vaso de pressão do reator; e
- b) no circuito secundário - uma turbina de alta pressão combinada com 3 turbinas de baixa pressão, duas ou mais unidades de separadores de reaquecimento de umidade (MSR), o gerador, o transformador, o condensador, bombas de circulação e as tubulações e válvulas.

A função do circuito primário é transferir o calor gerado pelo combustível nuclear para os geradores de vapor, enquanto mantém qualquer produto de fissão que possa escapar do combustível ou produtos de ativação resultantes da corrosão dos materiais estruturais contidos nos componentes [35].

Os componentes do circuito secundário em uma usina nuclear são semelhantes aos de uma usina termoelétrica convencional. A função básica do circuito secundário é receber o vapor produzido pelo gerador de vapor, converter a energia térmica em energia mecânica através do movimento das turbinas, que por sua vez, acionam o gerador para produzir energia elétrica. Como os componentes do circuito secundário possuem pouca ou nenhuma contaminação, o descomissionamento desses componentes é similar aos de uma usina termoelétrica e não será detalhado nesse trabalho.

Ao final da vida útil de um reator nuclear, é necessário realizar o processo de descomissionamento, que envolve atividades técnicas e administrativas. Por esse motivo, é fundamental entender as principais características dos componentes que serão descontaminados e desmantelados, de modo a possibilitar o desenvolvimento de estratégias para o descomissionamento. Com o objetivo de analisar informações técnicas relevantes que auxiliem no desenvolvimento de estratégias de descomissionamento para reatores de pequeno porte, serão, na medida do possível, realizadas comparações entre os componentes dos reatores de grande e de pequeno porte.

4.1 Componentes do circuito primário dos reatores nucleares PWR

Como mencionado anteriormente, os principais componentes do circuito primário de um reator PWR são: o vaso de pressão do reator, o núcleo do reator, o elemento de combustível, o pressurizador, o(s) gerador(es) de vapor, as bombas de resfriamento, as tubulações e válvulas e a blindagem biológica.

Nesta seção, serão detalhadas as informações dos principais componentes do circuito primário dos reatores do tipo PWR, que, ao final de seu ciclo de vida, deverão ser descontaminados e desmantelados. Serão realizadas comparações entre os tamanhos e estruturas desses componentes em reatores nucleares de pequeno, médio e grande porte, a fim de identificar as particularidades que devem ser consideradas no descomissionamento desses reatores.

4.1.1 Vaso de pressão do reator

O vaso de pressão do reator pode ser dividido em duas partes: a estrutura do vaso de pressão e os componentes internos.

A estrutura do vaso de pressão é uma estrutura cilíndrica, feita de aço carbono ou ligas leves, como o aço molibdênio manganês (ASTM-A533) ou o aço carbono temperado (ASTM-A508). Esses materiais são escolhidos devido às suas propriedades de resistência, disponibilidade em diferentes tamanhos, capacidade de produzir soldas de alta qualidade e baixa absorção de nêutrons. A cabeça superior do vaso é removível para permitir o reabastecimento dos combustíveis [36].

Geralmente, o vaso de pressão de um reator de grande porte PWR possui entre 10 e 14 metros de altura e entre 3,4 e 6 metros de diâmetro interno, com a espessura total da parede em torno de 200 a 250 mm [36]. Em contraste, os reatores de pequeno porte PWR possuem vasos de pressão com dimensões menores, variando entre 5 e 10 metros de altura e 1,7 e 3,3 metros de diâmetro interno [8] [37]. Os vasos de pressão dos reatores de micro porte possuem entre 3 e 6 metros de altura e 1,25 e 2,4 metros de diâmetro [8]. Para uma melhor compreensão das diferenças entre os tamanhos de vasos de reatores, na Tabela 5, é apresentado os dados comparativos entre eles, enquanto na Figura 7, é ilustrado essas diferenças de forma gráfica.

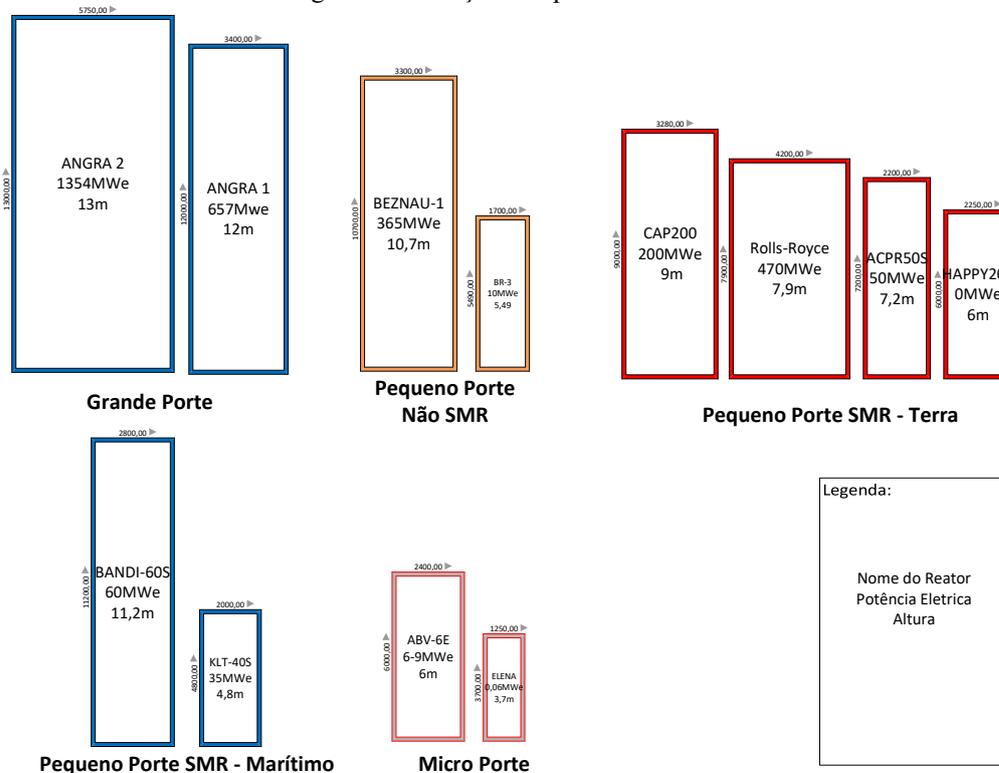
As superfícies internas em contato com a água são revestidas por uma camada de, no mínimo, 3mm de aço inoxidável austenítico serie 300 (AISI-304) ou Inconel, devido à sua excelente resistência à corrosão e oxidação em altas temperaturas. Esse aço possui boa resistência mecânica nas temperaturas de operação, estabilidade microestrutural sob irradiação e alta resistência a oxidação. Já os pinos, parafusos, porcas e válvulas de fechamento são feitos de liga de aço ASTM-A540, que apresenta alta resistência à tração e ao impacto, o que é fundamental para garantir a estabilidade mecânica do vaso durante sua operação e manutenção [36].

Tabela 5 - Comparativo entre as dimensões dos vasos de pressão dos reatores PWR

Modelo/ Reator	Porte	Potência Térmica	Potência Elétrica	Altura(m)	Diâmetro(m)	Ref.
KWU-Siemens (ANGRA 2)	Grande	3.765MW	1.354MW	13	5,75	[38]
Westinghouse 212 (ANGRA 1)	Grande	1.876MW	657MW	12	3,4	[36]
*BANDI-60S	SMR-Embarcado	200MW	60MW	11,2	2,8	[8]
BEZNAU-1	Médio	1.130MW	365MW	10,7	3,3	[8]
*UNITHERM	Micro	30MW	6,6MW	9,8	2,9	[8]
*OPEN20	SMR	73MW	22MW	9,1	2,3	[8]
*CAP200	SMR	600MW	200MW	9	3,28	[8]
*Rolls-Royce	SMR	1.358MW	470MW	7,9	4,2	[8]
*ACPR50S	SMR	200MW	50MW	7,2	2,2	[8]
*ABV-6E	Micro	38MW	6-9MW	6	2,4	[8]
*HAPPY200	SMR	200MW	0	6	2,25	[8]
BR-3	Pequeno	40.9MW	10.5MW	5,49	1,7	[37]
KLT-40S	SMR-Embarcado	150MW	35MW	4,8	2	[3]
*ELENA	Micro	19,6MW	0,068MW	3,7	1,25	[8]

*Em fase de projeto

Figura 7- Ilustração comparativa entre os reatores PWR



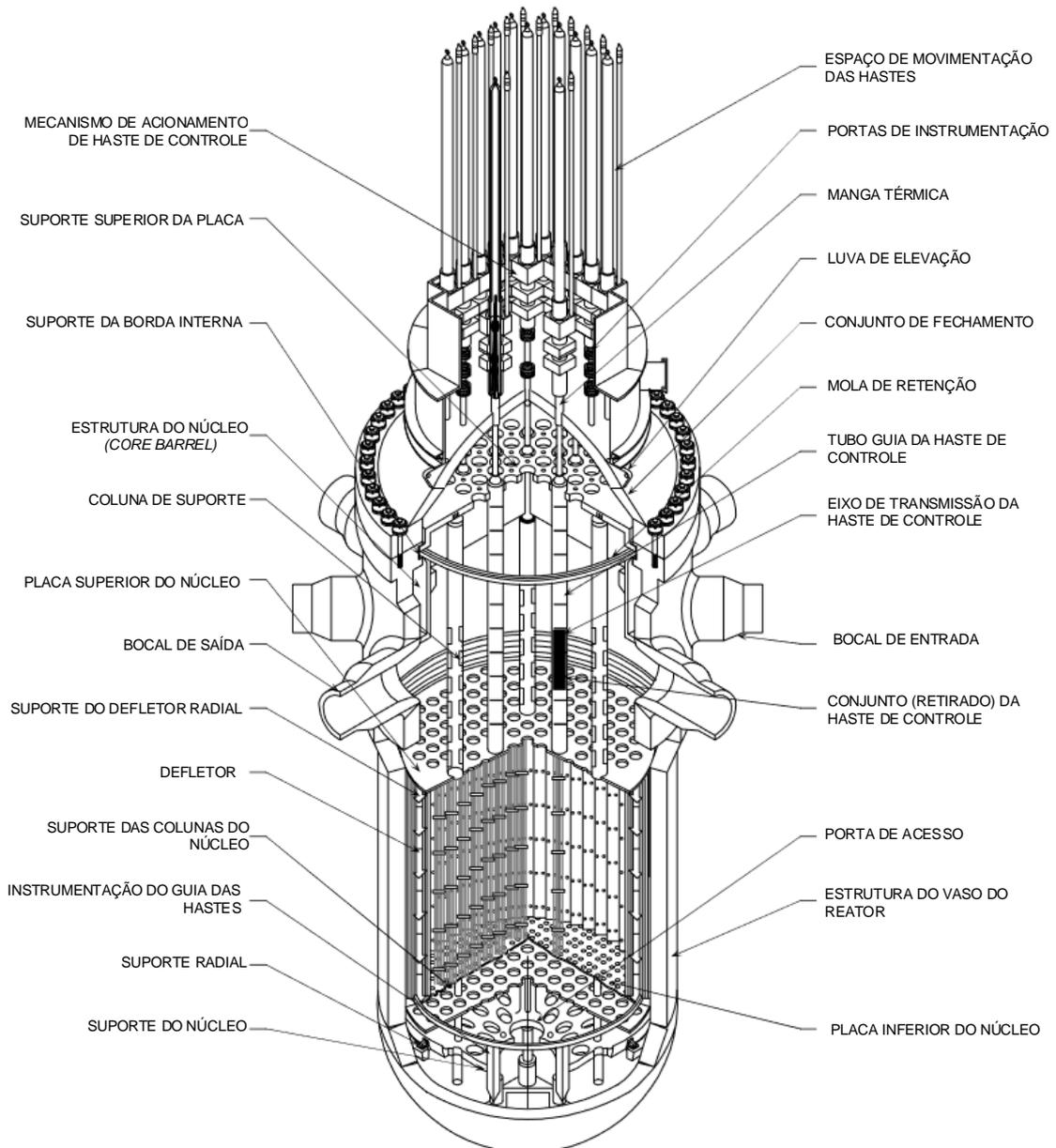
Fonte: Elaborado pelo autor baseado nos dados da Tabela 5.

O bloco de blindagem de nêutrons é feito de aço inoxidável AISI-304, com um teor de cobalto controlado de até 0,2% [36]. Esses blocos estão posicionados na parte inferior

do vaso de pressão em regiões de alto fluxo neutrônico para proteger o recipiente, reduzindo a radiação gama e o fluxo de nêutrons que escapam do núcleo. Todas as superfícies externas não usinadas ou fabricadas com materiais que não são resistentes à corrosão são revestidas com uma tinta resistente ao calor, radiação e corrosão.

Na Figura 8, é mostrado a visão esquemática da estrutura do vaso de pressão e os componentes relacionados nessa estrutura.

Figura 8- Vista da estrutura do vaso de pressão do reator Westinghouse PWR



Fonte: [35] - Traduzido pelo autor.

Os componentes internos do reator são compostos por duas estruturas principais: a superior e a inferior. Todos esses componentes são fabricados em aço inoxidável tipo AISI-304 e as soldas são realizadas de acordo com especificações rigorosas, verificadas por

radiografia e testes de penetração. Esses componentes são projetados de forma a serem completamente removíveis do vaso de pressão, facilitando a inspeção e manutenção dos componentes internos, bem como permitindo o acesso para a inspeção de toda a superfície interna do vaso [36]. Isso também simplifica as ações no processo de descomissionamento.

4.1.2 Núcleo do reator

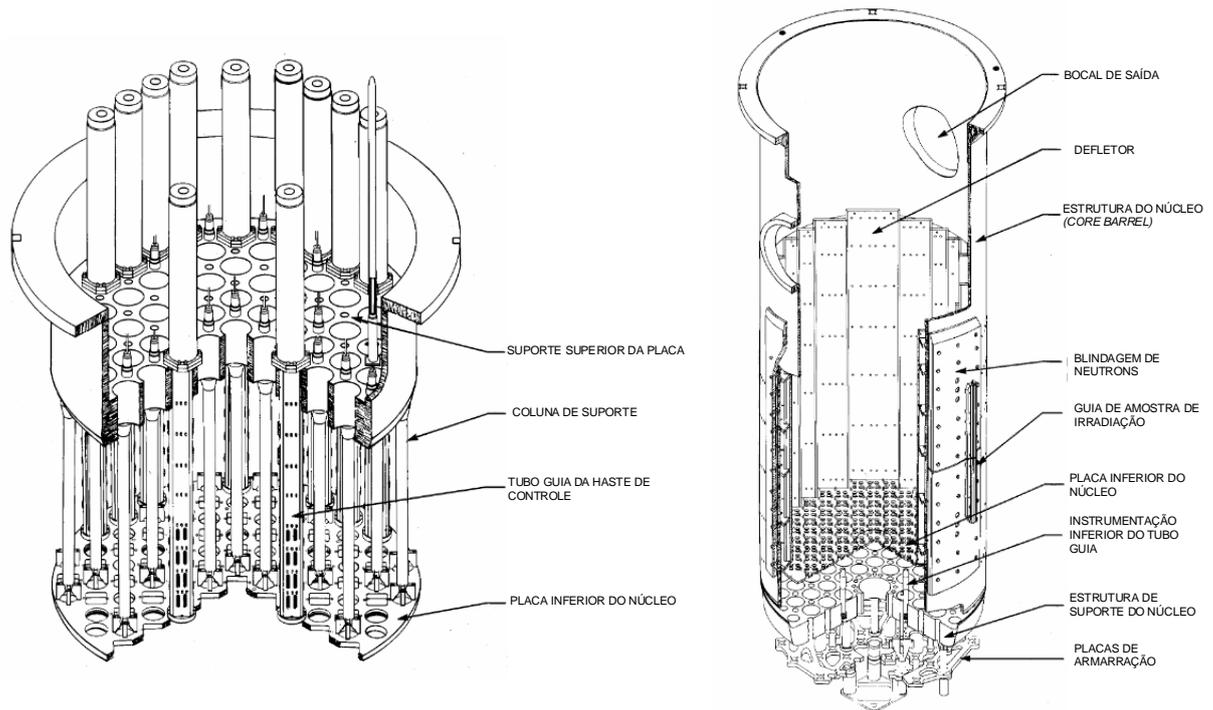
O núcleo (ou cerne) do reator é composto por uma estrutura removível interna ao vaso de pressão fabricada em aço inoxidável tipo AISI-304, além da instrumentação central de monitoramento. Ele está localizado dentro do vaso de pressão do reator e pode ser totalmente removível para realizar o processo de descomissionamento após o fim do seu ciclo de vida.

A estrutura superior do núcleo do reator é composta por: placa de suporte superior; a placa do núcleo superior; as colunas de suporte; e os tubos guias das hastes de controle. Suas funções são: alinhar e localizar as extremidades superiores dos elementos de combustível; proteger lateralmente as hastes de controle contra o fluxo de água; e guiar o conjunto de hastes de controle [36].

Já os componentes principais da estrutura inferior do núcleo são: placa de suporte do núcleo inferior, cerne, defletor e conjunto de matriz do núcleo. Eles têm diversas funções, tais como guiar as cargas verticais dos elementos de combustível e das hastes de controle através da matriz do núcleo, alinhar e posicionar as extremidades inferiores dos elementos de combustível, direcionar o fluxo de água do reator, reduzir a radiação para a estrutura do vaso de pressão, além de atuar como suporte de blindagem de nêutrons [36].

Na Figura 9, é apresentada a visão esquemática dos componentes superiores e inferiores do núcleo do reator.

Figura 9- Componentes superior e inferior do núcleo do reator



Fonte: [35] - Traduzido pelo autor.

4.1.3 Elemento de Combustível (EC)

O elemento de combustível (EC) é um componente do núcleo do reator, composto do combustível nuclear, necessário para a geração de energia, e dos materiais estruturais necessários para garantir o funcionamento desse processo. Nos reatores do tipo PWR, o EC é, geralmente, projetado por varetas cilíndricas.

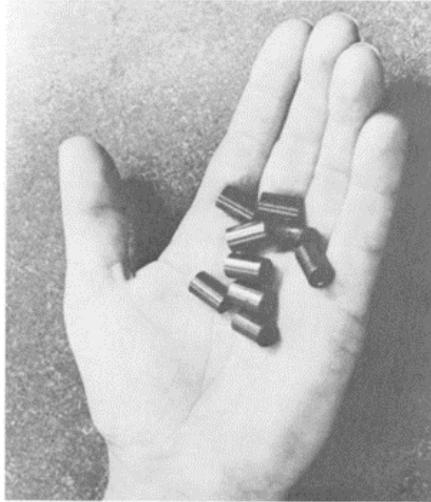
Os componentes básicos do elemento de combustível são: o conjunto pastilha-varetas; tubo guia da vareta de controle; grades espaçadoras; bocais de extremidade; e mola de fixação. As principais características requeridas de um combustível nuclear são: compatibilidade entre os materiais de combustão com as ligas e revestimento; estabilidade mecânica, térmica e à irradiação; boa resistência a corrosão e corrosão sob tensão; facilidade de fabricação; boa economia de nêutrons; baixo custo; e longo tempo de operação no reator [38].

Os combustíveis são formados de elementos físséis por nêutrons térmicos (^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu) e férteis (^{238}U , ^{232}Th) sob diferentes materiais estruturais que servem de elemento de ligação, revestimento e estrutura. O combustível nuclear básico (fissil) é o ^{235}U , que possui apenas 0,72% da sua composição isotópica do urânio natural, sendo a única fonte natural para fissão por nêutrons térmicos. Como a seção de choque de captura radiativa de nêutrons térmicos pela água é relativamente alta, os reatores PWR precisam de urânio

levemente enriquecido, entre 2,5% e 4,95% de ^{235}U , de modo a manter o processo de fissão. Dessa forma, o isótopo ^{235}U pode ser concentrado por meio de processo de difusão gasosa ou centrifugação [34].

O combustível nuclear do reator PWR é o dióxido de urânio (UO_2), material cerâmico fabricado na forma de pastilhas cilíndricas sinterizadas entre 10 e 12 mm de comprimento, 7,8 e 9 mm de diâmetro, com uma massa específica total de 10.96g/cm^3 , sendo 88,2% do peso de urânio ($9,67\text{g/cm}^3$). Esse material é revestido por uma camada metálica de 0,57mm de espessura, que pode ser de Zircaloy (Zircaloy-2, Zircaloy-4, ZirloTM, M5, HANA) ou aço inoxidável austenítico. Na Figura 10, é ilustrado comparativamente o tamanho da pastilha de combustível com a palma da mão.

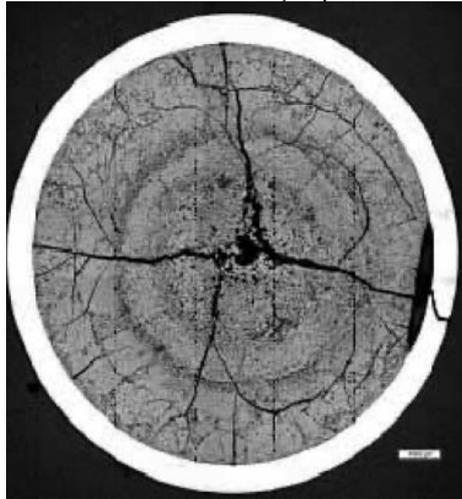
Figura 10- Tamanho das pastilhas combustíveis



Fonte: [36].

Durante o processo de fissão nuclear, o material cerâmico UO_2 pode formar rachaduras em virtude da existência de altos gradientes térmicos na pastilha (condutividade térmica baixa X alta potência gerada). Essas rachaduras não causam problemas de desempenho, pois o revestimento metálico retém o material combustível e os produtos de fissão. Esse revestimento da pastilha é a primeira blindagem dos produtos de fissão. Os produtos de fissão serão abordados com detalhes na seção 5.1 Liberação de radionuclídeos por meio de falhas no combustível. Na Figura 11, tem-se uma imagem de uma radiografia contendo falha devido a Interação pastilha-revestimento (PCI).

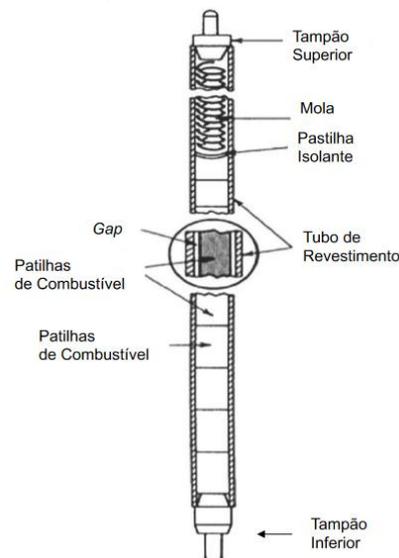
Figura 11- Falha devido a interação pastilha-revestimento



Fonte:[38].

As pastilhas de UO_2 são inseridas em varetas, geralmente fabricadas em Zircaloy-4, entre 3,65 e 3,9m de comprimento e 9,14mm e 10,75mm de diâmetro, pressurizado com gás hélio e selado nas extremidades por soldagem. A espessura da vareta é de 0.572mm com o gap entre a vareta e a pastilha de 0,157mm. Uma vareta combustível é composta, geralmente, por pastilhas de UO_2 , um tampão superior, molas, pastilha isolante e um tampão inferior. A vareta de combustível é a segunda blindagem dos produtos de fissão. Na Figura 12, tem-se a visão esquemática de uma vareta de combustível.

Figura 12- Visão esquemática de uma vareta de combustível

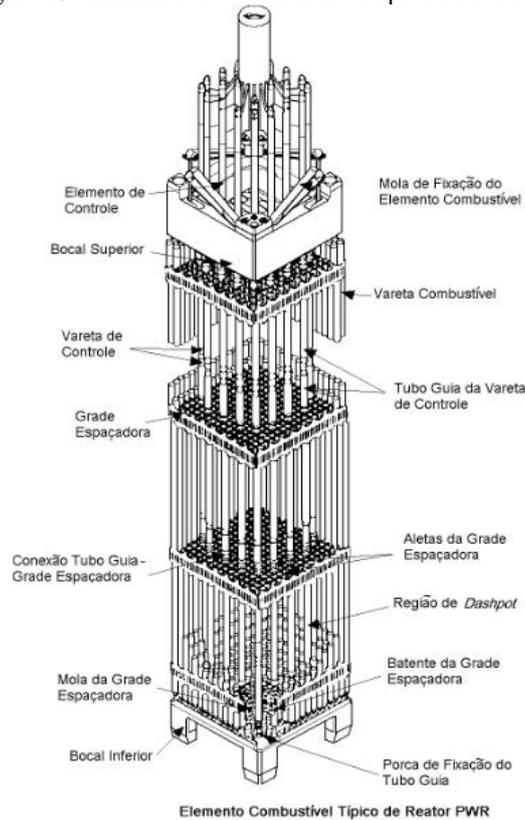


Fonte:[38].

O EC constitui de uma matriz quadrada, de 200mm de lado, contendo espaçamentos entre 14x14 e 18x18 hastes, para as varetas de combustível e os tubos guias

de varetas de controle. Os tubos guias das varetas de controle ocupam as hastes em espaços selecionados na matriz e são fixados nos bocais das extremidades. O espaçamento entre as varetas são contidos e suportados pelas grades espaçadoras feitas com uma liga de níquel (Inconel-718) nas extremidades e de zircônio [39]. Um EC, versão Westinghouse 412 (arranjos 17x17), possui 264 varetas de combustível. Na Figura 13, é mostrado um EC típico de um reator PWR.

Figura 13- Elemento de Combustível típico de reator PWR



Fonte: [38].

Os reatores PWR de grande porte são configurados para receber entre 121 e 193 EC, posicionados lado a lado dentro do vaso de pressão. Já nos reatores de pequeno porte, a quantidade de EC varia entre 24 e 121 unidades. Na Tabela 6, apresenta-se informações sobre os EC dos reatores de grande e pequeno porte.

Após permanecerem por um período determinado no núcleo do reator, os EC atingem um limite de geração de calor e precisam ser substituídos. Essa substituição envolve a remoção dos EC usados, que ainda contêm material nuclear, mas não têm mais capacidade de gerar energia elétrica, e a instalação de novos EC, que fornecerão o combustível necessário para continuar o processo de geração de energia. A frequência dessa substituição varia de acordo com o tipo de reator e outras considerações técnicas e operacionais, como a carga de combustível, o enriquecimento, a capacidade do reator e a segurança nuclear.

Tabela 6- Informações de elementos de combustíveis de reatores PWR

Reator	Porte	Comb.	Material de Revest.	Arranjo das Varetas no EC	Quant. de EC no Reator	Enriq. 235U	Tempo de Carga (anos)	Ref.
SIEMENS - KWU(ANGRA 2)	Grande	UO ₂	ZIRLO	16x16	193	2,5% (médio)	1	[38]
Westinghouse 212 (ANGRA 1)	Grande	UO ₂	ZIRLO	16x16	121	2,6% (médio)	1	[38]
Rolls-Royce UK-SMR	SMR	UO ₂ / MOX	Zircaloy-4	17x17	121	<4,95	1,5	[8]
KLT-40S	SMR-Emb.	UO ₂	Liga de Zircaloy Aço	N/A ¹	121	18,6	3	[3]
BR-3	Pequeno	UO ₂	Inoxidável 348	N/A ¹	111	3,7-4,43%	N/A	[37]
ELENA	SMR	UO ₂ - MOX	N/A	N/A ¹	109	15,20%	25	[8]
CAP200	SMR	UO ₂	N/A	17x17	89	4,20%	2	[8]
SMR-160	SMR	UO ₂	N/A	17x17	57	4%	2	[8]
BANDI-60S	SMR	UO ₂	N/A	17x17	52	4,95%	5	[8]
HAPPY200	SMR	UO ₂	Zircaloy-4	17x17	37	2,76-4,45%	1,5	[8]
ACPR50S	SMR	UO ₂	N/A	17x17	37	<5%	2,5	[8]
OPEN20	SMR	UO ₂	N/A	17x17	24	<4,95%	6	[8]

Após o uso no núcleo do reator, os EC tornam-se combustíveis irradiados e precisam ser armazenados em locais apropriados. Em geral, eles são armazenados em piscinas de armazenamento de combustível irradiado, localizadas dentro da instalação. Essas piscinas são projetadas para permitir que os EC esfriem e reduzam sua atividade radioativa, antes de serem eventualmente transferidos para outros locais de armazenamento de longo prazo ou para tratamento e disposição final.

É importante mencionar que, após o desligamento do reator, a maior parte da radioatividade presente na instalação nuclear está associada ao combustível irradiado. Esse combustível contém materiais radioativos, como os produtos de fissão, isótopos de urânio e

¹ Dados não citados na referência e não foram localizados em outros domínios públicos

os transurânicos, que foram gerados durante a operação do reator e que têm meia-vida longa e que levam muito tempo para decair completamente.

No processo de descomissionamento de reatores nucleares, é essencial a retirada desses combustíveis irradiados da piscina de armazenamento para um local externo, de forma que as atividades de descontaminação e desmantelamento possam ser realizadas de forma segura.

4.1.4 Pressurizador

O pressurizador é o componente que mantém a pressão do reator durante a operação e limita as mudanças de pressão durante mudanças de temperatura, sendo responsável pelo controle da pressão do sistema. Essa pressão é controlada pelo uso de aquecedores elétricos, spray, válvulas de alívio e válvulas de segurança. O pressurizador é fabricado em aço manganês-molibdênio, revestido internamente com aço inoxidável [36].

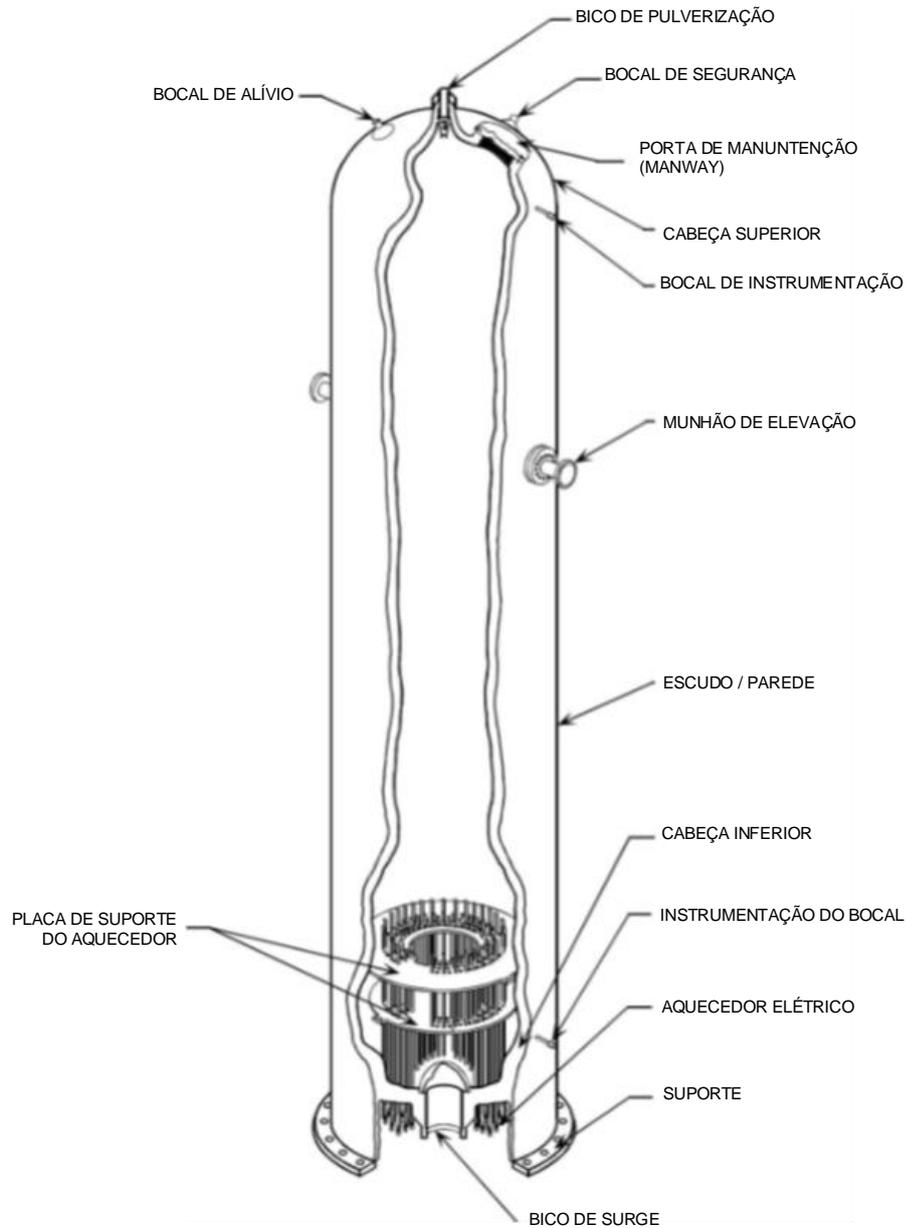
O tamanho do pressurizador varia de acordo com os modelos. Por exemplo, os fabricados pela Westinghouse para reatores de grande porte variam entre 9,6 e 16,1 metros de altura e 2,3 metros de diâmetro, pesando entre 50 e 88 toneladas a seco, com volumes entre 28,3 e 51 m³ [36]. Esses reatores geralmente possuem apenas um grande pressurizador no sistema. Na Figura 14, é possível ver a visão esquemática de um pressurizador do modelo Westinghouse.

Por outro lado, os reatores de pequeno porte podem ter mais de um pressurizador menor, como é o caso do modelo KLT-40S, em operação e embarcado, que possui quatro pressurizadores com volume de 8,16 m³ por unidade [40]. Outro exemplo é o pressurizador do reator de pequeno porte BR-3, com 5 metros de altura, 1 metro de diâmetro, pesando 12 toneladas e com o volume interno de 2,79 m³ [41].

É importante ressaltar que existem projetos de SMR que integram o pressurizador, juntamente com outros componentes do circuito primário, ao vaso de pressão do reator. Esses projetos são conhecidos como *integral* PWR (iPWR). No entanto, este trabalho não incluiu a análise desse tipo de reator devido à necessidade de maturidade técnica e, até o momento, não há planos para a implementação dessa tecnologia no Brasil.

Durante operações normais, o volume do pressurizador é ocupado por 60% de água e 40% em vapor. Os aquecedores elétricos em imersão, localizados na parte inferior do pressurizador, mantêm a água em temperatura de saturação, o que por sua vez mantém a pressão de operação do sistema constante [36].

Figura 14- Pressurizador modelo Westinghouse



Fonte:[36] – traduzido pelo autor.

Como o pressurizador está conectado ao sistema de refrigeração do reator (circuito primário), a água do refrigerante que passa pelo reator é a mesma que entrará no pressurizador. Dessa forma, os produtos de fissão e ativação presentes no sistema também estarão contidos na estrutura do pressurizador, contaminando o componente [36].

Outro componente importante conectado ao pressurizador é o tanque de alívio do pressurizador, também conhecido como tanque de condensação de vapor. Esse tanque é um grande recipiente contendo água com uma atmosfera de nitrogênio. Sua principal função é condensar o vapor descarregado pelas válvulas de alívio ou segurança, que liberam o excesso de pressão no sistema em emergências. Como o sistema de refrigeração do reator

contém hidrogênio, que é um gás explosivo em determinadas condições, a atmosfera de nitrogênio no tanque é utilizada para evitar a formação desse ambiente. É importante ressaltar que o tanque de alívio de pressurizador estará contaminado pelos radionuclídeos presentes no circuito primário do reator [36].

4.1.5 Gerador de Vapor (GV)

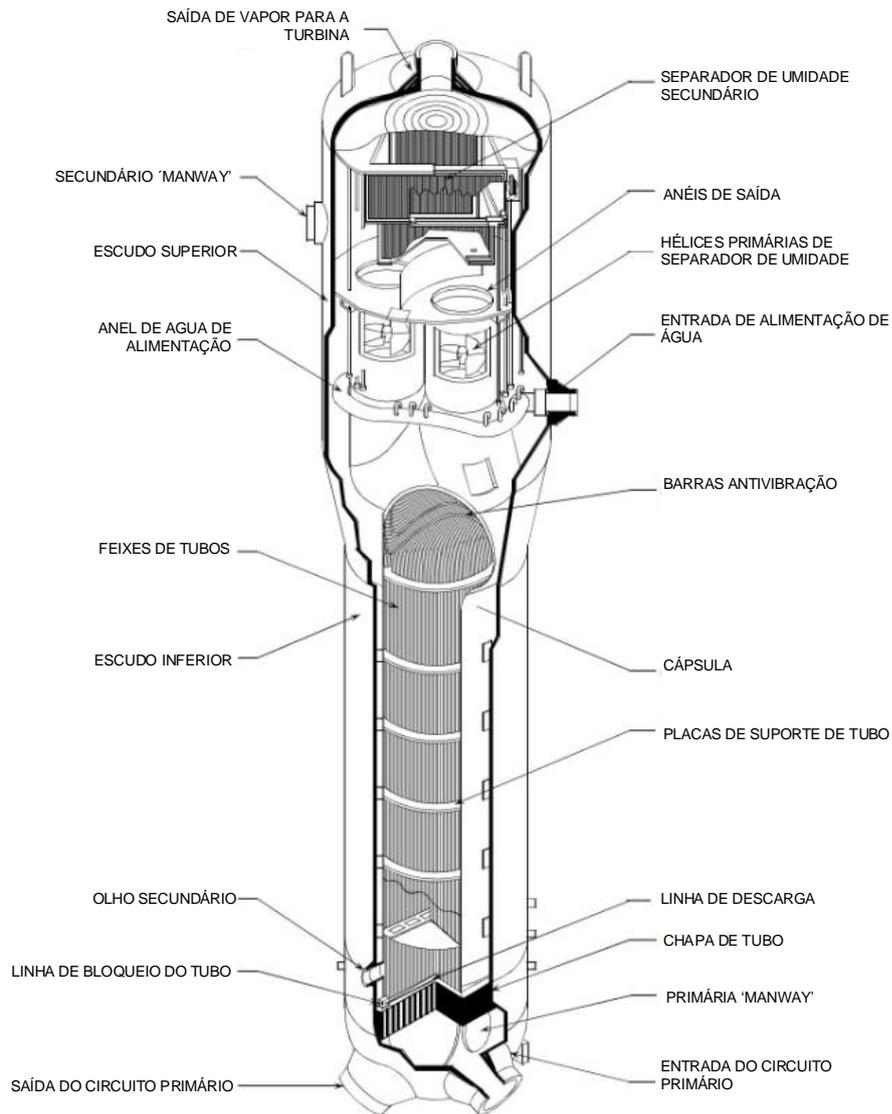
Uma usina nuclear modelo Westinghouse pode contar entre 1 e 4 geradores de vapor (GV), enquanto as usinas SMR podem chegar a ter 8 unidades, porém de tamanho menor [8]. Existem diversos projetos de GV, sendo que a Westinghouse desenvolveu GV verticais com tubos em formato de U. Os componentes principais do GV são o conjunto separador centrífugo de umidade, o feixe de tubos e os secadores de vapor. Todos os componentes sob pressão são fabricados em aço carbono ou ligas de aço, com exceção dos tubos que são feitos de Inconel 600. Além disso, as superfícies em contato com o fluido refrigerante do circuito primário são revestidas com aço inoxidável para minimizar a corrosão e, conseqüentemente, reduzir a contaminação.

Os tamanhos e diâmetros dos GV variam de modelo para modelo, os da Westinghouse por exemplo, possuem 20,6m de altura e 4.5m de diâmetro, pesando, seco, em torno de 314 toneladas [36], enquanto o modelo KLT-40S possui 23 toneladas cada [40]. O reator de pequeno porte BR-3 possui 8m de altura, 1,5m de diâmetro e um peso de 30 toneladas [37]. Na Figura 15, é mostrado a visão estrutural do GV modelo Westinghouse.

A água do circuito primário flui do vaso de pressão do reator para o GV através da entrada na parte inferior (entrada do circuito primário). Dentro do GV, a água quente do reator flui através de vários tubos, enquanto a água do circuito secundário flui ao redor dos tubos quentes na parte externa, absorvendo o calor da água do circuito primário sem ter contato direto com ela. Esse mecanismo de transferência de calor isola completamente a água contaminada no circuito primário do circuito secundário. Quando a água do circuito secundário (também conhecida como água de alimentação) absorve calor suficiente, ela começa a ferver e formar vapor, que alimentará posteriormente as turbinas [36].

Os GV em usinas nucleares são compostos por diferentes componentes, entre eles o conjunto separador centrífugo de umidade, que fica localizado acima do feixe de tubos. Esse conjunto tem como função principal remover a maior parte da umidade presente no vapor gerado. Em seguida, para garantir a qualidade do vapor produzido, os secadores de vapor são empregados no segundo estágio de separação, diminuindo a umidade para um mínimo de 0,25% [36].

Figura 15- Gerador de Vapor (GV) modelo Westinghouse



Fonte:[35] traduzido pelo autor.

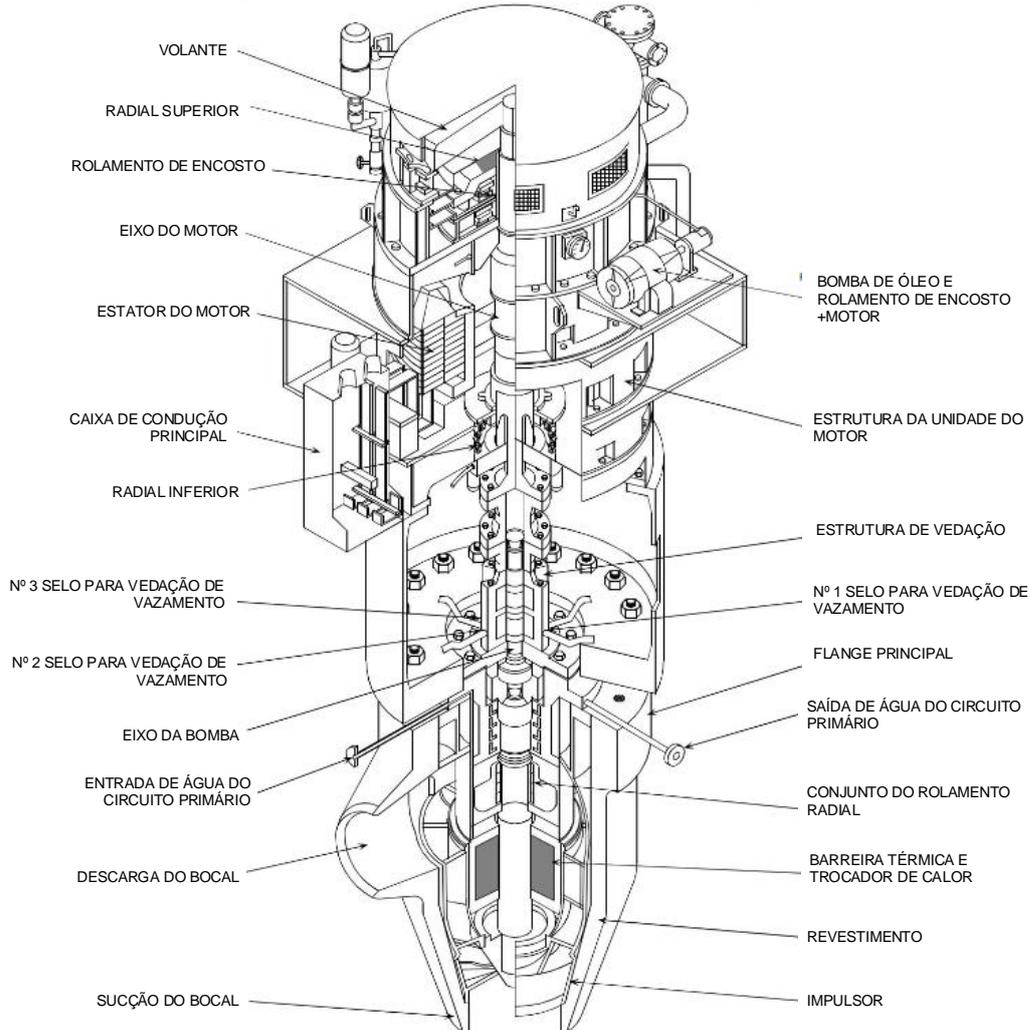
4.1.6 Bomba de refrigeração do reator

A bomba de refrigeração do reator é um componente com o objetivo de garantir a circulação de água no circuito primário. Composta pelo motor, unidade hidráulica e sistema de vedação do eixo, ela é responsável por fornecer o fluxo necessário para manter a temperatura do reator sob controle. O fluido refrigerante do reator entra na bomba de refrigeração após passar pelo GV. A bomba de refrigeração impulsiona a velocidade de fluxo da água, levando-a de volta ao reator para coletar mais calor e será enviado de volta aos geradores de vapor [36].

As bombas de refrigeração modelo Westinghouse possui dimensões de 8,5 metros de comprimento e 1,96 metros de diâmetro de revestimento. A bomba de refrigeração

é capaz de bombear 6,15 metros cúbicos por segundo [36]. Já no reator KLT-40S, a capacidade de bombeamento da bomba é de 0,24 metros cúbicos por segundo [40]. Todas as partes da bomba que entram em contato com a água do circuito primário são fabricadas em aço inoxidável, com exceção dos rolamentos e de alguns componentes especiais. Na Figura 16, é mostrado a estrutura da bomba de refrigeração do reator.

Figura 16- Bomba de refrigeração modelo Westinghouse



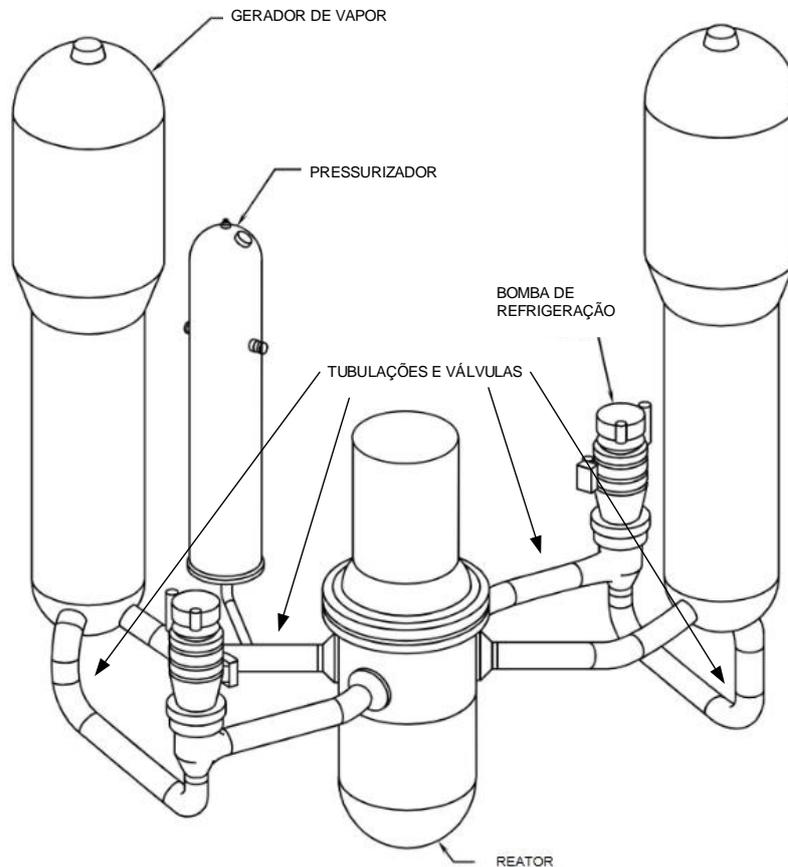
Fonte:[35] traduzido pelo autor.

4.1.7 Tubulações, válvulas e outros componentes

Todos os componentes mencionados anteriormente são interconectados por meio de tubulações e válvulas fabricadas em aço inoxidável ou revestidas de aço carbono com aço inoxidável [36]. Todas as juntas e conexões são soldadas, exceto o bocal de saída

das válvulas. Na Figura 17, é mostrada uma visão esquemática das conexões entre os principais componentes do modelo de reator Westinghouse.

Figura 17- Tubulações e válvulas modelos Westinghouse



Fonte:[35] traduzido pelo autor.

4.1.8 Blindagem Biológica

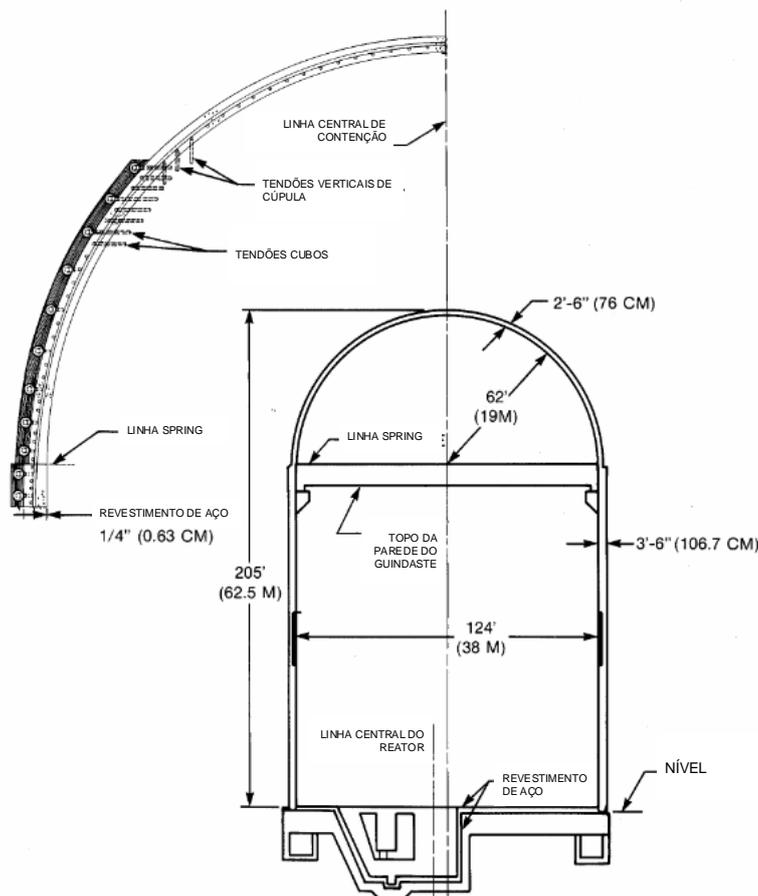
A blindagem biológica é uma barreira de contenção construída com concreto de alta densidade e espessura, que envolve o vaso de pressão do reator nuclear e todos os componentes do circuito primário. O seu objetivo principal é evitar a liberação de partículas radioativas, como nêutrons e raios-gama, para o ambiente externo. É considerada a última das seis barreiras de segurança existentes em uma usina nuclear [38], fornecendo uma camada adicional de proteção para as instalações e para o público em geral.

O concreto utilizado em instalações nucleares é uma mistura de cimento, areia, ferro e outros elementos, como a hematita, magnetita, barita e minério de ferro, conhecidos como agregados de alta densidade. Esses agregados são adicionados para aumentar a densidade do concreto, tornando-o mais eficaz como material de blindagem contra a radiação. Como resultado, o concreto utilizado em instalações nucleares apresenta uma

densidade maior do que o concreto convencional, o que o torna ideal para fornecer a proteção necessária contra a radiação. Os nêutrons interagem com os materiais da blindagem biológica “ativando” esses materiais, como será detalhado na seção 5.2 Geração de produtos ativados”. Na Figura 18, é mostrada uma visão esquemática da blindagem biológica do modelo de reator Westinghouse.

Além do concreto, alguns projetos de contenção utilizam revestimentos em aço cilíndrico para aumentar a segurança da instalação. As dimensões da blindagem biológica variam de acordo com o modelo do reator: para um reator de grande porte, como o modelo Westinghouse, as dimensões típicas são de 37,8m de diâmetro interno, 62,5m de altura, 1,07m de espessura da parede e 0,76m de espessura da cúpula, conforme mostrado na Figura 13 [36]. Já o reator BR-3, de menor porte, tem dimensões de 16,54m de diâmetro, 32,6m de altura e 1,17m de espessura de parede [37]. Outro exemplo é o projeto do reator SMR BANDI-60, com dimensões de 11m de diâmetro e 18,5m de altura [8]. Essas dimensões podem variar de acordo com o projeto e as normas de segurança de cada país.

Figura 18 - Blindagem biológica modelo Westinghouse



Fonte:[35] traduzido pelo autor.

4.2 Componentes do circuito secundário dos reatores nucleares PWR

O circuito secundário de uma usina nuclear é semelhante ao de uma usina termoelétrica convencional. A sua principal função é receber o vapor produzido pelo gerador de vapor, que foi aquecido pelo circuito primário que está em contato com o reator nuclear, e converter a energia térmica contida no vapor em energia mecânica, através das turbinas. Essa energia mecânica é, então, usada para acionar o gerador elétrico, produzindo a energia elétrica que é enviada para a rede elétrica.

O modelo Westinghouse, que é capaz de produzir 1.100 MWe, é composto por uma combinação de uma turbina de alta pressão e três turbinas de baixa pressão. Além disso, conta com duas ou mais unidades de separadores de reaquecimento de umidade (MSR), um gerador de energia elétrica, um transformador de energia, um condensador, bombas de circulação e diversas tubulações e válvulas interligando todos os componentes do sistema [36].

Como os componentes do circuito secundário apresentam pouca ou nenhuma contaminação, o processo de descomissionamento desses equipamentos é semelhante ao procedimento adotado em uma usina termoelétrica convencional. Portanto, este trabalho não abordará o desmantelamento desses componentes, já que não há risco de contaminação e não há necessidade de controle regulatório. Esses equipamentos podem ser reciclados, reutilizados ou vendidos, dependendo das suas condições e funcionalidade. Em alguns casos, os valores de venda de alguns desses equipamentos já são suficientes para custear as atividades de desmantelamento associados aos outros equipamentos do circuito secundário [31].

5 PROCESSO DE GERAÇÃO DE RADIONUCLÍDEOS NO REATOR

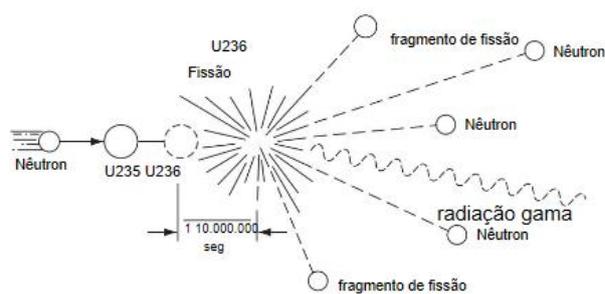
A geração de radionuclídeos resultantes do processo de fissão nuclear nos componentes dos reatores nucleares ocorre de duas formas distintas. A primeira ocorre devido a falhas nos EC defeituosos, o que pode liberar produtos de fissão, isótopos de urânio e transurânicos no circuito primário. A segunda forma de geração de radionuclídeos é proveniente das interações dos nêutrons com os materiais estruturais do reator ou com o refrigerante, gerando radionuclídeos "ativados".

Neste capítulo, serão apresentados os principais radionuclídeos gerados durante o funcionamento de um reator nuclear, bem como as formas de contaminação associadas. O objetivo é compreender a formação desses radionuclídeos nos componentes, de modo a adotar ações que minimizem sua geração e a entender as principais atividades associadas à descontaminação e desmantelamento de componentes altamente ativados.

5.1 Liberação de radionuclídeos por meio de falhas no combustível

O combustível nuclear da maioria dos reatores PWR usa como material fissil o ^{235}U , enriquecido entre 2,5 e 5%, responsável por manter a reação de fissão em cadeia. Cada reação saem aproximadamente 200MeV^2 de energia, 2 ou 3 nêutrons, 2 produtos de fissão e vários raios gama e neutrinos [42]. Na Figura 19, é ilustrado uma reação de fissão do ^{235}U .

Figura 19- Fissão nuclear



Fonte: [39].

A fissão resulta em muitos pares diferentes de produtos de fissão, conforme Lewis [42], mais de 200 radionuclídeos derivados da fissão foram identificados no reator

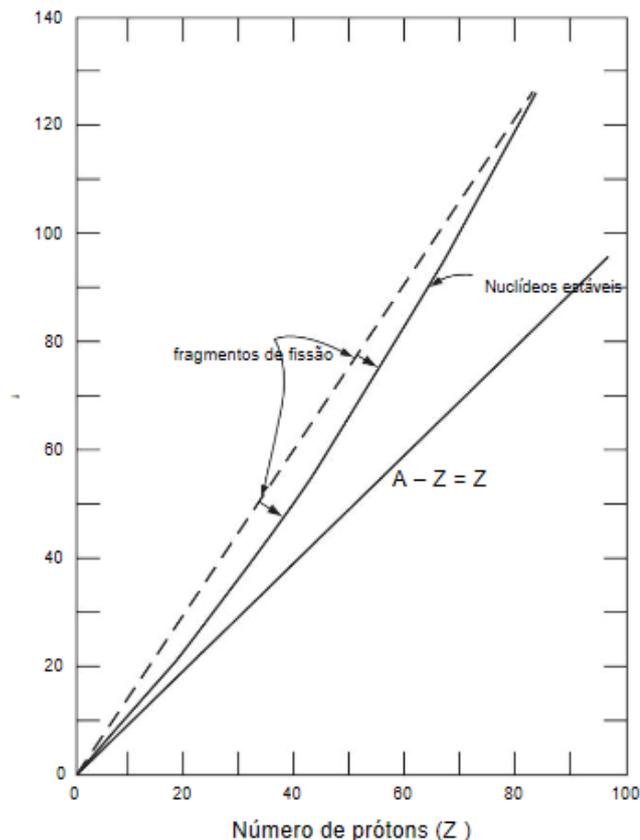
² Soma das energias: cinética dos fragmentos de fissão, cinética dos nêutrons emitidos, dos raios-gama prontos e a energia total do processo de decaimento nas cadeias de decaimento dos produtos de fissão.

nuclear. Esses radionuclídeos podem ter “nascido” logo após a fissão do ^{235}U (ou ^{239}Pu) ou por cadeias de decaimento radioativo desses produtos de fissão.

A faixa de produtos de fissão variam entre o número de massa 66 até 172. Cerca de 97% das fissões do ^{235}U por nêutrons térmicos resultam em pares de produtos de fissão que, relativamente, tem uma massa substancialmente mais pesada que a outra. O grupo de massa leve varia entre o número de massa 85 e 104, e o de massa pesada varia entre 130 e 149. O tipo de fissão mais comum, ocorrendo 7% do total, produz produtos de fissão entre os números de massa 95 e 139. A fissão do ^{239}Pu possui um comportamento semelhante [39].

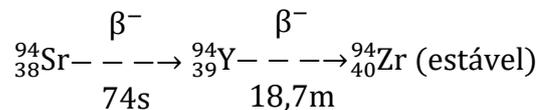
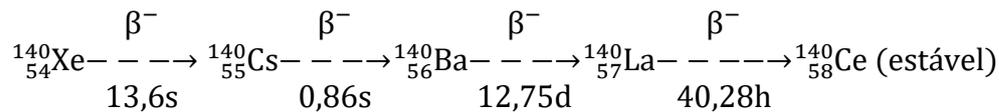
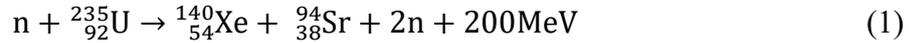
Logo após a fissão do ^{235}U , os produtos de fissão “nascem”, na sua grande maioria, instáveis, pois têm proporções de nêutrons para prótons muito grande, desviando-se da linha de núcleos estáveis. O principal modo de decaimento desses produtos de fissão instáveis é por emissão de partícula β . Tal decaimento move o nuclídeo resultante em direção à linha de núcleos estáveis. Na Figura 20, é mostrado o gráfico que representa a linha de núcleos estáveis e os fragmentos de fissão pelo número de massa(A) X número atômico (Z) [39, 42].

Figura 20- Gráfico de fragmentos de fissão e linha de núcleo estáveis



Fonte: [39].

Como cada radionuclídeo possui uma meia vida característica, os produtos de fissões instáveis percorrerá uma curta série radioativa, envolvendo sucessíveis decaimentos por emissão de partícula β^- , geralmente entre 6 e 7 decaimentos. Na equação 1, é mostrado um exemplo dos mais de 40 pares possíveis, a partir da fissão do ^{235}U , da geração de produtos de fissão [39, 42].



Alguns desses produtos de fissão podem possuir seções de choque para captura de nêutrons relativamente alta, e podem absorver nêutrons do sistema, provendo excesso de reatividade negativa ao núcleo. Esses radionuclídeos são conhecidos como venenos queimáveis. Alguns deles, após interagir com os nêutrons, pode transmutar para outros radionuclídeos. Tsoufanidis identificou os principais produtos de fissão, com essas características, que estão listados na Tabela 7 [2].

Tabela 7- Transmutação de radionuclídeos por meio de absorção de "venenos queimáveis"

Produto de Fissão (Transmutação)	% Produzida a partir da Fissão do ^{235}U	Meia Vida	Seção de Choque de captura por nêutrons térmicos σ_a (barns)
^{133}I (^{133}Cs)	6,787	20,83h	29
^{135}I	6,349	6,58h	80
^{99}Mo (^{99}Tc)	6,127	65,976h	22,8
^{143}Ce (^{143}Nd)	5,972	33,039h	6,002
^{103}Ru (^{103}Rh)	3,137	39,427d	145
^{147}Nd	2,711	10,98d	440,6
^{131}I (^{131}Xe)	2,473	8,0252d	90,03
^{149}Pm	1,089	53,08h	1400
^{135}Xe	0,255	9,14h	2665000

Fonte: [2].

Nos combustíveis irradiados existem, também, uma grande quantidade de isótopos de urânio (^{238}U e ^{235}U) que não foram consumidos e os transurânicos (como o plutônio, neptúnio, amerício), gerados por sucessivas reações de absorção de nêutrons. Esses

radionuclídeos, de meia vida longa, permanecerá ativado por milhares de anos e é umas das principais preocupações na gestão do combustível irradiado.

As pastilhas de UO_2 são projetadas de modo que os produtos de fissão fiquem retidos e não escapem do revestimento. Elas são projetadas, ainda, para suportar os produtos de fissão gasosos, que provoca uma alteração na matriz do material combustível (retidos no revestimento de zircônio), que deteriora a transferência de calor do combustível para o refrigerante. Dentro do combustível ocorre inchamento e densificação e, dentro dos materiais estruturais ocorrem alterações na ductilidade e fluência (*creep*). De tempos em tempos, os EC, contendo a grande maioria dos produtos de fissão, são substituídos e, os antigos, armazenados, geralmente em locais apropriados dentro da piscina de combustíveis ou em repositórios próprios de combustíveis irradiados.

Os produtos de fissão gerados durante o processo de fissão nuclear são contidos internamente no revestimento do elemento de combustível (EC). No entanto, é importante destacar que falhas no processo de construção, soldagem ou manuseio podem levar a falhas de combustível. De acordo com dados coletados mundialmente entre 1994 e 2006, a taxa média de falha de combustível em elementos de combustível é de 1,38% [38]. Quando ocorre uma falha de combustível, os produtos de fissão, isótopos de urânio e transurânicos podem escapar para o refrigerante do circuito primário, contaminando todos os componentes desse circuito [38].

De acordo com Lewis [42], os produtos de fissão mais importantes a serem monitorados são o radioiodo, os gases nobres, o estrôncio e o céσιο. A monitoração de certos isótopos de produtos de fissão no refrigerante fornece informações valiosas sobre o desempenho do combustível durante a operação. Em uma análise dos componentes do circuito, foram encontrados produtos de fissão nas paredes, identificados por meio de espectrometria. Dentre esses produtos, foram inventariados: ^{133}Xe , $^{133\text{m}}\text{Xe}$, ^{135}Xe , ^{138}Xe , $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I , ^{134}Cs , ^{136}Cs , ^{137}Cs [38].

É importante destacar que, em caso de um acidente grave, todos os radionuclídeos podem ser liberados para o sistema, como ocorreu na usina nuclear de Three Mile Island. Devido a falhas de operação, o calor gerado pelos produtos de fissão derreteu o núcleo do reator, resultando na liberação de todos os radionuclídeos, que ficaram retidos no vaso de pressão do reator. Nessas situações, a estratégia de descomissionamento é totalmente afetada [34].

Os combustíveis, após serem utilizados no reator, são chamados de combustíveis irradiados e geralmente são armazenados em piscinas de armazenamento na própria

instalação. Como resultado, a água da piscina pode conter produtos de fissão, urânio e transurânicos que escaparam do revestimento do combustível durante a operação do reator.

5.2 Geração de produtos ativados

Além dos produtos de fissão, o processo de geração de energia nuclear em reatores também pode produzir radionuclídeos ativados. Durante a operação do reator, os nêutrons gerados pelo processo de fissão nuclear interagem com os materiais estruturais do reator, como o aço e o concreto, bem como com o fluido refrigerante, produzindo esses radionuclídeos. Eles podem permanecer nos materiais do reator ou serem liberados, por meio da corrosão, para o circuito primário juntamente com os produtos de fissão.

Existem quatro maneiras básicas que os nêutrons interagem na matéria, que são: espalhamento elástico, espalhamento inelástico, absorção (captura, captura radioativa), emissão de nêutrons e fissão. O comportamento de cada isótopo muda drasticamente a depender da energia dos nêutrons.

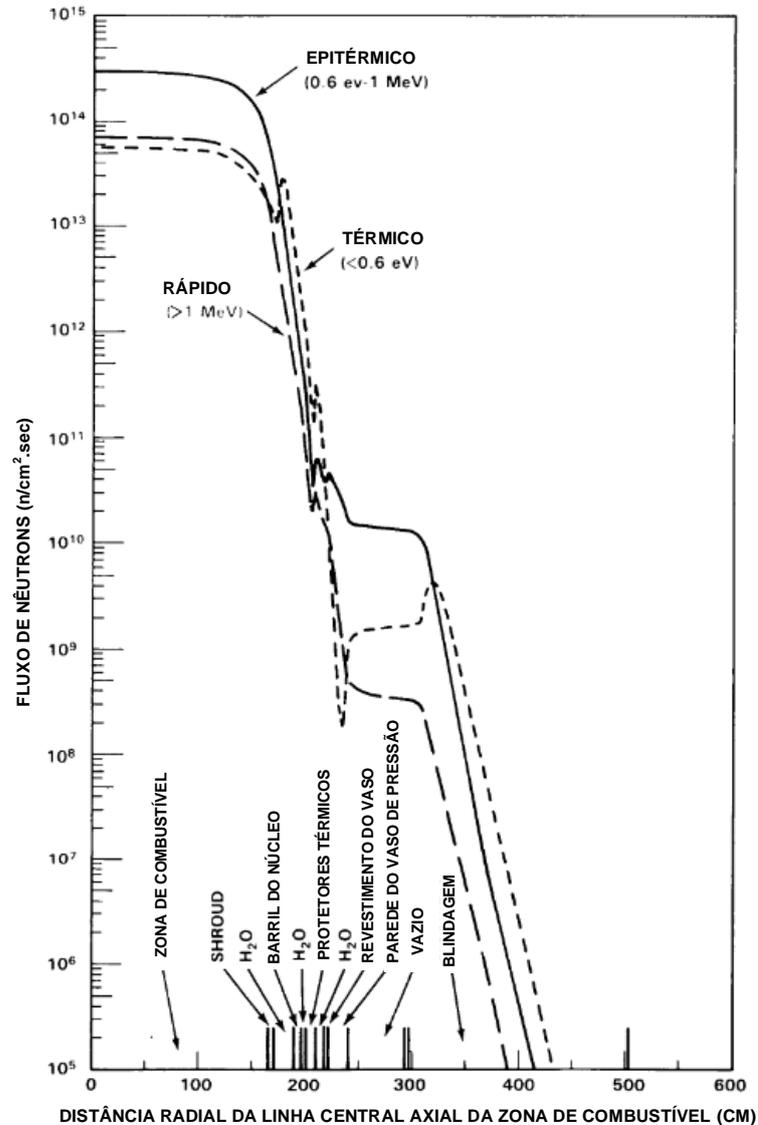
Nesse sentido, após a fissão nuclear no combustível, cerca de 2 ou 3 nêutrons rápidos, com energias próximas a 2 MeV, são gerados. O fluxo total de nêutrons produzidos no núcleo do reator pode chegar entre 10^{14} e 10^{15} nêutrons/cm².seg [43]. Esses nêutrons, inicialmente rápidos, podem causar novas fissões, principalmente no isótopo ²³⁸U, uma vez que a probabilidade de fissão para nêutrons rápidos no ²³⁵U é desprezível. Entretanto, a seção de choque para espalhamento elástico ou inelástico do ²³⁸U é maior do que a seção de choque para fissão. Portanto, após interagir por espalhamento elástico e, principalmente, espalhamento inelástico, a energia do nêutron é reduzida em cerca de 0,3 MeV por interação [2, 39, 42].

Os nêutrons, com diferentes energias, podem escapar da região do combustível e interagir com os materiais estruturais do reator ou com o refrigerante. Uma vez que esses materiais são projetados para absorver o mínimo possível de nêutrons, muitos deles ultrapassam o revestimento do EC e chegam à água, que funciona como moderador, reduzindo a energia dos nêutrons e absorvendo alguns deles. Essa interação dos nêutrons com a água pode gerar radionuclídeos ativados, que contribuem para a contaminação do circuito primário do reator [34, 38].

Os nêutrons continuam sua trajetória, atravessando todos os materiais e estruturas do núcleo, sendo alguns deles absorvidos, até chegar à blindagem biológica (concreto). O gráfico apresentado na Figura 21 mostra o fluxo de nêutrons e suas respectivas

energias em um reator PWR modelo Westinghouse em comparação com o alcance dos nêutrons em centímetros [43].

Figura 21- Distribuição radial de fluxo de nêutrons de três grupos de energia- Westinghouse



Fonte:[43] traduzido pelo autor.

A quantidade de radionuclídeos produzidos em um reator nuclear depende da interação dos nêutrons com os materiais presentes no fluido refrigerante e nas estruturas do reator. Alguns isótopos têm maior probabilidade de serem produzidos do que outros, dependendo de suas propriedades nucleares. Além disso, a quantidade de cada isótopo produzido também é influenciada pela abundância natural do elemento, pela meia-vida do isótopo e pela sua seção de choque, que é uma medida da probabilidade de interação do isótopo com os nêutrons.

Em geral, a mais importante interação de nêutrons é a de absorção de nêutrons térmicos, onde o isótopo de massa A captura um nêutron para produzir um isótopo com massa $A+1$, que, em muitos casos, decai por emissão de partícula β . Nêutrons com energias mais altas podem interagir e emitir nêutrons com a matéria e ter uma reação $N-2N$, e, portanto, produzindo isótopos com massa $A-1$. Outras interações, como por exemplo N -próton e $N-\alpha$ também são possíveis [43].

Sendo assim, estudar a composição química do fluido refrigerante, dos materiais estruturais do vaso de reator e da blindagem biológica é fundamental para entender a produção de produtos ativados. Cada elemento químico tem diferentes propriedades nucleares, como a seção de choque de interação com nêutrons e a meia-vida de seus isótopos. Portanto, a análise dos isótopos é essencial para determinar quais são os principais produtos ativados a serem “produzidos” em um reator.

5.2.1 Composição química do fluido refrigerante

O fluido refrigerante dos reatores PWR é composto principalmente pela água leve (H_2O). A água do refrigerante é desmineralizada de modo a evitar a possibilidade de gerar novos radionuclídeos como, por exemplo, os derivados do alumínio, do cálcio e do magnésio, bem como minimizar a corrosão dos materiais estruturais. Na água é dissolvida uma certa quantidade de boro para controle da reatividade. Dessa forma, os principais radionuclídeos gerados no refrigerante são o ^{16}N , produzido como resultado de interações de nêutrons com oxigênio, conforme mostrado na equação 2, e o 3H , produzidos a partir da absorção de nêutrons em deutério (mais comum em reatores de água pesada-PHWR) ou pela quebra induzida por nêutrons de ^{10}B , mostrado na equação 3, ou pelo decaimento do 7Li [2, 43].



5.2.2 Composição química dos materiais estruturais

Serão apresentadas as composições químicas dos materiais utilizados na estrutura do reator, incluindo o EC, os componentes internos do reator, a proteção térmica e a parede do vaso de pressão.

Em relação ao EC, na Tabela 8, é apresentado um resumo das especificações de composição química das principais ligas de zircônio utilizadas em reatores PWR [38].

Tabela 8- Composição química das ligas de Zircônio

Ligas	Composição das Ligas de Zircônio (% em peso)							
	Zr	Nb	Sn	Fe	Cr	O	Cu	Ni
ZIRLO	96,22	2	1,5	0,14	0,14	0	0	0
ZIRLO Otimizado	97,42	1,13	1,2	0,1	0	0,15	0	0
M5	98,655	1,2	0	0,015	0	0,13	0	0
HANA	97,1	1,5	0,8	0,35	0,15	0	0,1	0
E110	98,838	1,05	0	0,012	0	0,1	0	0
E110K	98,778	1,05	0	0,012	0	0,16	0	0
E635	98,922	1,05	0	0,012	0	0,016	0	0
MDA	98,4	0,5	0,8	0,2	0,1	0	0	0
Zircaloy 4	97,93	0	1,7	0,24	0,13	0	0	0
Zircaloy 2	97,87	0	1,7	0,2	0,15	0	0	0,08

Fonte:[38].

Além dos elementos citados na Tabela 8, as ligas de Zircaloy possuem uma certa quantidade de impurezas, como o cobalto, o titânio, o háfnio, o alumínio, o tungstênio além de outros elementos [44].

Os vasos de pressão são fabricados de aço molibdênio manganês ou aço carbono temperado revestido por uma camada de aço inoxidável. Os componentes internos são fabricados em aços inoxidável AISI 304. Na Tabela 9, é apresentado os materiais usados nas principais estruturas do reator e na Tabela 10, é apresentado a composição química desses materiais.

Tabela 9- Material da estrutura do vaso de pressão

Estrutura do reator	Material
<i>Shroud</i> ³	AISI 304
Matriz do Núcleo	AISI 304
Proteção Térmica	AISI 304
Revestimento do Vaso de Pressão	AISI série 300 (AISI 304) ou Inconel
Estrutura do Vaso de pressão	ASTM A533 ou ASTM A508
Pinos, porcas e válvulas	ASTM A540

Fonte: [36].

³ *Shroud* = Estrutura que envolve o EC na matriz do núcleo do reator.

Tabela 10- Composição química dos materiais do reator

Material	Composição química em %									Ref
	Fe	Cr	C	Mn	Mo	Ni	P	Si	S	
AISI 304	66,345	18	0,08	2	0	8	0,045	1	0,03	[45]
Inconel	6	14	0,15	1	0	72	0	0,5	0,015	[46]
ASTM A533	97	0	0,25	1,15	0,45	0,4	0,035	0,15	0,04	[47]
ASTM A508	97,28	0,25	0,24	0,7	0,08	0,25	0,035	0,15	0,04	[48]
ASTM A540	96	0,85	0,12	0,45	0,45	1,2	0,035	0,2	0,04	[49]

Além dos elementos citados na Tabela 10, esses materiais, também possuem uma certa quantidade de impurezas, como o cobalto, o titânio, o háfnio, o alumínio, o tungstênio além de outros elementos que estão presentes nesses aços.

5.2.3 Composição química da blindagem biológica

A blindagem biológica é uma barreira de contenção construída com concreto de alta densidade e espessura. O concreto utilizado em instalações nucleares é uma mistura de cimento, areia, água, ferro e outros elementos, como a hematita, magnetita, barita e minério de ferro, conhecidos como agregados de alta densidade. Os materiais utilizados estão descritos na Tabela 11 e a composição química do vergalhão está na Tabela 12.

Tabela 11- Material da blindagem biológica

Material do Concreto	Material
Cimento	ASTM C150 ou ASTM C595
Cimento hidráulico expansivo	ASTM C8445
Agregados de concreto	ASTM C33 ou ASTM C637
Água	H ₂ O
Armadura de aço deformada	ANSI/AWS D14 ou ASTM A706
Aço estrutural	ASTM A36 e ASTM A242 e ASTM A572
Tubos de aço	ASTM A36 e ASTM A242 e ASTM A572
Aditivos	ASTM C260 ou ASTM C494 e ASTM C1017

Fonte:[50].

Tabela 12- Composição química dos materiais da blindagem biológica – parte do vergalhão

Material	Composição Química em %							Ref
	C	Cu	Fe	Mn	P	Si	S	
ASTM A242	0,15	0,2	98	1	0,15	0	0,05	[51]
ASTM A36	0,29	0,2	98	0,8	0,04	0,15	0,05	[52]
ASTM A572	0,22	0	98	1,35	0,04	0,4	0,05	[53]

Em virtude de não obter acesso as informações oficiais da composição química dos outros materiais associados ao concreto, foi utilizado os dados da análise química do concreto da NPP PWR Rancho Seco, que está representada na Tabela 13 [43].

Tabela 13- Análise química do concreto de Rancho Seco

Elemento	Valor	Unidade
Al	5,7	%
Si	23,9	%
P	0,92	%
K	1,1	%
Ca	12,3	%
Fe	3,6	%
H	6000	ppm
Na	13500	ppm
Ti	4100	ppm

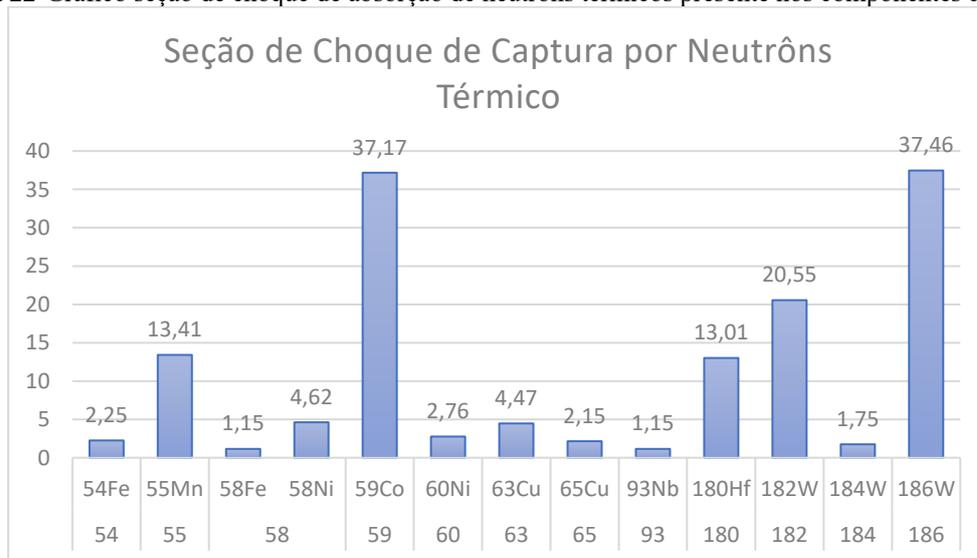
Fonte: [43].

5.2.4 Análise de isótopos-alvos de ativação no reator

Para analisar os principais produtos de ativação em um reator, é necessário identificar os principais isótopos "alvo" presentes nas estruturas do reator, que se tornam radioativos após serem bombardeados por um nêutron térmico. O APÊNDICE A apresenta informações sobre os isótopos presentes no reator, incluindo sua abundância na natureza, meia-vida (ou se são estáveis), seção de choque para absorção de nêutrons e, na última coluna, se o isótopo se torna ativo ou não após absorver um nêutron térmico.

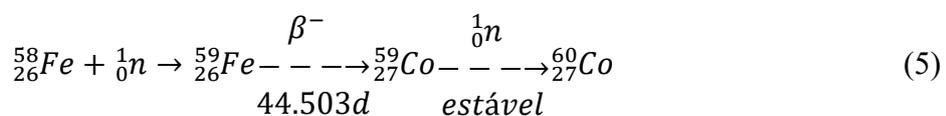
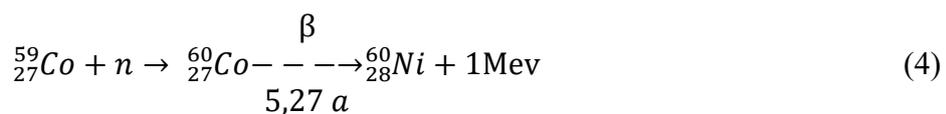
Neste ponto, foi realizada uma análise para identificar os principais isótopos-alvo que poderiam se tornar "ativados". Foi feito um filtro para excluir os isótopos que não são abundantes na natureza e aqueles que, embora sejam alvos, possuem seções de choque de absorção de nêutrons relativamente baixas (menor que 1 bar) em comparação com os demais. Na Figura 22, é apresentado um gráfico com os principais isótopos-alvos presentes nas estruturas dos reatores.

Figura 22-Gráfico seção de choque de absorção de nêutrons térmicos presente nos componentes do reator

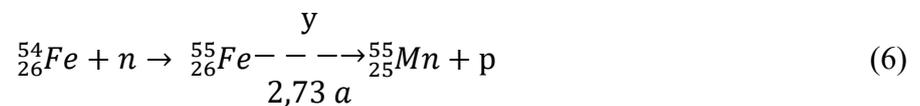


Fonte: autor

A partir deste gráfico, é possível entender, por exemplo, que o isótopo ⁵⁹Co, que é 100% abundante na natureza e tem uma seção de choque de absorção relativamente alta em comparação com outros isótopos-alvos, quando absorve um nêutron, torna-se ⁶⁰Co, um isótopo radioativo com uma meia-vida de 5,27 anos, que decai por emissão β, liberando uma energia média de cerca de 1 MeV para o ⁶⁰Ni, conforme mostrado na equação 4. Existem outras formas de produção do ⁶⁰Co, como a reação N-próton, a reação N-α, ou a reação por absorções sucessivas do ⁵⁸Fe (que tem uma seção de choque de 1,15 barn), conforme equação 5, mas são menos comuns de ocorrerem em relação ao primeiro exemplo [43]. Conforme veremos no estudo de caso apresentado na seção 5.4 Estudo de caso dos radionuclídeos encontrados nos componentes do reator nuclear”, o ⁶⁰Co é o radionuclídeo dominante na ativação interna no reator numa escala de 5 à 15 anos. O ⁶⁰Co pode ser encontrado tanto nos componentes do reator quanto na blindagem biológica, uma vez que uma certa quantidade de nêutrons atravessa a estrutura do vaso de pressão, sendo impedida pela blindagem biológica e interagindo com os metais internos da estrutura, como já mostrado na Figura 21, formando esse radionuclídeo nos materiais do concreto que possuem cobalto.



Outro importante exemplo de radionuclídeo produzido em reatores é o ^{55}Fe . Como a maior parte dos materiais estruturais dos reatores é composta de aço, que é majoritariamente formado por ferro, esse isótopo é produzido em quantidades significativas durante a exposição ao fluxo de nêutrons térmicos. O isótopo ^{54}Fe , que representa 5,85% da abundância na natureza do ferro, possui uma seção de choque de absorção de nêutrons de 2,25 barn. O ^{55}Fe , por sua vez, tem uma meia-vida de 2,73 anos e decai por captura eletrônica para produzir o ^{55}Mn , conforme mostrado na equação 6. O ^{55}Fe é o radionuclídeo dominante até 5 anos após o desligamento do reator, conforme será mostrado no estudo de caso apresentado na seção 5.4 Estudo de caso dos radionuclídeos encontrados nos componentes do reator nuclear”.

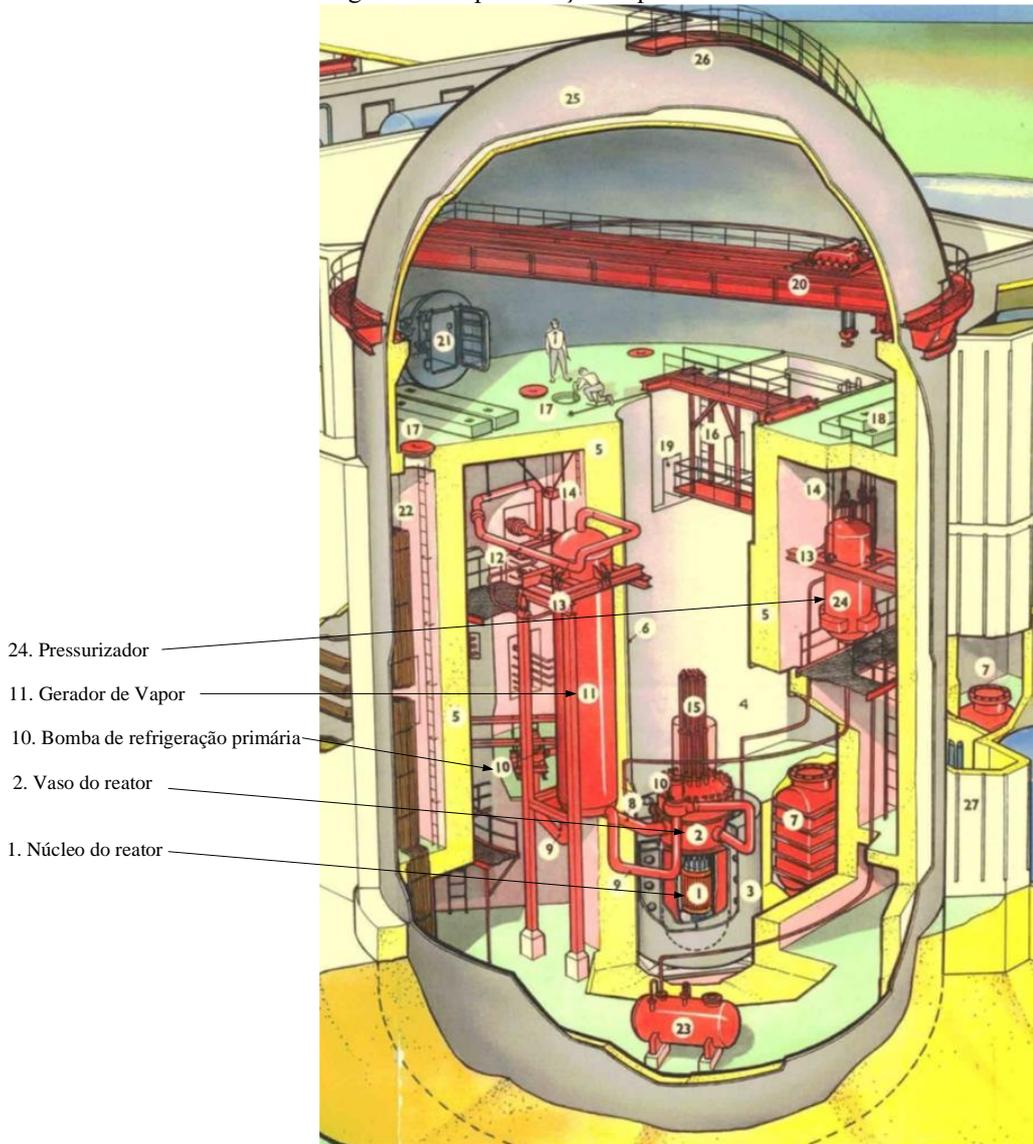


Os materiais estruturais em contato com a água estão sujeitos à corrosão, o que pode deteriorar a estrutura metálica e produzir produtos ativados na presença de água. Como resultado, os produtos ativados são disseminados na corrente do circuito primário. Esses produtos podem ser absorvidos em superfícies ou retidos como particulados nos limites dos fluxos de refrigerante dentro do circuito. Com a transmutação de elementos, a composição química da estrutura do reator é modificada ao longo do tempo, levando a perda de propriedades físicas e especiais (como por exemplo a ductibilidade). Após um certo tempo de funcionamento, por questões de segurança, é necessário cessar a operação do reator e, posteriormente, descomissioná-lo.

5.3 Processo de contaminação e ativação nos componentes do reator

Os reatores nucleares do tipo PWR são projetados para garantir que os componentes principais, como o pressurizador, o gerador de vapor e as bombas de refrigeração, não estejam expostos diretamente ao fluxo de nêutrons gerado no núcleo do vaso de pressão. Isso é alcançado por meio de uma disposição estratégica desses componentes, conectados ao vaso de pressão apenas por meio de tubulações que transferem o fluido do circuito primário. Normalmente, esses componentes são posicionados a uma certa altura acima do vaso de pressão, protegidos por uma parede de concreto como pode ser visto na representação esquemática do reator nuclear de pequeno porte BR-3 mostrada na Figura 23.

Figura 23- Representação esquemática do reator BR-3



Fonte:[37].

Os produtos de fissão (incluindo os transurânicos e isótopos de urânio) que podem vaziar do EC, bem como os produtos ativados nos materiais que sofreram corrosão na estrutura do vaso de pressão do reator, irão circular no circuito primário, contaminando todos os outros componentes nesse circuito durante a fase de operação. Geralmente, esses radionuclídeos ficam localizados nas superfícies desses componentes, e eles podem ser removidos no descomissionamento por meio de um processo de descontaminação, no entanto, é possível que alguns radionuclídeos penetre na estrutura do material e sua remoção somente poderá ser realizada por meio do desmantelamento. Essas atividades de descomissionamento serão apresentadas no decorrer deste trabalho.

Os materiais do vaso de pressão, que estão expostos ao fluxo de nêutrons, serão fortemente ativados, alterando sua microestrutura cristalina. Além do processo de descontaminação das superfícies, é necessário realizar o desmantelamento do vaso de pressão ou o armazenamento completo, dependendo da abordagem de descontaminação e desmantelamento a ser adotada. Essa decisão dependerá de fatores como limitações técnicas e de segurança.

A blindagem biológica também estará exposta ao fluxo de nêutrons e ativará uma certa quantidade de material até uma determinada profundidade na parede. No entanto, diferentemente dos componentes do circuito primário, a blindagem biológica não será contaminada pelos produtos de fissão, uma vez que não há nenhuma ligação com o circuito primário. Apesar disso, é comum adotar algumas técnicas de descontaminação⁴, como raspagem das paredes, jato abrasivo, entre outros, para remover apenas a estrutura contaminada, mantendo ou substituindo as estruturas não contaminadas. Um resumo das contaminações nos componentes é apresentado na Tabela 14.

Tabela 14-Contaminação nos principais componentes do reator

Componente do Reator	Nível de contaminação por produtos de fissão	Nível de contaminação por produtos ativados	Principal técnica para solução
Vaso de pressão	Alta - Superficial	Alta – Interna e superficial	Descontaminação e desmantelamento
Elemento de Combustível	Alta- Interna	Alta – Interna	Retirada do combustível e armazenamento em local apropriado
Pressurizador	Média - Superficial	Média – Superficial (corrosão do vaso)	Descontaminação e desmantelamento
Gerador de Vapor	Média - Superficial	Média – Superficial (corrosão do vaso)	Descontaminação e desmantelamento
Bombas de Refrigeração	Média - Superficial	Média – Superficial (corrosão do vaso)	Descontaminação e desmantelamento
Blindagem Biológica	Não há	Média – Interna e Superficial	“Descontaminação”

Fonte: Autor.

A abordagem descrita acima tem como objetivo preservar a integridade estrutural das instalações para fins restritos, tais como depósitos provisórios de rejeitos

⁴ Embora a técnica envolva o desmantelamento parcial da estrutura através de cortes, quando aplicada à blindagem biológica, a AIEA utiliza a terminologia 'descontaminação' em suas publicações, considerando que o objetivo é limpar a superfície, e não destruir o edifício.

radioativos, laboratórios, museus, indústrias, entre outros. Quando o objetivo do projeto de descomissionamento é permitir usos irrestritos, a estrutura do prédio pode ser implodida, após a remoção de todos os componentes contaminados. No entanto, todos os escombros devem ser tratados como rejeitos radioativos e passar pelas etapas adequadas de gestão desses materiais.

5.4 Estudo de caso dos radionuclídeos encontrados nos componentes do reator nuclear

A literatura sobre descomissionamento de reatores nucleares fornece uma ampla gama de informações sobre os inventários de produtos ativados. Um documento importante nesse sentido é o “*Long-Lived Activation Products in Reactor Materials*”, publicado pela Comissão Regulatória Nuclear dos EUA (NRC), que apresenta dados sobre a ativação de produtos em diversos reatores de potência, incluindo reatores PWR como Ranch Seco (873 MWe), Bellefonte, Palo Verde (1414 MWe) e Turkey Point (829 MWe) [43].

O trabalho realizado pela NRC reuniu informações de reatores nucleares de potência PWR desligado após 40 anos de operação, com uma taxa de funcionamento de 75%. Esse trabalho listou os 40 principais radionuclídeos produzidos nas partes internas e na estrutura do vaso de pressão do reator e na blindagem biológica. Sendo assim, os isótopos encontrados, sua meia vida e a atividade, convertidos em Bq/g. O resumo dos principais radionuclídeos e a atividade total realizado neste trabalho é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15- Radioatividade no reator

Região		Atividade Total (Bq/g)	Principais radionuclídeos (% de atividade do total)
Interno do Vaso de Pressão	<i>Shroud</i>	$1,35 \cdot 10^{10}$	^{55}Fe (57,48% - 60,38%) ^{60}Co (32,75% - 35,58%) ^{63}Ni (4,93% - 6,22%) ^{54}Mn (0,295% - 1,78%) ^{65}Zn (0,1% - 0,11%)
	Matriz do núcleo	$1,51 \cdot 10^9$	
	Proteção térmica	$2,26 \cdot 10^8$	
	Revestimento do vaso	$3,47 \cdot 10^7$	
	Parede do vaso de pressão	$3,62 \cdot 10^9$	
Blindagem Biológica	0 cm (Parede)	$3,15 \cdot 10^5$	^3H (58,67% - 60,30%) ^{55}Fe (34,00% - 34,04%) ^{152}Eu (2,81% - 2,89%) ^{60}Co (2,22% - 2,58%) ^{154}Eu (0,24% - 0,65%) ^{65}Zn (0,018% - 0,26%) ^{134}Cs (0,1% - 0,11%)
	10cm	$5,13 \cdot 10^5$	
	24cm	$2,72 \cdot 10^5$	
	55cm	$1,53 \cdot 10^4$	

Fonte: [43].

É importante citar, também, que foi relatado pequenos traços de isótopos de meia vida longa, dos quais se destacam: ^{146}Sm , $^{92\text{m}}\text{Nb}$, ^{205}Pb , ^{129}I , ^{53}Mn , ^{135}Cs e ^{41}Ca , entre outros. A meia vida desses isótopos é maior que milhões de anos.

Os dados apresentados na Tabela 15 indicam que, após o desligamento do reator, o ^{55}Fe , o ^{60}Co e o ^{63}Ni correspondem, em média, a 98,67% da ativação inicial do vaso de pressão, enquanto o ^3H , o ^{55}Fe , o ^{152}Eu e o ^{60}Co representam, em média, 98,73% da ativação na blindagem biológica.

5.4.1 Decaimento radioativo dos radionuclídeos presentes nos componentes do reator

A lei que rege o decaimento radioativos estabelece que a taxa de decaimento é proporcional ao número de radionuclídeos presente e que cada radionuclídeo possui uma constante de decaimento característica “ λ ” que está relacionada com a meia vida ($T_{1/2}$). O decaimento radioativo é um processo estatístico (probabilístico), independente de estado químico, temperatura e pressão. A taxa de decaimento num dado instante é representado pela equação 7 [42, 54]:

$$A = A_0 * e^{-\lambda t} \quad (7)$$

Onde:

A = a atividade final,

A_0 = a atividade inicial,

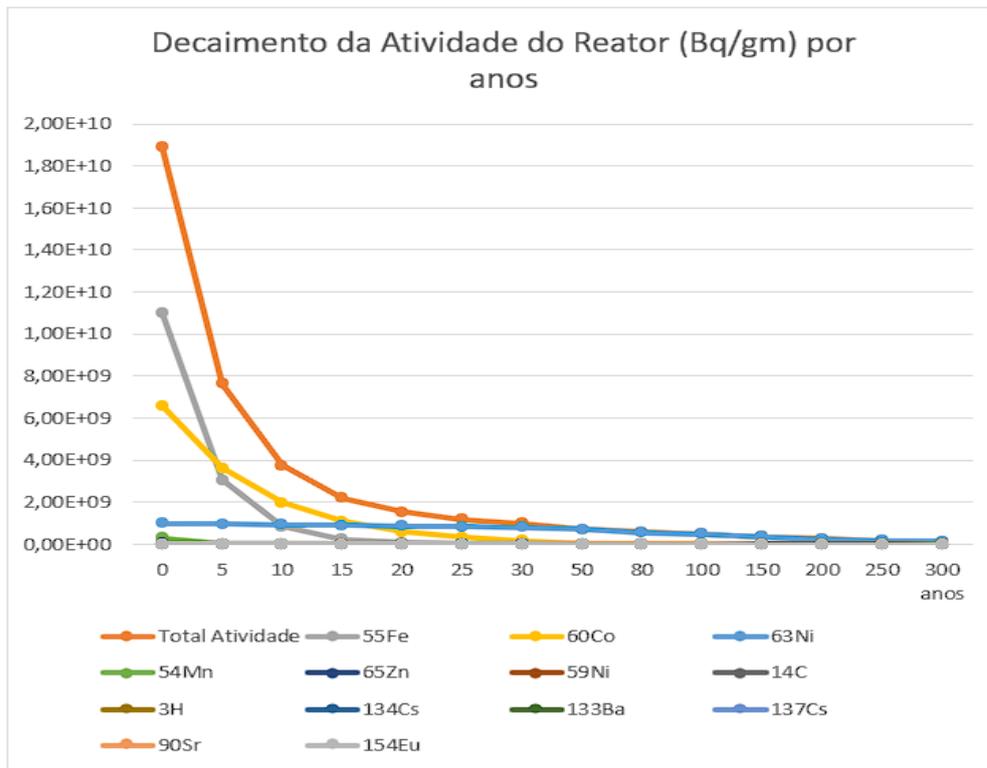
t = tempo

λ = é a constante de decaimento característica - $\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{\frac{1}{2}}}$

A partir dos dados obtidos no estudo realizado pela NRC, é possível prever a atividade durante um certo período por meio da aplicação da equação 7. No APÊNDICE B, é apresentado um exemplo dos 40 principais radionuclídeos com ativações iniciais dentro do vaso de pressão após o desligamento do reator e seus respectivos decaimentos em relação ao tempo (anos). Na Figura 24, é exibido o gráfico de decaimento da atividade dos 13 principais radionuclídeos no vaso de pressão.

Portanto, é possível observar que logo após o desligamento do reator, o radionuclídeo ^{55}Fe é o que possui maior atividade com uma concentração de $1,1 \cdot 10^{10}$ Bq/g. Devido à sua meia-vida relativamente curta de 2,7 anos, sua atividade diminui rapidamente e após 50 anos sua concentração será de $2,93 \cdot 10^4$ Bq/g, próxima ao nível de dispensa estabelecido pela posição regulatória da CNEN 8.01/2014 que é de $1,0 \cdot 10^4$ KBq/kg [55]. Após 80 anos, a concentração de atividade deste isótopo será inferior a 1 Bq/g e poderá ser dispensado.

Figura 24- Decaimento da atividade do reator



Fonte: Elaborado pelo autor com base na referência [43].

De acordo com os dados obtidos no estudo realizado pela NRC, o radionuclídeo dominante no vaso de pressão do reator após 5 anos do desligamento será o ^{60}Co , com uma concentração de atividade de $3,6 \cdot 10^9$ Bq/g. Esse isótopo tem uma meia vida de 5,27 anos e permanecerá como o radionuclídeo dominante até os 15 anos, quando sua concentração de atividade será de aproximadamente $6,3 \cdot 10^8$ Bq/g. É importante destacar que o ^{60}Co levará cerca de 168 anos para atingir o nível de dispensa estabelecido pela posição regulatória da CNEN, que é de 10 KBq/kg.

Na Tabela 16, é fornecida informações sobre as atividades de decaimento radioativo em diferentes períodos após o desligamento do reator. São apresentados os valores de atividade para os 40 principais radionuclídeos encontrados no vaso de pressão do reator PWR. Os valores são apresentados em Bq/g e mostram a porcentagem de redução da atividade em relação ao valor anterior em cada período. Essa tabela é importante para avaliar a decaimento radioativo dos radionuclídeos e decidir sobre as estratégias de descomissionamento que podem ser adotadas.

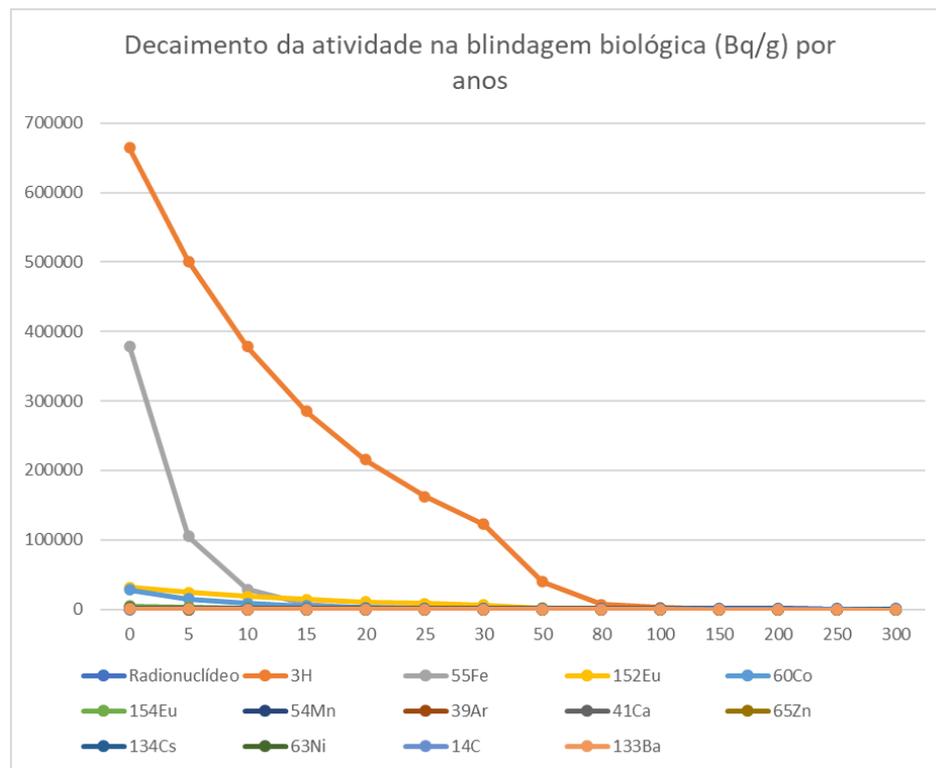
Tabela 16- Decaimento percentual da atividade do reator

Anos	Total Atividade (Bq/g)	Redução Porcentagem
0	$1,89 \cdot 10^{10}$	0
5	$7,61 \cdot 10^9$	60%
10	$3,74 \cdot 10^9$	51%
15	$2,20 \cdot 10^9$	41%
20	$1,51 \cdot 10^9$	31%
25	$1,17 \cdot 10^9$	23%
30	$9,85 \cdot 10^8$	16%

Fonte: Elaborado pelo autor com base na referência [43]

Em relação a blindagem biológica, no APÊNDICE C, é apresentado os 40 principais radionuclídeos com ativações iniciais e seus respectivos decaimentos em relação ao tempo (anos). Na Figura 25, é exibido o gráfico de decaimento da atividade dos 13 principais radionuclídeos na blindagem biológica.

Figura 25- Decaimento da atividade da blindagem biológica



Fonte: Elaborado pelo autor com base na referência [43].

Na Tabela 17, é fornecida informações sobre as atividades de decaimento radioativo em diferentes períodos após o desligamento do reator. São apresentados os valores de atividade para os 40 principais radionuclídeos encontrados na blindagem biológica. Os valores são apresentados em Bq/g e mostram a porcentagem de redução da atividade em

relação ao valor anterior em cada período. Essa tabela é importante para avaliar a decaimento radioativo dos radionuclídeos e decidir sobre as estratégias de descomissionamento a serem adotadas.

Tabela 17- Decaimento percentual da atividade da blindagem

Anos	Total Atividade	Decaimento Em relação ao período anterior
0	1,12E+06	-
5	6,53E+05	41,48%
10	4,40E+05	32,61%
15	3,17E+05	27,91%
20	2,35E+05	25,79%
25	1,77E+05	24,85%
30	1,34E+05	24,38%

Fonte: Elaborado pelo autor com base na referência [43].

Com base nos dados apresentados, é essencial avaliar as estratégias para o desmantelamento do reator. Observa-se que a redução da atividade não será tão expressiva após 30 anos quanto nos primeiros 15 anos. Portanto, é importante considerar não apenas os custos envolvidos, mas também a possibilidade de adiar o desmantelamento após esse período.

5.4.2 Análise dos limites de dispensa da norma CNEN 8.01 em relação ao estudo de caso

Com o objetivo de analisar os possíveis níveis de ativação nos componentes dos reatores e na blindagem biológica durante seus respectivos decaimentos radioativos, este estudo visa correlacioná-los com o período necessário para atingir os limites de dispensa estabelecidos pela norma regulamentadora brasileira [56]. Essa análise tem como objetivo apoiar nas possíveis abordagens de descomissionamento que podem ser adotadas de modo a garantir a conformidade com a norma. Para isso, a partir da formulação da equação 7, utilizaremos a equação 8 para calcular o tempo necessário para atingir os limites de dispensa estabelecidos pela norma regulamentadora brasileira.

$$t = \frac{\ln\left(\frac{A_0}{A}\right)}{\lambda} \quad (8)$$

Onde:

t = tempo

A = a atividade final,

A_0 = a atividade inicial,

$$\lambda = \text{é a constante de decaimento característica} - \lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$$

De acordo com os dados do estudo de caso, o somatório da atividade inicial no vaso de pressão do reator após o desligamento é apresentado no APÊNDICE B. Usando os valores de limite de concentração de atividade para materiais com quantidade ≤ 1000 kg (em kBq/kg⁵), limite de atividade para materiais com quantidade ≤ 1000 kg (em Bq) e limite de concentração de atividade para materiais sólidos com quantidade > 1000 kg estabelecidos pela norma CNEN 8.01/2014 para materiais sólidos (ANEXO 1), foram obtidos os valores finais de tempo representados na Tabela 18. Esses valores foram calculados a partir da equação 8 e obteve os tempos, em anos, necessários para aguardar o decaimento radioativo e atingir o limite de dispensa da norma CNEN.

Tabela 18-Tempo para alcançar o limite de dispensa do vaso de pressão do reator

Radionuclídeo	Tempo (em anos) para alcançar o Limite de:		
	Concentração de Atividade para Dispensa de Materiais (Quantidade ≤ 1000 kg) (kBq/kg)	Atividade para Dispensa de Materiais (Quantidade ≤ 1000 kg) (Bq)	Concentração de Atividade para Dispensa de Materiais Sólidos (Quantidade > 1000 kg) (kBq/kg)
³ H	5	0	168
¹⁴ C	40.399	0	116.538
³⁶ Cl	439.084	0	4.425.397
⁵⁴ Mn	21	7	27
⁵⁵ Fe	54	36	63
⁵⁹ Ni	747.382	0	1.278.891
⁶⁰ Co	168	92	206
⁶³ Ni	1.326	330	2.323
⁶⁵ Zn	14	3	19
⁸⁵ Kr	0	19	0
⁹⁰ Sr	280	87	472
⁹³ Mo	18.523	0	41.777
⁹⁴ Nb	216.826	0	349.703
⁹⁹ Tc	0	0	2.619.735
^{108m} Ag	1.159	0	0
¹²⁹ I	0	0	16.144.014

⁵ Deve-se levar em consideração que a norma regulamentadora brasileira estabelece os limites de dispensa em kBq/kg, enquanto os dados do estudo de caso estão na unidade Bq/g.

¹³³ Ba	110	0	0
¹³⁴ Cs	31	11	45
¹³⁷ Cs	391	91	591
¹⁵¹ Sm	0	0	0
¹⁵² Eu	128	0	214
¹⁵⁴ Eu	111	0	169
¹⁵⁵ Eu	40	0	72
¹⁵⁸ Tb	478	0	0
^{166m} Ho	11.458	0	0
^{178m} Hf	261	0	0
²³³ U	0	0	728.467
²³⁹ Pu	211.740	0	291.467

Fonte: Autor.

A partir da Tabela 18 é possível identificar algumas informações importantes, como por exemplo, os valores de limite de concentração de atividade para dispensa de materiais sólidos acima de 1.000 kg são, relativamente, maiores do que os limites abaixo de 1.000 kg. Isso significa que, no processo de descomissionamento, ao dismantelar um componente do reator que possua menos de 1.000 kg, a concentração de atividade a ser considerada é relativamente menor e pode ser possível dispensar ou reciclar o material, desde que atenda aos requisitos estabelecidos pela norma.

É possível verificar, ainda, que os radionuclídeos ¹⁴C, ³⁶Cl, ⁵⁹Ni, ⁶³Ni, ⁹³Mo, ⁹⁴Nb, ^{108m}Ag, ^{166m}Ho e ²³⁹Pu apresentam atividades específicas que excedem o limite de concentração de atividade para dispensa de materiais (Quantidade ≤1000 kg) (kBq/kg) estabelecido pela norma regulamentadora brasileira. Isso significa que esses materiais não podem ser liberados para o meio ambiente e devem ser armazenados em depósitos de rejeitos radioativos adequados, adaptados para receber esses materiais durante seus respectivos períodos de meia-vida, que podem ser longos e chegar a milhares de anos.

Em relação a blindagem biológica, usando os valores do estudo de caso apresentado no APÊNDICE C e associando com os limites de dispensa da norma CNEN 8.01/2014, temos os valores representados pela Tabela 19.

Tabela 19- Tempo para alcançar o limite de dispensa da blindagem biológica

Radionuclídeo	Tempo (em anos) para alcançar o Limite de:		
	Concentração de Atividade para Dispensa de Materiais (Quantidade ≤ 1000 kg) (kBq/kg)	Atividade para Dispensa de Materiais (Quantidade ≤ 1000 kg) (Bq)	Concentração de Atividade para Dispensa de Materiais Sólidos (Quantidade > 1000 kg) (kBq/kg)
^3H	-	-	156
^{14}C	-	-	44.776
^{36}Cl	-	-	1.084.830
^{54}Mn	6	-	12
^{55}Fe	14	-	23
^{60}Co	66	-	104
^{63}Ni	-	-	139
^{65}Zn	5	-	9
^{90}Sr	-	-	74
^{94}Nb	-	-	49.245
^{133}Ba	7	-	-
^{134}Cs	14	-	28
^{137}Cs	-	-	180
^{152}Eu	151	-	237
^{154}Eu	76	-	133
^{155}Eu	2	-	33
$^{178\text{m}}\text{Hf}$	33	-	-

Fonte: Autor.

6 POLÍTICA NUCLEAR E ESTRUTURA REGULATÓRIA BRASILEIRA

O desenvolvimento de estratégias de descomissionamento devem ser elaboradas com base nas diretrizes e regulamentos nacionais, de modo a atender os pré-requisitos técnicos e administrativos, prioridades e restrições. Sendo assim, este capítulo abordará a política nuclear e apresentará o setor nuclear brasileiro e a estrutura regulatória.

6.1 Breve resumo da Política Nuclear Brasileira

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) foi criada em 1956 através do Decreto nº 40.110/56 [57] para ser o órgão responsável pela orientação da política nuclear brasileira, sendo diretamente subordinada ao Presidente da República.

Inicialmente, a política nuclear tinha como objetivo a pesquisa científica. Os primeiros reatores nucleares construídos foram os reatores de pesquisa IEA-R1(1957) e IPR-R1(1960). Esses reatores foram projetados para a pesquisa científica, a produção de radioisótopos e o treinamento.

A Lei Nº 4.118/1962 [58], institucionalizou a criação da CNEN como autarquia federal, acumulando as responsabilidades de executar e fiscalizar as atividades nucleares no país, delegando a competência da política nacional de energia nuclear ao Poder Executivo.

Somente em 2018, por meio do Decreto nº 9.600/2018 [59], o Poder Executivo consolidou as diretrizes da Política Nuclear Brasileira (PNB), com a finalidade de “orientar o planejamento, as ações e as atividades nucleares e radioativas no País, em observância à soberania nacional, com vistas ao desenvolvimento, à proteção da saúde humana e do meio ambiente.” Para o descomissionamento de reatores nucleares, é importante ressaltar os seguintes objetivos da política [59]:

- a) atender às decisões futuras do setor energético quanto ao fornecimento de energia limpa e firme, por meio da geração Nucleoelétricas;
- b) garantir o uso seguro da tecnologia nuclear e fortalecer as atividades relacionadas com o planejamento, a resposta a emergências e eventos relacionados com a segurança nuclear e a proteção física das instalações nucleares;
- c) promover a conscientização da sociedade brasileira, de forma transparente, a respeito dos benefícios do uso da tecnologia nuclear e das medidas que permitam o seu emprego de forma segura;
- d) atualizar e manter a estrutura do setor nuclear, observadas as áreas de atuação de seus órgãos componentes, com vistas a garantir a sua integração, eficácia e

eficiência, além de evitar a sobreposição de competências e o acúmulo de atribuições conflitantes;

- e) garantir o gerenciamento seguro dos rejeitos radioativos.

A política nuclear define que o setor nuclear brasileiro terá estrutura regulatória com o objetivo de normatizar, licenciar, autorizar, controlar, regular e fiscalizar as suas atividades. A política ainda define que o combustível usado será tratado como resíduo, com vistas ao aproveitamento futuro do material reutilizável [59].

Recentemente, por meio da Lei nº 14.222/2021 [60], criou-se a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN), autarquia federal, subordinada ao Ministério de Minas e Energia (MME), nascida por meio do desmembramento da CNEN, com a finalidade de monitorar, regular e fiscalizar a segurança nuclear e a proteção radiológica das atividades e das instalações nucleares, materiais nucleares e fontes de radiação no território nacional, nos termos do disposto na Política Nuclear Brasileira e nas diretrizes do governo federal. Desse modo, a CNEN, subordinada ao Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) se tornou uma instituição dedicada a pesquisa científica e tecnológica para o setor nuclear.

No item V do Art. 6º dessa Lei, define como competência à ANSN “fiscalizar e expedir licenças, autorizações, aprovações e certificações para a construção, o comissionamento, a operação, a modificação e o descomissionamento de instalações nucleares e radioativas”. Esse órgão também terá como competências editar normas sobre a gestão de rejeitos radioativos, gestão de combustível irradiado, segurança nuclear (*Safety*) e de segurança física (*Security*).

No Art. 7º dessa Lei, transferiu a responsabilidade para o Comando da Marinha (CM) de regular, licenciar, fiscalizar e controlar quando as plantas nucleares estiverem relacionadas aos meios navais. Nesse sentido, a Marinha do Brasil exerce essa atribuição por meio da Secretaria Naval de Segurança Nuclear e Qualidade (SecNSNQ) [11].

A lei estabelece, ainda, punições no descumprimento das normas de segurança da ANSN e da SecNSNQ sobre o descomissionamento de instalações nucleares, que podem variar de multa, suspensão de licença e perda dos equipamentos e materiais nucleares. Sem prejuízo de sanções de natureza civil e penais cabíveis previstas em outras leis.

No entanto, até a presente data de conclusão deste trabalho, a Lei 14.222/21 apesar de estar vigorando, ela não produziu efeitos, pois, ainda, não foi aprovado o decreto da estrutura regimental da ANSN e, portanto, a transição da autarquia nuclear responsável pela fiscalização da CNEN para a ANSN / SecNSNQ ainda não foi concluída. Assim, as Normas Reguladoras da CNEN continuam válidas até a conclusão desse processo. Face a

isso, este trabalho basear-se-á nas Normas Regulatórias da CNEN, que podem, após a aprovação das normas da ANSN, sofrer alterações.

6.2 Estrutura do setor nuclear brasileiro

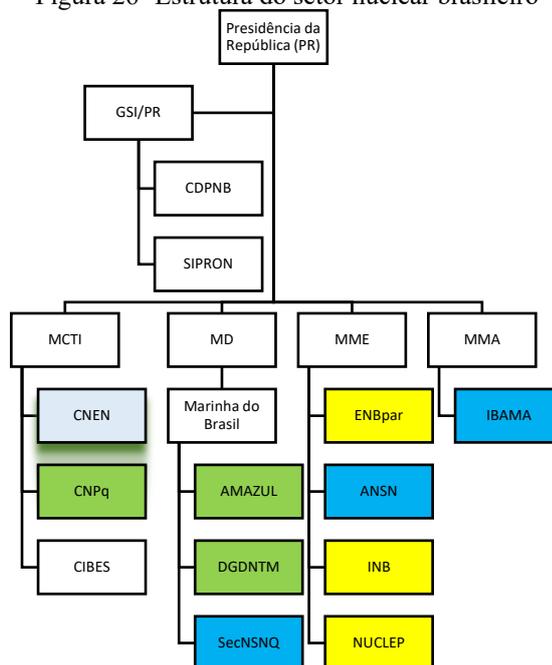
Os órgãos reguladores no Brasil serão a ANSN e a SecNSNQ⁶. A primeira regula e fiscaliza todas as atividades nucleares em terra, a segunda, as plantas navais embarcadas e o transporte de combustível para esses meios. A organização operadora de usinas nucleares no Brasil é a Eletronuclear, empresa pertencente a Empresa Brasileira de Participações em Energia Nuclear e Binacional (ENBPar), vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME). Outras instalações nucleares, como as Indústrias Nucleares do Brasil (INB) e Nuclebrás Equipamentos Pesados S.A. (NUCLEP) fazem parte do setor produtivo e são reguladas e fiscalizadas CNEN/ANSN.

Para o processo de licenciamento de instalações nucleares, além da emissão do órgão regulador, é necessário o licenciamento do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), autarquia subordinada ao Ministério do Meio Ambiente (MMA), responsável pelo licenciamento ambiental com o objetivo de garantir que as atividades desenvolvidas sejam realizadas de forma a preservar o meio ambiente e proteger a segurança do funcionário e da população.

As Instituições de Ciência e Tecnologia (ICT) voltadas para o desenvolvimento de tecnologia nuclear tem como missão principal a pesquisa científica e tecnológica na área nuclear para fins pacíficos, cumprindo os objetivos estabelecidos na Política Nuclear, para, posteriormente, transferi-la para o setor produtivo. São ICTs da área nuclear, incluindo suas organizações subordinadas: a Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha (DGDNTM), a Amazônia Azul Tecnologias de Defesa S.A. (AMAZUL); e a CNEN. A estrutura dos órgãos relacionados com a área nuclear é ilustrada por meio pela Figura 26.

⁶ Embora a Lei 14.222/21 esteja em vigor até a data de conclusão deste trabalho, a transição do órgão regulador da CNEN para a ANSN/SecNSNQ ainda não foi concluída. No entanto, com base nessa Lei, este trabalho pressupõe que os órgãos reguladores serão a ANSN/SecNSNQ.

Figura 26- Estrutura do setor nuclear brasileiro



Fonte: [61].

6.3 Estrutura regulatória brasileira

Além das normas da CNEN, existem diversos documentos legislativos que normatizam as atividades de descomissionamento. Sendo assim, neste item serão apresentados os principais documentos regulatórios que afetam essas atividades.

6.3.1 Constituição Federal de 1988

A constituição federal de 1988 estabeleceu a competência da União de exercer o monopólio estatal sobre a pesquisa, a lavra, o enriquecimento, a industrialização e o comércio de minérios nucleares e seus derivados [62].

No Brasil, a empresa responsável pela geração de energia nucleoeletrica é a Eletronuclear, que, recentemente, por motivo de processo de desestatização da Eletrobrás, foi transferida parte do capital (64,10%) para a ENBPar, empresa vinculada ao Ministério de Minas e Energia [63].

Adicionalmente, a constituição estabeleceu a competência da União em legislar sobre as atividades nucleares, na qual é exercida por meio do órgão regulador (CNEN ou ANSN / SecNSNQ). A constituição, também, define que as iniciativas do poder executivo referente as atividades nucleares devem ser aprovadas pelo congresso nacional. As aprovações do congresso devem ser promulgadas por meio de leis ou decretos legislativos.

6.3.2 Lei nº 9.765/1998 – Taxas de Licenciamento de Instalações Nucleares

A Lei nº 9.765/1998 [64] instituiu os preços de taxa de licenciamento, controle e fiscalização de materiais e instalações nucleares (TLC). Essa lei isenta instalações voltadas a pesquisa e desenvolvimento, organizações militares e hospitais públicos do Sistema único de Saúde (SUS). Nesse sentido, os valores fixados na lei são atualizados monetariamente uma vez por ano, nos termos de ato da Diretoria Colegiada do órgão regulador, seguindo a variação do Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) no ano anterior.

As taxas atreladas ao descomissionamento de reatores e os seus respectivos valores, no ano de 2023, são mostrados na Tabela 20. Estes valores deverão ser inseridos nos calculados das estimativas de custo do descomissionamento de forma a elaboração de estratégias.

Tabela 20- Valores de preços de TLC 2023

Objeto	Ato	Valor (R\$)
Reator Nuclear de Potência	Autorização para descomissionamento	1.702.290,00
	Liberação de controle regulatório	170.230,00
	TLC a ser paga anualmente durante o período de descomissionamento para usinas que ainda possuem combustíveis irradiados dentro da instalação	1.046.780,00
	TLC a ser paga anualmente durante o período de descomissionamento, para usinas que não possuem combustíveis irradiados dentro da instalação	348.930,00
Unidade de armazenamento de combustível irradiado (processo úmido)	Aprovação do local	170.230,00
	Licença de construção	1.516.960,00
	Autorização para utilização de material nuclear	22.580,00
	Renovação da autorização para utilização de material nuclear	2.260,00
	Autorização para operação inicial	2.056.170,00
	Renovação da autorização para operação inicial	205.620,00
	Extensão de vida ou autorização de operação estendida	616.860,00
	Autorização para descomissionamento	170.230,00
	Encerramento (liberação de controle regulatório)	85.120,00
	TLC a ser paga anualmente após emissão da autorização para operação permanente, por instalação	348.930,00
TLC a ser paga anualmente durante o período de descomissionamento	104.680,00	

Fonte: [64]

6.3.3 Lei 10.308/2001 – Depósitos de Rejeitos Radioativos (RR)

A Lei 10.308/2001 [65] dispõe sobre a seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos de rejeitos radioativos. A lei define quatro tipos de depósitos de rejeitos radioativos, que são: depósitos iniciais, intermediários, finais e provisórios.

A Lei estabelece a CNEN como responsável pelo destino final dos rejeitos radioativos produzidos no país. A CNEN, também, é responsável por projetar, construir e instalar depósitos intermediários e finais de rejeitos radioativos, essa lei abre a possibilidade de a CNEN terceirizar os serviços operacionais e administrativos, porém, mantendo a sua responsabilidade.

6.3.4 Decreto nº 5.935/2006 – Convenção conjunta para o gerenciamento seguro de combustível nuclear usado e dos RR

O decreto nº 5.935/2006 [12] promulga o texto assinado da Convenção Conjunta para o Gerenciamento Seguro de Combustível Nuclear Usado e dos Rejeitos Radioativos. Assim, o Brasil se compromete a adotar medidas que asseguram a proteção em todos os estágios do gerenciamento do combustível irradiado e dos rejeitos radioativos.

A convenção reforça, em vários artigos, a necessidade de assegurar planos de descomissionamento que contemplem o gerenciamento do combustível nuclear irradiado e dos rejeitos radioativos utilizando informações obtidas durante a vida útil de operação da instalação, e sejam revistos pelo órgão regulatório. A convenção reforça a necessidade de assegurar que os recursos financeiros e humanos necessários para o gerenciamento de combustível nuclear usado e de rejeitos radioativos estejam disponíveis para o descomissionamento.

6.3.5 Normas Regulatórias (NR)

As normas regulatórias, em vigor, associadas as atividades nucleares foram elaboradas pela CNEN. Elas foram divididas em 9 grupos, que são:

- a) Grupo 1 - Instalações Nucleares
- b) Grupo 2 - Controle de Materiais Nucleares, Proteção Física e Proteção contra Incêndio
- c) Grupo 3 - Proteção Radiológica
- d) Grupo 4 - Materiais, Minérios e Minerais Nucleares
- e) Grupo 5 - Transporte de Materiais Radioativos

- f) Grupo 6 - Instalações Radiativas
- g) Grupo 7 - Certificação e Registro de Pessoas
- h) Grupo 8 - Rejeitos Radioativos
- i) Grupo 9 – Descomissionamento

Apesar de existir um grupo de normas específica para o descomissionamento, outras normas pertencentes a outros grupos também são usadas. Nesse sentido, serão abordadas as normas mais importantes relativas ao descomissionamento de reatores de potência e, depois, relacioná-las com as atividades de descomissionamento.

6.3.5.1 CNEN NE 1.04 – Licenciamento de Instalações Nucleares

A norma regula o processo de licenciamento de instalações nucleares. Sendo assim, esta norma apresenta as etapas necessárias para a aprovação do local, licença de construção, autorização para construção de materiais nucleares, autorização para operação e cancelamento de autorização para operação [66].

Para a licença de construção, é necessário a apresentação do Relatório Preliminar de Análise de Segurança (RPAS). Esse relatório deverá conter o PPD da instalação nuclear, de modo a contemplar a segurança da instalação até o final do seu ciclo de vida.

Adicionalmente, caso seja necessário a construção de depósitos iniciais ou intermediários para armazenar os rejeitos radioativos de classe 1 ou 2, deve-se atender aos requisitos da norma CNEN NN 8.02[67], que trata de licenciamento para este tipo de instalação.

6.3.5.2 CNEN NE 1.16 – Garantia da Qualidade para a Segurança de Usinas Nucleoelétricas e outras instalações

A norma em questão se aplica às atividades que influenciam a qualidade de itens relacionados à segurança e ao gerenciamento da usina em todas as etapas do ciclo de vida, incluindo o descomissionamento. Essa norma tem caráter regulatório e, portanto, possui natureza jurídica e deve ser cumprida, ao contrário das normas ISO 9.000, que são voltadas para recomendações de boas práticas [68].

A garantia da qualidade é fundamental durante toda a operação de uma instalação, incluindo o processo de descomissionamento. Isso se deve ao fato de que os registros mantidos durante a operação são importantes para o planejamento e execução das atividades de descomissionamento. A apresentação do Programa de Garantia da Qualidade (PGQ) é um requisito necessário para a obtenção da autorização de descomissionamento

junto ao órgão regulador. Vale ressaltar que a garantia da qualidade envolve a adoção de medidas para assegurar que os requisitos e critérios de segurança e proteção radiológica sejam atendidos em todas as fases do descomissionamento.

6.3.5.3 CNEN NE 2.01 – Proteção Física de Unidades Operacionais da Área Nuclear

A norma citada estabelece requisitos para a proteção física no transporte de materiais radioativos, incluindo a segurança durante o manuseio, transporte e armazenamento desses materiais. É importante observar que, no processo de descomissionamento de instalações nucleares, são gerados rejeitos radioativos que podem ser transferidos para outras instalações, o que torna importante o conhecimento e aplicação dos procedimentos de proteção física no transporte desses materiais. Dessa forma, a norma citada é relevante para garantir a segurança no transporte de rejeitos radioativos durante o descomissionamento de instalações nucleares [69].

6.3.5.4 CNEN NN 2.01 – Proteção Física de Materiais e Instalações Nucleares

A norma estabelece os princípios gerais e requisitos básicos para a proteção física (*Security*) de materiais e instalações nucleares. Esta norma se aplica em todo o ciclo de vida da instalação, incluindo no descomissionamento [70].

Essa norma é importante no descomissionamento, pois a depender da estratégia a ser adotada, a instalação e os depósitos iniciais estabelecerão um Sistema de Proteção Física que podem ser curtos ou longos. Esse sistema contempla a aquisição de equipamentos, aparelhos e recursos humanos destinados a responder a qualquer ato malicioso que possa colocar a instalação e o ambiente em risco, conseqüentemente, a estratégia a ser adotada levará em conta os investimentos necessários para a proteção física.

6.3.5.5 CNEN NN 3.01 – Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica

A Norma CNEN NN 3.01 [71], que trata sobre as diretrizes básicas de proteção radiológica, é uma das mais importantes para o descomissionamento, pois as atividades de descontaminação e desmantelamento dos componentes do reator, que estão altamente ativado, deverão ser realizadas de acordo com os requisitos básicos de proteção radiológica descrito nessa norma.

Outros documentos complementares fazem parte dessa norma, que informam os critérios, limites de dose para indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE), restrição de dose, níveis de referência, classificação de áreas, entre outros. Os documentos complementares contendo as Posições Regulatórias são:

- a) Critérios de exclusão, isenção e dispensa de requisitos de proteção radiológica;
- b) Fatores de ponderação para as grandezas de proteção radiológica;
- c) Coeficientes de dose para indivíduos ocupacionalmente expostos;
- d) Restrição de dose, níveis de referência ocupacionais e classificação de áreas;
- e) Critérios de cálculo de dose efetiva a partir da monitoração individual;
- f) Medidas de proteção e critérios de intervenção em situações de emergência;
- g) Níveis de intervenção e de ação para exposição crônica;
- h) Programa de monitoração radiológica ambiental;
- i) Modelo para elaboração de relatórios de programa de monitoração radiológica ambiental;
- j) Níveis de dose para notificação à CNEN;
- k) Coeficientes de Dose para Exposição do Público; e
- l) Níveis de Investigação e de Referência para Radioatividade em Água Potável.

6.3.5.6 CNEN NE 5.02- Transporte, recebimento, armazenagem e manuseio de elementos combustíveis de usinas nucleoeletricas.

A norma estabelece os requisitos para o transporte, recebimento, armazenagem e manuseio de elementos de combustíveis de usinas nucleoeletricas. Nela, são incluídas os requisitos para o manuseio do combustível já irradiado [72].

6.3.5.7 CNEN NE 5.03 - Transporte, recebimento, armazenagem e manuseio de itens de usinas nucleoeletricas.

Da mesma forma da norma anterior, essa norma estabelece os requisitos para o transporte, recebimento, armazenagem e manuseio de itens importantes nas usinas nucleoeletricas. Os itens são classificados em níveis (A à D) de acordo com a sua sensibilidade as condições ambientais[73].

6.3.5.8 CNEN NN 5.01 - Regulamento para Transporte Seguro de Materiais Radioativos

A norma regula os requisitos de segurança e proteção radiológica para o transporte de materiais radioativos. Ela se aplica ao transporte, a preparação, expedição, manuseio, carregamento, armazenamento em trânsito, descarregamento e recebimento no destino final de rejeitos [74].

6.3.5.9 CNEN NE 6.06 – Seleção e Escolha de Locais para Depósitos de RR

A norma estabelece os requisitos básicos para a seleção e escolha de locais para depósitos intermediários ou finais de RR, de forma a garantir o confinamento seguro desse material pelo tempo que se fizer necessário [75].

Durante a elaboração do plano final de descomissionamento, é importante o planejamento para o armazenamento dos rejeitos radioativos. Como o descomissionamento de um reator nuclear produz uma quantidade relativamente grande de rejeitos, é importante ter o conhecimento das normas para a escolha para a construção de depósitos para este fim.

6.3.5.10 CNEN NN 6.09 – Critérios de Aceitação para Deposição de RR de Baixo e Médio Níveis de Radiação

A norma estabelece os procedimentos para o recebimento de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis pela CNEN, órgão responsável pelo repositório. Esta norma descreve, por exemplo, os tipos de embalagens e acondicionamento para cada estado (sólido, líquido e gasoso) dos rejeitos, a documentação necessária, entre outros [76].

6.3.5.11 CNEN NN 8.01 – Gerência de Rejeitos Radioativos de baixo e médio níveis de radiação.

A norma CNEN NN 8.01 é uma das normas mais importantes para a elaboração de planos para o descomissionamento. Ela trata dos requisitos básicos para a gestão de rejeitos radioativos de classe 1 e 2, que contemplam os procedimentos para a segregação, das embalagens e volumes, do transporte, do armazenamento, do tratamento, da dispensa, do registro e inventário [55].

Essa norma contempla, também, um roteiro para elaboração de plano de gerência de rejeitos radioativos que, inclui, tabelas com dados de níveis de dispensa de rejeitos por cada radionuclídeo em fase líquida, gasoso ou sólido.

6.3.5.12 CNEN NN 8.02 – Licenciamento de Depósitos de RR de baixo e médio níveis de radiação.

O descomissionamento do reator nuclear produzirá uma quantidade de rejeitos, significativamente, elevada. Nesse ponto, o planejamento para construção e licenciamento de depósitos de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis para armazenamento dos rejeitos derivados do descomissionamento é imprescindível [67].

Nesse ponto, a norma CNEN NN 8.02, orienta sobre os critérios e requisitos necessários de segurança e proteção radiológica relativos ao licenciamento de depósitos iniciais, intermediários e finais desse tipo de rejeito.

Importante citar que, para o armazenamento de combustível irradiado, não existe norma própria e, estes, deverão atender, na medida do possível, a norma CNEN NE 1.04 [66].

6.3.5.13 CNEN NN 9.01 - Descomissionamento de usinas nucleoeletricas

A norma estabelece as atividades, as responsabilidades e os procedimentos básicos para o planejamento e execução de descomissionamento das usinas nucleoeletricas em território nacional. A norma determina uma série de requisitos, como por exemplo: a implantação de um sistema de qualidade, a gestão de recursos humanos, a gestão de rejeitos radioativos, a segurança física, entre outros [24].

A norma estabelece, ainda, como parte do processo de licenciamento, a instalação deve apresentar o PPD, que deve propor a estratégia a ser adotada, demonstrando a sua viabilidade para a conclusão do descomissionamento seguro, mesmo na hipótese de retirada precoce de operação.

6.3.5.14 CNEN NN 9.02 – Gestão dos Recursos Financeiros destinados ao Descomissionamento de usinas nucleoeletricas

A norma estabelece os procedimentos para a gestão dos recursos financeiros destinados às atividades do descomissionamento. A instalação deve detalhar os procedimentos e critérios para a captação programada de recursos financeiros destinados ao descomissionamento durante a operação da instalação e incluir esse estudo no Plano Preliminar de descomissionamento [32].

6.3.6 Aderência dos documentos regulatórios com as atividades de descomissionamento

De forma a simplificar a análise dos documentos regulatórios em relação com as atividades de descomissionamento, na Tabela 21, é mostrado a relação desses documentos com as atividades de descomissionamento que serão apresentadas no Capítulo 7, consideradas por este autor.

Tabela 21- Relação de documentos regulatórios com atividades de descomissionamento

Documento Regulatório	Atividades do Descomissionamento				
	Técnicas		Administrativas		
	Descontaminação e Desmantelamento	Gestão de Rejeitos Radioativos	Recursos Humanos	Estimativas de Custo	Gestão de Fundos
Lei nº 9.765/1998		X		X	X
Lei 10.308/2001		X		X	X
CNEN NE 1.04		X	X	X	X
CNEN NE 1.16	X		X		
CNEN NE 2.01			X	X	
CNEN NN 2.01			X	X	
CNEN NN 3.01	X	X	X	X	
CNEN NE 5.02	X	X	X	X	
CNEN NE 5.03			X		
CNEN NN 5.01	X	X	X	X	
CNEN NE 6.06	X	X		X	
CNEN NN 6.09		X			
CNEN NN 8.01	X	X	X	X	
CNEN NN 8.02	X	X	X	X	
CNEN NN 9.01	X	X	X	X	X
CNEN NN 9.02	X	X	X	X	X

Fonte: Autor.

6.4 Política de gestão de rejeitos radioativos no Brasil

No Brasil, ainda não há um documento específico que define a política de gestão de rejeitos radioativos no país. Face a isso, um conjunto de documentos e normas regulatórias são usados como base para a definição de requisitos para a elaboração de estratégias. A principal lacuna existente é sobre a destinação do combustível irradiado [77].

De acordo com a Constituição Federal de 1988, todas as atividades nucleares em território nacional são de competência da União. Por essa razão, atualmente os reatores de pequeno porte projetados e implantados no Brasil devem ser operados por instituições federais, a exemplo da Eletronuclear, que é uma empresa estatal responsável pela geração de energia a partir da fonte nuclear no país.

Em relação a construção, a administração e a operação de depósitos intermediários e finais é de responsabilidade da CNEN [65]. Atualmente, existem os seguintes depósitos intermediários e finais no Brasil [77]:

a) depósitos intermediários - Instituto de Engenharia Nuclear - IEN/RJ; Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Ipen/SP; Centro de Desenvolvimento e Tecnologia Nuclear – CDTN/MG; Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste – CRCN-NE/Recife; e

b) depósito final - Abadia de Goiás – CRCN-CO/Goiânia

O CDTN/MG, sob a supervisão da CNEN, está atualmente trabalhando no projeto do Repositório Nacional de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação (RBMN), o qual tem previsão de entrar em operação em 2024⁷ [78]. Esse repositório tem como objetivo atender às usinas nucleares e reatores de pesquisas que estão próximos do descomissionamento. O período de armazenamento previsto para esse repositório é de 300 anos.

As atividades relativas ao órgão regulador (regular, fiscalizar, licenciar) dependerão se a instalação está em terra ou por meio naval. Caso a instalação esteja em terra, como por exemplo os depósitos de rejeitos, caberá as atividades de órgão regulador à ANSN, por outro lado, se for em meios navais, caberá ao Comando da Marinha.

A Política Nuclear Brasileira considera, também, não só os aspectos técnicos, mas também os aspectos sociais e ambientais. É importante para o sucesso do projeto de descomissionamento a ampla aceitação pública, uma vez que a percepção negativa sobre a construção de rejeitos radioativos em uma comunidade pode gerar a síndrome NIMBY (*not in my backyard*), que por sua vez pode se transformar em NIMTOO (*not in my term of office*), tornando-se um problema para políticos que dependem do voto popular para se reeleger [79].

Para garantir a ampla aceitação pública da Política Nuclear Brasileira, é fundamental que haja uma percepção de confiança e credibilidade da organização operadora e dos órgãos responsáveis por divulgá-la. Isso é especialmente importante devido à síndrome negativa de NIMBY, que geralmente surge quando a construção de depósitos de rejeitos radioativos é proposta em uma determinada comunidade.

⁷ Embora a referência mencione o prazo de 2024 para a operação do Repositório Nacional de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação (RBMN), é possível que esse prazo seja postergado para uma data futura, tendo em vista que projetos de grande porte como esse podem enfrentar desafios e atrasos ao longo do processo de construção e implantação.

7 DESCOMISSIONAMENTO DE REATORES NUCLEARES

O descomissionamento de reatores nucleares é um projeto complexo que envolve a retirada de uma usina nuclear de operação e seu eventual desmantelamento. Os processos contemplam atividades técnicas e administrativas visando a remoção parcial ou total do controle regulatório tendo em vista a segurança, a saúde dos funcionários, do público e do meio ambiente [16]. O descomissionamento é necessário quando uma usina nuclear chega ao fim de sua vida útil, não é mais economicamente viável, em caso de acidentes ou quando e não atende mais às normas de segurança.

Na Tabela 22, são apresentadas as principais atividades técnicas, divididas em atividades de descontaminação e desmantelamento (DD) e atividades de gestão de rejeitos radioativos (RR), relacionadas aos seus respectivos períodos [15].

Tabela 22- Atividades de DD e RR

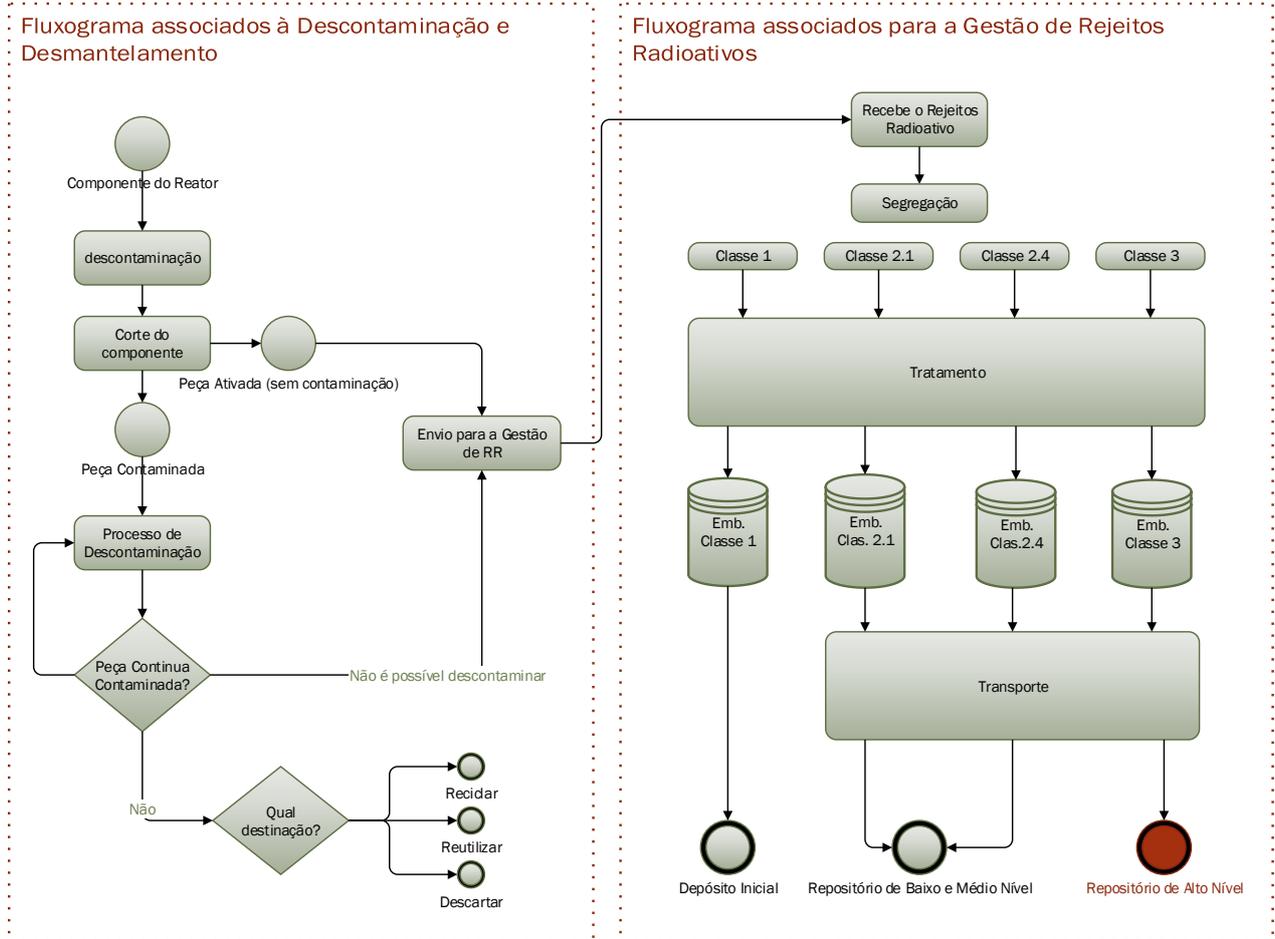
Período	Atividades de Descontaminação e Desmantelamento	Atividades de Gestão de Rejeitos Radioativos
Antes e durante a Operação	Selecionar cuidadosamente os materiais na construção da instalação (Ex. eliminar ao máximo o ^{59}Co)	Construção do depósito inicial vislumbrando a sua possível transformação em um depósito final
	Prever desencaixes de componentes em vez de ser necessários cortá-los	Desenvolver pesquisa e desenvolvimento para gestão de rejeitos
	Estabelecer espaços suficientes que facilitem a descontaminação e desmantelamento	Estimar a quantidade de rejeitos radioativos
	Desenvolver um software de descomissionamento	
Período de Transição	Caracterização radiológica	Construção do depósito intermediário ou final (ou a preparação para o envio do rejeito para o repositório)
	Remoção do combustível irradiado	Armazenagem ou transporte do combustível irradiado
	Drenagem do fluido refrigerante do circuito primário	Tratamento, acondicionamento e transporte dos rejeitos de operação
	Retirada de todos os rejeitos de operação	Aquisição de equipamentos para o manuseio, tratamento, armazenamento e transporte
	Descontaminação preliminar e limpeza inicial	
Início do Descom.	Adoção de uma abordagem para a descontaminação e desmantelamento	Adoção de uma abordagem para a gestão de rejeitos

Fonte: Elaborado pelo autor com base na referência [15].

As atividades técnicas de descomissionamento incluem “descontaminação, desmantelamento e remoção de estruturas, sistemas e componentes, incluindo a gestão dos

rejeitos radioativos e a proteção contra radiação dos trabalhadores que executam o descomissionamento, bem como a realização de pesquisas de caracterização para apoiar o descomissionamento” [16]. Um resumo das atividades técnicas é apresentado no fluxograma ilustrado na Figura 27.

Figura 27- Fluxograma de atividades técnicas de descomissionamento



Fonte: Autor.

Por outro lado, as atividades administrativas de descomissionamento envolvem a gestão dos recursos humanos e financeiros dedicados às atividades técnicas e administrativas realizadas para remover total ou parcialmente o controle regulatório, assegurando a gestão adequada dos fundos necessários para garantir o descomissionamento seguro e a gerência dos RR gerados durante o processo [16].

Uma pesquisa realizada pela Agência de Energia Nuclear da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OEDC/NEA) [28], apresentou fatores a serem considerados na escolha de uma estratégia de descomissionamento, além de como diferentes países atribuem diferentes níveis de importância a cada item, como apresentado na Tabela

23. A pesquisa destacou as diferenças significativas na percepção dos países quanto à importância de cada fator considerado.

Tabela 23- Fatores considerados para a seleção de uma estratégia de descomissionamento

Fatores Considerados para a seleção de uma macroestratégia de descomissionamento ⁸									
País	Proteção Rad.	Viab. Técnica	Deposição de RR	Regulam.	Custo	Fundo	Incertezas nos regula.	Sociais e Políticos	Reutilização do Local
República Tcheca	A	A	A	A	M	M	M	M	M
Finlândia	A	M	B	M	A	B	M	M	B
França	A	A	A	A	A	A	M	A	M
Itália	A	M	A	A	M	M	M	B	B
Coréia do Sul	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Holanda	M	B	B	M	A	A	A	A	M
Espanha	A	A	A	A	M	B	M	M	A
Eslováquia	A	A	A	M	A	M	M	M	B
Suécia	A	A	A	M	B	B	B	B	B
Suíça	A	A	M	B	B	B	B	M	M
Reino Unido	A	M	A	M	A	B	M	M	M
Estados Unidos	A	A	A	M	A	A	A	A	A

Fonte: [28].

É possível destacar que, de acordo com os dados da pesquisa apresentada na Tabela 23, os fatores associados a gestão de RR, as técnicas de DD, a gestão de recursos humanos e a gestão financeira foram os itens considerados de maior relevância pelos países na escolha de uma estratégia.

Embora existam atividades obrigatórias, como a caracterização radiológica, a retirada do combustível do vaso do reator e a drenagem do circuito, que devem ser realizadas independentemente da estratégia de descomissionamento adotada, é importante destacar que as abordagens escolhidas podem ser elaboradas de diferentes maneiras para atingir o objetivo de forma mais eficiente. A seleção de abordagens de descomissionamento terá um impacto significativo em todas as fases do processo de planejamento e execução. Por esse motivo, é importante que a instalação demonstre a viabilidade técnica e administrativa de adotar uma ou outra abordagem. Para cada abordagem selecionada, é necessário desenvolver estratégias específicas para gerenciar as atividades no descomissionamento.

⁸ A= Alto, M=Médio, B=Baixo

Embora haja vários aspectos importantes a serem considerados, este trabalho se concentrará em abordagens associadas aos quatro principais fatores do descomissionamento: técnicas de descontaminação e desmantelamento (DD), gestão de rejeitos radioativos (RR), gestão de recursos humanos (RH) e conhecimento, e gestão financeira. Na Figura 28, é apresentado uma visão esquemática da metodologia proposta.

Figura 28- As abordagens para elaboração de estratégias de descomissionamento



Fonte: Autor.

Nesse ponto, serão apresentados primeiramente os conceitos, considerações e outras informações relacionadas as atividades de descomissionamento nas quatro áreas de abordagens citadas. Posteriormente no Capítulo 8, serão propostas as abordagens com base na experiência retratada na literatura. Será adotada a técnica de avaliação de risco Análise de Decisão de Multicritério (MDCA), a fim de qualificar e comparar as abordagens entre si.

7.1 Atividades técnicas de descontaminação e desmantelamento (DD)

Nessa seção, serão apresentadas os conceitos, considerações e informações relacionadas com as atividades de descontaminação e desmantelamento.

7.1.1 Considerações técnicas na fase de projeto de construção e na fase de operação

É altamente recomendável que, na fase de projeto e construção da instalação, sejam consideradas algumas questões técnicas de DD, como por exemplo:

- a) selecionar cuidadosamente os materiais utilizados na construção da instalação, considerando o fato de que alguns materiais, como o ^{59}Co , são mais propensos a se tornarem ativos expostos ao fluxo de nêutrons, como discutido no Capítulo 5. Sempre que possível, é recomendado analisar o custo-benefício de utilizar um determinado tipo de material e estudar técnicas para minimizar a presença desses elementos nos componentes;

- b) prever desencaixes de componentes em vez de precisar cortá-los durante o processo de desmontagem. Nos reatores SMR, por exemplo, os fatores de padronização devem ser utilizados para facilitar o desmonte e garantir a eficiência do processo;
- c) estabelecer espaços suficientes dentro da instalação para facilitar as atividades de DD, além de considerar a possibilidade de estabelecer áreas para a retirada de componentes inteiros, dependendo da abordagem técnica adotada; e
- d) desenvolver um software para o acompanhamento de todas as etapas do descomissionamento.

Durante a fase de operação, é importante investir em pesquisa e desenvolvimento, em parcerias com as ICTs, para o desenvolvimento de processos que visam apoiar as atividades de descomissionamento no futuro. Um exemplo de projeto desenvolvido para o acondicionamento de rejeitos na fase líquida foi apresentado no reator de pesquisa *Salaspils*, na Letônia. A técnica apresentada foi a utilização de uma planta de cimentação, conforme mostrado na Figura 29, para solidificar os rejeitos líquidos [80].

Figura 29- Instalação da planta de cimentação em preparação para o descomissionamento



Fonte: [80].

Importante mencionar que, as técnicas desenvolvidas e comprovadas durante este período podem ser usadas no descomissionamento. A abordagem sugere que, durante a fase de operação, seja implementada na política de rejeitos radioativos, projetos de pesquisa e desenvolvimento para processos que visam a minimização de rejeitos radioativos. Esses projetos poderão ser custeados através do fundo de descomissionamento, como será tratado

na seção 7.4.2.4. Além disso, é possível criar produtos que podem ser comercializados para o descomissionamento de outras instalações.

7.1.2 Considerações técnicas no período de transição

Conforme abordado no Capítulo 5, os componentes do circuito primário permanecem altamente ativados após o desligamento do reator. Portanto, antes de iniciar as atividades de descomissionamento, é necessário realizar atividades transitórias entre a operação e o desmantelamento. Nesse sentido, as atividades que devem ser realizadas nessa fase incluem: caracterização radiológica; remoção do combustível irradiado; drenagem do refrigerante no circuito primário e na piscina; tratamento e acondicionamento de rejeitos operacionais; e descontaminação preliminar e limpeza [80].

Esses passos visam reduzir as doses de radiação ALARA através de técnicas e métodos de descontaminação, a fim de minimizar a exposição dos trabalhadores e do público durante o descomissionamento. Após essa etapa, inicia-se o processo de desmantelamento, que pode ocorrer imediatamente ou após alguns anos [80].

7.1.2.1 Caracterização radiológica

Após o desligamento do reator, é necessário inserir os dados dos componentes que serão desmantelados em um banco de dados. Esses dados podem fornecer informações importantes, como o tamanho dos componentes, o tipo de material, a localização, o estado físico e químico, as quantidades, os radioisótopos presentes, os valores de ativação, as dificuldades de descontaminação, as técnicas de desmantelamento, os riscos envolvidos, entre outros. A caracterização envolve a revisão dos dados e cálculos existentes, além da realização de medições *in situ*, amostragem e análises necessárias. Na Figura 30, é mostrado um funcionário realizando a medição *in situ* para obtenção dos dados.

Figura 30- Imagem de funcionário realizando a caracterização radiológica *in situ*



No processo de descomissionamento do reator de pequeno porte BR-3, foram relatadas experiências durante a caracterização dos componentes do reator. Os materiais a serem caracterizados foram divididos em três grupos, conforme descrito a seguir [81]:

- a) materiais de geometria simples – materiais que eram possíveis medir 100% da superfície usando monitores de radiação β portáteis;
- b) materiais homogêneos – materiais como concreto, materiais que são possíveis a medição de massa e volume. Exemplo da técnica para medição da radiação é adicionar os materiais em um tambor (Q2-220L) e fazer a medição de raios γ . O equipamento usado foi o detector de espectroscopia HPGe; e
- c) matérias de geometria complexa ou heterogêneo – materiais como tubos internos, bombas, válvulas. Nesses casos, foi desenvolvido um procedimento baseado em um método de medição dupla. O método era utilizar monitores portáteis duas vezes com intervalo máximo de 3 meses para materiais submetidos a um tratamento de descontaminação.

Os dados obtidos durante a caracterização dos componentes a serem desmantelados do reator devem ser incluídos no banco de dados. É essencial que esses dados sejam precisos e confiáveis, pois são fundamentais para o planejamento e a execução bem-sucedidas das atividades de descomissionamento. É importante também que o banco de dados seja atualizado regularmente, a fim de contabilizar o decaimento radioativo à medida que as atividades de descontaminação avançam.

As informações do banco de dados servirão de base para tomadas de decisões de outras estratégias, como por exemplo: se será possível a descontaminação total ou parcial; fornecimento de blindagem; remoção parcial ou total de componentes; classificação de RR; entre outros [80].

7.1.2.2 Remoção do combustível irradiado

Cerca de 99% da radioatividade presente nos reatores nucleares após o desligamento está associada ao combustível irradiado [28]. Embora a gestão do combustível irradiado geralmente não seja considerada como parte do descomissionamento, é necessário adotar uma estratégia para removê-lo, transportá-lo ou armazená-lo em outro local, a fim de iniciar as atividades de descomissionamento.

A escolha de abordagens para a remoção ou armazenamento do combustível poderá restringir certas escolhas de estratégias de desmantelamento. No Brasil, conforme norma CNEN NN 9.01, a retirada definitiva do combustível irradiado do vaso de pressão é

pré-requisito para a autorização do órgão regulador para o início das atividades de descomissionamento [24]. No entanto, não especifica a obrigatoriedade de retirada dos combustíveis irradiados da piscina do reator. Nesse ponto, os padrões de segurança da AIEA [16] recomendam iniciar o descomissionamento somente após a remoção da instalação dos RR de operação e do combustível irradiado, e esses transportados para uma instalação autorizada.

Como mencionado no Capítulo 4, o combustível irradiado contém os materiais residuais da fissão, produtos gerados durante a fissão e transurânicos. A atividade do combustível irradiado é extremamente elevada, contendo radionuclídeos de meia-vida longa. O combustível irradiado representa um alto risco de vazamento para o meio ambiente, podendo causar contaminação do ar, água e solo.

No Brasil, conforme a política nuclear, o combustível irradiado deve ser tratado como resíduo, em virtude da eficiência energética ainda presente. Em 2013, o Tribunal de Contas da União (TCU) reuniu informações destinadas a identificar possíveis riscos e subsidiar futuras ações de controle para a gestão de RR no Brasil e constatou a inexistência de lei ou norma regulatória que estabeleça os procedimentos para a gestão do combustível irradiado e não há posicionamento do país sobre qual será a solução a ser adotada [77]. Sendo assim, a decisão da estratégia sobre o combustível irradiado será tomada pela organização operadora em conjunto com o órgão regulador de modo provisório até que seja tomada uma decisão pelo país.

Durante a operação, os combustíveis irradiados são armazenados, na maioria dos casos, em piscinas dentro da própria instalação. O processo de remoção do combustível do núcleo do reator é uma atividade rotineira de operação e deve ser realizada totalmente após o desligamento. Portanto, é importante avaliar o impacto de um descarregamento completo do núcleo na capacidade do sistema de armazenamento do combustível irradiado na piscina.

Assim, sugere-se, já no PPD, adotar uma das abordagens abaixo, de modo que seja possível o planejamento das atividades de descomissionamento:

- a) manter os combustíveis irradiados armazenados na própria piscina da instalação;
- b) transportar os combustíveis irradiados para uma ilha de piscina fora da instalação, conhecido internacionalmente como *Spent Fuel Pool* (SFP);
- c) transportar os combustíveis irradiados para depósitos finais -armazenamento úmido ou seco; e
- d) enviar os combustíveis irradiados para reprocessamento ou reciclagem.

A primeira opção leva em consideração a minimização de custos e riscos associados com as atividades de movimentação e transporte dos combustíveis irradiados. Por outro lado, aumenta os riscos e custos durante a execução de atividades de desmantelamento nos componentes do reator. Essa opção não retira de controle os compromissos de salvaguardas assinados [27]. Ela é recomendada aos países que não estabeleceram uma política de gestão para o combustível irradiado e não possui instalação que possam receber esses combustíveis. A estratégia a ser adotada, provavelmente, será a de desmantelamento protelado.

Uma forma de evitar o prolongamento do desmantelamento e adotar a estratégia de desmantelamento imediato seria a adoção da segunda opção, na qual a própria organização operadora planejaria a construção de uma nova instalação para armazenamento do combustível irradiado numa piscina independente, fora da instalação, até aguardar a decisão do país de estabelecer a destinação final para estes “resíduos”.

Os benefícios dessa abordagem são [15]: facilita o desmantelamento de estruturas, sistemas e componentes; reduz a exposição ocupacional; minimiza custos de operação de descomissionamento; e reduz atividades de proteção física na instalação. Por outro lado, os pontos negativos são: aumento de custo de projeto, construção e licenciamento de uma nova instalação; monitoramento contínuo e segurança física; manutenções; novas salvaguardas; entre outros. Para atender a essa abordagem, a instalação deverá recolher os recursos financeiros necessários durante a fase de operação e constituir um fundo específico, geralmente separado do fundo de descomissionamento [28], para gerenciar a nova instalação.

Existem casos em que a usina nuclear pode solicitar a extensão de vida e a piscina de armazenamento de combustíveis irradiados da instalação, que foi projetada para receber uma certa quantidade de EC, pode não ter a capacidade suficiente de armazenamento durante o período de vida estendido. Assim, ainda durante a fase de operação, a organização operadora possa já ter construído uma nova piscina de armazenamento, usando os recursos de operação.

Nesses casos, é possível que essa nova piscina seja construída visando o uso também para o descomissionamento. Um exemplo é o reator de pesquisa egípcio ET-RR-1, que foi obrigado a construir uma nova instalação para receber os combustíveis irradiados durante a fase de operação. O local escolhido levantou alguns aspectos relevantes, como distâncias mínimas de transporte, questões de salvaguardas e infraestrutura [82].

A terceira e quarta opções ainda não são aplicáveis no Brasil, uma vez que não existe depósito final de armazenamento úmido ou seco para combustível irradiado, bem como não há planos de projetos de desenvolvimento de planta de reprocessamento. Entretanto, as duas primeiras abordagens são temporárias até que se defina a destinação final. Sendo assim, atualmente, as estratégias possíveis para remoção ou armazenamento dos combustíveis irradiados da instalação são as duas primeiras para, futuramente, ser enviado para a terceira ou quarta opção.

7.1.2.3 Drenagem do refrigerante no circuito primário e da piscina de combustíveis irradiados

A principal fonte de rejeitos radioativos na forma líquida é a água do refrigerante que circula nos componentes do circuito primário e na piscina de armazenamento de combustível irradiado. Durante o período de transição, é necessário drenar e tratar essa água para remover os radionuclídeos e outros contaminantes antes de descartá-la. Além disso, outros líquidos utilizados na operação da usina, como os fluidos de limpeza, também podem conter materiais radioativos e devem ser tratados adequadamente antes do descarte.

Conforme abordado no Capítulo 5, é importante destacar que os produtos de fissão e de ativação estarão presentes no refrigerante, e a drenagem pode resultar em condições adversas à segurança. O principal radionuclídeo encontrado na água do refrigerante do reator é o trítio (^3H), com uma meia-vida de 12,3 anos, enquanto na piscina de combustível irradiado são encontrados produtos de fissão como o ^{137}Cs e transurânicos, como por exemplo, o ^{239}Pu .

O planejamento para a drenagem de cada componente deve começar quando os sistemas interligados não são mais necessários para a segurança da planta. Nesse sentido, é fundamental a aplicação de técnicas para a purificação da água durante a drenagem e o armazenamento adequado dos RR gerados durante o processo.

A própria usina já possui um sistema de purificação para a água do refrigerante, que utiliza filtros e trocadores de íons para manter o controle dos níveis ideais de operação. Entretanto, o manuseio da água do refrigerante no descomissionamento deve levar em consideração a capacidade de estocar essa água em tanques, pois o próprio trítio é um componente que está presente na molécula da água ($^3\text{H}_2\text{O}$).

A água da piscina geralmente possui os produtos de fissão, que podem ser removidos por processos de filtração e separação iônica. Novas técnicas de descontaminação vem surgindo com a evolução da tecnologia. Como por exemplo o projeto de pesquisa

coordenado pela AIEA e a Federação Russa denominado de “*Decontamination and Waste Management in the Course of Research Reactors Decommissioning (DEWAN)*” [82], que relatou a experiência de tecnologias de descontaminação para a purificação de água contaminada com o ^{137}Cs , o ^{90}Sr e o plutônio.

Nesse projeto, foi citado o uso de técnicas de células eletroquímicas com membranas divisoras eletro condutoras; uma cascada de filtros de absorção baseados no trocador catiônico KU-2-8; e o solvente “*ferrocyanide NZA*”, segundo o documento [82], testes foram realizados de forma confiável e comprovando a eficiência da tecnologia desenvolvida, reduzindo a quantidade de radionuclídeos presentes na água.

7.1.2.4 Remoção de RR de operação

Os RR durante a operação de uma usina podem ser encontrados em ambientes internos da instalação. Esses rejeitos, na maioria das vezes, são gerados em função de processos operacionais, manutenção, testes, processos laboratoriais ou outros. Assim, deve-se realizar um esforço para localizar esses rejeitos espalhados pela usina, removê-los da planta, tratar, acondicionar em embalagens e, para depois, armazenar ou descartar. O objetivo dessa atividade é criar um ambiente seguro durante as atividades de desmantelamento. A quantidade de trabalho a ser realizado dependerá de vários fatores, como o inventário associado ao processo, seja radiológico ou não.

As abordagens que podem ser adotadas para acelerar o tratamento e acondicionamento de RR durante a operação são:

- a) criar um setor responsável pelo monitoramento, inspeção, controle de rejeitos radioativos na instalação;
- b) informar, através de política de gestão de RR os cuidados necessários no manuseio e descarte;
- c) desenvolver processos e tecnologias para acondicionamento e segregação de rejeitos.

7.1.2.5 Descontaminação preliminar e limpeza inicial

As técnicas de descontaminação preliminar durante a fase de transição diferem das técnicas de descontaminação nos componentes e edifícios durante a fase de descomissionamento. Na primeira abordagem, o foco é reduzir a radioatividade do ambiente para minimizar a exposição à dose durante a execução do descomissionamento, enquanto na segunda, o objetivo é minimizar a radioatividade presente nos componentes, a fim de reduzir o volume de rejeitos gerados ou tornar sua reciclagem viável.

Durante a fase de transição da instalação, é essencial descontaminar pisos, paredes e outras superfícies estruturais para remover a contaminação. Isso pode ser feito por meio do uso de produtos químicos ou processos que removam a contaminação superficial dessas estruturas [83].

7.1.3 Técnicas de descontaminação e desmantelamento (DD)

Durante as atividades de descomissionamento, é necessário planejar detalhadamente as técnicas a serem adotadas para descontaminar e desmantelar os componentes e estruturas do edifício. A seleção da abordagem correta nesta etapa é essencial, pois ela afetará a quantidade de rejeitos radioativos gerados, o custo das operações e a segurança envolvida. Portanto, é importante escolher uma abordagem que esteja em conformidade com os requisitos básicos estabelecidos pelo órgão regulador [83].

Nesse sentido, serão apresentadas as técnicas de DD nos componentes e nas estruturas de concreto, como por exemplo, a blindagem biológica e o prédio do reator.

7.1.3.1 Técnicas de descontaminação nos componentes

A descontaminação é definida como “a remoção da contaminação das superfícies de instalações e equipamentos por lavagem, aquecimento, ação química ou eletroquímica, limpeza mecânica ou outras técnicas” [83]. Os objetivos da descontaminação, conforme a publicação da AIEA, são [83]: remover os contaminantes radioativos; reduzir a dose durante o período de armazenamento seguro; reduzir a exposição à radiação e os volumes dos componentes e materiais que requerem armazenamento e descarte; e restaurar o local e a instalação para um estado de uso irrestrito ou restrito.

As técnicas de descontaminação dos componentes podem ser divididas entre mecânicas, químicas, eletroquímicas e fusão. Elas podem ser aplicadas antes ou depois do desmantelamento do componente e devem ser selecionadas com cuidado. O conceito de cada uma das técnicas é descrito abaixo [83]:

- a) a descontaminação mecânica são ações físicas para a remoção da contaminação na superfície do componente, inclui atividades, como por exemplo: lavagem e esfregação, uso de revestimento látex, jateamento abrasivo úmido ou seco, fragmentação, entre outros processos manuais;
- b) a descontaminação química compreende o uso de soluções concentradas ou diluídas de reagentes em contato com o componente de modo a remover a camada contaminada. Os níveis de descontaminação podem ser reduzidos à medida que se repete o processo;

- c) a descontaminação eletroquímica é um processo que remove a camada superficial e produz uma superfície lisa e polida em metais e ligas, ela tem sido aplicada por imersão da superfície em um “banho de eletrólito”, ou usando uma espuma movendo-se sobre a superfície a ser descontaminada; e
- d) a descontaminação por fusão é um processo que consegue redistribuir os radionuclídeos em lingotes, utilizando técnicas para “filtrar” os componentes resultantes do processo de fusão.

Outros métodos para descontaminação também são usados, como por exemplo o desenvolvimento de películas removíveis contendo ácidos orgânicos, como os usados no descomissionamento do reator de pesquisa da Bielorrússia, que consegue remover parte da contaminação da superfície de componentes e estruturas [82].

7.1.3.2 Técnicas de desmantelamento dos componentes

O desmantelamento dos componentes do reator é uma das etapas mais importantes do projeto de descomissionamento. A própria AIEA utiliza a terminologia "desmantelamento" para definir as opções de estratégia possíveis. Essa etapa é essencial para remover os componentes contaminados da instalação, a fim de tratá-los e/ou armazená-los adequadamente até que sejam transportados para seu destino.

Existem técnicas de desmantelamento que podem ser simples ou complexas. Por um lado, as soluções simples incluem aquelas em que os componentes podem ser desmontados e cortados pelo próprio operador, quando não há muita contaminação envolvida. Por outro lado, as soluções complexas exigem grandes processos de desmonte ou corte, ou até mesmo equipamentos remotos, quando os componentes estão altamente contaminados e o acesso do operador não é viável.

Existem várias ferramentas disponíveis para o desmantelamento, incluindo ferramentas mecânicas, térmicas (como as eletrotérmicas) e outras ferramentas de corte, conforme mostrado na Figura 31. Essas ferramentas devem ter um desempenho adequado para a tarefa em questão, ser resistentes à radiação e fáceis de descontaminar. Além disso, devem ser compatíveis com o ambiente de trabalho e não devem gerar perigos adicionais além daqueles que podem ser gerenciados. Alguns exemplos de ferramentas incluem [83]:

- a) ferramentas mecânicas – serras circulares, tesouras, fitas, fresas, discos, discos abrasivos, brocas, serras diamantadas, cabos, “*nibblers*”, jatos de água de alta pressão;

- b) ferramentas térmicas e eletrotérmicas – maçaricos de arco de oxigênio, plasma, lanças térmicas, eletrodos de corte, serras de arco; e
- c) outras ferramentas de corte – corte de gás liquefeito, lasers, etc.

Figura 31- Técnicas de desmantelamento



Fonte: [83].

7.1.3.3 Técnicas de descontaminação e desmantelamento de estruturas de edifícios

A técnica de descontaminação de estruturas de edifícios está estreitamente ligada ao estado final desejado. Se o objetivo for reutilizar o local para usos restritos ou minimizar a quantidade de RR, as técnicas de descontaminação mecânica de remoção de superfícies devem ser adotadas. Por outro lado, se o estado final desejado for para usos irrestritos, as técnicas convencionais de demolição das estruturas podem ser realizadas. No entanto, se o edifício for demolido, todos os detritos serão considerados como RR e, portanto, deverão ser tratados e armazenados adequadamente. É importante levar em consideração a quantidade de RR gerados durante o processo de descontaminação [83].

Os processos de descontaminação nas estruturas dos prédios variam de processos manuais muito simples a agressivos, que são [83]:

- a) processos simples - escovar, lavar, esfregar e limpar a vácuo, são usados para limpar superfícies pintadas ou lisas cobertas por contaminação; e

- b) processos agressivos - como esmerilhamento, lascamento, perfuração, jateamento de alta pressão, uso de espumas, revestimentos removíveis, frequência de micro-ondas, aquecimento por indução, que são usados para descontaminar concretos onde a contaminação penetrou profundamente.

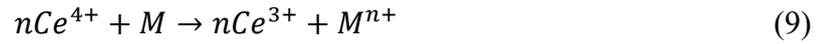
O desmantelamento de edifícios geralmente envolve a demolição total, que é realizada de forma semelhante às práticas da construção civil. É importante levar em consideração a retirada do solo, geralmente por alguns metros abaixo do local da usina, para garantir que não haja contaminação [83].

Após a demolição, podem ser realizadas atividades de tratamento e separação, como a separação de partes metálicas e o reaproveitamento de partes não contaminadas. No entanto, essas atividades exigirão muito tratamento dos rejeitos contaminados para garantir que sejam armazenados e tratados adequadamente [83].

7.1.3.4 Estudo de caso – Descontaminação dos componentes do reator BR-3

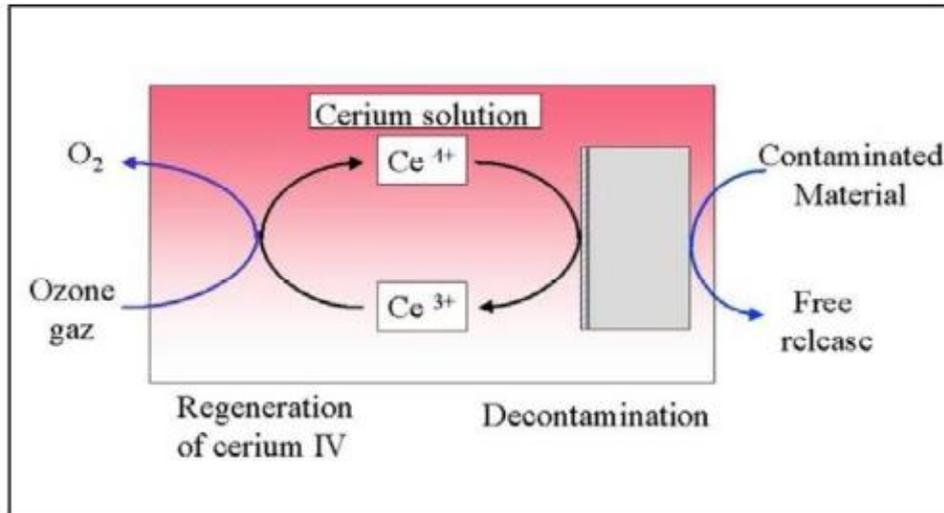
O reator de pequeno porte BR-3 obteve um desempenho de 80 a 90% de redução da contaminação nos metais do circuito primário utilizando as seguintes técnicas de descontaminação [81]:

- a) a lavagem manual ou limpeza em banho ultrassônico - usado para peças pouco contaminadas por deposição em superfície externa, como por exemplo: tubulação de água desmineralizada, peças estruturais, caixa de instrumentação e outros;
- b) jateamento abrasivo húmido - usado para peças enferrujadas ou de geometria simples, como estruturas e vigas. Projetou-se uma planta chamada “ZOE” para tratamento de peças de até 3ton e 3m de comprimento; e
- c) descontaminação química forte através de um processo denominado de “*Metal Decontamination by Oxidation with Cerium (MEDOC®)*”, baseado no uso do Cério IV como oxidante forte em ácido sulfúrico com regeneração contínua usando ozônio, conforme mostrado na equação 9 e representado na Figura 32, - usado para peças de aço inoxidável fortemente contaminada, principalmente de ^{60}Co , até 20.000Bq/cm^2 . Esse processo foi usado nos componentes do circuito primário, tanques etc. A instalação *MEDOC®* tem capacidade de cerca de 0,5 e 1ton de metal por lote que pode ser tratado em 1 dia.



Onde n é a valência do material considerado

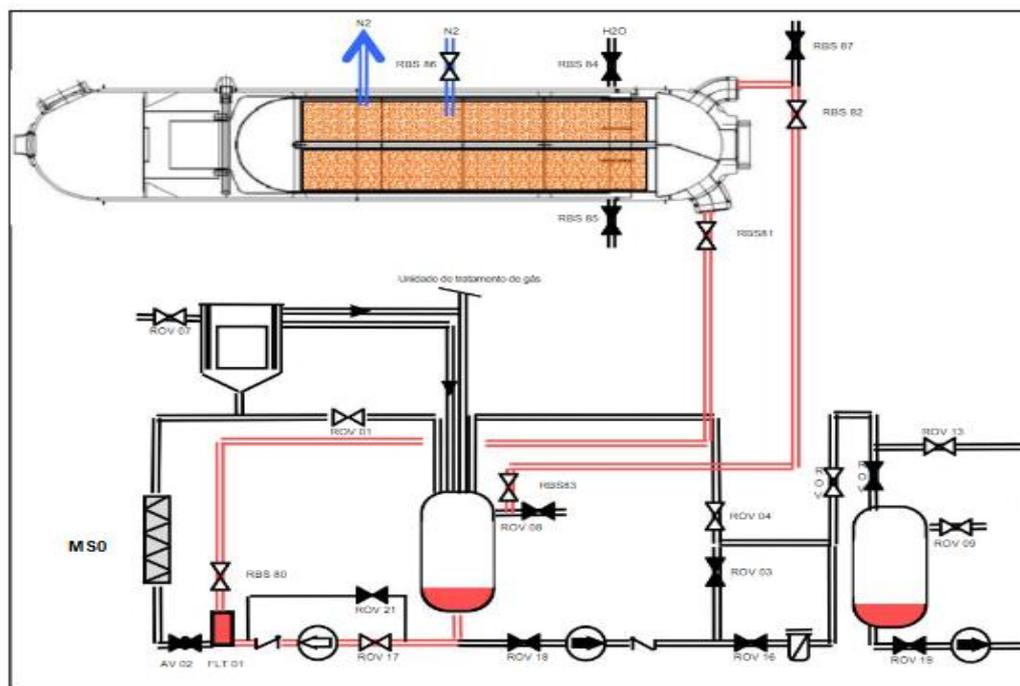
Figura 32- Processo MEDOC®



Fonte: [41].

O processo *MEDOC*® é capaz de remover cerca de 10µm de camada, suficiente para atingir o nível de liberação mesmo com amostras altamente contaminadas, como por exemplo, amostras com “*crud*” altamente contaminada por ¹³⁷Cs e partículas de emissão α [41]. Esse mesmo processo foi usado tanto para descontaminar peças desmontadas como também descontaminar peças inteiras de grandes componentes, como o gerador de vapor e o pressurizador, utilizando um circuito fechado ligando esses componentes a uma instalação *MEDOC*®, um exemplo de gerador de vapor conectado à rede *MEDOC*® é mostrado na Figura 33 [41, 81].

Figura 33- Gerador de vapor BR-3 conectado a planta MEDOC



Fonte: [41].

Conforme relatado, a carga de trabalho para descontaminar o GV e o pressurizador foi de cerca de 1.700 homens-hora (HH). A preparação do trabalho levou 6 meses e a operação em si, levou 4 semanas. Este trabalho gerou a produção de rejeitos secundários de 3,4m³ de solução de descontaminação contendo cerca de 2,06GBq de ⁶⁰Co [41]. Os 10 e 20% de contaminação restantes nos metais e que não foi possível eliminar pelos processos citados acima, foram enviados para uma instalação de fusão para posterior descontaminação e limpeza ou reciclagem [81].

7.2 Atividades técnicas de gestão de rejeitos radioativos (RR)

É indiscutível que o descomissionamento de reatores nucleares resulta na geração de grandes quantidades de RR, para os quais ainda não há tecnologia que permita sua solução definitiva. A maior parte desses rejeitos representa riscos à saúde humana e ao meio ambiente por períodos muito superiores ao tempo de existência das instituições humanas. Portanto, a gestão de RR busca minimizar sua geração, manter controle em todas as etapas até a disposição final, além de reduzir as doses de radiação e os custos envolvidos na gestão desses materiais [79]. Dessa forma, o desenvolvimento e a implementação de abordagens adequadas para o processamento e a disposição dos rejeitos gerados no descomissionamento de reatores nucleares se tornaram questões extremamente importantes.

A AIEA conduziu um projeto de pesquisa com o título “*Disposal Aspects of Low and Intermediate Level Decommissioning Waste*” – IAEA-TECDOC-1572 [84] com o objetivo de delinear abordagens apropriadas para o descarte de rejeitos radioativos derivados do descomissionamento. O resultado dessa experiência foi importante para desenvolver algumas abordagens de gestão de RR para este trabalho.

A produção de RR associados ao descomissionamento depende de fatores que devem ser monitorados desde a seleção dos materiais de construção até o tamanho e projeto da instalação. Durante a operação, o histórico operacional, bem como o registro de eventos, como acidentes envolvendo o combustível nuclear e outras atividades, também afetam a produção de radionuclídeos nos componentes do reator, influenciando a quantidade de rejeitos gerados [84].

Durante o período de transição, o combustível irradiado é removido e o sistema é drenado, retirando todos os líquidos e outros rejeitos radioativos da instalação. Após essa fase, iniciam-se as atividades de descomissionamento. É importante ressaltar que a gestão do combustível irradiado não será abordada com detalhes neste trabalho.

Os RR associados ao descomissionamento devem ser manuseados, tratados, acondicionados, transportados, armazenados e, finalmente, descartados quando alcançam os limites de disposição. Os métodos aplicados ao descomissionamento são, em sua maioria, semelhantes aos utilizados durante a operação, mas com diferenças em relação à quantidade, tamanho e composição química dos rejeitos. É necessário o uso de técnicas específicas para manuseio, processamento e descarte desses rejeitos [84].

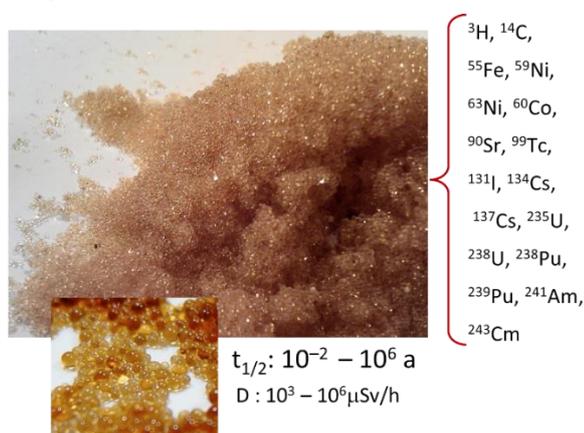
As origens de rejeitos radioativos no descomissionamento podem ser separados em 3 tipos, que são: rejeitos primários; secundários; e ferramentas e equipamentos contaminados [84]:

- a) os rejeitos primários são aqueles gerados durante a atividade de desmantelamento, como partes dos componentes contaminados, estruturas da parede como o concreto, aços, ligas metálicas. Eles variam de tipo, tamanho e volume e consistem em componentes ativados e contaminados;
- b) Os rejeitos secundários são aqueles gerados durante atividades de descontaminação e desmantelamento. Por exemplo, líquidos, produtos químicos, filtros etc. Na Figura 34, são mostrados rejeitos em resina de troca iônica contendo radionuclídeos do reator, na Figura 35, é mostrada o rejeito de filtro de cartucho de um reator nuclear e a Figura 36 são mostrados os rejeitos de concentrado de evaporador de um reator nuclear. Os

- radionuclídeos presentes correspondem aos dos componentes que foram usados para descontaminar e/ou dismantelar; e
- c) As ferramentas e equipamentos contaminados são aqueles materiais usados para a descontaminação e/ou dismantelamento e foram contaminados durante o uso, porém, esses equipamentos podem ser descontaminados e reutilizados para as atividades para qual foram destinadas. Assim como os rejeitos secundários, o radionuclídeo presente será aquele do componente que está sendo descontaminado e/ou dismantelado. No caso de não descontaminação da ferramenta, é possível que ela se torne um rejeito secundário.

Figura 34- Rejeito de um reator nuclear – resina de troca iônica

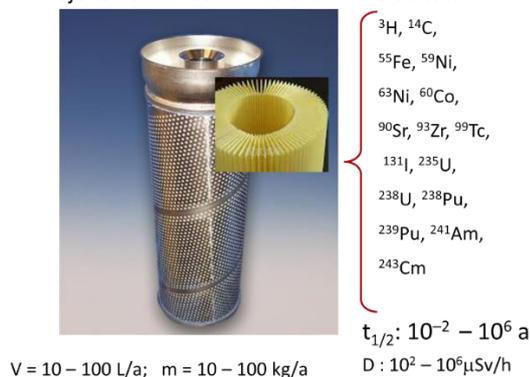
Rejeito de um reator nuclear – resina de troca iônica



Fonte: [79].

Figura 35- Rejeito de um reator nuclear – filtro cartucho

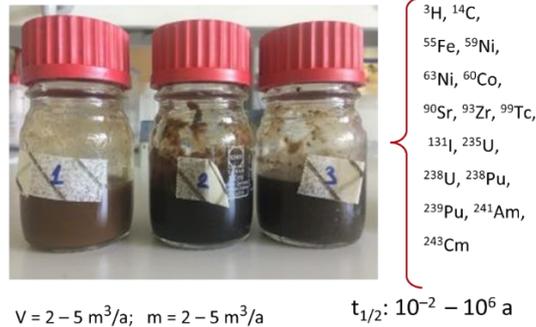
Rejeito de um reator nuclear – filtro cartucho



Fonte: [79].

Figura 36- Rejeito de um reator nuclear – concentrado de evaporador

Rejeito de um reator nuclear – concentrado de evaporador



Fonte: [79].

Conforme apresentado no Capítulo 6, no Brasil, existem Normas que estabelecem os procedimentos para a gestão de RR de Classe 1 e 2, assim como para o licenciamento de depósitos iniciais, intermediários e finais. Essas normas determinam que toda instalação nuclear deve possuir um plano de gestão de RR, que os rejeitos devem ser segregados em embalagens adequadas que atendam aos requisitos básicos de segurança e que a minimização do volume de rejeitos gerados deve ser considerada. Além disso, essas normas estabelecem critérios básicos de segurança e proteção radiológica para o licenciamento de depósitos iniciais, intermediários e finais de rejeitos radioativos.

7.2.1 Classificação de rejeitos radioativos

A classificação dos rejeitos radioativos gerados é de extrema importância durante o descomissionamento dos reatores. A existência de diretrizes para segregação, tratamento, acondicionamento, armazenamento e descarte podem ter um impacto significativo no planejamento de atividades de descomissionamento, particularmente nas seleções de atividades de DD e conseqüentemente, na estimativa de custos [84].

De forma a desenvolver as abordagens, serão apresentados dois tipos de classificações existentes. A da AIEA e a da CNEN, pois ambas divergem em alguns aspectos de classificação dos rejeitos. A primeira consta nos Padrões de Segurança da AIEA *GSG-1-Classification of Radioactive Waste* [85], que agrupa os RR a partir do nível de atividade em seis grupos, um deles é relativos a meia vida. Enquanto a Norma da CNEN [55] agrupa em quatro classes e quatro subclasses da classe 2. Além disso, há divergências nos tempos de meia vida e descrições conforme é mostrado no APÊNDICE D.

As principais divergências entre os documentos está na classe de rejeitos de meia vida muito curta. Enquanto na norma da CNEN, existem duas classes para definir esses tipos de rejeitos. Separados nas classes 1 e 2.1, onde na primeira classifica os rejeitos que possui meia vida inferior da ordem de 100 dias e na segunda classifica os rejeitos de baixo e médio níveis com meia vida da ordem de 30 anos e com concentração de radionuclídeos limitadas a 3.700kBq/kg [55]. No documento da AIEA, existe apenas uma classificação “*Very short lived waste (VSLW)*” que classifica os rejeitos de meia vida curta limitados de até “alguns” anos [85].

O documento da AIEA [85] também classifica os rejeitos em níveis muito baixo (Very low level waste - VLLW), baixo (Low level waste - LLW) e médio (Intermediate level waste -ILW), enquanto na Norma da CNEN existe apenas uma classificação que possivelmente agrupa esses tipos de rejeitos na classe 2.1. Em relação aos rejeitos de nível alto, tanto a norma da CNEN quanto a da AIEA possuem a classificação High level waste (HLW), que podem possivelmente agrupar os mesmos tipos de rejeitos.

Com base nos resultados do estudo de caso em relação à norma da CNEN apresentado na Tabela 19, podemos avaliar a classificação dos rejeitos gerados. Se considerarmos que os rejeitos terão menos de 1.000 kg, a maioria deles será armazenada em um único tipo de recipiente, de acordo com a classificação da CNEN [55]. No entanto, se adotarmos a classificação da AIEA [85], seria necessário utilizar quatro recipientes diferentes. Na Tabela 24, são apresentadas as possíveis classificações dos radionuclídeos de acordo com as normas da CNEN e AIEA. É fundamental destacar que no Brasil, a classificação dos rejeitos radioativos é regulamentada pela CNEN, conforme o disposto no Art. 10 da Norma CNEN NN 8.01. De acordo com essa norma, após a “segregação e acondicionamento em embalagens adequadas, os rejeitos devem ser identificados de acordo com a ficha apresentada no Anexo IV da norma e classificados de acordo com as Classes pré-estabelecidas pela CNEN”.

Portanto, é importante ressaltar que a classificação dos rejeitos no Brasil é determinada pelo órgão regulador, não sendo permitido às instalações utilizar outra classificação. Sendo assim, as organizações operadoras devem seguir as diretrizes estabelecidas pela CNEN para a classificação dos rejeitos ou consultá-la para verificar a possibilidade de utilizar outra classificação.

Tabela 24- Classificações de Rejeitos em relação ao estudo de caso

Radionuclídeo	Tempo (em anos) para alcançar o Limite de / Classificação		
	Concentração de Atividade para Dispensa de Materiais (Quantidade ≤ 1000 kg) (kBq/kg)	Norma CNEN	AIEA
54Mn	6	2.1	VSLW
55Fe	14	2.1	VSLW
60Co	66	2.1	LLW
65Zn	5	2.1	VSLW
133Ba	7	2.1	VLLW
134Cs	14	2.1	VLLW
152Eu	151	2.1	LLW
154Eu	76	2.1	VLLW
155Eu	2	2.1	VSLW
178mHf	33	2.1	VLLW

Fonte: Autor.

Durante o processo de descomissionamento, são gerados RR que se enquadram em praticamente todas as classificações existentes. A maioria desses rejeitos possui uma vida curta e pode ser descartada em instalações próximas à superfície. Entretanto, uma pequena quantidade de rejeitos com vida longa precisa ser armazenada em instalações de nível geológico.

7.2.2 Características dos rejeitos de descomissionamento

Como foi visto no Capítulo 5, os rejeitos radioativos resultantes do processo de descomissionamento provêm de materiais que entraram em contato com produtos de fissão e da corrosão de materiais ativados que estavam em superfícies de componentes, ou de materiais que foram ativados por meio da interação com fluxos de nêutrons, os quais alteraram sua microestrutura. Dessa forma, é possível categorizar esses rejeitos em duas classes: rejeitos contaminados e rejeitos ativados.

Esses materiais radioativos possuem várias características próprias que devem ser levados em consideração no momento do processamento de modo a cumprir os requisitos de armazenamento e descarte da norma CNEN NN 8.01. As principais características a serem analisadas são: meia-vida dos radionuclídeos, estado físico e características perigosas [84].

- a) a meia vida do radionuclídeo é relevante para classificar o rejeito e atribuir uma opção de eliminação. Além disso, é possível definir as embalagens (emissor α , β , γ) e níveis aceitáveis de concentração antes de descartar;
- b) o estado físico do rejeito pode ser sólido, líquido ou gasoso. A maior parte dos rejeitos estão na forma sólida. Os rejeitos na forma líquida e gasosa podem ser tratados e processados usando metodologias convencionais, como por exemplo, utilização de filtros; e
- c) características perigosas devem ser mapeadas, pois os riscos físicos, químicos, orgânicos, associados ao descarte precisam ser considerados de forma a reduzir o risco de inflamabilidade, explosões ou outros.

Se por um lado, os rejeitos contaminados é possível a descontaminação, usando as técnicas mostradas na seção 7.1.3.1 “Técnicas de descontaminação nos componentes”, por outro, os materiais ativados não é possível a descontaminação, sendo assim, estes últimos, deverão ser minimizados (cortados) e encaminhados, direto, para o processo de segregação.

7.2.3 Segregação, tratamento e acondicionamento de rejeitos radioativos

Após a etapa de DD, caso o material continue radioativo, o mesmo deve ser segregado, tratados e acondicionados em embalagens para o armazenamento e posterior descarte. A segregação visa separar os rejeitos baseado em nível de atividade e meias-vidas dos radionuclídeos presentes nesses rejeitos para posterior tratamento.

O tratamento visa a reduzir o volume e a massa do rejeito, concentrar os radionuclídeos, mudar o estado físico, condicionar quimicamente, estabilizar, remover outros perigos, imobilizar ou encapsular [79].

O objetivo do acondicionamento dos RR é limitar o potencial de mobilização dos radionuclídeos presentes nesses materiais, como por exemplo, através de gases ou vazamentos de líquidos, além de reduzir os espaços vazios internos das embalagens, a fim de melhorar a integridade e a estabilidade dos rejeitos [84]. Para tanto, é possível reduzir e compactar o rejeito de forma a minimizar o volume e aproveitar melhor o espaço disponível.

Existem diversos tipos de embalagens que podem variar em termos de dimensões, volumes, formas e materiais. O arranjo dessas embalagens e suas propriedades dependem em grande parte das formas dos rejeitos, dos equipamentos de manuseio e transporte e das condições e requisitos específicos do local de armazenamento.

No Brasil, a Norma CNEN NN 8.01 estabelece os critérios de embalagens e volumes a serem utilizados para o armazenamento dos rejeitos radioativos. É importante destacar que

as embalagens utilizadas para o transporte dos rejeitos também devem obedecer à norma CNEN NE 5.01 de Transporte de Materiais Radioativos [74]. Na Figura 37 é mostrado um exemplo de RR acondicionados em um tambor de 200 litros e na Figura 38, é mostrado o encapsulamento com cimento para imobilizar os RR sólidos e líquidos.

As características desejáveis para as embalagens são [84]:

- a) limite de peso bruto;
- b) resistência à compressão para permitir o empilhamento das embalagens;
- c) ausência de líquidos livres para evitar contaminação e liberação da atividade;
- d) compatibilidade físico-químico entre os materiais das embalagens e do rejeito;
- e) capacidade da embalagem resistir a condições de acidentes, como terremoto, incêndio ou eventos de queda ou impacto; e
- f) resistir à degradação durante o tempo de armazenamento para o decaimento dos radionuclídeos.

Figura 37 - Tambor de 200L armazenando rejeitos radioativos



Fonte: [79].

Figura 38- Encapsulamento com cimento para imobilizar rejeitos líquidos e sólidos



Fonte: [79].

7.2.4 Transporte

O transporte de material radioativo é, conforme norma CNEN NN 5.01, todas as operações e condições que envolvam ou que sejam associadas à movimentação de materiais

radioativos externamente à área de propriedade de uma instalação. Dessa forma, os rejeitos radioativos acondicionados nas embalagens podem ser transferidos para depósitos intermediários ou repositórios seguindo os requisitos disposto nessa Norma. Na Figura 39, é mostrado os rejeitos radioativos sendo transportados por meio de transporte rodoviário.

Figura 39- Rejeitos sendo transportados



Fonte: [2].

As embalagens a serem transportadas devem ser projetadas, também, para minimizar os riscos associados ao transporte. A publicação da AIEA, *Safety Guide No TSG1.3 -Radiation Protection Programmes for the Transport of Radioactive Material* [86] traz orientações importantes sobre os requisitos básicos para proteção radiológica, contemplando a proteção do trabalhador, do público e do meio ambiente. Outros riscos de acidentes, também, devem ser analisados. Além das preocupações com a área de segurança relacionadas com a proteção radiológica (*Safety*) existem, também, preocupações com a segurança física (*Security*), nesses casos, um plano de logística deve ser efetuado e os custos devem ser contabilizados no momento de elaborar uma estratégia.

7.2.5 Depósitos de rejeitos radioativos

A Convenção Conjunta sobre a segurança da gestão do combustível usado e RR é um acordo internacional que estabelece padrões para a gestão segura desses materiais. Promulgado no Brasil por meio do Decreto nº 5.935/2006, o acordo exige que o país forneça garantia de que "a sociedade e o meio ambiente estarão protegidos dos efeitos nocivos da radiação ionizante, agora e no futuro". Para garantir essa proteção a longo prazo, é necessário armazenar esses rejeitos em um repositório final até a sua disposição.

Os depósitos de rejeitos radioativos podem variar de alguns metros cúbicos para centenas de milhares, ele deve ser projetado para atender certas necessidades de armazenamento, como a quantidade de rejeitos, a forma física e química e as diferentes categoria e concentração dos radionuclídeos. Além de disso, deve ser operado dentro de um prazo aceitável, sob restrições técnicas, de segurança, e financeiras realistas [87]. No Brasil, conforme a Lei nº10.308/2001 e a norma da CNEN NN 8.02, os depósitos de rejeitos são divididos em quatro tipos: depósito inicial, intermediário, provisório e final, as definições são [65, 67]:

- a) depósito inicial é aquele “destinado ao armazenamento de rejeitos radioativos cuja responsabilidade para administração e operação é do titular, pessoa jurídica responsável legal pela instalação geradora dos rejeitos”;
- b) depósito intermediário é aquele “destinado a receber e, eventualmente, acondicionar rejeitos radioativos, objetivando a sua remoção para depósito final, em observância aos critérios de aceitação estabelecidos na Norma CNEN NN 6.09 Critérios de Aceitação para Deposição de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação [76]”;
- c) depósito final, também chamado de repositório, é aquele “destinado à deposição final de rejeitos radioativos”; e
- d) depósito provisório, é aquele “destinado a receber rejeitos radioativos provenientes de acidentes nucleares ou radiológicos”.

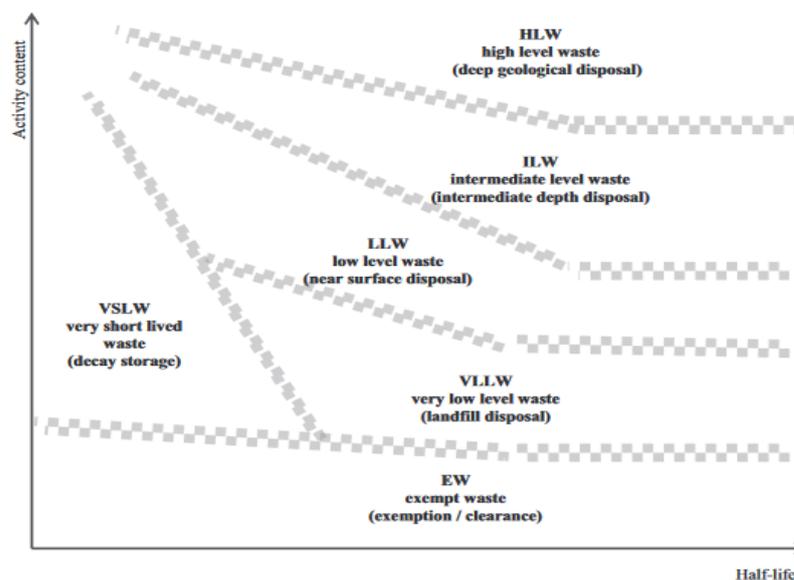
Se por um lado, os depósitos iniciais no Brasil são de responsabilidade da organização operadora para atender a demanda da instalação durante a operação. Por outro lado, a construção, a administração e a operação de depósitos intermediários e finais são de responsabilidade da CNEN, podendo terceirizar os serviços e mantendo a responsabilidade. A autorização e fiscalização de todos os depósitos caberá ao órgão regulador [65].

Os depósitos de rejeitos radioativos que se localizam em edificações distintas da instalação radiativa, na qual os rejeitos foram gerados, são consideradas novas instalações nucleares e, portanto, devem atender a norma CNEN NN 1.04 Licenciamento de Instalações Nucleares ou a norma CNEN NN 8.02 – para o licenciamento de Depósitos de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação. Assim, o depósito de rejeito terá um ciclo de vida próprio, devendo ser licenciado, construído, operado e ao final de sua vida, descomissionado.

Os requisitos de projetos de depósitos variam de acordo com a classe de rejeitos que irá armazenar. Pelo sistema de classificação da AIEA [85], é possível indicar os

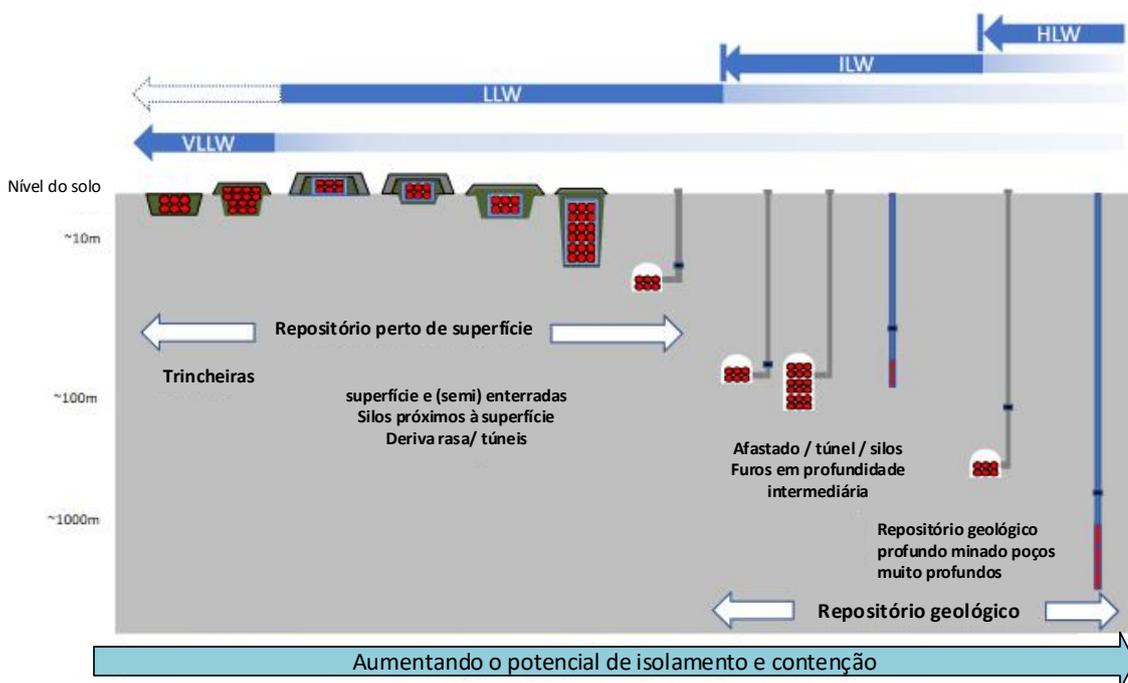
requisitos especiais de depósito ao nível de risco radiológico mínimo. Na Figura 40, é representado um gráfico esquemático em relação a meia vida e a atividade e o requisito mínimo de isolamento e contenção e na Figura 41, é mostrado o nível de isolamento em relação ao solo.

Figura 40- Ilustração de classificação e os tipos de armazenamentos



Fonte: [85].

Figura 41- Ilustração esquemática do nível de opções de armazenamento de rejeitos em relação ao solo



Fonte: [87]-traduzido pelo autor.

Considerando as especificidades do modelo de classificação brasileiro, é possível adaptar os padrões internacionais para definir os requisitos necessários em projetos de depósitos de rejeitos. Assim, na Tabela 25, é mostrado informações sobre os requisitos de depósitos em relação a classificação brasileira:

Tabela 25- Requisitos de depósitos

Classificação	Requisitos de depósito	Tipo de Rejeito	Exemplo
Classe 1: Rejeitos de Meia-Vida Muito Curta (RVMC):	Não precisam de um alto nível de contenção e isolamento. O depósito pode ser tipo aterro próximo a superfície.	rejeitos perigosos; solo contaminado; entulho com baixos níveis de concentração de atividade etc.	Aterro (Figura 42)
Classe 2.1: Meia-Vida Curta (RBMN-VC):	Isolamento e contenção robusta por períodos de até centenas de anos. Podem ser próximos a superfície.	Componentes contaminados, ativados. Rejeitos secundários e terciários.	Depósito – Armazém (Figura 43)
Classe 2.4: Rejeitos de Meia-Vida Longa (RBMN-VL)	Maior grau de confinamento e isolamento. Disposição em profundidades maiores da ordem de dezenas a centenas de metros	Componentes contaminados, ativados. Rejeitos secundários e terciários.	Repositório de Baixo e Médio Nível (Figura 44)
Classe 3: Rejeitos de Alto Nível de Radiação (RAN):	Devem ser projetados especificamente. O descarte deve ser em formação geológica profunda e estáveis, geralmente centenas de metros abaixo da superfície	Combustível irradiado, componentes do vaso de pressão, etc.	Repositório Geológico

Fonte: [84, 87]

Figura 42- Depósito de rejeitos em aterro



Fonte: [87]

Figura 43- Depósito de rejeitos em armazéns



Fonte: [87]

Figura 44- Depósito de rejeitos de baixo e médio níveis



Fonte: [87]

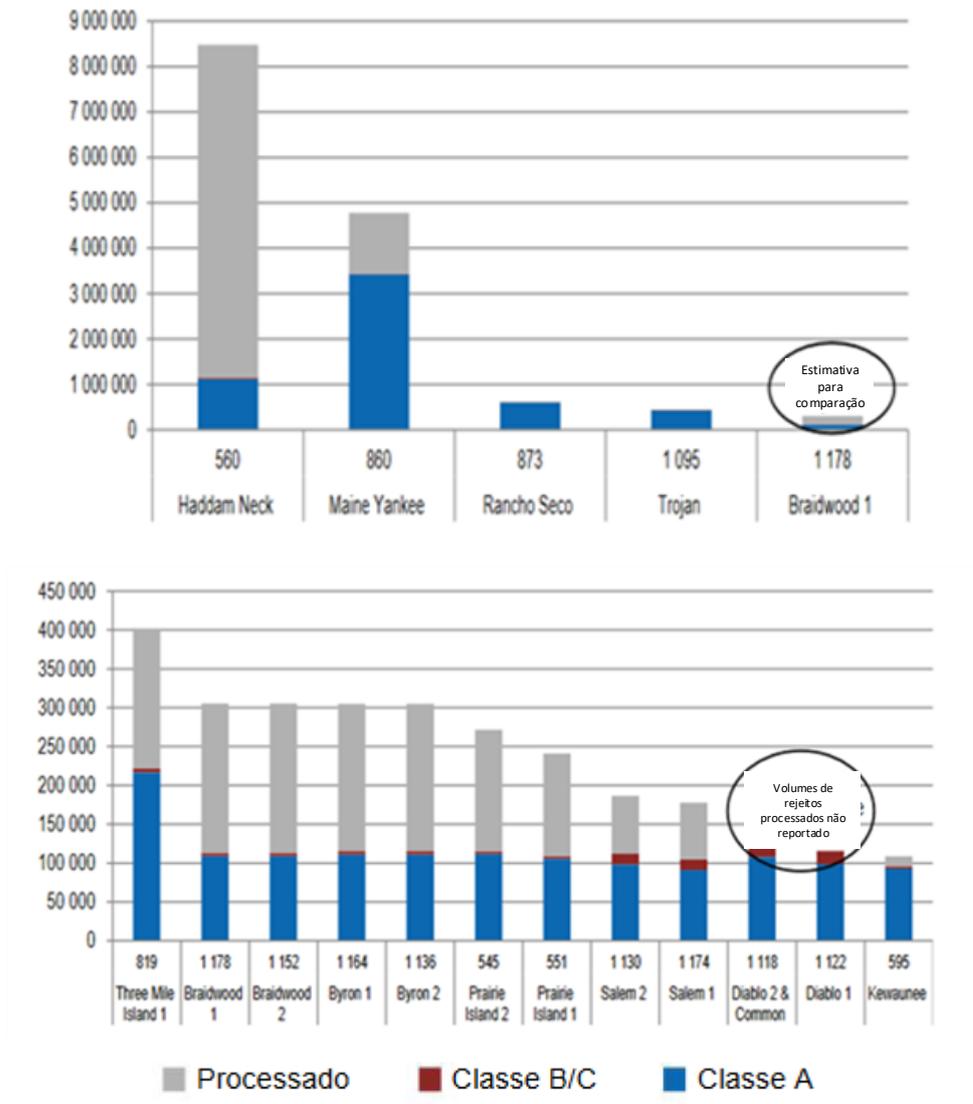
Os rejeitos de meia-vida curta ou de baixa atividade, resultantes do processo de descomissionamento, podem ser armazenados de forma segura na superfície. No entanto, os rejeitos de médio nível de radiação (ILW) também provenientes do descomissionamento, exigem um período de contenção e isolamento significativamente mais longo, que pode chegar a vários milhares de anos. Por isso, é necessário um projeto de deposição adequado, que considere a escolha de materiais de contenção apropriados e a monitoração constante dos RR [84].

7.2.6 Estudo de caso: Considerações sobre volumes de rejeitos radioativos nos EUA

Um estudo realizado pelos EUA e publicado pela OCDE/NEA [28] fornece informações relevantes sobre os volumes de rejeitos gerados durante o descomissionamento de reatores PWR nos EUA.

A NRC classifica os rejeitos radioativos em classes A (equivalente a classe 1 da norma brasileira), B (classe 2.1), C (classe 2.4), e GCC (“*Greater than Category C*” - classe 3). De modo a apresentar os resultados desse estudo, foram agrupados em três categorias, sendo rejeitos processados (material não contaminado ou processado), classe A, classe B e C [28]. Na Figura 45, é mostrado o gráfico de barra dos volumes gerados e projeções a partir do descomissionamento das unidades PWR (contemplando a capacidade em MWe) nos EUA.

Figura 45- Volumes de rejeitos gerados pelo descomissionamento de unidades PWR nos EUA em ft³



Fonte:[28].

Considerando o estudo mencionado, observa-se que não há uma relação direta entre a capacidade da planta (em MWe) e a quantidade de rejeitos gerados. Portanto, não se

pode afirmar que um reator de menor porte produzirá menos rejeitos do que um de maior porte.

Por exemplo, a usina de Haddam Neck, com potência de 560 MWe, gerou um total de 8.000.000 ft³ (226.534,77 m³) de rejeitos, enquanto a usina de Braidwood 1, com potência de 1178 MWe, gerou 300.000 ft³ (8.495,05 m³) de rejeitos, representando apenas 4% do total gerado em Haddam Neck (planta com a metade da potência de Braidwood 1). Portanto, é importante considerar outros fatores além da capacidade da planta ao estimar a quantidade de RR gerados durante o descomissionamento.

Foi divulgado na publicação [28] que um dos fatores de maior impacto na geração de RR é o requisito regulatório. É importante destacar que os critérios de liberação estabelecidos para os rejeitos podem influenciar fortemente na quantidade de volumes gerados. Quanto mais rigorosos forem esses critérios, exigindo níveis mais elevados de limpeza, maior será a quantidade de rejeitos gerados e, portanto, maiores serão os custos envolvidos.

Por exemplo, o estado de Connecticut, onde estava localizada a NPP de Haddam Neck, estabeleceu regulamentações mais restritivas para o descomissionamento do que os limites estabelecidos pela NRC. Essas regulamentações foram desenvolvidas em conjunto com várias agências governamentais e exigiram a remoção de partes acima do nível dos edifícios e estruturas do local, bem como a remoção de até 4 pés (1,2 metros) de solo. Além disso, como as águas subterrâneas foram classificadas para uso residencial, houve uma remediação rigorosa do solo, resultando na remoção adicional do solo necessária para atender aos requisitos da NRC. Consequentemente, o projeto de descomissionamento da Planta de Haddam Neck gerou uma enorme quantidade de rejeitos radioativos. No mesmo sentido, a planta de Maine Yankee também enfrentou exigências do estado de Maine e gerou volumes significativos de RR [28].

Por outro lado, o descomissionamento da Planta Nuclear de Trojan, com potência de 1100MWe, gerou volumes relativamente menores de RR em comparação com as plantas citadas anteriormente. Isso se deve ao fato de que a planta adotou três abordagens estratégicas com o objetivo de minimizar a quantidade de rejeitos gerados, que foram [28]:

- a) obteve a liberação da planta mantendo a estrutura da área controlada intacta, além de atuar para obter várias aprovações estaduais e federais necessárias para a opção de descarte;
- b) não desmontelou os componentes maiores, como vaso de pressão, pressurizador, gerador de vapor; e

- c) descartou 100% do volume de rejeitos de LLW diretamente na instalação ecológica dos EUA, onde havia acesso a uma rota específica para o descarte de rejeitos.

Para o desenvolvimento de estratégias de descomissionamento de instalações nucleares, é imprescindível que sejam conhecidos os requisitos técnicos e regulatórios envolvidos no processo, a fim de adotar as melhores práticas de gestão de RR planejar a estimativa de volume de rejeitos gerados. Isso é essencial para garantir a segurança radiológica e ambiental, além de minimizar os custos e os impactos decorrentes do gerenciamento desses materiais.

7.3 Atividades administrativas de gestão de recursos humanos (RH) e conhecimento

O processo de descomissionamento de instalações nucleares envolve diversas atividades administrativas que são fundamentais para garantir o sucesso do projeto. Dentre elas, destacam-se a gestão de recursos humanos (RH) e a gestão financeira. Outras atividades administrativas também são importantes, como as interações com autoridades regulatórias e a comunicação com as partes interessadas, tais como funcionários, comunidades locais, imprensa e sociedade em geral, no entanto, este trabalho se limitou a enfatizar as atividades de gestão de RH e gestão financeira.

Em relação as atividades de recursos humanos (RH), é importante destacar que o sucesso do descomissionamento de uma instalação nuclear depende significativamente dos RH, da gestão do conhecimento e do treinamento. A disponibilidade de um número suficiente de funcionários capacitados em todas as fases do ciclo de vida da instalação, incluindo o descomissionamento, é importante para garantir a eficiência e segurança do processo. Conforme destacado na publicação “*Training and Human Resource Considerations for Nuclear Facility Decommissioning*” [88], um número suficiente de funcionários deverá estar disponível em todas as fases do ciclo de vida da instalação, inclusive no descomissionamento.

Os Padrões de Segurança da AIEA para descomissionamento [16] inclui como requisito que organização operadora deve “garantir que pessoal devidamente treinado, qualificado e competente esteja disponível para o descomissionamento”. Esse documento ressalta a importância de exigir ações a serem tomadas pela organização de forma a “garantir que o conhecimento institucional sobre a instalação seja registrado e tornado acessível, e na medida do possível, que os principais funcionários sejam mantidos” [16].

É importante destacar que além da disponibilidade de pessoal treinado e qualificado, a gestão do conhecimento é um fator para o sucesso do descomissionamento. Isso inclui o registro e armazenamento de informações importantes sobre a instalação e suas atividades passadas, bem como a capacidade de compartilhar esse conhecimento de forma clara entre os membros da equipe e para as futuras gerações.

Todavia, é importante destacar que há uma grande diferença entre as atividades realizadas pelos funcionários durante a fase de operação e descomissionamento. Durante a fase de operação, os funcionários executam procedimentos de rotina, enfrentando um nível de risco constante baseado em riscos nucleares e radiológicos. Já na fase de descomissionamento, as modificações são constantes, as atividades são variadas, o risco nuclear é reduzido e surgem riscos industriais, com a participação de pessoal de diferentes empresas [81]. Essa transição da operação para o descomissionamento requer uma transformação na estrutura organizacional do operador, que deve se adaptar a essas mudanças significativas.

Durante o período de transição, é fundamental que sejam feitas mudanças estruturais que permitam que os funcionários tenham acesso a treinamentos e conhecimentos específicos sobre as novas atividades, bem como que a equipe responsável pelo descomissionamento esteja em conformidade com as normas e regulamentações estabelecidas pelas autoridades competentes [81]. Na Tabela 26, são destacadas as principais diferenças entre as atividades de operação e descomissionamento, que incluem mudanças no escopo das atividades, no perfil de risco e nas funções dos funcionários.

Tabela 26- Principais diferenças entre as atividades de operação e descomissionamento

Operação	Descomissionamento
Geração de renda	Geração de custos
Operação de rotina, pouca modificação	Tarefas e atividades variadas, modificações constantes
O rejeito é um subproduto gerado em quantidades que envolvem atividades operacionais	Os rejeitos são os principais produtos, envolvendo vários tipos e quantidades variáveis
Emprego de longo prazo, força de trabalho estável com objetivos de rotina	Fim visível do emprego, mudança de força de trabalho, tarefas e atividades
Risco estável com ênfase em riscos nucleares e radiológicos, pessoal treinado em energia nuclear	Riscos industriais

Fonte: [88].

É importante citar ainda que, a norma da CNEN 9.01 define que “a organização operadora é responsável pelo planejamento e implementação do programa de

descomissionamento, bem como pelo desenvolvimento das atividades dele decorrentes, incluindo todos os aspectos de segurança e proteção radiológica”. É permitido a organização operadora delegar a realização de tarefas específicas a terceiros, mantendo, no entanto, a responsabilidade pela segurança da usina.

7.3.1 Plano de Gestão de Recursos Humanos para o descomissionamento

Após décadas de operações rotineiras, os RH da instalação terão que passar por um período de mudança e adaptação durante o processo de descomissionamento. Para que esse processo ocorra da melhor forma possível, é fundamental que a instalação desenvolva um plano de recursos humanos para o descomissionamento, preferencialmente durante a fase de projeto. Isso ajudará a garantir que haja pessoal qualificado e suficiente em todas as fases do ciclo de vida da instalação, incluindo a fase de descomissionamento, que requer habilidades e conhecimentos específicos. O plano de RH deve considerar as diferenças entre as atividades de operação e descomissionamento, e deve prever treinamento e capacitação para que a equipe esteja preparada para as novas atividades e riscos associados ao processo de descomissionamento.

Conforme *Project Management Body of Knowledge* (PMBOK), o plano de gestão de recursos humanos visa identificar e documentar papéis, responsabilidades, habilidades necessárias e relações hierárquicas para o êxito do projeto, incluindo cronograma para mobilização e liberação de pessoal. Também podem incluir “identificação de necessidades de treinamento, estratégias para construção da equipe, planos para programas de reconhecimento e recompensas, considerações sobre conformidade, questões de segurança e o impacto do plano de gerenciamento de pessoal sobre a organização” [89].

A escolha da abordagem de gestão de RH e conhecimento terá implicação direta nas atividades de gestão de RH e treinamento para o descomissionamento. Por exemplo, se a abordagem de RH escolhida para o descomissionamento for de aproveitar a força de trabalho operacional, será necessário uma reorganização significativa e treinamento de atividades como, por exemplo, saúde, segurança e segurança industrial (treinamentos de andaimes e escadas, espaços confinados, riscos e perigos, proteção contra incêndios, segurança elétrica, manuseio de materiais perigosos etc).

A publicação “*Training and Human Resource Considerations for Nuclear Facility Decommissioning*” descreve algumas funções chaves para o descomissionamento, que são [88]:

a) diretor do projeto de descomissionamento – responsável por gerenciar o projeto em nível estratégico. Gerencia os recursos financeiros, revisa relatórios, equipes e vários os planos associados as atividades de descomissionamento;

b) gerentes de projeto – responsáveis pelo planejamento, aquisição e execução de atividades relacionadas com o projeto de descomissionamento;

c) engenheiros – responsáveis pelo detalhamento e supervisão das atividades de descomissionamento, incluindo a preparação de procedimento de trabalho e verificação de conformidade;

d) operadores da instalação – funcionários que trabalharam durante a operação da instalação e são qualificados para apoiar os engenheiros com informações técnicas em virtude da experiência operacional adquirida;

e) técnicos – responsáveis por fornecer monitoramento radiológico essencial para o apoio de proteção bem como os serviços analíticos e testes, geralmente são funcionários da instalação durante a operação;

f) técnicos de operação – trabalhadores com habilidades de mecânica, elétrica, instrumentação e controle, bem como soldadores, e outras atividades relacionadas a obras civis;

g) auxiliar de operação – atendem várias demandas necessárias durante o descomissionamento, por exemplo, uso de andaimes, revestimentos, especialistas em corte e perfuração de concreto, operadores de máquinas e equipamento, manuseio remoto, especialistas subaquáticos, especialistas em demolição, etc;

h) supervisores – responsáveis por supervisionar as equipes e força de trabalho para garantir as atividades de descomissionamento de forma segura e eficiente; e

i) profissionais especializados para apoio – inclui as áreas de tecnologia da informação, apoio logísticos, etc.

O descomissionamento de instalações nucleares é um projeto que requer uma gestão dinâmica e eficiente dos RH envolvidos. Tomando como exemplo um reator de potência que pode ter uma vida útil de até 60 anos, torna-se evidente a necessidade de um planejamento cuidadoso para garantir a disponibilidade de pessoal capacitado durante todo o ciclo de vida da instalação.

Dada a legislação trabalhista brasileira, que estabelece a idade de aposentadoria em 65 anos para homens e 60 anos para mulheres [90] e se considerarmos que a idade média para um profissional entrar no mercado de trabalho é de 28,6 anos [91], é improvável manter um único funcionário para todo o período de operação, o que implica na necessidade de duas

ou três gerações de funcionários para preencher a mesma posição de trabalho. Isso exige que os funcionários sejam continuamente treinados e capacitados na área, além de garantir a transferência de conhecimento de forma eficiente para as próximas gerações de trabalhadores.

Considerando que o período de descomissionamento pode variar entre 20 anos para as estratégias imediatas, até 60 anos para as estratégias proteladas e até 300 anos para o confinamento, é fundamental que o plano de gestão de RH preveja a substituição de pessoal, capacitação e, principalmente, a retenção de conhecimento. Caso seja adotada a estratégia protelada ou confinamento, a redução da mão de obra será necessária durante os períodos longos de armazenamento seguro.

No Brasil, como a atividade nuclear é monopólio da União, atualmente o ingresso de pessoal nas instituições federais é por meio de concurso público, atendendo os preceitos legais de processos seletivos específicos. Sendo assim, para o recrutamento de pessoal para atuar na indústria nuclear brasileira é necessária aprovação orçamentária da União além de outros trâmites burocráticos que exigem tempo e planejamento adequado. Outro ponto a ser considerado é a alta competição de pessoal com indústrias de outras áreas, como, por exemplo, de petróleo, gás e aeroespacial.

No Brasil, a área nuclear enfrenta um cenário de escassez de profissionais especializados. Isso ocorre devido à falta de cursos de graduação e pós-graduação em universidades brasileiras voltados para essa área de conhecimento. Contudo, nos últimos anos, tem havido avanços significativos graças aos esforços do Programa Nuclear Brasileiro, que tem buscado a implementação de novas universidades. Essas iniciativas têm contribuído para expandir a formação de profissionais qualificados para atuarem na indústria nuclear brasileira [92].

7.3.2 Plano de gestão de conhecimento para o descomissionamento

O plano de gestão do conhecimento para o descomissionamento tem como principal objetivo garantir que a organização tenha acesso ao conhecimento necessário durante todo o processo. Para isso, é necessário planejar e executar diversas atividades relacionadas à identificação, geração, desenvolvimento, codificação, aplicação, armazenamento e disseminação do conhecimento. Além disso, é fundamental que o plano contemple aspectos importantes de planejamento e controle, a fim de garantir que todas as etapas sejam realizadas de forma eficiente e eficaz. Conforme F. Borrmann [93], o ciclo de gestão do conhecimento compreende as seguintes tarefas:

- a) “planejamento – De que conhecimento precisamos? O que temos? Como podemos preencher as lacunas?”;
- b) “identificação - Que conhecimento temos? onde está o conhecimento e como pode ser acessado?”;
- c) “geração - Como o conhecimento é gerado – em nível individual ou coletivo?”;
- d) “desenvolvimento - Como o conhecimento pode ser desenvolvido em amplitude e profundidade?”;
- e) “divulgação -Como o conhecimento pode ser repassado?”;
- f) “aplicação -Conduzir os principais processos da organização e aplicar o conhecimento”;
- g) “conservação como podemos garantir que o conhecimento permaneça disponível e aplicável?”; e
- h) “avaliação qual é o estado do nosso conhecimento e qual é o estado do nosso conhecimento gestão”.

Para garantir que as informações relevantes estejam disponíveis durante todo o ciclo de vida da instalação, é importante ter um sistema de armazenamento de dados robusto e confiável. Isso inclui a documentação de projetos, informações da fase de construção, bem como o comportamento da planta durante a operação. Essas informações são importantes e serão transformadas em conhecimento no processo de descomissionamento, auxiliando na tomada de decisões críticas. Além disso, é importante implementar medidas de proteção ao conhecimento para garantir a integridade e segurança dessas informações ao longo do tempo. Isso pode incluir a definição de políticas de acesso, controle de versões e backup regular dos dados.

Um exemplo crítico de informação que deve ser mantida é a rastreabilidade dos rejeitos nucleares embalados, que precisam ser armazenados por longos períodos. Se o mecanismo de identificação dessas embalagens for, por exemplo, um pedaço de papel, após 300 anos de armazenamento, é possível que não existam garantias suficientes para que a identificação seja feita com precisão. Portanto, é importante que sejam adotados métodos seguros e duráveis para a identificação e rastreabilidade desses materiais, a fim de garantir a segurança e minimizar os riscos de acidentes nucleares no futuro [79].

Para proteger o conhecimento gerado através da pesquisa e desenvolvimento, é essencial que a propriedade intelectual ou industrial seja devidamente protegida. No Brasil, existem leis específicas que abrangem esse tema e oferecem diferentes tipos de proteção, como patentes, marcas, desenho industrial, direito autoral ou segredo industrial. É

importante que as ICT do setor nuclear estejam atentas a essas leis para garantir a proteção adequada do conhecimento gerado em suas atividades de pesquisa e desenvolvimento. A proteção do conhecimento não só preserva o valor do investimento realizado em pesquisa e desenvolvimento, mas também incentiva a inovação e contribui para o desenvolvimento do setor nuclear.

7.4 Atividades administrativas de gestão de recursos financeiros

A gestão dos recursos financeiros para o descomissionamento é uma atividade essencial que requer uma abordagem planejada. Ela pode ser dividida em duas áreas principais: estimativa de custos do projeto de descomissionamento e gestão financeira do fundo de descomissionamento.

Na primeira área, é importante seguir as metodologias recomendadas pela OCDE/NEA, AIEA e CE para garantir uma estimativa precisa dos custos do projeto de descomissionamento[28, 30, 31]. Essas metodologias incluem a identificação e avaliação dos riscos, a determinação dos custos associados às diferentes fases do projeto e a elaboração de um plano de financiamento.

Já na segunda área, a gestão financeira do fundo de descomissionamento é responsável pela coleta de recursos financeiros, sua gestão e controle, a aplicação em investimentos seguros e a gestão durante as atividades técnicas e administrativas associadas ao descomissionamento. É importante ressaltar que, após o desligamento da usina, a instalação não gerará receita por meio de sua atividade fim, o que torna a gestão financeira do fundo ainda mais importante.

No Brasil, tem-se uma norma específica, CNEN NN 9.02 [32], que regula a Gestão dos Recursos Financeiros destinados ao descomissionamento das Usinas Nucleoelétricas. Ela determina que a instalação assegure a gestão de recursos financeiros, pelo período necessário, de modo a cobrir os custos associados à implementação do PFD previamente aprovado pelo órgão regulador. A norma estabelece ainda, que a organização operadora, ou a organização gestora oficialmente estabelecida, é responsável pela gestão adequada dos fundos necessários para garantir o descomissionamento seguro e a gestão dos rejeitos radioativos gerados durante o descomissionamento.

A norma brasileira de descomissionamento estabelece que a apresentação do PPD é uma das etapas do processo de licenciamento de operação da instalação, e que esse plano deve contemplar a estimativa de custos para o projeto de descomissionamento. Nessa fase, a organização operadora deve adotar uma metodologia de estimativa de custos para

conhecer o valor aproximado do projeto, a ser implementado provavelmente décadas mais tarde, e dessa forma, implementar meios para arrecadar esses recursos durante a operação da instalação, a fim de utilizá-los durante a execução do descomissionamento.

7.4.1 Estimativa de custo para o projeto de descomissionamento

A estimativa de custo é um dos elementos mais importantes no projeto de descomissionamento de uma usina nuclear. Até a década de 1970, as estimativas eram calculadas a partir de custos de outros projetos, atualizando apenas os valores pela inflação, custo de mão de obra e armazenamento de RR [31]. No entanto, essa abordagem deixou de ser suficiente com a crescente complexidade das usinas nucleares e dos requisitos regulatórios mais rigorosos. Por isso, atualmente, é essencial adotar metodologias de estimativa de custo mais robustas, que levem em consideração os aspectos técnicos, regulatórios específicos de cada projeto de descomissionamento.

Dessa forma, as metodologias de estimativa de custo evoluíram, incorporando dados mais detalhados sobre componentes, estruturas, tecnologias de DD, gestão de RR, RH e outros custos relevantes. Consequentemente, tornou-se necessário criar uma lista de custos de descomissionamento para identificar e agrupar todos os itens de custos envolvidos [94].

A estimativa de custo pode ser desenvolvida pela organização operadora de duas formas. A primeira é a organização desenvolver uma metodologia própria para a elaboração de estimativas, com técnicas e procedimentos definidos por ela mesma, porém é necessário comprovar a consistência e a confiabilidade dessa metodologia. A segunda é a organização desenvolver a estimativa com base em uma lista padronizada, que utiliza experiências registradas de outros projetos de descomissionamento e ferramentas já comprovadas.

Como no Brasil não houve descomissionamento de reatores nucleares, não há dados históricos de custos para ser consultado. Isso é agravado por não se saber, também, como estimar os custos associados ao uso de certas tecnologias e de gestão de RR. A resposta básica adotada por alguns países para esse tipo de incerteza foi de adicionar subsídios de contingência calculados em cima do custo básico de estimativas. Os EUA, por exemplo, adicionaram contingência de 25% e 50% acima da estimativa. O Reino Unido usou valores entre 50% à 75% para cenários mais incertos. Mesmo com essas contingências, em alguns casos, acaba sendo insuficiente [29].

A organização operadora também pode criar estimativas de custos diferentes para o PPD e o PFD. No PPD, pode haver falta de informações precisas sobre preços a serem dispensados na execução do descomissionamento, como o preço de certas tecnologias, o

custo de mão de obra, o custo de materiais, impostos, etc. No entanto, é possível fazer uma estimativa por meio de simulações de índices inflacionários, aumento de salários, câmbio, taxa de juros, etc. Todavia, por mais sofisticada que possa ser a simulação, os valores podem não ser precisos, pois dependem fortemente de fatores externos, como política, condições econômicas, sociais, ambientais, requisitos ambientais, requisitos radiológicos, comércio exterior, entre outros.

É fortemente recomendada a realização de análise de risco para manter o controle sobre as incertezas e atualizações de custos do projeto.

Por outro lado, o PFD deve ter uma precisão mais próxima ao custo real das atividades, uma vez que o projeto será iniciado em um curto espaço de tempo e os riscos de fatores externos são reduzidos. Sendo assim, os dados a serem calculados devem ser mais próximos da realidade. Se os recursos financeiros recolhidos durante a fase de operação forem menores do que o previsto na estimativa de custo no PFD, pode ser necessário tomar medidas para diminuir os custos e protelar o descomissionamento de forma a aumentar o fundo até que seja possível executar o descomissionamento com segurança. Dessa forma, é possível que a organização operadora possa alternar de uma abordagem para a outra durante a fase de transição. Na Tabela 27, é apresentada alguns exemplos de metodologia/ferramentas de estimativas de custos executados em reatores nucleares.

Tabela 27- Ferramentas e metodologias de estimativa de custo

Estimativas de Custos			
Empresa / Elaborador	País	Ferramenta / Metodologia	Ref.
IAEA - OCDE/NEA	Países Membros	ISDC	[94]
AIEA	Países Membros	CERREX - ISDC	[95]
Thomas LaGuardia (TLG) Engineering	Estados Unidos	DECCER-EAP-ISDC	[31]
NIS Ingenieuresellschaft mbH	Alemanha	STILLKO - ISDC	[31]
Deiglys Borges Monteiro	Brasil	Ger-Descom e Av-Descom	[20]
Energy Solution	Estados Unidos	Software-EAP	[20]
NRC	Estados Unidos	OMEGA,	[20]
NRC	Estados Unidos	CECP	[20]
Konzek	Estados Unidos	Ordem magnitude com base na usina TROJAN	[20]

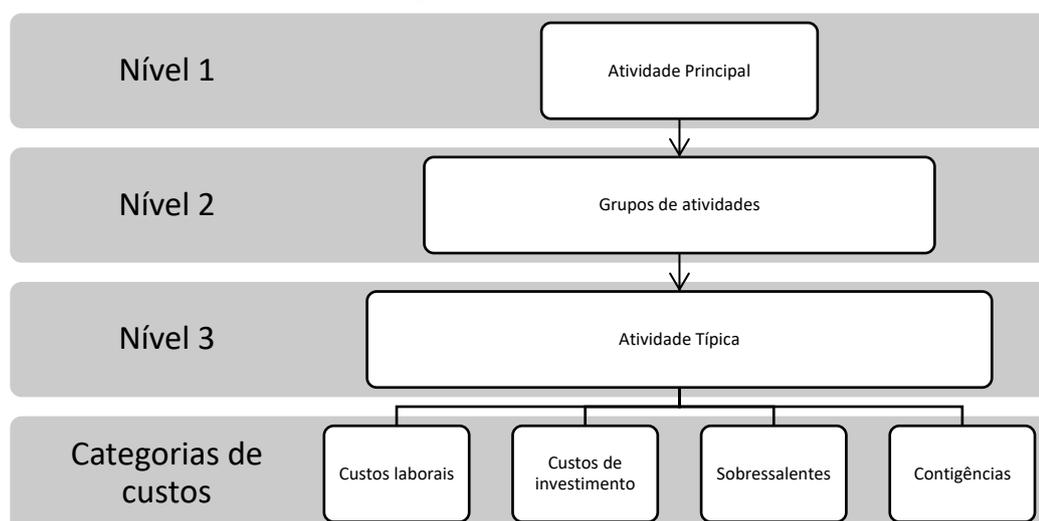
7.4.1.1 *International Structure for Decom. Costing of Nuclear Installations (ISDC)*

A maioria das ferramentas citadas na Tabela 27 são desenvolvidas com base na padronização descrita na publicação *International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations (OECD/NEA)* [94], que é o documento de referência

recomendado pela NEA, AIEA e pela Comissão Europeia (CE) para realizar estimativas de custo de projetos de descomissionamento. Essa publicação é uma atualização da publicação “*Proposed Standardized List of Items for Costing Purposes*” [96], também conhecida internacionalmente como “*Yellow Book*”. O ISDC é uma plataforma padronizada para apresentação de custos de projetos de descomissionamento que facilita a compreensão dos itens individuais de custo.

A publicação fornece uma estrutura hierárquica bem definida dos custos subdividida em três níveis, sendo o primeiro e o segundo nível o agrupamento das atividades básicas do terceiro nível. Cada atividade pode ser subdividida de acordo com quatro categorias de custos, conforme é mostrado na Figura 46 [94].

Figura 46- Estrutura ISDC



Fonte: [94].

No nível 1 são apresentadas as atividades principais [94]:

- 01- Ações de pré-ativação;
- 02- Atividades de desligamento da instalação;
- 03- Atividades complementares para armazenamento seguro ou confinamento;
- 04- Atividades de descomissionamento dentro da área controlada;
- 05- Processamento, armazenamento e eliminação de rejeitos;
- 06- Infraestrutura e operação do local;
- 07- Desmantelamento convencional, demolição e recuperação de sítios;
- 08- Gerenciamento, engenharia e suporte de projetos;
- 09- Pesquisa e desenvolvimento;
- 10- Combustível e material nuclear; e

11- Despesas diversas.

As categorias de custos são [94]:

- a) custos laborais – pagamentos a empregados, pagamentos a segurança social e saúde seguro de acordo com a legislação nacional e despesas gerais;
- b) custos de investimentos – aquisição de equipamentos, materiais ou despesas de consumíveis;
- c) sobressalentes – impostos, e etc.; e
- d) contingências - uma provisão específica para elementos imprevisíveis de custos dentro do escopo do projeto definido.

7.4.1.2 Estrutura Analítica de Projeto (EAP)

Uma alternativa ou complemento ao ISDC para estimativa de custos é a utilização de uma Estrutura Analítica do Projeto (EAP). Nesse método, os dados de custos de descomissionamento são organizados de acordo com as fases do projeto de descomissionamento. A empresa TLG, por exemplo, dividiu o projeto em 12 fases para o desmantelamento imediato e 13 fases para o desmantelamento protelado. É importante notar que a EAP pode ser adaptada às necessidades específicas de cada projeto de descomissionamento e que as fases podem variar de acordo com as características da instalação. A utilização da EAP pode ser uma forma de tornar a estimativa de custos mais detalhada e precisa, permitindo uma melhor gestão de recursos financeiros e uma maior transparência na divulgação das informações. O exemplo das fases elaborado pela TLG para o desmantelamento imediato é apresentado a seguir [28]:

1. Transição do desligamento;
2. Preparativos para o desmantelamento;
3. Remoção de componentes grandes;
4. Descontaminação do local;
5. Descontaminação após armazenamento de combustível úmido;
6. Atraso antes do cancelamento da licença;
7. Cessação da licença;
8. Restauração do local;
9. Operações de armazenamento/expedição de combustíveis;
10. Envio de rejeito; e
11. Descontaminação da instalação independente de armazenamento de combustível irradiado; e

12. Restauração do local.

As categorias de custos são [28]:

- a) custo do desmantelamento;
- b) custo de remoção;
- c) custo de embalagem;
- d) custo de transporte;
- e) custo de processamento externo;
- f) custo de descarte de rejeito de muito baixo nível;
- g) outro custo;
- h) contingência; e
- i) custo total.

A EAP é uma ferramenta para o planejamento e gerenciamento de qualquer tipo de projeto, incluindo projetos de descomissionamento, enquanto o ISDC é uma plataforma analítica que envolve todas as atividades típicas de descomissionamento. Em geral, as mesmas atividades ISDC com os mesmos números ISDC podem ser usadas em várias fases do projeto de descomissionamento. É recomendado que a vinculação de itens da EAP aos itens da ISDC seja realizada a partir do terceiro nível ISDC. Combinar a EAP com o ISDC pode fornecer uma abordagem completa para estimar os custos de descomissionamento, que leva em consideração todas as atividades necessárias em cada fase do projeto, desde a preparação até a finalização.

7.4.2 Gestão de fundos do projeto de descomissionamento

As atividades de gestão de fundos para o descomissionamento compreendem ações para captar e gerir os recursos financeiros durante a fase de operação, a fim de garantir que, após o desligamento da instalação, esses recursos possam ser usados para custear o projeto de descomissionamento de forma segura. Essas ações devem prever garantias em caso de desligamento prematuro, como acidentes ou decisões técnicas e políticas [31].

Geralmente, os custos associados à gestão do combustível irradiado são tratados separadamente do custo de descomissionamento das instalações nucleares. No entanto, alguns países e a AIEA consideram todos os custos associados ao combustível irradiado como custos operacionais da instalação [28]. É importante destacar que a gestão do combustível irradiado pode ter um impacto significativo nas decisões estratégicas relacionadas ao descomissionamento da instalação, e que esses custos devem ser considerados durante a fase de operação da instalação.

Nesse contexto, o artigo 22 da Convenção Conjunta para a Segurança da Gestão de Combustível Irradiado e para a Segurança da Gestão de Rejeitos Radioativos, promulgado no Brasil por meio do Decreto nº 5.935/2006, afirma que os “recursos financeiros adequados para apoiar a segurança das instalações para o gerenciamento de combustível nuclear usado e de rejeitos radioativos estejam disponíveis durante a sua respectiva vida útil de operação e descomissionamento”. Além disso, a norma CNEN NN 9.01 estabelece que “a organização operadora deve disponibilizar os fundos necessários para garantir o descomissionamento seguro, a gerência de rejeitos radioativos gerados durante o descomissionamento e a gerência do combustível irradiado”.

No entanto, a norma não determina a unificação desses custos, o que pode levar a desafios na gestão financeira da instalação. Portanto, é importante que a organização operadora considere inicialmente todos os custos associados à gestão do combustível irradiado e dos RR ao elaborar seu plano de gestão de fundos para o descomissionamento, a fim de garantir a segurança financeira do projeto. Dessa forma, assim como é realizado em alguns países, este trabalho considera que o fundo de descomissionamento é dedicado exclusivamente às atividades de descomissionamento, enquanto os custos relacionados ao combustível irradiado seriam considerados como parte da fase de operação da instalação ou de um fundo separado. Isso está alinhado com práticas adotadas na maioria dos países [30].

O fundo de descomissionamento pode ser captado com recursos próprios da organização ou com contribuições dos usuários que se beneficiam dos serviços prestados. Além disso, é importante que haja uma gestão financeira adequada para garantir que os recursos estejam disponíveis quando necessários e para evitar que ocorram desvios ou uso inadequado do dinheiro destinado ao descomissionamento. Outra medida que deve ser adotada é a realização de investimentos financeiros para aumentar a rentabilidade dos recursos disponíveis, sem que isso represente riscos à segurança financeira do descomissionamento.

7.4.2.1 Captação de recursos financeiros

A captação de recursos financeiros pode ser realizada por meio de uma cobrança proporcional ao serviço prestado, como por exemplo o fornecimento de energia elétrica. Entretanto, nos casos em que o serviço é estatal, como no Brasil, o custeio do projeto de descomissionamento pode ser obtido através do orçamento público. Nesse caso, os recursos serão contribuídos indiretamente pela população como um todo.

Existem diversas formas de captação de recursos financeiros para custear o projeto de descomissionamento de uma instalação nuclear. Algumas das principais formas são [31]:

- a) captação durante a fase de operação;
- b) captação antecipada antes do fim da operação;
- c) cobrança inicial para entrar em operação; e
- d) cobrança no início do descomissionamento.

A Norma CNEN NN 9.02 estabelece que “a organização operadora, ou a organização gestora oficialmente estabelecida, deve detalhar os procedimentos e critérios para a captação programada dos recursos financeiros destinados ao descomissionamento, ao longo da operação comercial da usina, consistentes com a estimativa de custos do descomissionamento, e incluí-los no PPD”.

7.4.2.2 Gestão e controle

A gestão e controle do fundo de descomissionamento pode ser realizada pela própria organização operadora (gestão interna) ou ser transferida para uma organização especializada (gestão externa) [31]. No Brasil, a norma CNEN NN 9.02 permite delegar as atividades de gestão para uma organização gestora oficialmente estabelecida. Ambas as abordagens têm o mesmo objetivo: cobrir os custos esperados e ter os recursos financeiros disponíveis quando necessários.

Existem abordagens, aplicada em alguns países, como por exemplo na Espanha, que unificam os fundos de descomissionamento das instalações nucleares daquele país, sob a responsabilidade de um órgão responsável pela gerência do fundo. Assim, o pagamento da instalação representa uma cota do fundo e que será custeado pelo órgão no momento do descomissionamento.

7.4.2.3 Investimento

A valorização dos recursos depositados no fundo de descomissionamento pode ser mantida por meio do investimento desses recursos em aplicações rentáveis. Para garantir isso, a norma CNEN NN 9.02 estabelece que os investimentos devem ser realizados em opções conservadoras, assegurando a atualização monetária e a minimização dos riscos de perda financeira.

É importante destacar que as opções conservadoras buscam proteger o valor do fundo de descomissionamento contra a inflação e minimizar os riscos de perda financeira. No entanto, nem sempre a estratégia de investimento conservadora é suficiente para garantir

o crescimento constante do fundo, especialmente diante de flutuações na economia do país. Por isso, é importante que a captação de recursos seja atualizada periodicamente, de forma a adequar-se às mudanças econômicas e garantir a sustentabilidade do fundo de descomissionamento ao longo do tempo.

O fundo de descomissionamento de Angra 1 e Angra 2, por exemplo, investiu em um fundo multimercado de longo prazo no Banco do Brasil, para acumular os recursos destinados a custear as atividades de descomissionamento. Este fundo contempla investimentos em títulos públicos, op. compromissadas e dólar comercial futuro [97].

A publicação da AIEA [31] define dois métodos principais para calcular os passivos do fundo. O primeiro é o método de valor presente (*current value*), que avalia o custo do descomissionamento como se as despesas fossem incorridas no presente. Nesse caso, o valor do fundo deverá ser igual ao valor da estimativa de custo e pode ser executado a qualquer momento. O segundo método é o valor presente líquido (*net present value*), que avalia o passivo com base nos custos de descomissionamento no futuro, descontando-os levando em conta o cronograma de despesas esperadas

7.4.2.4 Mecanismos para sacar os fundos

É importante estabelecer mecanismos específicos para garantir que os recursos financeiros do fundo de descomissionamento sejam utilizados exclusivamente para esse propósito. Nesse sentido, controles específicos estabelecidos pelo órgão regulador podem garantir que a organização operadora não tenha autorização para retirar fundos sem uma supervisão regulatória independente [31].

No entanto, é recomendável utilizar uma parte dos recursos do fundo de descomissionamento para financiar projetos de ciência, tecnologia e inovação, durante a fase de operação, com o objetivo de desenvolver tecnologias que possam ser aplicadas no descomissionamento [31]. Para isso, é importante estabelecer um limite percentual do fundo que possa ser autorizado para esta atividade, e uma meta razoável poderia ser de até 3% do custo total do descomissionamento [31]. É importante ressaltar que qualquer uso dos recursos do fundo que não seja para o descomissionamento deve ser cuidadosamente avaliado e aprovado pelo órgão regulador competente. Outro exemplo é, quando há necessidade de construção ou ampliação de depósitos iniciais (caso seja adotado essa abordagem) para o descomissionamento. Os saques dos recursos do fundo podem ser usados nas seguintes etapas pelos motivos descritos abaixo [30, 31]:

a) durante a operação – atividades de engenharia e planejamento de descomissionamento, projetos de CT&I, construções de depósitos de rejeitos;

b) durante o período de transição – despesas de transição, mudanças físicas, remoção de equipamentos; compra de equipamentos e descontaminação e desmantelamento;
e

c) durante o descomissionamento – todos os custos de descomissionamento, como pagamento de pessoal; pagamento de segurança; compra de material, taxas, impostos, energia etc.

8 ABORDAGENS DE DESCOMISSIONAMENTO

Para o desenvolvimento de estratégias de descomissionamento, é necessário conhecer as abordagens recomendadas, planejadas e comprovadas. As abordagens são conjuntos de atividades, técnicas e procedimentos que são utilizados para atingir um objetivo específico, neste caso, atividades de descomissionamento. Na Figura 47, é mostrado um exemplo de abordagem contemplando as atividades de descontaminação e desmantelamento e os fatores associados.

Figura 47 - Exemplo de Abordagem D&D



Fonte: Autor.

É importante conhecer as abordagens possíveis para que se desenvolva estratégias eficazes para o descomissionamento de reatores. A melhor seleção das abordagens dependerá de fatores como o custo da tecnologia, requisitos regulatórios, políticas de gestão de RR, entre outros [27]. Cada uma dessas abordagens a serem apresentadas possuem suas próprias peculiaridades e desafios que devem ser considerados.

Para desenvolver uma estratégia de descomissionamento, o responsável deve considerar todas as atividades obrigatórias e escolher uma abordagem dentro de cada grupo de abordagens. A seleção das abordagens em cada área de atividade formará, em conjunto, a estratégia de descomissionamento.

Este trabalho foi dividido em grupos de abordagens, que são:

- a) abordagens técnicas de DD;
- b) abordagens técnicas de gestão de RR;
- c) abordagens técnicas de gestão de armazenamento ou depósitos;
- d) abordagens administrativas de gestão de RH e conhecimento;
- e) abordagens administrativas de estimativa de custo; e
- f) abordagens administrativas de gestão de fundo financeiro.

8.1 Fatores associados as abordagens a serem analisados pela técnica MCDA

Com o objetivo de estabelecer um padrão para a seleção de abordagens no processo de descomissionamento, foi desenvolvido uma escala com base na proposta da AIEA para avaliação de risco [14]. Essa escala considera os fatores relevantes que devem ser levados em conta na tomada de decisão para adotar uma abordagem específica. Para cada abordagem, será atribuída uma pontuação correspondente aos fatores relevantes, baseada em informações provenientes de artigos e publicações. A escala varia de pontuação de 1 a 5, na qual os menores valores representam os melhores casos. Por outro lado, quanto maior o valor, pior é o fator considerado.

8.1.1 Tempo de execução (em anos)

O fator tempo de execução foi utilizado como critério para a seleção das abordagens técnicas, indicando o tempo necessário para sua execução, levando em consideração a experiência em descomissionamento. A escala varia de menos de 10 anos (pontuação 1) até mais de 80 anos (pontuação 5). As demais pontuações foram atribuídas usando uma fórmula que dobra o tempo da pontuação anterior. Por exemplo, a pontuação 2 corresponde a um intervalo de 10 a 20 anos, a pontuação 3 corresponde a um intervalo de 20 a 40 anos, e a pontuação 4 corresponde a um intervalo de 40 a 80 anos. Essas pontuações podem ser determinantes para afirmar se a estratégia de descomissionamento será desmantelamento imediato, protelado ou confinamento.

8.1.2 Custo da atividade (em milhões de U\$)

O fator custo da atividade está relacionado à abordagem específica e não ao projeto de descomissionamento como um todo. A escala varia de menos de 10 milhões (pontuação 1) até valores acima de 150 milhões (pontuação 5). Esses valores foram retirados dos valores apresentados pelo ISDC de algumas usinas de países membros da OCDE/NEA [28]. Assim, foram adicionados U\$ 50 milhões para cada pontuação de forma a elaborar uma escala para o custo.

8.1.3 Volume de rejeitos radioativos (em m³)

O fator de volume de rejeitos radioativos foi utilizado como critério para a seleção das abordagens técnicas e refere-se a previsão de volume de rejeitos a serem gerados e administrados usando a abordagem específica. A escala varia de menos de 3.000m³ (pontuação 1) até valores acima de 115.000m³ (pontuação 5). Esses valores foram retirados

dos valores apresentados pelas usinas dos EUA conforme foi apresentado na seção 7.2.6 Estudo de caso: Considerações sobre volumes de rejeitos radioativos nos EUA [25].

8.1.4 Viabilidade técnica

Esse fator foi utilizado como critério para a seleção das abordagens técnicas e considera a viabilidade técnica da execução da abordagem no Brasil. Este trabalho levou em conta diversos cenários, incluindo aspectos da indústria, políticas, requisitos técnicos e regulatórios, infraestrutura do país e outras considerações relevantes. A escala utilizada varia de "Muito Alta" (indicando que é totalmente viável tecnicamente executar a abordagem) a "Muito Baixa" (onde foi considerado que a probabilidade é quase nula). É importante ressaltar que essa escala é genérica e outros analistas podem atribuir pontuações diferentes. Esse fator é modificado nos cenários estudados neste trabalho.

8.1.5 Proteção Radiológica para o Indivíduo Ocupacionalmente Exposto (IOE)

Esse fator foi utilizado como critério para selecionar as abordagens técnicas e considera a quantidade de dose que os funcionários receberão durante a execução da abordagem específica. A escala varia de "Muito Alta" (indicando o melhor caso) a "Muito Baixo" (indicando o pior caso). A atribuição das pontuações levou em consideração os limites regulatórios de exposição: 20 mSv média em 5 anos e 50 mSv em qualquer ano, conforme a legislação de proteção radiológica do IOE e os valores divulgados nas experiências. Esses limites foram considerados para determinar a pontuação máxima a ser atribuída.

8.1.6 Proteção Radiológica para o público

Esse fator foi utilizado como critério para selecionar as abordagens técnicas e considera a quantidade de dose que o público e o meio ambiente receberão durante a execução da abordagem específica. A escala varia de "Muito Alta" (indicando o melhor caso) a "Muito Baixo" (indicando o pior caso). A atribuição das pontuações levou em consideração os limites regulatórios de exposição: 1 mSv anuais, conforme a legislação de proteção radiológica do IOE. Esses limites foram considerados para determinar a pontuação máxima a ser atribuída.

8.1.6 Riscos industriais

Esse fator foi utilizado como critério para selecionar as abordagens técnicas e considera os riscos industriais associados com a abordagem, como por exemplo: acidentes

de trabalho, como ser atingido por objetos em queda, ferir-se durante atividade de corte; choques elétricos; explosões de materiais inflamáveis no descomissionamento; colapsos de estruturas associadas à demolição; toxicidade química para os pulmões e pele de trabalhadores [98]. A escala varia de "Muito Baixo" (indicando o melhor caso) a "Muito Alto" (indicando o pior caso).

8.1.7 Incertezas no regulamento

O fator de incertezas regulatórias refere-se à probabilidade de a abordagem cumprir com as normas e regulamentos nacionais, ou se há dúvidas quanto à possibilidade de o órgão regulador não autorizar a abordagem. Foi atribuído uma escala de Muito Baixo (indicando o melhor caso) a "Muito Alto" (indicando o pior caso).

8.1.8 Segurança Física

O fator de segurança física está relacionado à abordagem de armazenamento de rejeitos radioativos e seu transporte. Ele tem como objetivo avaliar os riscos associados a essas atividades nessas abordagens específicas.

8.1.9 Disponibilidade de recursos humanos qualificados

Esse fator está relacionada às abordagens administrativas de RH. Ela diz respeito à disponibilidade de pessoal treinado na área de descomissionamento. A escala varia de 99% (melhor caso), indicando que todas as atividades-chave de descomissionamento estão devidamente preenchidas, até 5% (pior caso) de pessoal disponível para executar as atividades. A atribuição das pontuações foi baseada na experiência retratada na literatura.

8.1.10 Disponibilidade de conhecimento disponível da instalação

Esse fator está relacionado às abordagens administrativas de RH e conhecimento e desempenha um papel importante na execução do descomissionamento. Ele avalia se todo o conhecimento necessário para realizar as atividades de descomissionamento estará disponível na abordagem específica. A escala varia de 99% (melhor caso), indicando que todo o conhecimento necessário para o descomissionamento estão prontamente disponível, até 5% (pior caso), onde há pouco ou nenhum conhecimento disponível. A atribuição das pontuações foi baseada na experiência retratada na literatura.

8.1.11 Proteção à propriedade intelectual (PI)

Esse fator está relacionado às abordagens administrativas de RH e conhecimento e representa a possibilidade de perda de conhecimento intelectual ou produtos ou serviços

desenvolvidos durante o descomissionamento. Foi atribuída uma escala de "Muito Alta" (indicando o melhor caso) a "Muito Baixa" (indicando o pior caso).

8.1.12 Nível de precisão da estimativa de custo

Esse fator está relacionado ao nível de precisão da estimativa de custos da abordagem. A escala utilizada foi baseada em publicações da AIEA que já estabelece diferentes níveis de precisão. A escala varia de 0 a 15% (melhor caso), indicando uma baixa margem de erro na estimativa de custos, até 80 a 100% de erro (quando o custo pode ser o dobro da estimativa inicial), indicando uma alta margem de erro na estimativa de custos.

8.1.13 Outros fatores

Além dos fatores mencionados anteriormente, foram considerados outros fatores para realizar uma análise abrangente de todas as abordagens. Esses fatores incluem o tempo de implementação e os custos de implementação em níveis genéricos, os riscos associados ao desligamento prematuro e outros. É importante ressaltar que, durante a elaboração do plano de descomissionamento, o tomador de decisões pode adicionar outros fatores que não foram considerados neste trabalho, como por exemplo, a influência de stakeholders, a opinião pública, ganho político, entre outros. No APÊNDICE E – Escala de pontuação para nivelar as abordagens pela Análise de decisão por multicritérios (MCDA)”, é apresentada uma escala de pontuação que permite nivelar todas as abordagens por meio da Análise de Decisão por Multicritérios (MCDA).

8.2 Abordagens técnicas de descontaminação e desmantelamento (DD)

Com base nas atividades técnicas de DD apresentadas no Capítulo 7, foram identificadas quatro tipos de abordagens diferentes na literatura, que serão apresentadas a seguir e podem ser aplicadas para o descomissionamento de reatores nucleares no Brasil.

8.2.1 Abordagem Nº 1: Descontaminar e desmantelar todos os componentes do reator logo após o período de transição e removê-los para um depósito de RR fora da instalação

Essa abordagem foi identificada no estudo de caso do descomissionamento do reator de pequeno porte PWR BR-3, que traz informações relevantes no caso de selecionar uma estratégia de desmantelamento imediato [41, 81].

A instalação optou pela estratégia de desmantelamento imediato e, para isso, foram desmantelados todos os componentes pequenos altamente radioativos de forma

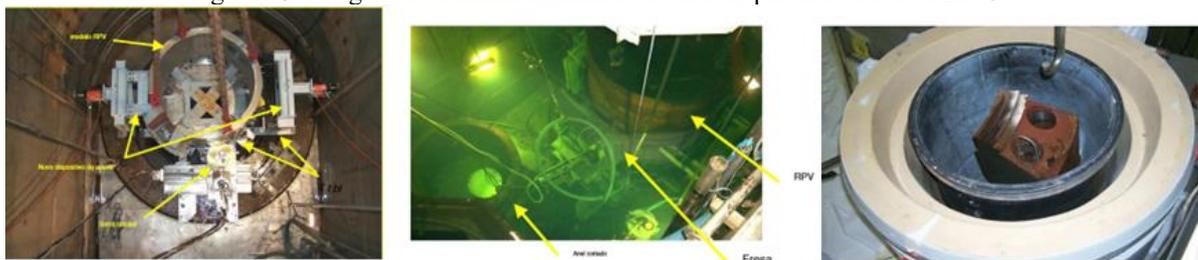
remota. Além disso, os componentes maiores foram descontaminados antes de serem desmontados, com exceção do vaso de pressão. Para este componente, uma técnica de corte específica foi adotada e será descrita a seguir.

O vaso do reator BR-3 possuía 5,49m de altura e 1,7m de diâmetro, com uma espessura de 112mm e uma potência elétrica de 40MWe. Ele foi desligado no ano de 1987 e as atividades de descontaminação dos componentes do circuito primário foram iniciadas em 1989. O desmantelamento do reator foi iniciado em 1997 [81].

Na época, foram estudadas duas opções de abordagens para o desmantelamento do vaso de pressão: a primeira visava o corte do vaso em forma de anéis na própria instalação, e a segunda seria a retirada do vaso de pressão por inteiro. Após estudos, a instalação optou pela primeira opção [81].

Nesse sentido, foi decidido desmantelar o vaso de pressão na própria piscina do reator, de forma subaquática. As ferramentas de corte adotadas foram: uma tocha de arco de plasma manuseada por um operador, uma fresa específica para o corte entre as tubulações do circuito e o vaso, uma máquina de serra circular para o corte horizontal do vaso e uma serra de fita para o corte vertical. Foram adotados procedimentos de segurança durante o corte entre o vaso de pressão e as tubulações do circuito primário, de forma a estancar a piscina durante a operação. Na Figura 48, são mostradas imagens do uso dessas ferramentas e a "peça final" do vaso do reator após o desmantelamento [81].

Figura 48- Imagens do desmantelamento do vaso de pressão do reator BR-3



Fonte: [81].

As peças cortadas passaram pelo processo de descontaminação usando o processo MEDOC[®], conforme já citado na seção 7.1.3.4 Estudo de caso – Descontaminação dos componentes do reator BR-3”. Aquelas que ainda apresentavam níveis elevados de radioatividade foram encaminhadas para uma planta de fusão [81].

Foi registrado um tempo total de 65 turnos de trabalho para a realização da operação, com uma dose média de radiação recebida por operador de 3,65mSv. O sucesso do desmantelamento do vaso de pressão comprovou a viabilidade dessa técnica. Embora as

ferramentas mecânicas sejam amplamente utilizadas na indústria, foi necessário fazer adaptações para executar o trabalho subaquático e em um ambiente de alta radiação [81].

A abordagem adotada para o desmantelamento de componentes como o pressurizador, o gerador de vapor e as bombas do refrigerante primário consistiu em primeiro descontaminá-los o máximo possível através do processo MEDOC[®]. Em seguida, foram desmantelados. O nível de contaminação da parte interna desses componentes era em média de 7.000 Bq/cm², e para obter uma atividade de 1 Bq/cm², foi estipulado a remoção de 30 µm de espessura. No caso do GV, por exemplo, foram necessárias 60 horas para retirar 10 µm de camada durante o processo de descontaminação [41].

Assim, na Tabela 28, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 28- Pontuações dos fatores associados na Abordagem DD n°1

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Tempo (anos)	Entre 9 e 15 anos.	2
Custo (US\$ milhões)	Não foram fornecidos dados específicos sobre os custos envolvidos na abordagem do reator BR-3, no entanto, foi utilizado os dados da NPP José Cabrera-ESP, que adotou essa abordagem de desmantelar todos os componentes e teve um custo na atividade (ISDC-4) de US\$ 55 milhões.	3
Volume de RR (m ³)	Os processos relativos à gestão de RR visaram a minimização e a reciclagem do máximo de rejeitos possíveis. Foi retratado que o vaso de pressão, onde está localizado os rejeitos de maior nível, teve uma quantidade relativamente pequena em relação ao desmantelamento de outros vaso de pressão (3,6m ³ de rejeitos de alto nível - 4,8m ³ de médio nível - 6,8m ³ de baixo nível). As técnicas de descontaminação, como por exemplo MEDOC, minimizam o volume e quantidades de RR.	2
Viabilidade Técnica	A viabilidade técnica foi comprovada, no entanto deve-se levar em consideração as características do país.	2
Proteção Radiológica (IOE)	Foi relatado uma dose recebida pelos operadores durante o desmantelamento do vaso de pressão de 3,65mSv em 65 turnos de trabalho. Se considerarmos um limite conforme a ICRP-103 de 20mSv ao ano, o valor estará na média do previsto se acrescentarmos as possíveis doses relativas dos outros componentes.	3
Proteção Radiológica-Público	Foi interpretado que a redução na quantidade de volumes de RR resultante das técnicas de desmantelamento pode levar a uma diminuição na exposição de dose associada ao transporte e armazenamento desses rejeitos. Isso ocorre porque menos material radioativo precisa ser movimentado e armazenado, reduzindo assim o risco de exposição à radiação para o público.	2
Riscos Industriais	Os riscos industriais serão, relativamente, altos do que as outras abordagens em virtude da quantidade de cortes e manuseio dos componentes a serem desmantelados.	4
Incerteza no regulamento	A AIEA recomenda, sempre que possível, o desmantelamento imediato com a minimização de geração de RR. Nesse trabalho foi entendido que essa abordagem pode ser motivada em virtude dos benefícios associados. Sendo assim, considerou não haver muitas incertezas no regulamento.	2

Fonte: Autor.

8.2.2 Abordagem Nº 2: Descontaminar e não desmantelar os componentes grandes do reator, mantê-los por inteiro e armazená-los em depósitos de rejeitos radioativos fora da instalação

Essa abordagem foi identificada no descomissionamento da usina de Trojan e está sendo proposta para o projeto de descomissionamento da usina nuclear de Loviisa, na Finlândia [28], que será retratado a seguir.

A usina nuclear de Loviisa possui dois reatores nucleares que foram comissionados próximos no tempo, um em 1977 e outro em 1980. Ambos são do tipo PWR modelo VVER V-213, com potência elétrica de 500 MWe, e estão em vias de serem descomissionados. A estratégia selecionada para o descomissionamento da usina nuclear de Loviisa foi a de DECON, com previsão de 11 anos de atividades para a conclusão do projeto. No plano de descomissionamento, optou-se por remover completamente o vaso de pressão do reator juntamente com seus componentes internos, sendo que o vaso seria utilizado como uma estrutura para armazenamento de outros componentes ativados. Vale ressaltar que o peso total do vaso de pressão, partes internas e elementos de blindagem é de 914 toneladas e, quando embalado no container, o volume é de 1.484 m³ [28].

Além do vaso de pressão, o plano de descomissionamento considerou não desmantelar os componentes maiores, como o GV e pressurizador. Dessa forma, decidiu-se armazenar esses componentes por inteiro [28]. Importante mencionar nessa abordagem são os custos reduzidos relacionados ao projeto de descomissionamento. Conforme já mostrado na Tabela 1, o custo do descomissionamento da usina de Trojan foi de U\$ 430 milhões, o de Loviisa está estimado em U\$ 236.9 milhões [28]. Custos relativamente menores em comparação com as outras abordagens técnicas de DD. Por outro lado, os riscos e a exposição de dose, principalmente no transporte, serão, relativamente mais altos.

Para a adoção dessa abordagem, é importante consultar o órgão regulador do país, de modo a verificar se as condições regulatórias são permitidas. No Brasil, a Norma CNEN NN 9.01 diz que a escolha técnica de DD da usina deve permitir a otimização da proteção dos IOE, do público e do meio ambiente, e a minimização de geração de RR, mas não restringe, claramente, a adoção dessa abordagem. Além da regulamentação, deve-se realizar uma análise de risco para saber da viabilidade técnica de transporte e armazenamento. Em alguns estados dos EUA e na Alemanha, por exemplo, possui regulamentação que proíbe esse tipo de abordagem [28].

Os reatores de pequeno porte são caracterizados por serem relativamente menores que os de grande porte, como discutido no Capítulo 4. Os componentes maiores desses reatores, como o pressurizador do reator BR-3, têm cerca de 5 metros de altura, 1

metro de diâmetro e pesam 12 toneladas, podendo ser transportados via caminhão de eixo triplo (o qual suporta até 34,5 toneladas) [99]. Já o pressurizador do modelo Westinghouse possui 16,1 metros de altura e pesa 88 toneladas [36], sendo necessária a utilização de ferrovias para o transporte.

A ativação radioativa prevista do vaso de pressão de um dos reatores de Loviisa é mostrado na Tabela 29 [28]:

Tabela 29- Ativação dos rejeitos da usina de Loviisa

Rejeitos	Atividade TBq	Principais Radioisótopos
Vaso de Pressão	560	^{60}Co , ^{63}Ni , ^{59}Ni , ^{55}Fe , ^{14}C
Internos do Reator	33085	
Elementos de Blindagem	61800	
Absorvedores	115	
Instrumentos do Núcleo	1093	

Fonte: [28]

Assim, na Tabela 30, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 30- Pontuações dos fatores associados na Abordagem DD n°2

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Tempo (anos)	Entre 7 e 11 anos.	1
Custo (US\$ milhões)	Os valores retratados foram relativamente menores do que as outras abordagens.	2
Volume de RR (m ³)	Uma vantagem da estratégia de não desmantelar os componentes maiores, como o gerador de vapor e o pressurizador, é que o volume de RR gerados será baixo, uma vez que o volume de rejeitos será proporcional ao tamanho dos componentes. Dessa forma, o volume a ser gerenciado será próximo aos tamanhos desses componentes maiores, o que pode facilitar o armazenamento e a disposição final dos rejeitos.	3
Viabilidade Técnica	Considerando as condições das estradas brasileira, a viabilidade atual do transporte de componentes por inteiro pode ser comprometida.	4
Proteção Radiológica (IOE)	Como os operadores não irão se expor a dose para desmantelar esses componentes, foi considerado que a exposição de dose IOE será menor do que a abordagem 1.	2
Proteção Radiológica-Público	Foi interpretado que por não desmantelar esses componentes maiores e não minimizar o volume de rejeitos, haverá um aumento significativo na exposição de dose associada ao transporte e armazenamento desses rejeitos.	4
Riscos Industriais	Os riscos industriais serão relativamente baixos do que as outras abordagens em virtude de não desmantelar os componentes que estão altamente expostos. No entanto, a tarefa de remover os componentes por inteiro pode trazer riscos industriais altos associados a essa atividade específica.	3
Incerteza no regulamento	Há incertezas no regulamento sobre a permissão do órgão regulador de executar essa abordagem.	4

Fonte: Autor.

8.2.3 Abordagem Nº 3: Colocar a instalação em condições seguras de forma a aguardar o decaimento radioativo e depois realizar as atividades de desmantelamento e remoção dos rejeitos para um depósito de rejeitos radioativos

A abordagem de DD de colocar em condições seguras de forma a aguardar o decaimento radioativo e, posteriormente, realizar as atividades de desmantelamento é uma abordagem comum em diversos projetos de descomissionamento.

Conforme apresentado no Capítulo 5, os radionuclídeos apresentam uma meia-vida característica e sofrem decaimento radioativo exponencial ao longo do tempo. No caso de um reator nuclear, o radionuclídeo dominante após o período de transição é o ^{60}Co , com meia-vida de 5,2 anos e que libera cerca de 1 MeV de energia. Portanto, após, por exemplo, 50 anos (aproximadamente 10 decaimentos radioativos do ^{60}Co), a exposição à dose recebida pelo ^{60}Co será relativamente pequena.

Nesse sentido, este capítulo apresentará a experiência do reator de pequeno porte BWR Dodewaard, localizado na Holanda, para ilustrar os detalhes e os resultados obtidos com essa abordagem [28]. Dessa forma, a opção de estratégia associada a essa abordagem será o desmantelamento protelado.

O reator BWR Dodewaard, na Holanda, capaz de produzir 55MWe, atingiu sua criticalidade em 1968 e encerrou suas atividades em 1997, ela adotou a estratégia de desmantelamento protelado para o projeto de descomissionamento [28].

Após o desligamento do reator, a instalação procedeu à retirada do combustível irradiado, que foi enviado para a planta de reprocessamento. Além disso, foram removidos os RR de operação e realizada a drenagem do sistema do circuito primário antes de colocar a instalação em “modo seguro” [28].

Nesse sentido, a instalação realizou atividades de reforço de vedação segura, controle da área contaminada, sistemas de água e energia e sistemas de segurança física. Essas atividades visavam manter a estrutura segura e vigiada. O projeto foi planejado para armazenar com segurança por 40 anos. A decisão da estratégia foi baseada por razões radiológicas e financeiras. A previsão de iniciar o desmantelamento está agendada para 2045 [28].

O plano de descomissionamento é revisado em 5 e 5 anos e a taxa de redução de dose prevista é de até 2Sv após 50 anos. A instalação também previu a rentabilidade nos aumentos do fundo financeiro a partir de uma taxa de 4% [28]. O custo do descomissionamento é estimado em €\$ 180 milhões com base nas premissas citadas na referência. Uma delas descreve o custo de transporte em torno de 25% desse valor.

A instalação investiu para a construção de infraestruturas para medições de liberação e em rotas de transporte internas no edifício. Foi escolhido o método de descontaminação seca, de forma a evitar a produção de grandes quantidades de rejeitos líquidos e lamas, que poderiam penetrar no solo durante o tempo [28].

Assim, na Tabela 31, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 31- Pontuações dos fatores associados na Abordagem DD nº 3

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Tempo (anos)	Entre 40 e 80 anos.	4
Custo (U\$ milhões)	Os valores retratados de €\$ 180 milhões (U\$ 193 ⁹) são menores do que a abordagem 1 e 2. Outrossim, essa abordagem permite uma captação menor de forma que o fundo financeiro do descomissionamento possa alcançar o custo para a execução do projeto.	1
Volume de RR (m ³)	A referência mencionada não forneceu uma estimativa específica do volume de rejeitos envolvido. No entanto, é entendido que é possível gerar uma quantidade de rejeitos menores do que a abordagem 2 e maior que a abordagem 1. Isso em virtude da redução da radioatividade dos componentes, a qual facilitaria aos funcionários executar dismantelamentos que antes não seria possível.	3
Viabilidade Técnica	É totalmente viável, no entanto as atividades de dismantelamento devem ser concluídas em até 60 anos.	2
Proteção Radiológica (IOE)	As doses do IOE serão reduzidas em virtude do decaimento radioativo.	2
Proteção Radiológica-Público	No mesmo sentido, as doses no transporte e no armazenamento também serão reduzidas.	2
Riscos Industriais	Os riscos industriais serão relativamente menores do que as outras abordagens em virtude de dismantelar os componentes com a radioatividade reduzida.	2
Incerteza no regulamento	Deve-se consultar o órgão regulador sobre informações e procedimentos a serem adotados para o armazenamento seguro.	3

Fonte: Autor.

8.2.4 Abordagem Nº 4: Dismantelamento parcial (ou não) com o depósito intermediário ou final “*in sítio*” para posterior remoção ou eliminação

Esta abordagem consiste em transformar a instalação em um depósito intermediário ou final, levando em consideração que os componentes podem ou não ser dismantelados e armazenados no local até que os radionuclídeos atinjam o limite de dispensa. Quando a radioatividade for suficientemente baixa, a instalação poderá ser

⁹ Conversão realizada na dia 26/05/2023

desmantelada de forma semelhante a uma instalação não radioativa. O objetivo do descomissionamento nesse caso seria manter e transformar o local da instalação em um depósito. Essa opção é indicada apenas em casos de acidentes ou inviabilidade técnica, pois a estratégia está associada ao confinamento.

Essa abordagem tem como objetivo minimizar a exposição à radiação durante o transporte, aproveitar a estrutura física de blindagem do prédio do reator, reduzir custos e utilizar a piscina para armazenar o combustível irradiado, entre outros fatores. Entretanto, o tempo necessário para concluir todo o processo será muito maior, pois além da retirada dos rejeitos, que pode levar mais de 300 anos, será necessário encapsular o local para alcançar o estado final.

Para exemplificar essa abordagem, será apresentada a experiência de descomissionamento da usina nuclear de Chernobyl, na Ucrânia. Essa usina sofreu um acidente nuclear em 1986, após um teste de baixa potência que resultou em uma explosão e um incêndio na unidade 4, liberando grandes quantidades de radiação na atmosfera (5% do núcleo) por várias centenas de quilômetros ao redor do local [100].

O planejamento do descomissionamento da usina incluiu o estabelecimento uma estratégia de segurança para toda remediação do local, incluindo as instalações de armazenamento do combustível irradiado, e os RR, bem como proteger as estruturas danificadas da usina que estão em construção. Após 6 meses do acidente, foi construído um “Sarcófago” para cobrir a unidade 4 danificada, as outras unidades foram fechadas em 1991, 1996 e 2.000 [100].

O projeto de descomissionamento da usina de Chernobyl incluiu a construção de uma nova instalação intermediária de armazenamento de combustível irradiado, uma estação de tratamento de RR líquidos, um complexo industrial de gestão de RR sólidos e um plano de implementação de encapsulamento, estabelecido em 1997. O Banco Europeu para Reconstrução e Desenvolvimento foi encarregado de constituir e gerir um fundo criado por 40 países doadores, com o objetivo de prevenir acidentes nucleares em usinas construídas na Rússia [100].

Foi estabelecido um procedimento geral para executar todas as atividades e estruturar os projetos, que incluiu a avaliação do estado de segurança da planta, a identificação das medidas e sistemas de segurança prioritários a serem construídos, a contratação de empresas de consultoria com o apoio da Comissão Europeia, a elaboração de especificações detalhadas, o lançamento de licitações e a seleção e contratação de empreiteiros. Tudo isso ocorreu sob a supervisão e aprovação da Organização Reguladora

Estatat Nuclear da Ucrânia (SNRIU), que é a autoridade responsável pela segurança nuclear daquele país [100].

Foi estabelecido um fundo específico, o *Chernobyl Shelter Fund* (CSF), para financiar a construção de um novo confinamento seguro com o objetivo de selar o reator danificado. Além disso, esse fundo ofereceu suporte financeiro para treinamento da equipe da instalação, monitoramento de radiação e suporte médico. Desde a sua criação, em 1997, até 2015, o fundo recebeu um total de €2,1 bilhões de 41 países [100].

Assim, na Tabela 32, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 32- Pontuações dos fatores associados na Abordagem DD n°4

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Tempo (anos)	Mais de 100 anos.	5
Custo (U\$ milhões)	Os valores retratados, em caso de acidentes, foram relativamente altos. Não foram encontrados valores de confinamento sem acidentes.	5
Volume de RR (m ³)	Foi considerado que o volume de rejeitos seria o tamanho da instalação.	4
Viabilidade Técnica	O encapsulamento é tecnicamente possível.	3
Proteção Radiológica (IOE)	As doses do IOE serão reduzidas uma vez que não haverá o desmantelamento.	2
Proteção Radiológica-Público	Conforme retratado na literatura, a instalação, mesmo encapsulada, fornecem doses muito altas para o público.	5
Riscos Industriais	Os riscos industriais serão relativamente baixos.	2
Incerteza no regulamento	Indicada apenas em caso de acidentes e inviabilidade técnica.	5

Fonte: Autor.

8.3 Abordagens técnicas de gestão de rejeitos radioativos (RR)

Com base nas atividades técnicas de gestão de rejeitos radioativos descritas no Capítulo 7, foram identificadas dois grupos de abordagens que podem ser separadas nas atividades de gestão de RR. O primeiro grupo visa as atividades de segregação, tratamento e acondicionamento. O segundo visa as atividades de transporte e depósitos de rejeitos radioativos. Sendo assim, serão apresentadas 4 abordagens de gestão de RR e estas serão complementadas com as três de abordagens de depósitos de rejeitos (armazenamento).

A motivação para a separação nesses grupos de atividades é devido à independência da organização operadora para adotar uma das 4 abordagens para as atividades de segregação, tratamento e acondicionamento, enquanto o segundo grupo é dependente das definições da política de gestão de rejeitos do país. É sempre importante adotar uma análise de risco para avaliar cenários que possam mudar no futuro.

8.3.1 Abordagem Nº 1: Segregar, tratar e “reconcentrar” todos os tipos de rejeitos até não ser mais economicamente viável

A abordagem descrita tem como objetivo separar toda a parte de uma peça ou entulho que não está contaminada da parte contaminada, minimizando ao máximo o tamanho da peça desmantelada ou a quantidade de entulho para uma fração mínima. Essa fração contaminada é "reconcentrada" em lotes contendo outras pequenas partes de outros componentes que passaram pelo mesmo tratamento e, posteriormente, seguirão as mesmas rotas de descarte.

Dessa forma, os RR podem ser separados em classes adicionais para serem armazenados em diferentes embalagens. Além da separação entre as 4 classes estabelecidas pelo órgão regulador (1, 2.1, 2.4 e 3), seria possível separar esses rejeitos com base em outras características, como materiais perigosos, metais etc. Isso permitiria uma gestão diversificada dos rejeitos e a liberação de grande parte deles do controle regulatório em menor prazo, sem a necessidade de armazenamento a longo prazo. Apenas uma pequena parcela seria transferida para o repositório final.

Além disso, mesmo que o RR seja parcialmente descontaminado, é possível realizar o tratamento de metais radioativos por meio da técnica de fusão [81, 83]. No entanto, no Brasil, ainda não há instalações para tratar o material usando essa técnica, que visa derreter o material radioativo de baixo nível para fabricar blocos de blindagem ou recipientes de RR. Nesses casos, é possível exportar o material¹⁰ para realizar esse processo e receber o material "reciclado", mas os custos envolvidos devem ser considerados. Uma alternativa é desenvolver a tecnologia em território nacional por uma ICT e transferi-la para o setor produtivo.

Os pontos positivos dessa estratégia são [83]:

- a) a quantidade de volumes de RR será, relativamente, pequena;

¹⁰ A importação de rejeitos radioativos é proibida pelo Art. 36 da Lei 10.308/2001. No entanto, para a exportação de rejeitos radioativos, é necessário cumprir as exigências da Lei 9.112/95, que trata da exportação de bens sensíveis, e da Lei nº 7.781/1989, que trata das exigências formuladas pela Política Nacional de Energia Nuclear e diretrizes governamentais para a energia nuclear.

- b) a quantidade de volumes de rejeitos não radioativo a serem liberados será, relativamente, maior. Esses rejeitos podem ser reciclados ou reutilizados, como por exemplo os aços e concretos;
- c) alguns materiais podem ser liberados para alguns usos específicos com pequenas condições, como por exemplo, a grande quantidade de entulho que pode ser descartado em um depósito convencional de superfície podem ser usados para fabricação de blindagem biológica;
- d) os custos associados as embalagens, transporte, e armazenamento a longos prazos serão relativamente, baixos;
- e) possibilidade de distribuir os rejeitos para cada depósito específico; e
- f) doses de radiação mais baixas para o público e meio ambiente, inclusive no transporte.

Os pontos negativos são [83]:

- a) implica em esforços prologados de segregação e descontaminação e desmantelamento para minimizar a quantidade de RR;
- b) alto custo associado ao uso de técnicas de DD;
- c) necessidade de pessoal altamente qualificado e treinado;
- d) exige que sejam realizados investimentos em pesquisa e desenvolvimento;
- e) aumenta os riscos industriais; e
- f) doses de radiação mais alta para o IOE.

Essa abordagem foi identificada no reator de pequeno porte BR-3, na qual segregou e tratou todos os RR que consideraram economicamente viável. As técnicas de descontaminação utilizadas para minimizar ou eliminar a contaminação foram apresentadas no estudo de caso apresentado na seção 7.1.3.4 Estudo de caso – Descontaminação dos componentes do reator BR-3”. Tal abordagem permitiu que a instalação gerenciasse de forma mais eficiente seus RR, além de possibilitar a redução dos custos envolvidos na gestão desses materiais. No entanto, é importante lembrar que a viabilidade econômica deve ser avaliada caso a caso [81].

O vaso de pressão desse reator, componente mais ativado do descomissionamento, por exemplo, apresentou um volume de rejeitos de alto nível de 3,6m³, o volume de rejeitos de médio nível 4,8m³ e de rejeitos de baixo nível, 6,8m³. Foram necessárias nove remessas de transporte para enviar os rejeitos do vaso de pressão para o

depósito [81]. A instalação demonstrou que os custos envolvidos em adotar essa estratégia foram menores do que os custos de transporte e armazenamento. Além de economizar em recursos naturais e minimizar os volumes de RR [81].

Assim, na Tabela 33, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 33- Pontuações dos fatores associados na Abordagem RR nº1

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Tempo (anos)	Entre 9 e 15 anos.	2
Custo (US\$ milhões)	Foi considerado neste trabalho que devido à quantidade de material e equipamentos necessários, e o treinamento específico exigido para as atividades, bem como o número de processos envolvidos, o custo será relativamente elevado.	4
Volume de RR (m ³)	As atividades têm como o objetivo de reduzir ao máximo o volume de RR.	2
Viabilidade Técnica	A viabilidade é possível.	2
Proteção Radiológica (IOE)	É importante ressaltar que as doses de radiação ionizante recebidas pelos profissionais envolvidos no processo de descontaminação podem ser consideráveis, pois é necessário realizar o processo ao máximo para descontaminar e desmantelar o material.	4
Proteção Radiológica-Público	Foi entendido que, devido à maximização da reciclagem e à minimização dos rejeitos radioativos, é possível que as doses para o público sejam baixas.	2
Riscos Industriais	Os riscos industriais serão relativamente altos.	4
Incerteza no regulamento	Poucas incertezas.	2

Fonte: Autor.

8.3.2 Abordagem Nº 2: Segregar e tratar os RR de nível baixo, médio e alto

A segunda abordagem tem como objetivo separar os RR em dois grupos distintos.

O primeiro grupo seria composto por rejeitos contaminados com atividades de nível muito baixo ou com radioisótopos de meia vida muito curta (Classe 1), e esses rejeitos seriam separados e transferidos sem tratamento para depósitos com baixo grau de isolamento, ou para o sistema de coleta de resíduo urbano, ou até mesmo para reciclagem, a depender das condições radiológicas.

Já o segundo grupo seria composto por RR de nível baixo, médio e alto, que necessitariam ser tratados e, posteriormente, enviados para armazenamento de longo prazo em depósitos adequado.

Essa abordagem resultará na produção de uma grande quantidade de volume de rejeitos radioativos de baixo risco, pois esses rejeitos não serão tratados. Conforme o estudo de caso apresentado na seção 7.2.6 Estudo de caso: Considerações sobre volumes de rejeitos radioativos nos EUA”, esses rejeitos representam a maioria dos RR produzidos em usinas PWR.

Os pontos positivos dessa estratégia são [84]:

- a) os custos associados ao tratamento de RR de nível muito baixo será reduzido;
- b) minimiza as doses ocupacional;
- c) minimiza os riscos industriais; e
- d) necessidade de menos mão de obra para execução das atividades de tratamento.

Os pontos negativos são:

- a) a quantidade de volumes de rejeitos de nível muito baixo e de rejeitos com radionuclídeo de meia vida curta será, relativamente, alto;
- b) necessidade de previsão de depósitos que possam armazenar esses rejeitos;
- c) aumento de doses para o público, principalmente em virtude da alta quantidade de transporte; e
- d) alto custo com embalagens e transporte.

Essa abordagem foi identificada na usina nuclear de Trojan, na qual não tratou os RR menores do "nível baixo" de radiação. Esses rejeitos foram diretamente enviados para a instalação de descarte americana *US Ecology*, em Richland, Washington, especializada em receber rejeitos desse nível. Os custos envolvidos foram considerados baixos, principalmente devido à instalação possuir uma rota direta de transporte [25].

No entanto, é importante salientar que os benefícios financeiros dessa abordagem só serão vantajosos se o custo de embalagem e transporte forem menores do que o custo de tratamento. Portanto, uma análise de custo-benefício deve ser realizada para comprovar a viabilidade financeira dessa abordagem.

Assim, na Tabela 34, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 34- Pontuações dos fatores associados na Abordagem RR nº2

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Tempo (anos)	Entre 5 e 10 anos.	1
Custo (US\$ milhões)	Foi citado a experiência da usina nuclear de Trojan para argumentar que essa abordagem pode ter custos menores em comparação com a abordagem anterior. No entanto, é importante ressaltar que essa afirmação se baseia em um contexto específico e, portanto, seria necessário realizar uma análise de custo-benefício no cenário brasileiro para confirmar se essa abordagem seria financeiramente vantajosa.	3
Volume de RR (m ³)	Por não tratar a maioria dos RR produzidos, o volume será alto.	4
Viabilidade Técnica	Estratégia é viável, no entanto, é necessário que o depósito de RR tenha capacidade suficiente.	3
Proteção Radiológica (IOE)	As doses provavelmente serão menores do que na abordagem 1, já que menos RR serão tratados pelos IOE.	2
Proteção Radiológica-Público	Como haverá mais rejeitos a serem transportados e armazenados, as doses para o público serão maiores do que a abordagem 1.	4
Riscos Industriais	Os riscos industriais serão apenas para o tratamento dos rejeitos de nível baixo, médio e alto.	3
Incerteza no regulamento	Deve verificar se o órgão regulador permitirá não tratar esses rejeitos de nível muito baixo.	3

Fonte: Autor.

8.3.3 Abordagem Nº 3: Transferir os rejeitos radioativos para serem separados, tratados e acondicionados numa instalação especializada

Essa opção foi identificada no documento [28], no qual é proposta a transferência dos RR para uma instalação especializada em gestão de rejeitos. Essa instalação seria responsável por realizar todas as atividades necessárias, desde o tratamento até o armazenamento de longo prazo, e poderia receber rejeitos de outras instalações, centralizando assim a gestão dos rejeitos radioativos no país.

Essa abordagem seria altamente viável em situações em que uma grande quantidade de usinas nucleares estivessem próximas umas das outras, permitindo uma unidade de centralização para o processo de gestão de RR. Além disso, a instalação especializada no Brasil poderia ser subordinada, a princípio, à CNEN, que é atualmente a responsável por administrar e operar depósitos intermediários e finais no Brasil [65].

Uma alternativa seria criar uma empresa especializada para a gestão de RR, que ficaria responsável por essa atividade e poderia aprimorar técnicas de DD. Essa ideia já foi discutida no Brasil, conforme citado no trabalho do Dr. Roberto Frajndlich [19].

Entre as vantagens dessa abordagem, destacam-se a redução dos custos para cada instalação, já que não seria mais necessário investir em infraestrutura e equipamentos para

gestão de rejeitos, além da possibilidade de aproveitar a expertise e tecnologia da instalação especializada. Por outro lado, as desvantagens incluem a dependência de uma única instalação para a gestão dos rejeitos e a possibilidade de sobrecarga dessa instalação com a gestão de rejeitos de outras instalações.

Sendo assim, será apresentado um exemplo de atividades de gestão de RR realizada na Espanha, país que possui uma infraestrutura significativa para a gestão de RR seguindo a abordagem de centralização em uma instalação especializada.

A “*Empresa Nacional de Resíduo Radioativo*” da Espanha (ENRESA) é uma instituição nacional destinada a gestão de RR e a implementação do descomissionamento de usinas. Ela também é responsável pela captação de recursos financeiros necessários e da gestão do fundo do descomissionamento daquele país. Após o desligamento do reator e os tramites pós-operacionais, a instalação transfere a responsabilidade do descomissionamento para a ENRESA, como ocorreu no descomissionamento da planta nuclear de José Cabreira [28].

De modo a transferir os RR para a sua central, a ENRESA utilizou nas peças mais ativas (aquelas mais próximas ao núcleo), toneis fabricados em aço carbono e concreto de alta densidade. As partes menos ativas foram retiradas em cestos devidamente blindados e transferidos para o antigo prédio das turbinas, onde foram inseridas em contêineres apropriados para o transporte até o centro de eliminação da ENRESA na cidade de El Cabril, Córdoba, Espanha [28].

Algumas atividades de desmantelamento foram executadas na própria instalação pelo pessoal da ENRESA, como o desmantelamento do vaso de pressão do reator, que foi realizado de forma subaquática para após serem acondicionados e transportados para a ENRESA. A estimativa de custo do projeto de descomissionamento de José Cabrera, de acordo com o ISDC, foi de €258 milhões [28].

Assim, na Tabela 35, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 35- Pontuações dos fatores associados na Abordagem RR nº 3

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Tempo (anos)	Entre 5 e 10 anos.	1
Custo (US\$ milhões)	Foi entendido que a abordagem de centralização em uma instalação especializada é mais econômica do que outras opções devido à concentração de atividades de gestão e de pessoal. Além disso, destaca a importância da expertise e dedicação na atividade de gestão de RR, que pode ser alcançada por meio de uma instalação dedicada. O valor do projeto de José Cabrera também foi considerado baixo em relação a outros descomissionamentos.	2
Volume de RR (m ³)	Foi entendido que utilizando a expertise do pessoal e a provável quantidade de equipamentos adequados para as atividades de RR, a minimização é possível. No entanto, foi considerado que pode ser maior do que a abordagem nº 1.	3
Viabilidade Técnica	No Brasil, não há empresa que poderia centralizar essas atividades.	5
Proteção Radiológica (IOE)	Em virtude da capacitação dos RH, expertise e os equipamentos que a empresa possa possuir, entende-se ser possível minimizar as doses de IOE.	3
Proteção Radiológica-Público	Apesar de haver uma quantidade significativa de transporte de rejeitos radioativos, é importante destacar que os recipientes utilizados são adequados e apropriados para minimizar a exposição à radiação, reduzindo as doses recebidas pelos envolvidos no transporte e pela população em geral.	3
Riscos Industriais	Funcionários dedicados e treinados podem trazer menores riscos as atividades.	3
Incerteza no regulamento	Não existe empresa especializada.	5

Fonte: Autor.

8.3.4 Abordagem Nº 4: Confinar os RR no local

Essa abordagem, conhecida como "confinamento", é uma opção recomendável apenas em casos excepcionais, como acidentes graves em que não há outra solução viável de gestão dos RR, ou em situações em que não há possibilidade técnica de DD [84].

Nessa abordagem, os componentes radioativos são preenchidos com concreto e enterrados em um local que deve possuir características específicas, como distância adequada de áreas urbanas, ausência de lençóis freáticos próximos e reduzido risco de acidentes graves. Para garantir a segurança, são implementadas barreiras adicionais, como a blindagem subterrânea. No entanto, essa abordagem deve ser considerada como última opção e somente após análise criteriosa das possibilidades de alternativas mais seguras e sustentáveis [101].

A instalação nuclear é totalmente encapsulada para que os radionuclídeos permaneçam confinados e decaiam a um nível que permita que a instalação seja liberada do controle regulatório, o que pode levar séculos. Essa instalação pode ser considerada um repositório de superfície [101].

Os pontos positivos é apenas os custos menores, enquanto que os pontos negativos são [101]:

- a) doses altas para o público;
- b) riscos ambientais catastróficos; e
- c) imagem do país será afetada.

Assim, na Tabela 36, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 36- Pontuações dos fatores associados na Abordagem RR nº 4

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Tempo (anos)	Maior que 100 anos.	5
Custo (US\$ milhões)	Os custos são relativamente baixos.	2
Volume de RR (m ³)	O volume de rejeitos é o próprio tamanho da instalação.	4
Viabilidade Técnica	Viável tecnicamente, no entanto, politicamente é inviável.	3
Proteção Radiológica (IOE)	Muito baixa.	1
Proteção Radiológica-Público	Muito Alta.	5
Riscos Industriais	Baixa.	2
Incerteza no regulamento	Somente em caso de acidentes.	5

Fonte: Autor.

8.3.5 Abordagem de armazenamento N° 1: Transferir os rejeitos radioativos para seus respectivos repositórios equivalentes

Essa abordagem visa transferir os RR para seus respectivos repositórios equivalentes, que devem ser construídos de maneira apropriada para garantir a segurança e a estabilidade dos materiais radioativos. É importante destacar que a escolha da localização desses repositórios deve ser feita considerando critérios técnicos e regulatórios, e que devem ser verificadas as rotas, distâncias, custos e riscos envolvidos em cada transporte.

Entretanto, no Brasil não há infraestrutura de repositório pronta para atender essa estratégia. Existe um projeto em andamento para a construção do Repositório Nacional de Rejeitos Radioativos (RBMB), porém ainda é incerto se estará pronto para receber os rejeitos

do descomissionamento. Por esse motivo, é importante adotar uma estratégia conservadora e não considerar essa opção até obter garantias de que o RBMN estará operacional antes do início das atividades de descomissionamento.

É possível que o repositório entre em funcionamento após início das atividades de operação. Nesse ponto, a estratégia inicial poderá ser reorganizada com a previsão de transferir os rejeitos de baixo e médio níveis para o RBMN.

Assim, na Tabela 37, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 37- Pontuações dos fatores associados na Abordagem de armazenamento nº 1

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Viabilidade Técnica	Não existe nenhum tipo de repositório em operação.	5
Segurança Física	Caso existisse o repositório, o país está capacitado para adequar a instalação e o transporte aos requisitos técnicos da AIEA.	3
Incerteza no regulamento	Dependente da Política Nuclear Brasileira (PNB).	5

Fonte: Autor.

8.3.6 Abordagem de armazenamento Nº 2: Transferir os rejeitos radioativos para um depósito intermediário

A abordagem de transferir para um depósito intermediário é uma opção na gestão de RR enquanto se aguarda a definição do local de deposição final, pois permite o armazenamento seguro dos materiais. Essa abordagem pode ser ainda mais eficiente se o depósito intermediário for localizado próximo às instalações, fornecendo flexibilidade e segurança na gestão do armazenamento.

Considerando o atual cenário, é importante ressaltar que o Brasil ainda não possui um depósito intermediário capaz de receber os RR provenientes do descomissionamento de usinas nucleares. A construção de um depósito intermediário para esse fim é uma etapa importante no projeto de descomissionamento, visto que os depósitos em operação não possuem capacidade para receber tais rejeitos.

Assim, na Tabela 38, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 38- Pontuações dos fatores associados na Abordagem de armazenamento nº 2

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Viabilidade Técnica	Apesar de existir depósitos intermediários, deve-se consultar a possibilidade de expansão. Além disso, as vias brasileiras oferecem pouca segurança para os endereços desses depósitos, sendo que alguns deles estão localizados em centros urbanos.	4
Segurança Física	Os depósitos estão localizados em instalações que já possuem mecanismo de segurança apropriado.	2
Incerteza no regulamento	Deve-se consultar o órgão regulador.	3

Fonte: Autor

8.3.7 Abordagem de armazenamento Nº 3: Transformar o depósito inicial em repositório

Conforme norma regulamentadora da CNEN [66], é requisito que a instalação inclua no projeto de construção da usina um local para armazenamento inicial dos RR. Este depósito inicial é destinado ao armazenamento de RR durante a operação da instalação cuja responsabilidade para administração e operação é da organização operadora.

Todavia, após a operação da instalação, os RR devem ser transferidos para um depósito final. A Posição Regulatória 1.26/001 da DRS – Gerenciamento de Rejeitos Radioativos em Usinas Nucleoelétricas [102] afirma que estes rejeitos podem permanecer nos depósitos iniciais até a construção do repositório ou até o início das operações de descomissionamento.

Neste caso, se o início das operações de descomissionamento ocorrer primeiro do que a construção do repositório, a instalação pode solicitar ao órgão regulador a transformação do depósito inicial em um depósito intermediário ou final. No entanto, além das adaptações técnicas necessárias, a instalação deve transferir a titularidade e responsabilidade do depósito para a CNEN, conforme determina a legislação em vigor.

Para adoção dessa abordagem, durante a fase de projeto da instalação, a organização operadora deverá prever e construir um depósito inicial com possibilidade de expansão e com estruturas adequadas para receber rejeitos de baixo e médio níveis. Isso se torna imprescindível quando o país não possui um repositório para receber esses materiais.

Assim, na Tabela 39, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 39- Pontuações dos fatores associados na Abordagem armazenamento nº3

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Viabilidade Técnica	Deve-se verificar se o local da instalação é seguro e adaptado.	3
Segurança Física	Os depósitos estão localizados na instalação onde já há mecanismos de segurança próprios.	2
Incerteza no regulamento	Deve-se consultar o órgão regulador.	3

Fonte: Autor

8.4 Abordagens administrativa de gestão de recursos humanos (RH) e conhecimento

No que se refere aos recursos humanos, a publicação da AIEA apresenta quatro abordagens para que as organizações operadoras realizem o processo de descomissionamento [88]. Algumas dessas abordagens foram identificadas nas experiências de descomissionamento e serão retratadas.

Os fatores que influenciam na escolha da abordagem de RH dependerão do tamanho do projeto de descomissionamento e se é permitida a transferência da licença ou responsabilidade. Independentemente da abordagem escolhida, é fundamental que o conhecimento e o histórico da fase de operação estejam disponíveis para a fase de descomissionamento [88].

A gestão de RH a ser adotada para o descomissionamento é normalmente definida durante a elaboração do PPD e deve ser mantida e atualizada ao longo da vida da instalação. É importante ressaltar que, mesmo com a escolha da abordagem de RH definida no PPD, podem ser necessárias mudanças ao longo do tempo [88].

No Brasil, existe a Norma Regulamentadora da CNEN NN 9.01, que estabelece os requisitos para o descomissionamento de Usinas Nucleoelétricas. De acordo com o item d) da Seção II dessa norma, a organização operadora deve apresentar ao órgão regulador, com antecedência de dois anos do fim da operação, o PFD, que deve incluir um plano de gerenciamento do descomissionamento contendo a estrutura organizacional, responsabilidades, recursos humanos necessários e treinamento adequado.

A capacitação adequada dos RH é fundamental para a conclusão do descomissionamento. Os funcionários responsáveis pelas atividades de DD devem possuir conhecimentos técnicos específicos da tecnologia adotada, como habilidades para manuseio remoto robótico de corte, embalagem e remoção de componentes altamente radioativos, bem como remoção de componentes pesados com o uso de guindastes. Além disso, é importante que tenham treinamentos nas áreas de garantia da qualidade, saúde, segurança e segurança

industrial, incluindo treinamentos sobre andaimes e escadas, espaços confinados, riscos e perigos, proteção contra incêndios, segurança elétrica e manuseio de materiais perigosos, entre outros [88].

8.4.1 Abordagem de RH N° 1: Organização operadora executa as atividades de descomissionamento

Essa abordagem é quando a organização operadora decide executar todas as atividades de descomissionamento com o próprio pessoal existente. Essa abordagem é adequada para casos pontuais, como, por exemplo, em países que não possuem empresas com experiência em atividades de descomissionamento, em organizações que preferem se especializar nas atividades de descomissionamento, prevendo descomissionar outras instalações no futuro, ou quando há necessidade de reter o conhecimento (de PI) durante o descomissionamento [88].

Os pontos positivos dessa abordagem são [88]:

- a) o risco de perda de conhecimento será minimizado;
- b) a organização poderá se especializar em atividades de descomissionamento; e
- c) será possível manter os empregos dos colaboradores por, pelo menos, até a conclusão do descomissionamento.

Os pontos negativos são [88]:

- a) o operador provavelmente não possui todas as competências necessárias para as atividades de descomissionamento, será necessário uma reorganização significativa e retreinamento do pessoal organizacional;
- b) falta de experiência em atividades industriais, principalmente aquelas relativas a construção civil (demolição de estruturas, técnicas de corte, etc); e
- c) funcionários da instalação se sentirão desmotivados em virtude do descomissionamento ser uma fase de “eliminação” da instalação, e assim, leva a uma sensação de destruição de seus empregos [93];

Foi identificada essa abordagem no descomissionamento do reator de pequeno porte BR-3, onde a organização responsável pelo reator, *Belgian Nuclear Research Centre* (SCK-CEN), assumiu a responsabilidade de realizar as atividades de descomissionamento do seu reator e adquiriu experiência relevante nas atividades de descomissionamento.

Um exemplo é o processo de descontaminação química MEDOC[®], relatado no Capítulo 7, que foi desenvolvido e patenteado pela empresa e depois transferido a tecnologia para uma planta industrial em parceria com a Framatome-ANP na França. Sendo assim, esse processo poderá ser utilizado em outros projetos de descomissionamento na Europa, com a possibilidade de reduzir a quantidade de volumes de rejeitos radioativos.

A SCK-CEN optou por realizar o descomissionamento do reator BR-3 com o seu próprio pessoal, adquirindo, assim, expertise em atividades como a elaboração de estratégias, estudos de avaliação de custos, técnicas de descontaminação e corte remoto, gestão de RR e avaliações ALARA [81]. Tornando-se referência na área e apta a aplicar seu conhecimento em futuros projetos.

Assim, na Tabela 40, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 40- Pontuações dos fatores associados na Abordagem RH nº 1

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Custo (milhões)	Foi considerado que o custo com o pessoal existente da instalação será elevado, em virtude de fatores como o nível salarial dos funcionários, números de treinamentos específicos necessários e a necessidade de cumprir as leis trabalhistas vigentes.	4
Disponibilidade Recursos humanos qualificados	Os operadores que atuam na rotina de operação da instalação possuem habilidades técnicas específicas que, muitas vezes, não são as mesmas necessárias para as atividades de descomissionamento. Sendo assim, é necessário que eles passem por um processo de requalificação, com foco nas atividades de DD, gestão de RR, dentre outras.	3
Conhecimento disponível	O conhecimento da instalação será alto. No entanto, em caso de desmantelamento protelado, deve-se adotar mecanismos de retenção do conhecimento.	2
Proteção à Propriedade Intelectual	Menor possibilidade de perda de conhecimento relacionado a propriedade intelectual.	2

Fonte: Autor.

8.4.2 Abordagem de RH Nº 2: Operador mantém o controle do projeto e delega atividades para empresas terceirizadas

Ao adotar essa abordagem, a organização operadora mantém a supervisão e a responsabilidade geral pelo projeto de descomissionamento, enquanto contrata terceiros especializados para realizar atividades específicas dentro desse processo. Isso permite que a organização se beneficie da experiência e dos recursos especializados dessas empresas terceirizadas, ao mesmo tempo em que mantém o controle estratégico e a tomada de decisões relacionadas ao descomissionamento. Essa abordagem pode ser adequada quando a

organização operadora deseja manter o controle do projeto ou quando a transferência não é permitida.

Essa abordagem reduz significativamente a quantidade de funcionários da organização operadora envolvidos na operação do projeto de descomissionamento, optando por contratar serviços de empresas especializadas para realizar a maior parte das atividades operacionais. Nesse modelo, o conhecimento e expertise são retidos pelos funcionários-chave da organização, que serão responsáveis por delegar as atividades específicas aos contratados. Dessa forma, a organização pode reduzir custos fixos relacionados aos funcionários e se beneficiar das habilidades especializadas dos contratados para executar as atividades necessárias.

Os pontos positivos dessa abordagem são [88]:

- a) o risco de perda de conhecimento é médio;
- b) empresas terceirizadas são especializadas nas atividades contratadas e podem agregar experiências e conhecimentos próprios; e
- c) será possível manter parte dos empregos dos colaboradores por, pelo menos, até a conclusão do descomissionamento.

Os pontos negativos são [88]:

- a) podem surgir problemas de PI;
- b) empresa terceirizada pode não possuir experiência em atividade com material radioativo; e
- c) empresa terceirizada pode declarar falência e não cumprir com as tarefas contratadas.

Essa abordagem foi identificada no plano de descomissionamento da planta nuclear de Loviisa, na Finlândia. Nesse plano, o pessoal da própria usina será encarregado da administração do projeto de descomissionamento, compreendendo atividades de planejamento e operação de processos que exigem um conhecimento especializado da usina.

No entanto, outras tarefas relacionadas ao descomissionamento serão contratadas separadamente ou subcontratadas. O plano de descomissionamento prever reaproveitar os operadores de Loviisa 1 para a fase de transição, pois essa usina desligará primeiro do que Loviisa 2 [28].

Na Tabela 41, são listadas as atividades a serem realizadas pela organização operadora e pela empresa contratada [28]. A tabela fornece uma visão geral das atividades atribuídas a cada uma das entidades envolvidas no projeto de descomissionamento. Ela detalha, nessa experiência [28], quais tarefas são responsabilidade da organização operadora

e quais serão executadas pela empresa contratada. Isso permite uma divisão clara de responsabilidades e ajuda no planejamento e na coordenação do trabalho.

Tabela 41- RH no descomissionamento de Loviisa

Fase	Organização Operadora	Empresa Contratada
Período de Transição	Operação e manutenção dos sistemas de processos necessários	Construção da estação de acondicionamento
	Tratamento de rejeitos de operação	Construção de estação de corte de rejeitos
	Transferência do combustível irradiado	Construção do depósito de rejeitos radioativos
	Desmontagem dos componentes internos do reator, Drenagem do circuito primário	-
	Proteção radiológica	-
	Serviços de escritórios	-
Descom.	Planejamento das medidas de descomissionamento	Desmantelamento de estruturas
	Supervisão e orientação das empreiteiras quanto ao destacamento e tratamento de material ativado e contaminado	Execução de atividades de gestão de rejeitos radioativos
	Operação e manutenção dos sistemas de processos necessários	Expansão de depósito de rejeitos radioativos
	Armazenamento e transporte do combustível irradiado e medidas de segurança relacionadas	Limpezas necessárias
	Proteção radiológica	-
	Transportes e disposição final dos rejeitos do descomissionamento	-

Fonte: [28].

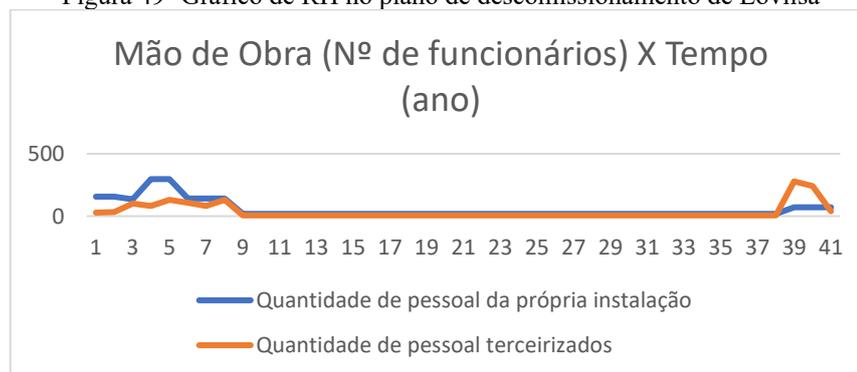
Na Tabela 42, é apresentado a previsão de pessoal tanto da organização operadora quanto da empresa contratada ao longo do tempo para executar os serviços citados na Tabela 41. Além disso, na Figura 49, é exibido um gráfico que representa a quantidade de pessoas em relação ao tempo. Isso ajuda a prever os RH necessários em diferentes fases do projeto, garantindo uma alocação adequada de pessoal para atender às demandas específicas de cada etapa.

Tabela 42- Quantidades de RH no Plano de descomissionamento de Loviisa

Ano após o fechamento de Loiivisa 1	Quantidade de pessoal da própria instalação	Quantidade de pessoal terceirizados
1 – (Transição)	156	29
2 – (Transição)	156	33
3– (Transição)	135	101
4	297	82
5	297	130
6	141	107
7	141	82
8	141	130
9	18	6
39	71	279
40	71	242
41	71	39
Total	1695	1260

Fonte: [28].

Figura 49- Gráfico de RH no plano de descomissionamento de Loviisa



Fonte: elaborado pelo autor com base nos dados da referência [28]

Por fim, na Figura 49, é mostrada graficamente a variação da quantidade de pessoas ao longo do tempo. Esse gráfico proporciona uma representação visual da distribuição do pessoal ao longo do projeto, permitindo uma compreensão rápida das mudanças na demanda de RH no início e no final do projeto. Assim, é possível analisar que nos primeiros anos após o desligamento, há uma previsão de maior quantidade de funcionários da organização operadora. No entanto, à medida que o projeto de descomissionamento avança e as atividades específicas de descomissionamento são iniciadas, a previsão é de um aumento na quantidade de funcionários da empresa contratada.

Conforme o projeto progride e entra na fase de descomissionamento efetivo, atividades como a remoção de equipamentos, tratamento de rejeitos e desmantelamento da

infraestrutura requerem habilidades especializadas que geralmente são fornecidas por empresas contratadas. Portanto, é esperado que haja uma maior presença de funcionários da empresa contratada nessa fase.

Assim, na Tabela 43, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 43- Pontuações dos fatores associados na Abordagem RH nº 2

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Custo (milhões)	Foi considerado que a combinação de pessoal da instalação e pessoal terceirizado é mais econômica em termos de custos. Isso se deve ao fato de que as empresas terceirizadas são especializadas nas atividades contratadas e podem trazer consigo experiência e conhecimento específico.	2
Disponibilidade Recursos humanos qualificados	Ao mesclar a equipe da instalação com funcionários terceirizados, a organização pode se beneficiar da expertise especializada dessas empresas, sem precisar manter uma equipe interna em tempo integral para todas as tarefas de descomissionamento.	2
Conhecimento disponível	Em virtude da redução de pessoal na instalação, há o risco de perda de conhecimento específico e experiência acumulada ao longo do tempo.	3
Proteção à Propriedade Intelectual	Possibilidade de perda de conhecimento relacionado a propriedade intelectual.	4

Fonte: Autor.

8.4.3 Abordagem de RH Nº 3: Operador e empresa contratada trabalham em parceria

A terceira abordagem consiste em uma parceria entre a organização operadora e uma instituição especializada [88]. Essa abordagem pode ser apropriada quando a organização operadora não pode transferir a licença, mas não deseja se envolver diretamente no processo ou precisa de apoio de uma ICT ou de uma empresa para executar o projeto de descomissionamento. Nesse cenário, os funcionários da organização operadora devem transmitir o conhecimento da planta para a empresa parceira [88].

Durante o processo, pode ocorrer o desenvolvimento de tecnologias ou processos que podem ser de propriedade da empresa parceira. Nesses casos, é fundamental estabelecer claramente no contrato as proteções e os direitos de propriedade envolvidos. Importante garantir que o conhecimento crítico seja transferido de forma adequada da organização operadora para a empresa parceira, a fim de garantir a continuidade eficiente do descomissionamento. Além disso, é necessário estabelecer termos contratuais claros que definam as responsabilidades, obrigações e direitos de ambas as partes.

Essa abordagem foi identificada na publicação da AIEA [88]. Assim, na Tabela 44, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para

essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 44- Pontuações dos fatores associados na Abordagem RH nº 3

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Custo (milhões)	É possível que a empresa parceira invista recursos financeiros no descomissionamento com o objetivo de desenvolver produtos ou tecnologias que possam ser comercializados na área de descomissionamento. Nesse caso, foi considerado que os custos relativos ao RH podem ser compartilhados entre a organização operadora e a empresa parceira.	3
Disponibilidade Recursos humanos qualificados	É possível que tanto a empresa parceira, como a instalação, necessite de treinamento específico para o descomissionamento.	4
Conhecimento disponível	É possível que o conhecimento da instalação seja perdido em função da perda de pessoal próprio da instalação.	3
Proteção à Propriedade Intelectual	Nesse tipo de parceria, é comum que a empresa parceira detenha os direitos de propriedade intelectual sobre os produtos, processos ou tecnologias desenvolvidas durante o projeto de descomissionamento. Isso ocorre porque a empresa parceira investiu recursos financeiros e dedicou esforços para o desenvolvimento dessas soluções específicas.	4

Fonte: Autor.

8.4.4 Abordagem de RH Nº 4: Operador transfere as atividades de descomissionamento para uma empresa especializada

A quarta abordagem ocorre quando a organização operadora transfere a responsabilidade do descomissionamento para uma empresa especializada [88]. Nesse cenário, é essencial que o conhecimento especializado em descomissionamento seja complementado pelo conhecimento específico da instalação. Nesse contexto, é necessário considerar a proteção da propriedade intelectual e do conhecimento envolvidos.

No Brasil, a norma CNEN NN 9.01 estabelece que a responsabilidade pelo descomissionamento não pode ser delegada a terceiros. Assim, em cumprimento com a norma, a organização operadora é a responsável pelo descomissionamento de instalações nucleares. Apesar de não ser permitida a transferência da responsabilidade do descomissionamento no Brasil de acordo com a norma CNEN NN 9.01, é válido ressaltar que a abordagem de centralizar as atividades de descomissionamento em uma instalação especializada pode ser considerada interessante em outros contextos.

A centralização das atividades de descomissionamento em uma instalação especializada traz potenciais benefícios, como a concentração de conhecimento especializado, o desenvolvimento de processos otimizados e a utilização de recursos

dedicados exclusivamente ao descomissionamento. Essa abordagem pode resultar em uma execução mais eficiente e efetiva do projeto de descomissionamento no futuro.

Os pontos positivos dessa abordagem são [88]:

- a) a empresa especializada pode ter um conhecimento significativo de descomissionamento; e
- b) a empresa especializada terá uma cadeia de suprimentos adequada.

Os pontos negativos dessa abordagem são [88]:

- a) alto risco de perda de conhecimento durante a transição;
- b) nenhum retorno de conhecimento para o operador; e
- c) o acesso a dados detalhados da instalação pode ser limitado.

Essa abordagem foi identificada no projeto de descomissionamento do reator José Cabrera. Nesse caso específico, a transferência da responsabilidade do descomissionamento foi permitida pelas autoridades espanholas. O Ministério da Indústria daquele país concedeu a autorização para o projeto de descomissionamento, reconhecendo a capacidade da ENRESA, empresa especializada em gestão de RR na Espanha, para assumir a responsabilidade pela usina [28].

Durante o processo de descomissionamento, a estrutura organizacional do projeto contou com um máximo de 250 funcionários, incluindo pessoal de engenharia, manutenção e aqueles encarregados de realizar as atividades específicas do descomissionamento. Ao compararmos com a abordagem adotada na planta nuclear de Loviisa, que possui uma capacidade de 500MWe, observa-se que o número máximo de funcionários no projeto de descomissionamento foi de 427, e por períodos mais longos [28].

Dos 250 funcionários envolvidos no projeto de descomissionamento, alguns são funcionários da ENRESA, outros são funcionários que trabalharam na instalação durante a fase de operação e há funcionários de empresas especializadas contratadas para o projeto. Todos esses funcionários ficam sob a responsabilidade da ENRESA [28].

Assim, na Tabela 45, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 45- Pontuações dos fatores associados na Abordagem RH n° 4

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Custo (milhões)	Foi entendido que por compartilhar a mão de obra para vários projetos de descomissionamento, o que pode ocorrer ao mesmo tempo, é mais econômico.	1
Disponibilidade Recursos humanos qualificados	Os RH são dedicados as atividades de descomissionamento.	2
Conhecimento disponível	A instalação deverá transferir o conhecimento da instalação para a empresa especializada.	3
Proteção à Propriedade Intelectual	Os desenvolvimentos de PI serão, provavelmente, da empresa especializada.	4

Fonte: Autor

8.5 Abordagens administrativa de gestão financeira

Com base nas atividades administrativas de gestão financeira apresentadas no Capítulo 7, foram identificados dois grupos de abordagens que podem ser separados. O primeiro grupo visa os métodos de estimativa de custos, enquanto o segundo grupo visa as atividades de gestão de fundos.

Para as abordagens de estimativa de custo, foi utilizada como base a publicação *"The Practice of Cost Estimation for Decommissioning of Nuclear Facilities"* [30], produzida pela OECD/NEA. Essa publicação abrange diversas experiências e abordagens para estimativas de custos de descomissionamento, com foco em usinas nucleares PWR e BWR. O documento serve como um guia prático, fornecendo orientações específicas para a preparação de estimativas de custos e cronogramas, a fim de auxiliar no orçamento detalhado e na elaboração de planos de descomissionamento.

Com base nessa publicação, serão retratadas quatro abordagens de estimativa de custo. Essas abordagens variam de acordo com o grau de definição do projeto, o estado da arte do projeto, a disponibilidade de banco de dados, a estimativa de tempo e custo, bem como o nível de dados de engenharia disponíveis.

Já para as abordagens de gestão de fundo, será usada como base a publicação *Financial Aspects of Decommissioning* [31] da AIEA e o uso da técnica do processo de avaliação de risco "Análise de Cenários". Os fatores identificados que influenciam na escolha entre as abordagens para a gestão de fundos no descomissionamento são: riscos financeiros; flexibilidade; disponibilidade e investimentos e transparência [31].

Para analisar o comportamento do fundo e fornecer simulações ilustrativas, será apresentado um exemplo hipotético por meio de uma Análise de Cenários nas abordagens

de gestão de fundos. É importante mencionar que esses cenários considera uma certa estabilidade nos índices de inflação e rendimento, no entanto, levando em consideração as oscilações dos índices econômicos no cenário brasileiro nos últimos anos, essa estabilidade pode se tornar pouco provável. Em uma situação real, os gestores deverão realizar ajustes na captação, investimentos e outras alterações para manter o equilíbrio das contas durante essas oscilações. Essa análise de cenário visa demonstrar o comportamento do fundo de descomissionamento em relação ao custo do projeto.

O cenário hipotético analisa um reator que estimou o custo de descomissionamento atual em torno de U\$ 700 milhões. Esse valor é corrigido anualmente por uma taxa hipotética de custo anual de 5% (incluindo inflação, mão de obra, preço de equipamentos, entre outros). Ao final de 60 anos, o custo estimado do descomissionamento seria de U\$ 12.452 milhões. As abordagens de gestão de fundo irão retratar os métodos utilizados para alcançar o custo do descomissionamento ao longo de um período de até 60 anos.

8.5.1 Abordagem de estimativa de custo N° 1: Técnica bottom-up baseada numa Estrutura Analítica de Projeto (EAP) com vinculação dos itens da ISDC

Essa abordagem foi desenvolvida pela empresa Thomas LaGuardia (TLG) e foi apresentada no *Atomic Industrial Forum (AIF)*. Essa abordagem é similar e segue a mesma lógica utilizada para estimativa de custos em outros tipos de projetos [28].

Nesse sentido, um projeto de descomissionamento pode ser dividido em grupos de atividades distintas e mensuráveis. Essa divisão proporciona um nível de detalhamento adequado para que a estimativa de uma atividade específica possa ser aplicada a todas as ocorrências dessa atividade. O processo envolve a divisão do projeto em componentes de nível mais baixo da Estrutura Analítica do Projeto (EAP), conhecidos como pacotes de trabalho ou tarefas [89]. Em seguida, estima-se a quantidade de mão de obra, materiais, consumíveis e a duração de cada pacote de trabalho, para então agregá-los em uma estimativa completa.

A vantagem dessa abordagem é que ela permite estimativas de custos mais precisas, pois leva em consideração o inventário físico e radiológico, os custos de mão de obra e os materiais específicos, levando em consideração as características locais no decorrer do tempo. No entanto, uma desvantagem é o esforço excessivo necessário para o detalhamento e cálculos envolvidos na previsão dessas estimativas.

A estrutura de custos da EAP desenvolvida pela TLG difere da estrutura de custos do *International Structure for Decommissioning Costing* (ISDC) [28]. Essas diferenças estão principalmente nas estruturas dos itens e nas categorias de custos apresentadas. No entanto, o nível de definições básicas da estrutura do ISDC pode servir como base para a elaboração de uma EAP, vinculando os itens do ISDC aos itens da EAP. O Apêndice 3.A2 do documento de referência traz um estudo de vinculação de dados do modelo EAP para o modelo ISDC [28].

Assim, na Tabela 46, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 46- Pontuações dos fatores associados na Abordagem de estimativa de custo nº 1

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Tempo de implementação	Foi considerado que essa estimativa é mais completa e necessita de informações e tempo de projeto mais detalhado.	4
Custo de implementação	Em virtude da complexibilidade, dos dados necessários e da realização de um planejamento completo e detalhado, foi entendido que o custo é muito alto. Em relação ao ISDC, o planejamento de alguns projetos alcançaram o valor acima de U\$ 150 milhões [28].	5
Nível de erro de precisão	-5 a 15% de acordo com a referência [30].	1
Dificuldade	Alta.	4
Incertezas no regulamento	Poucas incertezas em virtude ao detalhe de informações a serem disponibilizadas.	1

Fonte: Autor.

8.5.2 Abordagem de estimativa de custo Nº 2: Técnica de analogia específica baseada em ISDC

Conforme mencionado no documento [30], "as analogias específicas dependem do custo conhecido de um item utilizado em estimativas anteriores como base para estimar o custo de um item similar em uma nova estimativa" [30]. Dessa forma, é possível estimar a duração e o custo de um item ao compará-lo com o mesmo item de outro projeto, fazendo os devidos ajustes para a realidade da usina e da localização.

A vantagem dessa abordagem é que as estimativas são, relativamente, precisas, desde que as estimativas anteriores sejam devidamente ajustadas para a realidade da planta em questão. No entanto, uma desvantagem é que os ajustes necessários podem exigir documentações detalhadas e envolver aproximações que podem reduzir a precisão das estimativas.

A estimativa por analogia específica requer uma avaliação detalhada das diferenças entre o projeto anterior e o atual, que incluem questões de tamanho, diferença de complexibilidade, custos de mão de obra, ajustes de inflação e regulatórias.

No Brasil, atualmente não existem dados de estimativas de custos específicos para projetos de descomissionamento. No entanto, a publicação "*Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants*" [28] da OECD/NEA fornece uma discriminação de custos baseada no padrão ISDC de várias usinas nucleares em processo de descomissionamento.

Esses dados foram obtidos por meio de uma pesquisa respondida por alguns países membros da OECD/NEA, que forneceram informações sobre os custos previstos para cada item da estrutura. Embora esses dados sejam de diferentes países e usinas, eles podem ser usados como referência para fins de comparação e para a realização de estimativas de custo, levando em consideração as diferenças específicas de cada país e usina. A tabela de custos de Nível 1 do ISDC de oito usinas nucleares é apresentada na Figura 50.

Figura 50- ISDC - Custo de projetos de descomissionamento em US\$

Name	ID	MWe	ISDC Level 1 - items											Total
			01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	
José Cabrera	ES-P1	160	16.9	5.3	N/R	55.5	12.8	87.2	19.6	69.5	-	55.1	18.8	340.6
Generic - ESP	ES-P2	1 066	18.2	1.5	N/R	70.3	22.6	89.7	108.6	95.3	-	-	11.3	417.5
Generic - CH	CH-P1	1 000	57.8	481.2	N/R	96.4	116.9	338.1	46.8	55.8	-	-	7.6	1 200.6
Generic - FR	FR-P1	3 600/4	-	30.4	N/R	149.4	69.0	21.4	31.7	30.0	-	-	33.1	365.0
S M Garona	ES-B1	466	18.2	4.2	N/R	64.4	18.6	123.7	28.0	52.7	-	-	13.7	323.6
Generic - ESB	ES-B2	1 092	17.9	1.5	N/R	74.4	34.0	87.3	109.9	88.7	-	-	11.2	424.8
Loviisa	FI-V1	976/2	-	38.6	N/R	105.2	20.0	7.1	0.0	5.5	-	-	60.5	236.9
Bohunice	SK-V1	880/2	31.1	39.6	N/R	96.0	215.5	96.6	123.5	120.9	-	18.1	11.7	753.0

ESB = Spain BWR; ESP = Spain PWR; N/R = Not received.

Fonte: [28].

Assim, na Tabela 47, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 47- Pontuações dos fatores associados na Abordagem de estimativa de custo nº 2

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Tempo de implementação	Foi considerado que essa estimativa pode ser realizada em um menor tempo do que a abordagem nº 1.	3
Custo de implementação	Foi entendido que o custo é relativamente menor do que a abordagem nº 1.	3
Nível de erro de precisão	-15 a 30% de acordo com a referência [30].	2
Dificuldade	Média.	3

Incertezas no regulamento	Algumas incertezas em virtude ao detalhe de informações analisadas.	2
---------------------------	---	---

Fonte: Autor.

8.5.3 Abordagem de estimativa de custo N° 3: Técnica paramétrica baseada em dados estatísticos

A abordagem de estimativa paramétrica visa utilizar dados históricos dos sistemas ou subsistemas equivalentes para prever os custos de uma determinada atividade por meio de algoritmos ou técnicas de estatísticas [30].

Nesse sentido, a abordagem requer o uso de banco de dados para encontrar correlações entre os custos e outros parâmetros do sistema. Como, por exemplo, a quantidade de rejeitos gerados e seu custo futuro por m², m³, por quilo, etc. A análise produz equações de custo ou relações de estimativa de custo que podem ser usadas individualmente ou agrupados em modelos mais complexos.

Os modelos são uteis para estimativas de custo em locais grandes onde o inventário detalhado não estão prontamente disponível, entretanto pode introduzir erros em virtude de aproximações em áreas ou volumes, pois não há como rastrear o valor real.

Assim, na Tabela 48, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 48- Pontuações dos fatores associados na Abordagem de estimativa de custo n° 3

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Tempo de implementação	Foi considerado que essa estimativa levaria alguns anos para ser realizada.	4
Custo de implementação	Foi considerado que o custo para implementação é alto, pois deve envolver equipamentos, softwares e materiais para realizar cálculos precisos para a estimativa de custo.	4
Nível de erro de precisão	-30 a 50% de acordo com a referência [30].	3
Dificuldade	Alta.	4
Incertezas no regulamento	Algumas incertezas em virtude ao detalhe de informações analisadas.	2

Fonte: Autor

8.5.4 Abordagem de estimativa de custo N° 4: Técnica de opiniões de especialistas

Essa abordagem visa consultar vários especialistas, solicitando, independentemente uma estimativa de custos até que uma estimativa consensual de custo

seja estabelecida [30]. Essa estimativa pode ser usada em casos emergenciais ou quando é por decisão da organização. Ela pode não refletir a estimativa de produtividade de tarefas menores limitações radiológicas do projeto e outros itens que possam “fugir” do conhecimento do especialista.

Assim, na Tabela 49, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 49- Pontuações dos fatores associados na Abordagem de estimativa de custo nº 4

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Tempo de implementação	O tempo é relativamente baixo.	2
Custo de implementação	Foi entendido que por somente solicitar a opinião sobre o custo do descomissionamento, o custo seja baixo.	2
Nível de erro de precisão	-30 a 50% de acordo com a referência [30]. Entretanto foi entendido que pode surgir maiores imprecisões.	5
Dificuldade	Baixa.	2
Incertezas no regulamento	Foi entendido que essa abordagem somente seria aceita pelo órgão regulador em casos de acidentes.	4

Fonte: Autor

8.5.5 Abordagem de gestão de fundo Nº 1: Gestão interna com captação de recursos por meio de taxas regulares baseada no método de “valor presente líquido” e mecanismos de saques restritos

Essa abordagem tem como objetivo manter a gestão do fundo sob responsabilidade da organização operadora, que captará recursos financeiros por meio de taxas regulares cobradas pelo serviço. Essas taxas são calculadas com base nas estimativas de custo do descomissionamento, nas taxas de rendimento e na inflação, prevendo o valor final necessário para o descomissionamento ao término da operação. Em casos de superávit, é possível realizar saques do fundo para estimular projetos de ciência e tecnologia voltados para atividades de descomissionamento. No entanto, esses saques são limitados, por exemplo, a 3% do valor total do fundo [31].

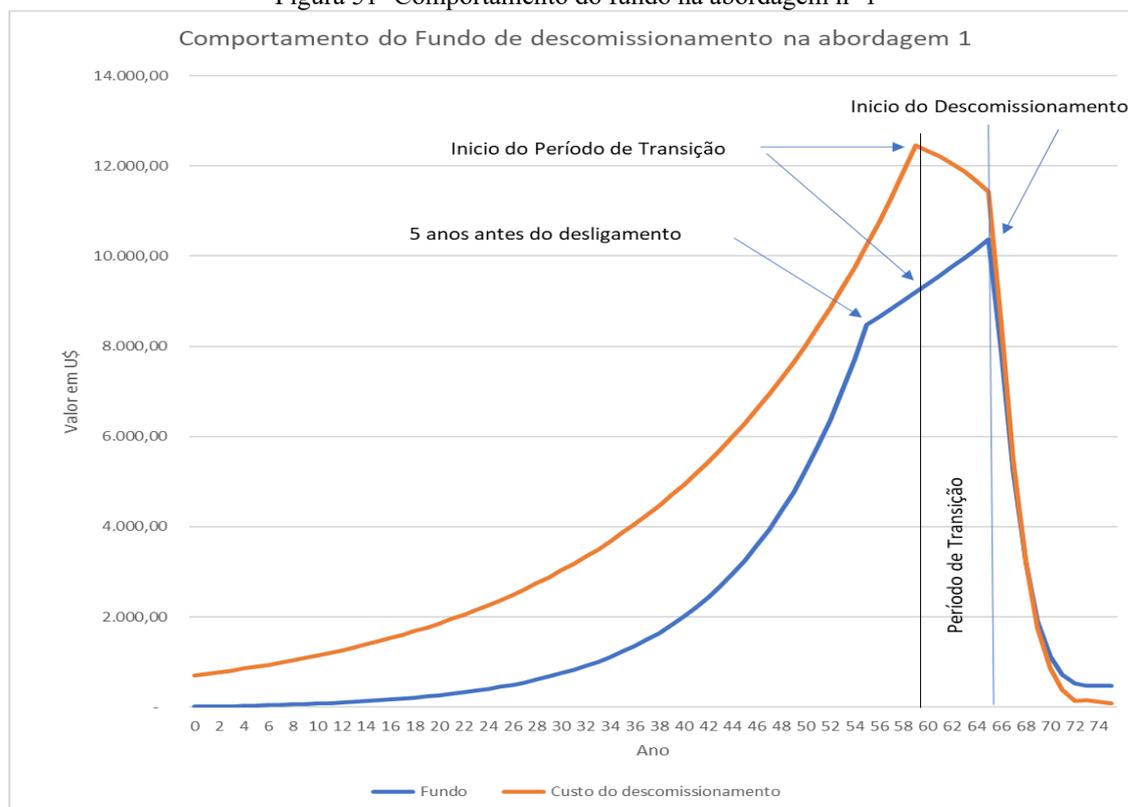
As vantagens dessa abordagem incluem maior flexibilidade no uso do fundo, redução das taxas de administração, valores regulares relativamente menores em comparação com outras abordagens, e a possibilidade de desenvolvimento de tecnologias inovadoras para o descomissionamento, o que pode resultar em redução de custos futuros.

No entanto, existem algumas desvantagens, como o aumento dos riscos associados ao desligamento prematuro, menor transparência na gestão do fundo e a necessidade de adotar técnicas para aumentar a confiança da população local no processo de descomissionamento [31].

Aplicando a técnica de análise no cenário hipotético citado anteriormente, para atingir esse valor por meio de uma taxa regular fixa e corrigindo o fundo acumulado com uma taxa de 10% ao ano, seria necessário um aporte anual de US\$ 4,1 milhões para alcançar o valor de US\$ 9.385 milhões em 60 anos. Embora esse valor ainda seja inferior ao custo total estimado, ele se aproximará do valor antes do início das atividades de descomissionamento. Os custos do fundo e os custos estimados se igualarão no início das atividades de descomissionamento.

Simulando saques para atividades de pré-ativação, desligamento e pesquisa e desenvolvimento (Níveis 1, 2 e 9 do ISDC), com base nas estimativas de custos apresentadas na Figura 50, considerando um período de saque de 5 anos antes do desligamento e 5 anos durante o período de transição, e um valor de saque anual de 8% do fundo para essas atividades, além de simular na estratégia de desmantelamento imediato com uma previsão de conclusão em 10 anos e uma média de retirada de 30% do fundo por ano após o início do descomissionamento, o comportamento ilustrativo e hipotético dessa abordagem terá um comportamento semelhante ao gráfico apresentado na Figura 51 e à Tabela 50 correspondente.

Figura 51- Comportamento do fundo na abordagem n° 1



Fonte: Autor

Tabela 50- Simulação dos valores do custo e do fundo na abordagem n° 1

Taxa Regular = 4,1 anual (Valores em milhões U\$)			
Ano	Fundo	Custo do descomissionamento	Saque
0	4,1	700,00	0
10	75,98	1140,23	0
20	262,41	1.857,31	0
30	745,97	3.025,36	0
40	2.000,00	4.927,99	0
50	5.253,33	8.027,18	0
55	8.485,57	10.244,94	678,85
60	9.385,99	12.339,27	750,88
65	10.362,89	11.438,32	3.500,31
70	1.124,16	855,24	520,88
75	479,54	73,55	33,56

Fonte: Autor.

Assim, na Tabela 51, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 51- Pontuações dos fatores associados na Abordagem de gestão de fundo nº 1

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Segurança no investimento	Foi considerado a segurança do investimento como uma variável média, uma vez que ela dependerá mais do contexto e cenário específico de cada instalação.	3
Flexibilidade para investir em CT&I	Como a gestão é interna, a instalação terá maior facilidade de aportar recursos em CT&I.	2
Riscos associados ao desligamento prematuro	Em virtude da captação baixa usando o método de “valor presente líquido”. Os riscos serão altos.	4
Transparência	Por ser interna, a transparência poderá ser baixa, uma forma de aperfeiçoar a transparência é criar regulamentos específicos relativos à governança da empresa.	4
Incertezas no regulamento	A norma permite a gestão interna.	2

Fonte: Autor.

8.5.6 Abordagem de gestão de fundo Nº 2: Gestão externa com captação dos recursos financeiros por um período mais curto, mantendo o método do valor presente sem mecanismo de saque

Essa abordagem transfere a responsabilidade da administração do fundo para um órgão gestor externo, independente da organização operadora. Nesse caso, o fundo fiduciário estaria sujeito a regras específicas que protegem seus recursos contra mau uso e riscos financeiros. A experiência financeira do órgão gestor pode contribuir para a diversificação e rentabilidade dos rendimentos do fundo e obter maiores retornos financeiros.

De forma a mitigar os riscos de desligamento prematuro, é viável captar um montante relativamente mais alto do que na primeira abordagem, a fim de minimizar possíveis lacunas de recursos. Uma vez que o montante necessário tenha sido obtido, não será mais necessário realizar captações nos anos subsequentes. No entanto, é importante acompanhar as taxas de inflação e o rendimento para evitar a desvalorização do fundo.

Essa abordagem permite apenas saques destinados exclusivamente ao descomissionamento, impedindo qualquer tipo de utilização de recursos para outras finalidades. Com base no cenário hipotético, para acumular os recursos necessários para o descomissionamento em um período de até 30 anos, levando em consideração os mesmos índices de inflação e taxas de rendimento, seria necessário um aporte anual de US\$17 milhões

nos primeiros 30 anos. O gráfico na Figura 52 e os dados na Tabela 52 apresentam os valores correspondentes a esse cenário.

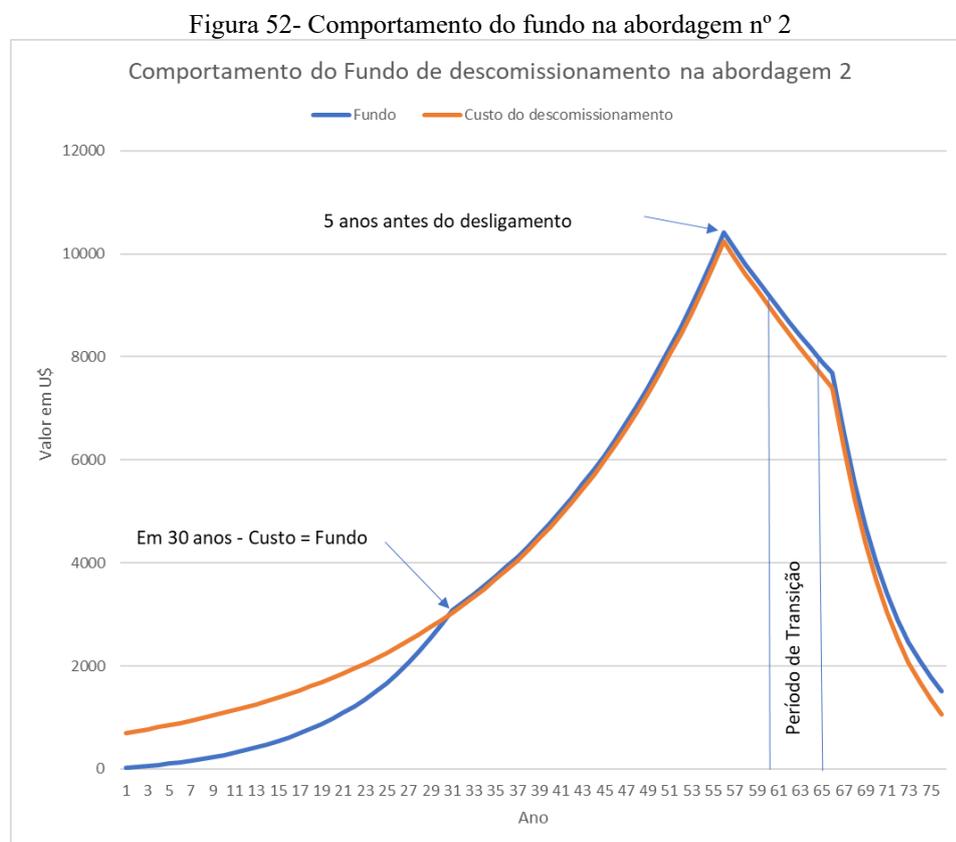


Tabela 52- Simulação dos valores do custo e do fundo na abordagem n° 2
Taxa Regular = 17 milhões anual (Valores em milhões US\$)

Ano	Fundo	Custo do descomissionamento
0	17,00	700,00
10	315,03	1.140,23
20	1.088,04	1.857,31
30	3.093,04	3.025,36
40	5.038,23	4.927,99
50	8.206,75	8.027,18
60	13.367,93	13.075,43

Fonte: Autor.

Assim, na Tabela 53, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 53- Pontuações dos fatores associados na Abordagem de gestão de fundo nº 2

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Segurança no investimento	Foi considerado a segurança do investimento como alta, uma vez que os gestores externos têm mais experiência nos investimentos em vários cenários.	2
Flexibilidade para investir em CT&I	Como a gestão é externa, a instalação terá menor facilidade ou não poderá utilizar para aportar recursos em CT&I.	4
Riscos associados ao desligamento prematuro	Em virtude da captação de recursos alta no início de operação.	2
Transparência	Alta. O gestor externo deverá apresentar relatórios periodicamente.	2
Incertezas no regulamento	A norma permite a gestão externa.	2

Fonte: Autor.

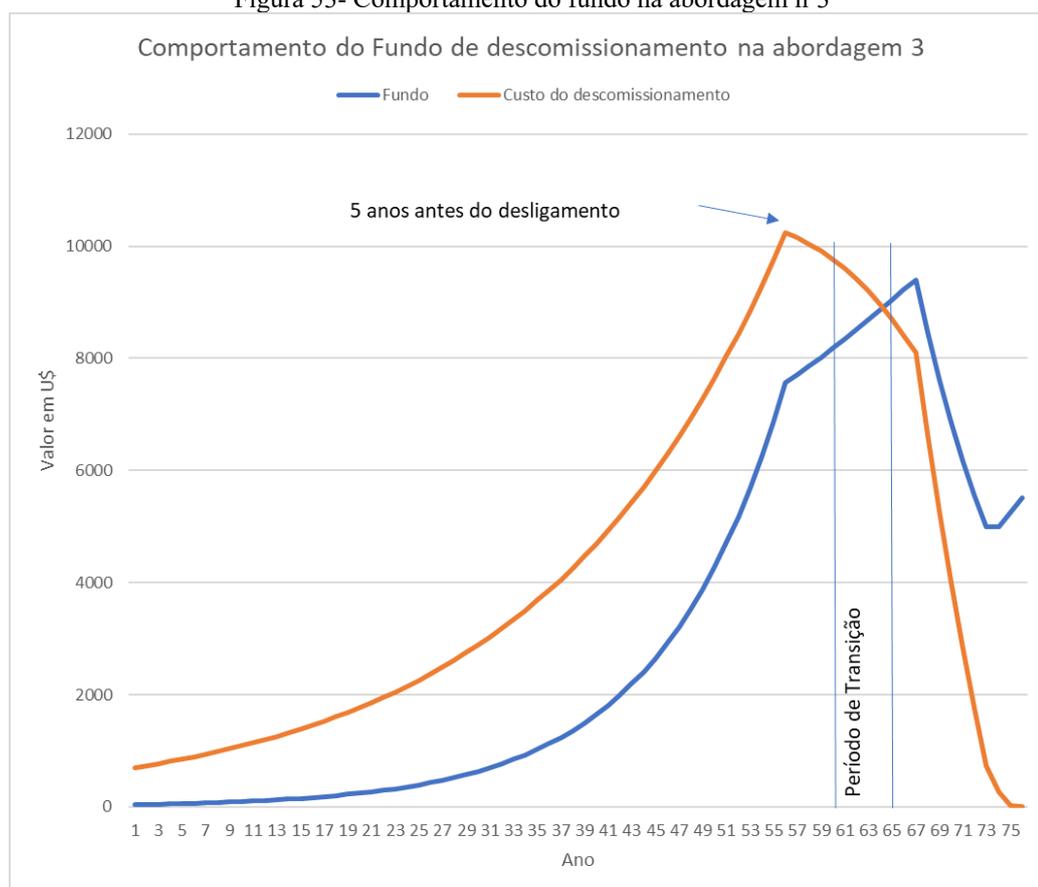
8.5.7 Abordagem de gestão de fundo Nº 3: Gestão interna ou externa, captando valor montante inicial mantendo o método de “valor presente líquido” sem mecanismo de saque

Essa abordagem é vantajosa para garantir recursos financeiros antecipadamente ou quando são exigidas garantias para mitigar os riscos financeiros de um desligamento precoce.

Nesse caso, o projeto de descomissionamento seria pago em uma única parcela ou em uma parcela significativa, como se fosse uma taxa de licença para autorizar o funcionamento. Dependendo do valor pago, pode não ser mais necessário obter recursos regularmente ou ser necessário apenas complementar com frações menores. Isso garantiria que os recursos necessários estariam disponíveis ao início das atividades de descomissionamento.

Com base no cenário hipotético, para obter os recursos necessários para o descomissionamento, levando em conta os mesmos índices de inflação e taxas de rendimento do cenário hipotético, considerando um aporte inicial de cerca de 6% (US\$40 milhões), não seria mais necessário realizar aportes anuais. Na Figura 53 e na Tabela 54, é apresentado o gráfico e os valores correspondentes a esse cenário.

Figura 53- Comportamento do fundo na abordagem nº3



Fonte: Autor

Tabela 54- Simulação dos valores do custo e do fundo na abordagem nº 3

Taxa único inicial = 40,00 (Valores em milhões US\$)			
Ano	Fundo	Custo do descomissionamento	Saque
0	40,00	700,00	0
10	103,75	1.140,23	0
20	269,10	1.857,31	0
30	697,98	3.025,36	0
40	1.810,37	4.927,99	0
50	4.695,63	8.027,18	0
55	7.562,37	10.244,94	604,99
60	8.349,46	9.602,78	667,96
65	9.218,48	8.421,76	737,48
70	6.169,21	2.838,77	1.233,84
75	5.509,26	0	275,46

Fonte: Autor.

Assim, na Tabela 54, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 55- Pontuações dos fatores associados na Abordagem de gestão de fundo nº 3

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Segurança no investimento	Como não haverá captação regular, a dependência no investimento será alta, tornando essencial evitar erros, uma vez que não haverá mais oportunidade de captar recursos adicionais.	4
Flexibilidade para investir em CT&I	Em virtude de não comprometer o acúmulo dos fundos, o investimento em CT&I será baixo, quando na gestão externa.	4
Riscos associados ao desligamento prematuro	Em virtude da captação inicial, os riscos são minimizados.	2
Transparência	Quando externa é alta. O gestor externo deverá apresentar relatórios periodicamente.	2
Incertezas no regulamento	Deve-se consultar o órgão regulador.	3

Fonte: Autor.

8.5.8 Abordagem de gestão de fundo Nº 4: Gestão interna, captar recursos apenas no início do descomissionamento

Essa abordagem tem como objetivo financiar o projeto de descomissionamento sem a necessidade de criar um fundo específico. Geralmente, é adotada por estatais ou instituições que não se planejaram previamente para o descomissionamento. Os recursos são obtidos por meio de alocação no orçamento público à medida que surgem as despesas. No entanto, captar os recursos apenas no início do descomissionamento não é uma prática recomendada, devido aos riscos associados e aos custos mais elevados que seriam incorridos no projeto.

Assim, na Tabela 56, estão as pontuações atribuídas neste trabalho correspondente aos fatores relevantes para essa abordagem, contendo as considerações e justificativa da pontuação específica para a posterior análise utilizando a técnica MCDA.

Tabela 56- Pontuações dos fatores associados na Abordagem de gestão de fundo nº 4

Fatores	Considerações / Justificativas	Pontuação
Segurança no investimento	Não haverá investimento.	5
Flexibilidade para investir em CT&I	Não haverá recursos.	5
Riscos associados ao desligamento prematuro	O orçamento público arcará com possíveis desligamentos prematuros.	4
Transparência	Baixa.	4
Incertezas no regulamento	Muito Alta.	5

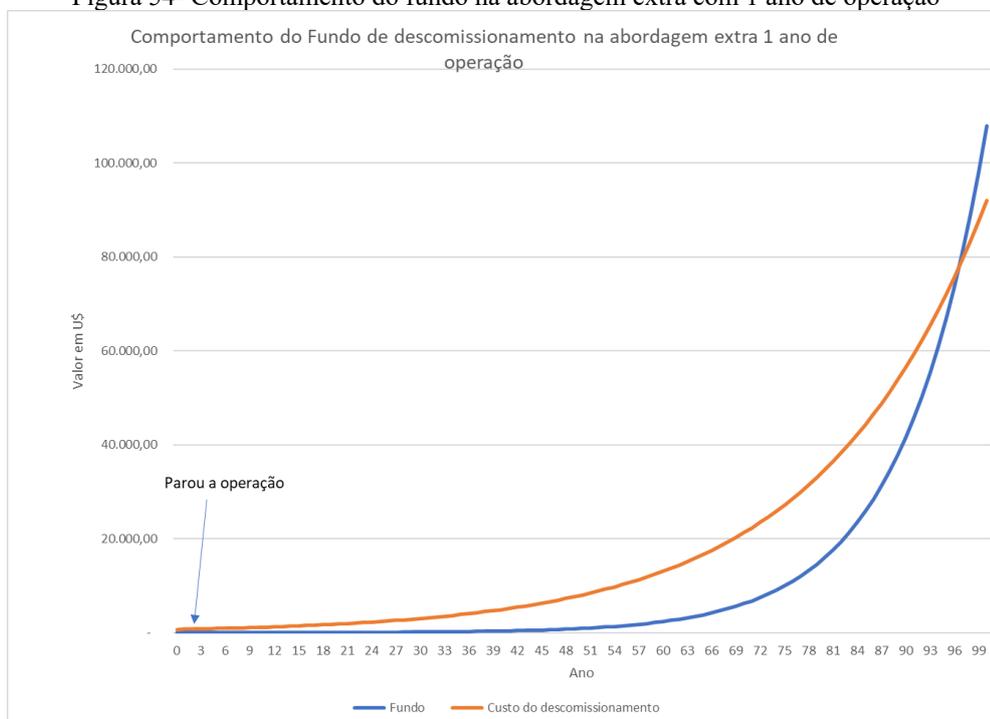
Fonte: Autor

8.5.9 Abordagem de gestão de fundo Extra: Abordagem 1 com simulação em caso de desligamento prematuro com 1, 10 e 30 anos de operação

Essa abordagem tem como objetivo demonstrar a possibilidade de alterar a estratégia de descomissionamento em caso de desligamento prematuro não planejado da instalação e como os fundos podem ser acumulados para obter os recursos necessários, sem depender de fontes externas de financiamento. No entanto, é importante realizar uma análise completa do problema para avaliar os custos de manter a instalação em armazenamento seguro e econômico até que o fundo atinja o montante necessário para o descomissionamento.

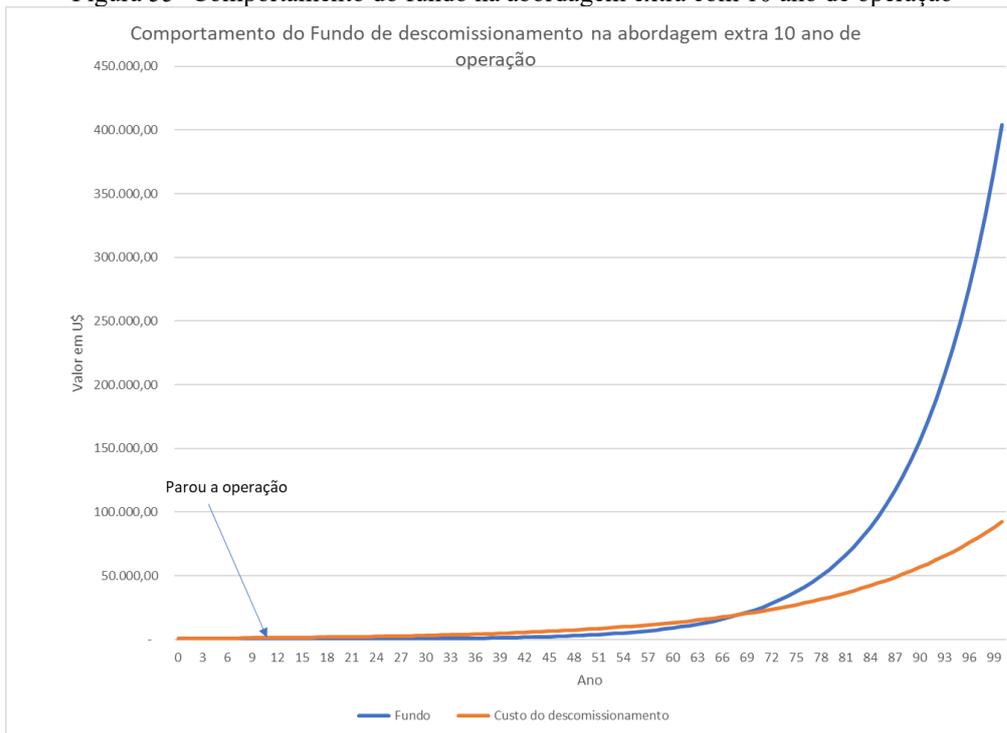
Nesse sentido, para simular um possível desligamento prematuro da usina em diferentes períodos de operação (1, 10 e 30 anos), considerando um custo de descomissionamento inicial de US\$ 700 milhões e um aporte anual de US\$ 4,1 milhões para o fundo, seria necessário aguardar respectivamente 100, 69 e 58 anos para que o rendimento do fundo seja suficiente para iniciar o descomissionamento. Esses comportamentos são ilustrados nos gráficos na Figura 54, na Figura 55 e na Figura 56.

Figura 54- Comportamento do fundo na abordagem extra com 1 ano de operação



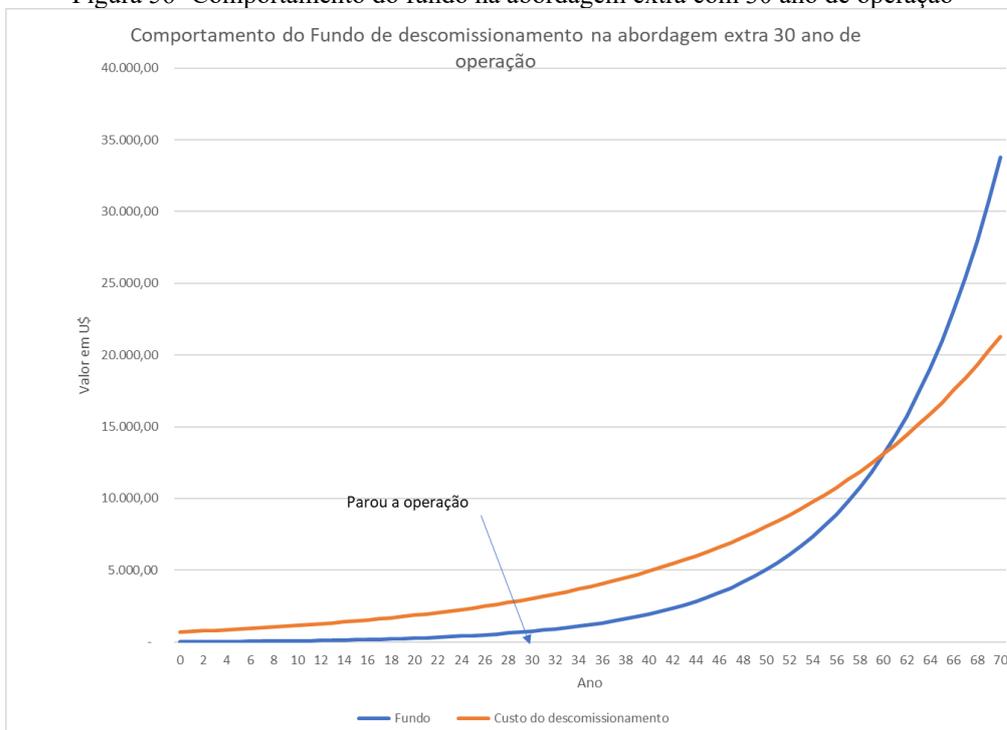
Fonte: Autor.

Figura 55- Comportamento do fundo na abordagem extra com 10 ano de operação



Fonte: Autor.

Figura 56- Comportamento do fundo na abordagem extra com 30 ano de operação



Fonte: Autor.

9 APRESENTAÇÃO DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA

A estratégia, conforme definida pelo dicionário brasileiro da língua portuguesa Michaelis, é a "arte de utilizar planejadamente os recursos de que se dispõe ou de explorar de maneira vantajosa a situação ou as condições favoráveis de que porventura se desfrute, de modo a atingir determinados objetivos" [103]. No contexto do descomissionamento, desenvolver uma estratégia significa criar um plano de descomissionamento abrangente e direcionado para alcançar os objetivos específicos do projeto. Envolve a utilização eficiente dos recursos disponíveis e a exploração das condições favoráveis para alcançar com sucesso a conclusão do descomissionamento.

A estratégia de descomissionamento deve ser elaborada na fase inicial do projeto de construção, antes mesmo de a instalação entrar em operação, e deve ser continuamente atualizada ao longo do tempo, acompanhando todo o ciclo de vida do descomissionamento, que pode abranger várias décadas. É essencial que a estratégia esteja alinhada com os requisitos regulatórios do país e com os requisitos técnicos estabelecidos. Além disso, é importante estar preparado para lidar com eventuais mudanças no contexto, como novas regulamentações ou avanços tecnológicos, e adaptar a estratégia de acordo com essas mudanças.

Com base em experiências de descomissionamento já realizadas ou propostas, além das recomendações de órgãos internacionais, foram identificadas diversas abordagens técnicas e administrativas de descomissionamento, conforme apresentado no Capítulo 8.

Para o desenvolvimento de estratégias de descomissionamento, utilizou-se a técnica da Análise de Decisão por Multicritério (MCDA), que é uma técnica do processo de avaliação de risco. Essa técnica foi a principal ferramenta utilizada na seleção das abordagens necessárias para o desenvolvimento das estratégias.

O processo de desenvolvimento das estratégias de descomissionamento envolveu a identificação de todas as atividades necessárias para o descomissionamento e a aplicação da técnica MCDA para a seleção das abordagens técnicas e administrativas. A seguir, serão apresentados detalhes sobre a técnica MCDA, a avaliação das abordagens identificadas e o processo completo de desenvolvimento das estratégias de descomissionamento.

9.1 Análise de decisão por multicritérios (MCDA)

A Análise de Decisão por Multicritério (MCDA) é uma técnica do processo de avaliação de risco que permite uma avaliação sistemática dos fatores associados para auxiliar

na tomada de decisão ao selecionar uma abordagem em relação a outra. Por meio dessa técnica, foi possível considerar diferentes fatores e pesos atribuídos a eles, permitindo uma análise mais fundamentada na escolha das abordagens. O conjunto das abordagens selecionadas, juntamente com as atividades obrigatórias, compõem a estratégia de descomissionamento.

O processo de uso da técnica, conforme a ABNT ISO/IEC 31010/2012 [33] adaptando para o contexto deste trabalho são:

- a) definir os grupos de abordagens;
- b) determinar os fatores que se relacionam a cada grupo de abordagens;
- c) estruturar os fatores dentro de uma hierarquia;
- d) identificar as opções para serem avaliadas em relação aos fatores;
- e) determinar a importância dos fatores nas abordagens e atribuir ponderações correspondentes a eles;
- f) avaliar as alternativas com relação aos fatores. Isto pode ser representado como uma matriz de priorização;
- g) combinar múltiplas pontuações de fatores únicos em uma única pontuação multiatributo agregada; e
- h) avaliar os resultados.

Podemos afirmar que os itens a, b, c, d e 'e' do processo da técnica foram abordados nos capítulos anteriores, fornecendo uma identificação detalhada dos fatores e das abordagens de descomissionamento. Nesses casos, incluíram fatores como tempo de implementação, custo, viabilidade técnica, riscos associados, entre outros. Cada fator foi ponderado de acordo com sua importância relativa consideradas neste trabalho com base na revisão bibliográfica realizada e conhecimento adquirido no curso de mestrado.

Agora, os itens f, g e h serão discutidos e desenvolvidos nas seções subsequentes, proporcionando uma visão abrangente do processo da técnica MCDA.

9.2 Grupo de abordagens

As abordagens apresentadas no Capítulo 8 podem ser resumidas em uma lista que inclui as respectivas pontuações atribuídas. Na Figura 57, é fornecido um resumo visual de todas as abordagens agrupadas, e na Tabela 57, na Tabela 58, na Tabela 59, na Tabela 60, na Tabela 61 e na Tabela 62 são exibidos o grupos de abordagens juntamente com suas

pontuações. Essas listas permitem uma comparação entre as abordagens com base nas suas pontuações, auxiliando na seleção da abordagem mais adequada.

Tabela 57 - Grupo de abordagens técnicas de DD

Abordagens	Tempo (anos)	Custo (U\$ milhões)	Volume de RR (m3)	Viabilidade Técnica	Proteção Radiológica (IOE)	Proteção Radiológica-Público	Riscos Industriais	Incerteza no regulamento
Nº 1	2	3	2	2	3	2	4	2
Nº 2	1	2	3	4	2	4	3	4
Nº 3	4	1	3	2	2	2	2	3
Nº 4	5	5	4	3	2	5	2	5

Fonte: Autor.

Tabela 58- Grupo de abordagens técnicas de RR

Abordagens	Tempo (anos)	Custo (U\$ milhões)	Volume de RR (m3)	Viabilidade Técnica	Proteção Radiológica (IOE)	Proteção Radiológica-Público	Riscos Industriais	Incerteza no regulamento
Nº 1	2	4	2	2	4	2	4	2
Nº 2	1	3	4	3	2	4	3	3
Nº 3	1	2	3	5	3	3	3	5
Nº 4	5	2	4	3	1	5	2	5

Fonte: Autor.

Tabela 59- Grupo de abordagens técnicas de armazenamento

Abordagens	Viabilidade Técnica	Segurança Física	Incerteza no regulamento
Nº 1	5	1	5
Nº 2	4	2	3
Nº 3	3	2	3

Fonte: Autor.

Tabela 60- Grupo de abordagens administrativa de RH

Abordagens	Custo (U\$ milhões)	Disponibilidade Recursos humanos qualificados	Conhecimento disponível	Proteção à Propriedade Intelectual
Nº 1	4	3	2	2
Nº 2	2	2	3	4
Nº 3	3	4	3	4
Nº 4	1	2	3	4

Fonte: Autor.

Tabela 61- Grupo de abordagens administrativas de estimativa de custo

Abordagens	Tempo de implementação	Custo de implementação	Nível de erro de precisão	Dificuldade	Incertezas no regulamento
Nº 1	4	5	1	4	1
Nº 2	3	3	2	3	2
Nº 3	4	4	3	4	2
Nº 4	1	2	5	2	4

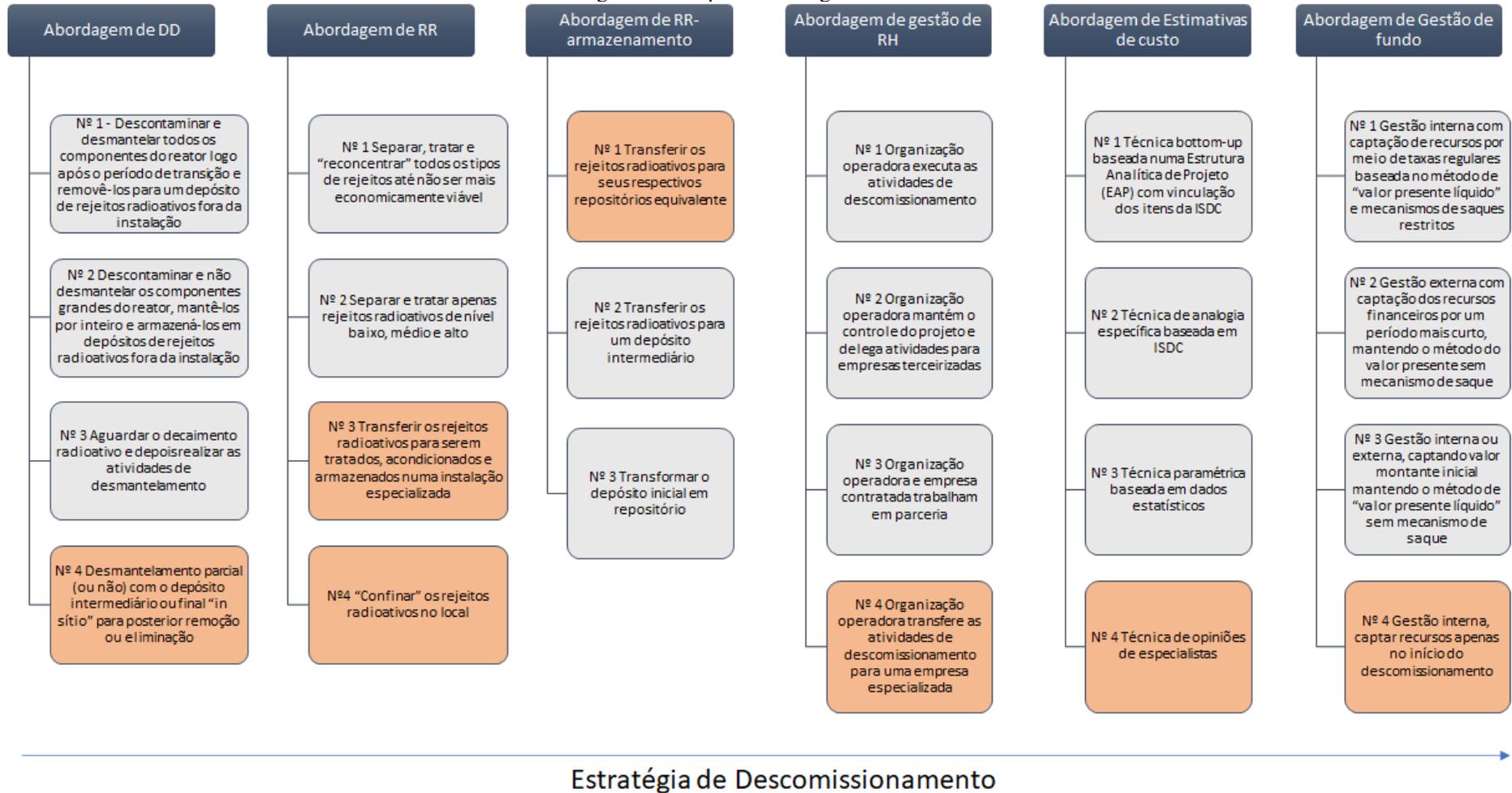
Fonte: Autor.

Tabela 62- Grupo de abordagens administrativa de gestão de fundo

Abordagens	Segurança no investimento	Flexibilidade para investir em CT&I	Riscos associados ao desligamento prematuro	Transparência	Incertezas no regulamento
Nº 1	3	2	4	4	2
Nº 2	2	4	2	2	2
Nº 3	4	4	2	2	3
Nº 4	5	5	4	4	5

Fonte: Autor.

Figura 57- Grupo de abordagens de descomissionamento

Fonte: Autor¹¹

¹¹ Cores cinzas não há óbices regulatórios ou técnicos brasileiros. Cores salmão há óbices regulatórios ou técnicos

9.3 Priorização dos fatores

Para realizar a priorização dos fatores, uma técnica adequada é a Matriz de Priorização. Nessa técnica, os fatores relevantes são listados e comparados em termos de sua importância relativa para a decisão. Os comparativos são transformados em pesos, levando em consideração os requisitos determinados pela Autoridade decisória.

Na matriz de priorização, cada fator receberá um peso de acordo com sua relevância para o processo de seleção da abordagem de descomissionamento. Esses pesos podem ser definidos pela Autoridade decisória com base em critérios específicos, como o tempo, custo, requisitos regulatórios, objetivos do projeto ou preferências estratégicas.

Uma vez estabelecidos os pesos para cada fator, os comparativos são realizados entre os fatores, atribuindo pontuações que refletem sua importância relativa em relação uns aos outros. Esses pesos podem seguir uma escala definida. Neste trabalho foi usado uma escala de pesos de 1 a 10, em que valores mais altos indicam uma maior importância. Essa escala possibilita distinguir a importância e atribuir critérios objetivos relativos aos 18 fatores a serem considerados.

Ao final do processo de comparação e atribuição de pontuações, os pesos dos fatores são multiplicados pela pontuação atribuída dentro da abordagem específica. Isso permite considerar a importância relativa de cada fator dentro do contexto da abordagem em análise. Assim, a abordagem final terá um valor final que pode ser comparado entre si dentro do mesmo grupo de abordagem.

Essa técnica ajuda a identificar os fatores mais significativos e a tomar decisões embasadas na priorização desses fatores de acordo com os requisitos e critérios estabelecidos pela Autoridade decisória.

9.4 Desenvolvendo estratégias de descomissionamento no Brasil

Para desenvolver uma estratégia de descomissionamento, é fundamental considerar as atividades obrigatórias e selecionar abordagens adequadas em cada um dos seis grupos de abordagens identificados. Isso permite que sejam tomadas decisões estratégicas eficientes ao longo do processo de descomissionamento.

Uma maneira de visualizar e compreender essas decisões estratégicas é por meio de um fluxograma, como apresentado na APÊNDICE G – Painel para o apoio às decisões estratégicas associadas à descontaminação e desmantelamento. Esse painel oferece uma

representação visual das implicações e restrições associadas à seleção das abordagens, permitindo uma visão clara de como cada ação se encaixa no processo de descomissionamento e em qual momento será executada.

Ao seguir o fluxograma, é possível tomar decisões informadas sobre as abordagens técnicas a serem adotadas em cada etapa do descomissionamento, considerando fatores como tempo, custos, riscos, recursos humanos e conhecimento e regulamentações.

9.4.1 Atividades que devem ser consideradas no plano de descomissionamento

A norma CNEN NN 9.01, em seu capítulo V, estabelece que a organização operadora deve apresentar um PPD e um PFD. Esses planos têm o objetivo de propor a estratégia a ser adotada, demonstrando que pode ser implementada de forma segura para alcançar o estado final planejado para o local e estruturas remanescentes.

Dentro desses planos, são considerados diversos itens, conforme descritos na Tabela 63. Essa tabela inclui informações sobre quais as atividades obrigatórias, bem como as atividades que podem ser selecionadas por uma abordagem específica. Essa distinção é importante para garantir que os planos de descomissionamento contemple todas as atividades essenciais.

Tabela 63- Atividades necessárias ao Plano de descomissionamento

Plano	Item	Atividade / Abordagem	Justificativa
PPD	estratégia de descomissionamento proposta	Abordagem	É a partir da seleção da abordagem de DD que é definido a estratégia de descomissionamento
	descrição da metodologia e dos critérios adotados para o descomissionamento	Abordagem	O processo de seleção das abordagens inclui a descrição da metodologia e dos critérios adotados para avaliar e escolher as abordagens mais adequadas para o descomissionamento.
	gerenciamento do descomissionamento	Abordagem	O gerenciamento do descomissionamento será realizado conforme o conjunto de abordagens selecionadas.
	previsão do inventário e da caracterização dos materiais radioativos presentes na usina no início do descomissionamento	Atividade	Atividade obrigatória em qualquer abordagem selecionada.
	medidas de proteção radiológica e medidas de proteção física	Atividade	Atividade obrigatória em qualquer abordagem selecionada.

	ações de garantia da qualidade a serem implementadas, relacionadas ao planejamento	Atividade	Atividade obrigatória em qualquer abordagem selecionada.
	medidas a serem adotadas para a gerência dos rejeitos radioativos gerados durante o descomissionamento	Abordagem	Abordagem técnica de gestão de rejeitos radioativos.
	orçamento e garantia financeira, especificando a forma da captação de recursos para implementação do Plano, inclusive na hipótese de descomissionamento precoce	Abordagem	Abordagem administrativa de gestão financeira.
	etapas de descomissionamento, com indicação do seu encadeamento e duração	Abordagem	O conjunto de abordagens e o fluxograma fornecem uma visualização clara e sequencial das etapas envolvidas no processo de descomissionamento, indicando o encadeamento lógico entre elas e sua duração estimada.
	caracterização do estado final do descomissionamento	Atividade	Atividade obrigatória em qualquer abordagem selecionada.
	hipótese de retirada de operação de forma não prevista e estabelecer medidas para preservar a segurança da usina até que o Plano Final de Descomissionamento seja preparado, aprovado e implantado	Abordagem	Abordagens de gestão financeira contempla um tipo de abordagens para esses casos.
PFD	plano de gerência do descomissionamento, contendo estrutura organizacional, responsabilidades, recursos humanos necessários e treinamento adequado	Abordagens	Abordagens administrativa de recursos humanos.
	descrição das atividades do descomissionamento, incluindo metodologias, critérios e cronograma	Abordagens	O desenvolvimento de uma EAP e o conjunto de abordagens selecionados.

orçamento para implementação do descomissionamento e adequação dos recursos financeiros ao orçamento; e	Abordagem	Abordagem administrativa de gestão financeira
caracterização do estado final do local e estruturas remanescentes e metodologia para demonstrar que o estado final previsto foi alcançado	Atividade	Atividade obrigatória em qualquer abordagem selecionada.

Fonte: [24] com a justificativa do autor

9.4.2 Selecionando abordagens pela metodologia proposta

De forma a exemplificar o uso pela metodologia proposta, suponha-se que a autoridade decisória tenha definido os pesos para os fatores relevantes, conforme apresentado na Tabela 64.

Tabela 64- Matriz de priorização

Abordagem	Fatores	Peso
Técnicas e administrativas	Tempo (anos)	10
Técnicas e administrativas	Custo (US\$ milhões)	5
Técnicas e administrativas	Volume de RR (m3)	3
Técnicas e administrativas	Viabilidade Técnica	6
Técnicas e administrativas	Proteção Radiológica (IOE)	6
Técnicas e administrativas	Proteção Radiológica- Público	8
Técnicas e administrativas	Riscos Industriais	5
Técnicas e administrativas	Incerteza no regulamento	5
Depósito de Rejeitos	Segurança Física	6
Recursos Humanos	Disponibilidade Recursos humanos qualificados	8
Recursos Humanos	Conhecimento disponível	5
Recursos Humanos	Proteção à Propriedade Intelectual	4
Estimativa de custo	Nível de erro de precisão (estimativa de custo)	7
Estimativa de custo	Dificuldade	7
Gestão de Fundo	Segurança no investimento	8
Gestão de Fundo	Flexibilidade para investir em CT&I	6
Gestão de Fundo	Riscos associados ao desligamento prematuro	8
Gestão de Fundo	Transparência	4

Fonte: Autor.

Esses pesos foram estabelecidos com base na importância relativa de cada fator para o processo de seleção da abordagem de descomissionamento nesse exemplo específico. Vale

ressaltar que os pesos podem variar de acordo com as necessidades e prioridades do cenário específico e da autoridade decisória. Neste caso, a decisão levou em consideração como a prioridade principal o tempo de execução.

Em seguida, as pontuações são multiplicadas pelos pesos correspondentes a cada fator. Esse processo leva em consideração tanto a importância relativa atribuída a cada fator quanto os pesos definidos pela autoridade decisória.

Ao final, são obtidas as pontuações ponderadas para cada fator, refletindo sua contribuição relativa no processo de seleção da abordagem de descomissionamento. Essas pontuações ponderadas podem ser somadas para obter uma pontuação total para cada abordagem em análise. Para facilitar o entendimento e simplificar o processo de seleção, será adotado o critério de escolher a abordagem que possuir a menor pontuação total. Esse critério baseia-se na ideia de que quanto menor a pontuação total, melhor é a abordagem em termos dos fatores considerados.

A seguir são apresentados na Tabela 65, na Tabela 66, na Tabela 67, na Tabela 68, na Tabela 69, e na Tabela 70 os cálculos dos fatores e pesos, indicando a pontuação total e, destacado em azul, a abordagem selecionada.

Tabela 65- Exemplo 1 - Selecionando abordagens técnicas de DD

Abordagens	Tempo (anos)			Custo (U\$ milhões)			Volume de RR (m3)			Viabilidade Técnica			Proteção Radiológica (IOE)			Proteção Radiológica-Público			Riscos Industriais			Incerteza no regulamento			Total
Nº 1	2	10	20	3	5	15	2	3	6	2	6	12	3	6	18	2	8	16	4	5	20	2	5	10	117
Nº 2	1	10	10	2	5	10	3	3	9	4	6	24	2	6	12	4	8	24	3	5	15	4	5	20	124
Nº 3	4	10	40	1	5	5	3	3	9	3	6	18	2	6	12	2	8	16	2	5	10	3	5	15	125
Nº 4	5	10	50	5	5	25	4	3	12	3	6	18	2	6	12	5	8	40	2	5	10	5	5	25	192

Fonte: Autor.

Tabela 66- Exemplo 1 - Selecionando abordagens técnicas de RR

Abordagens	Tempo (anos)			Custo (U\$ milhões)			Volume de RR (m3)			Viabilidade Técnica			Proteção Radiológica (IOE)			Proteção Radiológica-Público			Riscos Industriais			Incerteza no regulamento			Total
Nº 1	2	10	20	4	5	20	2	3	6	2	6	12	4	6	24	2	8	16	4	5	20	2	5	10	128
Nº 2	1	10	10	3	5	15	4	3	9	3	6	18	2	6	12	4	8	24	3	5	15	3	5	15	118
Nº 3	1	10	10	2	5	10	3	3	9	5	6	30	3	6	18	3	8	24	3	5	15	5	5	25	141
Nº 4	5	10	50	2	5	10	4	3	12	3	6	18	1	6	6	5	8	40	2	5	10	5	5	25	171

Fonte: Autor.

Tabela 67- Exemplo 1 - Selecionando abordagens técnicas de armazenagem

Abordagens	Viabilidade Técnica			Segurança Física			Incerteza no regulamento			Total
Nº 1	5	6	30	1	6	6	5	5	25	61
Nº 2	4	6	24	2	6	12	3	5	15	51
Nº 3	3	6	18	2	6	12	3	5	15	45

Fonte: Autor.

Tabela 68-Exemplo 1 - Selecionando abordagens administrativa de RH

Abordagens	Custo (U\$ milhões)			Disponibilidade Recursos humanos qualificados			Conhecimento disponível			Proteção à Propriedade Intelectual			Total
Nº 1	4	5	20	3	8	24	2	5	10	2	4	8	62
Nº 2	2	5	10	2	8	16	3	5	15	4	4	16	57
Nº 3	3	5	15	4	8	24	3	5	15	4	4	16	70
Nº 4	1	5	5	2	8	16	3	5	15	4	4	16	52

Fonte: Autor.

Tabela 69- Exemplo 1 - Selecionando abordagens estimativa de custo

Abordagens	Tempo de implementação			Custo de implementação			Nível de erro de precisão			Dificuldade			Incertezas no regulamento			Total
Nº 1	4	10	40	5	5	25	1	7	7	4	7	28	1	5	5	105
Nº 2	3	10	30	3	5	15	2	7	14	3	7	21	2	5	10	90
Nº 3	4	10	40	4	5	20	3	7	21	4	7	28	2	5	10	119
Nº 4	2	10	20	2	5	10	5	7	35	2	7	14	4	5	20	99

Fonte: Autor.

Tabela 70-Exemplo 1 - Selecionando abordagens gestão de fundo

Abordagens	Segurança no investimento			Flexibilidade para investir em CT&I			Riscos associados ao desligamento prematuro			Transparência			Incertezas no regulamento			Total
Nº 1	3	8	24	2	6	12	4	8	24	4	4	16	2	5	10	86
Nº 2	2	8	16	4	6	24	2	8	16	2	4	8	2	5	10	74
Nº 3	4	8	24	4	6	24	2	8	16	2	4	8	3	5	15	87
Nº 4	5	8	40	5	6	30	4	8	24	4	4	16	5	5	25	135

Fonte: Autor.

Nesse sentido, com base na priorização dos fatores estabelecidos na Tabela 64, foram selecionadas as seguintes abordagens utilizando a técnica do processo de avaliação de risco:

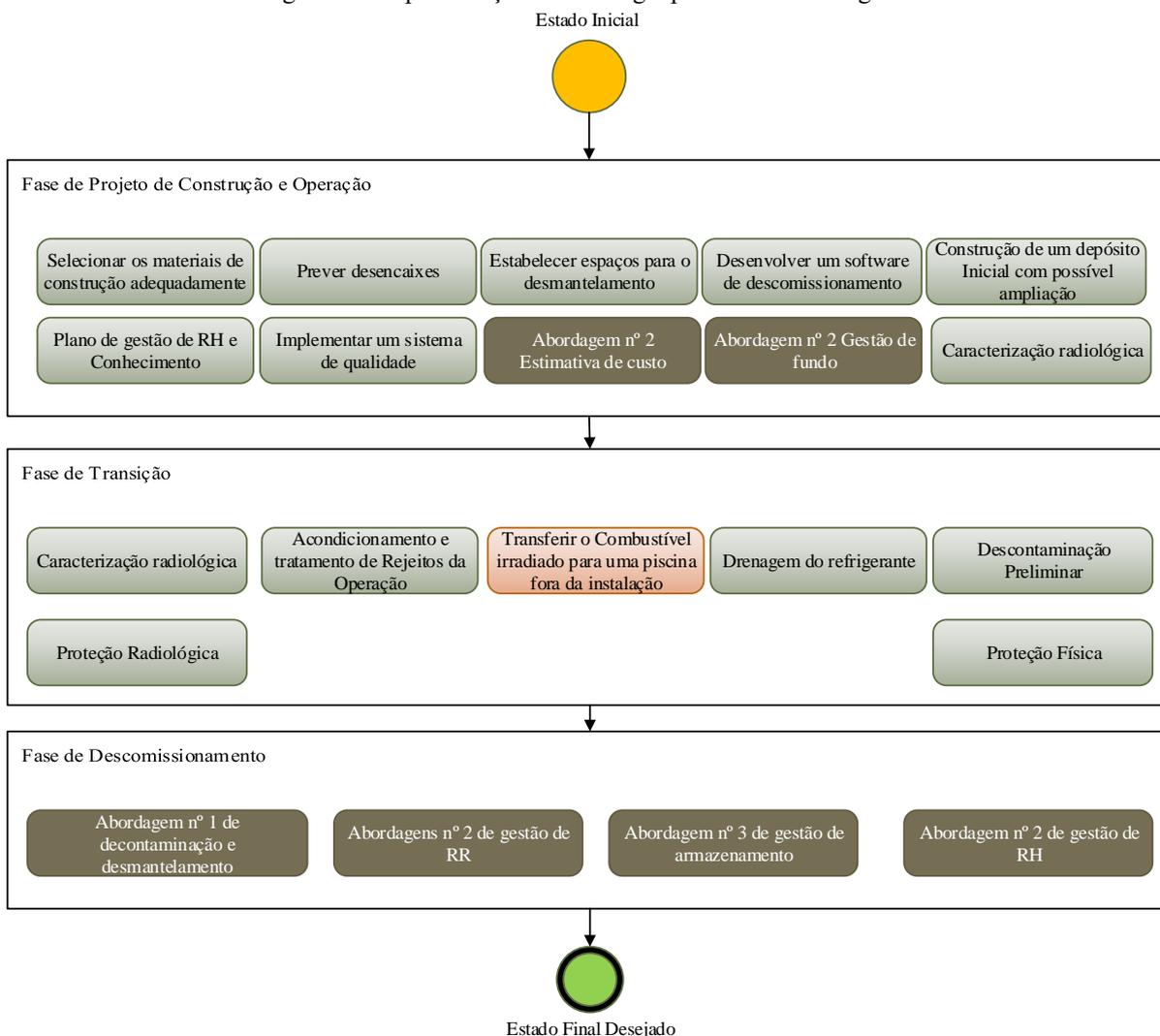
- a) abordagem técnica de DD: Descontaminar e desmantelar todos os componentes do reator logo após o período de transição e removê-los para um depósito de rejeitos radioativos fora da instalação;
- b) abordagem técnica de gestão RR: Separar e tratar os rejeitos radioativos de nível baixo, médio e alto
- c) abordagem técnica de gestão RR armazenamento: Transformar o depósito inicial em repositório;
- d) abordagem administrativa de gestão RH: Organização operadora mantém o controle do projeto e delega atividades para empresas terceirizadas;
- e) abordagem administrativa de estimativa de custo: Técnica de analogia específica baseada em ISDC; e
- f) abordagem administrativa de gestão de fundo: Gestão externa com captação dos recursos financeiros por um período mais curto, mantendo o método do valor presente sem mecanismo de saque.

9.4.3 Definindo a estratégia

Com base na identificação das atividades obrigatórias e na seleção das abordagens de descomissionamento, a estratégia para o descomissionamento hipotético do exemplo, usando a priorização dos fatores selecionados na Tabela 64, pode ser representada pelo fluxograma apresentado na Figura 58. Neste fluxograma, as atividades obrigatórias são destacadas em cinza e as abordagens são destacadas em marrom.

Para viabilizar a estratégia de descomissionamento, é necessário que o combustível irradiado seja transferido para outra instalação. No entanto, é importante ressaltar que as atividades de gestão do combustível irradiado não foram abordadas em detalhes neste trabalho, pois não foram o foco principal. No entanto, foi mencionado como um pré-requisito essencial para a execução da estratégia de descomissionamento. A atividade de transferir o combustível irradiado está representado na cor salmão no fluxograma.

Figura 58- Representação da estratégia por meio do fluxograma



9.4.4 Análise da estratégia proposta

A análise final da estratégia é importante para identificar eventuais discrepâncias que possam surgir e garantir a conclusão adequada do plano de descomissionamento. Essa etapa é essencial para avaliar a consistência e a eficácia da estratégia proposta, bem como para identificar possíveis lacunas ou desafios que precisam ser abordados ou propostas de mudanças a serem realizadas durante o tempo. Ao realizar essa análise, é possível verificar se a estratégia está alinhada com os objetivos de descomissionamento, se considera os requisitos regulatórios e técnicos, e se aborda de forma adequada os riscos e as incertezas associados ao processo. Com base nessa avaliação, ajustes e refinamentos podem ser realizados, garantindo a robustez e a viabilidade do plano de descomissionamento.

Por exemplo, na abordagem de gestão de armazenamento do exemplo proposto, estabelece-se que o depósito inicial será transformado em um depósito final. Nesse sentido, é importante considerar desde a fase de construção da instalação a possibilidade de realizar essa conversão, garantindo que o projeto seja adequado e dimensionado para essa futura modificação.

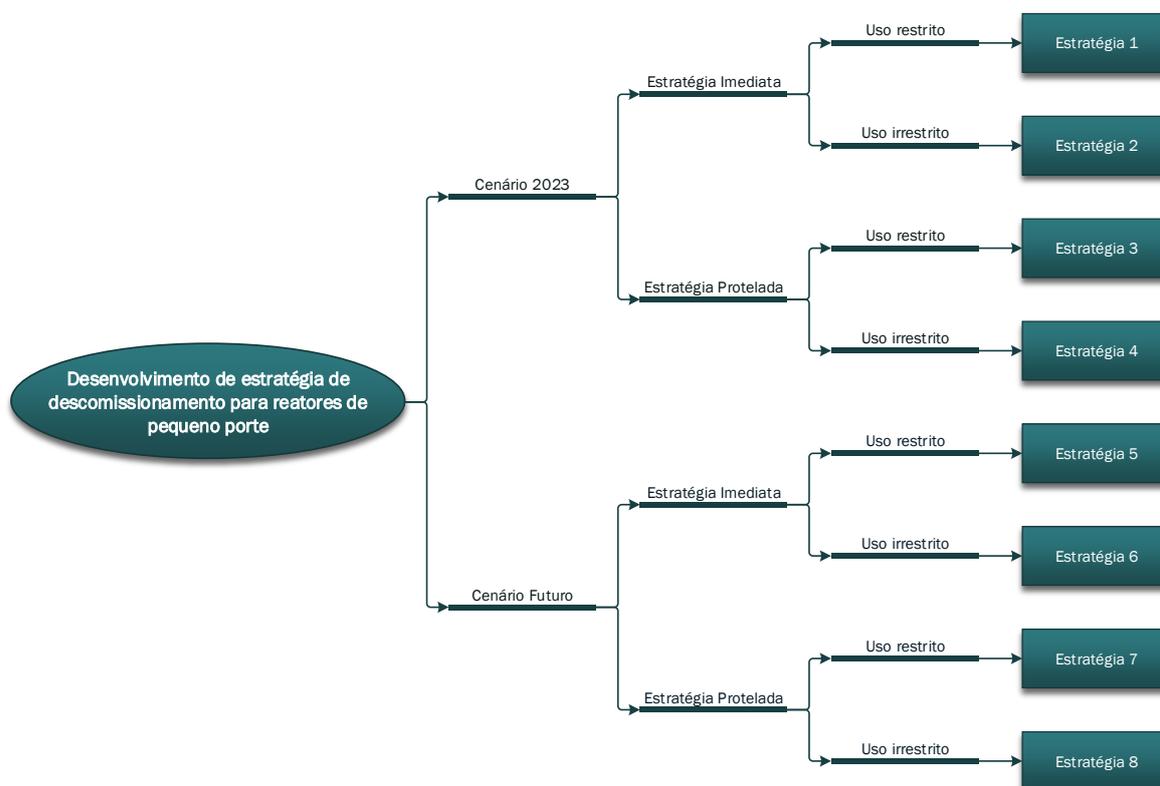
Além disso, caso ocorra a operação do repositório final, pode ser necessário ajustar a estratégia proposta, o que impactará nos custos e em outras atividades envolvidas. Portanto, é fundamental que a estratégia seja flexível e possa ser adaptada às mudanças de contexto. Nesse sentido, técnicas como a análise de causa e consequência podem ser aplicadas para analisar os possíveis cenários e suas implicações, ajudando a tomar decisões informadas e aprimorar a estratégia ao longo do processo de descomissionamento [104].

10 ESTRATÉGIAS DE DESCOMISSIONAMENTO PARA REATORES DE PEQUENO PORTE NO BRASIL

Este trabalho tem como foco o desenvolvimento de estratégias específicas para reatores de pequeno porte no Brasil. Foi proposta em dois cenários: um com base no cenário atual e o outro considerando possíveis mudanças na legislação brasileira para adequá-la para o desenvolvimento de estratégias para o descomissionamento desses reatores no futuro. As mudanças visam abordar os assuntos pertinentes à área nuclear, que estão sendo discutidos no Congresso Nacional brasileiro [105, 106], nas atividades planejadas pelo setor nuclear [78] e nas decisões políticas em pauta [19, 107].

Em cada cenário, será proposto duas estratégias imediatas e duas estratégias proteladas, uma para alcançar o estado final para usos restritos e outra para usos irrestritos. No total serão 8 estratégias desenvolvidas. Um resumo é apresentado no diagrama representado pela Figura 59.

Figura 59- Estratégias de descomissionamento desenvolvidas



Fonte: Autor

Para exemplificar as estratégias propostas, foi considerado que os projetos de descomissionamento em plantas nucleares com mais de um reator serão considerados como único, ou seja, uma estratégia será adotada para toda a planta. No entanto, em alguns casos,

pode ser necessário desenvolver uma estratégia específica para projetos de descomissionamento em plantas nucleares com múltiplos reatores.

Por exemplo, uma estratégia protelada poderia envolver o adiamento do descomissionamento das unidades já desligadas, aguardando até que o último reator seja desligado para iniciar as atividades de desmantelamento de todos os reatores. Neste trabalho, será considerado esse tipo de estratégia como protelada e considerará, também, como um caso único. Assim, a metodologia para desenvolver estratégia proposta pode ser aplicada.

Os reatores de pequeno porte possuem características especiais, que são [7] [8]:

- a) vaso de pressão, geradores de vapor, pressurizadores são relativamente menores, mais leves, e com diâmetros menores do que os reatores de grande porte;
- b) outras estruturas também são menores, como o prédio do reator e componentes secundários;
- c) os SMR embarcados podem ser movimentados “por inteiro”;
- d) os SMR possuem características de encaixes e desencaixes embutidos no projeto; e
- e) é possível criar processos de desmantelamento e descontaminação em série.

O primeiro cenário é elaborado com base na legislação atual (ano de 2023), prospecta o descomissionamento com a situação atual do Brasil, considerando as atuais legislações, as indústrias nucleares, os Institutos de Ciência e Tecnologia (ICT), os regulamentos e a política de gestão de RR (seus conjuntos de normativas). Algumas premissas devem ser consideradas, como por exemplo:

- a) monopólio das atividades nucleares é da União;
- b) não existe repositório para rejeitos de baixo e médio níveis;
- c) não existe repositório geológico para rejeitos de alto nível;
- d) existem poucos depósitos intermediários disponíveis, porém, nenhum deles tem a capacidade de receber RR de descomissionamento de reatores nucleares;
- e) a política do combustível irradiado não está definida. O combustível deve ser tratado como “resíduo”;
- f) não existe empresa estatal específica para a gestão de RR;
- g) existem poucos profissionais e poucas universidades da área nuclear no país;
- h) condições de rodovias brasileiras possui altos índices de acidentes;
- i) norma CNEN define os níveis de dispensa para cada radionuclídeo [108];
- j) CNEN é responsável pelo depósito intermediário e final [109];

O segundo cenário é elaborado com base nas mudanças da legislação brasileira atual, e melhoria nos aspectos das indústrias e na política de gestão de RR. Algumas premissas foram consideradas, como por exemplo:

- a) pode haver a quebra do monopólio da União;
- b) existe repositório para rejeitos de baixo e médio níveis;
- c) não existe, ainda, repositório geológico para rejeitos de alto nível;
- d) existe empresa específica para a gestão de rejeitos radioativos;
- e) existem muitos profissionais e algumas universidades da área nuclear no país;
- f) condições de rodovias brasileiras foram adaptadas e melhoradas;
- g) norma ANSN define os níveis de dispensa para cada radionuclídeo;
- h) é possível transferir a responsabilidade de descomissionamento;
- i) empresa específica pode ser responsável pelo depósito final;

Para realizar a análise nesse segundo cenário, foi necessário realizar ajustes nos valores dos fatores pré-estabelecidos no Capítulo 8. Essas modificações são baseadas nas premissas mencionadas anteriormente, que visam prospectar as mudanças no cenário brasileiro. Na Tabela 71, é apresentado os valores modificados correspondentes aos cenários atual e futuro, juntamente com a justificativa para cada modificação realizada. Essas alterações levam em consideração as mudanças previstas no cenário, como avanços tecnológicos, atualizações legislativas e outras variáveis relevantes.

Tabela 71- Alteração de valores de fatores correspondentes aos cenários atual e futuro

Abordagem	Fator	Atual	Futuro	Justificativa
RR Nº 3	Viabilidade Técnica	5	2	A premissa estabelecida para o cenário futuro considera a existência de uma empresa específica para gestão de RR
RR Nº 3	Incerteza no regulamento	5	2	
Armazenamento Nº 1	Viabilidade Técnica	5	3	A premissa estabelecida para o cenário futuro considera a existência de um repositório de baixo e médio nível, no entanto, ainda não existindo o repositório de alto nível
Armazenamento Nº 1	Incerteza no regulamento	4	3	
Armazenamento Nº 2	Viabilidade Técnica	4	2	
Estimativa de custo Nº 1	Custo de implementação	5	4	Com a experiência adquirida em descomissionamento de outras instalações brasileiras, informações de custos serão mais acessíveis. Tornando a estimativa mais fácil e com um menor custo de execução
Estimativa de custo Nº 1	Dificuldade	4	3	

Fonte: Autor.

Ao ajustar os valores dos fatores, foi buscado refletir de forma mais precisa as condições e expectativas do cenário futuro, permitindo uma análise mais realista das estratégias de descomissionamento.

10.1 Critérios para priorização de fatores em cada estratégia

A ideia de atribuir pesos aos fatores consiste em enfatizar os aspectos mais preocupantes dentro da estratégia. Por exemplo, caso a autoridade decisória opte pelo desmantelamento imediato, visando a obtenção de usos irrestritos, é essencial priorizar a velocidade de execução, a quantidade de RR gerados e os riscos industriais associados à intensa atividade industrial no local. Esses fatores devem receber pesos mais elevados devido à sua maior relevância e preocupação.

Nesse sentido, para adotar a metodologia proposta, foram estabelecidos os seguintes critérios para atribuir os pesos relativos aos fatores associados em cada abordagem:

- a) as estratégias imediatas receberão pontuações no fator tempo máximo (peso 10), pois a prioridade é a execução, relativamente rápida, do descomissionamento. Por outro lado, as estratégias proteladas terão valores mínimos (peso 1);
- b) no caso das estratégias para usos restritos, o objetivo é reaproveitar parte da infraestrutura existente no local da instalação. Nesse contexto, os fatores de volume de RR, riscos industriais e outros terão pesos relativamente baixos em comparação com as estratégias voltadas para usos irrestritos. Esse critério levou em consideração que as estratégias para usos irrestritos envolvem maior preocupação na execução das atividades;
- c) o peso do fator de custos será mais elevado nas estratégias do cenário atual e terá valores mais baixos nas estratégias do cenário futuro. Isso se deve à maior preocupação financeira das usinas no cenário atual, onde há pouca experiência em descomissionamento, enquanto em cenários futuros, após possíveis reorganizações, esse fator pode se tornar menos preocupante ou transferido para outras organizações;
- d) para estabelecer uma classificação entre os fatores, levando em consideração a lista de 18 fatores, cada peso será repetido no máximo três vezes, variando de 2 a 9. Os valores 1 e 10 serão reservados exclusivamente para o fator tempo, que determina a estratégia (imediato ou protelado).

10.2 Estratégia 1 – DECON para alcançar usos restritos: Cenário 2023

Essa estratégia tem como objetivo o desmantelamento imediato de reatores de pequeno porte, levando em consideração o cenário regulatório e do setor nuclear brasileiro atual, visando o seu aproveitamento para usos restritos. Isso implica no reaproveitamento da infraestrutura local para fins industriais, laboratoriais, depósitos ou outras aplicações restritas.

10.2.1 Selecionando as abordagens para a Estratégia 1

Os pesos atribuídos aos fatores estão apresentados na Tabela 72, enquanto as abordagens selecionadas são destacadas em azul na Tabela 73, na Tabela 74, na Tabela 75, na Tabela 76, na Tabela 77 e na Tabela 78.

As abordagens destacadas em vermelho são aquelas não indicáveis de acordo com os critérios da AIEA. Já as abordagens destacadas em cor salmão são aquelas que são inviáveis tecnicamente no atual cenário brasileiro.

Tabela 72- Classificação dos fatores e pesos da Estratégia 1

Abordagem	Fatores	Peso
Técnicas e administrativas	Tempo (anos)	10
Técnicas e administrativas	Custo (U\$ milhões)	9
Recursos Humanos	Conhecimento disponível	9
Técnicas e administrativas	Proteção Radiológica (IOE)	8
Recursos Humanos	Proteção à Propriedade Intelectual	8
Gestão de Fundo	Segurança no investimento	7
Gestão de Fundo	Riscos associados ao desligamento prematuro	7
Estimativa de custo	Nível de erro de precisão (estimativa de custo)	6
Técnicas e administrativas	Riscos Industriais	6
Técnicas e administrativas	Viabilidade Técnica	5
Depósito de Rejeitos	Segurança Física	5
Gestão de Fundo	Flexibilidade para investir em CT&I	4
Técnicas e administrativas	Volume de RR (m3)	4
Recursos Humanos	Disponibilidade Recursos humanos qualificados	3
Técnicas e administrativas	Incerteza no regulamento	3
Gestão de Fundo	Transparência	2
Técnicas e administrativas	Proteção Radiológica- Público	3
Estimativa de custo	Dificuldade	2

Fonte: Autor.

Tabela 73- Seleção de abordagens técnicas DD - Estratégia 1

Abordagens	Tempo (anos)			Custo (U\$ milhões)			Volume de RR (m3)			Viabilidade Técnica			Proteção Radiológica (IOE)			Proteção Radiológica-Público			Riscos Industriais			Incerteza no regulamento			Total
Nº 1	2	10	20	3	9	27	2	4	8	2	5	10	3	8	24	2	3	6	4	6	24	2	3	6	125
Nº 2	1	10	10	2	9	18	3	4	12	4	5	20	2	8	16	4	3	12	3	6	18	4	3	12	118
Nº 3	4	10	40	1	9	9	3	4	12	3	5	15	2	8	16	2	3	6	2	6	12	3	3	9	119
Nº 4	5	10	50	5	9	45	4	4	16	3	5	15	2	8	16	5	3	15	2	6	12	5	3	15	184

Fonte: Autor.

Tabela 74- Seleção de abordagens técnicas gestão de RR - Estratégia 1

Abordagens	Tempo (anos)			Custo (U\$ milhões)			Volume de RR (m3)			Viabilidade Técnica			Proteção Radiológica (IOE)			Proteção Radiológica-Público			Riscos Industriais			Incerteza no regulamento			Total
Nº 1	2	10	20	4	9	36	2	4	8	2	5	10	4	8	32	2	3	6	4	6	24	2	3	6	142
Nº 2	1	10	10	3	9	27	4	4	16	3	5	15	2	8	16	4	3	12	3	6	18	3	3	9	123
Nº 3	1	10	10	2	9	18	3	4	12	5	5	25	3	8	24	3	3	9	3	6	18	5	3	15	131
Nº 4	5	10	50	2	9	18	4	4	16	3	5	15	1	8	8	5	3	15	2	6	12	5	3	15	149

Fonte: Autor.

Tabela 75- Seleção de abordagens técnicas armazenamento - Estratégia 1

Abordagens	Viabilidade Técnica			Segurança Física			Incerteza no regulamento			Total
Nº 1	5	5	25	1	5	5	5	3	15	45
Nº 2	4	5	20	2	5	10	3	3	9	39
Nº 3	3	5	15	2	5	10	3	3	9	34

Fonte: Autor.

Tabela 76- Seleção de abordagens administrativas de gestão RH - Estratégia 1

Abordagens	Custo (U\$ milhões)			Disponibilidade Recursos humanos qualificados			Conhecimento disponível			Proteção à Propriedade Intelectual			Total
Nº 1	4	9	36	3	3	9	2	9	18	2	8	16	79
Nº 2	2	9	18	2	3	6	3	9	27	4	8	32	83
Nº 3	3	9	27	4	3	12	3	9	27	4	8	32	98
Nº 4	1	9	9	2	3	6	3	9	27	4	8	32	74

Fonte: Autor.

Tabela 77- Seleção de abordagens administrativa estimativa de custo - Estratégia 1

Abordagens	Tempo de implementação			Custo de implementação			Nível de erro de precisão			Dificuldade			Incertezas no regulamento			Total
Nº 1	4	10	40	5	9	45	1	6	6	4	2	8	1	3	3	102
Nº 2	3	10	30	3	9	27	2	6	12	3	2	6	2	3	6	81
Nº 3	4	10	40	4	9	36	3	6	18	4	2	8	2	3	6	108
Nº 4	2	10	20	2	9	18	5	6	30	2	2	4	4	3	12	84

Fonte: Autor.

Tabela 78- Seleção de abordagens administrativa gestão de fundo - Estratégia 1

Abordagens	Segurança no investimento			Flexibilidade para investir em CT&I			Riscos associados ao desligamento prematuro			Transparência			Incertezas no regulamento			Total
Nº 1	3	7	21	2	4	8	4	7	28	4	2	8	2	3	6	71
Nº 2	2	7	14	4	4	16	2	7	14	2	2	4	2	3	6	54
Nº 3	4	7	28	4	4	16	2	7	14	2	2	4	3	3	9	71
Nº 4	5	7	35	5	4	20	4	7	28	4	2	8	5	3	15	106

Fonte: Autor.

10.2.2 Definindo a Estratégia 1

Nesse cenário, há apenas uma opção técnica viável para a abordagem de armazenamento de rejeitos radioativos, que é a abordagem nº 3. Curiosamente, os valores calculados de acordo com os critérios de prioridade de fatores também selecionaram essa opção. Por outro lado, os cálculos dos fatores indicaram inicialmente a seleção da opção nº 4 para a abordagem de gestão de RH, porém foi necessário alterar para a opção nº 1, a segunda colocada. Essa mudança foi necessária devido à inviabilidade da opção nº 4 no atual cenário brasileiro.

10.2.3 Análise da Estratégia 1

Ao considerar as abordagens selecionadas e as características dos reatores de pequeno porte, juntamente com as premissas do cenário brasileiro, o Plano de Descomissionamento pode ser desenvolvido com base nas seguintes análises:

A abordagem nº 2 (descontaminar e não desmantelar os componentes grandes do reator, mantê-los por inteiro e armazená-los em depósitos de rejeitos radioativos fora da instalação) foi indicada para a descontaminação e desmantelamento dos reatores de pequeno porte. Esses reatores possuem estruturas adequadas para serem removidas por inteiro e transportadas por meio de rodovias para um depósito intermediário ou final.

Como o país ainda não possui depósitos intermediários ou finais para o armazenamento de rejeitos, será adotada a abordagem nº 3 de gestão de armazenamento

(transformar o depósito inicial em repositório), com o objetivo de transformar o depósito inicial em um depósito intermediário ou final. Isso facilitaria ainda mais o transporte dos componentes por inteiro e minimizaria as doses para o público durante o transporte. Nessa etapa, é importante que a titularidade do depósito seja transferida para a CNEN, para cumprir a legislação brasileira [65].

A abordagem nº 2 de gestão de RR (separar e tratar os rejeitos radioativos de nível baixo, médio e alto) foi indicada em conformidade com os fatores relativos à redução de custos e ao aumento da eficiência. A maioria dos RR de descomissionamento é de nível muito baixo ou de meia vida muito curta, e serão apenas armazenados. Como o depósito final está localizado próximo à instalação, os custos de transporte serão relativamente baixos. Além disso, como não será necessário realizar tratamento desses rejeitos, as doses de radiação para o IOE serão reduzidas. Após o decaimento radioativo, esses rejeitos poderão ser dispostos na rede pública comum, como em aterros, desde que atendam aos requisitos regulatórios de segurança radiológica.

A abordagem de gestão de RH nº 1 foi indicada, na qual o próprio pessoal da organização operadora é responsável pela execução das atividades de descomissionamento. Nesse contexto, foi considerado como uma boa opção, uma vez que eles possuem um conhecimento mais aprofundado das instalações e são mais capacitados na área nuclear. Esses funcionários deverão ser devidamente treinados e substituídos quando necessário.

Essa consideração pode ser embasada, ainda, no fato de que a maioria das atividades de desmantelamento (componentes e não estruturas) exigirá um alto grau de conhecimento na área nuclear. Além disso, como não haverá uma grande quantidade de desmantelamento de estruturas, que representa a maior parte das atividades, utilizar o pessoal da própria instalação se mostra a opção mais adequada e econômica. Essa consideração é, também, respaldada pela necessidade de executar o desmantelamento de forma rápida, pois não haveria necessidade de treinar pessoal externo para atividades nucleares.

A abordagem nº 2 de estimativa de custo, que utiliza a técnica de analogia específica baseada no ISDC, é considerada como uma boa opção para a estimativa de custos devido à falta de experiência em descomissionamento de reatores no Brasil e à escassez de informações sobre os custos futuros, o que dificulta a avaliação precisa dos custos envolvidos no projeto. Para superar essa limitação, uma opção é buscar dados de custos e informações de países pertencentes à ODCE/NEA por meio do ISDC e adaptá-los à realidade brasileira.

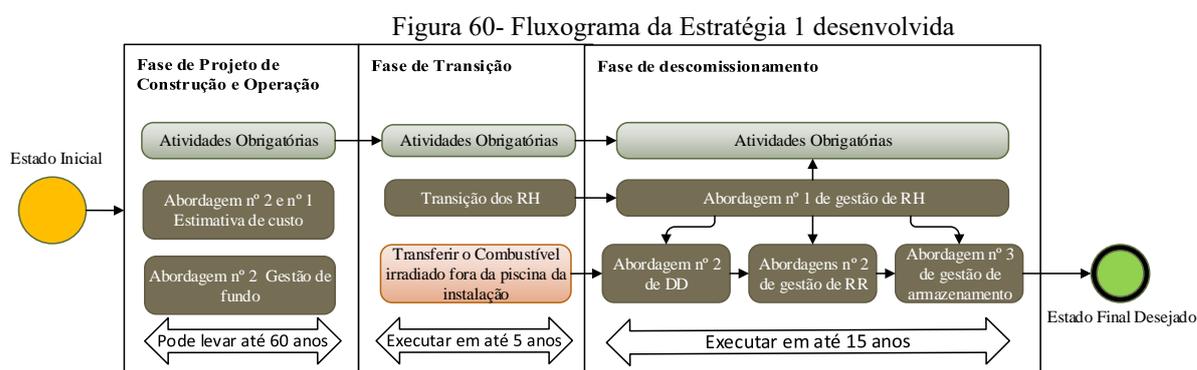
Dessa forma, será possível obter uma estimativa mais precisa dos custos e dos recursos necessários para o descomissionamento de reatores nucleares de pequeno porte no

país. No Plano Final de Descomissionamento, é ideal adotar a abordagem n° 1 (técnica bottom-up baseada numa Estrutura Analítica de Projeto (EAP) com vinculação dos itens da ISDC), uma vez que as informações sobre mão-obra, custo de tecnologia, e outros estarão mais próximo da realidade.

A abordagem n° 2 para a gestão de fundo, que consiste na gestão externa com captação dos recursos financeiros por um período mais curto, mantendo o método do valor presente sem mecanismo de saque, foi indicada pela técnica MCDA. Essa opção é favorável, pois a gestão externa realizada por um órgão especializado em investimentos financeiros oferece maior segurança financeira em comparação com a gestão interna, em linha com o que foi colocado na classificação de prioridade de fatores.

A abordagem do combustível irradiado é um fator determinante para a seleção das estratégias de descomissionamento. Embora não faça parte diretamente do escopo deste trabalho, alguns detalhes foram abordados nos capítulos anteriores. Para gerenciar o combustível irradiado, a estratégia adotada consiste na construção de uma piscina fora da instalação, onde o combustível poderá ser armazenado temporariamente até que seja tomada uma decisão sobre o seu destino pelo país. Essa abordagem permitirá uma gestão mais segura durante o processo de descomissionamento.

O fluxograma apresentado na Figura 60, representa a Estratégia 1 desenvolvida para descomissionar reatores de pequeno porte no Brasil. Essa estratégia contempla as atividades obrigatórias (cinza), a abordagem de combustível irradiado (salmão) e as abordagens (marrom) selecionadas pelo autor.



Fonte: Autor.

10.3 Estratégia 2 – DECON para alcançar usos irrestritos: Cenário 2023

Essa estratégia tem como objetivo o desmantelamento imediato de reatores de pequeno porte, levando em consideração o cenário regulatório e do setor nuclear brasileiro

atual, visando o seu aproveitamento para usos irrestritos. Isso implica na demolição total da estrutura e de atividades de descontaminação e limpeza do local, além de atividades de restauração. Além disso, para ilustrar possíveis análises de preferências estratégicas que poderiam surgir, foi adicionada a preferência de proteger o conhecimento em CT&I desenvolvido nas instalações como parte dessa estratégia.

10.3.1 Selecionando as abordagens para a Estratégia 2

Os pesos atribuídos aos fatores estão apresentados em ordem de classificação na Tabela 79, enquanto as abordagens selecionadas são destacadas em azul na Tabela 80, na Tabela 81, na Tabela 82, na Tabela 83, na Tabela 84 e na Tabela 85.

Tabela 79- Classificação dos fatores e pesos da Estratégia 2

Abordagem	Fatores	Peso
Técnicas e administrativas	Tempo (anos)	10
Técnicas e administrativas	Volume de RR (m3)	9
Gestão de Fundo	Flexibilidade para investir em CT&I	9
Recursos Humanos	Proteção à Propriedade Intelectual	9
Técnicas e administrativas	Custo (U\$ milhões)	8
Técnicas e administrativas	Riscos Industriais	8
Recursos Humanos	Disponibilidade Recursos humanos qualificados	8
Técnicas e administrativas	Proteção Radiológica (IOE)	7
Técnicas e administrativas	Viabilidade Técnica	6
Estimativa de custo	Nível de erro de precisão (estimativa de custo)	6
Técnicas e administrativas	Incerteza no regulamento	6
Técnicas e administrativas	Proteção Radiológica- Público	5
Depósito de Rejeitos	Segurança Física	5
Gestão de Fundo	Segurança no investimento	4
Recursos Humanos	Conhecimento disponível	4
Gestão de Fundo	Riscos associados ao desligamento prematuro	3
Gestão de Fundo	Transparência	3
Estimativa de custo	Dificuldade	2

Fonte: Autor.

Tabela 80- Seleção de abordagens técnicas DD - Estratégia 2

Abordagens	Tempo (anos)			Custo (U\$ milhões)			Volume de RR (m3)			Viabilidade Técnica			Proteção Radiológica (IOE)			Proteção Radiológica-Público			Riscos Industriais			Incerteza no regulamento			Total
Nº 1	2	10	20	3	8	24	2	9	18	2	6	12	3	7	21	2	5	10	4	8	32	2	6	12	149
Nº 2	1	10	10	2	8	16	3	9	27	4	6	24	2	7	14	4	5	20	3	8	24	4	6	24	159
Nº 3	4	10	40	1	8	8	3	9	27	3	6	18	2	7	14	2	5	10	2	8	16	3	6	18	151
Nº 4	5	10	50	5	8	40	4	9	36	3	6	18	2	7	14	5	5	25	2	8	16	5	6	30	229

Fonte: Autor.

Tabela 81- Seleção de abordagens técnicas gestão de RR - Estratégia 2

Abordagens	Tempo (anos)			Custo (U\$ milhões)			Volume de RR (m3)			Viabilidade Técnica			Proteção Radiológica (IOE)			Proteção Radiológica-Público			Riscos Industriais			Incerteza no regulamento			Total
Nº 1	2	10	20	4	8	32	2	9	18	2	6	12	4	7	28	2	5	10	4	8	32	2	6	12	164
Nº 2	1	10	10	3	8	24	4	9	36	3	6	18	2	7	14	4	5	20	3	8	24	3	6	18	164
Nº 3	1	10	10	2	8	16	3	9	27	5	6	30	3	7	21	3	5	15	3	8	24	5	6	30	173
Nº 4	5	10	50	2	8	16	4	9	36	3	6	18	1	7	7	5	5	25	2	8	16	5	6	30	198

Fonte: Autor.

Tabela 82- Seleção de abordagens técnicas armazenamento - Estratégia 2

Abordagens	Viabilidade Técnica			Segurança Física			Incerteza no regulamento			Total
Nº 1	5	6	30	1	5	5	5	6	30	65
Nº 2	4	6	24	2	5	10	3	6	18	52
Nº 3	3	6	18	2	5	10	3	6	18	46

Fonte: Autor.

Tabela 83- Seleção de abordagens administrativas de gestão RH - Estratégia 2

Abordagens	Custo (U\$ milhões)			Disponibilidade Recursos humanos qualificados			Conhecimento disponível			Proteção à Propriedade Intelectual			Total
Nº 1	4	8	32	3	8	24	2	4	8	2	9	18	82
Nº 2	2	8	16	2	8	16	3	4	12	4	9	27	71
Nº 3	3	8	24	4	8	32	3	4	12	4	9	36	104
Nº 4	1	8	8	2	8	16	3	4	15	4	9	36	75

Fonte: Autor.

Tabela 84- Seleção de abordagens administrativa estimativa de custo - Estratégia 2

Abordagens	Tempo de implementação			Custo de implementação			Nível de erro de precisão			Dificuldade			Incertezas no regulamento			Total
Nº 1	4	10	40	5	8	40	1	6	6	4	2	8	1	6	6	100
Nº 2	3	10	30	3	8	24	2	6	12	3	2	6	2	6	12	84
Nº 3	4	10	40	4	8	32	3	6	18	4	2	8	2	6	12	110
Nº 4	2	10	20	2	8	16	5	6	30	2	2	4	4	6	24	94

Fonte: Autor.

Tabela 85- Seleção de abordagens administrativa gestão de fundo - Estratégia 2

Abordagens	Segurança no investimento			Flexibilidade para investir em CT&I			Riscos associados ao desligamento prematuro			Transparência			Incertezas no regulamento			Total
Nº 1	3	4	12	2	9	18	4	3	12	4	3	12	2	6	12	66
Nº 2	2	4	8	4	9	36	2	3	6	2	3	6	2	6	12	68
Nº 3	4	4	16	4	9	36	2	3	6	2	3	6	3	6	18	82
Nº 4	5	4	20	5	9	45	4	3	12	4	3	12	5	6	30	119

Fonte: Autor.

10.3.2 Definindo a Estratégia 2

As abordagens de gestão de RR nº 1 e nº 2 obtiveram pontuações semelhantes. No entanto, a abordagem nº 1 foi selecionada devido à maior prioridade atribuída ao fator de volume de RR.

10.3.3 Análise da Estratégia 2

A abordagem nº 1, que consiste na descontaminação e desmantelamento de todos os componentes do reator logo após o período de transição, seguida pela remoção para um depósito de rejeitos radioativos fora da instalação, pode ser selecionada para o descomissionamento dos reatores de pequeno porte. Essa abordagem tem como objetivo minimizar ao máximo o volume de RR, buscando reciclar e reutilizar esses materiais na medida do possível.

A gestão de RR poderá ser intensificada de acordo com a abordagem nº 1, alinhada com a abordagem de desmantelamento. A ênfase poderá ser dada à reciclagem e reutilização dos rejeitos, principalmente aqueles provenientes da estrutura do prédio, que representam a maior quantidade de rejeitos. Através dessa abordagem, será possível otimizar a gestão dos RR, reduzindo seu volume e mitigando os impactos ambientais associados. A abordagem de gestão de armazenamento será a mesma da Estratégia 1.

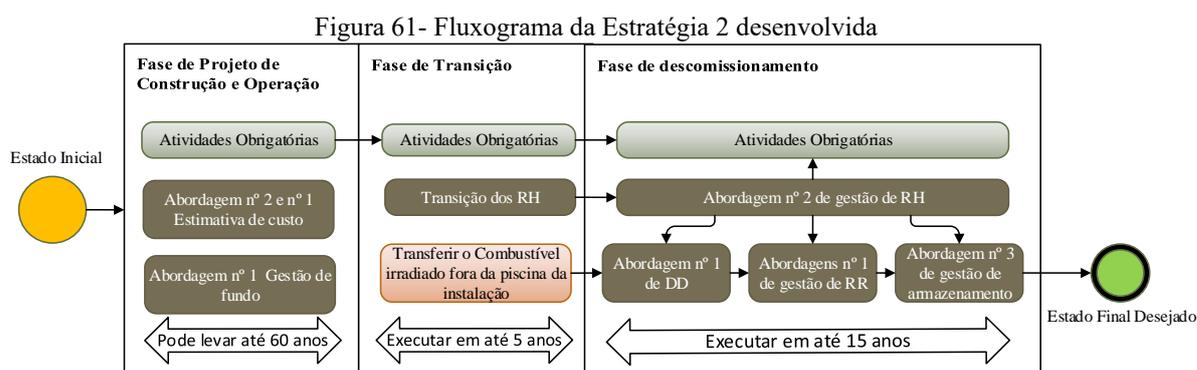
A abordagem de gestão de RH nº 2 (organização operadora mantém o controle do projeto e delega atividades para empresas terceirizadas) indicada pode ser adotada, em conformidade com a legislação que estabelece a responsabilidade da instalação no processo de descomissionamento. Nesse sentido, optou-se por combinar o conhecimento dos funcionários da instalação com a terceirização de atividades específicas, a fim de aproveitar a expertise de profissionais especializados e agregar novas experiências e conhecimentos ao projeto.

Apesar da proteção do conhecimento ser considerada mais favorável na opção nº 1, a análise MCDA indica que, devido aos custos associados e à disponibilidade de recursos humanos necessários pela quantidade de execução de tarefas de desmantelamento e processamento de RR, esses fatores têm um peso maior do que a questão da proteção da propriedade intelectual. Portanto, a opção selecionada é considerada mais adequada.

A abordagem nº 2 de estimativa de custo, que utiliza a técnica de analogia específica baseada no ISDC, foi indicada e pode ser adotada e alterada pelos mesmos motivos citados na Estratégia 1.

A abordagem nº 1 para a gestão de fundo (gestão interna com captação de recursos por meio de taxas regulares baseada no método de “valor presente líquido” e mecanismos de saques restritos) foi indicada e pode ser selecionada em virtude ao menor valor anual captado e independência da gestão. Sendo assim, a instalação poderá investir um percentual, em caso de superavit, para projetos de pesquisa e inovação em descomissionamento, em parcerias com as ICTs, uma vez que o país não possui muita experiência nessa área. Outrossim, como as atividades são monopolizadas pela União, em caso de desligamento prematuro, a própria União poderá apoiar com as despesas do descomissionamento.

O fluxograma apresentado na Figura 61 representa a Estratégia 2 desenvolvida para descomissionar reatores de pequeno porte no Brasil. Essa estratégia contempla as atividades obrigatórias (cinza), a abordagem de combustível irradiado (salmão) e as abordagens (marrom) selecionadas pelo autor.



Fonte: Autor.

10.4 Estratégia 3 – SAFSTOR para alcançar usos restritos: Cenário 2023

Essa estratégia tem como objetivo o desmantelamento protelado de reatores de pequeno porte, levando em consideração o cenário regulatório e do setor nuclear brasileiro atual, visando o seu aproveitamento para usos restritos.

10.4.1 Selecionando as abordagens para a Estratégia 3

Os pesos atribuídos aos fatores estão apresentados na Tabela 86, enquanto as abordagens selecionadas são destacadas em azul na Tabela 87, na Tabela 88, na Tabela 89, na Tabela 90, na Tabela 91 e na Tabela 92.

Tabela 86- Classificação dos fatores e pesos da Estratégia 3

Abordagem	Fatores	Peso
Técnicas e administrativas	Custo (US\$ milhões)	9
Gestão de Fundo	Segurança no investimento	8
Técnicas e administrativas	Proteção Radiológica (IOE)	8
Técnicas e administrativas	Proteção Radiológica- Público	7
Recursos Humanos	Proteção à Propriedade Intelectual	7
Gestão de Fundo	Riscos associados ao desligamento prematuro	7
Estimativa de custo	Nível de erro de precisão (estimativa de custo)	6
Técnicas e administrativas	Viabilidade Técnica	5
Depósito de Rejeitos	Segurança Física	5
Recursos Humanos	Disponibilidade Recursos humanos qualificados	5
Gestão de Fundo	Flexibilidade para investir em CT&I	4
Técnicas e administrativas	Riscos Industriais	3
Técnicas e administrativas	Volume de RR (m3)	3
Técnicas e administrativas	Incerteza no regulamento	3
Recursos Humanos	Conhecimento disponível	2
Gestão de Fundo	Transparência	2
Estimativa de custo	Dificuldade	2
Técnicas e administrativas	Tempo (anos)	1

Fonte: Autor.

Tabela 87- Seleção de abordagens técnicas DD - Estratégia 3

Abordagens	Tempo (anos)			Custo (U\$ milhões)			Volume de RR (m3)			Viabilidade Técnica			Proteção Radiológica (IOE)			Proteção Radiológica-Público			Riscos Industriais			Incerteza no regulamento			Total
	2	1	2	3	9	27	2	3	8	2	5	10	3	8	24	2	7	16	4	3	12	2	3	6	
Nº 1	2	1	2	3	9	27	2	3	8	2	5	10	3	8	24	2	7	16	4	3	12	2	3	6	101
Nº 2	1	1	1	2	9	18	3	3	12	4	5	20	2	8	16	4	7	32	3	3	9	4	3	12	113
Nº 3	4	1	4	1	9	9	3	3	12	3	5	15	2	8	16	2	7	16	2	3	6	3	3	9	82
Nº 4	5	1	5	5	9	45	4	3	16	3	5	15	2	8	16	5	7	40	2	3	6	5	3	15	149

Fonte: Autor.

Tabela 88- Seleção de abordagens técnicas gestão de RR - Estratégia 3

Abordagens	Tempo (anos)			Custo (U\$ milhões)			Volume de RR (m3)			Viabilidade Técnica			Proteção Radiológica (IOE)			Proteção Radiológica-Público			Riscos Industriais			Incerteza no regulamento			Total
	2	1	2	4	9	36	2	3	6	2	5	10	4	8	32	2	7	14	4	3	12	2	3	6	
Nº 1	2	1	2	4	9	36	2	3	6	2	5	10	4	8	32	2	7	14	4	3	12	2	3	6	118
Nº 2	1	1	1	3	9	27	4	3	12	3	5	15	2	8	16	4	7	28	3	3	9	3	3	9	117
Nº 3	1	1	1	2	9	18	3	3	9	5	5	25	3	8	24	3	7	21	3	3	9	5	3	15	122
Nº 4	5	1	5	2	9	18	4	3	12	3	5	15	1	8	8	5	7	35	2	3	6	5	3	15	114

Fonte: Autor.

Tabela 89- Seleção de abordagens técnicas armazenamento - Estratégia 3

Abordagens	Viabilidade Técnica			Segurança Física			Incerteza no regulamento			Total
	5	5	25	1	5	5	5	3	15	
Nº 1	5	5	25	1	5	5	5	3	15	45
Nº 2	4	5	20	2	5	10	3	3	9	39
Nº 3	3	5	15	2	5	10	3	3	9	34

Fonte: Autor.

Tabela 90- Seleção de abordagens administrativas de gestão RH - Estratégia 3

Abordagens	Custo (U\$ milhões)			Disponibilidade Recursos humanos qualificados			Conhecimento disponível			Proteção à Propriedade Intelectual			Total
	4	9	36	3	5	15	2	2	4	2	7	14	
Nº 1	4	9	36	3	5	15	2	2	4	2	7	14	69
Nº 2	2	9	18	2	5	10	3	2	6	4	7	28	55
Nº 3	3	9	27	4	5	20	3	2	6	4	7	28	81
Nº 4	1	9	9	2	5	10	3	2	6	4	7	28	62

Fonte: Autor.

Tabela 91- Seleção de abordagens administrativa estimativa de custo - Estratégia 3

Abordagens	Tempo de implementação			Custo de implementação			Nível de erro de precisão			Dificuldade			Incertezas no regulamento			Total
Nº 1	4	1	4	5	9	45	1	6	6	4	2	8	1	3	3	66
Nº 2	3	1	3	3	9	27	2	6	12	3	2	6	2	3	6	54
Nº 3	4	1	4	4	9	36	3	6	18	4	2	8	2	3	6	72
Nº 4	2	1	2	2	9	18	5	6	30	2	2	4	4	3	12	66

Fonte: Autor.

Tabela 92- Seleção de abordagens administrativa gestão de fundo - Estratégia 3

Abordagens	Segurança no investimento			Flexibilidade para investir em CT&I			Riscos associados ao desligamento prematuro			Transparência			Incertezas no regulamento			Total
Nº 1	3	8	24	2	4	8	4	7	28	4	2	8	2	3	6	74
Nº 2	2	8	16	4	4	16	2	7	14	2	2	4	2	3	6	56
Nº 3	4	8	32	4	4	16	2	7	14	2	2	4	3	3	9	75
Nº 4	5	8	40	5	4	20	4	7	28	4	2	8	5	3	15	111

Fonte: Autor.

10.4.2 Definindo a Estratégia 3

Os cálculos dos fatores indicaram inicialmente a seleção da opção nº 4 para a abordagem de gestão de RR, porém foi necessário alterar para a opção nº 2, a segunda colocada. Essa mudança foi necessária devido à não recomendação da AIEA em confinar os radionuclídeos na instalação, conforme prever a opção nº 4.

10.4.3 Análise da Estratégia 3

A abordagem de DD nº 3, que consiste em colocar a instalação em condições seguras aguardando o decaimento radioativo antes de realizar as atividades de desmantelamento e remoção dos rejeitos para um depósito específico, pode ser selecionada como abordagem para o descomissionamento dos reatores de pequeno porte de forma protelada. Essa abordagem requer investimentos para melhorar a infraestrutura do local, reforçar as estruturas existentes, aumentar a blindagem biológica e implementar sistemas de monitoramento e segurança durante longos anos.

A abordagem de gestão de RR nº 2 pode ser recomendada para ser adotada nos casos em que se busca alcançar usos restritos dos reatores de pequeno porte. Essa abordagem pode ser benéfica em conjunto com a restauração das estruturas, pois os rejeitos lá são de nível muito baixo, aproveitando o decaimento natural da radioatividade ao longo do tempo. Uma das principais vantagens é que a maioria dos rejeitos estará abaixo do limite de dispensa, devido ao

processo de decaimento radioativo. Isso significa que, após determinado período de monitoramento, esses rejeitos podem ser considerados seguros para serem expostos ao público em usos restritos.

Inicialmente, a abordagem de gestão de armazenamento selecionada será a nº 03, pois não há outras opções viáveis disponíveis. No entanto, é importante considerar que, devido aos longos períodos necessários para um armazenamento seguro, é possível que o repositório já esteja em operação quando as atividades de desmantelamento forem iniciadas. Nesse sentido, é recomendado que no PPD seja prevista uma possibilidade de alteração da abordagem de gestão de armazenamento, caso ocorra a disponibilidade de um repositório apropriado e sejam garantidas as condições de segurança no transporte dos rejeitos radioativos até o destino.

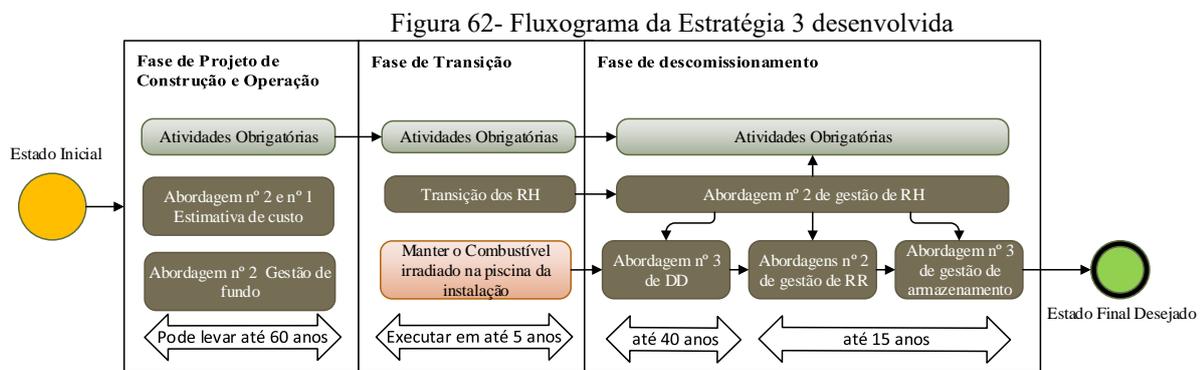
A abordagem de gestão de RH nº 2 é altamente recomendada, levando em consideração as características dos RH atualmente envolvidos na área nuclear. Atualmente, esses profissionais são servidores públicos concursados e altamente capacitados, possuindo um conhecimento especializado na operação da instalação. Após o desligamento da instalação, existe a possibilidade de que a mão de obra fique ociosa por longos períodos, especialmente se considerarmos o período de armazenamento seguro de até 40 anos. Nesse sentido, é importante recomendar a realocação do pessoal em outras instalações nucleares ou em atividades relacionadas, de modo a aproveitar e manter o conhecimento e experiência desses profissionais.

Adicionalmente, é possível designar uma pequena fração desse pessoal para realizar o monitoramento seguro da instalação durante o período de armazenamento. Essa equipe seria responsável por garantir a integridade da infraestrutura, monitorar os sistemas de segurança e realizar inspeções regulares, garantindo assim a segurança da instalação durante todo o período de armazenamento. Quando chegar o momento de iniciar as atividades de desmantelamento, recomenda-se a contratação, em sua maioria, de pessoal terceirizado especializado. Esses profissionais seriam responsáveis por conduzir as atividades de desmantelamento dos componentes e realizar a restauração da estrutura, seguindo os procedimentos e diretrizes estabelecidos no Plano de Descomissionamento.

A abordagem de estimativa de custo segue os mesmos princípios das Estratégias 1 e 2. A abordagem nº 2 para a gestão de fundo, que consiste na gestão externa com captação dos recursos financeiros por um período mais curto, mantendo o método do valor presente sem mecanismo de saque, pode ser selecionada e adotada com segurança. Essa opção é mais favorável tendo em vista os longos períodos de administração do fundo e maior segurança no investimento.

Para gerenciar o combustível irradiado, a abordagem adotada pode fazer uso da piscina existente na instalação, acompanhando de perto a decisão do país em relação à política de gestão desse combustível. Caso haja uma decisão sobre sua destinação durante o período de armazenamento seguro, essa ação poderá ser realizada conforme as diretrizes estabelecidas. No entanto, caso não haja uma decisão definitiva sobre a gestão do combustível irradiado, quando estiver próximo da fase de desmantelamento, será necessário construir uma instalação externa específica para o armazenamento desses combustíveis.

O fluxograma apresentado na Figura 62, representa a Estratégia 3 desenvolvida para descomissionar reatores de pequeno porte no Brasil. Essa estratégia contempla as atividades obrigatórias (cinza), a abordagem de combustível irradiado (salmão) e as abordagens (marrom) selecionadas pelo autor.



Fonte: Autor

10.5 Estratégia 4 – SAFSTOR para alcançar usos irrestritos: Cenário 2023

Essa estratégia tem como objetivo o desmantelamento protelado de reatores de pequeno porte, levando em consideração o cenário regulatório e do setor nuclear brasileiro atual, visando o seu aproveitamento para usos irrestritos. Além disso, para ilustrar possíveis análises de preferências estratégicas que podem surgir, inversamente da Estratégia 2, foi adicionada a não prioridade de proteger o conhecimento em CT&I desenvolvido nas instalações como parte dessa estratégia.

10.5.1 Selecionando as abordagens para a Estratégia 4

Os pesos atribuídos aos fatores estão apresentados na Tabela 93, enquanto as abordagens selecionadas são destacadas em azul na Tabela 94, na Tabela 95, na Tabela 96, na Tabela 97, na Tabela 98 e na Tabela 99.

Tabela 93- Classificação dos fatores e pesos da Estratégia 4

Abordagem	Fatores	Peso
Técnicas e administrativas	Custo (U\$ milhões)	9
Técnicas e administrativas	Volume de RR (m3)	9
Gestão de Fundo	Segurança no investimento	8
Técnicas e administrativas	Proteção Radiológica (IOE)	8
Técnicas e administrativas	Riscos Industriais	8
Técnicas e administrativas	Proteção Radiológica- Público	7
Depósito de Rejeitos	Segurança Física	7
Técnicas e administrativas	Viabilidade Técnica	5
Recursos Humanos	Disponibilidade Recursos humanos qualificados	5
Técnicas e administrativas	Incerteza no regulamento	5
Gestão de Fundo	Riscos associados ao desligamento prematuro	4
Recursos Humanos	Proteção à Propriedade Intelectual	3
Estimativa de custo	Nível de erro de precisão (estimativa de custo)	3
Gestão de Fundo	Flexibilidade para investir em CT&I	3
Recursos Humanos	Conhecimento disponível	2
Gestão de Fundo	Transparência	2
Estimativa de custo	Dificuldade	2
Técnicas e administrativas	Tempo (anos)	1

Fonte: Autor.

Tabela 94- Seleção de abordagens técnicas DD - Estratégia 4

Abordagens	Tempo (anos)			Custo (U\$ milhões)			Volume de RR (m3)			Viabilidade Técnica			Proteção Radiológica (IOE)			Proteção Radiológica- Público			Riscos Industriais			Incerteza no regulamento			Total
Nº 1	2	1	2	3	9	27	2	9	18	2	5	10	3	8	24	2	7	14	4	8	32	2	5	10	137
Nº 2	1	1	1	2	9	18	3	9	27	4	5	20	2	8	16	4	7	28	3	8	24	4	5	20	154
Nº 3	4	1	4	1	9	9	3	9	27	3	5	15	2	8	16	2	7	14	2	8	16	3	5	15	116
Nº 4	5	1	5	5	9	45	4	9	36	3	5	15	2	8	16	5	7	35	2	8	16	5	5	25	193

Fonte: Autor.

Tabela 95- Seleção de abordagens técnicas gestão de RR - Estratégia 4

Abordagens	Tempo (anos)			Custo (U\$ milhões)			Volume de RR (m3)			Viabilidade Técnica			Proteção Radiológica (IOE)			Proteção Radiológica- Público			Riscos Industriais			Incerteza no regulamento			Total
Nº 1	2	1	2	4	9	36	2	9	18	2	5	10	4	8	32	2	7	14	4	8	32	2	5	10	154
Nº 2	1	1	1	3	9	27	4	9	36	3	5	15	2	8	16	4	7	28	3	8	24	3	5	15	162
Nº 3	1	1	1	2	9	18	3	9	27	5	5	25	3	8	24	3	7	21	3	8	24	5	5	25	165
Nº 4	5	1	5	2	9	18	4	9	36	3	5	15	1	8	8	5	7	35	2	8	16	5	5	25	158

Fonte: Autor.

Tabela 96- Seleção de abordagens técnicas armazenamento - Estratégia 4

Abordagens	Viabilidade Técnica			Segurança Física			Incerteza no regulamento			Total
Nº 1	5	5	25	1	7	7	5	5	25	57
Nº 2	4	5	20	2	7	14	3	5	15	49
Nº 3	3	5	15	2	7	14	3	5	15	44

Fonte: Autor.

Tabela 97- Seleção de abordagens administrativas de gestão RH - Estratégia 4

Abordagens	Custo (US\$ milhões)			Disponibilidade Recursos humanos qualificados			Conhecimento disponível			Proteção à Propriedade Intelectual			Total
Nº 1	4	9	36	3	5	15	2	2	4	2	3	6	69
Nº 2	2	9	18	2	5	10	3	2	6	4	3	12	46
Nº 3	3	9	27	4	5	20	3	2	6	4	3	12	65
Nº 4	1	9	9	2	5	10	3	2	6	4	3	12	46

Fonte: Autor.

Tabela 98- Seleção de abordagens administrativa estimativa de custo - Estratégia 4

Abordagens	Tempo de implementação			Custo de implementação			Nível de erro de precisão			Dificuldade			Incertezas no regulamento			Total
Nº 1	4	1	4	5	9	45	1	3	3	4	2	8	1	5	5	65
Nº 2	3	1	3	3	9	27	2	3	6	3	2	6	2	5	10	52
Nº 3	4	1	4	4	9	36	3	3	9	4	2	8	2	5	10	67
Nº 4	2	1	2	2	9	18	5	3	15	2	2	4	4	5	20	59

Fonte: Autor.

Tabela 99- Seleção de abordagens administrativa gestão de fundo - Estratégia 4

Abordagens	Segurança no investimento			Flexibilidade para investir em CT&I			Riscos associados ao desligamento prematuro			Transparência			Incertezas no regulamento			Total
Nº 1	3	8	24	2	3	6	4	4	16	4	2	8	2	5	10	64
Nº 2	2	8	16	4	3	12	2	4	8	2	2	4	2	5	10	50
Nº 3	4	8	32	4	3	12	2	4	8	2	2	4	3	5	15	71
Nº 4	5	8	40	5	3	15	4	4	16	4	2	8	5	5	25	104

Fonte: Autor.

10.5.2 Definindo a Estratégia 4

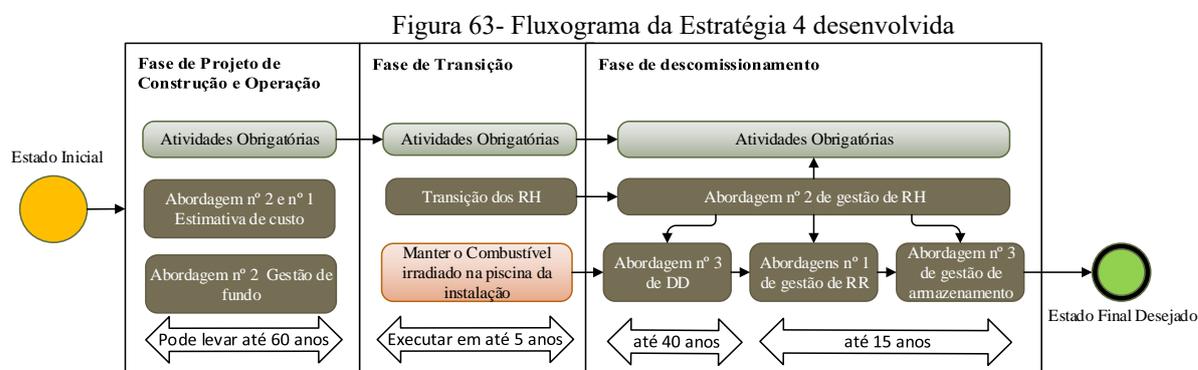
As abordagens de gestão de RH nº 2 e nº 4 obtiveram pontuações semelhantes. No entanto, a abordagem nº 2 foi selecionada devido à inviabilidade de se adotar a abordagem nº 4 no cenário atual.

10.5.3 Análise da Estratégia 4

A abordagem de DD, gestão de armazenamento, gestão de RH, gestão de fundos e a de combustível irradiado são semelhantes e com os mesmos objetivos das abordagens selecionadas na Estratégia 3. No entanto, com base na análise MCDA realizada, sugere-se uma alteração na abordagem de gestão de RR, alterando para a opção nº 1, pois reduz o volume expressivo de rejeitos que precisariam ser tratados. Essa abordagem busca otimizar a gestão dos RR, por meio de reciclagem e reutilização, especialmente em relação aos rejeitos provenientes da estrutura do prédio, que constituem a maior parte do volume gerado.

Outro ponto identificado foi que, comparando com a Estratégia 2 que visava priorizar projetos de CT&I, além da abordagem de DD que indica o tempo de execução, houve apenas a alteração da abordagem de gestão do fundo. Desse modo, identificou que para priorizar CT&I é importante que a gestão do fundo seja interna e adotado a abordagem nº 1 de gestão de fundo.

O fluxograma apresentado na Figura 63, representa a Estratégia 4 desenvolvida para descomissionar reatores de pequeno porte no Brasil. Essa estratégia contempla as atividades obrigatórias (cinza), a abordagem de combustível irradiado (salmão) e as abordagens (marrom) selecionadas pelo autor.



Fonte: Autor.

10.6 Estratégia 5 – DECON para alcançar usos restritos: Cenário futuro

Essa estratégia tem como objetivo o desmantelamento imediato de reatores de pequeno porte, levando em consideração o cenário regulatório e do setor nuclear brasileiro no futuro, visando o seu aproveitamento para usos restritos.

10.6.1 Selecionando as abordagens para a Estratégia 5

Os pesos atribuídos aos fatores estão apresentados na Tabela 100, enquanto as abordagens selecionadas são destacadas em azul na Tabela 101, na Tabela 102, na Tabela 103, na Tabela 104, na Tabela 105 e na Tabela 106. Os pontos marcados em amarelo são aqueles que houve alteração em virtude do novo cenário.

Tabela 100- Classificação dos fatores e pesos da Estratégia 5

Abordagem	Fatores	Peso
Técnicas e administrativas	Tempo (anos)	10
Recursos Humanos	Conhecimento disponível	9
Técnicas e administrativas	Incerteza no regulamento	9
Técnicas e administrativas	Proteção Radiológica (IOE)	8
Recursos Humanos	Proteção à Propriedade Intelectual	8
Estimativa de custo	Nível de erro de precisão (estimativa de custo)	8
Gestão de Fundo	Segurança no investimento	7
Gestão de Fundo	Riscos associados ao desligamento prematuro	7
Técnicas e administrativas	Riscos Industriais	6
Técnicas e administrativas	Viabilidade Técnica	5
Depósito de Rejeitos	Segurança Física	5
Técnicas e administrativas	Custo (US\$ milhões)	4
Gestão de Fundo	Flexibilidade para investir em CT&I	4
Técnicas e administrativas	Volume de RR (m3)	4
Recursos Humanos	Disponibilidade Recursos humanos qualificados	3
Técnicas e administrativas	Proteção Radiológica- Público	3
Gestão de Fundo	Transparência	2
Estimativa de custo	Dificuldade	2

Fonte: Autor.

Tabela 101- Seleção de abordagens técnicas DD - Estratégia 5

Abordagens	Tempo (anos)			Custo (US\$ milhões)			Volume de RR (m3)			Viabilidade Técnica			Proteção Radiológica (IOE)			Proteção Radiológica-Público			Riscos Industriais			Incerteza no regulamento			Total
	2	10	20	3	4	12	2	4	8	2	5	10	3	8	24	2	3	6	4	6	24	2	9	18	
Nº 1	2	10	20	3	4	12	2	4	8	2	5	10	3	8	24	2	3	6	4	6	24	2	9	18	122
Nº 2	1	10	10	2	4	8	3	4	12	4	5	20	2	8	16	4	3	12	3	6	18	4	9	36	132
Nº 3	4	10	40	1	4	4	3	4	12	3	5	15	2	8	16	2	3	6	2	6	12	3	9	27	132
Nº 4	5	10	50	5	4	20	4	4	16	3	5	15	2	8	16	5	3	15	2	6	12	5	9	45	189

Fonte: Autor.

Tabela 102- Seleção de abordagens técnicas gestão de RR - Estratégia 5

Abordagens	Tempo (anos)			Custo (U\$ milhões)			Volume de RR (m3)			Viabilidade Técnica			Proteção Radiológica (IOE)			Proteção Radiológica-Público			Riscos Industriais			Incerteza no regulamento			Total
Nº 1	2	10	20	4	4	16	2	4	8	2	5	10	4	8	32	2	3	6	4	6	24	2	9	18	134
Nº 2	1	10	10	3	4	12	4	4	16	3	5	15	2	8	16	4	3	12	3	6	18	3	9	27	126
Nº 3	1	10	10	2	4	8	3	4	12	2	5	10	3	8	24	3	3	9	3	6	18	2	9	18	109
Nº 4	5	10	50	2	4	8	4	4	16	3	5	15	1	8	8	5	3	15	2	6	12	5	9	45	169

Fonte: Autor.

Tabela 103- Seleção de abordagens técnicas armazenamento - Estratégia 5

Abordagens	Viabilidade Técnica			Segurança Física			Incerteza no regulamento			Total
Nº 1	3	5	15	1	7	7	3	9	15	37
Nº 2	2	5	10	2	7	14	3	9	9	33
Nº 3	3	5	15	2	7	14	3	9	9	38

Fonte: Autor.

Tabela 104- Seleção de abordagens administrativas de gestão RH - Estratégia 5

Abordagens	Custo (U\$ milhões)			Disponibilidade Recursos humanos qualificados			Conhecimento disponível			Proteção à Propriedade Intelectual			Total
Nº 1	4	4	16	3	3	9	2	9	18	2	8	16	59
Nº 2	2	4	8	2	3	6	3	9	27	4	8	32	73
Nº 3	3	4	12	4	3	12	3	9	27	4	8	32	83
Nº 4	1	4	4	2	3	6	3	9	27	4	8	32	57

Fonte: Autor.

Tabela 105- Seleção de abordagens administrativa estimativa de custo - Estratégia 5

Abordagens	Tempo de implementação			Custo de implementação			Nível de erro de precisão			Dificuldade			Incertezas no regulamento			Total
Nº 1	4	10	40	4	4	16	1	8	8	3	2	8	1	9	9	81
Nº 2	3	10	30	3	4	12	2	8	16	3	2	6	2	9	18	82
Nº 3	4	10	40	4	4	16	3	8	24	4	2	8	2	9	18	106
Nº 4	2	10	20	2	4	8	5	8	40	2	2	4	4	9	36	108

Fonte: Autor.

Tabela 106- Seleção de abordagens administrativa gestão de fundo - Estratégia 5

Abordagens	Segurança no investimento			Flexibilidade para investir em CT&I			Riscos associados ao desligamento prematuro			Transparência			Incertezas no regulamento			Total
Nº 1	3	7	21	2	4	8	4	6	24	4	2	8	2	9	18	79
Nº 2	2	7	14	4	4	16	2	6	12	2	2	4	2	9	18	64
Nº 3	4	7	28	4	4	16	2	6	12	2	2	4	3	9	27	87
Nº 4	5	7	35	5	4	20	4	6	24	4	2	8	5	9	45	132

Fonte: Autor.

10.6.2 Definindo a Estratégia 5

Nesse cenário, as opções indicadas pela técnica MCDA serão consideradas sem alteração.

10.6.3 Análise da Estratégia 5

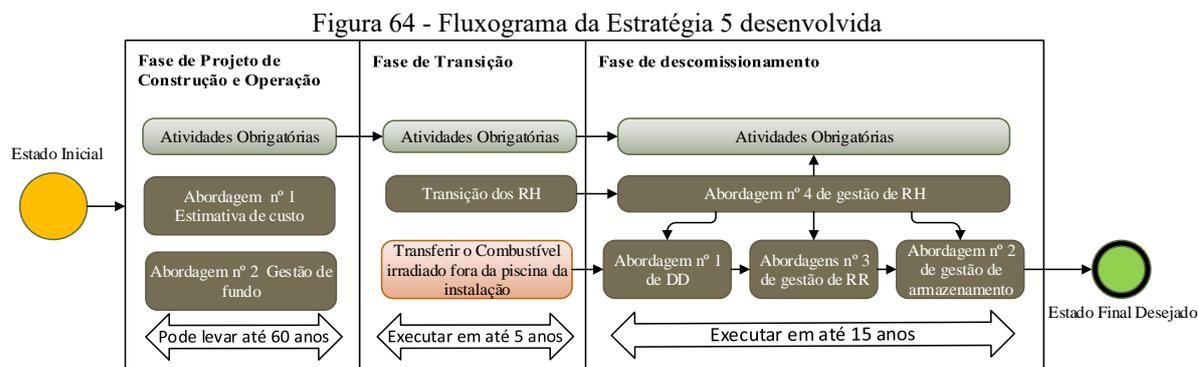
Diferentemente da estratégia no cenário atual, a abordagem de DD nº 1 foi indicada e pode ser adotada para reatores de pequeno porte. Ela pode ser combinada com a abordagem de RR nº 3 que envolve o tratamento dos rejeitos em uma instalação especializada. A empresa especializada deverá possuir expertise e equipamentos adequados para minimização e segregação dos rejeitos, bem como será possível reciclar aos máximos os rejeitos radioativos. A técnica MCDA indica que a opção de armazenamento nº 2 é a mais adequada com base na lista de prioridades, sendo assim, os rejeitos serão transferidos para depósitos intermediários.

Nesse contexto, a abordagem de gestão de RH nº 4 também está alinhada com as outras abordagens, pois envolve a contratação de uma empresa especializada em descomissionamento para executar as atividades necessárias. Portanto, a estratégia 5 está baseada na premissa de que no futuro haverá uma empresa especializada em gestão de RR e que será possível transferir a responsabilidade do descomissionamento.

A estimativa de custo da abordagem nº 1 é a opção mais adequada no cenário futuro, tendo em vista a possível experiência já adquirida no descomissionamento e a base de dados de informações mais precisas.

Com a mudança na natureza das atividades, que deixaram de ser monopólio da União, é necessário ter cuidado para garantir que os recursos estejam disponíveis em caso de desligamento prematuro. Por isso, a captação de recursos será acelerada para assegurar que os fundos estejam disponíveis o mais breve possível. Além disso, a gestão será externa, pois a empresa especializada é quem deverá administrar os fundos. Dessa forma, foi selecionada a abordagem nº 2 (gestão externa com captação dos recursos financeiros por um período mais curto, mantendo o método do valor presente sem mecanismo de saque).

O fluxograma apresentado na Figura 64, representa a Estratégia 5 desenvolvida para descomissionar reatores de pequeno porte no Brasil. Essa estratégia contempla as atividades obrigatórias (cinza), a abordagem de combustível irradiado (salmão) e as abordagens (marrom) selecionadas pelo autor.



Fonte: Autor

10.7 Estratégia 6 – DECON para alcançar usos irrestritos: Cenário futuro

Essa estratégia tem como objetivo o desmantelamento imediato de reatores de pequeno porte, levando em consideração o cenário regulatório e do setor nuclear brasileiro no futuro, visando o seu aproveitamento para usos irrestritos. Além disso, assim como na Estratégia 2, foi adicionada a preferência de proteger o conhecimento em CT&I desenvolvido nas instalações como parte dessa estratégia.

10.7.1 Selecionando as abordagens para a Estratégia 6

Os pesos atribuídos aos fatores estão apresentados na Tabela 107, enquanto as abordagens selecionadas são destacadas em azul na Tabela 108, na Tabela 109, na Tabela 110, na Tabela 111, na Tabela 112 e na Tabela 113. Os pontos marcados em amarelo são aqueles que houve alteração em virtude do novo cenário.

Tabela 107- Classificação dos fatores e pesos da Estratégia 6

Abordagem	Fatores	Peso
Técnicas e administrativas	Tempo (anos)	10
Técnicas e administrativas	Volume de RR (m3)	9
Gestão de Fundo	Flexibilidade para investir em CT&I	9
Recursos Humanos	Proteção à Propriedade Intelectual	9
Técnicas e administrativas	Riscos Industriais	8
Recursos Humanos	Disponibilidade Recursos humanos qualificados	8
Técnicas e administrativas	Proteção Radiológica (IOE)	7
Gestão de Fundo	Segurança no investimento	7
Técnicas e administrativas	Viabilidade Técnica	6
Estimativa de custo	Nível de erro de precisão (estimativa de custo)	6
Técnicas e administrativas	Incerteza no regulamento	6
Técnicas e administrativas	Proteção Radiológica- Público	5
Depósito de Rejeitos	Segurança Física	5
Recursos Humanos	Conhecimento disponível	4
Gestão de Fundo	Riscos associados ao desligamento prematuro	3
Técnicas e administrativas	Custo (U\$ milhões)	3
Gestão de Fundo	Transparência	3
Estimativa de custo	Dificuldade	2

Fonte: Autor.

Tabela 108- Seleção de abordagens técnicas DD - Estratégia 6

Abordagens	Tempo (anos)			Custo (U\$ milhões)			Volume de RR (m3)			Viabilidade Técnica			Proteção Radiológica (IOE)			Proteção Radiológica-Público			Riscos Industriais			Incerteza no regulamento			Total
Nº 1	2	10	20	3	3	9	2	9	18	2	6	12	3	7	21	2	5	10	4	8	32	2	6	12	134
Nº 2	1	10	10	2	3	6	3	9	27	4	6	24	2	7	14	4	5	20	3	8	24	4	6	24	149
Nº 3	4	10	40	1	3	3	3	9	27	3	6	18	2	7	14	2	5	10	2	8	16	3	6	18	146
Nº 4	5	10	50	5	3	15	4	9	36	3	6	18	2	7	14	5	5	25	2	8	16	5	6	30	204

Fonte: Autor.

Tabela 109- Seleção de abordagens técnicas gestão de RR – Estratégia 6

Abordagens	Tempo (anos)			Custo (U\$ milhões)			Volume de RR (m3)			Viabilidade Técnica			Proteção Radiológica (IOE)			Proteção Radiológica-Público			Riscos Industriais			Incerteza no regulamento			Total
Nº 1	2	10	20	4	3	12	2	9	18	2	6	12	4	7	28	2	5	10	4	8	32	2	6	12	144
Nº 2	1	10	10	3	3	9	4	9	36	3	6	18	2	7	14	4	5	20	3	8	24	3	6	18	149
Nº 3	1	10	10	2	3	6	3	9	27	2	6	12	3	7	21	3	5	15	3	8	24	2	6	12	127
Nº 4	5	10	50	2	3	6	4	9	36	3	6	18	1	7	7	5	5	25	2	8	16	5	6	30	188

Fonte: Autor.

Tabela 110- Seleção de abordagens técnicas armazenamento - Estratégia 6

Abordagens	Viabilidade Técnica			Segurança Física			Incerteza no regulamento			Total
Nº 1	3	6	18	1	5	5	3	6	18	41
Nº 2	2	6	12	2	5	10	3	6	18	40
Nº 3	3	6	18	2	5	10	3	6	18	46

Fonte: Autor.

Tabela 111 - Seleção de abordagens administrativas de gestão RH - Estratégia 6

Abordagens	Custo (U\$ milhões)			Disponibilidade Recursos humanos qualificados			Conhecimento disponível			Proteção à Propriedade Intelectual			Total
Nº 1	4	3	12	3	8	24	2	4	8	2	9	18	62
Nº 2	2	3	6	2	8	16	3	4	12	4	9	36	70
Nº 3	3	3	9	4	8	32	3	4	12	4	9	36	89
Nº 4	1	3	3	2	8	16	3	4	12	4	9	36	67

Fonte: Autor.

Tabela 112- Seleção de abordagens administrativa estimativa de custo - Estratégia 6

Abordagens	Tempo de implementação			Custo de implementação			Nível de erro de precisão			Dificuldade			Incertezas no regulamento			Total
Nº 1	4	10	40	4	3	12	1	6	6	3	2	8	1	6	6	72
Nº 2	3	10	30	3	3	9	2	6	12	3	2	6	2	6	12	69
Nº 3	4	10	40	4	3	12	3	6	18	4	2	8	2	6	12	90
Nº 4	2	10	20	2	3	6	5	6	30	2	2	4	4	6	24	84

Fonte: Autor.

Tabela 113- Seleção de abordagens administrativa gestão de fundo - Estratégia 6

Abordagens	Segurança no investimento			Flexibilidade para investir em CT&I			Riscos associados ao desligamento prematuro			Transparência			Incertezas no regulamento			Total
Nº 1	3	7	21	2	9	18	4	3	12	4	2	8	2	6	18	71
Nº 2	2	7	14	4	9	36	2	3	6	2	2	4	2	6	18	72
Nº 3	4	7	28	4	9	36	2	3	6	2	2	4	3	6	27	92
Nº 4	5	7	35	5	9	45	4	3	12	4	2	8	5	6	45	130

Fonte: Autor.

10.7.2 Definindo a Estratégia 6

Nesse cenário, as opções indicadas pela técnica MCDA serão consideradas sem alteração.

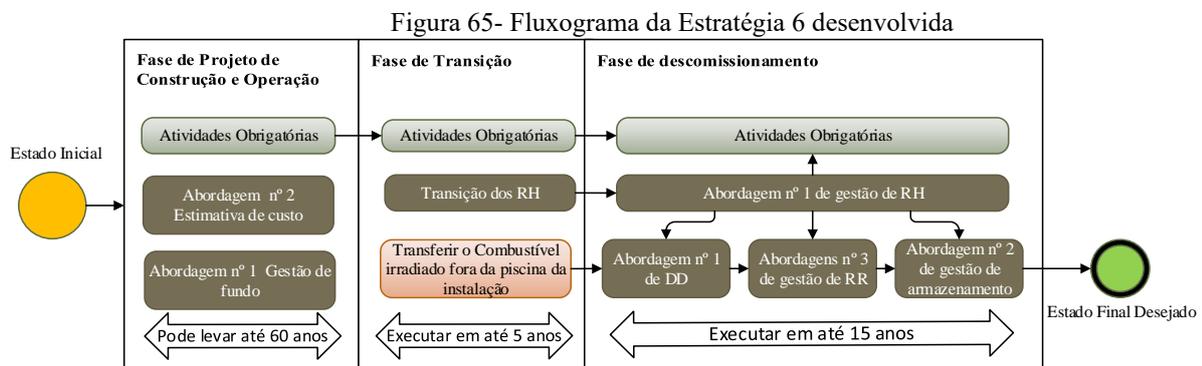
10.7.3 Análise da Estratégia 6

A abordagem n° 1 de desmantelamento foi indicada para realizar o desmantelamento completo da instalação, visando atingir o estado para usos irrestritos. Por outro lado, a abordagem de gestão de RR, que tem como objetivo transferir os rejeitos para uma instalação especializada, onde serão tratados e adequadamente acondicionados. Nesse contexto, é necessário estabelecer uma interface entre os recursos humanos da instalação principal (abordagem de RH n° 1), responsáveis pelo desmantelamento, e os recursos humanos da instalação especializada, que cuidarão dos RR. Dessa forma, os dois RH trabalham em conjunto para garantir uma gestão de RR mais adequada.

A abordagem de armazenamento indicada é a n° 2, embora os valores na análise MCDA tenham se aproximado da abordagem n° 1. É importante ressaltar que, caso o repositório geológico estivesse em pleno funcionamento, a opção n° 1 poderia ser considerada mais viável. No entanto, dado o contexto futuro, a abordagem de armazenamento n° 2 foi a indicação.

A abordagem de gestão de fundo selecionada é a n° 1, na qual a própria instalação será responsável pela gestão dos recursos financeiros. A flexibilidade de investir em CT&I foi um fator determinante para essa indicação. Sob essa abordagem, a instalação assumirá os custos relacionados às atividades de gestão de RR, que deverão ser pagos a empresa especializada contratada para executar essas atividades.

O fluxograma apresentado na Figura 65, representa a Estratégia 6 desenvolvida para descomissionar reatores de pequeno porte no Brasil. Essa estratégia contempla as atividades obrigatórias (cinza), a abordagem de combustível irradiado (salmão) e as abordagens (marrom) selecionadas pelo autor.



Fonte: Autor

10.8 Estratégia 7 – SAFSTOR para alcançar usos restritos: Cenário futuro

Essa estratégia tem como objetivo o desmantelamento protelado de reatores de pequeno porte, levando em consideração o cenário regulatório e do setor nuclear brasileiro no futuro, visando o seu aproveitamento para usos restritos.

10.8.1 Selecionando as abordagens para a Estratégia 7

Os pesos atribuídos aos fatores estão apresentados na Tabela 114, enquanto as abordagens selecionadas são destacadas em azul na Tabela 115, na Tabela 116, na Tabela 117, na Tabela 118, na Tabela 119 e na Tabela 120.

Tabela 114- Classificação dos fatores e pesos da Estratégia 7

Abordagem	Fatores	Peso
Técnicas e administrativas	Incerteza no regulamento	9
Gestão de Fundo	Segurança no investimento	8
Técnicas e administrativas	Proteção Radiológica (IOE)	8
Técnicas e administrativas	Proteção Radiológica- Público	7
Recursos Humanos	Proteção à Propriedade Intelectual	7
Gestão de Fundo	Riscos associados ao desligamento prematuro	7
Estimativa de custo	Nível de erro de precisão (estimativa de custo)	6
Técnicas e administrativas	Viabilidade Técnica	5
Depósito de Rejeitos	Segurança Física	5
Recursos Humanos	Disponibilidade Recursos humanos qualificados	5
Técnicas e administrativas	Custo (U\$ milhões)	4
Gestão de Fundo	Flexibilidade para investir em CT&I	4
Técnicas e administrativas	Riscos Industriais	3
Técnicas e administrativas	Volume de RR (m3)	3
Gestão de Fundo	Transparência	3
Recursos Humanos	Conhecimento disponível	2
Estimativa de custo	Dificuldade	2
Técnicas e administrativas	Tempo (anos)	1

Fonte: Autor.

Tabela 115- Seleção de abordagens técnicas DD - Estratégia 7

Abordagens	Tempo (anos)			Custo (U\$ milhões)			Volume de RR (m3)			Viabilidade Técnica			Proteção Radiológica (IOE)			Proteção Radiológica- Público			Riscos Industriais			Incerteza no regulamento			Total
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Nº 1	2	1	2	3	4	12	2	3	12	2	5	10	3	8	24	2	7	14	4	3	12	2	9	18	98
Nº 2	1	1	1	2	4	8	3	3	9	4	5	20	2	8	16	4	7	28	3	3	9	4	9	36	127
Nº 3	4	1	4	1	4	4	3	3	9	3	5	15	2	8	16	2	7	14	2	3	6	3	9	27	95
Nº 4	5	1	5	5	4	20	4	3	12	3	5	15	2	8	16	5	7	35	2	3	6	5	9	45	154

Fonte: Autor.

Tabela 116- Seleção de abordagens técnicas gestão de RR - Estratégia 7

Abordagens	Tempo (anos)			Custo (U\$ milhões)			Volume de RR (m3)			Viabilidade Técnica			Proteção Radiológica (IOE)			Proteção Radiológica-Público			Riscos Industriais			Incerteza no regulamento			Total
Nº 1	2	1	2	4	4	16	2	3	6	2	5	10	4	8	32	2	7	14	4	3	12	2	9	18	110
Nº 2	1	1	1	3	4	12	4	3	12	3	5	15	2	8	16	4	7	28	3	3	9	3	9	27	120
Nº 3	1	1	1	2	4	8	3	3	9	2	5	10	3	8	24	3	7	21	3	3	9	2	9	18	100
Nº 4	5	1	5	2	4	8	4	3	12	3	5	15	1	8	8	5	7	35	2	3	6	5	9	45	134

Fonte: Autor.

Tabela 117- Seleção de abordagens técnicas armazenamento - Estratégia 7

Abordagens	Viabilidade Técnica			Segurança Física			Incerteza no regulamento			Total
Nº 1	3	5	15	1	5	5	3	9	27	47
Nº 2	2	5	10	2	5	10	3	9	27	47
Nº 3	3	5	15	2	5	10	3	9	27	52

Fonte: Autor.

Tabela 118- Seleção de abordagens administrativas de gestão RH - Estratégia 7

Abordagens	Custo (U\$ milhões)			Disponibilidade Recursos humanos qualificados			Conhecimento disponível			Proteção à Propriedade Intelectual			Total
Nº 1	4	4	16	3	5	15	2	2	4	2	7	14	49
Nº 2	2	4	8	2	5	10	3	2	6	4	7	28	52
Nº 3	3	4	12	4	5	20	3	2	6	4	7	28	66
Nº 4	1	4	4	2	5	10	3	2	6	4	7	28	48

Fonte: Autor.

Tabela 119- Seleção de abordagens administrativa estimativa de custo - Estratégia 7

Abordagens	Tempo de implementação			Custo de implementação			Nível de erro de precisão			Dificuldade			Incertezas no regulamento			Total
Nº 1	4	1	4	4	4	16	1	6	6	3	2	8	1	9	9	43
Nº 2	3	1	3	3	4	12	2	6	12	3	2	6	2	9	18	51
Nº 3	4	1	4	4	4	16	3	6	18	4	2	8	2	9	18	64
Nº 4	2	1	2	2	4	8	5	6	30	2	2	4	4	9	36	80

Fonte: Autor

Tabela 120- Seleção de abordagens administrativa gestão de fundo - Estratégia 7

Abordagens	Segurança no investimento			Flexibilidade para investir em CT&I			Riscos associados ao desligamento prematuro			Transparência			Incertezas no regulamento			Total
Nº 1	3	7	21	2	9	18	4	3	12	4	3	12	2	6	12	75
Nº 2	2	7	14	4	9	36	2	3	6	2	3	6	2	6	12	74
Nº 3	4	7	28	4	9	36	2	3	6	2	3	6	3	6	18	94
Nº 4	5	7	35	5	9	45	4	3	12	4	3	12	5	6	30	134

Fonte: Autor.

10.8.2 Definindo a Estratégia 7

Nesse cenário, as abordagens de armazenamento nº 1 e 2 tiveram pontuações semelhantes, nesse sentido, foi optado por selecionar a opção nº 1 por ser a mais adequada.

10.8.3 Análise da Estratégia 7

Ao analisar o conjunto de abordagens indicadas pela técnica MCDA, essa estratégia contempla a transferência da responsabilidade do descomissionamento para uma empresa especializada após a fase de operação da instalação. Essa empresa seria responsável pelo desmantelamento após o período de armazenamento seguro, das atividades de gestão de RR e do transporte desses rejeitos para seus respectivos depósitos. Ela poderia empregar pessoal próprio ou terceirizar os serviços necessários.

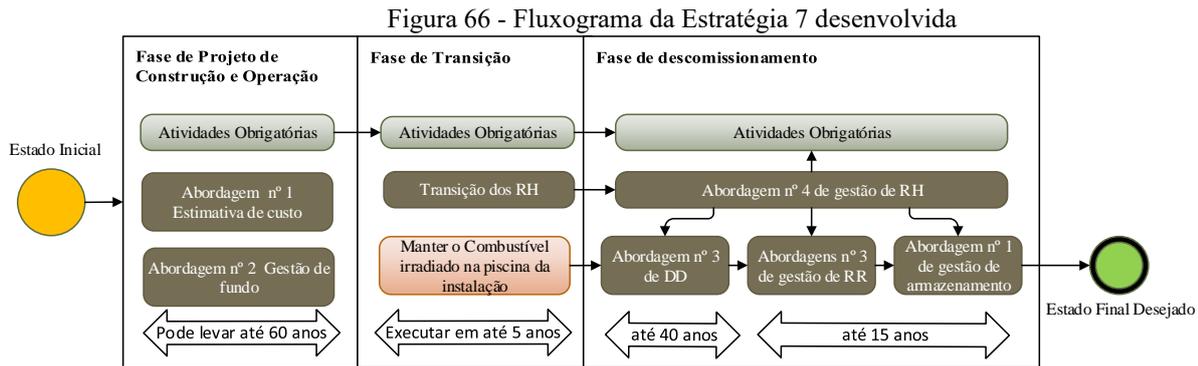
A estratégia dessa abordagem tem como objetivo transferir todas as atividades de descomissionamento para uma empresa especializada, que centralizaria as atividades de descomissionamento. Essa empresa teria a responsabilidade de gerir os fundos de descomissionamento (Abordagem nº 2), contratar pessoal especializado para as atividades técnicas e aproveitar equipamentos de descomissionamento em diversas instalações, entre outros benefícios. Essa empresa especializada se encarregaria de todas as etapas do descomissionamento, adquirindo expertise e aprimorando constantemente as técnicas empregadas.

Além disso, a gestão externa do fundo poderia ser realizada pela empresa especializada desde a fase inicial, permitindo uma estimativa de custos mais abrangente e a captação dos recursos necessários seria realizada por essa empresa, que seria a gestora do fundo de descomissionamento.

Considerando a tendência de construção de vários SMRs a partir de 2030 para atender à demanda energética, uma solução viável seria aplicar os mesmos conceitos de construção e modularização em série para criar processos de desmontagem e

descomissionamento em série. Assim um centro especializado em descomissionamento poderia ser construído pela empresa especializada.

O fluxograma apresentado na Figura 66, representa a Estratégia 7 desenvolvida para descomissionar reatores de pequeno porte no Brasil. Essa estratégia contempla as atividades obrigatórias (cinza), a abordagem de combustível irradiado (salmão) e as abordagens (marrom) selecionadas pelo autor.



Fonte: Autor.

10.9 Estratégia 8 – SAFSTOR para alcançar usos irrestritos: Cenário futuro

Essa estratégia tem como objetivo o desmantelamento protelado de reatores de pequeno porte, levando em consideração o cenário regulatório e do setor nuclear brasileiro no futuro, visando o seu aproveitamento para usos irrestritos.

10.9.1 Selecionando as abordagens para a Estratégia 8

Os pesos atribuídos aos fatores estão apresentados na Tabela 121, enquanto as abordagens selecionadas são destacadas em azul na Tabela 122, na Tabela 123, na Tabela 124, na Tabela 125, na Tabela 126 e na Tabela 127.

Tabela 121- Classificação dos fatores e pesos da Estratégia 8

Abordagem	Fatores	Peso
Técnicas e administrativas	Volume de RR (m3)	9
Técnicas e administrativas	Incerteza no regulamento	9
Gestão de Fundo	Segurança no investimento	8
Técnicas e administrativas	Proteção Radiológica (IOE)	8
Técnicas e administrativas	Riscos Industriais	8
Técnicas e administrativas	Proteção Radiológica- Público	7
Depósito de Rejeitos	Segurança Física	7
Estimativa de custo	Nível de erro de precisão (estimativa de custo)	7
Técnicas e administrativas	Viabilidade Técnica	5

Recursos Humanos	Disponibilidade Recursos humanos qualificados	5
Gestão de Fundo	Riscos associados ao desligamento prematuro	4
Recursos Humanos	Proteção à Propriedade Intelectual	3
Gestão de Fundo	Flexibilidade para investir em CT&I	3
Recursos Humanos	Conhecimento disponível	3
Técnicas e administrativas	Custo (U\$ milhões)	2
Gestão de Fundo	Transparência	2
Estimativa de custo	Dificuldade	2
Técnicas e administrativas	Tempo (anos)	1

Fonte: Autor.

Tabela 122- Seleção de abordagens técnicas DD - Estratégia 8

Abordagens	Tempo (anos)			Custo (U\$ milhões)			Volume de RR (m3)			Viabilidade Técnica			Proteção Radiológica (IOE)			Proteção Radiológica-Público			Riscos Industriais			Incerteza no regulamento			Total
	2	1	2	3	2	6	2	9	18	2	5	10	3	8	24	2	7	14	4	8	32	2	9	18	
Nº 1	2	1	2	3	2	6	2	9	18	2	5	10	3	8	24	2	7	14	4	8	32	2	9	18	124
Nº 2	1	1	1	2	2	4	3	9	27	4	5	20	2	8	16	4	7	28	3	8	24	4	9	36	156
Nº 3	4	1	4	1	2	2	3	9	27	3	5	15	2	8	16	2	7	14	2	8	16	3	9	27	121
Nº 4	5	1	5	5	2	10	4	9	36	3	5	15	2	8	16	5	7	35	2	8	16	5	9	45	178

Fonte: Autor.

Tabela 123- Seleção de abordagens técnicas gestão de RR - Estratégia 8

Abordagens	Tempo (anos)			Custo (U\$ milhões)			Volume de RR (m3)			Viabilidade Técnica			Proteção Radiológica (IOE)			Proteção Radiológica-Público			Riscos Industriais			Incerteza no regulamento			Total
	2	1	2	4	2	8	2	9	18	2	5	10	4	8	32	2	7	14	4	8	32	2	9	18	
Nº 1	2	1	2	4	2	8	2	9	18	2	5	10	4	8	32	2	7	14	4	8	32	2	9	18	134
Nº 2	1	1	1	3	2	6	4	9	36	3	5	15	2	8	16	4	7	28	3	8	24	3	9	27	153
Nº 3	1	1	1	2	2	4	3	9	27	2	5	10	3	8	24	3	7	21	3	8	24	2	9	18	129
Nº 4	5	1	5	2	2	4	4	9	36	3	5	15	1	8	8	5	7	35	2	8	16	5	9	45	164

Fonte: Autor.

Tabela 124- Seleção de abordagens técnicas armazenamento - Estratégia 8

Abordagens	Viabilidade Técnica			Segurança Física			Incerteza no regulamento			Total
Nº 1	3	5	15	1	7	7	3	9	27	49
Nº 2	2	5	10	2	7	14	3	9	27	51
Nº 3	3	5	15	2	7	14	3	9	27	56

Fonte: Autor.

Tabela 125- Seleção de abordagens administrativas de gestão RH - Estratégia 8

Abordagens	Custo (US\$ milhões)			Disponibilidade Recursos humanos qualificados			Conhecimento disponível			Proteção à Propriedade Intelectual			Total
Nº 1	4	2	8	3	5	15	2	3	6	2	3	6	35
Nº 2	2	2	4	2	5	10	3	3	9	4	3	12	35
Nº 3	3	2	6	4	5	20	3	3	9	4	3	12	47
Nº 4	1	2	2	2	5	10	3	3	9	4	3	12	33

Fonte: Autor.

Tabela 126- Seleção de abordagens administrativa estimativa de custo - Estratégia 8

Abordagens	Tempo de implementação			Custo de implementação			Nível de erro de precisão			Dificuldade			Incertezas no regulamento			Total
Nº 1	4	1	4	4	2	8	1	6	6	3	2	8	1	9	9	35
Nº 2	3	1	3	3	2	6	2	6	12	3	2	6	2	9	18	45
Nº 3	4	1	4	4	2	8	3	6	18	4	2	8	2	9	18	56
Nº 4	2	1	2	2	2	4	5	6	30	2	2	4	4	9	36	76

Fonte: Autor.

Tabela 127- Seleção de abordagens administrativa gestão de fundo - Estratégia 8

Abordagens	Segurança no investimento			Flexibilidade para investir em CT&I			Riscos associados ao desligamento prematuro			Transparência			Incertezas no regulamento			Total
Nº 1	3	8	24	2	3	6	4	4	16	4	2	8	2	9	18	72
Nº 2	2	8	16	4	3	12	2	4	8	2	2	4	2	9	18	58
Nº 3	4	8	32	4	3	12	2	4	8	2	2	4	3	9	27	83
Nº 4	5	8	40	5	3	15	4	4	16	4	2	8	5	9	45	124

Fonte: Autor.

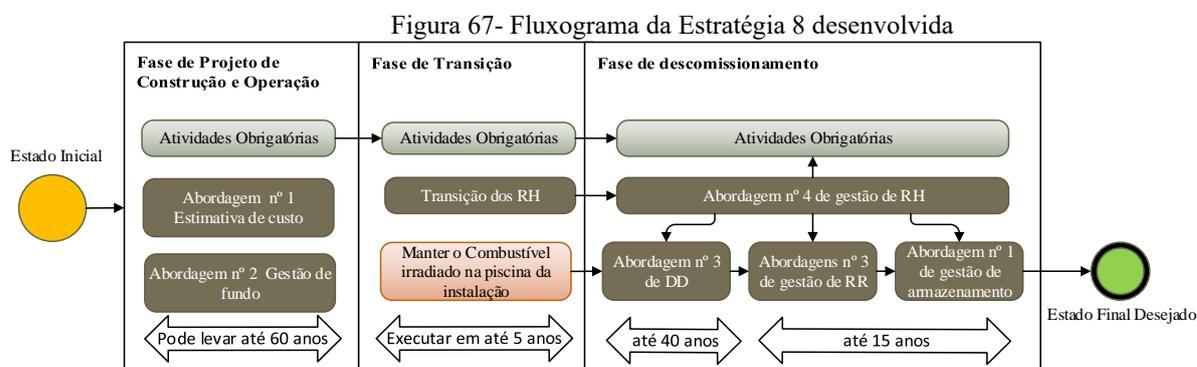
10.9.2 Definindo a Estratégia 8

Nesse cenário, as opções indicadas pela técnica MCDA serão consideradas sem alteração.

10.9.3 Análise da Estratégia 8

Apesar da alteração nos valores dos fatores considerados, a técnica MCDA indicou as mesmas abordagens que foram propostas na Estratégia 7. Isso significou que as estratégias proteladas para o cenário futuro não terão diferenças significativas na indicação de abordagens de descomissionamento. Portanto, as abordagens indicadas serão as mesmas, independentemente da perspectiva de uso final.

O fluxograma apresentado na Figura 67, representa a Estratégia 8 desenvolvida para descomissionar reatores de pequeno porte no Brasil. Essa estratégia contempla as atividades obrigatórias (cinza), a abordagem de combustível irradiado (salmão) e as abordagens (marrom) selecionadas pelo autor.



Fonte: Autor

11 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos neste trabalho, juntamente com as discussões.

11.1 Resultados do trabalho

11.1.1 Resultados da Parte 1

A primeira parte dos resultados deste trabalho proporcionou dados e informações relevantes sobre o descomissionamento de reatores nucleares, os quais foram obtidos através de estudos por meio de pesquisas bibliográficas. Além disso, alguns desses dados foram desenvolvidos pelo autor, utilizando seu conhecimento adquirido durante o curso de mestrado, visando alcançar o objetivo geral da pesquisa. Dentre os resultados obtidos nessa parte, é importante destacar:

- a) foram identificadas interpretações diferentes e significativas nas estratégias de descomissionamento adotadas pelas NPP no mundo. Foi estabelecido premissas temporais para cada estratégia de descomissionamento;
- b) foram apresentadas comparações entre os principais componentes dos reatores de pequeno, médio e grande porte que serão descomissionados ao final de seu ciclo de vida. Este trabalho identificou e analisou as diferenças estruturas entre esses componentes;
- c) foi analisado e fornecido uma análise dos isótopos alvo de ativação presentes no reator (APÊNDICE A);
- d) foi analisado e fornecido um estudo sobre o decaimento radioativo dos principais radionuclídeos no reator com base no estudo de caso (APÊNDICE B e C);
- e) foi fornecido um estudo comparativo entre as classificações de RR da AIEA e CNEN (APÊNDICE D);
- f) foi realizada uma análise dos limites de liberação dos radionuclídeos gerados no reator, em comparação com as normas estabelecidas pela CNEN de modo a verificar o tempo que os rejeitos poderá levar para serem dispensados;
- g) foram identificadas as normas e regulamentos aplicáveis ao descomissionamento no Brasil; e

- h) foram identificadas as principais atividades técnicas e administrativas de descomissionamento necessárias para desenvolver uma estratégia eficaz.

11.1.2 Resultados da Parte 2

Na segunda parte do trabalho, foi aplicada a técnica de avaliação de riscos para identificar os fatores que influenciam a seleção de estratégias de descomissionamento, bem como as atividades e abordagens relacionadas ao processo. Além disso, foi desenvolvida a metodologia proposta. Nesse sentido, os resultados obtidos nessa etapa foram:

- a) identificação de 18 fatores associados na seleção de estratégias de descomissionamento (APÊNDICE E);
- b) identificação e desenvolvimento de 23 abordagens técnicas e administrativas que podem ser adotadas para o desenvolvimento de estratégias de descomissionamento (APÊNDICE F);
- c) determinação de como os fatores se relacionam com as abordagens;
- d) desenvolvido um painel para o apoio às decisões estratégicas associadas as técnicas DD (APÊNDICE G); e
- e) desenvolvido uma metodologia para desenvolver estratégia de descomissionamento baseada em uma técnica do processo de avaliação de risco.

11.1.3 Resultados da Parte 3

A terceira parte fornece os resultados gerais desse trabalho, que são as 8 estratégias desenvolvidas para o descomissionamento de reatores de pequeno porte no Brasil em dois cenários distintos, considerando os 18 fatores identificados que podem influenciar na decisão da estratégia. O resumo dos fatores considerados em cada estratégias e seus respectivos pesos é apresentado na Tabela 128.

Tabela 128- Pesos atribuídos em cada fator por estratégia

Fatores	Estr. 1	Estr. 2	Estr. 3	Estr. 4	Estr. 5	Estr. 6	Estr. 7	Estr. 8
Conhecimento disponível	9	4	2	2	9	4	2	3
Custo (US\$ milhões)	9	8	9	9	4	3	4	2
Dificuldade	2	2	2	2	2	2	2	2
Disponibilidade Recursos humanos qualificados	3	8	5	5	3	8	5	5
Flexibilidade para investir em CT&I	4	9	4	3	4	9	4	3
Incerteza no regulamento	3	6	3	5	9	6	9	9
Nível de erro de precisão (estimativa de custo)	6	6	6	3	8	6	6	7
Proteção à Propriedade Intelectual	8	9	7	3	8	9	7	3
Proteção Radiológica (IOE)	8	7	8	8	8	7	8	8
Proteção Radiológica-Público	3	5	7	7	3	5	7	7
Riscos associados ao desligamento prematuro	7	3	7	4	7	3	7	4
Riscos Industriais	6	8	3	8	6	8	3	8
Segurança Física	5	5	5	7	5	5	5	7
Segurança no investimento	7	4	8	8	7	7	8	8
Tempo (anos)	10	10	1	1	10	10	1	1
Transparência	2	3	2	2	2	3	3	2
Viabilidade Técnica	5	6	5	5	5	6	5	5
Volume de RR (m3)	4	9	3	9	4	9	3	9

Fonte: Autor.

Nesse contexto, foi elaborado as estratégias com base nas informações abordadas na pesquisa, complementadas por sua experiência e conhecimento adquiridos durante o curso de mestrado. Para cada fator relevante na abordagem, foi atribuído um valor, o qual foi posteriormente multiplicado pelos respectivos pesos, a fim de indicar a abordagem mais apropriada no cenário nacional.

De forma a facilitar a visualização dos pesos atribuídos nos fatores em cada estratégia desenvolvidas no cenário 2023, é mostrado na Figura 68 um gráfico radar indicando esses valores. De mesmo modo, na Figura 69, é mostrado um gráfico radar indicando os pesos dos fatores considerados nas estratégias desenvolvidas no cenário futuro.

Figura 68- Gráfico radar - Estratégias no cenário 2023

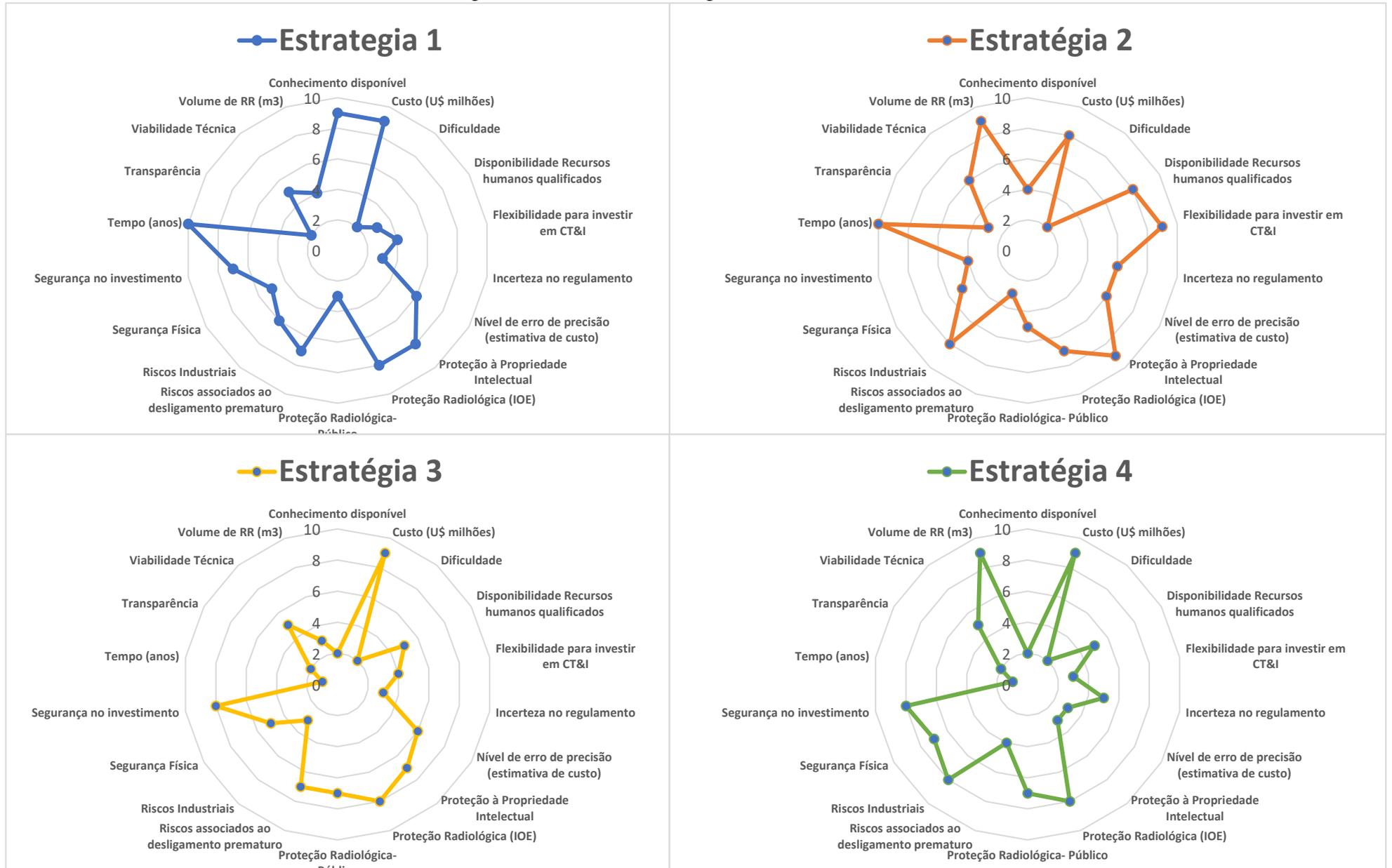
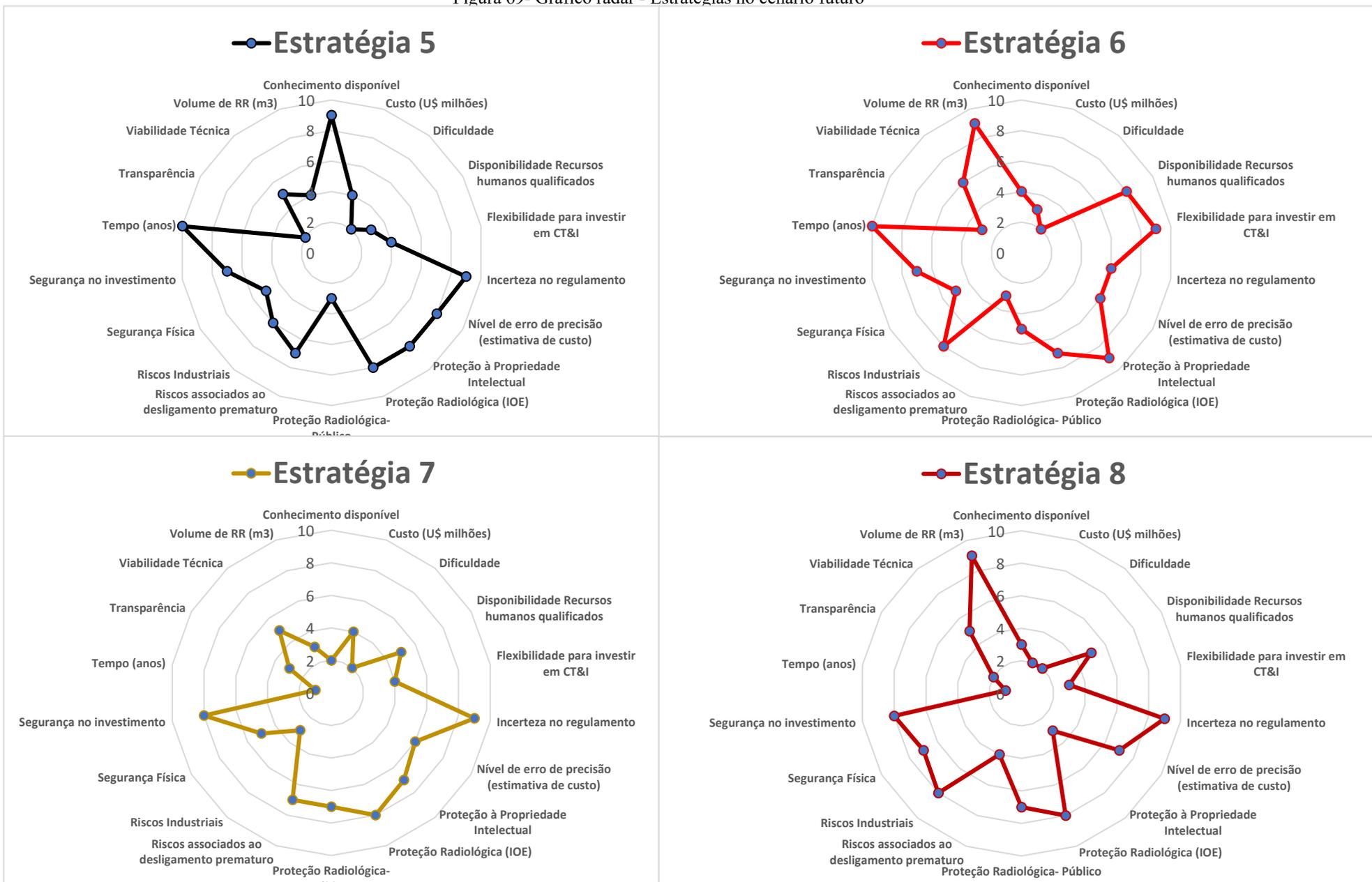


Figura 69- Gráfico radar - Estratégias no cenário futuro



Nesse sentido, na Tabela 129, são apresentadas as abordagens selecionadas em cada estratégia desenvolvida tendo como base os fatores considerados acima.

Tabela 129- Resultado das abordagens selecionadas em cada estratégia

Estratégia	Tipo	Estado Final	Cenário	DD	RR	Armaz.	RH	Estimativa de custo	Gestão de fundo
1	Imediato	Restrito	2023	2	2	3	1	2 > 1	2
2	Imediato	Irrestrito	2023	1	1	3	2	2 > 1	1
3	Protelado	Restrito	2023	3	2	3	2	2 > 1	2
4	Protelado	Irrestrito	2023	3	1	3	2	2 > 1	2
5	Imediato	Restrito	Futuro	1	3	2	4	1	2
6	Imediato	Irrestrito	Futuro	1	3	2	1	2	1
7	Protelado	Restrito	Futuro	3	3	1	4	1	2
8	Protelado	Irrestrito	Futuro	3	3	1	4	1	2

Fonte: Autor.

11.2 Discussões

11.2.1 Abordagens não selecionadas ou não indicadas

A abordagem de DD nº 4 e a abordagem de RR nº 4 que consideram a estratégia de confinamento (encapsulando a instalação), além da abordagem de estimativa de custo nº 4, que define a estimativa de custo com opiniões de especialistas e da abordagem de gestão de fundo nº 4, que prever o pagamento do descomissionamento somente ao final, não foram selecionadas por não serem recomendadas pela AIEA. No entanto, elas podem ser úteis em caso de acidentes ou desligamento prematuro. Entre elas, somente a abordagem de RR nº 4 foi indicada pela técnica MCDA na Estratégia 3 e foi alterada para a abordagem de RR nº 2.

Outras abordagens também não foram indicadas, como a abordagem de RH nº 3, onde seria possível uma parceria entre a organização operadora e uma ICT para executar o descomissionamento em parceria. Apesar de não ser indicada pela técnica MCDA, foi entendido que essa abordagem poderia ser mais adequada para descomissionar reatores de pesquisas que visam aproveitar as atividades de descomissionamento para desenvolver novos processos ou produtos de modo a prover futuros serviços na área de descomissionamento.

A abordagem de estimativa de custo nº 3 e gestão de fundo nº 3 também não foram indicadas pela técnica MCDA. É possível que essas abordagens sejam adotadas apenas se forem impostas pelo órgão regular ou por alguma necessidade específica.

11.2.2 Abordagens selecionadas

Apesar de os reatores nucleares de pequeno porte possuírem estruturas adaptáveis que permitem sua remoção completa, conforme abordagem nº 2 de DD, apenas a Estratégia 1 indicou essa opção. Isso se deve ao objetivo do projeto de descomissionamento de alcançar um estado final para usos restritos, onde o peso atribuído ao fator de volume de rejeitos radioativos é baixo. Assim, ao atribuir pesos mais elevados para esse fator, a abordagem nº 1 é a mais adequada. Isso se torna ainda mais importante quando há uma grande quantidade de geração de RR como nas estratégias voltadas para o uso irrestrito.

As estratégias 2 e 6 receberam prioridades nos investimentos em CT&I, o que teve um peso considerável na indicação da opção de abordagem de gestão do fundo nº 1, que envolve a gestão interna com possibilidade de investir o fundo em CT&I. No entanto, embora o fator de CT&I tenha influenciado na indicação da abordagem de RH nº 1 na Estratégia 6, a Estratégia 2 indicou a abordagem de RH nº 2. Foi interpretado que, apesar dos benefícios associados ao investimento em CT&I no cenário atual, os fatores relacionados as atividades industriais e a necessidade de pessoal capacitado para executar as atividades teve maior relevância para essa indicação.

No cenário futuro, as Estratégias 5, 7 e 8 transferem, praticamente, a responsabilidade do descomissionamento para uma empresa especializada. As abordagens de RR, RH e gestão de fundos são semelhantes e tendem a delegar essas atividades, embora apresentem diferenças significativas nos pesos atribuídos aos fatores. Apenas a Estratégia 6 difere das demais nesse cenário, devido à prioridade dada ao investimento em CT&I, o que exigirá uma interface entre a organização operadora e a empresa especializada.

As Estratégias 7 e 8 tiveram as mesmas indicações de abordagens, apesar da diferença expressiva nos valores dos fatores considerados, conforme é possível visualizar pelo gráfico radar da Figura 69. Isso significa que as estratégias proteladas no cenário futuro não terão diferenças significativas na indicação de abordagens de descomissionamento. Assim, as abordagens indicadas serão as mesmas, independentemente da perspectiva de uso final. Após considerar a segurança do armazenamento, previsto para um período de aproximadamente 40 anos, chegou à conclusão de que não haveria uma diferença significativa entre desmantelar completamente a estrutura ou mantê-la para outros fins. Isso

se deve ao fato de o prédio não apresentar níveis elevados de contaminação, o que possivelmente permitiria que sua estrutura fosse utilizada para diversos propósitos, a depender do caso inclusive sem restrições.

O trabalho também identificou que certos fatores são determinantes para a adoção de algumas abordagens de descomissionamento. Essas conclusões e suas respectivas justificativas foram apresentadas no resumo apresentado na Tabela 130. A tabela resume os principais pontos identificados.

Tabela 130- Atração de fatores nas abordagens

Fator	Determinante para a abordagem	Justificativa
Custo	RR nº 2	Ao analisar o gráfico radar, no qual o principal foco estava no custo, essa era a abordagem selecionada.
Proteção a PI	Gestão de fundo nº 1	Estratégia 2 e 6 conforme já citado.
Segurança no Investimento	Gestão de fundo nº 2	Ao analisar o gráfico radar, na qual o principal foco estava nesse fator, essa era abordagem selecionada

Fonte: Autor.

11.2.3 Mudanças de estratégias durante a operação

O desenvolvimento de estratégias está intrinsecamente ligado a diversos fatores, como viabilidade técnica, políticas governamentais e decisões de autoridades competentes. Por exemplo, se não houver depósitos intermediários ou finais para o armazenamento de rejeitos radioativos durante a operação, a única solução viável para a instalação é converter seu depósito inicial em um depósito final. Por outro lado, caso o repositório esteja operacional, a instalação terá duas opções para selecionar.

Outro exemplo é quando um país ainda não adotou uma política de gerenciamento do combustível irradiado e não há planos para construir uma instalação para receber esses combustíveis. Nesse caso, a única opção é adiar o descomissionamento até que uma solução seja decidida no futuro.

Por isso, uma estratégia deve ser realizada já na fase inicial de projeto de modo a contemplar essas possibilidades e se planejar antes que elas ocorram. Em diferentes cenários, outras abordagens podem ser consideradas após uma avaliação adequada. Por exemplo, pode ser decidido, inicialmente, não dismantelar os componentes principais e removê-los integralmente (abordagem de DD nº 2). No entanto, é essencial realizar uma

análise minuciosa da viabilidade técnica dessa opção e implementá-la de forma apropriada. É importante ressaltar que a instalação deve estar preparada para possíveis mudanças, como alterações regulatórias ao longo do ciclo de vida operacional, que podem proibir essa abordagem. Nesse caso, a estratégia deve ser ajustada e adotada de acordo com os requisitos vigentes.

11.2.3 Outros fatores e abordagens e suas mudanças com o tempo

É possível que possam ser identificados outros fatores determinantes e abordagens para o desenvolvimento de estratégias. Foi delimitado a analisar as abordagens técnicas e administrativas nas quatro áreas principais, que são atividades de DD, RR, RH e gestão financeira.

Além disso, é importante destacar que certos fatores podem se tornar mais determinantes do que outros ao longo do tempo. Por exemplo, embora o impacto social não tenha sido considerado neste estudo, é possível que no futuro ele se torne um fator determinante para a decisão entre as abordagens. Nesse sentido, é fundamental que os dados da metodologia seja atualizado e aplicado para analisar as novas indicações e abordagens sugeridas, levando em consideração as mudanças e evoluções que ocorrerem ao longo do tempo. Dessa forma, será possível obter uma visão atualizada e embasada para tomar decisões informadas no futuro.

12 CONCLUSÃO

Para reatores nucleares, o descomissionamento é a fase final do ciclo de vida após a definição da localização, o projeto, a construção, o comissionamento, a operação, a transição e o desligamento. É um projeto que envolve uma ampla gama de atividades técnicas (descontaminação, desmantelamento, gestão de RR), e administrativas (gestão de RH, gestão dos recursos financeiros), sempre levando em consideração a proteção da saúde, da segurança e do meio ambiente.

No presente trabalho, foram apresentadas informações técnicas sobre os principais componentes do circuito primário dos reatores nucleares de potência do tipo PWR, abrangendo tanto reatores de pequeno, médio e grande porte. Essas informações são importantes e fornece conhecimento sobre as abordagens técnicas viáveis para reatores de pequeno porte, considerando o contexto nacional e os requisitos regulatórios. Além disso, o trabalho incluiu estudos sobre a geração de radionuclídeos durante o processo de operação desses reatores, com o objetivo de compreender e adotar uma das opções de abordagens para o desmantelamento dos componentes contaminados por esses radionuclídeos.

Adicionalmente, o trabalho apresentou uma análise da estrutura atual do setor nuclear brasileiro e sua regulamentação, visando compreender os limites técnicos e regulatórios envolvidos no processo de descomissionamento. É importante ressaltar que, embora não exista um único documento que estabeleça a política de gestão de RR e combustível irradiado, o Brasil conta com um conjunto abrangente de documentos que delimitam as atividades de descomissionamento.

Além disso, o trabalho abordou as principais atividades técnicas e administrativas de descomissionamento. O levantamento bibliográfico apresentado pode servir como ponto de partida para futuras pesquisas sobre descomissionamento, fornecendo um panorama das atividades ao longo do tempo, técnicas adotadas, conceitos técnicos e administrativos, bem como a sua aplicação prática na área.

Para desenvolver as estratégias de descomissionamento, o trabalho adotou as técnicas do processo de avaliação de risco conforme estabelecido na norma ABNT ISO/IEC 31010. Nesse sentido, foram identificados, analisados e qualificados os principais fatores que influenciam a tomada de decisão sobre a estratégia de descomissionamento, levando em consideração as abordagens documentadas em artigos e publicações internacionais. Com base nessa análise, foi desenvolvido uma metodologia para a seleção das abordagens de

descomissionamento, considerando os fatores que impactam a estratégia. Essa metodologia pode ser aplicada no desenvolvimento de estratégias para reatores de qualquer porte no país.

Ao aplicar a metodologia desenvolvida para o desenvolvimento de estratégias de descomissionamento de reatores de pequeno porte, obteve sucesso na elaboração de oito estratégias. Essas estratégias foram desenvolvidas com base em uma lista de priorização dos fatores considerados relevantes. Nesse ponto, foi alcançado o objetivo geral deste trabalho, que consiste em propor estratégias de descomissionamento viáveis para projetos de descomissionamento no Brasil no presente e no futuro. Essas estratégias foram fundamentadas em uma análise de risco, proporcionando uma base sólida para apoiar a tomada de decisões no projeto de descomissionamento.

Do mesmo modo, esse trabalho, também, identificou algumas lacunas no cenário brasileiro que precisam ser mais bem analisadas para a elaboração mais robusta de planos para projetos de descomissionamento de reatores nucleares, das quais se destacam:

- a) criação de um documento para a política nacional de gestão de rejeitos radioativos, contemplando a estratégia a ser adotada, principalmente para o combustível nuclear irradiado;
- b) regulamentação do descomissionamento de reatores de pequeno porte;
- c) adoção de regulamentos para garantir que as instalações nucleares assegurem o recolhimento de recursos financeiros a serem usados no descomissionamento e, no final da vida útil, caso não seja suficiente, oferecer mecanismo de apoio para que as atividades de descomissionamento não sejam interrompidas;
- d) adoção de políticas de gestão de pessoal e gestão do conhecimento nas instalações nucleares de modo a incentivar os funcionários a continuarem na instalação e promover planos de carreira adequados;
- e) adoção de mecanismos para incentivar a ciência, pesquisa e inovação na área de descomissionamento e proteger o conhecimento tecnológico; e
- f) criação de um sistema robusto de conscientização e comunicação com a população brasileira de forma a esclarecer os benefícios e as limitações da tecnologia nuclear.

Face ao exposto, a partir da demanda prevista, a partir de 2030, os projetos de descomissionamento de reatores de pequeno porte deverão ser estabelecidos antes mesmo de iniciar a construção da instalação. Nesse ponto, este trabalho fornece uma visão geral das

principais atividades de descomissionamento e como elaborar Planos (preliminar e final) com base em estratégias adequadas.

A ação de descomissionamento é um processo importante no ciclo de vida de uma instalação nuclear. Assim, sendo bem executada e planejada mostrará à sociedade que é possível utilizar ao máximo os benefícios da tecnologia nuclear e devolver o local sem apresentar nenhum risco ao público e ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NUCLEAR ENGINEERING INTERNATIONAL, Past, Present and Future, Disponível em: <<https://www.neimagazine.com/features/featurepast-present-and-future-721-12006617/>> Acesso em 22 mar. 2023.
- [2] MEYERS, R., Nuclear Energy - A Volume in the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Series Second Edition, Springer Berlin Heidelberg, New York, NY (2018).
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Site. Advanced Reactors Information System. Disponível em: <<https://aris.iaea.org/default.html>> Acesso em 22 mar. 2023.
- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA, Nuclear Power Reactors in the World, Text, International Atomic Energy Agency (2022) pp. 1–100. Disponível em: <<https://www.iaea.org/publications/15211/nuclear-power-reactors-in-the-world>> Acesso em 16 mar. 2023.
- [5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Site. Power Reactor Information System. Disponível em: <<https://pris.iaea.org/pris/home.aspx>> Acesso em 26 mai. 2023.
- [6] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, Nuclear Power in a Clean Energy System – Analysis, IEA, Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/nuclear-power-in-a-clean-energy-system.>> Acesso em 22 mar. 2023.
- [7] NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA), Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities, Nuclear Technology Development and Economics (2021). Disponível em: <https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities?details=true> Acesso em 06 jun. 2023.
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, (2022). Disponível em: <https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf> Acesso em 22 mar. 2023.
- [9] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, Plano Nacional de Energia PNE 2050, (2020). Disponível em <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-523/05.05%20Energia%20Nuclear.pdf>>. Acesso em 22 mar. 2023.
- [10] BRASIL, Lei Nº 14.222, de 15 de Outubro de 2021, Cria a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN), (2021). Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Lei/L14222.htm> Acesso em 15 jan. 2023.
- [11] BRASIL, Decreto Nº 11.286, de 13 de dezembro de 2022 - DOU - Imprensa Nacional, Aprova a Estrutura Regimental e o Quadro Demonstrativo dos Cargos em Comissão e das Funções Gratificadas do Comando da Marinha, do Ministério da Defesa. Disponível em:

<<https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=DEC&numero=11286&ano=2022&ato=e8fITRE9kMZpWTda9>>. Acesso em: 07 mai. 2023.

[12] BRASIL, Decreto nº 5935, de 19 de outubro de 2006, Promulga a convenção conjunta para o gerenciamento seguro de combustível nuclear usado e dos rejeitos radioativos. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/decreto/d5935.htm>. Acesso em 22 dez. 2022.

[13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA, Decommissioning Strategies for Facilities Using Radioactive Material, Text, International Atomic Energy Agency (2007) pp. 1–37.

[14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA, Management of Project Risks in Decommissioning, Text, International Atomic Energy Agency (2019) pp. 1–57.

[15] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA, Safety Considerations in the Transition from Operation to Decommissioning of Nuclear Facilities, Text, International Atomic Energy Agency (2004) pp. 1–38.

[16] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA, Decommissioning of Facilities, Text, International Atomic Energy Agency (2014) pp. 1–23.

[17] SUH, Y.A., HORNIBROOK, C., YIM, M.-S., Decisions on nuclear decommissioning strategies: Historical review, Prog. Nucl. Energy **106** (2018) 34.

[18] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA, Official Web Site of the IAEA, Disponível em: <<https://www.iaea.org>>. Acesso em 31 mai. 2023

[19] FRAJNDLICH, R, Considerações Sobre o Descomissionamento Do Reator de Pesquisa IEA-R1 e Futuro de Suas Instalações Após o Seu Desligamento, (2014). Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

[20] MONTEIRO, D.B., Descomissionamento de centrais nucleares no Brasil : proposta de uma ferramenta de gestão de custos de descomissionamento. fl. 203. Tese (Doutorado-Programa de Pós Graduação em Energia) Universidade Federal do ABC, Santo André, 2017.

[21] MAIA, Y. L., Approach for the Site Selection of an Interim Storage Facility for the Reactor Compartment of the Decommissioned Brazilian Nuclear Submarine. fl. 112 pag. Tese (Doutorado - Programa de Engenharia Nuclear), Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE, 2022.

[22] SOBREIRO JUNIOR, A., Desenvolvimento de um plano preliminar de descomissionamento de um navio com uma planta de potência nuclear embarcada. 2021. 100p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

[23] VIVAS, A. de S., Desenvolvimento do plano preliminar de descomissionamento do reator IPEN/MB-01, text, Universidade de São Paulo (2014). Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

- [24] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN, Norma CNEN NN 9.01- Descomissionamento de Usinas Nucleoelétricas. 2012. Disponível em <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm901.pdf>>
- [25] LARAIA, M., Overview of nuclear decommissioning principles and approaches, Nuclear Decommissioning, Woodhead Publishing Series in Energy (LARAIA, M., Ed), Woodhead Publishing (2012) 13–32.
- [26] “Fim de uma era”: a decisão da Alemanha de abolir energia nuclear após 60 anos, BBC News Brasil, Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/articles/c9010147xvyo>>. Acesso em 07 de mai. 2023.
- [27] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA, Policies and Strategies for the Decommissioning of Nuclear and Radiological Facilities, Text, International Atomic Energy Agency (2011) pp. 1–30.
- [28] NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA), Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants, Nuclear Energy Agency (NEA), Disponível em: <https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14910/costs-of-decommissioning-nuclear-power-plants?details=true>. Acesso 13 de fev. 2023
- [29] LORDAN-PERRET, R., SLOAN, R.D., ROSNER, R., Decommissioning the U.S. nuclear fleet: Financial assurance, corporate structures, and bankruptcy, Energy Policy **154** (2021) 112280.
- [30] NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA), The Practice of Cost Estimation for Decommissioning of Nuclear Facilities | en | OECD, Disponível em: <<https://www.oecd.org/publications/the-practice-of-cost-estimation-for-decommissioning-of-nuclear-facilities-9789264237209-en.htm>> Acesso 22 de fev. 2023.
- [31] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA, Financial Aspects of Decommissioning, Text, International Atomic Energy Agency (2005) pp. 1–96.
- [32] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN, Norma CNEN NN 9.02 Gestão Dos Recursos Financeiros Destinados Ao Descomissionamento de Usinas nucleoelétricas, (2016).
- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR ISO/IEC 31010:2012 Gestão de Riscos — Técnicas Para o Processo de Avaliação de Riscos, (2012).
- [34] TERREMOTO, L, Material de sala de aula da disciplina Fundamentos de Tecnologia Nuclear- Reatores- Reatores Nucleares de Potência. 2022
- [35] WESTINGHOUSE - USNRC TECHNICAL TRAINING CENTER, Pressurized Water Reactor (PWR) Systems, (2019).
- [36] WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION, The Westinghouse Pressurized Water Reactor Nuclear Power Plant, (1984).
- [37] The World’s Reactors - Nuclear Engineering - N. 27 BR3. Disponível em:<<https://www.flickr.com/photos/bibliodyssey/4567442202>> Acesso em 06 de jun. 2023.

- [38] GIOVEDI C., SILVA A. T., Material de Sala de Aula da disciplina- Engenharia de Combustível Nuclear I - Análise Do Combustível Nuclear, (2022).
- [39] TERREMOTO, L. Material de sala de aula da disciplina Fundamentos de Tecnologia Nuclear- Reatores - FISSÃO NUCLEAR.Pdf. 2022.
- [40] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Site. Advanced Reactors Information System. JSC “AFRIKANTOV OKB MECHANICAL ENGINEERING” (OKBM), KLT-40S Design Description, (2013). Disponível em: <<https://aris.iaea.org/default.html>> Acesso em 22 mar. 2023.
- [41] PONNET, MATHIEU, KLEIN M., MASSAUT V., DAVAIN H., Thorough Chemical decontamination With the MEDOC Process: Batch Treatment of Dismantled Pieces or Loop Treatment of Large Components Such as the BR3 Steam Generator and Pressurizer.
- [42] LEWIS, E.E., Fundamentals of Nuclear Reactor Physics, Academic Press, Amsterdam ; Boston (2008) 293 pp.
- [43] EVANS, J.C. et al., Long-Lived Activation Products in Reactor Materials, NUREG/CR-3474, PNL-4824, 6776358, (1984) p. NUREG/CR-3474, PNL-4824, 6776358.
- [44] LIMA, R.S., Estudo da Cinética de recristalização em ligas de zircaloy. Disponível em: <<https://www.repositoriobib.ufc.br/000021/00002110.pdf>> Acesso em 31 de mar. 2023.
- [45] 304 Stainless Steel, Disponível em: <<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=abc4415b0f8b490387e3c922237098da>> Acesso 25 de abr. 2023.
- [46] Special Metals INCONEL® Alloy 600, <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=029d44b293ee41a1926d8de74e6369bc>.> Acesso 25 de abr. 2023.
- [47] ASTM A533 Low Alloy Steel, Grade B, Class 2, Disponível em: <<https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=7c1605ae2cd249518c3735d5e0fbde3a>> Acesso 25 de abr. 2023.
- [48] ASTM A537 Carbon Steel, Class 1, Disponível em: <<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3f59fb2727d446a78b34fdd6ecd15ae2>> Acesso 25 de abr. 2023.
- [49] ASTM A514 Steel, grade P, plate thickness ≤ 19 mm, Disponível em: <<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=399f2dcfb1774f15a27c55978e2714f8>> Acesso 25 de abr. 2023.
- [50] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ZALESIAK, CHARLES A., Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures (ACI 349-01).
- [51] ASTM A242 Steel, type 1, 19 mm thick, Disponível em: <<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=5a34cd9bab9e4f82afa85943dcc10827>> Acesso 25 de abr. 2023.

[52] ASTM A36 Steel, bar, Disponível em: <<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d1844977c5c8440cb9a3a967f8909c3a>> Acesso 25 de abr. 2023.

[53] ASTM A572 Steel, grade 45, Disponível em: <<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=cbd047a5afcc45a38dc8e85e645ade1c>> Acesso 25 de abr. 2023.

[54] ZAHN, GUILHERME, Material de sala de aula - Fundamentos de Tecnologia Nuclear - Física Nuclear e Aplicações. 2022.

[55] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA, Norma CNEN NN 8.01 – Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação.

[56] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN, Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação, (2014).

[57] BRASIL, Decreto nº 40.110, de 10 de outubro de 1956, Cria a Comissão Nacional de Energia Nuclear, Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1950-1969/d40110.htm> Acesso 15 de jan. 2023.

[58] BRASIL, Lei nº 4.118, de 27 de agosto de 1962, Dispõe sobre a política nacional de energia nuclear, Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l4118.htm> Acesso 16 de jan 2023.

[59] BRASIL, Decreto nº 9.600, de 5 de dezembro de 2018, Consolida as diretrizes sobre a Política Nuclear Brasileira, Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2018/Decreto/D9600.htm> Acesso 16 de jan 2023.

[60] BRASIL, Lei nº 14.222, de 15 de outubro de 2021, Cria a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN), Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Lei/L14222.htm> Acesso 16 de jan. 2023

[61] BRASIL, Órgãos do Governo, Serviços e Informações do Brasil, Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/orgaos-do-governo/ministerios-e-orgaos-com-status-de-ministerios>>. Acesso 16 de jan. 2023

[62] Brasil, Constituição Federal de 1988, Disponível em: <<https://www25.senado.leg.br/web/atividade/legislacao/constituicao-federal>>. Acesso em 16 jan. 2023

[63] Banco Nacional do Desenvolvimento, Projeto de Desestatização da Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – Eletrobras, BNDES, Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/transparencia/desestatizacao/processos-encerrados/projeto-de-desestizacao-eletobras>> Acesso em 20 de jan. 2023.

[64] Brasil, Lei nº 9765/98, de 17 de dezembro de 1998, Instituiu taxa de licenciamento, controle e fiscalização de materiais nucleares e radioativos. Disponível em:

<<https://presrepublica.jusbrasil.com.br/legislacao/126916/lei-9765-98>> Acesso em 22 de jan. 2023.

[65] Brasil, Lei nº 10.308, de 20 de novembro de 2001, Dispõe sobre a seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos de rejeitos radioativos. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/110308.htm> Acesso em 05 de nov. 2022.

[66] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN, Norma CNEN NE 1.04 Licenciamento de Instalações Nucleares, (2002).

[67] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN, Norma CNEN NN 8.02 - Licenciamento de Depósitos de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação, (2014).

[68] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN, Norma CNEN NN 1.16 - Garantia Da Qualidade Para a Segurança de Usinas Nucleoelétricas e Outras Instalações, (2000).

[69] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN, Norma CNEN NE 2.01 – Proteção Física de Unidades Operacionais Da Área Nuclear.

[70] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN, Norma CNEN NN 2.01 – Proteção Física de Materiais e Instalações Nucleares, (2019).

[71] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN, Norma CNEN NN 3.01 – Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica.

[72] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN, Norma CNEN NE 5.02- Transporte, Recebimento, Armazenagem e Manuseio de Elementos Combustíveis de Usinas Nucleoelétricas.

[73] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN, Norma CNEN NE 5.03 - Transporte, Recebimento, Armazenagem e Manuseio de Itens de Usinas Nucleoelétricas.

[74] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN, Norma CNEN NN 5.01 - Regulamento Para o Transporte Seguro de Materiais Radioativos.

[75] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN, Norma CNEN NE 6.06 – Seleção e Escolha de Locais Para Depósitos de Rejeitos Radioativos.

[76] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN, Norma CNEN NN 6.09 – Critérios de Aceitação Para Deposição de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação.

[77] Tribunal de Contas da União -TCU, Levantamento. Identificação de riscos acerca do gerenciamento seguro de rejeitos radioativos e de combustível nuclear usado. Disponível em: <<https://www.jusbrasil.com.br/jurisprudencia/tcu/315635578/inteiro-teor-315635609>> Acesso em 15 de set. 2022.

- [78] Gouveia, R. M., O Projeto RBMN e a sustentabilidade do setor nuclear nacional - CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Disponível em: <<https://antigo.cdtm.br/ultimas-noticias/121/newsletter/375-o-projeto-rbmn-e-a-sustentabilidade-do-setor-nuclear-nacional>> Acesso em 06 de jun. 2023.
- [79] VICENTE, R, Material de Sala de Aula - Disciplina: Gestão de Rejeitos Radioativos na industria, medicina e pesquisa, (2022).
- [80] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA., Transition from Operation to Decommissioning of Nuclear Installations, Text, International Atomic Energy Agency (2004) pp. 1–221.
- [81] DADOUMONT J., MASSAUT V., KLEIN M., DEMEULEMEESTER Y., Decommissioning of a small reactor (BR3 reactor, Belgium), (1999).
- [82] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA, Decommissioning Techniques for Research Reactors, Text, International Atomic Energy Agency (2002) pp. 1–268.
- [83] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA, Methods for the Minimization of Radioactive Waste from Decontamination and Decommissioning of Nuclear Facilities, Text, International Atomic Energy Agency (2001) pp. 1–157.
- [84] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA, Disposal Aspects of Low and Intermediate Level Decommissioning Waste, Text, International Atomic Energy Agency (2007) pp. 1–44.
- [85] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA, Classification of Radioactive Waste, Text, International Atomic Energy Agency (2009) pp. 1–48.
- [86] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA., Radiation Protection Programmes for the Transport of Radioactive Material, Text, International Atomic Energy Agency (2007) pp. 1–93.
- [87] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA., Design Principles and Approaches for Radioactive Waste Repositories, Text, International Atomic Energy Agency (2020) pp. 1–75.
- [88] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA, Training and Human Resource Considerations for Nuclear Facility Decommissioning, Text, International Atomic Energy Agency (2022) pp. 1–84.
- [89] PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE, Um Guia Do Conhecimento Em Gerenciamento de Projetos (Guia Pmbok)/ Guide to the Project .., Project Management Inst, Place of publication not identified (2009).
- [90] Aposentadoria CLT, Diretoria Geral de Recursos Humanos — DGRH, Disponível em<<https://www.dgrh.unicamp.br/produtos-e-servicos/aposentadoria-e-desligamento/aposentadoria-clt>>

- [91] ECONÔMICO, B., Brasileiro tem primeiro emprego com carteira assinada, em média, após os 28 anos, Portal iG, Disponível em: <<https://economia.ig.com.br/2019-05-12/brasileiro-tem-primeiro-emprego-com-carteira-assinada-em-media-apos-os-28-anos.html>>
- [92] MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, Programa Nuclear - Ministério da Educação, Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/component/tags/tag/programa-nuclear>>
- [93] BORRMANN, F, Knowledge management toward,during, and after decommissioning.
- [94] NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA), International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations, Disponível em: <https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14804/international-structure-for-decommissioning-costing-isdc-of-nuclear-installations?details=true>
- [95] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA., Cost Estimation for Research Reactor Decommissioning, Text, International Atomic Energy Agency (2014) pp. 1–95.
- [96] A Proposed Standardised List of Items for Costing Purposes in the Decommissioning of Nuclear Installations, Nuclear Energy Agency (NEA), Disponível em: <https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_13260/a-proposed-standardised-list-of-items-for-costing-purposes-in-the-decommissioning-of-nuclear-installations?details=true>
- [97] UNIÃO, T. de C. da, Fiscalização do Setor Nuclear - Monitoramento do Fundo de Descomissionamento das Usinas Nucleares de Angra 1 e Angra 2 da Eletrobrás Termonuclear S.A. (Eletronuclear) | Portal TCU, Disponível em: <<https://portal.tcu.gov.br/biblioteca-digital/fiscalizacao-do-setor-nuclear-monitoramento-do-fundo-de-descomissionamento-das-usinas-nucleares-de-angra-1-e-angra-2-da-eletronuclear-s-a-eletronuclear.htm>>
- [98] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA., Safety Assessment for the Decommissioning of Facilities Using Radioactive Material, Text, International Atomic Energy Agency (2008) pp. 1–62.
- [99] Participa + Brasil - Limites de pesos e dimensões de veículos e combinações de veículos, inscrições de capacidades em veículos de tração, de carga e de transporte coletivo de passageiros., Participa + Brasil, <https://www.gov.br/participamaisbrasil/limites-de-pesos-e-dimensoes-de-veiculos-e-combinacoes-de-veiculos-inscricoes-de-capacidades-em-veiculos-de-tracao-de-carga-e-de-transporte-coletivo-de-passageiros>.
- [100] MALTINI ,F, SMIEEE, D, The Chernobyl Nuclear Power Plant accident : its decommissioning, the Interim Spent Fuel Storage ISF-2, the nuclear waste treatment plants and the Safe Confinement project.
- [101] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA., Low and Intermediate Level Waste Repositories: Socioeconomic Aspects and Public Involvement, Text, International Atomic Energy Agency (2007) pp. 1–154.

[102] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA, GERENCIAMENTO DE REJEITOS RADIOATIVOS EM USINAS NUCLEOELÉTRICAS, (2008).

[103] Estratégia, Michaelis On-Line,
<https://michaelis.uol.com.br/palavra/a2zb/estrat%C3%A9gia/>.

[104] NETO, A.B.C., Risks to be considered in Nuclear Reactor Decommissioning Projects in Brazil: Técnicas do processo de avaliação de gestão de risco para o descomissionamento de reatores nucleares, Braz. J. Radiat. Sci. **10** 4 (2022) 1.

[105] Portal da Câmara dos Deputados,
<https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=359897>.

[106] Portal da Câmara dos Deputados,
<https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=372075>.

[107] Governo já tem pronta PEC para quebra do monopólio nuclear,
https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=40&campo=14743.

[108] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN, POSIÇÃO REGULATÓRIA 3.01/001:2011 - Critérios de Exclusão, Isenção e Dispensa de Requisitos de Proteção Radiológica, (2011).

[109] BRASIL, Lei Nº 10.308 de 20 de Novembro de 2001 - Dispõe Sobre a Seleção de Locais, a Construção, o Licenciamento, a Operação, a Fiscalização, Os Custos, a Indenização, a Responsabilidade Civil e as Garantias Referentes Aos Depósitos de Rejeitos Radioativos, e Dá Outras Providências.

[110] NuDat 3, Disponível em: <<https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>>.

APÊNDICE A – Informações dos principais elementos químicos presentes nos componentes dos reatores

Elemento	Isótopo	Abundância	Meia Vida	$\sigma(n,\gamma)$ (b)	Alvo de Ativação
Carbono	¹² C	98,93%	estável	0	Não
	¹³ C	1,07%	estável	0	Sim
	¹⁴ C	0,00%	5700 a	0	Sim
Oxigênio	¹⁶ O	99,76%	estável	0,00019	Sim
	¹⁷ O	3,80%	estável	0,0038	Sim
Magnésio	²⁴ Mg	78,99%	estável	0,0503	Não
	²⁵ Mg	10,00%	estável	0,19	Não
	²⁶ Mg	11,01%	estável	0,0383	Sim
Alumínio	²⁶ Al	0,00%	7,17.10 ⁵ anos	0	Não
	²⁷ Al	100,00%	estável	0,2335	Sim
	²⁸ Al	0,00%	2,245 min	0	Sim
Silício	²⁸ Si	92,22%	estável	0,169	Não
	²⁹ Si	4,69%	estável	0,1199	Não
	³⁰ Si	3,09%	estável	0,107	Sim
	³¹ Si	0,00%	157,36 min	0	Sim
Potássio	³¹ P	100%	Estável	0,199	Não
Titânio	⁴⁶ Ti	8,25%	estável	0,576	Não
	⁴⁷ Ti	7,44%	estável	1,702	Não
	⁴⁸ Ti	73,72%	estável	7,84	Não
	⁴⁹ Ti	5,41%	estável	1,829	Não
	⁵⁰ Ti	5,18%	estável	0,1783	Sim
	⁵¹ Ti	0,00%	5,76min	0	Sim
Crômio	⁵⁰ Cr	4,35%	1,3.10 ¹⁸ a	16	Não
	⁵¹ Cr	0,00%	27,7 d	0	Não
	⁵² Cr	83,79%	estável	0,745	Não
	⁵³ Cr	9,50%	estável	18	Não
	⁵⁴ Cr	2,37%	estável	0,36	Sim
Manganês	⁵⁵ Mn	100,00%	estável	13,41	Sim
	⁵⁶ Mn	0,00%	2,5789 h	0	Sim
Ferro	⁵⁴ Fe	5,85%	estável	2,25	Sim
	⁵⁵ Fe	0,00%	2,744 a	0	Não
	⁵⁶ Fe	91,75%	estável	2,589	Não
	⁵⁷ Fe	2,12%	estável	2,42	Não

	⁵⁸ Fe	0,28%	estável	1,15	Sim
Cobalto	⁵⁸ Co	0,00%	70,86 d	165	Não
	⁵⁹ Co	100,00%	estável	37,17	Sim
	⁶⁰ Co	0,00%	5,27 a	0	Sim
Níquel	⁵⁸ Ni	68,08%	estável	4,62	Sim
	⁵⁹ Ni	0,00%	7,6.10 ⁴ a	80,7	Não
	⁶⁰ Ni	26,22%	estável	2,76	Sim
Cobre	⁶³ Cu	69,15%	estável	4,47	Sim
	⁶⁴ Cu	0,00%	12,7h	0	Não
	⁶⁵ Cu	30,85%	estável	2,15	Sim
Zircônio	⁹⁰ Zr	51,45%	estável	7,80E-02	Não
	⁹¹ Zr	11,22%	estável	8,32E-01	Não
	⁹² Zr	17,15%	estável	0,23	Sim
	⁹³ Zr	0,00%	1,61.10 ⁶ anos	0,69	Não
	⁹⁴ Zr	17,38%	estável	0,05	Sim
	⁹⁵ Zr	0,00%	64,032 dias	1200	Sim
	⁹⁶ Zr	2,80%	2,35.10 ¹⁹ anos	0,0228	Sim
Nióbio	⁹³ Nb	100,00%	estável	1,15	Sim
	⁹⁴ Nb	0,00%	2.10 ⁴ a	15,76	Sim
	⁹⁵ Nb	0,00%	34,99d	7	Sim
Molibdênio	⁹² Mo	14,53%	Estável	0,02075	Sim
	⁹³ Mo	0,00%	4.10 ³ a	0	Não
	⁹⁴ Mo	9,15%	estável	0,34	Não
	⁹⁵ Mo	15,84%	estável	13,56	Não
	⁹⁶ Mo	16,67%	estável	0,595	Não
	⁹⁷ Mo	9,60%	estável	2,197	Não
	⁹⁸ Mo	24,39%	estável	0,13	Sim
	⁹⁹ Mo	0,00%	65,97 h	8	Sim
	¹⁰⁰ Mo	9,82%	7,3.10 ¹⁸ a	0,199	Sim
Estanho	¹¹² Sn	0,97%	1,3.10 ²¹ anos	0,85	Sim
	¹¹³ Sn	0,00%	115,09d	8,87	Sim
	¹¹⁴ Sn	0,66%	estável	0,125	Não
	¹¹⁵ Sn	0,34%	estável	58	Não
	¹¹⁶ Sn	14,54%	estável	0,12	Não
	¹¹⁷ Sn	7,68%	estável	1,07	Não
	¹¹⁸ Sn	24,22%	estável	0,22	Não
	¹¹⁹ Sn	8,59%	estável	2,17	Não
	¹²⁰ Sn	32,58%	estável	0,14	Sim

	¹²¹ Sn	0,00%	27,03h	0	Não
	¹²² Sn	4,63%	estável	0,146	Sim
	¹²³ Sn	0,00%	129,2 d	3	Não
	¹²⁴ Sn	5,79%	1,2.10 ²¹ a	0,133	Não
Háfnio	¹⁷⁴ Hf	0,16%	2.10 ¹⁵ a	561,7	Sim
	¹⁷⁵ Hf	0,00%	70 d	0	Não
	¹⁷⁶ Hf	5,26%	estável	13,76	Não
	¹⁷⁷ Hf	18,60%	estável	373,6	Não
	¹⁷⁸ Hf	27,28%	estável	84,05	Não
	¹⁷⁹ Hf	13,62%	estável	43,59	Não
	¹⁸⁰ Hf	35,08%	estável	13,01	Sim
	¹⁸¹ Hf	0,00%	42,39 d	0	Não
Tungstênio	¹⁸² W	26,50%	estável	20,55	Sim
	¹⁸³ W	14,31%	6,7.10 ²⁰ a	10	Não
	¹⁸⁴ W	30,64%	estável	1,75	Sim
	¹⁸⁵ W	0,00%	75,1 d	0	Não
	¹⁸⁶ W	28,43%	2,3.10 ¹⁹ a	37,46	Sim

Fonte: [110]

APÊNDICE B – Decaimento radioativo dos 40 principais radionuclídeos no vaso de pressão do reator até 300 anos

Radionuclídeo	Meia Vida (anos)	0	5	10	15	20	25	30	50	80	100	150	200	250	300
3H	12,3	1,30E+06	980640,8	739843,8	558174,7	421114,5	317709,6	239695,8	77657,02	14320,6	4639,611	277,1931	16,56087	0,989428	0,059113
14C	5730	1,33E+06	1324760	1323959	1323159	1322359	1321559	1320760	1317569	1312796	1309624	1301726	1293877	1286074	1278319
36Cl	300000	2,76E+04	27579,48	27579,16	27578,84	27578,53	27578,21	27577,89	27576,61	27574,7	27573,43	27570,24	27567,06	27563,87	27560,69
39Ar	269	6,59E+03	6502,422	6419,184	6337,011	6255,89	6175,808	6096,75	5790,512	5359,754	5090,535	4475,174	3934,2	3458,62	3040,53
41Ca	1,00E+05	2,50E+02	250,0373	250,0287	250,02	250,0113	250,0027	249,994	249,9594	249,9074	249,8727	249,7862	249,6996	249,6131	249,5266
53Mn	3,70E+06	1,44E+02	143,8152	143,815	143,8149	143,8148	143,8146	143,8145	143,814	143,8131	143,8126	143,8113	143,8099	143,8086	143,8072
54Mn	0,85	2,86E+08	4842330	82089,89	1391,634	23,59176	0,399941	0,00678	5,6E-10	1,33E-20	1,1E-27	2,15E-45	4,22E-63	8,27E-81	1,62E-98
55Fe	2,7	1,10E+10	3,05E+09	8,44E+08	2,34E+08	64782418	17947097	4972001	29287,31	13,24042	0,077992	2,08E-07	5,53E-13	1,47E-18	3,92E-24
59Ni	8,00E+04	6,49E+06	6490629	6490348	6490066	6489785	6489504	6489223	6488099	6486412	6485288	6482480	6479672	6476865	6474060
60Co	5,73E+00	6,60E+09	3,6E+09	1,97E+09	1,07E+09	5,86E+08	3,2E+08	1,75E+08	15533214	411493	36567,61	86,08585	0,202659	0,000477	1,12E-06
63Ni	1,00E+02	9,82E+08	9,48E+08	9,16E+08	8,85E+08	8,55E+08	8,26E+08	7,97E+08	6,94E+08	5,64E+08	4,91E+08	3,47E+08	2,45E+08	1,74E+08	1,23E+08
65Zn	6,70E-01	2,97E+07	168199,2	953,5237	5,405539	0,030644	0,000174	9,85E-07	1,02E-15	3,38E-29	3,49E-38	1,2E-60	4,1E-83	1,4E-105	4,8E-128
79Se	6,50E+04	2,82E+01	28,1888	28,18729	28,18579	28,18429	28,18279	28,18128	28,17527	28,16626	28,16025	28,14524	28,13024	28,11525	28,10026
81Kr	2,10E+05	2,88E+01	28,8387	28,83822	28,83774	28,83727	28,83679	28,83632	28,83441	28,83156	28,82966	28,8249	28,82014	28,81539	28,81063
85Kr	1,05E+01	3,43E+04	24685,36	17745,65	12756,87	9170,577	6592,484	4739,161	1265,642	174,6728	46,64819	1,719328	0,06337	0,002336	8,61E-05
90Sr	2,90E+01	7,98E+04	70850,58	62869,74	55787,89	49503,76	43927,5	38979,37	24167,29	11798,25	7314,938	2214,081	670,1564	202,8425	61,39623
92mNb	2,70E+07	4,87E-02	0,048662	0,048662	0,048662	0,048662	0,048662	0,048662	0,048662	0,048662	0,048662	0,048662	0,048662	0,048662	0,048662
93Zr	9,50E+05	4,60E+00	4,598195	4,598178	4,598162	4,598145	4,598128	4,598111	4,598044	4,597944	4,597877	4,597709	4,597541	4,597373	4,597206
93Mo	3,50E+03	3,92E+04	39151,61	39112,86	39074,15	39035,48	38996,85	38958,25	38804,25	38574,38	38421,9	38043,32	37668,47	37297,31	36929,81
94Nb	2,00E+04	1,83E+04	18343,27	18340,09	18336,91	18333,74	18330,56	18327,38	18314,69	18295,65	18282,98	18251,32	18219,72	18188,18	18156,69
99Tc	2,10E+05	5,69E+03	5692,726	5692,632	5692,538	5692,444	5692,35	5692,256	5691,881	5691,317	5690,941	5690,002	5689,063	5688,124	5687,186

108mAg	1,30E+02	4,82E+03	4694,991	4571,478	4451,215	4334,116	4220,097	4109,078	3693,448	3147,484	2829,119	2167,058	1659,93	1271,478	973,931
121mSn	5,00E+01	1,91E+02	178,4108	166,4632	155,3157	144,9146	135,2101	126,1555	95,608	63,07776	47,804	23,902	11,951	5,9755	2,98775
129I	1,26E+07	2,43E-02	0,024305	0,024305	0,024305	0,024305	0,024305	0,024305	0,024305	0,024305	0,024305	0,024305	0,024305	0,024305	0,024305
133Ba	1,04E+01	1,51E+05	108498,1	77749,22	55714,74	39924,93	28610,02	20501,81	5406,153	732,0363	193,0318	6,892379	0,246099	0,008787	0,000314
134Cs	2,06E+00	3,92E+05	72872,78	13549,09	2519,154	468,3811	87,08514	16,19156	0,019349	7,99E-07	9,55E-10	4,72E-17	2,33E-24	1,15E-31	5,67E-39
135Cs	2,30E+06	1,62E+00	1,615373	1,615371	1,615368	1,615366	1,615363	1,615361	1,615351	1,615337	1,615327	1,615303	1,615278	1,615254	1,61523
137Cs	3,01E+01	8,15E+04	72649,88	64748,53	57706,53	51430,41	45836,87	40851,69	25774,49	12916,96	8149,674	2576,857	814,7804	257,6266	81,45935
145Pm	1,77E+01	1,91E+01	15,66955	12,88308	10,59213	8,708561	7,159945	5,886714	2,689838	0,830818	0,379629	0,053579	0,007562	0,001067	0,000151
146Sm	1,00E+08	5,29E-06													
151Sm	9,30E+01	6,06E+02	584,2467	562,8749	542,2848	522,448	503,3367	484,9246	417,7694	334,0644	287,8011	198,2661	136,5854	94,09364	64,82107
152Eu	1,30E+01	9,14E+03	6997,77	5360,174	4105,803	3144,976	2408,999	1845,253	635,2326	128,3064	44,16977	3,071266	0,213555	0,014849	0,001033
154Eu	8,60E+00	7,93E+04	53016,26	35431,67	23679,59	15825,47	10576,44	7068,412	1410,107	125,6457	25,06558	0,445557	0,00792	0,000141	2,5E-06
155Eu	4,76E+00	3,39E+04	16355,42	7896,845	3812,814	1840,932	888,8524	429,1624	23,32329	0,295489	0,016059	1,11E-05	7,61E-09	5,24E-12	3,61E-15
158Tb	1,50E+02	9,12E+01	89,08934	87,05453	85,0662	83,12329	81,22475	79,36957	72,36303	62,99567	57,43457	45,58585	36,18151	28,71729	22,79293
166mHo	1,20E+03	7,49E+03	7467,203	7445,668	7424,195	7402,784	7381,435	7360,147	7275,608	7150,618	7068,486	6867,26	6671,762	6481,83	6297,305
178mHf	3,00E+01	4,16E+03	3701,773	3297,905	2938,099	2617,549	2331,971	2077,55	1308,774	654,3872	412,2381	129,8469	40,8992	12,88244	4,057715
205Pb	1,40E+07	8,27E-02	0,082747	0,082747	0,082747	0,082747	0,082747	0,082747	0,082747	0,082746	0,082746	0,082746	0,082746	0,082746	0,082746
233U	1,60E+05	2,35E+01	23,47229	23,47178	23,47127	23,47077	23,47026	23,46975	23,46772	23,46467	23,46263	23,45755	23,45247	23,44739	23,44231
239Pu	2,40E+04	4,53E+02	452,6666	452,6013	452,5359	452,4706	452,4052	452,3399	452,0787	451,6872	451,4263	450,7749	450,1245	449,4749	448,8263
Total Atividade		1,89E+10	7,61E+09	3,74E+09	2,2E+09	1,51E+09	1,17E+09	9,85E+08	7,18E+08	5,72E+08	4,99E+08	3,55E+08	2,53E+08	1,81E+08	1,31E+08

Fonte: Autor com base nos dados da referência [43]

APÊNDICE C – Decaimento radioativo dos 40 principais radionuclídeos na blindagem biológica até 300 anos

Radionuclídeo	Meia Vida (anos)	0	5	10	15	20	25	30	50	80	100	150	200	250	300
3H	12,3	6,64E+05	5,01E+05	3,78E+05	2,85E+05	2,15E+05	1,62E+05	1,22E+05	3,97E+04	7,32E+03	2,37E+03	1,42E+02	8,46E+00	5,06E-01	3,02E-02
14C	5730	2,25E+02	2,25E+02	2,25E+02	2,25E+02	2,25E+02	2,24E+02	2,24E+02	2,24E+02	2,23E+02	2,22E+02	2,21E+02	2,20E+02	2,18E+02	2,17E+02
36Cl	300000	1,23E+01	1,23E+01												
39Ar	269	1,56E+03	1,54E+03	1,52E+03	1,50E+03	1,49E+03	1,47E+03	1,45E+03	1,37E+03	1,27E+03	1,21E+03	1,06E+03	9,34E+02	8,21E+02	7,22E+02
41Ca	1,03E+06	1,54E+03	1,54E+03												
53Mn	3,70E+06	9,77E-04	9,77E-04												
54Mn	0,85	1,60E+03	2,71E+01	4,60E-01	7,80E-03	1,32E-04	2,24E-06	3,80E-08	3,14E-15	7,45E-26	6,15E-33	1,21E-50	2,36E-68	4,64E-86	9,09E-104
55Fe	2,7	3,79E+05	1,05E+05	2,91E+04	8,06E+03	2,23E+03	6,18E+02	1,71E+02	1,01E+00	4,56E-04	2,69E-06	7,16E-12	1,91E-17	5,07E-23	1,35E-28
59Ni	8,00E+04	2,10E+00	2,10E+00												
60Co	5,73E+00	2,81E+04	1,53E+04	8,37E+03	4,57E+03	2,50E+03	1,36E+03	7,44E+02	6,61E+01	1,75E+00	1,56E-01	3,66E-04	8,63E-07	2,03E-09	4,78E-12
63Ni	1,00E+02	2,63E+02	2,54E+02	2,45E+02	2,37E+02	2,29E+02	2,21E+02	2,13E+02	1,86E+02	1,51E+02	1,31E+02	9,29E+01	6,57E+01	4,64E+01	3,28E+01
65Zn	6,70E-01	1,37E+03	7,79E+00	4,42E-02	2,50E-04	1,42E-06	8,05E-09	4,56E-11	4,71E-20	1,56E-33	1,62E-42	5,54E-65	1,90E-87	6,51E-110	2,23E-132
79Se	6,50E+04	2,43E-04	2,43E-04												
81Kr	2,10E+05	6,39E-06	6,38E-06	6,38E-06	6,38E-06	6,38E-06	6,38E-06								
85Kr	1,05E+01	3,81E+00	2,74E+00	1,97E+00	1,41E+00	1,02E+00	7,31E-01	5,26E-01	1,40E-01	1,94E-02	5,17E-03	1,91E-04	7,03E-06	2,59E-07	9,55E-09
90Sr	2,90E+01	5,85E+00	5,19E+00	4,61E+00	4,09E+00	3,63E+00	3,22E+00	2,86E+00	1,77E+00	8,64E-01	5,36E-01	1,62E-01	4,91E-02	1,49E-02	4,50E-03
92mNb	2,70E+07	6,36E-08	6,36E-08												
93Zr	9,50E+05	2,69E-03	2,69E-03												
93Mo	3,50E+03	7,05E-02	7,04E-02	7,03E-02	7,03E-02	7,02E-02	7,01E-02	7,00E-02	6,98E-02	6,94E-02	6,91E-02	6,84E-02	6,77E-02	6,71E-02	6,64E-02
94Nb	2,00E+04	5,51E-01	5,50E-01	5,50E-01	5,49E-01	5,48E-01	5,47E-01	5,46E-01	5,45E-01						

99Tc	2,10E+05	1,70E-02	1,69E-02	1,69E-02	1,69E-02	1,69E-02										
108mAg	1,30E+02	3,06E-01	2,98E-01	2,90E-01	2,83E-01	2,75E-01	2,68E-01	2,61E-01	2,34E-01	2,00E-01	1,80E-01	1,38E-01	1,05E-01	8,07E-02	6,18E-02	
121mSn	5,00E+01	5,04E-02	4,70E-02	4,39E-02	4,09E-02	3,82E-02	3,56E-02	3,32E-02	2,52E-02	1,66E-02	1,26E-02	6,30E-03	3,15E-03	1,57E-03	7,87E-04	
129I	1,26E+07	1,80E-06														
133Ba	1,04E+01	1,61E+02	1,16E+02	8,28E+01	5,93E+01	4,25E+01	3,05E+01	2,18E+01	5,76E+00	7,79E-01	2,06E-01	7,34E-03	2,62E-04	9,36E-06	3,34E-07	
134Cs	2,06E+00	1,24E+03	2,30E+02	4,28E+01	7,96E+00	1,48E+00	2,75E-01	5,12E-02	6,12E-05	2,53E-09	3,02E-12	1,49E-19	7,36E-27	3,63E-34	1,79E-41	
135Cs	2,30E+06	1,16E-04														
137Cs	3,01E+01	6,26E+00	5,58E+00	4,97E+00	4,43E+00	3,95E+00	3,52E+00	3,14E+00	1,98E+00	9,92E-01	6,26E-01	1,98E-01	6,26E-02	1,98E-02	6,26E-03	
145Pm	1,77E+01	7,84E-01	6,45E-01	5,30E-01	4,36E-01	3,58E-01	2,95E-01	2,42E-01	1,11E-01	3,42E-02	1,56E-02	2,20E-03	3,11E-04	4,39E-05	6,20E-06	
146Sm	1,00E+08	2,24E-08														
151Sm	9,30E+01	1,27E+02	1,23E+02	1,18E+02	1,14E+02	1,10E+02	1,06E+02	1,02E+02	8,77E+01	7,01E+01	6,04E+01	4,16E+01	2,87E+01	1,98E+01	1,36E+01	
152Eu	1,30E+01	3,15E+04	2,41E+04	1,85E+04	1,42E+04	1,09E+04	8,31E+03	6,37E+03	2,19E+03	4,43E+02	1,52E+02	1,06E+01	7,37E-01	5,12E-02	3,56E-03	
154Eu	8,60E+00	4,63E+03	3,09E+03	2,07E+03	1,38E+03	9,23E+02	6,17E+02	4,12E+02	8,22E+01	7,33E+00	1,46E+00	2,60E-02	4,62E-04	8,21E-06	1,46E-07	
155Eu	4,76E+00	1,30E+02	6,30E+01	3,04E+01	1,47E+01	7,09E+00	3,42E+00	1,65E+00	8,98E-02	1,14E-03	6,18E-05	4,26E-08	2,93E-11	2,02E-14	1,39E-17	
158Tb	1,50E+02	1,27E-02	1,24E-02	1,21E-02	1,18E-02	1,15E-02	1,13E-02	1,10E-02	1,01E-02	8,75E-03	7,98E-03	6,33E-03	5,03E-03	3,99E-03	3,17E-03	
166mHo	2,74E-03	3,17E+00	0,00E+00													
178mHf	3,00E+01	2,13E+01	1,90E+01	1,69E+01	1,50E+01	1,34E+01	1,19E+01	1,06E+01	6,70E+00	3,35E+00	2,11E+00	6,65E-01	2,09E-01	6,60E-02	2,08E-02	
205Pb	1,40E+07	1,60E-05														
233U	1,60E+05	5,70E-01	5,69E-01													
239Pu	2,40E+04	2,25E+00	2,24E+00	2,24E+00	2,24E+00	2,24E+00	2,23E+00	2,23E+00								
Total		1,12E+06	6,53E+05	4,40E+05	3,17E+05	2,35E+05	1,77E+05	1,34E+05	4,55E+04	1,10E+04	5,71E+03	3,13E+03	2,81E+03	2,66E+03	2,54E+03	

Fonte: Autor com base nos dados da referência [43]

APÊNDICE D – Classificação de Rejeitos Radioativos

Classificação de Rejeitos Radioativos

Norma CNEN NN 8.01		General Safety Guide No. 1- IAEA Safety Standards	
Classe	Descrição	Classe	Descrição
Classe 0 - Rejeitos Isentos (RI)	rejeitos contendo radionuclídeos com valores de atividade ou de concentração de atividade, em massa ou volume, inferiores ou iguais aos respectivos níveis de dispensa estabelecidos nos Anexos II e VI da Norma	Exempt waste (EW) - Rejeitos Isentos	rejeitos que atendem aos critérios de liberação, isenção ou exclusão do controle regulatório para fins de proteção contra radiação
Classe 1: Rejeitos de Meia-Vida Muito Curta (RVMC):	rejeitos com meia-vida inferior ou da ordem de 100 dias , com níveis de atividade ou de concentração em atividades superiores aos respectivos níveis de dispensa	Very short lived waste (VSLW) - Rejeitos de Meia-Vida Muito Curta	rejeitos que podem ser armazenados para decomposição por um período limitado de até alguns anos e subsequentemente liberados do controle regulatório de acordo com disposições aprovadas pelo órgão regulador, para descarte, uso ou descarte descontrolado. Esta classe inclui rejeitos contendo principalmente radionuclídeos com meias-vidas muito curtas, frequentemente usados para fins médicos e de pesquisa
Classe 2: Rejeitos de Baixo e Médio Níveis de Radiação (RBMN)	rejeitos com meia-vida superior à dos rejeitos da Classe 1, com níveis de atividade ou de concentração em atividades superiores aos níveis de dispensa estabelecidos nos Anexos II e VI, bem como com potência térmica inferior a 2 kW/m ³	Very low level waste (VLLW) - Rejeitos de nível muito baixo	rejeitos que não atendem necessariamente aos critérios de EW, mas que não precisam de um alto nível de contenção e isolamento e, portanto, são adequados para disposição em instalações do tipo aterro próximo à superfície com capacidade limitada controle regulatório. Essas instalações do tipo aterro também podem conter outros rejeitos perigosos. Os rejeitos típicos desta classe incluem solo e entulho com baixos níveis de concentração de atividade. As concentrações de radionuclídeos de vida mais longa em VLLW são geralmente muito limitadas
		Low level waste (LLW) - Rejeitos de nível baixo	rejeitos que estão acima dos níveis de liberação, mas com quantidades limitadas de radionuclídeos de vida longa. Esses rejeitos requerem isolamento e contenção robustos por períodos de até algumas centenas de anos e são adequados para descarte em instalações projetadas próximas à superfície. Esta classe abrange uma ampla gama de rejeitos. LLW pode incluir radionuclídeos de vida curta em níveis mais altos de concentração de atividade, e radionuclídeos de vida longa, mas apenas em níveis

			relativamente baixos de concentração de atividade.
		Intermediate level waste (ILW) - Rejeito de Nível Intermediário (Médio)	rejeitos que, devido ao seu conteúdo, particularmente de radionuclídeos de vida longa, requerem maior contenção e isolamento do que aquele proporcionado pelo descarte próximo à superfície. No entanto, ILW não precisa de provisão, ou apenas provisão limitada, para dissipação de calor durante seu armazenamento e descarte. ILW pode conter radionuclídeos de vida longa, em particular, radionuclídeos emissores de alfa que não decairão a um nível de concentração de atividade aceitável para descarte próximo à superfície durante o período em que os controles institucionais podem ser usados. Portanto, os rejeitos desta classe requerem a disposição em profundidades maiores, da ordem de dezenas de metros a algumas centenas de metros
Classe 3: Rejeitos de Alto Nível de Radiação (RAN):	rejeitos com potência térmica superior a 2kW/m ³ e com concentrações de radionuclídeos de meia-vida longa que excedam as limitações para classificação como rejeitos de meia-vida curta.	High level waste (HLW) - Rejeitos de Nível Alto	rejeitos com níveis de concentração de atividade altos o suficiente para gerar quantidades significativas de calor pelo processo de decaimento radioativo ou rejeitos com grandes quantidades de radionuclídeos de vida longa que precisam ser considerados no projeto de uma instalação de descarte para tais rejeitos. O descarte em formações geológicas profundas e estáveis, geralmente várias centenas de metros ou mais abaixo da superfície, é a opção geralmente reconhecida para o descarte de HLW.

Subdivisão da Classe 2 na Norma da CNEN

Classe	Descrição
Classe 2.1: Meia-Vida Curta (RBMN-VC):	rejeitos de baixo e médio níveis de radiação contendo emissores beta/gama, com meia-vida inferior ou da ordem de 30 anos e com concentração de radionuclídeos emissores alfa de meia-vida longa limitada em 3700 kBq/kg em volumes individuais e com um valor médio de 370 kBq/kg para o conjunto de volumes

Classe 2.2: Rejeitos Contendo Radionuclídeos Naturais (RBMN-RN):	rejeitos de extração e exploração de petróleo, contendo radionuclídeos das séries do urânio e tório em concentrações de atividade ou atividades acima dos níveis de dispensa estabelecidos no Anexo VI desta Norma
Classe 2.3: Rejeitos contendo Radionuclídeos Naturais (RBMN-RN):	rejeitos contendo matérias primas minerais, naturais ou industrializadas, com radionuclídeos das séries do urânio e do tório em concentrações de atividade ou atividades acima dos níveis de dispensa estabelecidos no Anexo VI desta Norma;
Classe 2.4: Rejeitos de Meia-Vida Longa (RBMN-VL)	rejeitos não enquadrados nas Classes 2.2 e 2.3, com concentrações de radionuclídeos de meia-vida longa que excedem as limitações para classificação como rejeitos de meia-vida curta

APÊNDICE E – Escala de pontuação para nivelar as abordagens pela Análise de decisão por multicritérios (MCDA)

Abordagens	Fatores	Pontuação					Referência
		1	2	3	4	5	
Técnicas de DD e RR	Tempo (anos)	<10	10 a 20	20 a 40	40 a 80	>80	[15]
	Custo (U\$ milhões)	<10	10 a 50	50 a 100	100 a 150	> 150	[10]
	Volume de RR (m ³)	<3000	3000 a 12000	12000 a 30000	30000 a 115000	> 115000	[10]
	Viabilidade Técnica	Muita Alta	Alta	Média	Baixa	Muito Baixa	[10]
	Proteção Radiológica (IOE)	Muito Alta	Alta	Médio	Baixa	Muito Baixa	CNEN - AIEA
	Proteção Radiológica- Público	Muito Alta	Alta	Médio	Baixa	Muito Baixa	CNEN - AIEA
	Riscos Industriais	Muito Baixa	Baixa	Médio	Alta	Muito Alta	[1]
	Incerteza no regulamento	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto	CNEN - AIEA
Gestão de RR Armazenamento	Viabilidade Técnica	Muita Alta	Alta	Média	Baixa	Muito Baixa	[10]
	Incerteza no regulamento	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto	CNEN - AIEA
	Segurança Física	Muito Alta	Alta	Médio	Baixa	Muito Baixa	CNEN - AIEA
Gestão de RH e Conhecimento	Custo (U\$ milhões)	<10	10 a 50	50 a 100	100 a 150	> 150	[10]
	Disponibilidade Recursos humanos qualificados	99%	75	50	25	5	[12]
	Conhecimento disponível	99%	75	50	25	5	[12]
	Proteção à Propriedade Intelectual	Muito Alta	Alta	Médio	Baixa	Muito Baixa	[12]
Estimativa de Custo	Nível de precisão da estimativa de custo	0 a 15%	15 a 30	30 a 60	60 a 80	80 a 100	[14]
	Dificuldade	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto	[14]
	Custo de Implementação	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto	[14]
	Incerteza no regulamento	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto	[14]
	Tempo de Implementação	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto	[14]
Gestão de Fundo	Segurança de investimento	Muito Alta	Alta	Médio	Baixa	Muito Baixa	[14]
	Flexibilidade de uso do fundo	Muito Alta	Alta	Médio	Baixa	Muito Baixa	[14]
	Riscos associados ao desligamento prematuro	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto	[14]
	Transparência	Muito Alta	Alta	Médio	Baixa	Muito Baixa	[14]
	Incerteza no regulamento	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto	CNEN - AIEA

APÊNDICE F – Abordagens para o descomissionamento

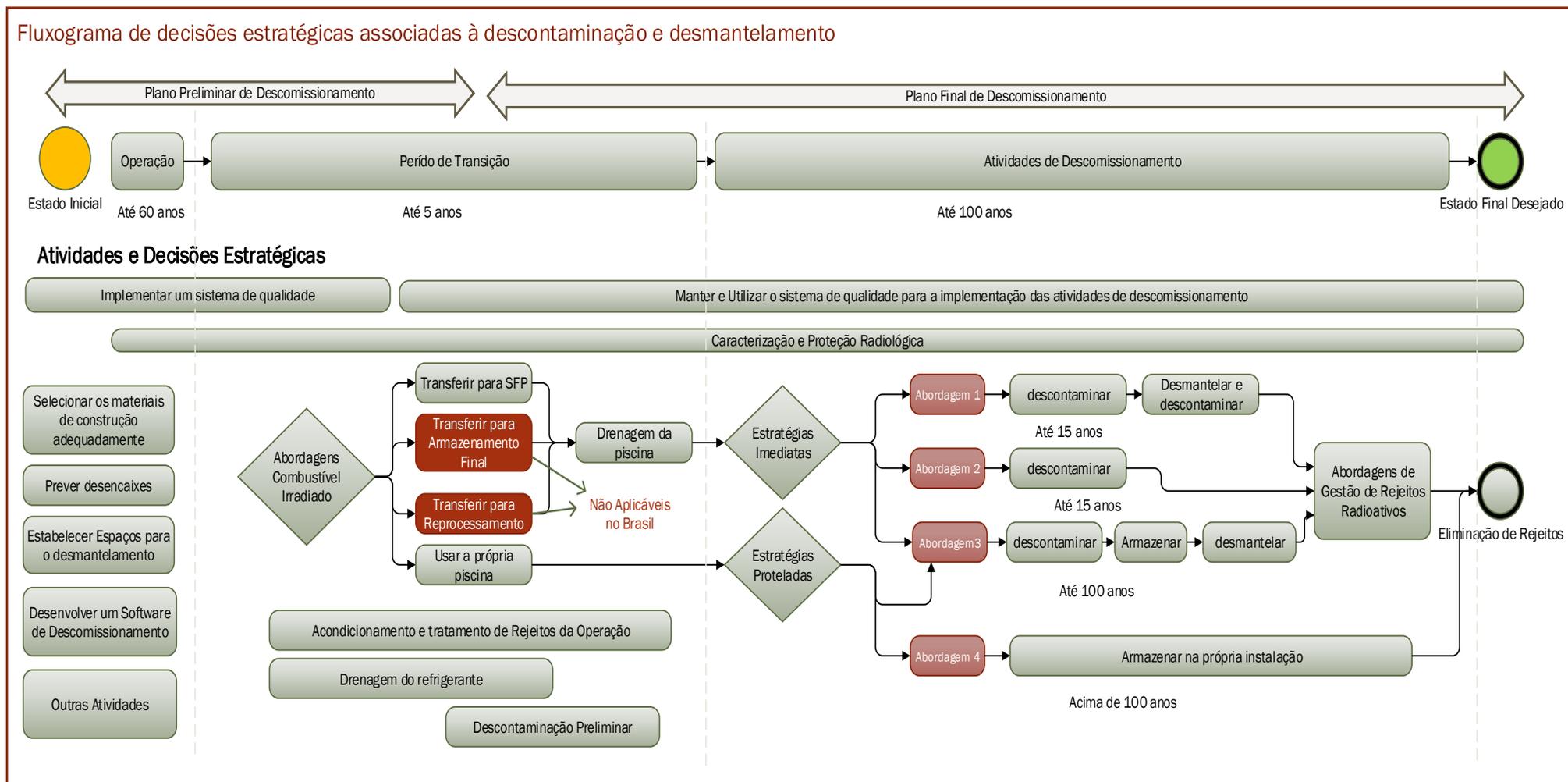
Abordagens	Nº	Descrição da Abordagem	Exemplo de Reator que adotou/ Pub.	País	Relação com a Estratégia AIEA	Ref.
Descontaminação e desmantelamento	1	Descontaminar e desmantelar todos os componentes do reator logo após o período de transição e removê-los para um depósito de rejeitos radioativos fora da instalação	Reator de Pequeno Porte BR3 (PWR)	Bélgica	Desmantelamento Imediato	[81]
	2	Descontaminar e não desmantelar os componentes grandes do reator, mantê-los por inteiro e armazená-los em depósitos de rejeitos radioativos fora da instalação	Usina Nuclear de Loviisa (VVER) / Trojan (PWR)	Finlândia/ EUA	Desmantelamento Imediato	[28]
	3	Aguardar o decaimento radioativo e depois realizar as atividades de desmantelamento	Reator de pequeno porte Dodewaard (BWR)	Holanda	Desmantelamento Protelado	[28]
	4	Desmantelamento parcial (ou não) com o depósito intermediário ou final “in sitio” para posterior remoção ou eliminação	Reatores de pequeno porte VM-A e VM-4 (PWR)	Rússia	Desmantelamento Protelado ou Confinamento	[82]
Gestão de Rejeitos Radioativos (RR)	1	Separar, tratar e “reconcentrar” todos os tipos de rejeitos até não ser mais economicamente viável	Reator de Pequeno Porte BR3 (PWR)	Bélgica	Desmantelamento Imediato ou Protelado	[81]
	2	Separar e tratar os rejeitos radioativos de nível baixo, médio e alto	Trojan (PWR)	EUA	Desmantelamento Imediato ou Protelado	[28]
	3	Transferir os rejeitos radioativos para serem tratados, acondicionados e armazenados numa instalação especializada	Jose Cabrera - ESP (PWR)	Espanha	Desmantelamento Imediato ou Protelado	[28]
	4	“Confinar” os rejeitos radioativos no local	Chernobyl (Moderado a Grafite)	Ucrânia	Confinamento	[17]
Gestão de RR - Armazenamento	1	Transferir os rejeitos radioativos para seus respectivos repositórios equivalente	Usina Nuclear de Loviisa (VVER)	Finlândia	Desmantelamento Imediato ou Protelado	[28]
	2	Transferir os rejeitos radioativos para um depósito intermediário	Jose Cabrera - ESP (PWR)	Espanha	Desmantelamento Imediato ou Protelado	[28]
	3	Transformar o depósito inicial em repositório	Reatores de pequeno porte VM-A e VM-4 (PWR)	Rússia	Todas	[82]

Gestão de Recursos humanos e conhecimento	1	Organização operadora executa as atividades de descomissionamento	Reator de Pequeno Porte BR3 (PWR)	Bélgica	Desmantelamento Imediato	[81]
	2	Organização operadora mantém o controle do projeto e delega atividades para empresas terceirizadas	Usina Nuclear de Loviisa (VVER)	Finlândia	Todas	[28]
	3	Organização operadora e empresa contratada trabalham em parceria	AIEA	AIEA	Todas	[88]
	4	Organização operadora transfere as atividades de descomissionamento para uma empresa especializada	Jose Cabrera - ESP (PWR)	Espanha	Desmantelamento Imediato ou Protelado	[28]
Estimativa de Custo	1	Técnica bottom-up baseada numa Estrutura Analítica de Projeto (EAP) com vinculação dos itens da ISDC	Usinas nucleares dos EUA	EUA	Todas	[28]
	2	Técnica de analogia específica baseada em ISDC	OCDE NEA	Membros da NEA	Todas	[94]
	3	Técnica paramétrica baseada em dados estatísticos	AIEA	AIEA	Todas	[31]
	4	Técnica de opiniões de especialistas	AIEA	AIEA	Todas	[31]
Gestão de Fundo	1	Gestão interna com captação de recursos por meio de taxas regulares baseada no método de “valor presente líquido” e mecanismos de saques restritos.	AIEA	AIEA	Todas	[31]
	2	Gestão externa com captação dos recursos financeiros por um período mais curto, mantendo o método do valor presente sem mecanismo de saque	AIEA	AIEA	Todas	[31]
	3	Gestão interna ou externa, captando valor montante inicial mantendo o método de “valor presente líquido” sem mecanismo de saque	AIEA	AIEA	Todas	[31]
	4	Gestão interna, captar recursos apenas no início do descomissionamento	AIEA	AIEA	Todas	[31]
	5	Simulação com a adoção da abordagem 1 prevendo o desligamento prematuro com 1, 10 e 30 anos de operação *	AIEA	AIEA	Todas	[31]

*A abordagem é específica para realização de estudos para a análise de risco.

APÊNDICE G – Painel para o apoio às decisões estratégicas associadas à descontaminação e desmantelamento

Fluxograma de decisões estratégicas associadas à descontaminação e desmantelamento



ANEXO 1 - Níveis de dispensa para materiais sólidos contendo radionuclídeos da

Norma CNEN 8.01/2014

Radionuclídeo	Limite de Concentração de Atividade para Dispensa de Materiais (Quantidade ≤1000 kg) (kBq/kg)	Limite de Atividade para Dispensa de Materiais (Quantidade ≤1000 kg) (Bq)	Limite de Concentração de Atividade para Dispensa de Materiais Sólidos (Quantidade >1000 kg) (kBq/kg)
3H	1,00E+06	1,00E+09	100
14C	1,00E+04	1,00E+07	1
36Cl	1,00E+04	1,00E+06	1
39Ar	1,00E+07	1,00E+04	0
41Ca	1,00E+05	1,00E+07	0
53Mn	1,00E+04	1,00E+09	100
54Mn	1,00E+01	1,00E+06	0,1
55Fe	1,00E+04	1,00E+06	1000
59Ni	1,00E+04	1,00E+08	100
60Co	1,00E+01	1,00E+05	0,1
63Ni	1,00E+05	1,00E+08	100
65Zn	1,00E+01	1,00E+06	0,1
79Se	1,00E+04	1,00E+07	0
81Kr	1,00E+04	1,00E+07	0
85Kr	1,00E+05	1,00E+04	0
90Sr	1,00E+02	1,00E+04	1
92mNb	1,00E+04	1,00E+07	10
93Zr	1,00E+03	1,00E+07	10
93Mo	1,00E+03	1,00E+08	10
94Nb	1,00E+01	1,00E+06	0,1
99Tc	1,00E+04	1,00E+07	1
108mAg	1,00E+01	1,00E+06	0
121mSn	1,00E+03	1,00E+07	0
129I	1,00E+02	1,00E+05	0,01
133Ba	1,00E+02	1,00E+06	0

134Cs	1,00E+01	1,00E+04	0,1
135Cs	1,00E+04	1,00E+07	100
137Cs	1,00E+01	1,00E+04	0,1
145Pm	1,00E+03	1,00E+07	0
146Sm	1,00E+02	1,00E+07	0
151Sm	1,00E+04	1,00E+08	1000
152Eu	1,00E+01	1,00E+06	0,1
154Eu	1,00E+01	1,00E+06	0,1
155Eu	1,00E+02	1,00E+07	1
158Tb	1,00E+01	1,00E+06	0
166mHo	1,00E+01	1,00E+06	0
178mHf	1,00E+01	1,00E+06	0
205Pb	1,00E+04	1,00E+07	0
233U	1,00E+02	1,00E+05	1
239Pu	1,00E+00	1,00E+04	0,1

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento,
associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e
administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do
Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.**