



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia de Energia

Rejeitos Radioativos: um Estudo de Caso para Angra 2

Autor: Bruno de Medeiros Vieira Rocha
Orientador: Dr. Ronni Amorim

Brasília, DF
2020



Bruno de Medeiros Vieira Rocha

Rejeitos Radioativos: um Estudo de Caso para Angra 2

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia de Energia) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia de Energia).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Dr. Ronni Amorim

Brasília, DF

2020

Bruno de Medeiros Vieira Rocha

Rejeitos Radioativos: um Estudo de Caso para Angra 2/ Bruno de Medeiros
Vieira Rocha. – Brasília, DF, 2020-
103 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Ronni Amorim

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2020.

1. Lixo Nuclear. 2. Angra 2. I. Dr. Ronni Amorim. II. Universidade de
Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Rejeitos Radioativos: um Estudo de Caso
para Angra 2

CDU 02:141:005.6

Bruno de Medeiros Vieira Rocha

Rejeitos Radioativos: um Estudo de Caso para Angra 2

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia de Energia) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia de Energia).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 17 de Dezembro de 2020:

Dr. Ronni Amorim
Orientador

Dr. Leandro Xavier Cardoso
Convidado 1

**Dr. Redisley Aristóteles dos Santos
Paiva**
Convidado 2

Brasília, DF
2020

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus pela dádiva da vida em seguir sempre seus ensinamentos e preceitos.

Em segundo lugar à minha família. Meu pai e mãe por sempre procurar me conceder as melhores oportunidade de estudo e conhecimento. A minha irmã pelo apoio incondicional e cumplicidade. Aos meus avós por disseminar em nossa família o valor da educação e do aprendizado. Sem eles eu nada seria.

Em terceiro ao meu grande professor e exímio mentor Ronni Amorim que tive a oportunidade de ser aluno em diversas disciplinas na Faculdade do Gama (FGA), onde pude compactuar e receber um vasto conhecimento em diversas frentes da Engenharia.

E por fim, e não menos importante à minha namorada, amigos do BDJ, da escola, colegas e conhecidos sempre estiveram ao meu lado e me apoiaram em busca dessa realização.

*“Ensina-me bom discernimento e conhecimento,
pois acredito em seus mandamentos.”
(Bíblia Sagrada, Salmo 119, 66)*

Resumo

Levando em consideração os anseios por demanda de energia no mundo, a energia nuclear vem ganhando espaço na matriz energética de diversos países. Com o Brasil não é diferente. Porém esse tipo de fonte pode produzir resíduos que permanecem emitindo radiação por milhares de anos, e para isso o correto manejo e destino desse material deve ser tratado de maneira particular e sob égide de rigorosos protocolos de controle. Nesse contexto, esse trabalho visa evidenciar as principais técnicas adotadas no mundo para a gestão de resíduos nucleares, e elucidar o atual cenário do Brasil para essa temática. Identificando e diagnosticando em Estudo de Caso, a partir de uma entrevista com especialistas da Usina de Angra 2, como são executados essas diretrizes e processos de tratamento de rejeitos atômicos nessa usina.

Palavras-chaves: energia nuclear. resíduos nucleares. lixo atômico. Angra 2.

Abstract

Taking into account the yearnings for energy demand in the world, nuclear energy has been gaining space in the energy matrix of several countries. It is no different with Brazil. However, this type of source can produce residues that remain emitting radiation for thousands of years, and for this, the correct handling and destination of this material must be treated in a particular way and under strict control protocols. In this context, this work aims to highlight the main techniques adopted in the world for the management of nuclear waste, and to elucidate the current scenario in Brazil for this theme. Identifying and diagnosing in a case study, based on an interview with a specialist from the Angra 2 Plant, how these guidelines and processes for the treatment of atomic waste are carried out in this plant.

Key-words: nuclear energy. nuclear waste. atomic waste. Angra 2.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Matriz energética brasileira. Fonte: (EPE, 2020)	23
Figura 2 – Ciclo de vida do combustível nuclear até uso dentro da central. Fonte: (COSTA, 2018).	27
Figura 3 – Formação do <i>yellowcake</i> , Fonte: (G1, 2010).	28
Figura 4 – A esquerda elemento combustível em escala real, e a direita partes do elemento, Fonte: (COSTA, 2018).	30
Figura 5 – Reação em cadeia do elemento urânio 235, Fonte: (CARDOSO, 20-?).	31
Figura 6 – Funcionamento de uma usina do tipo BWR, Fonte: (EDUCACIONAL, 2020).	33
Figura 7 – Operação de uma usina PWR, obtido em (EDUCACIONAL, 2020)	34
Figura 8 – Esquemático do ciclo do combustível nuclear em usinas com unidade de reprocessamento. Fonte: (ABEN, 2016).	38
Figura 9 – Armazenagem do combustível nuclear queimado em piscinas. Fonte: (ROMANATO, 2005).	40
Figura 10 – Vista esquemática de uma instalação de combustível nuclear queimado em poços. Fonte: (ROMANATO, 2005).	41
Figura 11 – Instalação de silos verticais de concreto armado em instalações externas. Fonte: (ROMANATO, 2005).	42
Figura 12 – Estrutura de túnel para repositório em deposição geológica na Finlândia. Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2016).	43
Figura 13 – Em vista, Usinas de Angra 1 e Angra 2. Fonte: (MOREIRA, 2020).	57
Figura 14 – Organograma com os principais órgãos envolvidos no desempenho de Angra 2. Fonte: Autor.	58
Figura 15 – Origem dos rejeitos de atividade intermediária na Usina de Angra 2. Fonte: (SILVA, 2006)	61
Figura 16 – Níveis em frações da composição de um elemento combustível após submetido a processamento em Angra 2. Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2014a).	62
Figura 17 – Estrutura de origem dos rejeitos gerados em Angra 2. Fonte: Autor.	63
Figura 18 – Fluxograma dos principais processos inerentes a gestão de resíduos. Adaptado de (FREIRE; TELLO, 2007).	64
Figura 19 – Diagrama de processos necessários para concepção do Plano de Gerência. Fonte: Autor.	66
Figura 20 – Fases da cadeia de gestão de rejeitos na CNAA. Adaptado de: (ELETRONUCLEAR, 2014a).	68

Figura 21 – Modelo de estratégia que pode ser aplicado à caracterização de rejeitos radioativos em Angra.	70
Figura 22 – Métodos de tratamento de rejeitos para fontes específicas. Fonte: (SILVA, 2006)	71
Figura 23 – Aplicação do processo de compactação de rejeitos em Angra 2. Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2020).	73
Figura 24 – Tambor prensado pela técnica de supercompactação. Fonte: (SANTOS; LIMA, 2007)	73
Figura 25 – Caixas que recebem os tambores após compressão e redução de volume. Fonte: (SANTOS; LIMA, 2007)	74
Figura 26 – Imobilização de rejeitos radioativos em cimento. Fonte: (COTA, 2014).	74
Figura 27 – Exemplo rótulo de identificação de rejeito radioativo. Fonte: (SILVA, 2006).	75
Figura 28 – Composição do Centro de Gerenciamento de Rejeitos. Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2014).	76
Figura 29 – Depósito Intermediário para acometimento de resíduo nuclear na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto. Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2020).	77
Figura 30 – Processos referentes ao inventário das cargas de rejeitos radioativos em Angra. Adaptado de (COTA, 2014)	78
Figura 31 – Piscinas de armazenagem do combustível nuclear queimado em Angra 2. Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2020).	79
Figura 32 – Local onde ficará situado a UAS no complexo da CNA AAA. Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2020).	80
Figura 33 – Modelo esquemático da planta da Unidade de Armazenagem Complementar a Seco na CNA AAA. Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2020).	81
Figura 34 – A UAS em Angra encontra-se em fase final de construção. Fonte: (ENERGIA, 2020).	82
Figura 35 – Quantidade de pessoas e doses acumuladas em 25 anos na CNA AAA (ASSUNÇÃO; AMARANTE, 2019).	92
Figura 36 – Taxa de concentrações referência para os tipos de rejeitos radioativos. Fonte: (SILVA, 2006).	101
Figura 37 – Controle da Variação de Inventário de Radionuclídeos Fonte: (CNEN, 2014)	103

Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação dos resíduos radioativos. Fonte: (ALMEIDA et al., 2016).	37
Tabela 2 – Vantagens e desvantagens armazenagem via úmida. Fonte: (ROMA-NATO, 2005)	44
Tabela 3 – Vantagens e desvantagens da armazenagem via seca. Fonte: (ROMA-NATO, 2005).	44
Tabela 4 – Análise da gestão de resíduos por país. Adaptado de Mariz (2015). . .	46
Tabela 5 – Cronograma de desenvolvimento do Trabalho de Conclusão 2. Fonte: Autor.	53
Tabela 6 – Principais radioisótopos gerados durante operação do reator. Fonte: (SILVA, 2006).	60
Tabela 7 – Evolução da produção de rejeitos radioativos produzidos de 2010 a 2014. Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2014)	61
Tabela 8 – Massas e níveis referentes de composição do combustível usado após 3 anos de irradiação no núcleo do reator em Angra 2. Fonte: (MOREIRA et al., 2006)	61
Tabela 9 – Tipos de depósitos e respectivos responsáveis pelos empreendimentos. Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2014)	76
Tabela 10 – Principais processos e atividade inerentes a armazenagem via úmida na Usina de Angra 2. Fonte: Autor.	80

Lista de abreviaturas e siglas

CNAAA	Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto
CTMSP	Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
INB	Indústrias Nucleares do Brasil
UAS	Unidade de Armazenamento Complementar a Seco
PWR	<i>Pressure Water Reactor</i>
BWR	<i>Boiling Water Reactor</i>
OCDE	Comitê de Meio Ambiente da Organização para Cooperação e Desenvolvimento
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
KPE	Sistema de Armazenamento de Rejeitos
CGR	Centro de Gerenciamento de Rejeitos
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
IRD	Instituto de Radioproteção e Dosimetria

Lista de símbolos

Γ	Letra grega Gama
Λ	Lambda
ζ	Letra grega minúscula zeta
\in	Pertence

Sumário

	Introdução	23
I	ASPECTOS GERAIS	25
1	CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR	27
1.1	Mineração e Beneficiamento	28
1.2	Conversão	28
1.3	Enriquecimento	29
1.4	Reconversão	29
1.5	Fabricação de Pastilhas	29
1.6	Fabricação do Elemento Combustível	30
2	USINA NUCLEAR	31
2.1	Reator Nuclear	32
2.1.1	Reator tipo BWR	32
2.1.2	Reator tipo PWR	33
2.1.2.1	Circuito Primário	34
2.1.2.2	Circuito Secundário	35
2.2	Resíduos Radioativos	35
2.3	Tipos de Resíduos Radioativos	36
2.3.1	Resíduos de Atividades Elementares	38
2.3.2	Combustível Irrradiado	39
2.3.2.1	Armazenagem Via Úmida	40
2.3.2.2	Armazenagem Via Seca	40
2.3.2.2.1	Armazenagem em Poços	41
2.3.2.3	Armazenagem em Silos	41
2.3.2.4	Armazenagem em Cascos	41
2.3.2.5	Armazenagem em Navios	42
2.3.3	Deposição Geológica	42
2.3.4	Vantagens e Desvantagens dos Tipos de Armazenagem do Combustível Nuclear Queimado	43
2.3.5	Panorama Mundial de Gestão do Combustível Nuclear Queimado	44
2.3.6	As Entidades e Marcos Regulatórios na Gestão de Resíduos no Mundo	46

II		49
3	OBJETIVO E ESCOPO	51
3.1	Objetivo Geral	51
3.2	Objetivo Específico	51
3.3	Metodologia	51
III	ESTUDO DE CASO	55
4	COMPLEXO NUCLEAR DE ANGRA	57
4.1	Usina de Angra 2	58
4.1.1	Rejeitos Radioativos em Angra 2	59
4.1.1.1	Principais Rejeitos em Angra 2	59
4.1.2	Gestão de Rejeitos Radioativos	62
4.1.2.1	Leis e Diretrizes Regulatórias na Gestão de Rejeitos Radioativos no Brasil	64
4.1.2.2	Norma CNEN-NN-8.01 - Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação	65
4.1.3	Gerência de Rejeitos Radioativos na CNAEA	67
4.1.3.1	Etapas da Gestão de Rejeitos em Angra 2	68
4.1.3.1.1	Rejeitos de Baixa e Média Radioatividade	69
4.1.3.2	Inventários e Registros de Atividades de Controle de Rejeitos	76
4.1.3.3	Gestão e Controle de Elementos de Alta Atividade	78
4.1.3.3.1	Unidade de Armazenamento Complementar a Seco - UAS	79
4.1.4	Perspectivas e Desafios	81
4.2	Resultados Esperados	83
4.3	Resultados	83
4.3.1	A Entrevista com Sandro Lima	85
4.3.2	A Entrevista com Rafael Chiaro	86
4.4	Análise dos Resultados	90
4.5	Conclusão	93
	REFERÊNCIAS	95
	ANEXOS	99
	ANEXO A – PRIMEIRO ANEXO	101
	ANEXO B – SEGUNDO ANEXO	103

Introdução

Diante da constante demanda por oferta energética em âmbito global, o Brasil têm por necessidade o aumento na produção de energia, tendo em vista sua situação de expressivo crescimento econômico. Pela força direta da industrialização e pelo aumento do consumo humano, faz-se cada vez mais necessária a diversificação de sua matriz energética, buscando alternativas que sejam capazes de atender as necessidades de sustentabilidade, com formas de emissão cada vez menos poluentes.

O Brasil apresenta arranjo de produção energética desconsoante com a matriz energética global. Enquanto no mundo a geração tem dependência direta de fontes de energia não renováveis, como carvão, petróleo e gás, o Brasil destaca-se na geração oriunda de fontes renováveis, que totalizam aproximadamente 43%, valor correspondente a quase metade de sua matriz total (EPE, 2020). Fato que pode ser visto na Figura (1) a seguir.

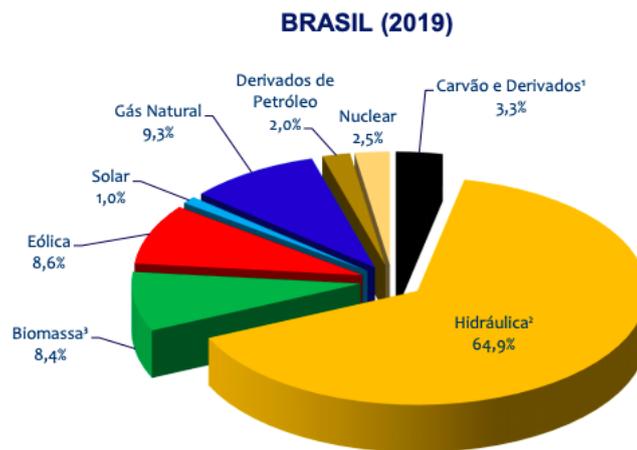


Figura 1 – Matriz energética brasileira. Fonte: (EPE, 2020)

Por ter posição de destaque frente a condição de outros países quanto o uso de fontes de geração de energia com caráter sustentável, a energia nuclear surge como uma alternativa e eleva um degrau de expansão da matriz energética brasileira. Essa forma de energia térmica é capaz de garantir fornecimento constante sem lançamento de gases poluentes, elementos causadores do efeito estufa. Assim, considerando que o Brasil tem domínio tecnológico no ciclo do combustível, e abundância na oferta de reservas de urânio, o uso dessa fonte entra em consonância com os anseios por demanda energética existente; além de que é fundamental para o desenvolvimento pleno de um país a diversificação no uso de formas de geração de energia (BONES; SCHIRMER; CEOLIN, 2017).

Ainda segundo Bones, Schirmer e Ceolin (2017), essa forma de geração de energia voltou a cena internacional como alternativa ao uso de fontes não renováveis de energia.

A geração tem por característica a emissão de baixos teores de gás carbônico (CO₂), principal agente do efeito estufa; o que acontece diferentemente com fontes de energia não renovável, como o petróleo, por exemplo, que desde seu processo de exploração até sua transformação em derivados é responsável pela emissão de dióxido de enxofre, monóxido de carbono, óxido de nitrogênio e emissão de partículas suspensas (metais pesados), substâncias que causam impacto direto na camada de ozônio.

No entanto, essa temática gera insegurança e questionamentos, principalmente quando a aceitação pública esbarra no estigma do perigo causado por três grandes fatores (JANNUZZI, 2001). Pelos riscos de manuseio do material radioativo durante o processo de produção do combustível, com riscos de vazamentos e acidentes, pelo caminho inverso em direção a rota clandestina de fornecimento de material radioativo para utilização em armamentos, e por fim pelo descarte e formas de armazenamento dos produtos residuais do processo de conversão. A produção desses rejeitos radioativos (lixo atômico), é capaz de emitir cargas ionizantes que permanecem presentes na natureza por milhares de anos. Como exemplo, o plutônio 238 que tem período de meia vida de 88 anos; ou ainda, em casos mais extremos, a produção do elemento plutônio 239 com meia vida de 240 séculos. O fato é, “inexiste solução prática e, tampouco, em nível mundial para o problema (MARQUES, 2011), pois não é possível apressurar o processo de decaimento de um material radioativo, a não ser respeitando seu tempo de meia vida”.

Esses elementos, quando em contato com o homem são capazes de produzir sérios danos a saúde humana, como diversos tipos de cânceres, no caso do iodo radioativo, ou ainda queda na contagem das plaquetas, com constantes sangramentos, inflamação e fibrose nos pulmões. Quando descartados incorretamente no meio ambiente, acabam depositados em lavouras e contaminam vegetais que nos beneficiam dentro da cadeia alimentar, como é o complexo caso do cézio-137 (MARQUES, 2011).

Com toda inconstância de fontes renováveis, como o uso de biomassa para a produção de energia, os grandes impactos causados pelo gás natural e ainda a crise hídrica vivenciada atualmente, o uso desse tipo de energia torna-se cada vez mais inevitável e fundamental. Mesmo apesar de já existir tecnologias que diminuem substancialmente os riscos de contaminação, ainda não são satisfatórios para o conjunto de questões que envolvem o descarte do lixo atômico.

Parte I

Aspectos Gerais

1 CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR

O ciclo do combustível nuclear pode ser entendido como o conjunto de etapas necessárias para o processamento da matéria como combustível dentro das usinas. Essa cadeia de processos, que vai desde a fase de mineração do urânio até a fase de utilização do elemento no interior de uma central nuclear, permite que o isótopo enriquecido seja componente principal para a formação da matéria final que alimenta os reatores presentes na unidade de operação.

De acordo com a INB, o ciclo do combustível abrange em sua totalidade 6 grandes processos até o uso final do elemento combustível como fonte geradora de calor. São eles: mineração e beneficiamento, conversão, enriquecimento, reconversão, fabricação de pastilhas e por fim a fabricação do combustível nuclear. As etapas são ilustradas em seu ciclo na Figura (2).



Figura 2 – Ciclo de vida do combustível nuclear até uso dentro da central. Fonte: (COSTA, 2018).

1.1 Mineração e Beneficiamento

O urânio pode ser encontrado como vestígio em todas as rochas sedimentares incidentes na formação da estrutura geológica do Brasil. Segundo site das Indústrias Nucleares do Brasil (INB, 2020), esse tipo de elemento pode ser encontrado nas mais diversas colorações, como branco, cinza, amarelo, marrom. O que o diferencia de outros elementos é sua propriedade física de liberar partículas que emitem radiação, que assim é aproveitada para gerar energia na forma de calor.

A primeira etapa do ciclo acontece com a descoberta da jazida e sua viabilidade econômica em prospecção. Com toda avaliação devidamente descrita, é iniciada a operação de extração para que após isso seja realizado o beneficiamento do mineral. É nessa etapa, por sua vez, que as britas formadas do processo de britagem são submetidas a ação de ácido sulfúrico, que será responsável por extrair o urânio da rocha. Esse processo é conhecido como lixiviação, e dele é formada uma solução em estado líquido, o licor de urânio.

O licor de urânio é passado por um processo de purificação onde gera um concentrado de urânio, também entitulado na bibliografia como *yellowcake*. Esse material é condicionado em tambores interamente oclusos e são conduzidos para a outra etapa do ciclo, como pode ser visto na Figura (3).



Figura 3 – Formação do *yellowcake*, Fonte: (G1, 2010).

1.2 Conversão

Após passar por todo processo de purificação e dissolução, o *yellowcake* é convertido em um sal, o hexafluoreto de urânio (UF_6), que tem como principal propriedade passar para o estado gasoso em baixas temperaturas.

Todo esse processo é trabalhado pela INB sob égide de um sistema integrado de gestão que é assegurado segundo as normas ISO 9001 (ISO, 2008), ISO 14001 (ISO, 2004)

e OHSAS 18001 (OHSAS, 2007), onde todo atendimento dos requisitos são realizados com auditorias periódicas.

1.3 Enriquecimento

O processo de enriquecimento tem como objetivo promover a separação e aumento na concentração de urânio 235. O elemento em seu estado natural não produz energia, e contém aproximadamente 0,7% da presença do isótopo (DAU, 2009).

Atualmente o Brasil tem domínio tecnológico de todo processo de enriquecimento. O Centro Tecnológico da Marinha de São Paulo em Parceira (CTMSP) em parceria com o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) foram responsáveis pelo desenvolvimento da técnica de ultracentrifugação, largamente usada em escala industrial.

Essa técnica é considerada a mais econômica entre as existentes e consiste na separação dos isótopos de urânio 235 e urânio 238 por meio da operação em máxima rotação. O arranjo do modelo de montagem das ultracentrífugas condiciona os níveis de teor e massa do elemento enriquecido produzido. A disposição em série provê baixa quantidade baixa de massa produzida, mas alto enriquecimento. Por sua vez, a composição em paralelo promove concentrações menores objetivo em grande quantidade de massa. Para os reatores de Angra 1 e 2 são necessárias grandes quantidades de elemento combustível com teores entre 3% e 5% (SILVA; MARQUES, 2006).

1.4 Reconversão

É na reconversão que ocorre o fluxo reverso de transformação de estado físico do gás hexafluoreto de urânio (UF_6) ao estado sólido na forma de pó. Esse processo garante concentrar o urânio de maneira apropriada ao emprego do elemento como combustível.

O urânio enriquecido na forma de gás oriundo de processos anteriores é submetido a atuação de diversas atividades que permite gerar o tricarbonato de amônio e uranila (TCAU), um composto amarelo e sólido, que quando aquecido e misturado é submetido á ação de vapor d'água, e em seguida resfriado, formando assim um composto na forma dióxido de urânio(UO_2). O produto resultante ocorre na forma de pó, que após ser estabilizado é utilizado na etapa de produção de pastilhas (INB, 2020).

1.5 Fabricação de Pastilhas

Após submeter o urânio enriquecido na forma de pó (UO_2) à mistura com outros compostos de urânio, a solução é levada a uma prensa rotativa onde são produzidas as chamadas pastilhas verdes. Após esse procedimento, as pastilhas são conduzidas a

um forno onde são submetidas a sinterização, procedimento onde ocorre a compactação aquecimento, em faixa média de 1750 °C, a fim de garantir rigidez necessária as condições de operação dentro do reator da central nuclear (INB, 2020)

As cerâmicas sinterizadas são usinadas em molde de retificação, geralmente com 1 cm de diâmetro e 1 cm de comprimento, para então prosseguimento ao processo de enchimento e varetas, e enfim montagem do elemento combustível (COSTA, 2018).

1.6 Fabricação do Elemento Combustível

As pastilhas são depositadas nas varetas formadas a partir de uma liga super resistente comercial, *Zircaloy*, no qual é estruturado por grades espaçadoras (INB, 2020). Costa (2018) apresenta que as usinas de Angra 1 e Angra 2 recebem dois tipos de elemento combustível, respectivamente: o americano, com tecnologia Westinghouse, que utiliza 121 elementos com 4 metros de comprimento; e o alemão, com tecnologia Siemens, que usa 193 elementos com 5 metros de comprimento. A estrutura permanece no núcleo do reator de acordo com o tempo de vida do combustível nuclear.

O elemento combustível final é apresentado na Figura (4). A direita podemos identificar as varetas, as grades de espaçamento e o bocal, que serve como elemento orientador do fluxo de água para os dutos de refrigeração entre as varetas de combustível.



Figura 4 – A esquerda elemento combustível em escala real, e a direita partes do elemento, Fonte: (COSTA, 2018).

2 USINA NUCLEAR

É dentro das usinas nucleares que acontece a geração de energia a partir do processo de fissão nuclear do elemento natural urânio. Esse princípio se baseia na colisão entre partículas, e partir disso, a divisão do núcleo dos átomos. “A colisão é realizada entre certos tipos de núcleos metálicos (elemento mais pesado - maior massa) com um nêutron, resultando na divisão do núcleo em dois fragmentos similares em tamanho”(ALMEIDA et al., 2016). O produto energético dessa reação é aproveitado tanto em forma de calor quanto na forma de radiação. Almeida et al. (2016) exemplifica reações de fissão com núcleo de elementos pesados, como urânio 235 ou plutônio 239, decorrentes da interação com nêutrons, que desintegram-se em uma reação exotérmica (ZAHN, 2007). A reação, conhecida como reação em cadeia e vista na Figura (5), mostra que os nêutrons são liberados do núcleo, e assim continuam a colidir com outros núcleos dando efeito contínuo a ocorrência da reação (núcleo dividido + nêutrons + energia).

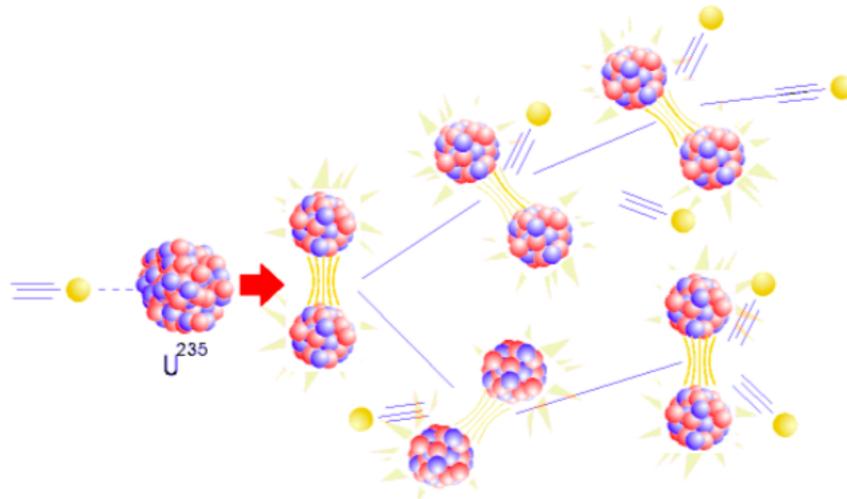


Figura 5 – Reação em cadeia do elemento urânio 235, Fonte: (CARDOSO, 20-?).

Segundo dados da Eletronuclear (2020), a fissão do átomo de urânio é a principal técnica adotada no mundo. Essa técnica é empregada em mais de 400 centrais nucleares, e no Brasil é operado nas duas usinas em atividade: Angra 1 e Angra 2. O calor proveniente da reação em cadeia é utilizado para aquecer a água e assim produzir vapor d’água que mecanicamente acionará as turbinas de um gerador, produzindo energia elétrica.

As usinas nucleares são formadas por grupamento de maquinários semelhante ao encontrado em uma termoelétrica, somada a operação de um reator nuclear. As constantes

iterações do choque do núcleo dos átomos com nêutrons acontecem de maneira desacelerada por barras de controle, dentro do reator (ALMEIDA et al., 2016). Esse equipamento tem então extrema importância durante todo o processo de conversão energética, uma vez que é dentro de sua estrutura que acontece a liberação dos raios gama, responsáveis pela geração de calor de alta energia conforme apresentado anteriormente. A seguir será apresentado os diferentes tipos de reatores e seus respectivos princípios de funcionamento dentro de uma usina nuclear.

2.1 Reator Nuclear

O reator é o principal dispositivo presente em uma unidade de geração nuclear. Esse dispositivo é, na verdade, uma central térmica nuclear, que apresenta estrutura funcional básica permitindo categorizá-lo quanto formato de operação. Para seu correto funcionamento é necessário trabalho de um fluido refrigerante, elementos de controle e materiais estruturais (CARDOSO, 20-?). A composição da unidade reatora não possui simplicidade quanto a apresentação de sua complexidade, e sim necessita de elementos, que bem arquitetados garantem segurança e eficiência no processo de conversão de energia. Os principais componentes e materiais envolvidos na estrutura básica de uma central nuclear serão apresentados ainda dentro desse capítulo.

Atualmente são adotados em operação dois tipos de reatores em predominância, o de água fervente (BWR - *Boiling Water Reactors*), e o reator de água pressurizada (PWR - *Pressurized Water Reactors*). As usinas em atividade no Brasil, Angra 1 e Angra 2, operam com reator do tipo PWR.

2.1.1 Reator tipo BWR

De acordo com Almeida et al. (2016), é o tipo de reator onde o calor é produzido no núcleo que fica situado dentro do vaso de pressão. O deslocamento da água para parte inferior do núcleo acontece devido ao processo de arrefecimento, produzindo uma mistura entre água e vapor, de menor densidade. Essa mistura então é deslocada para o topo do núcleo, de onde deixa após processo de separação de umidade, processo que consiste na eliminação de gotículas presentes. O *steamline* recebe o vapor, e o direciona até a turbina, que acoplada a um gerador, produz energia elétrica. O vapor remanescente é condensado e a água produzida é bombeada e reutilizada no núcleo do reator.

As turbinas a vapor presentes na unidade fazem parte do circuito do reator. Uma vez que durante o funcionamento do circuito, partículas de radionuclídeos são produzidos, podendo causar danos a estrutura de blindagem da turbina. Assim, por ser contaminada com esses efeitos da radiação provocada no núcleo do reator, têm-se por necessidade que a turbina esteja protegida por equipamentos de proteção radiológica durante a operação

normal da turbina (REZENDE et al., 2009). O esquema operacional de um reator do tipo BWR é apresentado na Figura (6) abaixo.

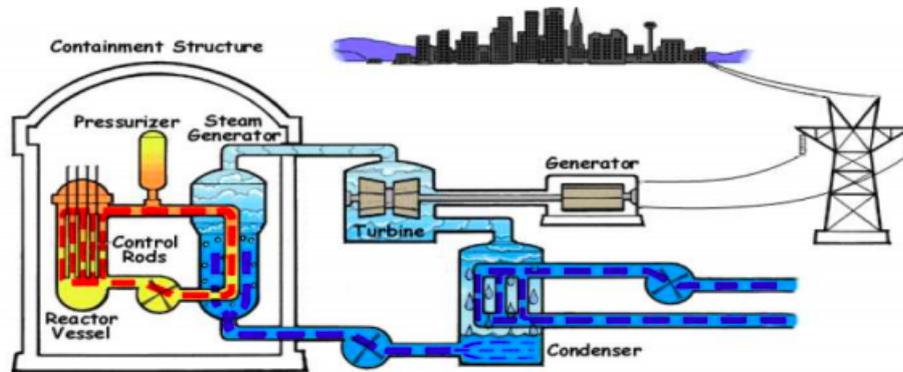


Figura 6 – Funcionamento de uma usina do tipo BWR, Fonte: (EDUCACIONAL, 2020).

2.1.2 Reator tipo PWR

Um reator tipo PWR usa água leve como fluido refrigerante que transcorre por trocadores de calor sendo aquecida e pressurizada, a temperatura média de 325°C , não entrando em estado de ebulição em circuito fechado, chamado **circuito primário**. Por meio de trocadores de calor, geradores de vapor, a energia térmica é transmitida a um **circuito secundário**, onde o fluido refrigerante é aquecido. A água presente nesse circuito encontra-se em pressão inferior a do circuito primário, que quando aquecida se expande transformando-se em vapor que aciona as pás de uma turbina, cujo eixo está acoplado a um gerador produzindo energia elétrica. O produto que circula no circuito secundário após contato com as pás da turbina, condensa-se devido a operação de um terceiro circuito de resfriamento e retorna aos trocadores do circuito primário para que seja aquecida novamente (REZENDE et al., 2009).

Uma das maiores vantagens do emprego desse tipo de sistema é que os circuitos de trabalho ficam isolados. Assim, o circuito primário, que contém material radioativo, fica separado do circuito secundário por duas barreiras, feixes dos tubos geradores de vapor e dos condensadores (ELETRONUCLEAR, 2020).

Os principais componentes presentes em um reator nuclear estão presentes dentro do circuito primário e secundário, conforme apresentado em Rezende et al. (2009). Os subitens seguintes apresentarão a função de cada um desses elementos e o funcionamento por completo de uma usina com reator tipo PWR. A Figura (7) a seguir, ilustra uma usina nuclear do tipo PWR; em laranja, o circuito primário, em azul escuro, o secundário e em azul claro o circuito de resfriamento.

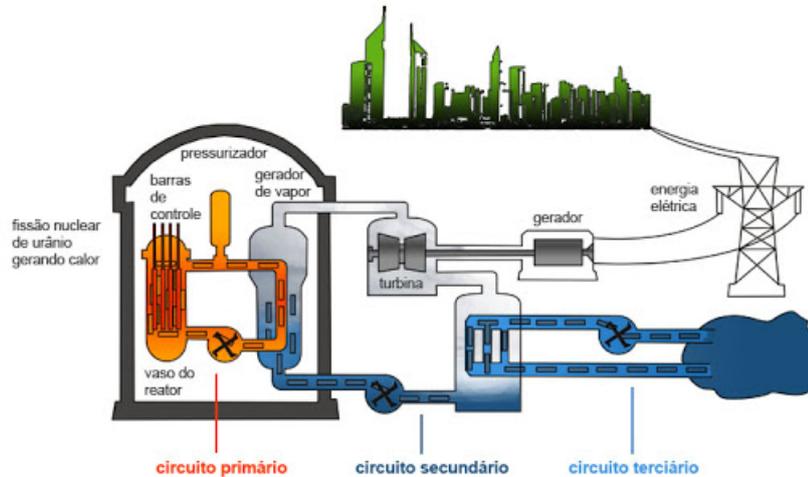


Figura 7 – Operação de uma usina PWR, obtido em (EDUCACIONAL, 2020)

2.1.2.1 Circuito Primário

- Núcleo do Reator: é dentro do núcleo do reator que ocorre o processo de fissão controlada do combustível nuclear. Esse componente abriga o elemento combustível, que contém barras de controle, elementos absorvedores, restritores de fluxo dentre outros elementos internos responsáveis pela produção e controle da energia produzida;
- Sistema de Refrigeração do Reator: esse elemento é um dos responsáveis por garantir a segurança do reator nuclear. A principal função do sistema de refrigeração do reator é conduzir a energia térmica gerada no reator pelas bombas de refrigeração até os geradores de vapor. Durante funcionamento, esse sistema é responsável por transportar água pressurizada através vaso do reator e do circuito de refrigeração;
- Pressurizador: o pressurizador é o elemento que tem função de controlar a pressão do circuito primário. Esse dispositivo possui um elemento de controle que, no caso de queda de pressão do circuito primário liga aquecedores presentes que por consequência vaporizará a água, aumentando assim a pressão interna do sistema. De maneira inversa, caso ocorra um aumento de pressão do circuito primário, as válvulas do sistema de controle são abertas injetando água fria no vapor, condensando e equalizando à nível de operação (CRUZ, 2016).
- Gerador de Vapor: este elemento tem como objetivo transferir energia na forma de calor do circuito primário para um fluido de trabalho do circuito secundário, produzindo vapor. Esses, podem ser do tipo horizontal ou vertical. O gerador de vapor contém um separador de umidade, que garante qualidade no vapor produzido no outro circuito. Esse processo minimiza efeitos de corrosão e erosão nas pás da turbina.

- Vaso de contenção: o gerador de vapor e o vaso de pressão do reator são envolvidos por uma grande estrutura em forma de carcaça que é responsável por conter os possíveis gases e vapores produzidos durante processo de operação do reator. Esse elemento é constituído de aço, com espessura média de 3,8 *cm* como é o caso em Angra 1. O Edifício do reator envolve toda estrutura de contenção, e serve como barreira física para a saída de material radioativo e exposição da central nuclear à ocorrência de fatores externos, como explosão ou acidentes aéreos (CNEN, 2020).

2.1.2.2 Circuito Secundário

- Sistema de Vapor Principal: permite a circulação do fluido de trabalho no ciclo secundário. Esse sistema compreende a linha que sai do gerador de vapor e chega a turbina acoplada ao eixo do gerador elétrico. Esse sistema é composto por válvulas que realizam o controle de pressão dentro do canal de operação (CRUZ, 2016).
- Turbina: dispositivo que transforma energia térmica em energia mecânica, a partir da rotação de seu eixo principal. O aumento de energia cinética, que ocorre devido decréscimo de pressão e temperatura, provoca expansão do vapor e movimenta as pás da máquina. Dentro de uma usina nuclear são utilizadas turbinas a vapor. As turbinas a vapor podem ser classificadas em dois tipos, de acordo com o tipo de descarga: Turbina de Alta Pressão (TAP), onde a pressão de saída é maior que a pressão atmosférica; Turbina de Baixa Pressão (TPB), que tem pressão de saída abaixo da pressão atmosférica (WOODROOF; LAMMERS, 2012). Em usinas que operam com reator tipo PWR, a principal diferença de turbinas presente em termelétricas convencionais é a qualidade do vapor admitida na entrada (HITACHI, 2006).
- Gerador Elétrico: Os geradores elétricos são os dispositivos responsáveis por converter a energia mecânica proveniente do movimento da pás em energia elétrica. A variação do fluxo magnético induz a chamada força eletromotriz que por consequência induz corrente elétrica nas bobinas do rotor da máquina (WOODROOF; LAMMERS, 2012).

2.2 Resíduos Radioativos

Resíduo pode ser definido como o produto de qualquer substância oriundo de um processamento prévio, e que não possui função útil para reuso dentro da cadeia a qual pertence. A partir de sua definição, os resíduos radioativos são rejeitos de qualquer natureza (sólida, líquida) que contenha teores de radionuclídeos superiores aos determinados em lei. Padrões internacionais de segurança definem processos como de transporte, tratamento e armazenamento, e que são normatizados de acordo com a legislação de cada país

(ALMEIDA et al., 2016). Os resíduos são divididos em dois grandes grupos de acordo com os os teores incidentes de radionuclídeos, sendo de baixa atividade ou de alta atividade.

Em processos radioativos faz-se por necessário a definição de tempo de meia vida de um elemento; esse, é o tempo necessário que um elemento decaia a metade de sua atividade anterior. O tempo de meia vida é fundamental para determinação do número de ciclos necessários que determinado elemento permanecerá com atividade radioativa quando presente no ambiente. Até que sejam atingidos níveis insignificantes, as substâncias com níveis de contaminação desses radionuclídeos podem causar substanciais impactos ambientais e ainda serem extramente nocivos a saúde humana.

Desde a extração do elemento até a passagem em dutos, rejeitos radioativos são produzidos em níveis de escala em função da exposição a atividade radioativa, ou do próprio elemento sujeito a alta atividade nuclear. Uma vez retirado do reator, esse produto pode ser acometido de maneira temporária na usina ou enviado para usinas de reprocessamento, que em geral ficam localizadas dentro do complexo de uma usina nuclear.

2.3 Tipos de Resíduos Radioativos

Os resíduos radioativos podem ser formados a partir de diferentes naturezas. Desde o simples contato de uma substância com material radioativo até a mistura de radionuclídeos oriundos do processo de fissão, por exemplo. Alguns dos mais conhecidos rejeitos são estrôncio - 90 e césio - 137. De acordo com o CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear, os rejeitos são classificados de acordo com a duração do tempo de atividade radioativa. Esses por sua vez são separados em classes e caracterizados de acordo com os níveis de concentração em relação aos níveis de dispensa estabelecidos. Esses níveis são variados e podem ser obtidos na página de acesso do órgão (CNEN, 2020). No Brasil, é competência do CNEN a normatização, regulamentação e fiscalização de todo processo de gerenciamento dos rejeitos radioativos. A CNEN estabelece alguns critérios para categorização, e são eles: teores de concentrado existentes, respectivas meia-vida e a natureza da radiação. A Tabela (1) seguinte ilustra quais são essas categorias e suas respectivas características associadas.

Os critérios de caracterização são importantes para identificação dos tipos de resíduos ocorrentes durante o processo de processamento do elemento combustível dentro da central nuclear. A partir da classificação, resíduos provenientes do processo de manipulação do elemento natural e de cargas residuais do elemento combustível (combustível queimado) assim como utensílios que quando expostos as cargas radioativas formam resíduos, que em linhas gerais fazem parte do lixo produzido em usinas.

Tipo	Característica
Classe 0.	Rejeitos Isentos (RI): rejeitos contendo radionuclídeos com valores de atividade ou de concentração de atividade, em massa ou volume inferiores aos iguais ou respectivos níveis de dispensa estabelecidos.
Classe 1.	Rejeitos de Meia Vida Muito Curta (RVMC): rejeitos com meia vida curta inferior, ou da ordem de 100 dias, com níveis de atividade ou concentração em atividades superiores aos respectivos níveis de dispensa estabelecidos.
Classe 2.	Rejeitos de Baixo e Médio Níveis de Radiação (RBMN): com meia-vida superior aos rejeitos de Classe 1, com níveis de atividade ou de concentração em atividades superiores aos níveis de dispensa estabelecidos bem como potência térmica inferior a 2 kW/m ³ .
Classe 2.1	Meia Vida Curta (RBMN-VC): rejeitos de baixo e médio níveis de radiação contendo emissores beta/gama com meia-vidainferior ou da ordem de 30 anos com concentração de radionuclídeos em emissores alfa de meia-vida longa limitada em 3700 kBq/kg em volumes individuais e com 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 do urânio e tório em concentraçãode atividades, ou atividades acima dos níveis de dispensa estabelecidos.
Classe 2.3	Rejeitos Contendo Radionuclídeos Naturais (RBMN-RN): rejeitos contendo matérias primas minerais, naturais ou industrializados, com radionuclídeos da série do urânio tório em concentração de atividade ou atividades acima dos níveis de dispensa estabelecidos.
Classe 2.4	Rejeitos de Meia-Vida Longa (RBMN-RN): 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.
Classe 3.	Rejeitos de Alto Nível de Radiação (RAN): rejeitos com potência térmica superior a 2 kW/m ³ e com concentrações de radionuclídeos de meia-vida longa que excedem as limitações para classificação como rejeitos de meia-vida curta.

Tabela 1 – Classificação dos resíduos radioativos. Fonte: (ALMEIDA et al., 2016).

2.3.1 Resíduos de Atividades Elementares

Os rejeitos de baixa atividade abrangem quase 90% do volume do lixo total, mas que possuem apenas 1% dos níveis totais de radiação gerados. Já os rejeitos de nível médio ou intermediário apresentam cerca de 7% do volume total e 4% da radioatividade dos resíduos radioativos. Em usinas, no geral, esses rejeitos são materiais usados em limpeza, roupas, sapatilhas e luvas utilizadas no edifício da central do reator, impurezas e dentre outros resíduos. Esses materiais uma vez expostos à atividade nuclear são condicionados inicialmente em embalagens metálicas para que assim seja destinado a um depósito, normalmente presente dentro das fronteiras da usina. Esses depósitos são constantemente monitorados por especialistas a fim de garantir a proteção dos colaboradores e do ambiente a ação da atividade nuclear (ABEN, 2016).

Centrais modernas, e com alto grau de avanço tecnológico contam com unidades de reprocessamento situadas no sítio da Usina. Apenas 1% é isótopo de urânio pronto para ser usado, por esse motivo é demandado alto nível de tecnologia para funcionamento e operação das unidades particulares. A Figura (8) traz um esquemático do processo de ciclo do combustível em uma usina com unidade de reprocessamento.

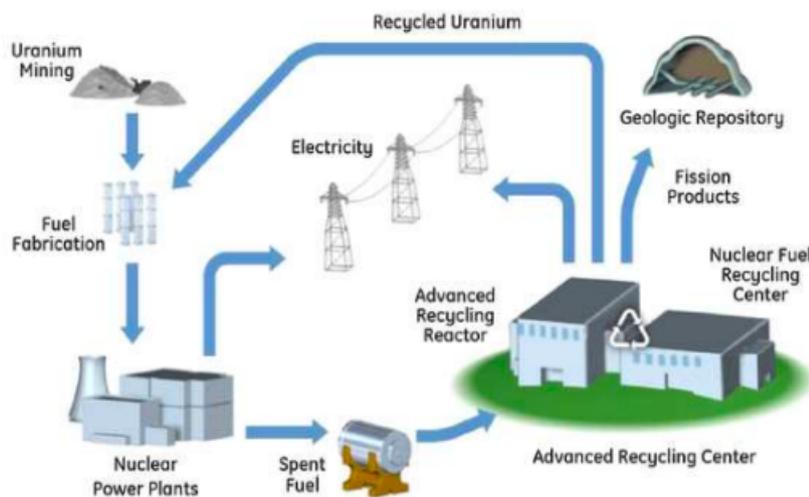


Figura 8 – Esquemático do ciclo do combustível nuclear em usinas com unidade de reprocessamento. Fonte: (ABEN, 2016).

A análise do processo de gerenciamento de resíduos é função do modelo implementado pelo país, e isso tem variantes diversas de acordo com a política nuclear local. Em linhas gerais, o acondicionamento para tratamento dos resíduos de baixa e média radioatividade exige um manejo mais simples em relação a rejeitos de alta atividade, como é o caso do combustível irradiado. Por mais que sejam produzidos diversos tipos, e em diferentes estágios da matéria, líquido, sólido ou gasoso, existem diversas tecnologias desenvolvidas por empresas para armazenagem e transporte desse combustível nuclear. O

descarte é feito seguindo os níveis de concentração presente, e caso não seja possível o descarte via esgoto ou lixo residual, deve ser encaminhado para local de armazenamento adequado (ABEN, 2016).

No caso específico de equipamentos que tem contato direto com a atividade nuclear, esses materiais são acondicionados em barris metálicos, solidificados com concreto e vedados com resina, garantindo máximo isolamento. Em seguida, são transportados a depósitos intermediários, onde serão encaminhados a depósitos geológicos, ou mais comumente chamado de repositórios. Tratado como túmulo dentro da cadeia do ciclo de vida do produto nuclear, esses locais tem como finalidade receber os resíduos dos diferentes níveis de concentração e estabilizar os efeitos radioativos em longa duração (ELETRO-NUCLEAR, 2020).

2.3.2 Combustível Irradiado

Quando um país se torna autossuficiente em uma parte do ciclo nuclear relacionada à produção de combustível que será usado nas centrais nucleares para a geração de energia, é muito importante ter uma atenção especial para a forma como armazenar este combustível após a sua utilização. Existem dois principais aspectos relacionado à combustíveis queimados: armazenagem do combustível nuclear queimado destinado ao reprocessamento e outro que é enviado para deposição final quando o sítio de deposição estiver definido, com o local correto, caracterizado tanto pelas definições técnicas quando licenciado (ROMANATO, 2005).

Segundo Romanato (2005) quando o combustível nuclear é removido do núcleo do reator, ele ainda está intensamente radioativo e gerando calor. A redução de calor ocorre quando ele é submetido à refrigeração em meios como a água, denominadas piscinas. O combustível nuclear queimado, ou irradiado segue o ciclo de resfriamento e tem a sua deposição final de forma segura ao meio ambiente. No entanto, não existe nenhum país no mundo onde seja possível depositar definitivamente o combustível nuclear queimado.

A prática mais comum do mundo é a armazenagem submersa em piscina com água, que são existentes nas instalações dos reatores comerciais, como é o caso do Brasil. O combustível deve ficar armazenado no mínimo um ano e depois pode ser transferido para instalações de armazenagem em via seca, também de forma temporária (ROMANATO, 2005).

Nos sistemas de armazenagem a seco, o combustível irradiado é transferido do sistema submerso para recipientes cilíndricos de metal. A água que pode ter ficado dentro do combustível é drenada e esse espaço é preenchido com um gás inerte e lacrado. Os cilindros que possuem paredes mais espessas podem ser colocados diretamente sobre um piso reforçado de concreto e os de parede mais fina colocados em cilindro de concreto

maiores ou abrigos especiais com blindagem à radiação (ROMANATO, 2005). Esse tipo de armazenagem, segundo a Comissão Nuclear de Regulamentação (NRC), é considerada segura por pelo menos 100 anos.

2.3.2.1 Armazenagem Via Úmida

A armazenagem por via úmida é a mais praticada e conhecida no mundo e a experiência em relação à segurança desse tipo de instalação é muito grande. Quando o combustível nuclear perde a eficiência energética desejada no reator, mas ainda radioativo e quente, ele é armazenado em piscinas com água, existente em cada reator, para decair durante um determinado período. Esse modelo pode ser visto na Figura (9), localizado na China. Para alguns reatores, como é o caso do LWR - Light Water Reactor, uma tonelada de combustível queimado de 600 MWe de potência, gera aproximadamente 2000 kW de calor de decaimento ao ser retirado e após um ano diminui para 10 kW e após 10 anos para 1kW, é o que afirma Romanato (2005).



Figura 9 – Armazenagem do combustível nuclear queimado em piscinas. Fonte: (ROMANATO, 2005).

2.3.2.2 Armazenagem Via Seca

Como o próprio nome diz, a armazenagem em via seca se difere da úmida pelo uso de um gás ou ar ao invés de um líquido refrigerante, sendo este gás frequentemente inerte como o hélio ou levemente reativo como o nitrogênio, a fim de evitar a oxidação do combustível que está armazenado. Outra característica é a blindagem contra radiação, feita através de grossas paredes de concreto, ferro fundido, aço ou combinações aço e chumbo. Lembrando que para utilizar essa opção de armazenagem, o combustível deve ser armazenado em piscinas com água anteriormente. (ROMANATO, 2005).

2.3.2.2.1 Armazenagem em Poços

Utilizado no predominantemente no Reino Unido, Canadá, França e já utilizado nos EUA, esse tipo de armazenamento atinge na superfície externa do cilindro de armazenamento 160°C , conforme IAEA (1983). O combustível queimado é guardado em um edifício de concreto com uma estrutura exterior que serve como barreira radiológica e no interior várias cavidades, no piso, para receber os elementos combustíveis. O calor é removido pelo ar por convecção com ar por circulação natural e forçada (ROMANATO, 2005). A Figura (10) ilustra um pouco melhor esse formato de atuação.

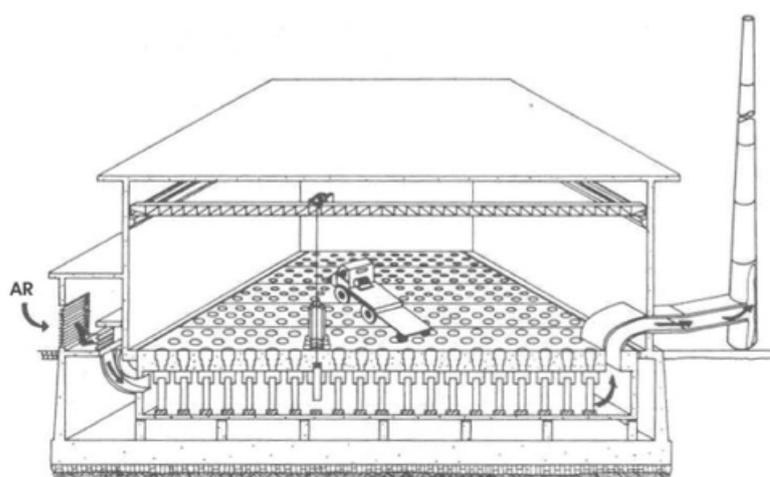


Figura 10 – Vista esquemática de uma instalação de combustível nuclear queimado em poços. Fonte: (ROMANATO, 2005).

2.3.2.3 Armazenagem em Silos

Nesse tipo de armazenagem, o combustível irradiado é guardado em tambores metálicos dentro um cilindro de concreto e pode ser visto na Figura (11). Como na armazenagem em poços, o concreto serve para blindagem contra à radiação. O calor é removido por convecção com o ar (ROMANATO, 2005).

O combustível nuclear queimado é colocado em cestos dentro de um cilindro e fechado, drenado, preenchido com gás inerte, e inserido dentro de um caso de transporte (ROMANATO, 2005).

2.3.2.4 Armazenagem em Cascos

Os cascos podem ser de dois tipos, metálicos ou de concreto. Ambos são introduzidos na piscina de combustível queimado de um reator PWR ou BWR, içados e tem a água drenada de seu interior. Após a secagem é feita a inserção do gás inerte, os cascos são vedados e transportados até o local de armazenagem.



Figura 11 – Instalação de silos verticais de concreto armado em instalações externas.
Fonte: (ROMANATO, 2005).

Em alguns países, esses cascos são submetidos a testes antes de terem seus projetos validados. Segundo Romanato (2005), esses cascos são submetidos a um rígido protocolo antes de serem aprovados para transporte. Procedimentos de testagem como de queda livre, queda sobre ponta perfurante, resistência ao fogo, imersão em água são promovidos a fim de garantir o máximo controle para o combustível nuclear queimado. Esse modelo de armazenagem é muito utilizado pelo EUA, Japão e Alemanha, e pode ser visto na Figura (11) (ROMANATO, 2005).

2.3.2.5 Armazenagem em Navios

A armazenagem em navios é uma alternativa de estocagem do combustível nuclear queimado, e é usada fortemente pela Rússia. A colocação do elemento combustível é considerada uma operação de alto risco, em função de criticalidade iminente em altos níveis de concentração, característica predominante ao modelo de enriquecimento da política nuclear do país.

2.3.3 Deposição Geológica

Esse tipo de estocagem é um outro tipo de alternativa aos tipos de rejeito de alta atividade e longa vida. Esse modelo é fundamentado a partir do isolamento proporcionado pela combinação de barreiras artificiais e naturais (argila, rocha, sal). A deposição geológica é realizada em depósitos profundos, que possui, geralmente, de 200 m a 1000 m de fundura, e tem seu princípio embasado nas formações geológicas estáveis. Um local de deposição geológica é vista na Figura (12), situada na Finlândia. Dos 43 países que atualmente utilizam esse tipo de fonte para geração de energia, 25 já determinaram o uso desse tipo de estocagem como solução para o condicionamento do lixo. Canadá, Finlândia, França e Suécia já tem esses planos em desenvolvimento ou andamento (ELETRONUCLEAR, 2016).



Figura 12 – Estrutura de túnel para repositório em deposição geológica na Finlândia.
Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2016).

2.3.4 Vantagens e Desvantagens dos Tipos de Armazenagem do Combustível Nuclear Queimado

Os modelos de estocagem do combustível nuclear queimado para tratamento são vastos e devem ser projetados de acordo com os anseios da política energética particular a cada país. Atualmente, as formas mais modernas encontram-se em disposição por via seca, e diversas centrais optam por esse tipo de armazenagem.

As instalações por via úmida apresentam maior grau de satisfação, uma vez que apresenta protocolos padronizados desde o momento de retirada do elemento combustível até a armazenagem para reprocessamento. A NEA (2020), constatou que durante 10 a 20 anos de armazenagem por esse meio, a corrosão foi diminuída, entretanto com o passar dos anos ela tende a aumentar pois o elemento encontra-se imerso em água à uma temperatura média de 40 °C, que favorece a corrosão. De maneira semelhante, outro problema que acontece nesse tipo de armazenagem ocorre no manuseio ou acontecimentos externos alheios ao plano de projeto.

Dentre os sistemas de armazenagem a seco, que tem vasta amplitude no seu processo de oferta, desses é destacado os silos, poços e cascos. Esse modelo de estocagem também garante blindagem da radiação proveniente do elemento queimado, com resfriamento passível, sem necessidade de um processo de resfriamento adjacente. Romanato (2005) coloca que outro ponto de destaque desse tipo de armazenagem cabe a mobilidade, e não particulariza com necessidade de execução de um projeto, viabilizando uma mudança rápida se for necessário. Como desvantagem, os processos de avaliação contínua de averiguação da integridade do elemento combustível não acontecem de maneira frequente, uma vez que após introduzido no involóculo e vedado não é possível a realização de inspeções visuais, sendo possível apenas com instrumentos específicos para esse tipo de análise.

Romanato (2005) apresenta nas Tabelas (2) e (3) algumas das principais vantagens e desvantagens existentes entre os processos de estocagem do combustível nuclear queimado por via úmida.

Tipo	Vantagens	Desvantagens
Piscinas	1. Inspeção 2. Remanejamento do combustível	1. Controle de impurezas, resfriamento e nível de H_2O 2. Corrosão
Modificação dos racks	1. Inspeção 2. Remanejamento do combustível 3. Maior espaço que nas piscinas	1. Controle de impurezas, resfriamento e nível de H_2O 2. Corrosão
Agrupamento de varetas	1. Maior espaço que nas piscinas	1. Controle de impurezas, resfriamento e nível de H_2O 2. Corrosão
Piscinas centralizadas	1. Mobilidade dos cascos	1. Controle de impurezas, resfriamento e nível de H_2O 2. Transporte

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens armazenagem via úmida. Fonte: (ROMANATO, 2005)

Tipo	Vantagem	Desvantagem
Silos	1. Não ocorrência de corrosão	1. Falta de inspeção 2. Resfriamento forçado
Casco Metálico	1. Não ocorrência de corrosão 2. Resfriamento passivo 3. Casco de transporte é o mesmo de armazenagem; 4. Mobilidade dos cascos	1. Falta de Inspeção
Casco de Concreto	1. Não ocorrência de corrosão 2. Resfriamento passivo 3. Casco de transporte é o mesmo de armazenagem; 4. Mobilidade dos cascos;	1. Falta de Inspeção
Poços	1. Não ocorrência de corrosão; 2. Resfriamento passivo;	1. Falta de Inspeção

Tabela 3 – Vantagens e desvantagens da armazenagem via seca. Fonte: (ROMANATO, 2005).

2.3.5 Panorama Mundial de Gestão do Combustível Nuclear Queimado

Os países veem o combustível nuclear queimado sob óticas distintas do ponto de vista de seu processamento. Alguns deles definem que esse produto deve ser armazenado

em repositórios de alta radiação, e outros como recurso energético a partir do reprocessamento e reutilização. Nesse contexto, duas estratégias são utilizadas para o processo de gerenciamento desse resíduos produzidos.

A primeira cabe a estocagem do combustível já manipulado dentro da central da usina, para futuro reprocessamento de modo a extrair os resquícios de combustível existente no material irradiado. Esse processo tem por finalidade produzir o MOX, um óxido misto de Urânio e Plutônio que é usado em usinas que trabalham com centrais preparadas para receber esse tipo de combustível (ABEN, 2016). Ainda segundo a ABEN (2016), nos últimos anos cerca de 33% da descarga mundial de combustível nuclear queimado tem sido submetida à ação de processos de reutilização.

A outra estratégia, considera o uso desse produto como rejeito e é armazenado primeiramente para que assim seja atribuído disposição final com base em seus níveis de decaimento. No entanto, a esses dois tipos de processos são aplicados de maneira preliminar a estocagem e depois repositórios intermediários para uso final (ABEN, 2016).

De acordo com ABEN (2016), os países que trabalham o processo de reprocessamento em suas centrais são China, Índia, Reino Unido, França, Japão e Rússia. E aqueles que armazenam, podendo reprocessar em momento futuro são Canadá, Finlândia e Suécia. Um mapeamento realizado pelo IAEA (2000) mostra que em 2010 mais de 330.000 ton de combustível nuclear queimado serão produzido em todo mundo, dos quais destacam-se a participação ativa dos países supracitados em função da produção bruta total e da participação direta na matriz de oferta a partir desse tipo de fonte.

A grande parte dos países ainda encontram-se em estágio de desenvolvimento tecnológico e não tem uma estratégia bem definida do que será executado, é o caso por exemplo dos Estados Unidos. Por esse motivo estão estocando esse combustível e progredindo seus estudos de desenvolvimento no manejo desse tipo de produto. A Tabela (4), mostra o *status quo* do programa de gestão de resíduos de cada país. Ela exprime o momento e a perspectiva futura de cada um deles quanto a resolução final ou não para esses tipos de materiais.

Os planos de concepção de repositórios encontram-se em desenvolvimento, e uma solução comercial final não é vista antes de 2020 à nenhum país, é o que aponta o estudo da ABEN (2016). O fato de o país não ter em definitivo seu repositório não impede que o tratamento de outros níveis de atividade não sejam operacionados. O que quer dizer que todos eles tem em pleno funcionamento as instalações para uso dos elementos combustível e de armazenagem de resíduos de baixo, intermediário ou alto nível de radiação.

País	Processamento	Armazenamento Intermediário	Combustível Irrradiado (toneladas métricas)	Data para Depósito Geológico
China	Reprocessamento	Não	1.532	2050
Suécia	Deposição direta	Sim	4.893	2022
França	Reprocessamento	Não	12.400	2025
EUA	Deposição direta	Não	62.400	Desconhecido
Suíça	Reprocessamento	Sim	1.040	2040
Japão	Reprocessamento	Não	12.585	2035
Reino Unido	Reprocessamento	Não	423	2025
Alemanha	Reprocessamento	Sim	12.788	2035
Coréia do Sul	Deposição direta	Sim	10.185	Desconhecido
Finlândia	Deposição direta	Não	1.684	2020
Canadá	Deposição direta	Não	40.054	2025
Espanha	Deposição direta	Sim	3.827	2020

Tabela 4 – Análise da gestão de resíduos por país. Adaptado de [Mariz \(2015\)](#).

2.3.6 As Entidades e Marcos Regulatórios na Gestão de Resíduos no Mundo

Com o avanço e o crescente uso a partir dos anos 70 da energia nuclear como fonte alternativa para geração de energia, a disposição e armazenamento dos rejeitos produzidos foi criando cada vez mais relevância, e pesquisas e estudos voltados para essa temática passaram a ganhar um nível de importância e necessidade que até o momento ainda não era tido. A partir disso, novos paradigmas foram sendo criados, uma vez que a prática mais comum até princípios da segunda guerra mundial era o alijamento desse tipo de material nos ambientes costeiros e mares por navios, oriundos dos processos inerentes as práticas de estudo promovidas pelos principais países que até o momento passavam a ter domínio e conhecimento desse tipo de geração. Foi no período então que surgiu o primeiro movimento de coleta de informações, reunindo 16 países com objetivo geral de entender os processos regulamentários individuais que formaram a discussão sobre as questões que envolviam essa temática. Coordenado sob tutela da AIEA, o encontro resultou no primeiro marco regulatório, sendo ele um documento de caráter técnico denominado “Aspectos Regulatórios de Disposição Subterrânea de Rejeitos Radioativos” ([BARROS, 2012](#)).

Com iminente avanço no desenvolvimento e uso da fonte nuclear, foi organizado pelo OCDE em 1987 um novo encontro, denominado de Diretrizes do Cairo, nele foram elaboradas as orientações aos países sobre o manuseio dos rejeitos. A convenção foi um momento importante no controle de rejeitos perigosos, pois nela foi estabelecido as primeiras bases sobre a sedimentação como forma de disposição para esse tipo de material. As bases estabelecidas pelas Diretrizes do Cairo nortearam ainda para uma outra discussão que até então era realizada de maneira desordenada e que oferecia riscos à saúde humana e comprometia a segurança do meio ambiente, a Convenção da Basiléia. Nesse

encontro foi criada regulamentação que mantinha controle seguro sobre os processos logísticos transfronteiriços que aconteciam até de maneira desordenada e sem regras de operação, desprovido de meios e tecnologias para correto manejo e transporte norteadas por princípios ecologicamente correto (FERREIRA, 2016). Porém, já naquele momento a convenção adotou como princípio não infringir a soberania dos países, adotando como base a liberdade jurídica de acordo com as necessidades e adequações individuais dos países.

Com a transgressão dos acontecimentos e os interesses conflituosos entre saciar as necessidades de controle de processos de uso e disposição do material contaminado em modelos de regulamentação *x* as políticas particulares de cada país, prevaleceu o poderio individual de cada nação. Nos dias atuais, a instituição que tem maior participação no tratamento dos resíduos nucleares é a AIEA. Por meio das Convenções Conjuntas Sobre a Segurança da Gestão do Combustível Usado e a Segurança da Gestão de Resíduos Radioativos, essas reuniões tem como objetivo “atingir e manter um alto nível de segurança dos resíduos radioativos e combustível gasto através da cooperação internacional” (FERREIRA, 2016). As convenções são reavaliadas dentro de um período máximo de 3 anos, e em relação ao combustível nuclear queimado apropriada que os Estados adotem medidas de responsabilidade a proteção dos seres humanos, sociedade e meio ambiente, sendo a criação e deliberação de leis como instrumento legal para fiscalização das atividades executadas.

A Convenção ainda levanta base para alguns questionamentos e preocupações sobre a implementação de repositórios geológicos. O fato é que os espaços destinados a implementação da estrutura devem zelar em todos os níveis de segurança necessários, sendo eles de construção, operação, manutenção, acondicionamento, monitoramento e inspeção, e não apenas na esfera de disposição e controle das cargas de combustíveis irradiados e resíduos nucleares produzidos. Para isso, é necessário que sejam estabelecidas as medidas de controle necessárias por normas e leis, e que evitem ações emergenciais de controle a potenciais impactos causados (FERREIRA, 2016).

Para Ferreira (2016), toda questão gira em torno do insulamento disciplinar, onde o autor coloca que apesar de existir uma movimentação que envolve os países geradores de energia nuclear, não existe um instrumento legal que é capaz de escalar a questão para um nível de diplomacia ‘nuclear’. Para ele, essas convenções “negligenciam” pelo fato da temática trazer objetivos militares e particulares dentro da política nuclear de cada Estado, e esquecendo dos potenciais impactos ambientais e riscos aos seres humanos e ambiente. A IAEA legitima apenas princípios que norteiam os processos de gestão de rejeitos radioativos, e são consolidados no documento “*Principles of Radioactive Waste Management*”, datado em 1997 (IAEA, 1997). Esse registro reúne os princípios básicos, necessários e aplicáveis a todos os países geradores de rejeito radioativo no mundo em tratando das questões associadas a rejeitos nucleares.

Atualmente o Brasil é membro signatário da Convenção Internacional para Gerenciamento Seguro de Rejeitos Radioativos e Combustível Usado. Esse acordo prevê que haja sobre o país uma auditoria periódica promovida por órgão internacional que assume responsabilidade sobre a questão, no caso a IAEA. Com isso, o país tem responsabilidade de envio de relatórios de desempenho referentes a sua autogestão de rejeitos, e que a partir daí tenha seus níveis sempre mantidos dentro dos padrões nacionais e internacionais que garantem proteção a todas as partes ([ELETRONUCLEAR, 2011](#)).

Parte II

3 OBJETIVO E ESCOPO

3.1 Objetivo Geral

O estudo desse trabalho tem como objetivo realizar um estudo de caso para Usina de Angra 2 de modo a identificar os principais processos e técnicas envolvidas no tratamento dos rejeitos produzidos na Usina, e a partir daí avaliar se os mesmos são aplicados de acordo com os requisitos mínimos estabelecidos em norma para o manejo e tratamento dessas cargas.

3.2 Objetivo Específico

- Caracterizar os principais rejeitos produzidos na Usina de Angra 2;
- Elucidar e apresentar o principal instrumento de regulação e controle para execução dos processos inerentes a gestão de rejeitos em Angra 2;
- Identificar os principais processos que compõe o gerenciamento de resíduos para Usina de Angra 2;
- Analisar os níveis de desempenho das atividades referentes a processos sobre responsabilidade da Eletronuclear, e a partir disso avaliar se são executados conforme previsto em regulação;

3.3 Metodologia

O trabalho foi desenvolvido a partir de um estudo exploratório e revisional de trabalhos com abordagem da temática em questão, com posterior estudo de caso particular a operação da Usina de Angra 2. Dessa maneira, a abordagem metodológica utilizada foi dividida em duas grandes etapas: contextualização a partir de revisão bibliográfica e coleta de informações a partir de uma entrevista com especialista da usina e posterior análise para discussão dos resultados obtidos no estudo de caso realizado.

A primeira parte abrange a caracterização em forma de referencial teórico criado a partir da revisão de estudos presentes na literatura sobre o tema em questão. A ideia é dar contexto ao conteúdo que será aprofundado durante o estudo particular que será realizado para a Usina de Angra 2. Assim, foram analisadas de maneira prévia tipos de fontes que pudessem fornecer informações e descritivos necessários e completos para a melhor caracterização do estudo desenvolvido nesse trabalho. Para isso, foram pesquisados

artigos científicos obtidos em importantes bases de dados como Scielo, Periódico CAPES, Google Acadêmico e ainda base da biblioteca da Universidade de Brasília. A escolha de palavras chave como "lixo radioativo, dejetos radioativos, rejeitos radioativos e resíduos radioativos", foi um dos critérios escolhidos para um maior apontamento em relevância dos trabalhos abordados para elaboração desse documento.

A segunda parte desse trabalho será realizada a partir de uma análise feita em estudo de caso para Usina de Angra 2. O estudo de caso tem como objetivo particularizar um determinado evento e com isso avalia-lo dentro de um processo sistemático. O método exploratório e investigativo tem como objetivo servir de base para novos estudos de modo a atestar a veracidade de uma determinada proposta. A realização de um estudo exploratório pode ajudar a responder algumas dificuldades de pesquisa. Os estudos particulares de casos podem ser divididos em três tipos: descritivo, exploratório ou analítico.

O estudo do tipo exploratório, como seu nome em significado já diz, busca uma aproximação entre o pesquisador e o conteúdo pesquisado, visto que esse ainda é pouco conhecido. É esperado que o pesquisador busque entender o contexto de trabalho, com objetivo a aprimorar suas ideias e com isso construir hipóteses para sua interpretação. O método descritivo visa complementar a análise, de maneira a tratar o assunto previamente conhecido, e com isso propiciar uma nova visão sobre a realidade já conhecida. Por fim, e não menos importante que os demais, o método de estudo analítico visa problematizar o objeto de estudo, de modo a propiciar avanços do conhecimento de determinada temática.

Assim, na primeira parte da elaboração desse estudo foi utilizado o método exploratório descritivo, de modo a aproximar e contextualizar o pesquisador a cerca da temática trabalhada, descrevendo os eventos e identificando características iminentes dentro dos processos analisados. Posteriormente, para a fase subsequente no desenvolvimento do TCC 2, será aplicado o método analítico uma vez que o propósito é mapear a experiências gerais, a fim de propor respostas para as questões particulares avaliadas. Para isso, será realizado uma entrevista como ferramenta de pesquisa analítica, com um responsável da Usina de Angra 2. O uso desse modelo irá servir como forma de validação para avaliação dos protocolos determinados em normativas, e com isso possibilitar a compreensão dos processos de execução para o tratamento do lixo nuclear decorrente dos processos de conversão na usina.

A entrevista a ser realizada tem por finalidade identificar as principais características que definem o processo de manejo do resíduo nuclear. Essa será do tipo semi-estruturada. Para (MANZINI, 1990), o cerne de uma entrevista do tipo semi-estruturada deve estar na estruturação de perguntas principais, e que sejam complementadas com outras questões inerentes às circunstâncias avaliadas. Ainda, para ele, esse modelo permite que o entrevistador faça emergir informações de maneira mais livre e de modo a evitar respostas padronizadas. De maneira a complementar, Trivinos (1987) define que uma entrevista

desse tipo permite que não somente um fenômeno seja descrito, mas também explicado e compreendido em sua totalidade. Em outro texto, [Manzini \(2004\)](#) coloca que é necessário que seja um roteiro prévio, sendo que esse é um recurso que o entrevistador se vale para seguir uma cronologia lógica no processo de interação com o entrevistado.

As perguntas são categorizadas em quatro diferentes tipos: a) perguntas denominadas consequências, b) perguntas avaliativas, c) questões hipotéticas, d) perguntas categorias ([TRIVINOS, 1987](#)). Esse trabalho irá trabalhar em predominância com perguntas avaliativas e de categoria, visto que seu objetivo final é de avaliação dos processos ocorrentes na usina.

Dessa maneira, para garantir que a concepção da entrevista seja um sucesso e que esse instrumento seja de extrema importância para avaliação, é necessário que a entrevista comece com perguntas básicas e de relevância para o objetivo do estudo, e que assim sejam explorados níveis de abrangência dentro do contexto, para que a partir daí seja "possível fazer uma análise de roteiro para identificar sua adequação em termos de linguagem, estrutura e sequência das perguntas no roteiro." ([MANZINI, 2004](#)).

A Tabela (3.3) a seguir apresenta o cronograma de atividades a serem desenvolvidos para conclusão do estudo.

Mês	Atividade
Janeiro	1. Estudo e pesquisa sobre tratamento de rejeitos na usina de Angra 2; 2. Estudo e pesquisa sobre estruturação de entrevista;
Fevereiro	1. Definição do entrevistado; 2. Estruturação do questionário a ser executado na entrevista; 3. Estudo de abrangência de contexto; 4. Desenvolvimento escrito do trabalho sobre rejeitos na usina de Angra 2;
Março	1. Aplicação da entrevista; 2. Descrição dos resultados obtidos na entrevista;
Abril	1. Conclusão do trabalho escrito; 2. Ajustes e defesa do estudo desenvolvido;

Tabela 5 – Cronograma de desenvolvimento do Trabalho de Conclusão 2. Fonte: Autor.

Parte III

ESTUDO DE CASO

4 COMPLEXO NUCLEAR DE ANGRA

Atualmente o Brasil conta com duas usinas nucleares em operação. Essas infraestruturas que formam o complexo da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto ficam localizadas na região de Angra dos Reis, estado do Rio de Janeiro. Uma terceira usina encontra-se em fase de construção, Angra 3.



Figura 13 – Em vista, Usinas de Angra 1 e Angra 2. Fonte: (MOREIRA, 2020).

Angra 1 e Angra 2 como são comumente conhecidas, as usinas são responsáveis por 3% da produção energética nacional. Ambas centrais são operacionadas com reator do tipo PWR, sendo que a primeira de tecnologia americana e a segunda de tecnologia alemã. Toda a energia gerada nessas centrais são alocadas para distribuidores no Brasil e fazem parte do SIN – Sistema Interligado Nacional. Essas interligações entre as usinas e o sistema elétrico é feita por linhas de transmissão em 500 KiloVolt (kV) para as subestações de Tijuco Preto (SP), São José (RJ) e Adrianópolis (RJ). Uma outra interligação em 138kV é utilizada para alimentar os sistemas das usinas, sendo vital para o seu funcionamento, e na falta dela, os geradores diesel de emergência das usinas são acionados automaticamente.

É de extrema importância ressaltar que a energia gerada pelas usinas nucleares no Brasil é responsável por atender à maior parte da carga do subsistema Sudoeste/Centro-Oeste e contribui para evitar congestionamentos nas interligações entre subsistemas. Segundo dados da ONS (2017) a operação de Angra 1 e 2 durante um mês corresponde a 0,9% da energia armazenável máxima do subsistema Sudoeste/Centro-Oeste e corresponde a um acréscimo anual de 10,3% da energia armazenável máxima deste subsistema.

4.1 Usina de Angra 2

Segunda usina nuclear brasileira, Angra 2 começou a ser construída em meados de 1981, mas teve sua construção interrompida em 1983 devido a uma crise econômica que o Brasil passava no momento. No entanto, somente em 2001 que começou a operar comercialmente.

Com 1.350 MWe de potência elétrica bruta e fruto de um acordo comercial entre Brasil e Alemanha, a usina conta com um reator Siemens/KWU. A transferência de tecnologia e o funcionamento em operação da usina, foi fonte para o desenvolvimento tecnológico próprio. Hoje o país tem domínio sobre grande parte dos processos que envolvem a formação do elemento combustível, possibilitando inclusive um avanço nos acordos comerciais com outros países a partir do compartilhamento de domínio tecnológico.

No Brasil, alguns órgãos são responsáveis pelo desenvolvimento da política nuclear energética. Entre eles estão Eletronuclear (subsidiária da Eletrobrás), CNEN, ANEEL, e alguns outros órgãos que atuam em áreas paralelas e necessárias ao funcionamento da usina. O organograma representado na Figura (14) ilustra os principais órgãos e instituições envolvidas e as respectivas atividades associadas. Essas atividades são promulgadas a partir de normativas institucionalizadas pelo órgãos que servem de base para processos de regulamentação, licenciamento, construção, operação e fiscalização. Isso prevê que os órgãos tem autonomia de atuação sobre quaisquer uma das frentes mencionadas, cabendo a ela o exercício do que está previsto em lei.

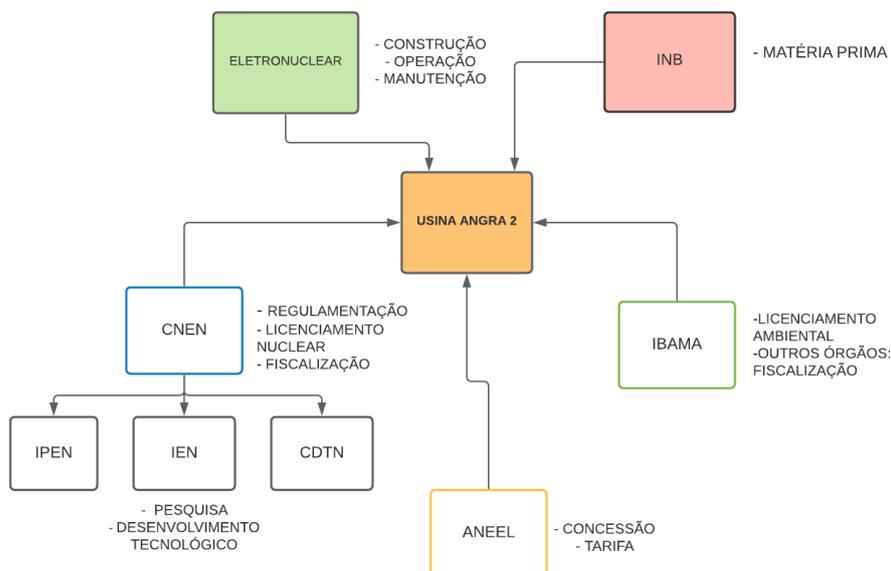


Figura 14 – Organograma com os principais órgãos envolvidos no desempenho de Angra 2. Fonte: Autor.

4.1.1 Rejeitos Radioativos em Angra 2

Conforme apresentado anteriormente, os resíduos radioativos são classificados a partir de níveis de referência determinados pela CNEN. Essas categorias atribuem ao rejeito um título em nível atividade, o que facilita nos processos de tratamento e manejo desse material. Para isso, classifica os tipos de rejeitos radioativos a partir de três categorias:

- Natureza da radiação emitida (rejeitos contendo emissores beta e/ou gama; rejeitos contendo emissores alfa);
- Concentração e taxa de exposição na superfície (baixo, médio ou alto nível de concentração);
- Estado físico (sólido, líquido ou gasoso);

As categorias detalhadas estão situadas no Anexo A presente nesse documento.

4.1.1.1 Principais Rejeitos em Angra 2

Anualmente a Usina de Angra 2 processa aproximadamente 11,5 toneladas de combustível “fresco”. Esse processo resulta na formação de frações mais leves, como Estrôncio-90, Prasêudímio-143, Zircônio-95, Césio-135. A incidência desses radionuclídeos permanecem presente em diversos materiais, que passam a ser tratados como rejeitos. Todos resíduos são produzidos normalmente durante operação da usina, com maior ênfase nas paradas para recarregamento ou manutenção (ELETRONUCLEAR, 2011). Os rejeitos produzidos são formados desde resíduos mais simples produzidos até o combustível nuclear queimado, que ainda permanece com alta quantidade de carga energética e radioativa (ARAUJO, 2013). Por essa razão esses resíduos gerados não podem ser integralmente ou totalmente tratados como “lixo”, uma vez que a maior quantidade de sua composição ainda permanece ativa e possui valor agregado para o reuso como fonte de geração. Os principais radioisótopos produzidos pela operação da usina são apresentados na Tabela 6.

Em Angra 2, os rejeitos produzidos na central são classificados em:

- Concentrado do Evaporador (CE);
- Resina do Primário (RP);
- Rejeito Compactado (RC);
- Rejeito Não Compactado (RNC);
- Combustível Nuclear Queimado (CNQ);

Radioisótopo	Meia Vida
Co-60	5,16 anos
Cs-137	30,17 anos
Fe-55	2,7 anos
H-3	2,323 anos
I-129	16.000.000 anos
Kr-85	10,72 anos
Sr-90	28,1 anos
Xe-133	5,25 dias

Tabela 6 – Principais radioisótopos gerados durante operação do reator. Fonte: (SILVA, 2006).

Os resíduos de baixa atividade são materiais utilizados em operação dentro da usina, que quando submetidos a incidência radioativa tornam-se rejeitos, como luvas, roupas, equipamentos e até mesmo pequenos utensílios como fita crepe. Esses materiais são classificados como de rejeito compactado, uma vez que a perspectiva é de que possam ser triturados e compactados para redução de volume. Mesmo os processos de descontaminação desses materiais geram efluentes que também são tratados como rejeitos.

Na central, materiais como peças, tubos e materiais metálicos que também submetidos à ação de radionuclídeos originam resíduos, são enquadrados como não compactáveis. Isso ocorre devido a propriedade de resistência e dureza que esses materiais possuem, dificultando sua compressibilidade.

Já os rejeitos de média atividade são elementos compositórios da usina, ou até mesmo instrumentos de controle e automação responsáveis pelo desempenho da central. Alguns exemplos são concentrado do evaporador, filtros e resinas de troca iônica de sistemas de purificação do reator e alguns efluentes líquidos. As resinas e filtros são elementos oriundos do sistema de purificação do refrigerante, sistema de purificação da piscina, do sistema de processamento de rejeitos líquidos e também do sistema de drenagem e ventagem dos equipamentos do edifício auxiliar. Um exemplo de produto gerado a partir de processos como este são resíduos produzidos ao longo do tratamento de água de resfriamento do reator. Em geral, o material ativado que permanece presente no material e que são coletados por resinas de troca iônica que ficam contaminadas, dando característica a este material como a de rejeito. De maneira similar ocorre com resíduos do concentrado do evaporador, uma vez que esses elementos compõem os sistemas de purificação e tratamento de efluentes na usina.

Por fim, o combustível irradiado é a parcela que apresenta alta carga de radionuclídeos presentes. A geração desse tipo de rejeito acontece quando o combustível utilizado é desmontado ou torna-se inexplorável (ELETRONUCLEAR, 2011). A Tabela 7 mostra a evolução da geração de resíduos radioativos produzidos em volume durante um período de

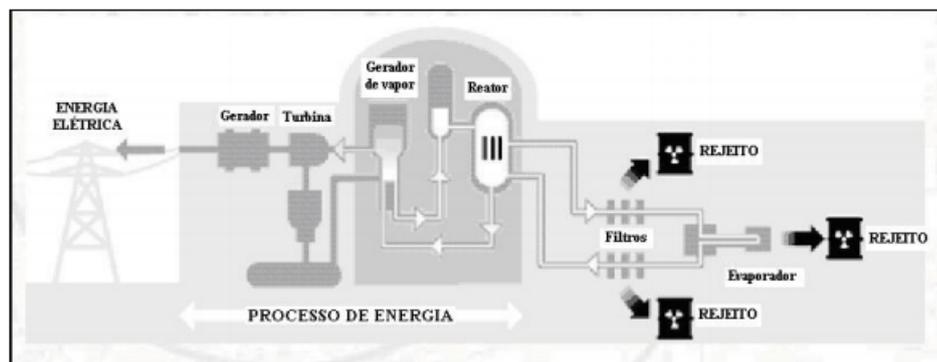


Figura 15 – Origem dos rejeitos de atividade intermediária na Usina de Angra 2. Fonte: (SILVA, 2006)

tempo. Desses, em um tempo de vida útil de 40 anos de operação contínua da usina, são esperados a produção de aproximadamente 1.000 m^3 de combustível irradiado, segundo dados da CNEN (2020). Mesmo correspondendo 99% de toda radioatividade da geração, os volumes relacionados e envolvidos por esse tipo de rejeito são pequenos (MOREIRA et al., 2006). Por sua vez, a Tabela (8) a seguir apresenta os níveis em massa e composição do combustível irradiado em Angra 2 após 3 anos de irradiação no reator. A partir dela é possível verificar que a maior parcela ainda permanece como combustível ativo que pode ser aproveitado em reuso ou reaproveitamento.

Volumes de rejeitos radioativos produzidos na CNAE em m ³				
2010	2011	2012	2013	2014
82,33	74,50	42,78	122,00	71,46

Tabela 7 – Evolução da produção de rejeitos radioativos produzidos de 2010 a 2014. Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2014)

Isótopo	Massa (kg)	Fração do total (%)
Urânio - 238	31.989	94,7
Urânio - 235	272	0,8
Plutônio	316	0,9
Produtos de fissão	804,3	2,4
Actínídeos menores	396,7	1,2
Massa total	33.778	100

Tabela 8 – Massas e níveis referentes de composição do combustível usado após 3 anos de irradiação no núcleo do reator em Angra 2. Fonte: (MOREIRA et al., 2006)

Das frações referentes ao processo de reciclagem, uma quantidade significativa de rejeitos de baixa e média são gerados contendo principalmente radionuclídeos e actínídeos (elementos transurânicos). Isso equivale aproximadamente de 3% a 5% de todo combustível

usado. Essa parcela é oriunda das atividades de trabalho e inerentes ao processamento propriamente dito, considerados produtos de fissão. Esses produtos são compostos complexos que variam de acordo com o processo de tratamento aplicado (MOREIRA et al., 2006). A Figura (15) ilustra as frações produto de um elemento combustível novo que possui em média 500 kg de urânio. Essa quantidade referência é a massa total que compõe um elemento urânio para um reator do tipo PWR como presente na Usina de Angra 2. Nela é possível ver que a maior fração produto pode ainda ser tratada como combustível, formada por dois compostos o UO_2 e PuO_2 (MOX). O restante é retratado como resíduo, formado pelos produtos de fissão, conforme explicado anteriormente.

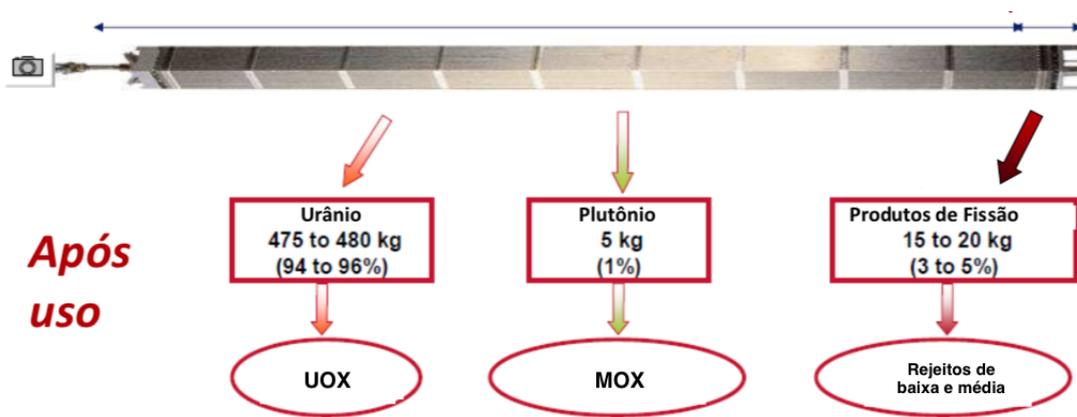


Figura 16 – Níveis em frações da composição de um elemento combustível após submetido a processamento em Angra 2. Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2014a).

Com isso, o urânio separado ainda tem valor energético e comercial para processamento, bem como o MOX que pode ser incorporado com combustível reprocessado. É estimado que do potencial total de energia inicial de urânio “fresco”, 30% pode ser reprocessado em reatores.

De uma maneira geral, diversos rejeitos são produzidos ao longo do processamento do combustível dentro da central. A Figura (17) ajuda a entender de uma maneira abrangente a composição de todos os principais tipos de rejeitos gerados na Usina de Angra 2, de acordo com as classes correspondentes para esse nicho do ciclo de geração nuclear.

4.1.2 Gestão de Rejeitos Radioativos

A gestão de rejeitos radioativos consiste no conjunto processos e de tecnologias utilizadas desde o momento da geração até a deposição. As etapas inerentes a esse processo ocorrem a partir de critérios de classificação do rejeito, estado físico, composição química e da estratégia adotada. Isso objetiva reduzir e minimizar os volumes e índices de radiação, e por isso os elementos são submetidos a processos como de identificação, seleção, empacotamento, transporte e deposição.

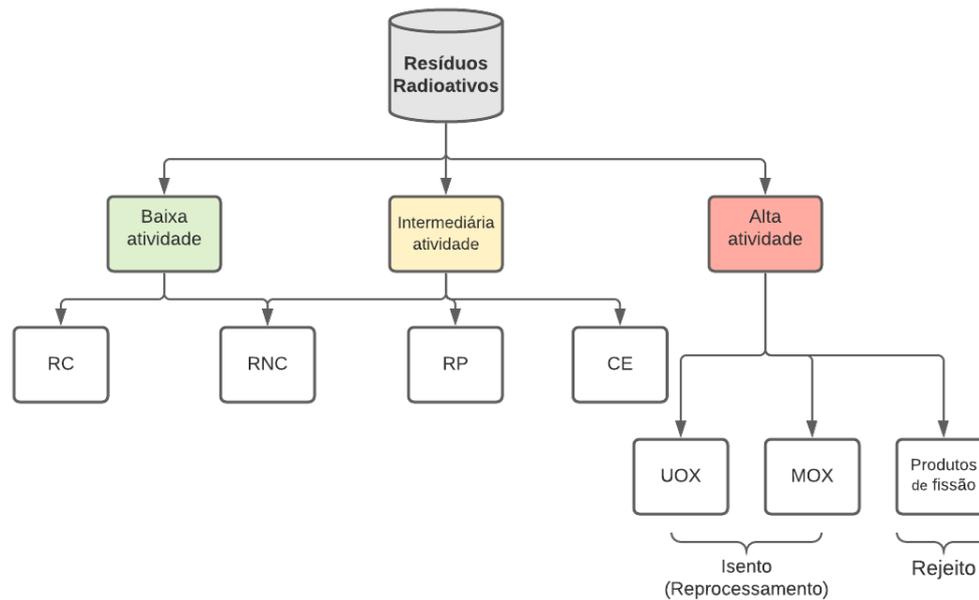


Figura 17 – Estrutura de origem dos rejeitos gerados em Angra 2. Fonte: Autor.

No Brasil, é de competência da CNEN a implantação da Política Nacional de Resíduos Radioativos, sendo cabido a ela atividades de planejamento, orientação, supervisão e fiscalização. [Moreira et al. \(2006\)](#) diz que o gerenciamento da segurança dos rejeitos radioativos é de interesse geral. Para os autores, esse processo deve ser estabelecido de maneira sistemática a partir de um severo protocolo regulatório a fim de garantir a integridade das pessoas e do meio ambiente. Essas atividades são promulgadas a partir de normativas institucionalizadas pelo órgãos, conforme visto na seção anterior desse estudo, que servem de base para processos de regulamentação, licenciamento das instalações e fiscalização. Isso prevê que o órgão tenha autonomia sobre qualquer uma das esferas mencionadas, cabendo a ela o exercício do que está previsto em lei.

A Gestão de Rejeitos é regida segundo normativas que definem etapas que vão desde como realizar a caracterização de uma fração até infraestrutura de instalação adequada para aquele tipo de rejeito. A partir desses instrumentos, o órgão tem controle sobre todo material radioativo gerado, ou seja, desde técnicas específicas associadas ao momento de coleta do material até a deposição do rejeito. Segundo ela, o processo de manejo dos rejeitos segue quatro princípios fundamentais: não geração, redução de volume, proteção do público e do ambiente e as responsabilidades com as gerações futuras ([FREIRE; TELLO, 2007](#)). Esses princípios gerais tem como base mitigar as ações radioativas iminentes dentro de cada fase. O fluxograma apresentado na Figura (18) ilustra os principais processos necessários para gestão dos resíduos radioativos.

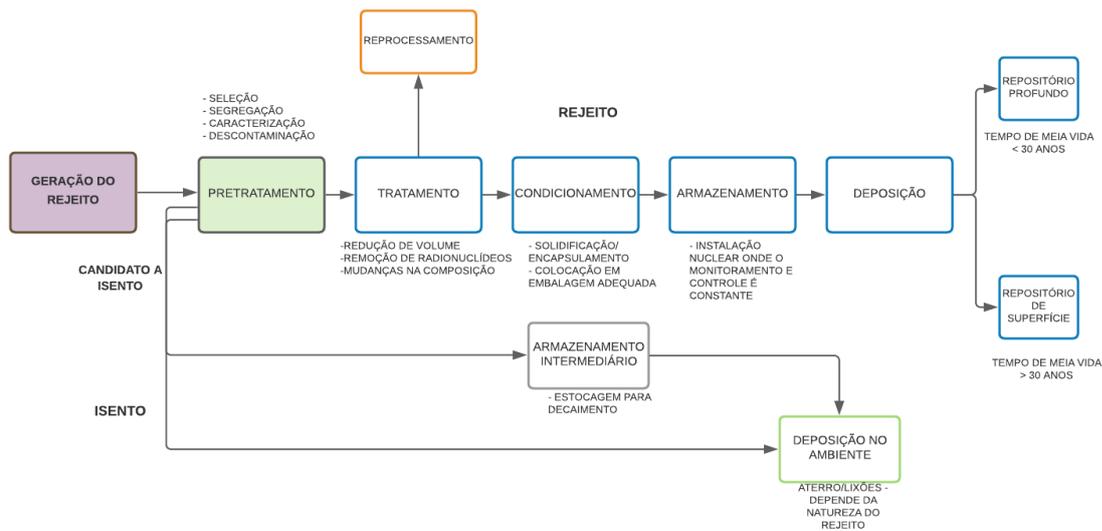


Figura 18 – Fluxograma dos principais processos inerentes a gestão de resíduos. Adaptado de (FREIRE; TELLO, 2007).

4.1.2.1 Leis e Diretrizes Regulatórias na Gestão de Resíduos Radioativos no Brasil

Em tratando de segurança, a importância de uma gestão de resíduos coerente e com êxito resguarda os interesses majoritários e é de interesse geral. A conduta deve ser feita com rigor, e interpelada de forma sistemática que garanta a segurança para indivíduo, sociedade e meio ambiente.

Dentro dessa conjuntura, e levando em consideração as três esferas que podem sofrer diretamente diversos tipos e níveis de impactos, a Constituição Federal de 1988 pelos artigos 21 e 177 conferem de maneira exclusiva o país como soberano na temática que envolve as atividades nucleares em seu território. Isso inclui todo e qualquer tipo de atividade, inclusive e primordialmente a geração a partir da operação de reatores nucleares. Os autores (MOREIRA et al., 2006) elucidam que como qualquer natureza de atividade, a nuclear também apresenta seu potencial em respeito a geração de resíduos. Nesse mesmo contexto ainda, os autores colocam que “a questão dos resíduos radioativos no Brasil está intimamente ligada às atividades do próprio governo federal na área nuclear”.

Em 20 de Novembro de 2001 a Lei 10.308 entra em vigor, e determina os procedimentos detalhados em relação a resíduos nucleares. A essa temática, as questões referentes a instalações nucleares, transporte e tratamento, proteção individual, ocupacional e ambiental contra radiações e outras questões que envolvem o compromisso em nível de segurança a riscos iminentes passam a ter critérios que deliberam ações de cunho regulatório para medidas de fiscalização e controle das práticas. Além de deliberar atuação ao órgão, a lei ainda outorga a atuação de órgãos “secundários” dentro das esferas estaduais e municipais de atividades licenciadoras e fiscalizadoras, como IBAMA e participação de

secretarias estaduais e municipais do meio ambiente, dando validação ao licenciamento, instalação e operação de depósitos iniciais, intermediários e finais como locais para deposição de rejeitos radioativos (MOREIRA et al., 2006).

A Lei define ainda que é de responsabilidade da geradora do rejeito a responsabilidade financeira a cerca de questões que envolvem a concepção, instalação, gestão, operação e proteção da manutenção física dos depósitos iniciais. No entanto, esse último certamente é deliberado a partir de uma cooperação entre Eletronuclear e CNEN (BARROS, 2012).

Em seu artigo 18 a Lei confere responsabilidade ao órgão de regulação e controle, o envio de relatórios de fiscalização com periodicidade anual sobre a situação dos depósitos de rejeitos radioativos (BARROS, 2012). É compreensível que as normas estabelecem as diretrizes mínimas necessárias para a execução da Política Nuclear, no entanto a lei delibera sobre as responsabilidades e atribuições em nível de obrigatoriedade para exercício de tais práticas.

Como o objetivo de estudo desse trabalho tem de avaliar os principais processos envolvidos no tratamento e deposição inicial de rejeitos em Angra 2, e nesse contexto sendo cabido a operação em nível de execução de processos referentes a essa questão, a Gerência de Rejeitos é regida segundo a normativa CNEN-NN-8.01 (CNEN, 2014). Essa norma teve sua primeira resolução publicada em Dezembro de 1985, como CNEN-NN-6.05. Com a mudança para novas diretrizes, e principalmente com o desenvolvimento e avanço tecnológico, a norma estabelece os requisitos mínimos para a gerência de rejeitos dentro da esfera de geração inicial a partir de sua Resolução CNEN 167/14 publicada em Maio de 2014. O tópico a seguir irá tratar de maneira particular quais as diretrizes e os principais requisitos estabelecidos pela norma.

4.1.2.2 Norma CNEN-NN-8.01 - Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação

Em concordância com a norma CNEN-NN-1.26 “Segurança em Usinas Nucleoelétricas”, que estabelece que os volumes e quantidades de rejeitos radioativos gerados devem ser a todo momento minimizados e controlados, de modo que os potenciais impactos associados a geração sejam mínimos ou inexistentes (CNEN, 1997). De sua disposição geral, a norma define “os critérios gerais e requisitos básicos de segurança e proteção radiológica relativos à gerência de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação, bem como rejeitos de meia-vida muito curta”(CNEN, 2014). Esse instrumento é aplicado exclusivamente à gerência de rejeitos das Classes 1 e 2 apresentadas anteriormente nesse estudo, e que pode ser visto na Tabela 1.

A normativa é concebida a partir de requisitos gerais, e que são definidos por artigos que compõem as seções. Ao todo são estabelecidos 9 seções que definem os requisitos

básicos para a gestão de rejeitos radioativos de baixa e média atividade. Para isso a norma estabelece um roteiro que deve ser seguido para determinação de um Plano de Gerência. As seções são tratadas em seus artigos de maneira sucinta e estipula os requisitos necessários para cada etapa desse programa, e é necessário que a organização operadora, no caso a Eletronuclear, indique os níveis de liberação de efluentes e rejeitos radioativos gerados bem como a determinação de técnicas e procedimentos de monitoramento e controle adotadas durante todo o processo. Os limites devem ser respeitados segundo os níveis de dispensa estabelecidos no Anexo II da norma.

Por si só, o Plano de Gerência é o documento que descreve todas as atividades que devem ser executadas para o correto uso desse tipo de material. Ele deve conter todo programa de gerenciamento de rejeitos, no qual devem ser incluídos o tratamento, acondicionamento, armazenamento inicial, transporte e deposição dos rejeitos. O uso não consiste apenas em reaplica-lo, mas sim em como dispor e depositar esse material com segurança. O diagrama presente na Figura (18) traz em modelo representativo de todos os processos e os procedimentos necessários a cada fase para elaboração desse plano gerencial.

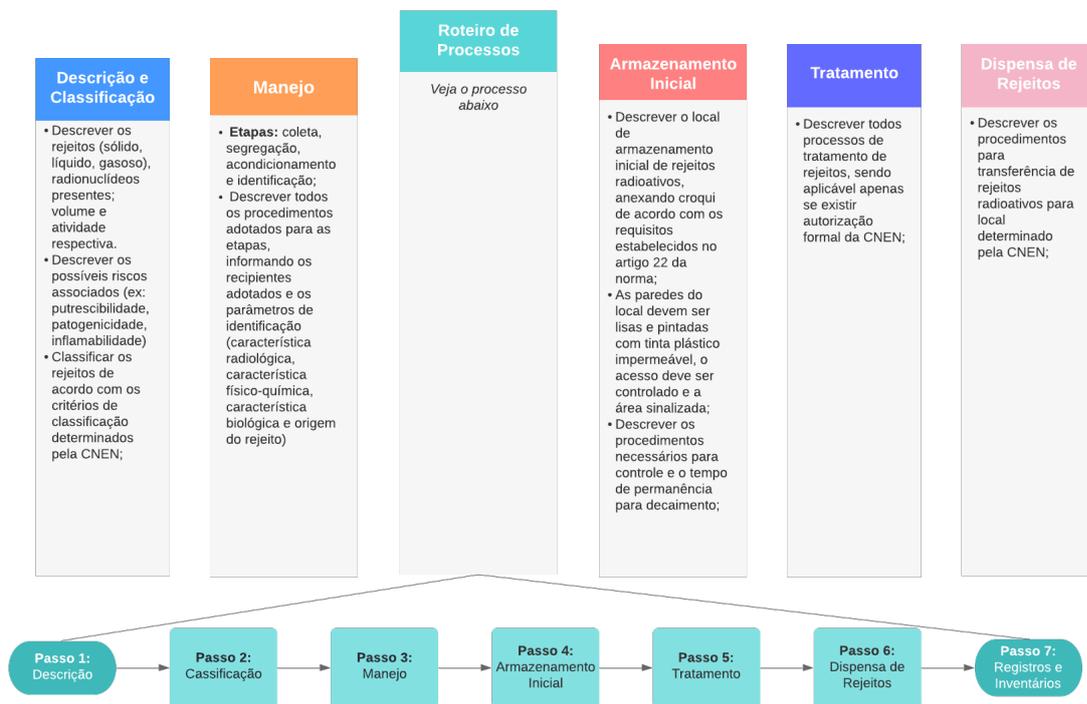


Figura 19 – Diagrama de processos necessários para concepção do Plano de Gerência. Fonte: Autor.

Todo roteiro de processos é caracterizado pelas seções presentes na norma. Elas

definem e determinam as condições para aplicação da atividade. Esse plano finda as bases para concepção do Programa de Gerenciamento de Rejeitos em Angra. Os registros e inventários devem ser mantidos pela Eletronuclear, e devem conter os dados sobre os rejeitos, localização dos volumes, origem e destino e transferências realizadas, precisando estar sempre em conformidade com as diretrizes estabelecidas.

Por fim, é determinado que a organização operadora envie à CNEN relatórios periódicos sobre a liberação e geração desses rejeitos.

4.1.3 Gerência de Rejeitos Radioativos na CNAAA

A Gestão de Rejeitos é uma das principais áreas que fornece embasamento para tese de desenvolvimento nuclear dentro da política nuclear de um país. É a partir dela que são estabelecidos fluxos e processos, sustentados por 4 pilares que abrangem desde o planejamento e controle até administração de governança e liderança para que sejam alcançados os objetivos de forma eficiente e eficaz. Para executar os requisitos necessários e definidos pela CNEN a nível de execução, imediatamente após a geração dos rejeitos, foi criada uma unidade dentro da organização operadora que fosse incumbida de realizar os primeiros, e imediatos processos na geração de rejeitos radioativos.

A partir disso, a Gerência de Rejeitos é a unidade responsável pelo tratamento, monitoramento e controle das atividades inerentes a cada tipo de processamento, visto que ocorrem de maneira distinta às duas centrais. Essa unidade é formada por departamentos que são responsáveis pelo acolhimento e recebimento das frações e execução dos primeiros processos que compõe o armazenamento inicial desses rejeitos. O fluxograma de processos a seguir apresenta as fases de execução e os agentes responsáveis por cada uma delas.

O diagrama indica a cadeia de fases que envolvem todo gerenciamento de rejeitos na CNAAA. Em um primeiro momento é possível identificar que Angra 1 e 2 apresentam locais distintitos de armazenamento primário. Isso acontece pois Angra 2 possui uma área especial que fica localizada no próprio subsolo da usina e que recebe esses materiais após tratamento. O Sistema de Armazenamento de Rejeitos (KPE) é a unidade responsável por receber esses rejeitos, e que possui monitoramento e controle constante. Essa etapa fica sob égide da Eletronuclear, e são realizadas periódicas atividades de fiscalização e regulação até que seja encaminhado a etapa de deposição final, ou de armazenamento final sob tutela da CNEN ([ELETRONUCLEAR, 2014b](#)).

Em tratando de efluentes radioativos, são adotadas metas anuais de descarte, de modo que sejam contabilizados mensalmente e comparado com a projeção anual determinada. Ou seja, o descarte desse tipo de rejeito obedece a critérios específicos que variam ano a ano. Esse controle é realizado separadamente da Usina, sendo realizado em uma

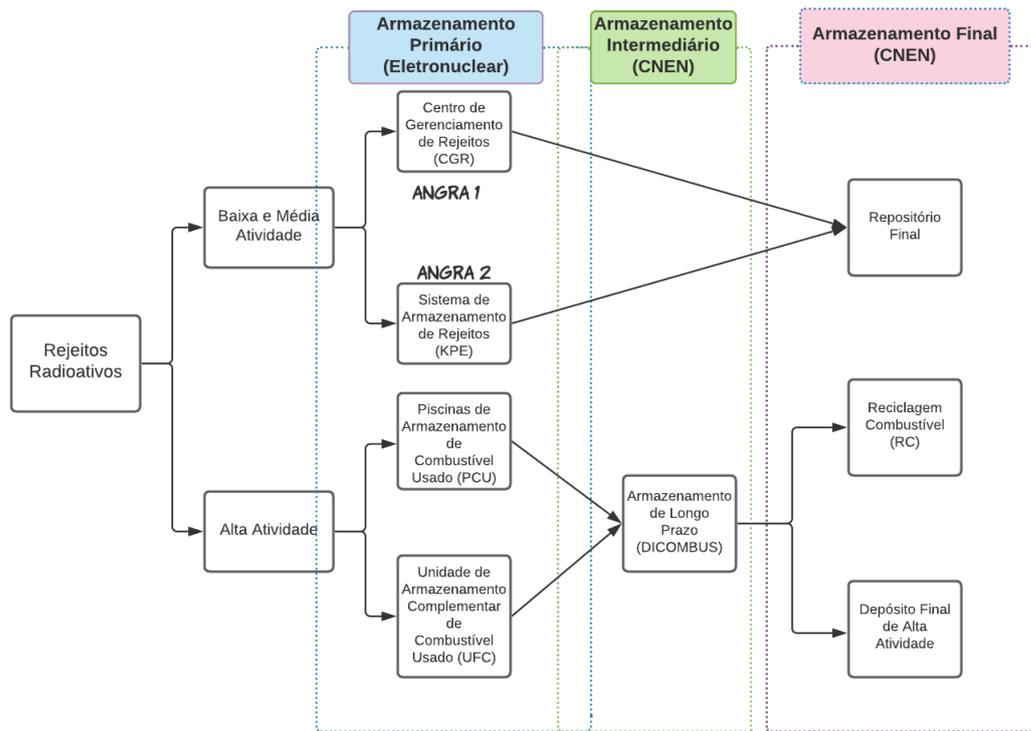


Figura 20 – Fases da cadeia de gestão de rejeitos na CNAA. Adaptado de: (ELETRONUCLEAR, 2014a).

unidade adjacente de tratamento de todos os efluentes gerados, o Sistema GN.

4.1.3.1 Etapas da Gestão de Rejeitos em Angra 2

Algumas características definem quais efeitos os rejeitos podem vir a causar, e como devem ser gerenciados. Como visto anteriormente, as categorias como estado físico, concentração de radionuclídeos e característica de radiação emitida são somadas ao período em que a radiação vai persistir (tempo de meia vida) e a geração ou não de calor residual. A caracterização consiste em determinar qualitativa e quantitativamente as propriedades físicas, químicas e biológicas. Nesse mesmo contexto, Silva (2006) coloca que o tempo de meia vida é o responsável por determinar por quanto tempo o rejeito que o contenha precisa ser gerenciado. Por sua vez, a concentração e os radionuclídeos que caracterizam o resíduo e o fato de haver ou não calor residual definem como os rejeitos deverão ser tratados, condicionados e a blindagem a ser aplicada para proteção contra radiação. Essas particularidades estabelecem a necessidade de uma estratégia que atenda as etapas anteriores a deposição com segurança, e por essa razão devem ser tratados, condicionados e armazenados em locais propícios para este fim até que seja determinado um local seguro para confinamento.

4.1.3.1.1 Rejeitos de Baixa e Média Radioatividade

Primeira etapa da cadeia de processos, a seleção consiste na separação entre os tipos de rejeitos produzidos. Nessa etapa são identificados resíduos de diversas naturezas, e a partir daí submetidos a processos elementares como de caracterização, segregação e descontaminação de modo a identificar os níveis de radioatividade presente. “A segregação pode ser baseada nas seguintes características” (SILVA, 2006):

- Radioativos e não radioativos;
- Compatibilidade de armazenamento para decaimento;
- Concentração e tipo de radionuclídeo presente;
- Forma física e química: rejeitos sólidos (compactável/não compactável);
- Rejeitos mistos contendo materiais perigosos (tóxicos, patogênicos);

De uma forma geral, esse pré tratamento tem como finalidade principal categorizar a partir da potencial incidência ou não de radionuclídeos. Uma vez isento, ou candidato a isento, esse material é submetido a processamento elementar com descontaminação, podendo ser armazenado, para que então tenha seu correto descarte ao meio ambiente (FREIRE; TELLO, 2007). No entanto, uma vez identificado a presença de elementos radioativos em níveis de carga de referência, esses rejeitos devem seguir um protocolo rígido de controle até sua disposição final.

Na usina, os rejeitos de baixa e média atividade são inicialmente descontaminados para reduzir seus níveis de atividade. Em seguida, submetidos a processo de acometimento, sendo preparado para o manejo. Essa etapa é uma das principais dentro da gestão, pois controla os riscos à saúde reduzindo a possibilidade de contaminação pela exposição, mantém a segregação por tipo de rejeito e ainda viabiliza a identificação com a rotulagem dos rejeitos (SILVA, 2006). O conjunto de todos esses processos é chamado de caracterização. Ela com o passar dos anos passou a ser um processo do tipo “*back-end-driven*”, é o que define Silva (2006). Ou seja, o processo é definido no qual os receptores dos rejeito e operadores de instalação de armazenamento definem qual extensão de caracterização. No caso de Angra, como a própria central é o receptor inicial desse rejeito, a mesma é responsável por todo processo de caracterização. Nela, o modelo de caracterização segue abordagem de uma amostra que representa aquele rejeito em sua totalidade. Isso acontece devido aos custos e também pela preservação da segurança frente a exposição das frações, no entanto um dos principais desafios é superar a heterogeneidade dos rejeitos, como luvas, roupas dentre outros resíduos. Para isso, podem ser aplicadas técnicas não destrutivas, como varredura gama segmentada, para identificação dessas composições. O

fluxograma presente na Figura (21) traz uma representação de um modelo estratégico que pode ser utilizado para caracterização de rejeitos radioativos em usinas nucleoeletricas.

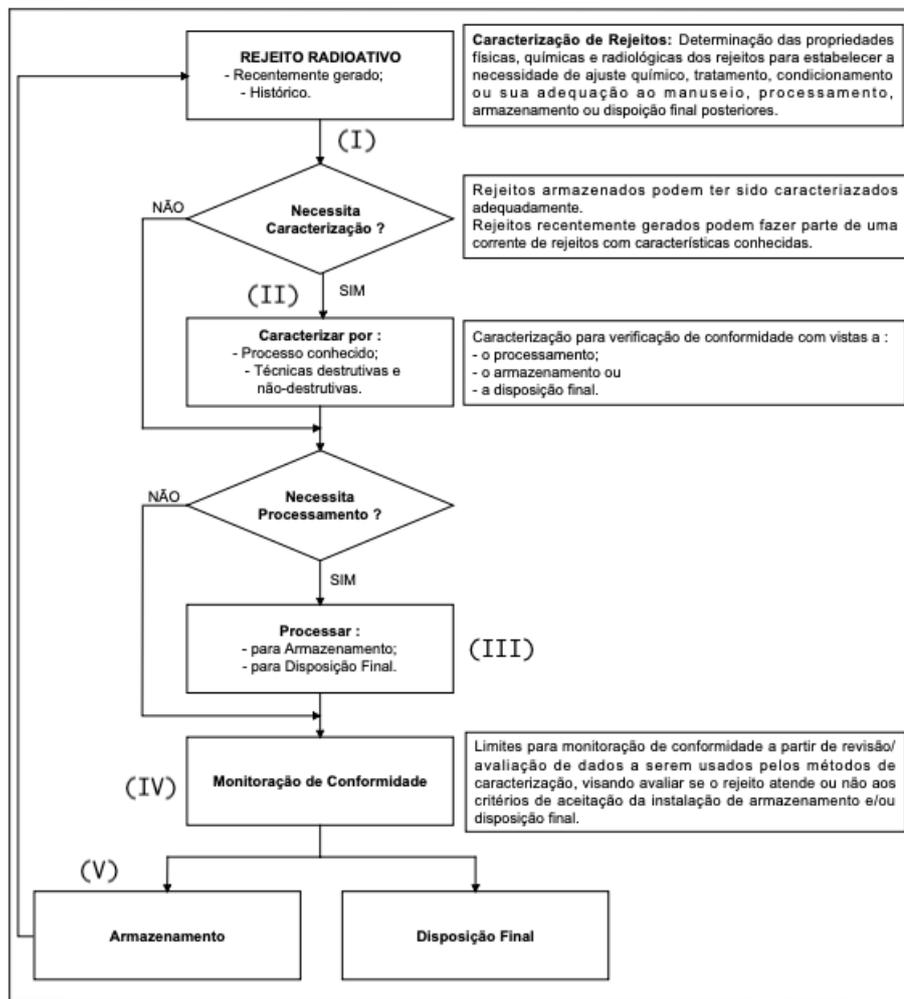


Figura 21 – Modelo de estratégia que pode ser aplicado à caracterização de rejeitos radioativos em Angra.

Uma etapa intermediária e essencial no ciclo de manejo das cargas é o tratamento. Nela, são aplicados processos físicos e químicos com objetivo de reduzir o volume dos rejeitos por aplicação de diversos métodos, como incineração, fragmentação de volumes dispositivos ou desmontagem de equipamentos. Essa etapa também tem como finalidade a remoção de radionuclídeos da massa dos rejeitos, e técnicas de evaporação e troca iônica são algumas atividades exercidas sobre rejeitos líquidos. De modo geral, o objetivo é alterar a propriedade desses resíduos. O próprio processo de compactação, é uma etapa de tratamento de rejeitos. A matriz apresentada na Figura (22) mostra alguns dos principais métodos utilizados no tratamento de rejeitos.

A análise mostra que os principais métodos aplicados em usinas nucleares são por tratamento mecânico e descontaminação para rejeitos sólidos. Já em tratando de rejeitos líquidos são aplicados técnicas como remoção de água, destruição térmica e química,

Categoria de rejeito	Tratamento antes da Imobilização																								
	Remoção de água					Destruição térmica & química					Ajuste químico					Tratamento mecânico					Descontaminação				
Origem ^(a)	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
Concentrados de Rejeitos Líquidos:																									
Lamas	X	X	X	X					X		X	X		X											
Resinas de T.I.*	X	X		X		X	X		X		X	X		X							X	X			
Concentrados	X	X	X	X					X		X	X		X											
Rejeitos Sólidos:																									
Combustível:																									
Sem alfa						X	X	X	X	X						X	X	X	X	X					
Contendo alfa							X	X	X								X	X	X						
Não combustível:																									
Sem alfa																X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Contendo alfa																	X	X	X						
Rejeitos Especiais:																									
Líquido orgânico		X	X	X	X	X	X	X	X	X				X											
Resíduo metálico de desmonte																	X		X			X		X	
Materiais irradiados																	X		X			X		X	
Rejeitos de descomissionamento	X	X	X	X												X	X	X	X		X	X	X	X	
Rejeitos contendo H-3 e C-14	X	X		X					X		X	X		X							X				

Figura 22 – Métodos de tratamento de rejeitos para fontes específicas. Fonte: (SILVA, 2006)

ajuste químico e ainda descontaminação. A aplicação de técnicas de destruição térmica ou incineração a rejeitos sólidos atinge os mais altos fatores de redução de volume e massa, é o que entende (SILVA, 2006). A autora ainda coloca que dentre as vantagens por esse tipo de aplicação está na desoxidação do resíduo e na recuperação da energia gerada. Por esse motivo, é primordial que sejam aplicados processos de qualidade assertivos de caracterização, uma vez que o reaproveitamento energético pode ser um ganho expressivo na gestão de rejeitos.

Apesar do Brasil não possuir incineradores licenciados, a compactação é a técnica amplamente utilizada para tratamento de rejeitos sólidos de baixa e média atividade, e o uso desse recurso é acompanhado para as atividades da indústria de geração nuclear. Por esse motivo, o modelo de caracterização deve ser realizado de acordo com o tipo de processamento e em relação à etapa seguinte. Como Angra 2 armazena esses rejeitos, a conformidade deve ser estabelecida com posterior processamento. Nesse processo alguns

materiais são triturados, fragmentados ou ainda desmontados por meio de uso de maçarico, serras, tesoura hidráulica e dispositivos de corte, como é o caso dos rejeitos oriundos de fontes seladas e em seguida compactados por meio de prensa hidráulica, de modo a reduzir seu volume, e a partir daí condicionados em recipientes próprios de maneira a estabilizar química e fisicamente durante tempo que for necessário, garantindo que não seja passada radiação (FREIRE; TELLO, 2007).

Em tratando de efluentes líquidos, “a evaporação é um processo bem estabelecido”, (SILVA, 2006). A técnica apresenta altos fatores de descontaminação e otimização dos níveis de volume. Entretanto, é uma atividade que apresenta alto custo, e que pode demandar etapas complementares como a reciclagem interna ou troca iônica. Essa última é um procedimento amplamente utilizado para remoção de radionuclídeos solúveis, e é realizada pela atividade de envolvimento de espécies iônicas entre o líquido e a matriz sólida aplicada. Os rejeitos líquidos radioativos devem seguir os critérios de eliminação determinados em norma a partir dos níveis de dispensa estabelecidos.

Como visto anteriormente, a Lei veda o recebimento de rejeitos líquidos e efluentes, e estabelece a formação do concentrado de rejeitos de característica individual, que devem ser solidificados. A solidificação é necessária para formação de produtos que atendam as necessidades de transporte, armazenamento e deposição. Esse processo visa atender 3 requisitos básicos: resistência mecânica, permeabilidade e estabilidade. Em Angra 2, os rejeitos são imobilizados e solidificados por betume (PEREIRA et al., 2015). A escolha por esse tipo de material se dá pelo fato do betume ser um termoplástico que amolece quando aquecido e solidifica quando resfriado podendo ser facilmente moldado mecanicamente; dentre as propriedades de maior destaque, o fato de ser inerte e apresentar boa resistência à lixiviação asseguram requisitos necessários para o encapsulamento dos resíduos (GUZELLA, 2010). Em geral, essas cargas são compactadas em tambores de 200 litros pois não podem ser liberados como resíduo industrial ou lixo comum.

A compactação é feita sob prensa mecânica, de aproximadamente 16 toneladas, que realiza a compactação dos rejeitos em forma de cápsulas pelos tambores de rejeitos. O Brasil vem atuando diretamente em pesquisas dentro da área, e diversos estudos vem sendo promovidos como fontes alternativas que visam otimizar os processos de qualidade e segurança no condicionamento desses rejeitos. Técnicas como a de supercompactação foram testadas e aprovadas, e não apontou nenhum tipo de variação de níveis de radiação em torno da área de armazenamento. As Figuras (23) e (24), ilustram como é empregada a técnica de supercompactação. Os rejeitos são condicionados nos tambores e em seguida submetidos a compressão total, onde são prensados e colocados em caixas metálicas, de modo a reduzir os volumes de uso das unidades. O processo pode ser visto pela Figura (23).

Atualmente existem cerca de 80 mil recipientes tambores de armazenamento de re-



Figura 23 – Aplicação do processo de compactação de rejeitos em Angra 2. Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2020).

jeito radioativo na CNAEA. Júnior (2019) coloca que há bastante risco associado a essas cargas, e por isso esses dispositivos de armazenamento são muito bem lacrados e vedados. Para ele, o risco é real, no entanto é calculado apenas no caso de intrusão, onde algum indivíduo ou espécie tenha contato com as fontes seladas. A exposição ocorre quando há algum contato à fonte puntiforme, ingestão ou inalação. Por esse motivo o autor dá ênfase na importância dos métodos de caracterização, para que seja evitado a todo custo revolver os conteúdos presentes nos tambores já identificados.



Figura 24 – Tambor prensado pela técnica de supercompactação. Fonte: (SANTOS; LIMA, 2007)

Os rejeitos não compactáveis, por sua vez, sofrem processo de imobilização particular. A compactação direta é realizada em materiais como tubos, peças e materiais metálicos em geral. A imobilização, nesse caso, ocorre com acometimento desses resíduos em recipientes metálicos de $1,248 m^3$ de volume, com preenchimento de pasta de cimento.

A identificação é a etapa seguinte que consiste no conjunto de medidas responsáveis por fornecer as informações e que asseguram o gerenciamento correto. “A adoção de



Figura 25 – Caixas que recebem os tambores após compressão e redução de volume. Fonte: (SANTOS; LIMA, 2007)



Figura 26 – Imobilização de rejeitos radioativos em cimento. Fonte: (COTA, 2014).

sistemas bem estruturados de identificação dos embalados e da manutenção dos registros, através da utilização de código de identificação único por embalado” garante controle administrativo mais direcionado, facilitando na tomada de decisão com relação as etapas seguintes e também no rastreamento desses rejeitos (SILVA, 2006). As demarcas sobre os rejeitos são feitas por meio de rótulos sobre os recipientes e devem estar sinalizados por símbolo internacional de presença radioativa, e com devida categorização. Um exemplo pode ser visto na Figura (27), ela ilustra um modelo de etiqueta que deve ser anexada junto aos tambores contendo todas as informações relevantes para registro desses rejeitos.

Em seguida, esses recipientes são encaminhados para armazenagem. O armazenamento inicial ou intermediário deve ser realizado conforme a norma CNEN-NN-8.01 (CNEN, 2014). Ela define os modelos de dispensa bem como as condições para o depósito de rejeitos. Desses requisitos, o local deve conter segurança necessária, dispondo de sistema de monitoração de área, ser sinalizado e com acesso restrito de técnicos e colaboradores autorizados.

O confinamento é estabelecido por um período de tempo específico para cada tipo

<p><u>CUIDADO!</u></p>  <p><u>REJEITO RADIOATIVO</u></p>	Nº de identificação:
	Sector gerador:
	Quantidade: Peso (kg) :
	Volume (l) :
	pH :
	Conteúdo/Composição Química:

	Principais radionuclídeos:

	Atividade(Bq): <input type="checkbox"/> Medida <input type="checkbox"/> Estimada
	ac B.y
	Taxa de exposição: (mR.h ⁻¹)
	ao contato: a 1m:
	Data de monitoração: ____/____/____
Resp. monitoração/SP:	
Data de recebimento: ____/____/____	
Resp. pelo recebimento/CT3:	
Observações	
.....	

Figura 27 – Exemplo rótulo de identificação de rejeito radioativo. Fonte: (SILVA, 2006).

de rejeito. No entanto, os rejeitos armazenados para decaimento devem ser separados de materiais radioativos para uso e de outros rejeitos que devem ser mantido a longo prazo e mantidos a distância de materiais perigosos, como inflamáveis, explosivos, oxidantes dentre outros (CNEN, 2014). Assim, o rejeito pode passar por diversos tipos de armazenagem até que seja estabelecida sua deposição final. Para rejeitos de baixa e média atividade, essa armazenagem inicial é feita dentro da CNAAA, em Itaorna, e tem caminhos distintos para Angra 1 a Angra 2 conforme apresentado anteriormente; a Eletronuclear atua constantemente em programas de controle e monitoramento sobre essas instalações, até que a CNEN determine um local para armazená-los definitivamente. A Tabela (9) apresenta os tipos de depósitos existentes e o agente responsável pelo licenciamento e operação desse tipo de infraestrutura.

O complexo da CNAAA conta com um Centro de Gerenciamento de Rejeitos. O propósito do funcionamento da unidade é de inventariar os rejeitos radioativos de baixa e média atividade gerados a partir dos processos de conversão dentro da usina, armazená-los e monitorá-los. O local conta com 3 depósitos e o centro de monitoramento de rejeitos, e é responsável por atender as demandas operacionais da Eletronuclear e dar atendimento as necessidades condicionais da CNEN (ELETRONUCLEAR, 2014). O centro tem total capacidade de abrigar e receber todos os resíduos dessa ordem gerados nas usinas, e que pode ser visto na Figura (28). Os locais de armazenamento são configurados em galpões com pé direito alto para receberem as cargas, que em geral são empilhadas em fileiras ao longo da instalação. Entretanto, Angra 2 emprega modelo distinto nessa estocagem

Tipo de Depósito	Agente Responsável	Local
Depósito iniciais	- Operador da usina; - Licença outorgada pela CNEN;	CNAA
Depósito intermediários	- CNEN; - Pode ser delegada a gestão a terceiros mas a CNEN continua como responsável;	CNAA
Depósitos finais	- CNEN; - Pode ser delegada a gestão a terceiros mas a CNEN continua como responsável;	Abadia De Goiás - GO
Depósitos provisórios	- CNEN;	

Tabela 9 – Tipos de depósitos e respectivos responsáveis pelos empreendimentos. Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2014)

inicial. A própria central conta com um Sistema de Armazenamento de Rejeitos, o KPE. O local no subsolo da usina e é responsável por receber as cápsulas de tonéis de rejeitos gerados pela central. Os rejeitos são abrigados e aguardam definição até a construção do Depósito Definitivo de Rejeitos.

No tangir as necessidades logísticas, a localização do CGR situada no próprio sítio da Usina favore os processos. Ainda mais quando o Sistema de Armazenamento fica na própria central. A segurança é angariada pelo projeto de configuração e embalagem das cargas, e preservada pela localização da unidade de controle e gestão.

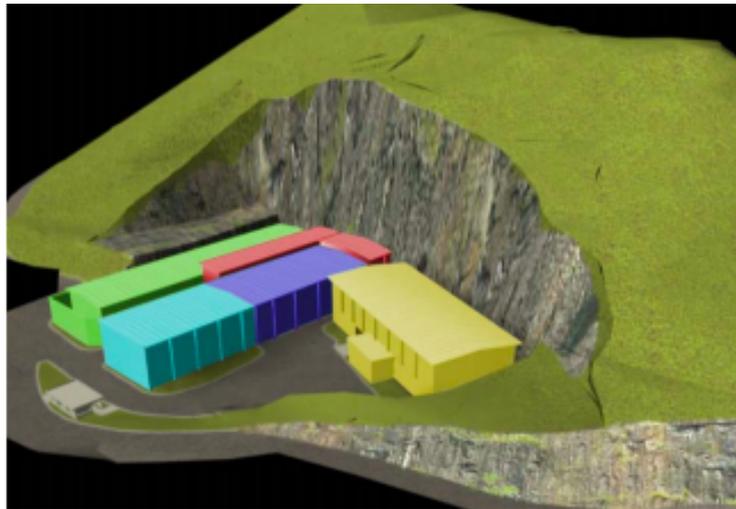


Figura 28 – Composição do Centro de Gerenciamento de Rejeitos. Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2014).

4.1.3.2 Inventários e Registros de Atividades de Controle de Rejeitos

Um vez determinada a estratégia de gerenciamento de rejeitos, o caminho seguinte é inventariar as informações em forma de armazenamento de dados. “Em todas as etapas



Figura 29 – Depósito Intermediário para acometimento de resíduo nuclear na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto. Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2020).

do gerenciamento, a documentação completa deve ser gerada e retida, contendo informações sobre as características e origem dos rejeitos, liberações realizadas, transferências, etc” (SILVA, 2006). Para todos os efeitos, é necessário assegurar a rastreabilidade dos rejeitos transferidos e criar e atualizar os inventários dos rejeitos. Um modelo de ficha onde são atualizados os dados das cargas encontra-se presente no Anexo desse trabalho. A CNEN estabelece que os locais onde são armazenados rejeitos, devem dispor de registros atualizados que (CNEN, 2014):

- Identificação e localização do rejeito;
- Origem e destino - em caso de transferências;
- Tipo de transferência - interna ou extena;
- Informações pertinentes a segurança;

Quando as cargas estiverem armazenadas para decaimento, deve ser estipulado o prazo necessário de retenção dos rejeitos e todos os registros devem ser mantidos na própria instalação sob tutela da unidade geradora, no caso a Eletronuclear (CNEN, 2014). A manutenção dos registros deve ser mantida pelo programa de qualidade da usina. O Anexo B traz um modelo representativo com os requisitos de preenchimento necessário para composição dos dados de inventário.

Em suma, o processo deve ser aplicado de modo a coletar as informações de etiquetas, guias, fichas e protocolos de modo a criar um banco de dados que armazenam essas informações. Em Angra 2, é cabido ao CGR as atividades de inventário. Um modelo representativo de ficha do inventário encontra-se presente no Anexo deste trabalho. As atualizações periódicas devem acontecer em períodos fechados de tempo, de modo que

mantenha sempre com as informações mais recentes e de modo a facilitar as oportunidades de recuperações e rastreabilidade dos rejeitos. A Figura (30) traz uma representação esquemática para armazenamento de dados referentes as cargas de rejeitos.

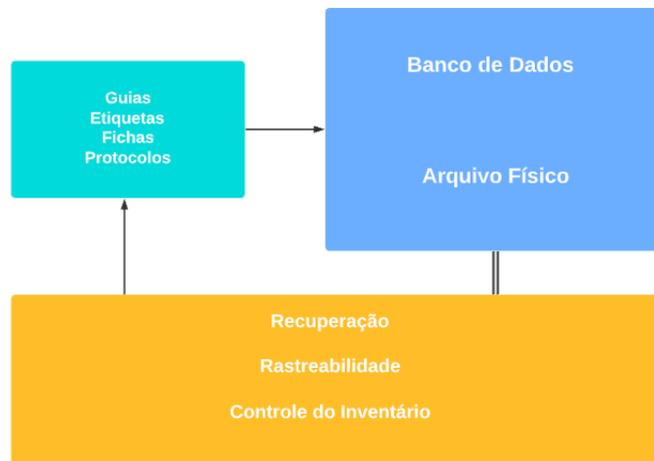


Figura 30 – Processos referentes ao inventário das cargas de rejeitos radioativos em Angra. Adaptado de (COTA, 2014)

4.1.3.3 Gestão e Controle de Elementos de Alta Atividade

Segundo o que foi apresentado no estudo desse trabalho, o combustível queimado é o produto resultante do processo de conversão que acontece dentro do núcleo do reator. A esse tipo de rejeito, cuidados e medidas de segurança devem ser seguidas com maior preocupação, já que alguns deles podem continuar radioativos por milhares de anos.

O caminho para esse material pode seguir duas vias: o reprocessamento ou necessidade de deposição final, com atribuição de remate em estruturas como repositórios de deposição geológica. Para Silva (2006), no Brasil não existe uma definição final sobre onde se encerra o ciclo de vida do combustível nuclear. Ou seja, se será submetido a reprocessamento para que sejam reutilizados dentro de reatores ou não. Dessa maneira, após retirado do núcleo do reator, esses elementos são encaminhados à piscinas de resfriamento, onde serão armazenados.

Essas piscinas são compostas por *racks* que sustentam as varetas de combustível processadas no núcleo do reator, e são responsáveis por mantê-las estabilizadas dentro dessa área. No interior delas, existem trocadores de calor que atuam na retirada do calor residual gerado. Acima desses elementos, existe uma vasta camada de água borada, que atua na blindagem. Essa prática, que acontece no mesmo local onde está situado o núcleo do reator, tem como objetivo o imediato controle sobre as emissões das cargas de radionuclídeos ainda presentes nesses elementos, e com isso garantir a segurança dos colaboradores que trabalham ao redor da piscina (ELETRONUCLEAR, 2020).



Figura 31 – Piscinas de armazenagem do combustível nuclear queimado em Angra 2.
Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2020).

A normativa CNEN-NE-5.02 CNEN (2003) define os requisitos específicos para a armazenagem do combustível irradiado. Uma vez necessário, são aplicados processos de monitoramento e avaliação constante, sendo de responsabilidade da Eletronuclear e CNEN para processos de controle a riscos iminentes desse tipo de rejeito. Algumas etapas necessárias para execução desses planos de controle são apresentados na Tabela 10.

4.1.3.3.1 Unidade de Armazenamento Complementar a Seco - UAS

Em Angra 2 as piscinas suprem a capacidade de armazenamento de combustível nuclear queimado gerado. Entretanto, até o final do funcionamento da usina, 2040, estima-se que sejam produzidas de 4 a 6 mil conjunto de varetas na Central Almirante Álvaro Alberto. Segundo Mariz (2015), esse motivo fomenta a necessidade de expansão das unidades de estocagem, e com isso sugere que seja implementado um empreendimento de instalação temporária para esse tipo de rejeito.

A partir desse contexto, e a necessidade ainda mais latente com a proximidade na conclusão das obras de Angra 3, a Eletronuclear está em processo de implantação de uma unidade de armazenamento complementar para o combustível nuclear queimado. O local ficará situada dentro do próprio sítio da usina, facilitando assim processos logísticos e de transporte desses rejeitos. Para esse local já foram realizados estudos de condições geológicas e geotécnicas bem como também meteorológicas e hidrológicas para avaliação das condições da área (ELETRONUCLEAR, 2020).

A unidade, que irá utilizar tecnologia de armazenagem a seco tem capacidade de abrigar até 480 combustíveis irradiados, e é segura e de fácil implantação. A proposta

Tipo de processo	Atividades relacionadas	Agente responsável
Blindagem	- Utilização de blindagem adequada em torno dos limites da piscina;	CNEN
Operação	- Controle de contaminação; - Nível da água da piscina abaixo de limite especificado; - A piscina deve ser dotada de iluminação adequada; - Deve ser utilizado água desmineralizada;	Eletronuclear
Sistema de Limpeza	- Manter a qualidade da água dentro dos limites definidos;	Eletronuclear
Sistema de resfriamento	- Os limites de temperatura devem ser estabelecidos a partir de condições diferentes, como operação e de acidente;	Eletronuclear
Infraestrutura	- Local adequado para ferramentas e equipamentos de manuseio do combustível; - Acomodação definitiva de equipamentos do núcleo que são manuseados em locais onde se tem combustível irradiado; - Capacidade adequada de armazenagem de elementos combustíveis irradiados, de modo a permitir decaimento radioativo suficiente antes do embarque para fora da usina; - Local reservado para armazenagem de elementos combustíveis danificados ou com vazamento;	Eletronuclear/ CNEN

Tabela 10 – Principais processos e atividade inerentes a armazenagem via úmida na Usina de Angra 2. Fonte: Autor.



Figura 32 – Local onde ficará situada a UAS no complexo da CNAAA. Fonte: (ELETRO-NUCLEAR, 2020).

com a construção dessa central de armazenamento é que após esgotamento das piscinas, o excedente gerado seja encaminhado para esse local (ELETRO-NUCLEAR, 2020).

A formação dessa central será composta a partir de sistema de armazenagem a seco do tipo “Canister”. Essa matriz de estocagem é modelada a partir de aço inoxidável, soldado e com capacidade de abrigar até 48 elementos combustíveis. “Sua função principal é confinar todo o material radioativo no seu interior, garantir a subcriticalidade (ou seja, manter os elementos combustíveis espaçados, para não provocar uma reação nuclear) e permitir a troca de calor com o meio externo” (ELETRONUCLEAR, 2020). Os módulos serão responsáveis por receber a estrutura do “Canister” e do casco de transferência, que abrigará os elementos e será responsável pela blindagem, estabilidade estrutural e proteção física (ELETRONUCLEAR, 2020).

A Figura (33) ilustra uma visão representativa de como será projetado essa unidade e os empreendimentos que a compõem. Já a Figura (34) mostra a fase atual de construção do empreendimento e dos módulos de armazenagem.

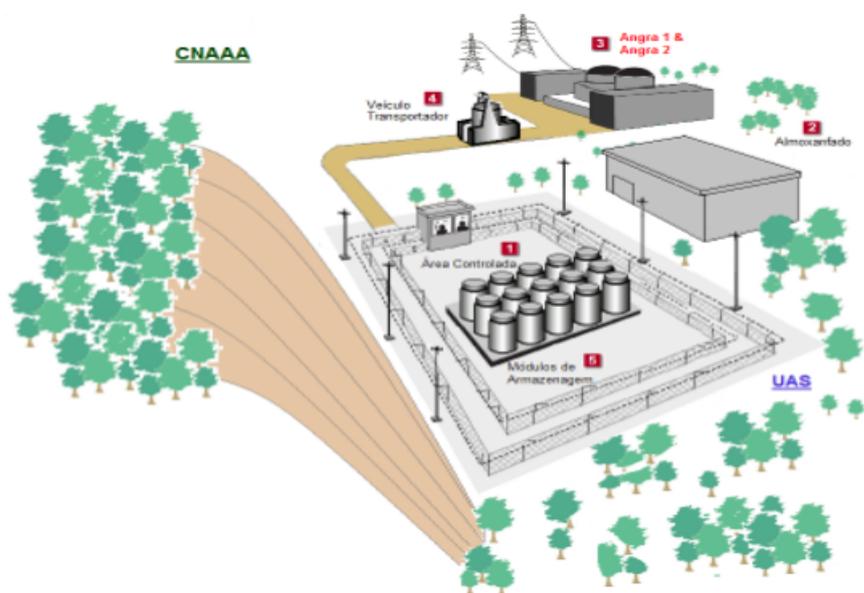


Figura 33 – Modelo esquemático da planta da Unidade de Armazenagem Complementar a Seco na CNAAA. Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2020).

4.1.4 Perspectivas e Desafios

Programas de desenvolvimento e concepção de repositório estão em avanço em todo mundo. No entanto, até hoje nenhum país sequer definiu uma estratégia de deposição final, mas isso não anula o fato de que alguns estão caminhando a passos largos em busca de maior desenvolvimento tecnológico para implementação dessas estratégias.

O fato é, o Brasil não foge essa regra e atualmente vem armazenando seus rejeitos e estudando maneiras de como dar fim ao seu lixo nuclear. Estudo realizado por Mariz (2015) aponta que nos 30 anos seguintes, projetos de novas usinas nucleares surgirão, com descomissionamento iminente das atuais em função do aumento de demanda energética



Figura 34 – A UAS em Angra encontra-se em fase final de construção. Fonte: (ENERGIA, 2020).

populacional. Nesse contexto, o autor diz ainda que poderão ser construídas mais duas usinas, uma na região Nordeste e outra na região Centro-Oeste, importantes polos econômicos industriais do país, o que torna a necessidade de discussão para implementação de políticas de desenvolvimento de planos de gestão de rejeitos ainda mais urgentes. As oportunidades são vastas, olhando para o cenário de condições favoráveis do Brasil perante os requisitos de implementação dessas estratégias. Porém em contramão a tudo isso, sua extensão territorial surge como um obstáculo a ser ultrapassado, visto que a operação em processos logísticos é um grande agente dificultador para o manejo desses materiais. A partir disso, e como solução imediata, o autor sugere então que cada unidade tenha seu local próprio de armazenamento, seja para reúso ou ainda para encaminhamento aos repositórios (MOREIRA, 2020), facilitando processos logísticos e garantindo a correta gestão em processos de controle desse tipo de material.

Os delírios causados por acidentes nucleares no mundo faz com que paralelos sobre as formas de manejo do combustível nuclear sejam pauta recorrente de questionamentos e insegurança popular. Acidentes envolvendo materiais radioativos, como do Césio-137 em Goiânia devem ser evitados a todo custo, e que a partir deles sejam estabelecidos protocolos transparentes e seguros sobre a “problemática” do “lixo nuclear”. Mesmo que várias propostas de projetos de armazenamento temporário vem sendo realizadas, o reúso do material radioativo é uma alternativa palpável, porém ainda muito embrionária para o contexto brasileiro, e com isso é de suma responsabilidade governamental que esses planos de ação sejam costurados de modo a criar planos alternativos frente aos convencionais modelo de gestão de resíduos já implementado.

4.2 Resultados Esperados

Toda questão que envolve rejeito nuclear não deve ser entendida como questionável ou dubitável, e sim como uma oportunidade de mostrar que é possível sim assumir total domínio sobre todo ciclo do processo de geração, do berço ao túmulo. Seja em respeito aos aspectos sociais, políticos econômicos ou ambientais, a manutenção de um sistema claro e integrado de gestão dos resíduos da continuidade e oportuniza o desenvolvimento tecnológico de geração alternativa de energia.

Sob essa ótica, a contextualização do momento nuclear do Brasil é importante, no entanto é preciso mostrar transparência de como todas essas ações são realizadas na prática, e elucidar, frente aos requisitos mínimos a serem seguidos, se essas de fato vem sendo executadas conforme previsto. Por esse motivo, a escolha por uma entrevista como ferramenta a ser utilizada do processo investigativo traz de uma maneira clara e simples a transmissão da informação entre o que é proposto, dentro da abordagem trabalhada, e o leitor. Assim, é então esperado que esse estudo seja capaz de identificar e transmitir de maneira simplificada como são atribuídas todas as atividades de operação a partir do ponto de vista de um colaborador da usina, e com isso , garantir que mesmo sendo um tema que envolve muitos questionamentos, os protocolos aplicados para esse tipo de material são realizados adequadamente e de forma controlada pelas instituições envolvidas, garantindo assim total segurança a todos os elementos envolvidos.

4.3 Resultados

Essa seção irá abordar os resultados coletados a partir de entrevista realizada com colaborador da Usina. As perguntas foram estabelecidas de modo a coletar a maior quantidade de informações e que fossem tangíveis as necessidades reais encontradas para concepção do estudo. Para isso, foram elaboradas perguntas que não somente abordassem de maneira mais abrangente a temática, mas também perguntas direcionadas e específicas que fossem capazes de atender os requisitos mapeados.

Em primeiro momento, fora estabelecido um cabeçalho introdutório com identificação do entrevistado, área de formação, qual tempo de exercício na usina e qual função(ões) ocupa ou já ocupou na mesma. Em momento seguinte, as perguntas aplicadas visam entender qual a relação do entrevistado com a temática e qual a visão particular o mesmo possui sobre o tema específico. A sequência das perguntas aplicadas, foram:

1. Considerando sua experiência e conhecimento sobre Energia Nuclear, qual seu ponto de vista acerca da temática, como um todo, que envolve rejeitos radioativos?
2. Quais são os principais rejeitos ou tipos de rejeitos radioativos gerados na Usina de Angra 2?

3. A Norma CNEN-NN-8.01 – “Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação” define como requisito necessário a concepção de um Plano de Gerência pela unidade geradora dessas cargas. Quais são as etapas estipuladas e realizadas no gerenciamento de rejeitos radioativos em Angra 2? E qual é unidade ou área responsável por realizar a concepção e execução desse plano de gerência?
4. Levando em consideração o avanço tecnológico e desenvolvimento da Engenharia Nuclear, e tendo em vista que o tratamento é uma das etapas primordiais para controle das cargas e de radionuclídeos presentes. Quais são as principais técnicas e procedimentos aplicados nessa etapa na Usina?
5. Muitos autores colocam que a utilização da nomenclatura “lixo nuclear” é erroneamente empregada; isso acontece devido ao fato da maior parte do material residual de processamento na central nuclear ainda possuir valor energético agregado. Esses autores ainda especulam que as piscinas de armazenamento conseguem suprir essas cargas até o ano de 2020. Em tratando dessa questão, como são aplicados os processos de tratamento à esse tipo de material na usina? E ainda nesse contexto, qual sua visão sobre a questão do reprocessamento desse material?
6. O risco é um fator que está associado a previsibilidade. Nesse sentido, existe algum fator de cálculo que prevê o risco de uma carga de rejeito em desuso?
7. A Normativa CNEN-NN-1.26 - “Segurança em Usinas Nucleoelétricas” define em suas seções os requisitos de operação de uma usina nuclear. Em uma dessas seções, estabelece que o Gerenciamento de Riscos é um processo que deve ser feito de modo a quantificar o risco de impacto total durante a operação da usina, considerando atividades referentes à modificações de projeto, gerenciamento de configurações de sistemas, planejamento de manutenção e testes periódicos e análise de eventos operacionais. O fato é, a operação da usina engloba também a geração de rejeitos radioativos; existe algum posicionamento da Eletronuclear para o controle dos riscos iminentes a esse processo? E em caso de não haver, existe algum parâmetro define e quantifique os impactos reais e totais causados por esse tipo de atividade dentro da usina?
8. Qual sua opinião sobre o investimento e subsídios destinados à gestão de rejeitos na Usina de Angra 2? E em caso de você ser um pesquisador, acha ser suficientemente bom os recursos destinados à pesquisas na área?
9. Tendo em vista as questões que envolvem rejeitos radioativos no Brasil e no mundo, a temática gera insegurança e muitos questionamentos. O objetivo do estudo desse trabalho é tentar dar maior transparência em tratando da geração e do controle desses materiais. Em uma escala de 0 a 10, qual valor você atribuiria a execução de todos os requisitos necessários para a gestão de rejeitos na Usina?

4.3.1 A Entrevista com Sandro Lima

Sandro Leonardo Nogueira de Lima é Supervisor de Proteção Radiológica, na área de Proteção Radiológica. Ele tem formação em Química, e possui 19 anos de exercício efetivo na Usina. O responsável já atuou em outras áreas como a de Gerenciamento de Rejeitos Radioativos, Proteção Respiratória e Calibração de Equipamentos de Monitoramento de Área.

A cerca da temática que envolve Energia Nuclear e a geração de rejeitos radioativos na Usina, o entrevistado acredita que a questão carece de uma solução definitiva para deposição, no entanto afirma que a indústria possui controle total sobre todas as cargas produzidas.

Segundo o ele, os principais tipos de rejeitos radioativos produzidos na Usina de Angra 2 são Rejeitos Compactados (RC), Rejeitos Não Compactáveis (RNC), Concentrado do Evaporador (CE), Resinas do Circuito Primário (RP) e Resinas do Circuito Secundário (RS) e Filtros (F). Essas são as cargas de baixa e média radiação, assim como também os Elementos Combustíveis, que por sua vez são classificados como rejeitos de média e alta atividade. Esses elementos podem ser submetidos a reprocessamento, prática que o Brasil não realiza no tratamento das cargas de rejeitos geradas. E a essas, técnicas de descontaminação, evaporação por concentração de radionuclídeos presentes em filtros e resinas são alguns dos principais métodos empregados para minimização dos rejeitos. Fato é que o entrevistado acredita que é de suma importância aplicação de técnicas como essa, uma vez que acredita que termos como “lixo nuclear” são inapropriados, pois muitos países reprocessam e reutilizam esse tipo de material. Mas que no entanto, não possui uma opinião bem definida sobre a questão, pois crê que isso depende de políticas de Estado.

Em tratando do controle das cargas geradas, o responsável afirma que a área responsável pelo Gerenciamento de Rejeitos é o Departamento de Proteção Radiológica (DPRO), e que essa unidade é encarregada de atender a norma desde a geração do rejeito até o armazenamento no depósito interno da Usina de Angra 2, ou ainda no Depósito de Rejeitos, instalação situada no sítio da Central, mas externa à Usina.

Acerca de questões mais específicas levantadas, como os riscos e sua previsibilidade para determinação de planos de mitigação a partir de eventuais ameaças a saúde e integridade humana e de ecossistemas, o entrevistado diz que não saberia informar se há um estudo de fator de risco associado a rejeitos radioativos, mas que todos os riscos são conhecidos e devidamente gerenciados. Para ele, todos os riscos de operações existentes são estudados e demonstrados no processo de licenciamento da atividade, e que por existir muitos setores dentro da Usina acredita que possivelmente exista algum setor que trabalhe diretamente mapeando e identificando os riscos iminentes dentro da cadeia do produto nuclear, mas que não é de seu conhecimento.

O entrevistado ainda define que a Usina é geradora de rejeitos radioativos desde seu projeto, ou seja, que é cabido à ela atividades operacionais referente ao correto manejo e armazenamento das cargas produzidas ao longo do processo. Por essa razão, os investimentos ficam restritos em atender demandas específicas nessa perspectiva. Com isso, a aplicação de verbas destinadas ao desenvolvimento de projetos e pesquisa são destinadas as frentes que tem atuação com esse viés, como Institutos e Centros de Pesquisa externos, que são: CDTN, IRD, COPPE.

Por fim, com respeito ao cerne da questão que envolve os questionamentos e a insegurança, o entrevistado atribuiu nota 8, em uma escala de 0 a 10 para atendimento aos requisitos necessários a correta operação e gestão dos rejeitos nucleares produzidos em Angra 2. Para ele, é fatídico o entendimento que a Instituição acerca dos riscos, e manipula essas cargas de maneira controlada e segura, mas crê que o desenvolvimento de estudos devem acontecer paralelamente ao desenvolvimento e domínio integral desse tipo de tecnologia, de modo a cada vez mais mitigar os possíveis riscos e ameaças inerentes a esse tipo de material.

4.3.2 A Entrevista com Rafael Chiaro

Rafael Silva Chiaro é Engenheiro Químico e colaborador efetivo da Usina há 10 anos. Atualmente atua na área de Gerenciamento de Rejeitos Radioativos e Transporte de Materiais Radioativos e tem função de Supervisor de Proteção Radiológica. O responsável já atuou em outras frentes de responsabilidade do Departamento de Proteção Radiológica, sendo atuante nos setores ocupacionais de Angra 1 e 2.

No primeiro momento, sobre a temática da Energia Nuclear e os rejeitos produzidos por esse tipo de atividade, o responsável crê que todo tipo de empreendimento energético, sendo ele de qualquer natureza gera impactos diversos. Em se tratando especificamente da indústria nuclear, as liberações ocorrem em níveis muito abaixo dos limites determinados, para todos os tipos de cargas (gasoso, líquido). Toda questão está envolva dos rejeitos sólidos, e todo estigma impulsiona um dos maiores mitos associados a esse tipo de geração. E isso acontece devido ao estigma social e a preocupação econômica sobre a necessidade em saber lidar om essas cargas por longo período de tempo.

O entrevistado define os rejeitos radioativos gerados em Angra 2, em cinco diferentes classes, são elas: Concentrado do Evaporador (CE), Resina do Primário (RP), Filtro (F), Rejeito Compactado (RC) e Rejeito Não Compactado (RNC). Ele explica que no Manual de Operação da Usina é definido o Plano de Gerência e suas etapas, e está sob égide da Área de Proteção Radiológica. Esse plano subdivide a área em três subáreas a partir do modelo de execução de suas atividades, e são elas: Área de Operação, Área Química e Área de Proteção Radiológica.

A Área de Operação é responsável pela requisição de materiais consumíveis como tambores, betume e outros e ainda é incumbida de realizar o acondicionamento desses rejeitos nos embalados. O transporte ainda é uma das atividades executadas por essa subdivisão, a qual também é responsável por manobras operacionais para funcionamento de sistemas concorrentes ao de processamento de rejeitos sólidos, em nível de transferência dos tambores ao KPE.

A Área Química é responsável por realizar as amostragens e garantir o controle de qualidade sobre a betumização dos rejeitos sólidos como a resina do primário e de concentrado do evaporador.

A Área de Proteção Radiológica tem responsabilidade sobre toda segregação dos rejeitos (quando aplicável), o gerenciamento e controle radiológico dos depósitos iniciais, KPE e CGR. É função da divisão contabilizar e controlar os embalados de rejeitos radioativos gerados; a execução, monitoramento e sinalização dos embalados, efetuando a inspeção visual desses que serão acondicionados nos depósitos iniciais; e ainda a execução da transferência dos embalados para o CGR, e nesse trato de transporte, a monitoração do veículo de transporte.

Acerca do tratamento das cargas de rejeitos produzidas, o entrevistado pontua que são aplicadas alguns métodos, envolvem técnicas específicas a cada tipo de rejeito. Algumas dessas técnicas são:

- Rejeitos sólidos: descontaminação por imersão em banho aquecido por agitador pneumático, descontaminação ultrassônica, descontaminação utilizando soluções químicas, descontaminação com jateamento de vapor de água ou de água com agente abrasivo;
- Efluentes gasosos: banco de filtros mecânicos, banco de filtros com carvão ativado, leitos de retardo, lavador de gases;
- Efluentes líquidos: leitos de resina de troca iônica, banco de filtros mecânicos e coluna desgaseificadora;

O armazenamento é um dos processos que mais apresenta singularidades, quando em tratando de nível macro toda cadeia. Por esse motivo, o entrevistado explicou que todos os rejeitos sólidos são acondicionados em embalados e transferidos para os depósitos que compõe os sistemas, ou seja, o CGR e o KPE. Para diferentes tipos de rejeito, aplicam-se diferentes formas de acondicionamento. Para o concentrado do evaporador, oriundo dos sistemas de purificação, há incorporação em betume dentro de tambores de 200 litros. Da mesma forma que acontece com os embalados de resina que são gerados a partir do encapsulamento do conteúdo do Tanque de Armazenamento de Resina Exaurida do

Primário, e dos filtros oriundos de todos os Sistemas de Purificação existentes na unidade; esses rejeitos são armazenados em unidades idênticas ao dos embalados do concentrado.

Por sua vez, os rejeitos compactados são materiais compressíveis e trituráveis, compactados por prensa hidráulica para minimização do volume, é o que explica o entrevistado. Ele exemplifica que materiais que compõem essa classe são objetos plásticos, papéis, luvas, sapatilhas e vestimentas, que mesmo depois de passarem por processos de descontaminação, ainda permanecem com limites acima dos adotados na CNAEA, e assim não podendo ser eliminados por vias comuns. O armazenamento desse tipo de rejeito acontece em tambores de 200 litros.

Os rejeitos não compactados são materiais não compressíveis, que em geral são formados por peças, tubos e materiais metálicos, que assim como os rejeitos compactáveis, são submetidos a processos de descontaminação e permanecem com seus níveis acentuados acima dos limites permitidos. Esse tipo de rejeito deve ser acondicionado em caixas metálicas de 1,248 m³ e imobilizadas com cimento comum. O entrevistado ainda explica que os RC e RNC são monitorados previamente em etapa anterior. Nessa etapa, as cargas são submetidas a processo de segregação, que tem como objetivo separar os materiais segundo suas características radiológicas e físicas, e avaliar a possibilidade de descontaminação para futura remoção da área contaminada como lixo comum, minimizando os volumes de geração do rejeito radioativo. O risco é um fator que está associado a previsibilidade. Sobre questões específicas que procuram entender como são monitorados os riscos que envolvem rejeitos radioativos na Usina, o entrevistado garante que a Eletronuclear em suas especificações técnicas não só prevê o controle de riscos a atividade, como atua especificamente em respeito ao gerenciamento dos rejeitos radioativos. O entrevistado explica que para todos os depósitos há um cálculo de incêndio que, dentre outras variáveis existentes, leva em consideração principalmente o conteúdo dos embalados e o tipo de matriz utilizada para incorporação dos rejeitos. E que também há inspeções visuais constantes que monitoram os níveis de degradação das estruturas metálicas que condicionam esses rejeitos.

O entrevistado ainda explica que há instruções e planos de operação segura dos sistemas de processamento e transferência das cargas de rejeitos. O CGR, que é considerada uma instalação radioativa. Para ele, os planos de execução e operação são rigorosos, e o CGR tem responsabilidade de emitir periodicamente um Relatório Final de Análise de Segurança e um Plano de Radioproteção. Em paralelo a isso, a CNEN realiza auditorias para inspecionar o cumprimento das diretrizes apresentadas nestes documentos.

À sombra de toda questão que envolve rejeitos nucleares, o combustível nuclear queimado abre precedente para o rito acerca do estigma causado pela continuidade da atividade nuclear dessas cargas. Sobre o assunto, o autor esclarece que esse composto é disposto na Piscina de Combustível Usado (PCU), localizado no Edifício do Reator

de Angra 2; e que a água ali presente é constantemente monitorada, sendo submetida a processos de purificação e refrigeração. No próprio edifício do reator, se concentra o Sistema de Purificação da Piscina de Elementos Combustível. Esse arranjo é responsável por desempenhar diversas funções como a remoção de impurezas sólidas da água, de modo a garantir a transparência, a manutenção da concentração de boro na água, que tem propriedade de blindagem da radiação residual que caracteriza esses elementos, e ainda a remoção dos produtos de ativação e fissão resultantes do processo de conversão; esse sistema tem como objetivo remover o calor de decaimento da piscina de elementos combustíveis em todas situações operacionais e de acidentes.

Devido os níveis de limites físicos da PCU, recentemente foi implementado uma unidade adjacente de Armazenamento Complementar de Combustível Irrradiado (UAS), é o que explica Rafael. O empreendimento, que tem armazenamento a seco, será responsável por abrigar não somente os elementos combustível de Angra 2, mas também de Angra 1. O projeto foi concebido a partir de canisteres de metal em aço inoxidável, com capacidade de armazenamento de até 37 elementos. A função principal dessas estruturas são de confinar o material radioativo, de forma a garantir a subcriticalidade - manter os elementos espaçados para não provocar uma reação nuclear) e permitir a troca de calor com o meio externo, por convecção natural.

Todas as práticas que concernem as atividades de processamento e transferência dos rejeitos somente são executadas após emissão de uma Licença de Trabalho Radiológico, é o que diz Rafael. Este documento estima o tempo de execução e a dose coletiva da atividade, de modo a garantir que o níveis de exposição estejam tão baixos quanto razoavelmente exequíveis.

Acerca da integridade dos ecossistemas e manutenção da preservação através de prática humana que exponha riscos a fauna, flora e ecossistema, o entrevistado informa que existe um Programa de Monitoração Ambiental Radiológico que é responsável por analisar amostras ambientais (solo, ar, água, peixes, vegetação) e no qual ocorre avaliação de kerma no ar, de modo a identificar a energia das partículas ionizantes carregadas e a partir daí, através de dosímetros termoluminescentes ocorre a medição das taxas de ambientais em pontos predeterminados.

A pesquisa procurou entender ainda como são aplicados e alocados recursos financeiros de apoio ao desenvolvimento de estudos que visam atender as necessidades reais da indústria nuclear. O entrevistado, que apesar de não ser pesquisador, define como satisfatório. Segundo ele, em 2018 a Eletronuclear recebeu uma missão da Agência Internacional de Energia Atômica, com enfoque na área de rejeitos radioativos, denominada Missão Ártemis. Nessa missão, a instituição foi condecorada, na qual a gestão de rejeitos da Usina de Angra 2 foi elogiada. Mas que apesar de entender que existe a disponibilidade de recursos, ainda crê que essa temática ainda é pouco explorada nos campos de pesquisa, e

que por isso, muitos assuntos permanecem sem resposta, ou indefinidos, como é o caso do tratamento do óleo contaminado, uma vez que não é possível incinerar como é realizado em outros países.

Por fim, a fim de identificar qual nota o entrevistado concede a execução dos requisitos necessários para a gestão de rejeitos na Usina, ele atribui, sem pestanejar, nota 10. À isso, define como aspecto determinante o fato da CNAAA ser rigorosamente auditada por instituições nacionais e internacionais, e que a gestão de rejeitos possui uma grande relevância dentro do contexto. Conforme detalhado em sua explicação anterior, periodicamente é avaliado o desempenho de execução dos requisitos necessários desde os treinamentos das equipes até a comprovação do atendimento dos parâmetros operacionais, e que são emitidos relatórios de rejeitos sólidos e liberações de efluentes à CNEN. Ainda, segundo o responsável, dados são fornecidos às organizações internacionais visando estabelecer estudos a partir de intercomparações entre usinas consignatárias, em vista a tratados e parcerias de cooperação ao desenvolvimento tecnológico; *'IAEA- CNS - Convention of Nuclear Safety'* é exemplo de um desses relatórios.

4.4 **Análise dos Resultados**

Todas as perguntas criadas para o levantamento dos dados foram costuradas de modo que permeassem pelos principais tópicos que envolvem a temática de rejeitos radioativos em Angra 2. Por esse motivo, a escolha por uma entrevista do tipo semi-estruturada foi essencial para não somente entender processos, procedimentos e técnicas implementados dentro do ambiente do único parque de geração nuclear que o Brasil possui, mas também como forma de colher os pontos de vista individuais de cada colaborador, como membro efetivo da usina.

O estudo foi direcionado a profissionais que atuassem na linha de frente em atividades operacionais de controle das cargas geradas, por esse motivo ambos os entrevistados faziam parte do Departamento de Proteção Radiológica, seção responsável por atuar no cumprimento da norma desde a geração do rejeito até a deposição inicial dentro do prédio do reator. Por serem habilitados para o desenvolvimento dessas atividades, as respostas trouxeram clareza no que tange a necessidade de respostas sobre os principais processos aplicados, e se os mesmo são executados conforme a normativa que define os requisitos mínimos e necessários para geração dos rejeitos. Essas respostas estiveram a todo instante bem alinhadas com toda abordagem teórica estudada e levantada no desenvolvimento do referencial teórico desse trabalho.

A partir dos resultados obtidos pela entrevista foi possível obter informações e dados com mais clareza sobre todas as questões envolvidas. Termos técnicos e específicos que pouco presentes estão na literatura foram empregados e definidos, e puderam contribuir

de modo a conhecer e definir parâmetros para análise de ambientes de monitoração. Nesse sentido, a aplicação da entrevista trouxe a relevância esperada para o desenvolvimento do estudo pois confrontou pontos de vista e foi crucial no apontamento dos principais instrumentos aplicados a gestão de rejeitos, as etapas e procedimentos envolvidos nos processos, os órgãos envolvidos, e a transparência das ações executadas para o controle das cargas geradas pela entidade de geradora.

Acerca das questões gerais sobre a energia nuclear, ambos entrevistados trouxeram seu ponto de vista atrelado ao principal estigma que envolve a geração de rejeitos. Esse ponto é findado na não solução final de deposição do material, e que apesar de toda incerteza tudo que é gerado é minusciosamente controlado, desde o berço até sua deposição controlada. Todos os riscos são previamente mapeados, em todas esferas. Por esse motivo, a segurança sobre as cargas é demasiadamente garantida. Assim, conforme apresentado de forma sistematizada em

É sabido que no Brasil, a morosidade de processos e o não apoio ao desenvolvimento a pesquisas é algo fatídico. Nesse sentido, não é o que acontece com estudos que abrangem o tema, mas sim a carência de estudos na área. Os investimentos existem e são suficientemente bons, olhando para o viés de desenvolvimento tecnológico. A Eletronuclear não é a insituição que está a frente de pesquisas associadas ao tratamento de cargas de rejeitos, mas seus colaboradores constantemente dão suporte no desenvolvimento de estudos como oportunidade de melhoria no âmbito do controle na geração das cargas de rejeitos.

Um estudo recente promovido pelo Serviço de Proteção Radiológica na CNAAA procurou entender, dentro de uma perspectiva histórica, como vinha sendo os níveis de exposição a radiação de trabalhadores ocupacionais (IOE) (ASSUNÇÃO; AMARANTE, 2019). Como o tratamento, monitoração e o transporte de rejeitos faz parte das atividades operacionais e gerenciais desempenhadas por parte desses IOE, o estudo em questão foi importante para entender o nível de segurança existente, em correlação com as cargas de rejeitos geradas. Os resultados chave, que compunham os níveis de radiação acumulada ao longo de 25 anos, tinham como objetivo verificar se os números identificados estavam dentro dos limites aceitos e esperados.

Nesse estudo, foram analisados cerca de 17 mil pessoas, entre colaboradores efetivos ou ex colaboradores que em algum momento tiveram contato com esse tipo de radiação. Anteriormente é necessário definir que a quantidade de radiação a qual uma pessoa é exposta, é chamado de dose. Essa fração nada mais do que a energia depositada no corpo humano pela radiação. O Órgão Regulador, pela norma CNEN NN 3.01, estabelece que a quantidade anual máxima de radiação para um indivíduo desse público seja de até 50 mSv (Sivert - no Sistema Internacional de medidas), desde que não seja superado uma média de 20 mSv em cinco anos consecutivos (ASSUNÇÃO; AMARANTE, 2019). Os resultados

obtidos podem ser observados na Figura (35) abaixo.

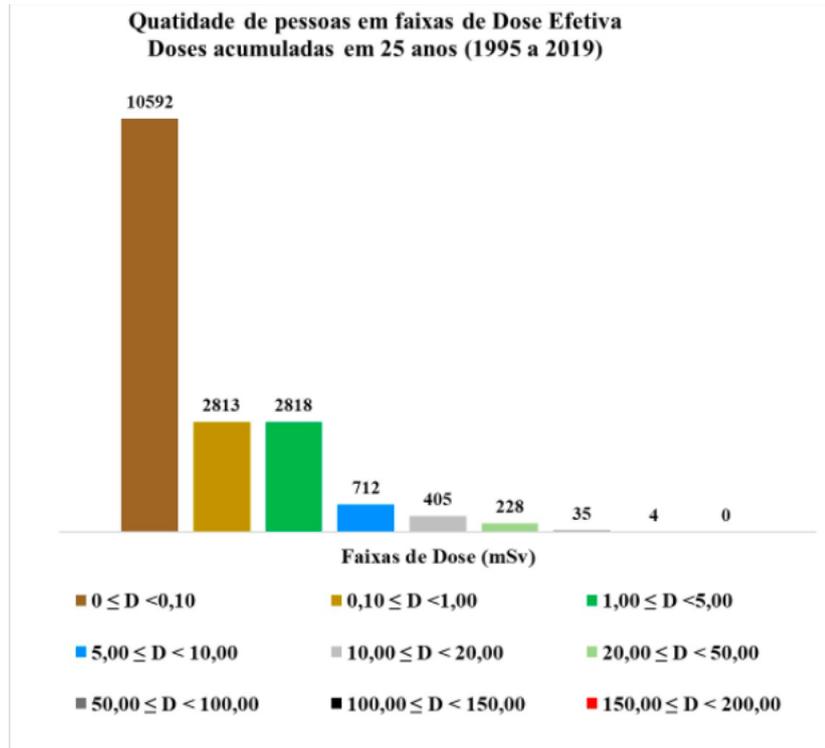


Figura 35 – Quantidade de pessoas e doses acumuladas em 25 anos na CNAAB (ASSUNÇÃO; AMARANTE, 2019).

Os números expressam que mais de 98% dos indivíduos avaliados apresentam níveis aquém dos valores limite determinados em norma, estando inclusive na faixa percentual de 20% dos valores limite de referência. Nessa ótica, é possível verificar que as concentrações em dose são extremamente baixas, uma vez que tem peso grande na faixa mais baixa de dose efetiva. O autor faz um comparativo com a exposição à radiação natural por um indivíduo, que tem média de dose efetiva anual de 2,4 mSv (radiação cósmica e terrestre, inalação e ingestão), e expressam valores bem satisfatórios, tendo aproximadamente 79% dos indivíduos com níveis abaixo desse índice.

A evidência do estudo em questão mostra que a performance dos resultados de geração para todos os níveis surpreendem. Esse fato se estende ao controle das cargas de rejeitos produzidas, e sobressalta os resultados obtidos a partir do ponto de vista de cada entrevistado. Assegurar a saúde dos colaboradores é uma das principais necessidades diante da toda temática; mas não somente isso, garantir o correto controle e manejo das cargas, monitoramento e a segurança de armazenagem diante dos desafios de mitigar à exposição, são bem claros. Conforme apresentado, é possível entender que todos os processos são minuciosamente trabalhados em seus detalhes e validam os requisitos necessários para os rejeitos radioativos em Angra 2. Com isso, é possível afirmar que a Eletronuclear consolida em um plano de gerência para o total controle dessas cargas, e ainda reenfatiza

seu compromisso com a segurança dos colaboradores e do meio ambiente.

Os resultados observados a partir da atribuição de uma nota geral por parte dos entrevistados, ratificam o desempenho da Usina no âmbito do tratamento de rejeitos. Como exemplo, o entrevistado Rafael trouxe à tona o evento em que a performance da usina foi condecorada diante de uma agremiação que integra os serviços de gerenciamento e manejo de combustível nuclear queimado, e rejeitos radioativos. A Missão ARTEMIS, consiste em um relatório emitido pela Agência Internacional e reverencia em seus relatórios o desempenho de boas práticas, atribuindo o suporte de segurança fundamental para condução dos planos de execução operados ([IAEA, 2021](#)).

Por último, foi analisado especificamente a contribuição de um terceiro colaborador, este da área de Dosimetria, para fazer frente e apresentar seu ponto de vista diante das atividades atribuídas a sua função, e com isso ressaltar a aplicação dos processos inerentes à atividade. Todos resultados notabilizaram conformidade. Para todos eles, a Usina é um ambiente seguro e que dá as condições necessárias para execução de suas atividades laborais. E que faz-se mais do que necessário a transparência para esclarecimento e conhecimento de como todos os processos e práticas são executados na Usina.

De maneira geral, os resultados exprimiram o ponto de vista realístico diante de todo estudo construído no desenvolvimento deste trabalho. Todos os entrevistados atribuíram nota máxima ou quase máxima para condução dos planos de gestão aplicados ao tratamento de rejeitos radioativos na Usina de Angra 2. E que diante de toda execução, as constantes auditorias pelo órgão nacional e internacional, conformidam o êxito esperado. A grande relevância é alcançada a partir dos rígidos parâmetros e aplicação de atividades necessárias para o cumprimento dos requisitos, que não é possível identificar em qualquer outro segmento da indústria. Essa comprovação é pertinente quando analisado os resultados de exposição, com baixos índices de dose alcançados, conforme visto anteriormente. Isso é fruto de um desempenho coletivo que é engajado desde o uso da tecnologia, com a aplicação de técnicas e métodos, até a conscientização de todos os colaboradores da Usina.

4.5 Conclusão

A temática que envolve rejeitos radioativos ainda é cercada de diversos questionamentos, principalmente por ser uma questão pouco abordada e explorada. E isso não é exclusivo ao Brasil; a grande maioria dos países que são geradores desse tipo de fonte, enfrentam desafios muitas vezes sem solução definitiva para o controle das cargas de rejeitos produzidas. Por esse motivo, o estudo de caso desenvolvido nesse trabalho deu oportunidade para que seja colocado essa temática em pauta, e que a partir dela fossem esclarecidos os principais pontos que envolvem os tipos de rejeitos gerados, os instrumen-

tos regulatórios que deliberam as bases normativas para o correto controle das cargas, os processos e principais técnicas envolvidas no desenvolvimento do plano de gestão de rejeitos pela unidade geradora. Essa visão promove nível de transparência esperado, e torna acessível a qualquer interessado o conhecimento sobre como é findado todo ciclo de geração, tratamento e controle dos rejeitos gerados em Angra 2.

O cerne de toda questão ainda está envolta na solução final para a deposição desses rejeitos. O país vem armazenando e estocando as cargas, mas ainda sem uma definição final como resposta para as questões. Essa indefinição acaba criando estigma, principalmente populacional, que conduz a uma forte desaprovação causada pelo desconhecimento. Nesse contexto, este trabalho deu o embasamento científico esperado para o assunto, e dentro do nível de clareza esperado, criou respostas e apresentou o posicionamento em opinião individual de colaboradores que atuam diretamente no desenvolvimento das atividades na Usina.

O Brasil, como país soberano, é responsável por toda sua geração e também pela necessidade de controle das cargas. Por essa questão, é preciso dar luz a temática, mostrando com clareza que a energia nuclear merece, uma posição como alternativa viável de geração energética, que corre paralelamente a outras fontes de geração, e que na perspectiva nacional ganha força pela abundância da matéria prima e domínio tecnológico na produção do elemento combustível. Sendo capaz de suprir demandas que sejam escaláveis para o desenvolvimento de diversos setores do país. Por isso, o trabalho abre também a oportunidade de incentivar o desenvolvimento científico, que por sua vez impulsiona o desenvolvimento tecnológico. Inclusive, um dos pontos de destaque notabilizados durante o desenvolvimento do estudo foi o engajamento dos entrevistados e o reconhecimento pelo entusiasmo de trazer à tona uma temática até então pouco estudada. Isso ficou notório pelo fato de que dos 3 participantes procurados, todos tiveram participação no desenvolvimento com apresentação do cenário, e respondendo as questões que foram concebidas para a consolidação dos objetivos apresentados.

Por fim, o “lixo nuclear”, como popularmente empregado, não é a denominação mais correta a ser adotada. É claro que o rito, e o desconhecimento, fazem com que assim seja chamado. Isso fica claro quando resíduos oriundos do processo de conversão, ainda possuem valor energético, e dentro do contexto apresentado sugere resoluções, ainda que sem resposta, para desenvolvimento de processos de reconversão, que atribui as cargas primariamente processadas outro valor energético, e embasa teses de sustentabilidade desse tipo de geração.

Referências

- ABEN. *Panorama da Energia Nuclear no Mundo*. 2016. Disponível em: <<http://www.aben.com.br/Arquivos/451/451.pdf>>. Acesso em: 01/12/2020. Citado 4 vezes nas páginas 13, 38, 39 e 45.
- ALMEIDA, A. L. A. et al. Energia nuclear: obtenção de energia e resíduos gerados. Universidade FUMEC, 2016. Citado 5 vezes nas páginas 15, 31, 32, 36 e 37.
- ARAÚJO, L. G. d. *Degradação da Resina de Troca Iônica Utilizando o Reagente de Fenton*. Dissertação (Mestrado) — IPEN, Rio Claro, São Paulo, Brasil, 2013. Citado na página 59.
- ASSUNÇÃO, H. S.; AMARANTE, J. W. Serviço de proteção radiológica na central almirante Álvaro alberto - cnaaa: uma perspectiva histórica. Rio de Janeiro, Brasil, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 14, 91 e 92.
- BARROS, D. F. de. *Estudo Comparativo da Evolução da Legislação Internacional e Brasileira sobre Repositórios Geológicos de Rejeitos Radioativos*. Dissertação (Mestrado) — UNESP, Rio Claro, São Paulo, Brasil, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 65.
- BONES, A. U.; SCHIRMER, P.; CEOLIN, C. O papel da energia nuclear na matriz energética brasileira: aspectos socioeconômicos e ambientais. Universidade Federal de Santa Maria, 2017. Citado na página 23.
- CARDOSO, E. d. M. *Energia Nuclear*. Rio de Janeiro: Comissão Nacional de Energia Nuclear, 20–? 29 p. Citado 3 vezes nas páginas 13, 31 e 32.
- CNEN. *CNEN-NE-6.05*. [S.l.], 1985. Disponível em: <http://www.plataformarss.com.br/imagens/banco/grupo_pdf_COD-394604210_arquivo.pdf>. Citado na página 101.
- CNEN. *Comissão Nacional de Energia Nuclear*. 2020. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/>>. Acesso em: 05/04/2020. Citado 3 vezes nas páginas 35, 36 e 61.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *CNEN-NN-1.26*: Segurança em usinas nucleoeletricas. Rio de Janeiro, 1997. 18 p. Citado na página 65.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *CNEN-NE-5.02*: Transporte, recebimento, armazenagem e manuseio de elementos combustíveis de usinas nucleoeletricas. Rio de Janeiro, 2003. 24 p. Citado na página 79.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *CNEN-NN-8.01*: Gerência de rejeitos radioativo de baixo e médio nível de radiação. Rio de Janeiro, 2014. 45 p. Citado 6 vezes nas páginas 14, 65, 74, 75, 77 e 103.
- COSTA, D. R. *Produção de pastilhas combustíveis cerâmicas combustíveis de UO₂ dopadas para aplicação nuclear*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Candido Mendes, Rio de Janeiro, Brasil, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 13, 27 e 30.
- COTA, S. *Gerência de Rejeitos Radioativos*. [S.l.: s.n.], 2014. Citado 3 vezes nas páginas 14, 74 e 78.

- CRUZ, d. W. A. *Monitoramento e Diagnóstico em Usinas Nucleares PWR Utilizando Análise Exérgica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais, Brasil, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.
- DAU, C. G. M. *Energia nuclear: segurança e rejeitos radioativos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Candido Mendes, Rio de Janeiro, Brasil, 2009. Citado na página 29.
- EDUCACIONAL. *Falando de ciência. Energia Nuclear*. 2020. Disponível em: <http://www.educacional.com.br/reportagens/pc_energianuclear/partes-01.asp>. Acesso em: 10/04/2020. Citado 3 vezes nas páginas 13, 33 e 34.
- ELETRONUCLEAR. *Critérios de Segurança adotados para Usinas Nucleares de Angra 1, Angra 2 e Angra 3*. [S.l.: s.n.], 2011. Citado 3 vezes nas páginas 48, 59 e 60.
- ELETRONUCLEAR. *O Gerenciamento de Resíduos Radioativos na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014. Citado 3 vezes nas páginas 13, 62 e 68.
- ELETRONUCLEAR. *Segurança Nuclear: Principais organizações envolvidas*. [S.l.: s.n.], 2014. Citado na página 67.
- ELETRONUCLEAR. *Energia Nuclear*. 2020. Disponível em: <<https://www.eletronuclear.gov.br/Sociedade-e-Meio-Ambiente/espaco-do-conhecimento/Paginas/Energia-Nuclear.aspx>>. Acesso em: 05/04/2020. Citado 10 vezes nas páginas 14, 31, 33, 39, 73, 77, 78, 79, 80 e 81.
- ELETRONUCLEAR, E. *Relatório de Sustentabilidade Socioambiental*. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2014. Citado 5 vezes nas páginas 14, 15, 61, 75 e 76.
- ELETRONUCLEAR, E. *Panorama da Energia Nuclear no Mundo*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2016. Citado 3 vezes nas páginas 13, 42 e 43.
- ENERGIA, C. *Eletronuclear constrói unidade para armazenar combustíveis usados de Angra 1 e 2*. 2020. Disponível em: <<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53150394/eletronuclear-constroi-unidade-para-armazenar-combustiveis-usados-de-angra-1-e-2>>. Acesso em: 10/12/2020. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 82.
- EPE. *Balanco Energético Nacional*. 2020. Acessado: 15-12-2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019_Final.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 23.
- FERREIRA, L. G. *As políticas internacionais de proteção dos efeitos nocivos dos resíduos nucleares: os esforços diplomáticos em torno das ameaças à segurança humana*. Minas Gerais, Brasil, 2016. Citado na página 47.
- FREIRE, C. B.; TELLO, C. C. d. O. *Rejeitos e Gerência de Resíduos Radioativos*. Bauru, São Paulo: Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento, 2007. Citado 5 vezes nas páginas 13, 63, 64, 69 e 72.
- G1. *No Brasil, 99% do urânio é usado para gerar eletricidade*. 2010. Disponível em: <<http://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2010/05/no-brasil-99-do-uranio-e-usado-para-gerar-eletricidade-saiba-mais.html>>. Acesso em: 02/04/2020. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 28.

GUZELLA, M. F. R. *Desenvolvimento de Processo para Imobilização de Rejeitos de Usinas Nucleares Utilizando Betumes Tradicionais*. Dissertação (Mestrado) — UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil, 2010. Citado na página 72.

HITACHI. *Hitachi Turbine Generator Technology for Nuclear Applications*. [S.l.]: Hitachi Power Systems America Ltd, 2006. Citado na página 35.

IAEA. *Principles of Atomic Waste Management*. [S.l.: s.n.], 1997. Citado na página 47.

IAEA. *Exemplo de citação no texto Armazenagem de Combustível Nuclear Queimado*. 2000. Disponível em: <<https://www.iaea.org/>>. Acesso em: 01/12/2020. Citado na página 45.

IAEA. *Integrated Review Service for Radioactive Waste and Spent Fuel Management, Decommissioning and Remediation (ARTEMIS)*. 2021. Disponível em: <<https://www.iaea.org/services/review-missions/integrated-review-service-for-radioactive-waste-and-spent-fuel-management-decommissioning-and-remediation>>. Acesso em: 20/05/2021. Citado na página 93.

INB. *INB*. 2020. Disponível em: <<http://www.inb.gov.br/>>. Acesso em: 02/04/2020. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 30.

ISO. *ISO 14001*. [S.l.], 2004. Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasghislaine/iso-14001-2004.pdf>>. Citado na página 28.

ISO. *ISO 9001*. [S.l.], 2008. Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasghislaine/abnt-iso9001.pdf>>. Citado na página 28.

JANNUZZI, G. D. M. Energia e meio ambiente. Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, 2001. Citado na página 24.

JÚNIOR, J. d. O. *Identificação de Radionuclídeos Potencialmente Relevantes nos Rejeitos da Central Nuclear de Angra dos Reis*. Dissertação (Mestrado) — IPEN, São Paulo, Brasil, 2019. Citado na página 73.

MANZINI, E. J. *Exemplo de citação no texto Entrevista semi-estruturada: Análise de objetivos e de roteiros*. São Paulo: Didática, 1990. Citado na página 52.

MANZINI, E. J. *Entrevista semi-estruturada: Análise de objetivos e de roteiros*. Bauru, São Paulo, 2004. Citado na página 53.

MARIZ, C. H. d. C. *Novas Usinas Nucleares no Brasil*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2015. Citado 4 vezes nas páginas 15, 46, 79 e 81.

MARQUES, P. Os delírios impactos da crise nuclear no japão. IEA-USP, 2011. Citado na página 24.

MOREIRA, A. C. *Angra dos Reis tem projeto educacional sobre energia nuclear*. 2020. Disponível em: <<http://www.edhorizonte.com.br/noticias/projeto-energia-nuclear-angra/>>. Acesso em: 04/12/2020. Citado 3 vezes nas páginas 13, 57 e 82.

MOREIRA, J. M. L. et al. Situação atual dos rejeitos radioativos no brasil e no mundo. São Paulo, Brasil, 2006. Citado 6 vezes nas páginas 15, 61, 62, 63, 64 e 65.

- NEA. *Nuclear Energy Agency*. 2020. Disponível em: <<https://www.oecd-nea.org/>>. Acesso em: 30/11/2020. Citado na página 43.
- OHSAS. *OHSAS 18001*. [S.l.], 2007. Disponível em: <https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/7319/2/Anexo%20I%20OHSAS180012007_pt.pdf>. Citado na página 29.
- ONS. *Impactos da Suspensão da Operação das UTNs Angra 1 e Angra 2 em 2019*. 2017. Disponível em: <https://www.eletronuclear.gov.br/Sociedade-e-Meio-Ambiente/Documents/05_ONS_NT_0105_2017_ImpactoSuspensaoOperacaoAngra1e2.pdf>. Acesso em: 04/12/2020. Citado na página 57.
- PEREIRA, A. C. et al. Avaliação de pastas e argamassas para o embalamento de rejeitos radioativos betumizados. São Paulo, Brasil, 2015. Citado na página 72.
- REZENDE, G. F. d. S. et al. *Reatores Nucleares de Potência*. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Rio de Janeiro, Brasil, 2009. Citado na página 33.
- ROMANATO, L. S. *Armazenagem de Combustível Nuclear Queimado*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, Brasil, 2005. Citado 8 vezes nas páginas 13, 15, 39, 40, 41, 42, 43 e 44.
- SANTOS, J. W. A.; LIMA, S. L. N. de. *Reduction of Radiactive Waste by Using Supercompaction Technique*. Santos, São Paulo, Brasil, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 14, 73 e 74.
- SILVA, E. M. P. d. *Implementação de um Sistema Unificado Para Gerenciamento de Rejeitos*. Dissertação (Mestrado) — UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil, 2006. Citado 14 vezes nas páginas 13, 14, 15, 60, 61, 68, 69, 71, 72, 74, 75, 77, 78 e 101.
- SILVA, O. L. P. d.; MARQUES, A. L. F. *Enriquecimento de urânio no Brasil: desenvolvimento da tecnologia por ultracentrifugação*. 2006. Acessado: 02-04-2020. Disponível em: <https://ecen.com/eee54/eee54p/enriquec_uranio_brasil.htm>. Citado na página 29.
- TRIVINOS, A. N. S. *Exemplo de citação no texto **Entrevista semi-estruturada: Análise de objetivos e de roteiros***. São Paulo: Atlas, 1987. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 53.
- WOODROOF, E. B.; LAMMERS, T. *Exemplo de citação no texto **Stean Plant Operation***. [S.l.]: Macgrew-Hill, 2012. v. 9th. Citado na página 35.
- ZAHN, G. S. *Exemplo de citação no texto **Eu, o Nêutron (prazer em conhecer)***. [S.l.: s.n.], 2007. Citado na página 31.

Anexos

ANEXO A – Primeiro Anexo

Valores referência utilizados pela CNEN para classificação dos rejeitos radioativos, segundo normativa CNEN (1985).

Rejeitos com emissores beta/gama - rejeitos contendo emissores beta e/ou gama, e nos quais os eventuais emissores alfa tenham concentração total inferior a $3,7 \times 10^8 \text{ Bq/m}^3$ (10^{-2} Ci/m^3).		
Rejeitos Líquidos Categoria	Concentração (C)	
	Bq/m³	Ci/ m³
Baixo nível de radiação (LBN)	$C \leq 3,7 \times 10^{10}$	$C \leq 1$
Médio nível de radiação (LMN)	$3,7 \times 10^{10} < C \leq 3,7 \times 10^{13}$	$1 < C \leq 10^3$
Alto nível de radiação (LAN)	$C > 3,7 \times 10^{13}$	$C > 10^3$
Rejeitos Sólidos Categoria	Taxa de Exposição (X) na Superfície	
	μC/kg.h	R/h
Baixo nível de radiação (SBN)	$X \leq 50$	$X \leq 0,2$
Médio nível de radiação (SMN)	$50 < X \leq 500$	$0,2 < X \leq 2$
Alto nível de radiação (SAN)	$X > 500$	$X > 2$
Rejeitos gasosos Categoria	Concentração (C)	
	Bq/m³	Ci/ m³
Baixo nível de radiação (GBN)	$C \leq 3,7$	$C \leq 10^{-10}$
Médio nível de radiação (GMN)	$3,7 < C \leq 3,7 \times 10^4$	$10^{-10} < C \leq 10^{-6}$
Alto nível de radiação (GAN)	$C > 3,7 \times 10^4$	$C > 10^{-6}$
Rejeitos com emissores alfa - rejeitos contendo emissores alfa, em concentrações superiores a $3,7 \times 10^8 \text{ Bq/m}^3$ (10^{-2} Ci/m^3),		
Rejeitos Líquidos Categoria	Concentração (C)	
	Bq/m³	Ci/ m³
Alfa de baixo nível de radiação (LαBN)	$3,7 \times 10^8 < C \leq 3,7 \times 10^{10}$	$10^{-2} < C \leq 1$
Alfa de médio nível de radiação (LαMN)	$3,7 \times 10^{10} < C \leq 3,7 \times 10^{13}$	$1 < C \leq 10^3$
Alfa de alto nível de radiação (LαAN)	$C > 3,7 \times 10^{13}$	$C > 10^3$
Rejeitos Sólidos Categoria	Concentração (C)	
	Bq/m³	Ci/ m³
Alfa de baixo nível de radiação (SαBN)	$3,7 \times 10^8 < C \leq 3,7 \times 10^{11}$	$10^{-2} < C \leq 10$
Alfa de médio nível de radiação (SαMN)	$3,7 \times 10^{11} < C \leq 3,7 \times 10^{13}$	$10 < C \leq 10^3$
Alfa de alto nível de radiação (SαNA)	$C > 3,7 \times 10^{13}$	$C > 10^3$

Figura 36 – Taxa de concentrações referência para os tipos de rejeitos radioativos. Fonte: (SILVA, 2006).

