

**MARINHA DO BRASIL  
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE WANDENKOLK  
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM TECNOLOGIA NUCLEAR**

**CAPITÃO-TENENTE LUIZ MÕES IOOTTY DE PAIVA**



**ALTERNATIVAS AO SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO DE GARFOS  
MECÂNICOS PARA A MOVIMENTAÇÃO DE TAMBORES DO SISTEMA DE  
PROCESSAMENTO DE REJEITOS RADIOATIVOS SÓLIDOS DO  
LABGENE (SPRS)**

**Rio de Janeiro**

**2018**

**CAPITÃO-TENENTE LUIZ MÕES IOOTTY DE PAIVA**

**ALTERNATIVAS AO SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO DE GARFOS  
MECÂNICOS PARA A MOVIMENTAÇÃO DE TAMBORES DO SISTEMA DE  
PROCESSAMENTO DE REJEITOS RADIOATIVOS SÓLIDOS DO  
LABGENE (SPRS)**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
Apresentado ao Centro de Instrução  
Almirante Wandenkolk para aprovação  
no Curso de Aperfeiçoamento  
Avançado em Tecnologia Nuclear para  
Oficiais**

**Rio de Janeiro**

**2018**

**CAPITÃO-TENENTE LUIZ MÕES IOOTTY DE PAIVA**

**ALTERNATIVAS AO SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO DE GARFOS  
MECÂNICOS PARA A MOVIMENTAÇÃO DE TAMBORES DO SISTEMA DE  
PROCESSAMENTO DE REJEITOS RADIOATIVOS SÓLIDOS DO  
LABGENE (SPRS)**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
Apresentado ao Centro de Instrução  
Almirante Wandenkolk para aprovação  
no Curso de Aperfeiçoamento  
Avançado em Tecnologia Nuclear para  
Oficiais**

**Área de Concentração: Tecnologia  
Nuclear.**

**Orientador: CC (EN) Rafael Radé  
Pacheco**

**Rio de Janeiro**

**2018**

Dedico todo o esforço deste trabalho aos meus pais, Sergio e Iara, que me proporcionaram os primeiros passos rumo ao estudo e ao saber e à minha esposa, Maria Elisa, pelo amor e apoio incondicional e pela compreensão durante os períodos de afastamento.

## AGRADECIMENTOS

Ao CC (EN) Rafael Radé Pacheco pela orientação durante a condução deste trabalho.e a todos os instrutores, Oficiais e Civis, designados para atuarem, com competência e dedicação, como disseminadores do conhecimento neste projeto pioneiro da Marinha.

Aos companheiros de curso pela oportunidade de dividir as experiências acadêmicas e suplantar os obstáculos durante esta árdua, porém grata, jornada.

À Marinha do Brasil, em especial ao Centro de Instrução Almirante Wandenkolk e ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, pela oportunidade de realizar o primeiro Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Tecnologia Nuclear e pelo profissionalismo durante a realização de todas as atividades, em especial o período de estágio supervisionado em São Paulo.

O insucesso é apenas uma oportunidade  
para recomeçar com mais inteligência.  
(Henry Ford)

## RESUMO

O presente trabalho aborda os aspectos conceituais acerca do gerenciamento de rejeitos radioativos, as técnicas adotadas no Brasil e no Mundo com as respectivas normatizações. A tecnologia nuclear é uma realidade com uma demanda cada vez maior, todavia, trata-se de uma atividade com um risco elevado, o que requer, cada vez mais, técnicas seguras na sua gestão. Gerenciar rejeitos radioativos de forma responsável é garantir uma proteção para a geração atual e não impor encargos adicionais às gerações futuras. O objetivo de estabelecer um controle rigoroso acerca dos resíduos produzidos em uma instalação nuclear é, acima de tudo, salvaguardar a vida humana e proteger o meio ambiente. Diante das técnicas de gerenciamento de rejeitos apresentadas, o estudo estabelece uma análise comparativa entre as técnicas adotadas nas usinas nucleares e o projeto do LABGENE. Ao final, propõe uma alternativa para a substituição do projeto vigente, mantendo as condições de segurança estabelecidas nas normas.

**Palavras-chave:** Gerenciamento de Rejeitos Radioativos. Tecnologia Nuclear. LABGENE.

## ABSTRACT

The present work deals with the conceptual design topics about the management of radioactive waste, the techniques adopted in Brazil and in the World, following regulations. The nuclear technology is a reality with an increasing demand, however, it is an activity with a high risk, which requires, more and more, safe techniques in its management. Managing radioactive waste responsibly means to ensure the protection for the current generation and to not impose additional burdens on future generations. The objective of strict control over waste produced in a nuclear facility aims, above all, to safeguard the human life and to protect the environment. In view of the techniques of waste management presented, the current study establishes a comparative analysis between the techniques adopted among the nuclear plants and the LABGENE project and, in the end, proposes an alternative to replace the current design, maintaining the safety conditions established by the standards.

**Keywords:** Management of Radioactive Waste. Nuclear Technology. LABGENE.



## LISTA D E FIGURA

Figura 1 Organograma do setor Nuclear no Brasil .....	14
Figura 2 Características das classes de rejeitos radioativos .....	19
Figura 3 Classificação de rejeitos radioativos.....	20
Figura 4 Etapas básicas no gerenciamento de resíduos radioativos, dependendo dos tipos de resíduos radioativos .....	24
Figura 5 Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto .....	26
Figura 6 Gerenciamento de rejeitos radioativos da CNAAA .....	27
Figura 7 Depósito inicial de rejeitos radioativos.....	28
Figura 8 Armazenamento de rejeitos radioativos em tambores.....	30
Figura 9 Angra 1 .....	33
Figura 10 Angra 2 .....	34
Figura 11 Piscina de resfriamento de rejeitos de Angra 1 .....	35
Figura 12 Piscina de armazenamento de combustível irradiado .....	35
Figura 13 Monitoramento da radiação dos embalados de rejeitos de médio e baixo níveis de radiação.....	36
Figura 14 LABGENE em construção .....	38
Figura 15 Blocos 30 e 40 do LABGENE .....	39
Figura 16 Arranjo do Grupo de Mistura e do Sistema Integrado para Processamento de Rejeitos Radioativos Sólidos.....	40
Figura 17 Arranjo das áreas de processamento .....	43
Figura 18 Sequência operacional da compactação .....	43
Figura 19 Prédio Auxiliar Controlado do LABGENE .....	45
Figura 20 Sequência operacional do encapsulamento .....	46
Figura 21 Rota operacional do encapsulamento .....	48
Figura 22 Rota operacional da cimentação .....	49
Figura 23 Transportador de Roletes .....	50
Figura 24 Posição de operação dos tambores .....	51
Figura 25 Vista frontal do EMT .....	52
Figura 26 Detalhamento do sistema de travamento dos garfos.....	53
Figura 27 Perfis metálicos de guia.....	54
Figura 28 Conjunto mecânico do EMT .....	55
Figura 29 Equipamento de Movimentação de Tambores .....	55

Figura 30 Mecanismo de acionamento de roletes .....	57
Figura 31 Roletes acionados .....	57
Figura 32 Esteira transportadora com roletes acionados .....	58
Figura 33 Arranjo geral do grupo de mistura .....	59
Figura 34 Arranjo geral do grupo de mistura modificado .....	59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ALARA</b>	<i>As Low as Reasonably Achievable</i>
<b>CGR</b>	Centro de Gerenciamento de Rejeitos
<b>CINA</b>	Centro Industrial Nuclear de Aaramar
<b>CNAAA</b>	Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto
<b>CNEN</b>	Comissão Nacional de Energia Nuclear
<b>CRFB</b>	Constituição da República Federativa do Brasil
<b>CTMSP</b>	Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo
<b>EMT</b>	Equipamento de Movimentação de Tambores
<b>EW</b>	<i>Empt Waste</i>
<b>HLW</b>	<i>High Level Waste</i>
<b>IAEA</b>	<i>International Atomic Energy Adgency</i>
<b>ILW</b>	<i>Intermediate Level Waste</i>
<b>LABGENE</b>	Laboratório de Geração de Energia Nucleoelétrica
<b>LLW</b>	<i>Low Level Waste</i>
<b>MCTIC</b>	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
<b>PAC</b>	Prédio Auxiliar Controlado
<b>PNM</b>	Programa Nuclear da Marinha
<b>RAN</b>	Rejeitos de Alto Nível de Radiação
<b>RBMN</b>	Rejeitos de Baixo e Médio Níveis de Rdiação
<b>RBMN-RN</b>	Rejeitos de Baixo e Médio Níveis de Rdiação Contendo Radionuclídeos Naturais
<b>RBMN-VC</b>	Rejeitos de Baixo e Médio Níveis de Rdiação de Meia-Vida Curta
<b>RBMN-VL</b>	Rejeitos de Baixo e Médio Níveis de Rdiação de Meia-Vida Longa
<b>RI</b>	Rejeitos Isentos
<b>RVMC</b>	Rejeitos de Meia-Vida Muito Curta
<b>SNBR</b>	Submarino Nuclear Brasileiro
<b>SPRL</b>	Sistema de Processamento de Rejeitos Radioativos Líquidos
<b>SPRS</b>	Sistema de Processamento de Rejeitos Radioativos Sólidos
<b>VLLW</b>	<i>Very Low Level Waste</i>
<b>VSLW</b>	<i>Very Short Lived Waste</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa .....</b>	<b>12</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>12</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>13</b>
<b>1.4</b>	<b>Metodologia .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>CONCEITOS FUNDAMENTAIS E REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Conceitos Básicos e Previsões Normativas.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>Classificação de Rejeitos Radioativos .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3</b>	<b>Gerenciamento de Rejeitos Radioativos.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Gerenciamento de Rejeitos nas Usinas de Angra 1 e Angra 2 .....</b>	<b>26</b>
<b>2.4</b>	<b>Armazenamento de Rejeitos Radioativos .....</b>	<b>27</b>
<b>2.5</b>	<b>Rejeitos Radioativos e Aceitação Pública .....</b>	<b>36</b>
<b>3</b>	<b>LABGENE .....</b>	<b>38</b>
<b>3.1</b>	<b>Sistema de Processamento de Rejeitos Radioativos Sólidos (SPRS) ....</b>	<b>39</b>
<b>3.2</b>	<b>Transportador de Roletes.....</b>	<b>48</b>
<b>3.3</b>	<b>Equipamento de Movimentação de Tambores (EMT) .....</b>	<b>50</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>60</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>64</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem por escopo abordar, de uma forma geral, as técnicas adotadas no gerenciamento de rejeitos radioativos nas usinas nucleares, bem como no Laboratório de Geração de Energia Nucleoelétrica (LABGENE) e propor alternativas para a redução de custo do seu respectivo sistema. Não obstante a finalidade precípua, serão conceituados e classificados os rejeitos provenientes da atividade nuclear e apresentada uma discussão acerca dos riscos e benefícios da energia nuclear frente às demais tecnologias. Desde a promulgação da carta magna de 1988, a tecnologia nuclear no Brasil ganhou uma proteção constitucional, conferindo à União a exclusividade na exploração, na pesquisa e na atividade legiferante. Ao enumerar as competências administrativas da União, a Carta Magna Republicana, em seu artigo 21, atribui ao ente federativo, a exploração dos serviços e instalações nucleares de qualquer natureza e o monopólio estatal sobre a pesquisa, a lavra, o enriquecimento e reprocessamento, a industrialização e o comércio de minérios nucleares e seus derivados, com a condicionante de a atividade nuclear, em todo território nacional, seja admitida, somente, para fins pacíficos, conforme disposto no inciso XXIII [1] .

Rejeitos radioativos são materiais, produtos das atividades nucleares, que não serão mais utilizados e, em decorrência de sua característica radioativa, devem ter seu armazenamento e descarte cuidadosamente controlados e monitorados. Apresentam-se nas formas líquida, gasosa e sólida e são oriundos de diversos procedimentos da atividade nuclear. Todos os materiais utilizados no manuseio de substâncias radioativas, ao final, são considerados rejeitos e devem ter seu descarte realizado de forma distinta do lixo comum. O próprio combustível irradiado, ao ser trocado, caso não seja reprocessado, será considerado um rejeito radioativo, devendo ser armazenado e controlado durante longo período [2]. Os rejeitos são segregados e classificados de acordo com o nível de radioatividade e com o tempo de meia vida dos radionuclídeos.

No tocante aos riscos envolvidos, a própria Constituição da República adota a teoria do risco integral atribuindo, ao operador, a responsabilidade civil por danos nucleares, independentemente da existência de culpa, nos termos do artigo 21, inciso XXIII, alínea “d” [1], o que já exige da atividade um controle muito mais rigoroso e, conseqüentemente, a adoção de medidas muito mais eficazes no funcionamento do sistema e no gerenciamento dos rejeitos radioativos. Assim como toda e qualquer

indústria, a atividade nuclear produz resíduos, seja na geração de energia elétrica, seja na área de pesquisa medicinal ou, até mesmo, com o propósito propulsivo. Todavia, os rejeitos radioativos, em termos quantitativos, são muito menores e mais fáceis de armazenar quando comparados às demais tecnologias [2].

Independente do combustível utilizado, seja carvão, petróleo, gás ou o combustível nuclear, o gerenciamento dos resíduos gerados deve pautar-se em medidas suficientes e necessárias para a proteção da vida humana e, nesse contexto, existem métodos seguros, provados tecnicamente, no sentido de tornar os resíduos radioativos inofensivos à saúde humana e ao meio ambiente [2].

Não significa afastar a prejudicialidade do resíduo nuclear, pelo contrário, trata-se de material altamente radioativo e perigoso, todavia, a energia nuclear se caracteriza por produzir uma grande quantidade de energia, durante muito tempo, com uma pequena quantidade de combustível gerando, conseqüentemente, uma reduzida quantidade de resíduos. A título de exemplo, uma pastilha de urânio com um centímetro de diâmetro e um centímetro de altura equivale a, aproximadamente, uma tonelada de carvão na geração de energia. Uma indústria a carvão não armazena seus resíduos, os libera para a atmosfera, ao contrário de uma indústria nuclear que pouco libera para atmosfera, armazena todo o lixo gerado, pois de outra forma não pode ocorrer. Esse é o grande desafio da atividade nuclear e um dos objetivos deste trabalho, indicar técnicas eficazes no gerenciamento dos respectivos rejeitos por muitos anos [2].

## **1.1 Justificativa**

O presente trabalho busca analisar uma alternativa técnica para a tecnologia corrente de descarte de rejeito radioativo do LABGENE de onde, eventualmente, pode ser proposta uma melhoria conceitual no projeto.

## **1.2 Objetivo Geral**

Este trabalho analisa o Sistema de Processamento de Rejeitos Nucleares Sólidos (SPRS) do LABGENE, especificamente o sistema de movimentação de tambores, atualmente previsto com garfos mecânicos suspensos, acionados por controle pneumático, e propor, alternativamente, a substituição por esteira mecânica, com roletes acionados.

### **1.3 Objetivos Específicos**

Descrever o sistema de movimentação de tambores por garfos mecânicos, realizado por um cilindro pneumático, atualmente considerado no projeto do LABGENE.

Verificar a exequibilidade da movimentação de tambores contendo rejeito nuclear imobilizado em matriz sólida de cimento através de esteiras rolantes.

Verificar a disponibilidade no mercado brasileiro de esteiras rolantes capazes de executar tal movimentação, bem como sua viabilidade técnica e orçamentária.

Realizar uma análise das vantagens e desvantagens da substituição do sistema projetado, pelo sistema de esteira rolante.

### **1.4 Metodologia**

Na seção 2 deste trabalho, serão apresentados conceitos fundamentais, bem como uma revisão de literatura, necessários para a compreensão do problema do armazenamento de rejeito radioativo. Nesta seção, será definido o conceito de rejeito radioativo; será descrito o sistema de classificação de rejeitos; serão apresentados os principais tópicos das normas brasileiras que regulam o armazenamento e descarte de produtos radioativos, bem como serão apresentadas as principais tecnologias de armazenamento e descarte de rejeito radioativo. Ainda nesta seção, buscar-se-á descrever as soluções de rejeitos nucleares já disponíveis nacionalmente e implantadas nas centrais nucleolétricas de ANGRA I e ANGRA II.

Na seção 3, o Sistema de Processamento de Rejeitos Nucleares do LABGENE será descrito de uma maneira ampla, considerando-se o processamento de rejeitos sólidos, líquidos e gasosos. O sistema de processamento de rejeitos sólidos será descrito de maneira específica, com especial ênfase para o sistema de movimentação de tambores.

Na seção 4, descrever-se-á a alternativa de movimentação de tambores por meio de esteira, com vistas a viabilidade técnica e operacional. Uma especificação técnica simplificada será produzida a fim de viabilizar consulta à fornecedores.

Na seção 5, uma vez comprovada a viabilidade técnico-comercial da proposta da esteira, ambas as soluções serão confrontadas (pontos positivos e negativos) a fim de que seja indicada qual das duas é mais vantajosa.

## 2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS E REVISÃO DE LITERATURA

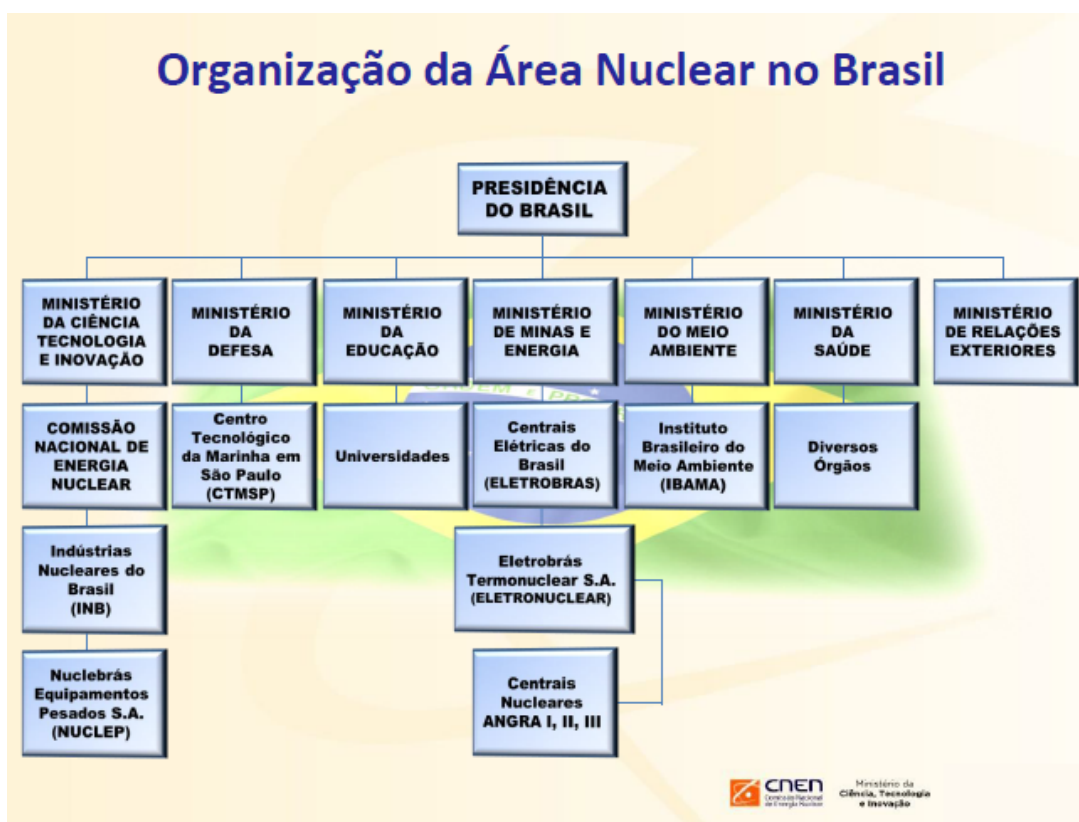
### 2.1 Conceitos Básicos e Previsões Normativas

O presente capítulo revê a teoria básica sobre o conceito de rejeitos e a sua forma de armazenagem; os desafios perante a sociedade, compilando algumas fontes bibliográficas sobre o assunto; e toda a base normativa que dá sustentação ao gerenciamento de rejeitos radioativos.

No âmbito interno, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), autarquia federal vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), é o órgão responsável por desenvolver a política nacional de energia nuclear. À CNEN compete regular, licenciar e fiscalizar a produção e o uso da energia nuclear no Brasil, funções, estas, conferidas pela lei federal 7.781/89 [3].

A Figura 1 representa o Organograma do setor nuclear no Brasil, de maneira a expor a subordinação segundo a legislação nacional.

Figura 1 Organograma do setor Nuclear no Brasil



Fonte: Ref. [4]



De acordo com definição estabelecida pela autarquia federal, entende-se por gerência de rejeitos radioativos, o conjunto de atividades administrativas e técnicas envolvidas na coleta, segregação, manuseio, tratamento, acondicionamento, transporte, armazenamento, controle e deposição de rejeitos radioativos. Da mesma forma, convém reproduzir o conceito de rejeito radioativo, sendo qualquer material resultante de atividade humana, que contenha radionuclídeos em quantidades superiores aos limites de isenção, estabelecidos pela própria autarquia, para o qual a reutilização é imprópria ou não prevista [5].

No campo internacional, o protagonismo fica por conta da *International Atomic Energy Agency* (IAEA), organismo internacional, autônomo, responsável por garantir o uso seguro e pacífico da ciência e tecnologia nucleares, contribuindo para a paz e a segurança internacional e para os objetivos de desenvolvimento sustentável das Nações Unidas [6].

De acordo com a definição da IAEA, o gerenciamento de resíduos radioativos abrange todas as atividades administrativas e operacionais, envolvidas no manuseio, tratamento, acondicionamento, transporte armazenamento e descarte. De igual forma, a Agência entende por rejeito radioativo todo material em forma gasosa, líquida ou sólida para o qual não está previsto qualquer outra utilização [7].

Seja internamente ou no cenário internacional, a gerência de rejeitos radioativos, apesar de haver uma abordagem conceitual diversa entre os Estados, possui um papel de extrema relevância dentro dos princípios básicos de proteção radiológica, qual seja, a proteção e salvaguarda da vida humana e gerações futuras e a preservação do meio ambiente, com a adoção de técnicas seguras e uma gestão responsável.

Os rejeitos radioativos surgem da geração de eletricidade numa planta nuclear, a partir de operações envolvendo o ciclo do combustível nuclear e de outras atividades em que há a utilização de material radioativo, podendo ser gerados a partir de uma ampla gama de atividades, de hospitais a usinas nucleoeletricas, incluindo, também, a utilização da tecnologia na propulsão naval. Uma característica comum de todos os resíduos radioativos é o seu potencial para representar um risco para as pessoas e para o meio ambiente devendo, portanto, ser gerenciado para levar qualquer risco a níveis aceitáveis, podendo o perigo potencial variar de grande a trivial.

Em função da importância do tema, a atividade nuclear, mais especificamente a matéria de rejeitos radioativos, possui um amplo arcabouço normativo tanto no

âmbito interno, quanto no cenário internacional. Dentre todas as regulamentações emanadas pela CNEN, o gerenciamento de rejeitos radioativos possui um grupo específico de normas, contendo disposições específicas acerca das classificações, do seu correto tratamento, manuseio, armazenamento, bem como sobre a disposição final. O grupo 8 das normas da CNEN compõe-se pelas normas NN 8.01 e NN 8.02, dispondo sobre a gerência de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação e o licenciamento de depósitos de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação, respectivamente, e pela posição regulatória 1.26/001 sobre gerenciamento de rejeitos radioativos em usinas nucleoeletricas [8] [9].

Não obstante as disposições específicas, há normatização acerca do tema no demais grupos de normas, tendo em vista que o gerenciamento de rejeitos radioativos possui importância em todas as fases da atividade nuclear, desde o licenciamento da instalação até o seu descomissionamento [10].

A agência define, ainda, os rejeitos classificando-os conforme seus níveis de radioatividade e seu tempo de meia vida em seis classes, a saber: resíduos isentos, resíduos de duração muito curta, resíduos de muito baixo nível, resíduos de baixo nível, resíduos de nível intermediário e resíduos de alto nível e que, a depender da classificação, serão adotadas medidas diferenciadas no tocante ao acondicionamento, blindagem, manuseio e transporte [7].

A classificação dos rejeitos varia de acordo com os países, levando-se em conta diversos critérios de avaliação. No Brasil, a classificação baseia-se na forma física, nos tipos de emissão dos radionuclídeos e na taxa de exposição [2].

Em função da classificação, os resíduos radioativos devem ser gerenciados de forma a salvaguardar a vida humana e conferir a máxima proteção ao meio ambiente, gerência, esta, que envolve várias etapas, como segregação, coleta, tratamento, armazenamento, transporte, até uma possível liberação controlada ao meio ambiente.

## **2.2 Classificação de Rejeitos Radioativos**

Já é de conhecimento que o rejeito radioativo é gerado em vários tipos diferentes de instalações, surgindo em uma ampla gama de concentrações de radionuclídeos e em uma variedade de formas físicas e químicas, essas diferenças resultam em um grande espectro de opções para a gestão dos resíduos, existindo várias alternativas para o seu processamento e armazenamento a curto ou longo

prazo. Destarte, existem diversas formas para a eliminação segura dos rejeitos, variando da superfície próxima à eliminação geológica [11].

Os rejeitos radioativos são produzidos nas várias atividades do setor nuclear, como em reatores nucleares, na indústria do ciclo do combustível nuclear e no uso de materiais radioativos para pesquisa, medicina e indústria convencional, podendo também ser produzidos em decorrência de acidentes em instalações nucleares ou radiativas que podem liberar material radioativo e contaminar áreas que entrem em contato com eles. Esses rejeitos são constituídos de uma diversidade de materiais com diferentes características físicas, químicas e radioativas, requerendo diferentes tipos de gerenciamento, cujo objetivo principal é a redução de seus volumes e radioatividade e o seu confinamento. Muitos materiais se transformam em rejeitos entrando em contato com materiais radioativos como luvas, papéis, algodão, vidros, plásticos que, entrando em contato com substâncias radioativas, ficam contaminados, da mesma forma a água utilizada para limpeza e descontaminação de instrumentos e soluções utilizadas em análises de laboratórios [2].

Os critérios para a classificação dos resíduos radioativos evoluíram com o passar dos anos, de acordo com as suas propriedades físicas, químicas e radiológicas ou circunstâncias específicas em que foram gerados, podendo, esta classificação, diferir, em terminologias, de Estado para Estado e mesmo entre instalações no mesmo Estado [2].

A fim de abordar essas questões, a classificação dos resíduos radioativos tem sido objeto de normas internacionais sobre segurança no seu gerenciamento e diferentes tipos de resíduos podem ser agrupados para fins operacionais. Por exemplo, os resíduos que contêm radionuclídeos com meias-vidas curtas podem ser separados dos resíduos que contêm radionuclídeos com meias-vidas mais longas, ou os resíduos compressíveis podem ser separados dos resíduos não compressíveis [11].

Nesse sentido, a IAEA classificou os rejeitos radioativos (Figura 2 e Figura 3), dividindo-os em seis classes diferentes a saber [11]:

1. Resíduos Isentos (*Exempt waste - EW*): resíduos que atendem aos critérios de remoção, isenção ou exclusão do controle regulatório para fins de proteção contra radiação.
2. Resíduos de muito curta duração (*Very short lived waste - VSLW*): resíduos que podem ser armazenados para deterioração durante um período limitado

de até alguns anos e, posteriormente, removidos do controle regulatório de acordo com as disposições aprovadas pelo órgão regulador, para descarte, uso ou descarga descontrolados. Esta classe inclui resíduos que contêm principalmente radionuclídeos com meias-vidas muito curtas, muitas vezes usadas para fins de pesquisa e na medicina.

3. Rejeitos de muito baixo nível de radiação (*Very low level waste - VLLW*): rejeitos que não satisfazem necessariamente os critérios de EW, mas que não necessitam de um alto nível de contenção e isolamento e, portanto, podem ser dispostos em instalações de aterros próximas à superfície com controle regulatório limitado. Essas instalações do tipo aterro também podem conter outros rejeitos perigosos. Os rejeitos típicos nesta classe incluem solo e entulho com baixos níveis de atividade. As concentrações de radionuclídeos de longa vida em VLLW são geralmente muito limitadas.
4. Rejeito de baixo nível de radiação (*Low level waste - LLW*): rejeitos que estão acima dos níveis de isenção, mas com quantidades limitadas de radionuclídeos de longa duração. Esse rejeito requer isolamento e contenção robustos por períodos de até algumas centenas de anos e é adequado para disposição em locais próximos à instalação que o utiliza. Esta classe abrange uma grande variedade de rejeitos. O LLW pode incluir radionuclídeos de curta duração em níveis mais altos de atividade e radionuclídeos de longa duração, mas apenas em níveis relativamente baixos.
5. Rejeitos de nível intermediário (*Intermediate level waste - ILW*): rejeito que, devido ao seu conteúdo, particularmente de radionuclídeos de longa duração, requer um maior grau de contenção e isolamento do que o proporcionado pela disposição próxima à superfície. No entanto, o ILW não precisa de provisão, ou provisão limitada, para dissipação de calor durante a sua armazenagem e disposição. O ILW pode conter radionuclídeos de longa duração, em particular, radionuclídeos emissores alfa que não se deterioram para um nível de concentração de atividade aceitável para disposição próxima à superfície durante o tempo para o qual os controles institucionais existam. Portanto, a disposição nesta classe requer armazenamento em maiores profundidades, da ordem de dezenas a algumas centenas de metros.

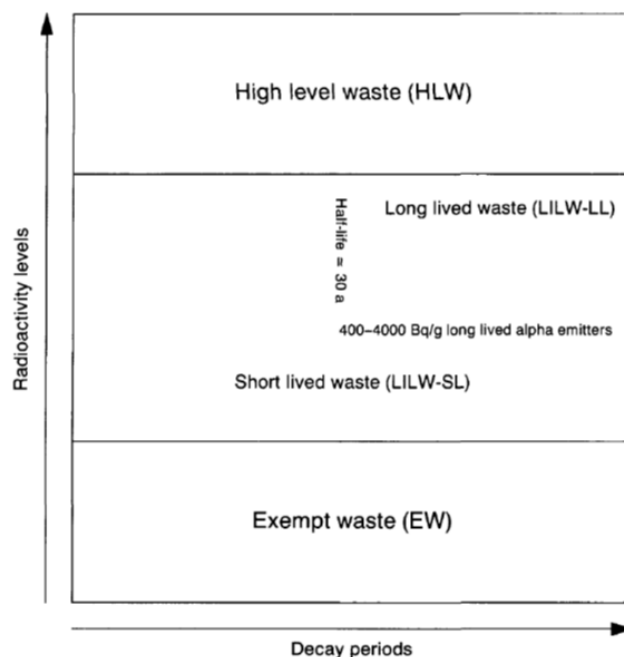
6. Rejeitos de alto nível de radiação (*High level waste - HLW*): rejeitos com níveis de concentração de atividade suficientemente altos para gerar quantidades significativas de calor no processo de decaimento radioativo ou rejeitos com grandes quantidades de radionuclídeos de longa duração que precisam ser considerados no projeto de uma instalação de disposição desses rejeitos. A eliminação em formações geológicas profundas e estáveis geralmente várias centenas de metros ou mais abaixo da superfície é a opção geralmente reconhecida para a eliminação de HLW.

Figura 2 Características das classes de rejeitos radioativos

Waste classes	Typical characteristics	Disposal options
1. Exempt waste (EW)	Activity levels at or below clearance levels given in Ref. [4], which are based on an annual dose to members of the public of less than 0.01 mSv	No radiological restrictions
2. Low and intermediate level waste (LILW)	Activity levels above clearance levels given in Ref. [4] and thermal power below about 2kW/m <sup>3</sup>	
2.1. Short lived waste (LILW-SL)	Restricted long lived radionuclide concentrations (limitation of long lived alpha emitting radionuclides to 4000 Bq/g in individual waste packages and to an overall average of 400 Bq/g per waste package); see paragraphs 324 and 325	Near surface or geological disposal facility
2.2. Long lived waste (LILW-LL)	Long lived radionuclide concentrations exceeding limitations for short lived waste	Geological disposal facility
3. High level waste (HLW)	Thermal power above about 2kW/m <sup>3</sup> and long lived radionuclide concentrations exceeding limitations for short lived waste	Geological disposal facility

Fonte: Ref. [11]

Figura 3 Classificação de rejeitos radioativos



Fonte:Ref. [11]

Novamente, estabelecendo uma terminologia de classificação diversa, mas seguindo a mesma linha da agência internacional, a CNEN classificou os rejeitos radioativos segundo seus níveis e natureza da radiação, por meio da norma NN-8.01, diploma este que revogou a NE-6.05, dividindo-os em oito classes a saber [12]:

1. Classe 0: Rejeitos Isentos (RI): rejeitos contendo radionuclídeos com valores de atividade ou de concentração de atividade, em massa ou volume, inferiores ou iguais aos respectivos níveis de dispensa previamente estabelecidos.
2. Classe 1: Rejeitos de Meia-Vida Muito Curta (RVMC): rejeitos com meia-vida inferior ou da ordem de 100 dias, com níveis de atividade ou de concentração em atividade superiores aos respectivos níveis de dispensa.
3. Classe 2: Rejeitos de Baixo e Médio Níveis de Radiação (RBMN): rejeitos com meia-vida superior a dos rejeitos da Classe 1, com níveis de atividade ou de concentração em atividade superiores aos níveis de dispensa estabelecidos pela CNEN, bem como com potência térmica inferior a 2 kW/m<sup>3</sup>.
4. Classe 2.1: Meia-Vida Curta (RBMN-VC): rejeitos de baixo e médio níveis de radiação contendo emissores beta/gama, com meia-vida inferior ou da

ordem de 30 anos e com concentração de radionuclídeos emissores alfa de meia-vida longa limitada em 3700 kBq/kg em volumes individuais e com um valor médio de 370 kBq/kg para o conjunto de volumes.

5. Classe 2.2: Rejeitos Contendo Radionuclídeos Naturais (RBMN-RN): rejeitos de extração e exploração de petróleo, contendo radionuclídeos das séries do urânio e tório em concentrações de atividade ou atividades acima dos níveis de dispensa estabelecidos.
6. Classe 2.3: Rejeitos contendo Radionuclídeos Naturais (RBMN-RN): rejeitos contendo matérias primas minerais, naturais ou industrializadas, com radionuclídeos das séries do urânio e do tório em concentrações de atividade ou atividades acima dos níveis de dispensa.
7. Classe 2.4: Rejeitos de Meia-Vida Longa (RBMN-VL): rejeitos não enquadrados nas Classes 2.2 e 2.3, com concentrações de radionuclídeos de meia-vida longa que excedem as limitações para classificação como rejeitos de meia-vida curta.
8. Classe 3: Rejeitos de Alto Nível de Radiação (RAN): rejeitos com potência térmica superior a  $2\text{kW/m}^3$  e com concentrações de radionuclídeos de meia-vida longa que excedam as limitações para classificação como rejeitos de meia-vida curta.

Os limites de dispensa mencionados nas classificações supracitadas são estabelecidos nos anexos II e VI da norma da CNEN NN 8.01, os quais relacionam diversos rejeitos sólidos, líquidos e gasosos contendo radionuclídeos.

Os rejeitos de baixa e média atividades oferecem pouco perigo potencial. Há bastante experiência em relação a esses tipos de rejeitos, de modo que as soluções de engenharia encontradas, o tratamento e a disposição segura podem ser consideradas consolidadas. Os rejeitos de alta atividade, bem como os combustíveis irradiados, representam um risco potencial de longo prazo, pois necessitam ser adequadamente isolados por milhares de anos para proteger o homem e meio ambiente dos efeitos nocivos da radiação nuclear [2].

Rejeitos de baixa atividade são os que contêm baixa intensidade de radioatividade, com quantidades desprezíveis de isótopos radioativos de longa vida, não necessitam de blindagem especial para o seu manuseio e podem ser armazenados em depósitos simples. São todos os materiais comuns utilizados na atividade nuclear, equipamentos, luvas. Os de média atividade necessitam de

blindagem como, por exemplo, os revestimentos dos elementos combustíveis. Os rejeitos de alta atividade, por possuírem uma grande quantidade de energia, requerem um resfriamento por diversos anos. O próprio combustível nuclear, caso não seja reprocessado, é considerado um rejeito de alta atividade [2].

### 2.3 Gerenciamento de Rejeitos Radioativos

Parece evidente que a tecnologia nuclear para produzir energia e todas essas aplicações produz benefícios que justificam o seu uso. Entretanto gerenciar os rejeitos radioativos de forma econômica e segura é um objetivo a ser alcançado para que esses benefícios superem os custos [13].

Conforme previamente definido pela IAEA [14] a gestão de rejeitos radioativos engloba atividades, administrativas e operacionais, envolvendo manipulação, pré-tratamento, tratamento, condicionamento, transporte, armazenamento e a disposição, propriamente dita. O objetivo da gestão de resíduos radioativos é lidar com resíduos radioativos de maneira a proteger a saúde humana e o meio ambiente, agora e no futuro, sem impor encargos indevidos às gerações futuras. O gerenciamento responsável dos rejeitos requer a implementação de medidas que ofereçam proteção à saúde humana e ao meio ambiente, uma vez que resíduos radioativos geridos de forma inadequada podem resultar em efeitos adversos para a saúde humana ou para o meio ambiente, agora e no futuro [14].

Alguns princípios fundamentais norteiam essa gestão de forma segura e eficaz, contribuindo para alcançar os objetivos do gerenciamento de rejeitos radioativos [14].

- **Princípio 1: Proteção da saúde humana** - Os resíduos radioativos devem ser geridos de forma a garantir um nível aceitável de proteção da saúde humana.
- **Princípio 2: Proteção do ambiente** - Os resíduos radioativos devem ser geridos de forma a garantir um nível aceitável de proteção do ambiente.
- **Princípio 3: Proteção para além das fronteiras nacionais** - Os resíduos radioativos devem ser geridos de forma a assegurar que os possíveis efeitos na saúde humana e no ambiente para além das fronteiras nacionais sejam considerados.
- **Princípio 4: Proteção das gerações futuras** - Os resíduos radioativos devem ser geridos de forma que os impactos previstos para a saúde das



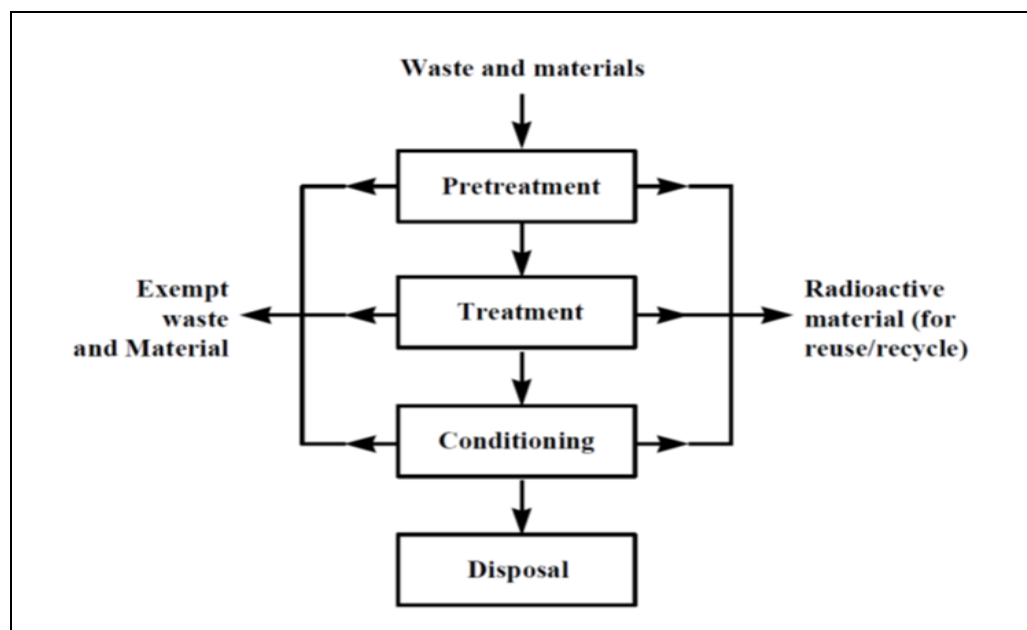
gerações futuras não sejam superiores aos níveis de impacto relevantes que são aceitáveis hoje em dia.

- **Princípio 5: Encargos sobre as gerações futuras** - Os resíduos radioativos devem ser geridos de forma a não impor encargos indevidos às gerações futuras.
- **Princípio 6: Quadro legal nacional** - Os resíduos radioativos devem ser geridos dentro de um quadro legal nacional apropriado, incluindo uma clara atribuição de responsabilidades e uma provisão para funções reguladoras independentes.
- **Princípio 7: Controle da geração de resíduos radioativos** - A geração de resíduos radioativos deve ser mantida no mínimo possível.
- **Princípio 8: Interdependências de geração e gerenciamento de resíduos radioativos** - As interdependências entre todas as etapas da geração e gestão de resíduos radioativos devem ser devidamente consideradas.
- **Princípio 9: Segurança das instalações** - A segurança das instalações para a gestão de resíduos radioativos deve ser assegurada de forma adequada durante toda sua vida útil.

O gerenciamento efetivo de rejeitos radioativos considera as etapas básicas, manipulação, pré-tratamento, tratamento, condicionamento, transporte, armazenamento e a disposição, como partes de um sistema total, desde a geração até o descarte, conforme ilustrado pela Figura 4.

É na etapa de pré-tratamento que se faz a caracterização, uma vez que o conhecimento das propriedades do rejeito gerado é essencial para sua classificação, segregação e definição dos requisitos de segurança que serão aplicados nas demais etapas do gerenciamento. É nessa etapa que um material inicialmente tomado como rejeito radioativo poderá ser classificado como resíduo comum e ser descartado obedecendo limites de dispensa estabelecidos pela regulamentação [13].

Figura 4 Etapas básicas no gerenciamento de resíduos radioativos, dependendo dos tipos de resíduos radioativos



Fonte: Ref. [11]

O pré-tratamento de resíduos é o passo inicial no gerenciamento de resíduos que ocorre após a sua geração. Consiste, por exemplo, na coleta, segregação, ajuste químico e descontaminação, e pode incluir um período de armazenamento intermediário. Esta etapa inicial é extremamente importante porque fornece em muitos casos a melhor oportunidade de segregar fluxos de resíduos, por exemplo, para reciclagem dentro do processo ou para descarte como lixo não radioativo comum quando as quantidades de materiais radioativos que eles contêm estão isentas de controles regulatórios. Também oferece a oportunidade de segregar resíduos radioativos, por exemplo, para descarte próximo à superfície ou geológico [14].

O tratamento de resíduos radioativos inclui as operações destinadas a melhorar a segurança ou a economia, alterando as características dos resíduos radioativos. Os conceitos básicos de tratamento são redução de volume, remoção de radionuclídeos e mudança de composição. Exemplos de tais operações são: incineração de resíduos combustíveis ou compactação de resíduos sólidos secos (redução de volume); evaporação, filtração ou troca iônica de fluxos de resíduos líquidos (remoção de radionuclídeos); e precipitação ou floculação de espécies químicas (mudança de composição). Muitas vezes, vários destes processos são

usados em combinação para fornecer uma descontaminação eficaz de um fluxo de resíduos líquidos. Isso pode levar a vários tipos de resíduos radioativos secundários a serem gerenciados [14].

O condicionamento de rejeitos radioativos envolve operações que transformam os rejeitos radioativos em uma forma adequada para manuseio, transporte, armazenamento e descarte. As operações podem incluir a imobilização de resíduos radioativos, a colocação dos resíduos em contêineres e o fornecimento de embalagens adicionais. Os métodos comuns de imobilização consideram a solidificação de resíduos radioativos líquidos, por exemplo, em cimento ou betume, e vitrificação de resíduos radioativos líquidos de alto nível numa matriz de vidro. Os resíduos imobilizados, por sua vez, podem ser acondicionados em contêineres que vão desde tambores de aço comuns de 200 litros até contêineres de paredes espessas altamente projetados, dependendo da natureza dos radionuclídeos e suas concentrações. Em muitos casos, o tratamento e o condicionamento ocorrem em estreita conjunção entre si [14].

O descarte é a etapa final no sistema de gerenciamento de resíduos radioativos. Consiste principalmente na colocação de resíduos radioativos numa instalação de eliminação com garantia razoável de segurança, sem intenção de recuperação e sem dependência de vigilância e manutenção a longo prazo. Esta segurança é conseguida principalmente por concentração e contenção, que envolvem o isolamento de resíduos radioativos, adequadamente condicionados em uma instalação de descarte. O isolamento é alcançado pela colocação de barreiras em torno do lixo radioativo, a fim de restringir a liberação de radionuclídeos no meio ambiente. As barreiras podem ser naturais ou projetadas e um sistema de isolamento pode consistir em uma ou mais barreiras [14].

Um sistema de múltiplas barreiras confere maior garantia de isolamento e ajuda a garantir que qualquer liberação de radionuclídeos para o ambiente ocorrerá a uma taxa aceitavelmente baixa. As barreiras podem fornecer contenção absoluta por um período, como a parede metálica de um contêiner, ou retardar a liberação de materiais radioativos no ambiente, como um aterro ou rocha hospedeira com alta capacidade de absorção. Durante o período em que os resíduos radioativos são contidos pelo sistema de barreiras, os radionuclídeos nos resíduos decairão. O sistema de barreira é projetado de acordo com a opção de eliminação escolhida e as formas de resíduos radioativos envolvidos [14].

Simplificadamente, essas são as etapas envolvidas numa gestão responsável e segura dos rejeitos radioativos, sempre objetivando a salvaguarda da vida humana e a proteção do meio ambiente.

### 2.3.1 Gerenciamento de Rejeitos nas Usinas de Angra 1 e Angra 2

Situadas na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) (Figura 5), o Brasil possui duas usinas nucleares em operação, Angra 1 e Angra 2. A CNAAA, que estão em operação desde o início da década de 80, gerando energia para o desenvolvimento do Estado do Rio de Janeiro, bem como para otimização da malha elétrica do sudeste.

Figura 5 Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto



Fonte: [15]

A Figura 6 traduz de forma simples e esquemática o gerenciamento de rejeitos radioativos da CNAAA.

Figura 6 Gerenciamento de rejeitos radioativos da CNAAA



Fonte: Ref. [16]

Conforme verificado neste trabalho, uma das questões importantes na operação de uma instalação nuclear é o gerenciamento dos resíduos e rejeitos produzidos por este tipo de atividade, que possui total controle, permitindo, assim, uma avaliação dos possíveis impactos ambientais gerados. Via de regra, os rejeitos sólidos produzidos pelas Unidades 1 (Angra 1) e 2 (Angra 2) da CNAAA são classificados como de baixo, médio ou alto nível de radiação, conforme os valores de taxa de dose medidos na superfície dos embalados.

## 2.4 Armazenamento de Rejeitos Radioativos

Apresentada a classificação dos rejeitos radioativos, faz-se necessário estabelecer a sua forma de acondicionamento, já que não podem ser descartados na natureza nem armazenados como lixo comum. O armazenamento dos resíduos radioativos é feito em depósitos, os quais são classificados, basicamente, em quatro tipos diferentes, a saber: depósito inicial, depósito intermediário, depósito final e depósito provisório.

A lei 10.308/01 que estabelece normas para o destino dos rejeitos produzidos em todo o território nacional, dispõe sobre a seleção de local, a construção, o

licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos radioativos. O depósito inicial (Figura 7) é localizado dentro da própria instalação nuclear sendo, sua administração e operação, de responsabilidade da pessoa jurídica titular da instalação. A trajetória seguinte dos rejeitos passa pelo depósito intermediário até ser descartado ou removido ao repositório, ou depósito final. O armazenamento de rejeitos radioativos possui um custo, cuja a responsabilidade é prevista em lei. Diferentemente dos depósitos intermediários e finais, os quais ficarão a cargo da CNEN, todos os custos relativos ao depósito inicial são atribuídos ao titular da instalação geradora de rejeitos [17].

Figura 7 Depósito inicial de rejeitos radioativos



Fonte: Ref. [18]

Os depósitos iniciais encontram-se dentro da instalação geradora de rejeitos e destinam-se a armazenar os rejeitos radioativos gerados durante a operação da instalação. Para casos de acidentes radiológicos ou nucleares, é prevista, excepcionalmente, a construção de depósitos provisórios. Estes dois tipos de depósitos recebem os rejeitos diretamente da fonte geradora, seja ela uma instalação ou uma área onde tenha ocorrido um acidente. Estes depósitos são geridos, normalmente, pela instalação geradora dos rejeitos.

Os depósitos intermediário e final visam receber rejeitos provenientes dos depósitos iniciais e provisórios, devem ser localizados em regiões apropriadas e são

geridos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear. Os rejeitos radioativos de Angra 1 e 2 encontram-se, hoje, em depósitos iniciais e devem ser, oportunamente, transferidos para depósitos intermediários e finais. Antes de serem dispostos nos depósitos, os rejeitos radioativos devem ser acondicionados em embalagens especialmente projetadas para assegurar a proteção dos trabalhadores, da população e do meio ambiente [2].

Caso haja algum acidente com materiais radioativos, os rejeitos provenientes das áreas atingidas, serão armazenados em depósitos intermediários até serem destinados ao depósito definitivo.

Ao contrário do depósito inicial, que é de responsabilidade do gerador do rejeito, tanto o depósito intermediário quanto o definitivo, são de responsabilidade da CNEN.

Toda e qualquer instalação que trabalhe com material radioativo e, conseqüentemente, produza rejeitos deve conter um Plano de Gerenciamento de Rejeitos Radioativos, com a classificação e descrição dos rejeitos, os procedimentos para a coleta, segregação e acondicionamento, o procedimento para depósito inicial e as condições para dispensa e descarte. Todos os rejeitos devem ser registrados e inventariados dentro das instalações responsáveis. A CNEN NN 8.01 estabelece normas para a gerência de rejeitos radioativos, dispondo sobre segregação, embalagens, transporte, armazenamento, tratamento e a dispensa dos rejeitos nucleares, contendo critérios rígidos de controle e monitoramento, baseados em parâmetros estabelecidos pela IAEA, sempre com o objetivo de salvaguardar a vida humana e preservar o meio ambiente [12].

Em atendimento à lei supracitada, a norma CNEN NN 8.02, aprovada pela resolução 168/2014, estabelece os critérios gerais e requisitos básicos de segurança e proteção radiológica relativos ao licenciamento de depósitos iniciais, intermediários e finais de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação. Todos os rejeitos radioativos das Classes 1 e 2 devem ser gerenciados de modo a cumprir os requisitos estabelecidos na referida norma [19].

Antes de serem dispostos nos depósitos, os rejeitos radioativos devem ser acondicionados em embalagens especialmente projetadas para assegurar a proteção dos trabalhadores, da população e do meio ambiente (Figura 8). Embora todos os cuidados em relação à segurança sejam tomados durante a seleção do sítio, e no projeto do depósito que leva em conta as ameaças internas e externas, existe sempre

a possibilidade de que possa vir a ocorrer algum impacto ambiental indesejado. Desta forma, para que se possa detectar qualquer anormalidade ambiental proveniente de uma falha no depósito, faz-se necessário a implantação de um programa de monitoração ambiental. Esse programa possui duas fases principais: a fase pré-operacional, quando se faz a caracterização ambiental do sítio antes que nele sejam depositados rejeitos radioativos, e a fase operacional, quando o depósito abriga os rejeitos a ele destinados.

Figura 8 Armazenamento de rejeitos radioativos em tambores



Fonte: Ref. [20]

A comparação entre os resultados pré-operacionais e operacionais fornece uma medida das alterações ambientais produzidas pelo depósito, o que permite a identificação do eventual problema e a tomada de ações necessárias para corrigir a anomalia. O sistema de depósito de rejeitos deve atender dois objetivos fundamentais: garantir a proteção da população e do meio ambiente no presente e no futuro em relação aos rejeitos radioativos e permitir que a área onde estão os depósitos possa ser usada sem nenhuma restrição daqui a centenas de anos [2].

O processo de gerenciamento de rejeitos radioativos engloba todas as fases do ciclo do combustível, perdura durante toda a fase operacional do reator e deve ser rigorosa observado, controlado e monitorado até o descomissionamento da planta



nuclear. Prova disso é o fato de ter a CNEN reservado, na norma que dispõe sobre o descomissionamento de usinas, disposições específicas de forma a garantir uma gerência eficaz durante o desmantelamento da planta. De acordo com a CNEN NN 9.01, aprovada pela resolução 133/12, a organização operadora deve prover os fundos necessários para garantir o descomissionamento seguro, a gerência de rejeitos radioativos gerados durante esta fase final e a gerência do combustível irradiado. É também responsabilidade da organização operadora a gerência de todo o rejeito radioativo decorrente do descomissionamento, até a sua transferência para um depósito intermediário ou final, entre outras disposições que envolvem o plano de gerência de rejeitos durante toda a fase final de funcionamento de uma planta nuclear [10].

De acordo com orientação da IAEA [21], o armazenamento de resíduos radioativos deve garantir que tanto a saúde humana como o meio ambiente estarão protegidos, tanto agora como no futuro, sem impor encargos indevidos às gerações futuras. No projeto e na operação de instalações de armazenamento de resíduos radioativos, faz-se necessário assegurar a máxima proteção dos trabalhadores, do público e do ambiente, em conformidade com os requisitos e princípios dispostos nas normas internacionais [21].

As doses de radiação para os trabalhadores e o público, em consequência das atividades de armazenamento de resíduos, não devem exceder os limites estabelecidos nas Normas Internacionais Básicas de Segurança para Proteção contra Radiação Ionizante e para a Segurança de Fontes de Radiação. As instalações de armazenamento devem ser projetadas e operadas, de forma a minimizar os níveis de radiação contra os trabalhadores e o público e qualquer falha prevista ou condição de acidente devem ser otimizadas, em conformidade com as referidas normas internacionais de segurança [21].

As descargas para o meio ambiente de instalações de armazenamento devem ser rigorosamente controladas e medidas eficazes de controle devem ser adotadas para limitar a exposição dos trabalhadores, por meio de monitoramento individual e monitoramento da área [21].

Na geração e armazenamento de resíduos, bem como nas etapas subsequentes de gerenciamento, uma cultura de segurança deve ser estimulada e mantida para encorajar uma atitude de questionamento e aprendizado em relação à proteção e segurança e para desencorajar a complacência. O armazenamento de

resíduos deve ser realizado dentro de uma estrutura legal nacional adequada, que propicie uma alocação clara de responsabilidades e garanta o controle regulamentar efetivo das instalações e atividades, a gestão deve ser claramente especificada e funcionalmente separada. Uma única organização não deve receber a responsabilidade operacional e regulatória pela gestão de resíduos [21].

A CNAAA possui três depósitos iniciais de rejeitos de baixo e médio níveis de radiação (Depósitos 1, 2 e 3), devidamente licenciados pelo Ibama e pela CNEN, que compõem seu Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR), localizado no próprio sítio da Central Nuclear. Esses depósitos têm capacidade suficiente para armazenar de forma segura, ou seja, isolados do público e do meio ambiente, todos os rejeitos de baixo e médio níveis de radiação produzidos pela operação e manutenção das usinas Angra 1, Angra 2 e Angra 3 até 2025 [16].

Para o armazenamento de rejeitos de Angra 1, usa-se o Centro de Gerenciamento de Rejeitos – CGR, as usinas produzem rejeitos de baixa e média atividade, equipamentos de proteção, vestuário e a própria água de resfriamento utilizada no reator, são considerados rejeitos. Já os combustíveis podem ser considerados rejeitos (ou não) a depender da forma como for tratado. Combustíveis podem ser reprocessados e retornar para o reator, não podendo ser encarado, neste caso, como simples rejeito. Exige-se reflexão a respeito do reprocessamento do combustível, pois o processo é complexo e, por muitas vezes, não se torna viável economicamente. Como no Brasil não há reprocessamento do combustível irradiado, considera-se um rejeito de alta atividade. Enquanto isso é armazenado em piscinas de armazenamento com água de resfriamento, que possui uma dupla finalidade, funcionar como uma barreira contra a radiação e retirar o calor residual presente no combustível [2].

Em Angra 1 (Figura 9), o combustível usado é armazenado numa piscina que está localizada no edifício do combustível na própria Usina. Os rejeitos radioativos de médio e baixo níveis de radiação estão sendo armazenados nos Depósitos Iniciais do CGR. Já em Angra 2 (Figura 10), o combustível usado é armazenado numa piscina que está localizada no edifício do reator na própria Usina. Atualmente, os rejeitos de médio e baixo níveis de radiação gerados por Angra 2 estão armazenados em local específico no interior da Usina. Devido ao pequeno volume gerado por Angra 2, ainda não há necessidade da remoção desses rejeitos para os depósitos do CGR. O gerenciamento inicial de rejeitos radioativos de Angra 3 será da mesma forma que

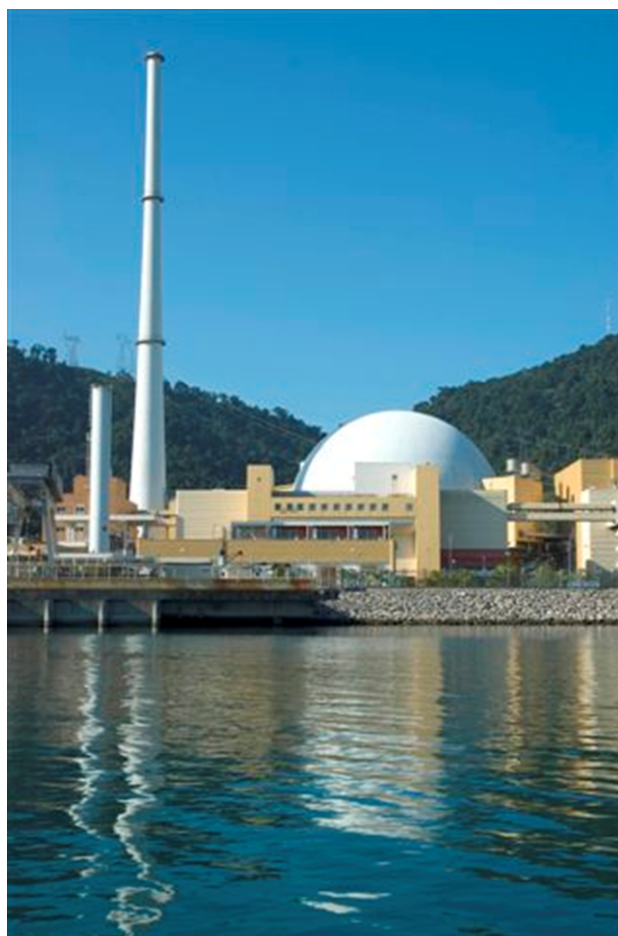
Angra 2, devido à similaridade do projeto conceitual existente entre ambas. O processo utilizado para o seu tratamento será a solidificação com a utilização de betume, com prévia estocagem dentro da própria Usina nos primeiros anos de operação e posterior transferência para o CGR e, no futuro, para um depósito definitivo [16].

Figura 9 Angra 1



Fonte:Ref. [22]

Figura 10 Angra 2



Fonte: Ref. [15]

Os depósitos das usinas consistem em galpões de concreto e no interior dos galpões são armazenados os resíduos de baixa atividade, dentro de tambores metálicos. Já para os resíduos de alta radioatividade, formados pelos elementos combustíveis, por possuírem uma meia-vida muito longa, dispensa-se um tratamento muito mais cuidadoso. Os elementos combustíveis irradiados são armazenados em piscina de resfriamento (Figura 11 e Figura 12). Diferentemente de Angra I, em Angra II foi construída uma piscina dentro do reator, mas em ambas instalações os resíduos são mantidos submersos a mais de dez metros de profundidade, tendo a água como blindagem radiológica.

Figura 11 Piscina de resfriamento de rejeitos de Angra 1



Fonte: Ref. [20]

Figura 12 Piscina de armazenamento de combustível irradiado



Fonte: Ref. [20]

Os rejeitos de médio e baixo níveis de radiação (Figura 13) são armazenados em embalagens metálicas, tambores, a partir de um processo de solidificação, transferidos para o depósito inicial localizado dentro da própria CNAAA e monitorados constantemente pela equipe de proteção radiológica, especialistas em segurança nuclear. O CNAAA possui três depósitos iniciais de rejeitos de baixo e médio níveis

de radiação, com aproximadamente 1000 m<sup>2</sup> cada um, compondo o Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR), os embalados são manuseados por empilhadeiras e transportados até o CGR por meio de caminhões. O cimento é amplamente usado, desde o início da indústria nuclear, para a imobilização de rejeitos radioativos de níveis baixo e médio por causa da segurança oferecida, custo baixo e pela simplicidade do processo de cimentação.

Figura 13 Monitoramento da radiação dos embalados de rejeitos de médio e baixo níveis de radiação



Fonte: Ref. [20]

## 2.5 Rejeitos Radioativos e Aceitação Pública

Outro grande desafio presente nos dias atuais, envolvendo a atividade nuclear, é a questão da aceitação pública. O termo radiação nos remete, diretamente, à energia nuclear causando um certo temor perante a sociedade, a respeito das suas consequências para a saúde [23]. Talvez por desconhecimento total, tanto sobre os benefícios quanto sobre os malefícios, a verdade é que ainda é um tema que enfrenta pouca aceitação social. As radiações advindas da energia nuclear, apesar de mais temidas, envolvem riscos graves somente se forem utilizadas de maneira incorreta e displicente, pois, em geral, contribuem potencialmente para a melhoria da vida humana. Estudos comprovam que os riscos de mortalidade no trabalho e os riscos imediatos ao público são maiores quando advindos de fontes distintas da energia nuclear como, por exemplo, carvão, petróleo e gás [23].

Geralmente, essa aceitação por parte da sociedade se torna mais fácil em localidades próximas às usinas existentes, pois a conscientização do público e a familiarização com a tecnologia tornam esse relacionamento mais fácil, fazendo parte do cotidiano dos que residem ao seu redor. De forma distinta, essa aceitação pública já não se faz muito presente em regiões mais distantes, em virtude do desconhecimento e da imagem negativa acerca dos riscos envolvidos. Não se beneficiam, diretamente, das vantagens fornecidas por uma usina nuclear e, apesar da popularidade e do entendimento em relação à tecnologia nuclear, a aceitação social ainda constitui um forte limitador para o seu potencial crescimento [23].

A sociedade ainda associa a energia nuclear ao temor de uma guerra, uma bomba, doenças graves resultantes da radiação, câncer, enfim, são expressões que ainda geram o que alguns chamam de “risco apavorante”, principalmente entre gerações mais antigas, que assistiram o mundo sofrer com as consequências do uso irresponsável da tecnologia nuclear, no passado [23]. Conscientizar o público mais jovem, explicar-lhe todos os benefícios que decorrem da energia nuclear e mostrar-lhe o quanto a utilização da energia nuclear pode ser segura caso seja utilizada de forma correta e responsável é fundamental para o crescimento do setor nuclear. Entender a energia nuclear como uma atividade normal, com seus riscos intrínsecos, onde pessoas comuns trabalham em prol das necessidades da sociedade é crucial para o desenvolvimento das usinas nucleares. Trabalhar a conscientização do público sobre a radiação, seus verdadeiros riscos, fará com que a sociedade conviva, mais facilmente, com a energia nuclear [23].

### 3 LABGENE

Pertencente ao Programa Nuclear da Marinha (PNM) e projetado para servir de protótipo do Submarino Nuclear Brasileiro (SN-BR), o Laboratório de Geração de Energia Nucleoelétrica (LABGENE) situa-se no Centro Industrial Nuclear de Aramar (CINA), em Iperó (SP) (Figura 14 e Figura 15).

O LABGENE foi projetado para garantir meios adequados de controlar a liberação de materiais radioativos, presentes em efluente líquidos e gasosos e também no manuseio de rejeitos sólidos, produzidos durante a operação normal do reator e, ainda, capaz de armazenar materiais radioativos quando em condições ambientais desfavoráveis e que imponham limitações operacionais não usuais à liberação desses efluentes para o meio ambiente [24].

Figura 14 LABGENE em construção



Fonte: Produção própria (imagem do Departamento de Construção Civil - CTMSP)



Figura 15 Blocos 30 e 40 do LABGENE



Fonte: Produção própria (imagem do Departamento de Construção Civil - CTMSP)

De forma semelhante às usinas nucleares, o LABGENE, conforme previsto na planta do Sistema de Processamento de Rejeitos Radioativos Sólidos (SPRS), armazena os resíduos em tambores metálicos com capacidade de 200 litros, através de um sistema de cimentação, responsável pela solidificação do material. A câmara de cimentação é o local onde ocorre a mistura, devendo cumprir as características de blindagem e confinamento. O manuseio dos tambores da câmara de cimentação é realizado por três garras suspensas e, após o processamento dos rejeitos na câmara, os tambores são enviados para uma área de monitoração e descontaminação de embalagens, onde serão monitorados quanto ao nível de radiação e contaminação da superfície externa.

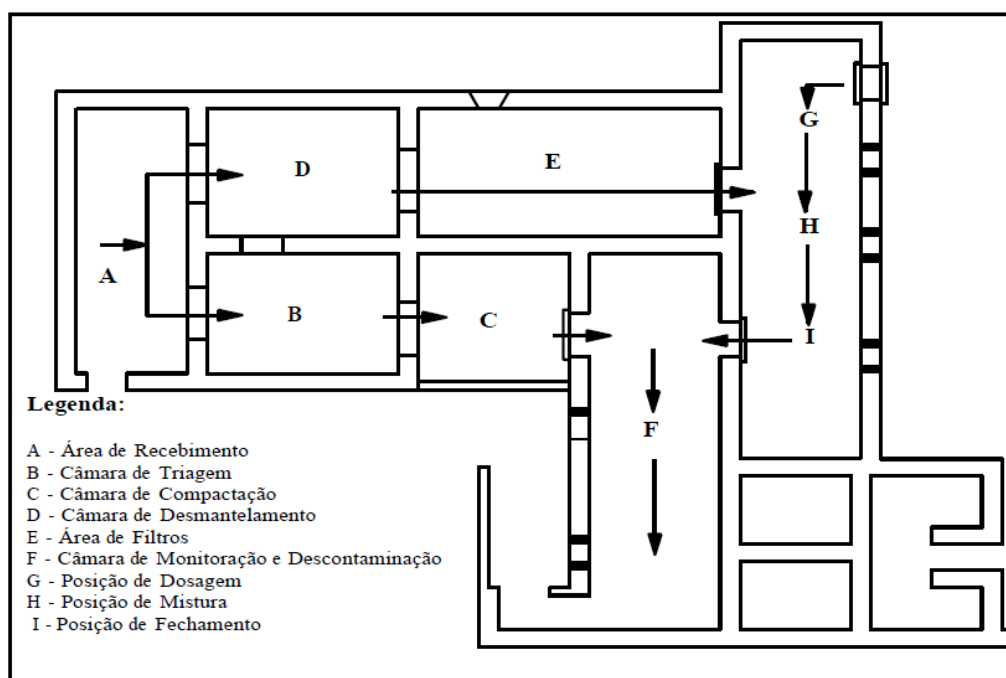
### **3.1 Sistema de Processamento de Rejeitos Radioativos Sólidos (SPRS)**

Para o processamento de rejeitos radioativos do tipo sólido secos, tais como papéis, panos, equipamentos de proteção individual, plásticos, borrachas, itens metálicos e filtros em geral estão previstos os processos de compactação e de encapsulamento. Também fazem parte do sistema mais duas operações denominadas de triagem e desmantelamento (fragmentação). Há também as

operações de apoio, de recebimento de rejeitos e monitoração/descontaminação dos tambores [25].

Desta forma o processamento de rejeitos sólidos constitui-se no que se denomina de Sistema Integrado (Figura 16), formado pela área de recebimento, câmara de desmantelamento, área de triagem, área de compactação, área de filtros, área da máquina de trocar filtros e a câmara para monitoração e descontaminação dos tambores. As áreas que circundam as áreas de processamento são denominadas de áreas de operação de onde o operador acompanha e comanda os processos [25].

Figura 16 Arranjo do Grupo de Mistura e do Sistema Integrado para Processamento de Rejeitos Radioativos Sólidos



Fonte: Ref. [24]

A condição básica para se integrar as operações está no estabelecimento de um arranjo das áreas envolvidas com interligações diretas entre elas, existindo uma única área de recebimento de rejeitos e uma única área de monitoração e descontaminação de tambores. Qualquer sólido que entre numa das áreas de processamento só sai após estar corretamente processado e acondicionado em tambores metálicos de 200 litros, isto minimiza as doses de radiação recebidas pelos operadores e a dispersão de contaminação devida à otimização dada ao manuseio do rejeito [25].

O SPRS tem por função processar todos os rejeitos sólidos gerados nas instalações do LABGENE que sejam potencialmente radioativos e que requeiram solidificação [24].

Para que o processamento ocorra de forma adequada e dentro dos padrões de qualidade almejados, os rejeitos serão processados de forma segregada. A segregação já será feita no local de geração, considerando dois tipos básicos de rejeitos, rejeitos sólidos secos e rejeitos sólidos úmidos [24].

Os rejeitos sólidos úmidos incluem, em termos gerais filtros úmidos tipo cartucho, concentrados e lamas radioativas, ambos provenientes do SPRL e resinas de troca iônica [24].

Os rejeitos sólidos secos são papéis, panos, equipamentos de proteção individual, plásticos, borrachas, itens metálicos e filtros em geral [24].

Para ambos os tipos de rejeitos estão previstos os processos de compactação, encapsulamento e cimentação. Antes destas etapas, os rejeitos passam pelas etapas iniciais de recebimento, triagem, desmantelamento, operações de apoio, e finalizando o processo, a etapa de monitoração e descontaminação dos embalados produzidos [24].

As etapas mencionadas consistem nos subsistemas de recebimento de rejeitos, triagem, cimentação, compactação, encapsulamento, desmantelamento, área de filtros e monitoração e descontaminação de tambores. Os subsistemas de triagem, compactação, encapsulamento e desmantelamento estão interligados de forma que todos os rejeitos radioativos sólidos secos sejam adequadamente processados e embalados em tambores metálicos de 200 litros [24].

Os rejeitos radioativos advindos da área de recebimento são recebidos na área de triagem ou na câmara de desmantelamento de forma a separar o rejeito compactável do não compactável para que ambos possam ser coletados nos tambores para o processamento. São rejeitos compactáveis, papéis, roupas, equipamentos de proteção individual, plásticos, vidros isentos de líquido, borracha e elementos filtrantes. Por outro lado, pequenas peças, sucata, entulho, vidro, filtro úmido, estrutura de filtro e madeira, por exemplo, são rejeitos não compactáveis e que serão encapsulados. Os rejeitos triados e/ou desmantelados são, então, processados ou por compactação, gerando um volume de rejeito prensado dentro de um tambor de 200 litros, ou por encapsulamento, gerando um volume de rejeito fixado num bloco de cimento, também em tambores de 200 litros [25].

O Subsistema de Triagem é constituído por uma caixa de luvas (câmara de triagem) onde os rejeitos são previamente monitorados quanto a compatibilidade radiológica com o processo de triagem ou compactação. A triagem é realizada em regime de batelada em conjunto com o processamento do rejeito pela Compactação. [24].

O rejeito radioativo sólido seco é encaminhado das áreas de armazenamento, para decaimento radioativo dos radionuclídeos de meias-vidas curtas ( $T_{1/2} < 8$  dias), para a área de recebimento, acondicionados em sacos plásticos e dentro de tambores metálicos de 200 litros sem blindagem. Nesta etapa, o operador trabalha posicionado no corredor de operação. Na área de triagem, inicialmente, os sacos são abertos através de operação manual, com o operador utilizando luvas de proteção de borracha. Em seguida, retira-se os rejeitos radioativos dos sacos, que serão triados, sendo segregados aqueles incompatíveis com o processo devido às suas características físicas e químicas. A compatibilidade radiológica está definida pela monitoração na saída da área de armazenamento [21].

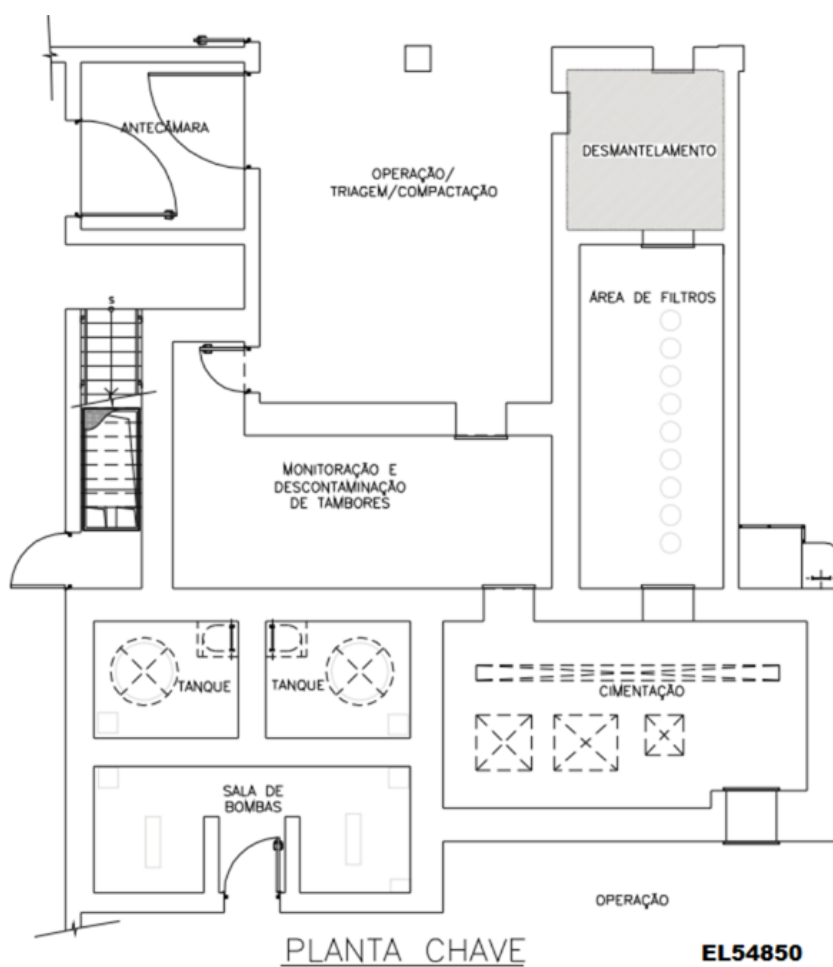
As etapas operacionais do Sistema Integrado são abrangidas pela compactação, encapsulamento de não compactáveis, encapsulamento de filtros úmidos, encapsulamento de não-desmanteláveis e monitoração e descontaminação (Figura 17) [25].

O Subsistema de Compactação é composto pela área de compactação e seus respectivos equipamentos, possuindo uma prensa hidráulica que atua em um ambiente fechado, com exaustão local (Figura 18) [24].

O rejeito radioativo é comprimido dentro de tambores metálicos com volume nominal de 200 litros, até completar um volume ocupado de 90% do nominal. Para evitar a recuperação elástica do rejeito compactado, podem ser empregados discos de compactação, com diâmetro pouco maior que o diâmetro interno do tambor [24].

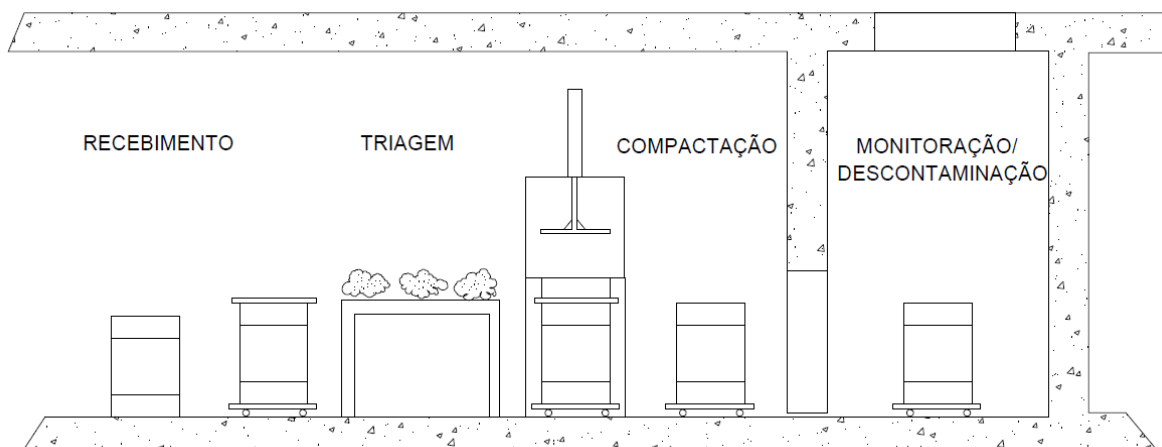
Após o enchimento, o tambor será tampado e encaminhado para o subsistema de monitoração e descontaminação, para ser monitorado quanto ao nível de radiação e contaminação superficial. Em caso de contaminação superficial, o tambor será descontaminado e novamente monitorado, de forma a garantir a concordância com os requisitos para encaminhamento ao armazenamento [24].

Figura 17 Arranjo das áreas de processamento



Fonte: [25]

Figura 18 Sequência operacional da compactação



Fonte: Ref. [25]

O tambor de encapsulamento poderá receber para processamento:

- os rejeitos segregados e fragmentados na câmara de desmantelamento;
- os rejeitos gerados por operações da área de descontaminação e oficina mecânica quente;
- os rejeitos segregados na triagem como não compactáveis;
- os rejeitos gerados em operações de manutenção, coletados diretamente no tambor de encapsulamento, devido ao seu maior nível de radiação.

Os rejeitos radioativos sólidos considerados não compactáveis devem ser enviados para encapsulamento, são gerados na segregação realizada na área de triagem e nas operações de desmantelamento e fragmentação dos rejeitos sólidos secos. São encapsulados por não haver compatibilidade com a compactação ou por terem sido caracterizados como sendo de médio ou alto nível de radiação [25].

Os rejeitos desmantelados, principalmente os módulos de elementos filtrantes dos sistemas de ventilação geram, também, rejeitos compactáveis e se o nível de atividade for compatível com a triagem e compactação, os rejeitos desmantelados compactáveis são enviados para a área de triagem e seguem a rotina prevista para a compactação [25].

Desta forma, o encapsulamento consiste basicamente no processamento de rejeitos não compactáveis advindos da área de desmantelamento, filtros úmidos provenientes da área de filtros e rejeitos que não necessitam de desmantelamento e são coletados diretamente em tambores [24].

Os rejeitos encapsuláveis são transferidos para o tambor de encapsulamento posicionado sob a câmara de desmantelamento. O tambor cheio com estes rejeitos é transferido para ser encapsulado e depois levado para área de monitoração e descontaminação e por fim, para área de armazenagem do Prédio Auxiliar Controlado (PAC) (Figura 19) [24].

Figura 19 Prédio Auxiliar Controlado do LABGENE



Fonte: Produção própria (imagem do Departamento de Construção Civil - CTMSP)

Os tambores contendo rejeitos que não necessitam de desmantelamento são enviados para o armazenamento para que ocorra o decaimento radioativo e posteriormente enviados para o subsistema de cimentação [24].

O Tambor de 200 litros após estar cheio com rejeito radioativo não compactável fragmentado é conduzido pelo carro da área de filtros da câmara de desmantelamento para o grupo de mistura, atravessando a área de filtros, onde se faz o encapsulamento dos rejeitos com pasta de cimento. Toda a operação é comandada pelo operador que acompanha o trabalho através de visores à base de chumbo. O operador controla a operação através do painel auxiliar situado na área de operação [25].

Há rejeitos radioativos que serão encapsulados sem necessidade de serem desmantelados, que serão coletados nos pontos de geração dentro de sacos plásticos e colocados em tambores de 200 litros. Seguem para a área de armazenamento para decaimento radioativo até a hora de encapsulamento quando, então, serão conduzidos nos tambores de 200 litros até a área de recebimento.

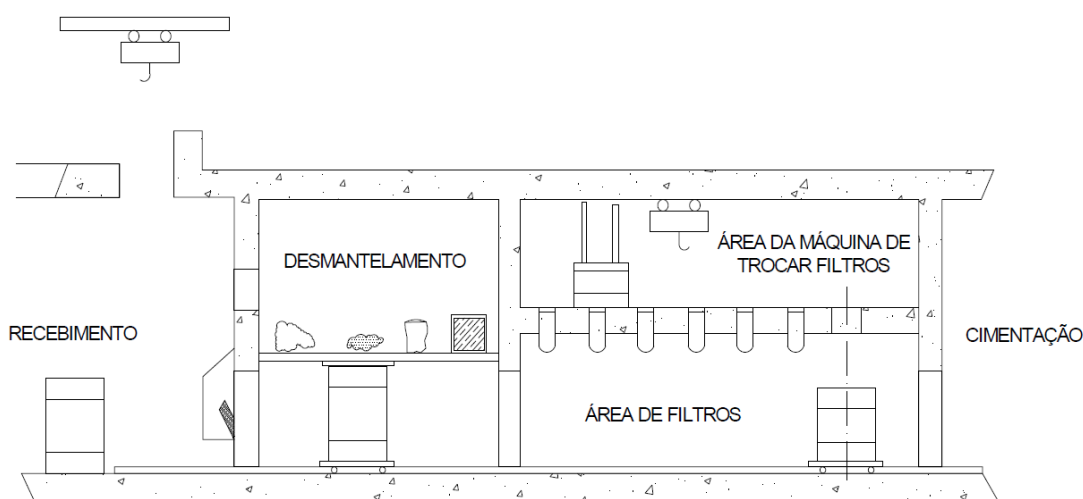
No interior da câmara de desmantelamento os rejeitos são retirados dos sacos plásticos, colocados em um tambor de encapsulamento e encaminhados para grupo de mistura.

As áreas de desmantelamento e de filtros necessitam de paredes blindadas e visores à base de chumbo para que sejam respeitados os requisitos da radioproteção quanto a exposição do operador à radiação. Devem ser projetados de modo a garantir um limite de dose no corredor de operação igual a 1 milirem/hora.

Nas áreas de triagem e de compactação são manuseados os rejeitos considerados de baixo nível de radiação, portanto, estas não requerem paredes blindadas e visores com vidros plúmbicos. A parede entre a área de triagem e desmantelamento requer espessura especial de blindagem.

Os tambores com rejeitos compactados e encapsulados serão manuseados nas áreas de processamento sem blindagens externas, na área de processamento de rejeitos a serem compactados, o manuseio dos mesmos é feito com o uso de luvas longas de borracha (Figura 20).

Figura 20 Sequência operacional do encapsulamento



Fonte: Ref. [25]

Conforme supramencionado o SPRS é composto pelo sistema integrado, formado pelas áreas de triagem, compactação, desmantelamento e encapsulamento, e pelo grupo de mistura que realiza a imobilização dos rejeitos em tambores com matriz de cimento, num processo que ocorre em célula isolada e blindada com manuseio remoto e observação visual. Além de processar rejeitos metálicos



desmantelados, participa do processo de cimentação de rejeitos líquidos. Quando o grupo de mistura estiver processando os rejeitos líquidos, não estará realizando o encapsulamento de rejeitos sólidos.

O Grupo de mistura está dentro de uma célula isolada e blindada com exaustão e filtragem de ar, sendo o acesso às operações por meio de equipamentos de manuseio remoto, com observação visual através de janelas blindadas. Os equipamentos do SPRS estão dispostos em salas enclausuradas, individuais ou em grupos de equipamentos semelhantes, e em salas com acesso restrito (porta travada) de modo a minimizar a exposição dos operadores à radiação. A compartimentação das áreas do SPRS prevê a utilização de corredores de operação e salas de operação de válvulas de baixo nível de radiação, de modo que os operadores não necessitam entrar em contato direto com os equipamentos de processo durante as etapas de operação normal do sistema e durante as etapas de manutenção preventiva e corretiva. O projeto assegura a manutenção dos níveis de exposição à radiação tão baixo quanto razoavelmente exequível (ALARA) [24]

A operação do subsistema de cimentação do SPRS é iniciada sempre que um dos tipos de rejeitos atinge o volume definido para a batelada de operação, que gera, em média, 30 tambores com rejeitos processados e que, após o processamento, serão encaminhados para a área de armazenamento interno do PAC [26].

Independentemente do tipo de rejeito as bateladas seguem sempre uma mesma sequência de processamento [26]:

1. Entrada do tambor vazio
2. Transferência do tambor para a posição de dosagem de rejeito
3. Dosagem do rejeito
4. Transferência do tambor para a posição de mistura
5. Dosagem da pasta de cimento
6. Mistura
7. Vibração para adensamento
8. Transferência do tambor para a posição de fechamento
9. Fechamento do tambor
10. Encaminhamento do tambor para câmara de monitoração e descontaminação

Para a translação do tambor na câmara de cimentação são utilizados como equipamentos principais três garras e o equipamento de movimentação de tambores,

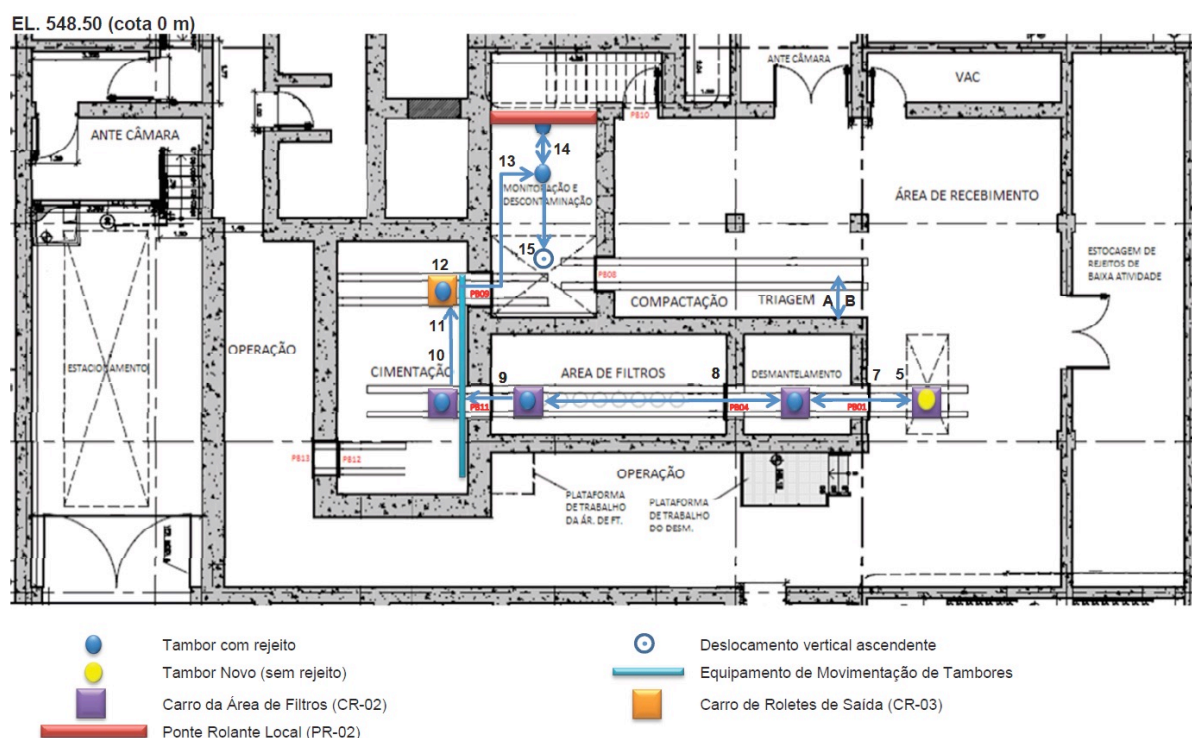
que ocorre sobre uma pista de roletes livres, sem acionamento, diminuindo o atrito e facilitando a movimentação [26].

### 3.2 Transportador de Roletes

A finalidade do transportador de roletes será propiciar a movimentação dos tambores metálicos, desde a entrada até a saída da câmara de cimentação, passando por todas as etapas do processo. O sistema de transportador de roletes é constituído pelo carro de roletes, pela pista de roletes livres, pelo carro da área de filtros e pelo carro de roletes da saída. Os possíveis caminhos percorridos pelo tambor até ingressar na câmara de cimentação são bem ilustrados pela Figura 21 e pela Figura 22 [27].

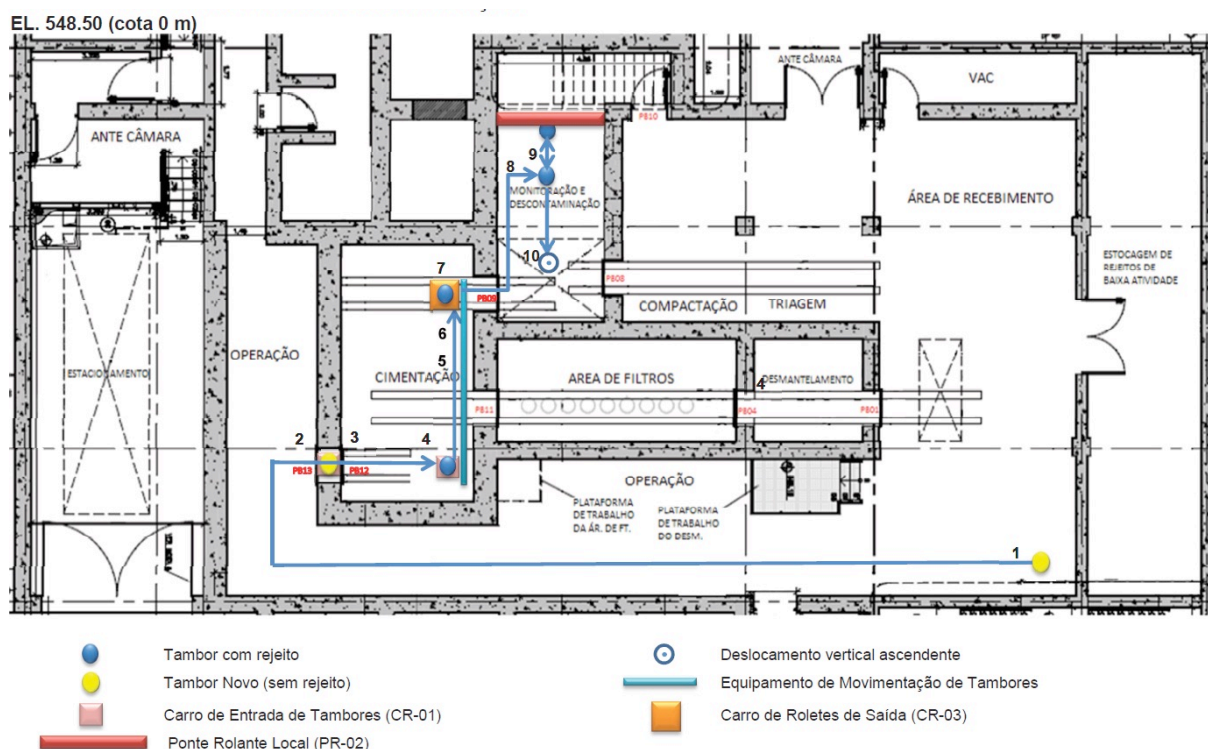
Os carros de roletes da entrada, da área de filtros e da saída são acionados eletricamente e possuem a função de efetuar o transporte para a entrada e saída da câmara de cimentação, respectivamente [28].

Figura 21 Rota operacional do encapsulamento



Fonte: Ref. [27]

Figura 22 Rota operacional da cimentação



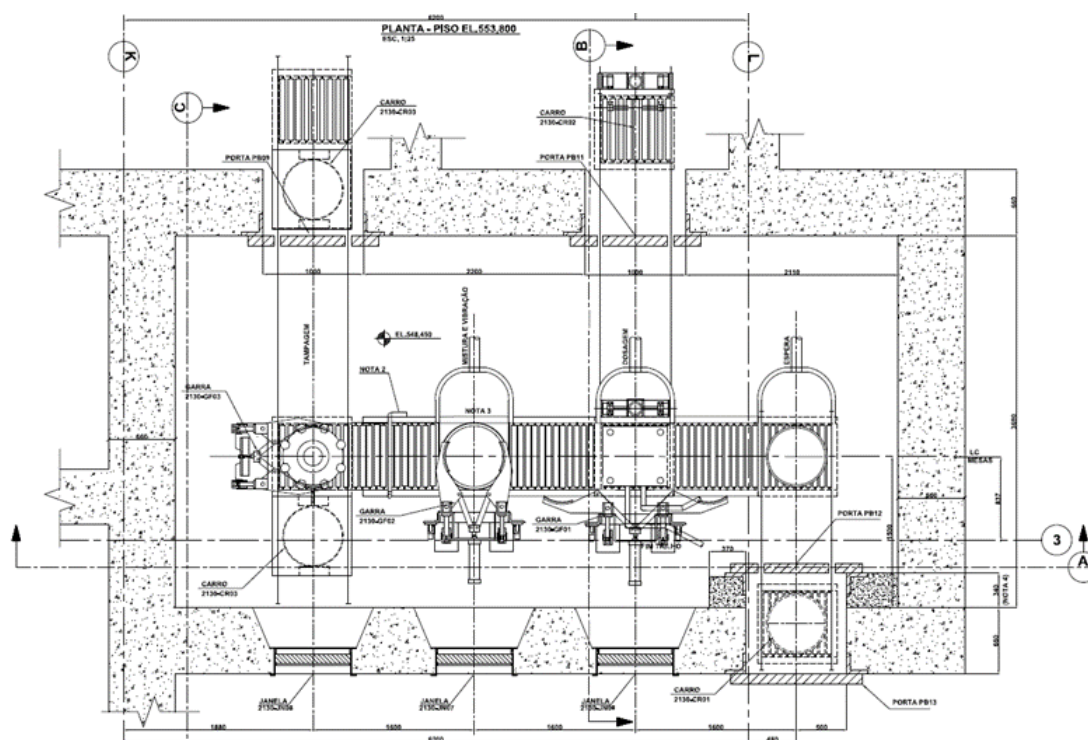
Fonte: Ref. [27]

O transportador de roletes (Figura 23), assim como todo o grupo de mistura, localizar-se-á dentro de uma câmara blindada e isolada, conectada ao sistema de ventilação do PAC, devido à potencialidade de contaminação radioativa do ar local [28].

A pista de roletes livres tem a função de permitir o deslocamento dos tambores no interior da câmara, ao longo das etapas do processo de cimentação, dosagem, mistura, vibração e tampagem. A pista de roletes não possui acionamento elétrico e a movimentação dos tambores sobre a pista é efetuada pelo equipamento de movimentação de tambores [28].

O carro de roletes da entrada avança até se acoplar à pista de roletes livres, instalando-se na posição de espera. Os garfos do equipamento de movimentação fixam-se ao tambor, transportando-o até as posições subsequentes, dosagem, mistura e vibração, e tampagem, respectivamente [28].

Figura 23 Transportador de Roletes



Fonte: Ref. [29]

### 3.3 Equipamento de Movimentação de Tambores (EMT)

O EMT possui a finalidade de movimentar os tambores metálicos de 200 litros sobre a pista de roletas livres, ao longo das etapas de cimentação, no interior da câmara de cimentação do grupo de mistura, constituído de três garfos, três carros de movimentação interligados e três cilindros pneumáticos de acionamento dos garfos, além de três garras de fixação que se acoplam aos tambores nas posições de dosagem, mistura e vibração, e tampagem [30].

Inicialmente o EMT encontra-se posicionado com o garfo nº 1 alinhado com a posição de espera da pista de roletas livres, o garfo nº 2 alinhado com a posição de dosagem de rejeito e o garfo nº 3 alinhado com a posição de mistura e vibração. A introdução na pista de roletas livres é feita pelo carro transportador. Após o correto alinhamento dos tambores com as respectivas posições de operação, os garfos desacoplam-se dos mesmos através de atuação de cilindros pneumáticos e o EMT retorna à posição inicial, tudo acionado pelo operador através do painel local do grupo de mistura [30].

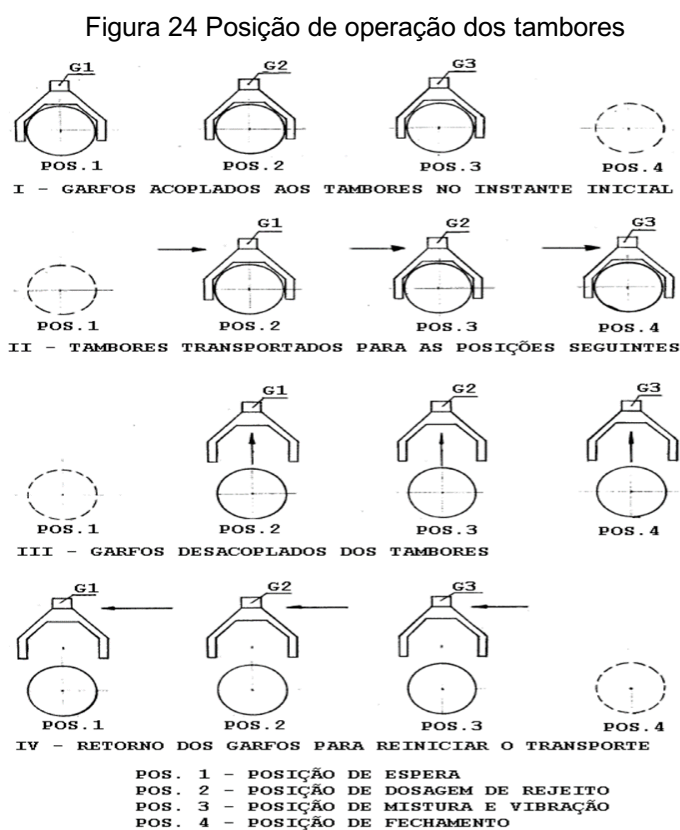
Conforme ilustrado na Figura 24 há quatro posições para os tambores no interior da câmara, a saber: a posição 1, chamada de espera, e de onde vem os

tambores provenientes do Sistema de Processamento de Rejeitos Radioativos líquidos (SPRL) para cimentação; a posição 2, onde ocorre a dosagem do rejeito, a posição 3, momento de mistura e vibração e, por fim, a posição 4, onde ocorrerá o fechamento do tambor [30].

Os garfos funcionam suspensos na câmara de cimentação, fixados aos carros de movimentação localizados no compartimento de montagem e manutenção, acima da referida câmara. A fixação dos garfos é feita através de eixos, em olhais pertencentes aos carros de movimentação e os cilindros pneumáticos, quando acionados, promovem o giro de cada garfo ao redor do seu eixo de fixação ao olhal, efetuando acoplamento ou desacoplamento ao tambor [30].

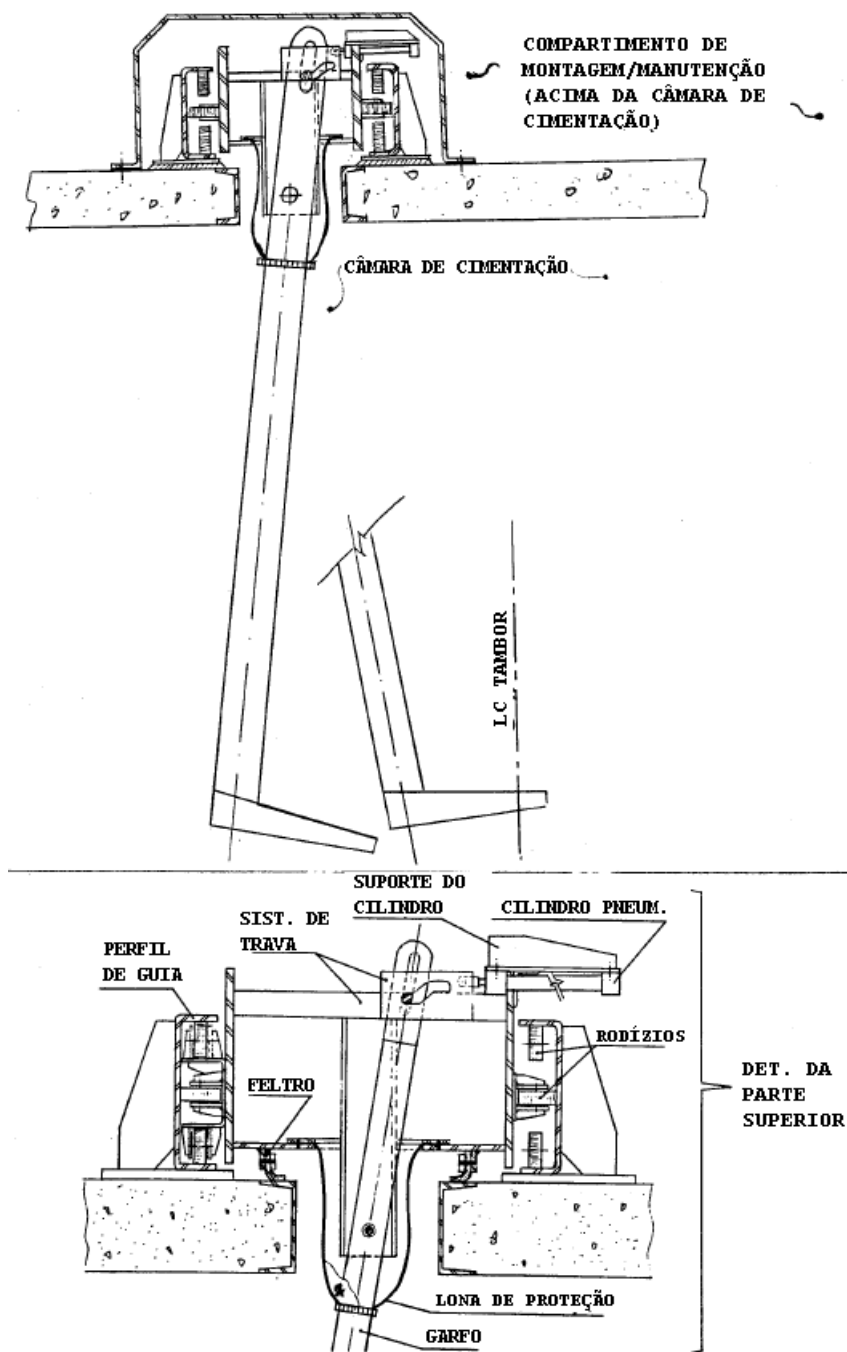
Por segurança, há previsão de travas para garantir que os garfos permaneçam desacoplados dos tambores durante a parada do grupo de mistura e durante as operações de cimentação dos rejeitos radioativos. As travas são acionadas pelos próprios cilindros pneumáticos de acionamento dos garfos [30].

A Figura 25 e a Figura 26 ilustram a vista frontal do EMT, demonstrando o compartimento de montagem e manutenção, acima da câmara de cimentação, bem como o detalhamento do sistema de funcionamento das travas dos garfos [30].



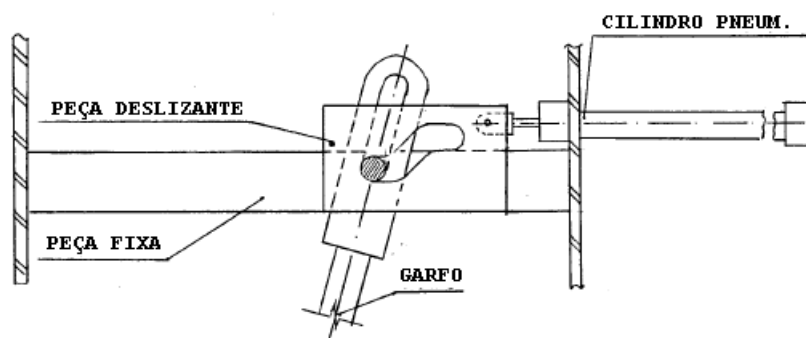
Fonte: Ref. [30]

Figura 25 Vista frontal do EMT

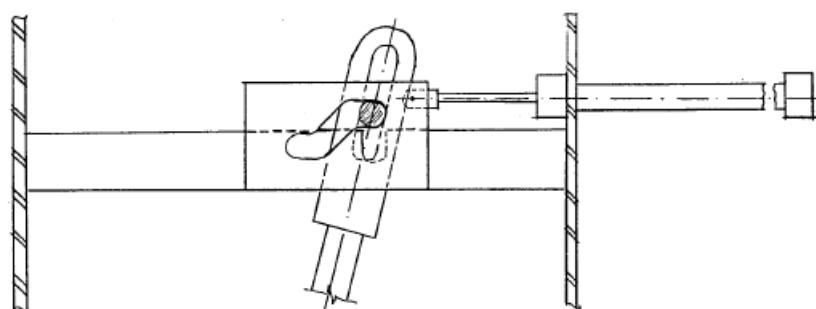


Fonte: Ref. [30]

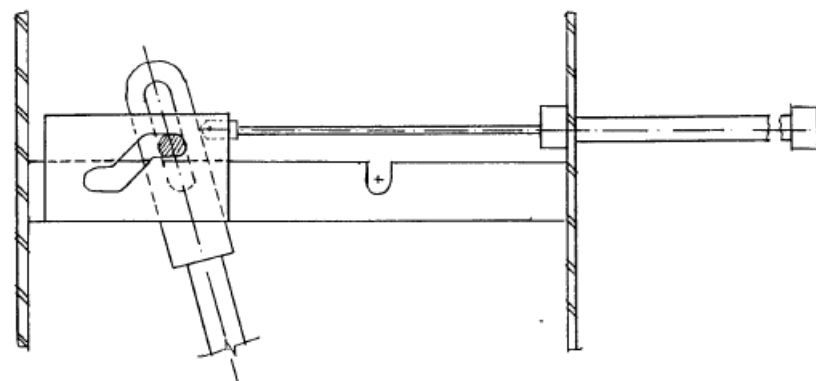
Figura 26 Detalhamento do sistema de travamento dos garfos



1 - GARFO TRAVADO (DESCOPLADO DO TAMBOR)



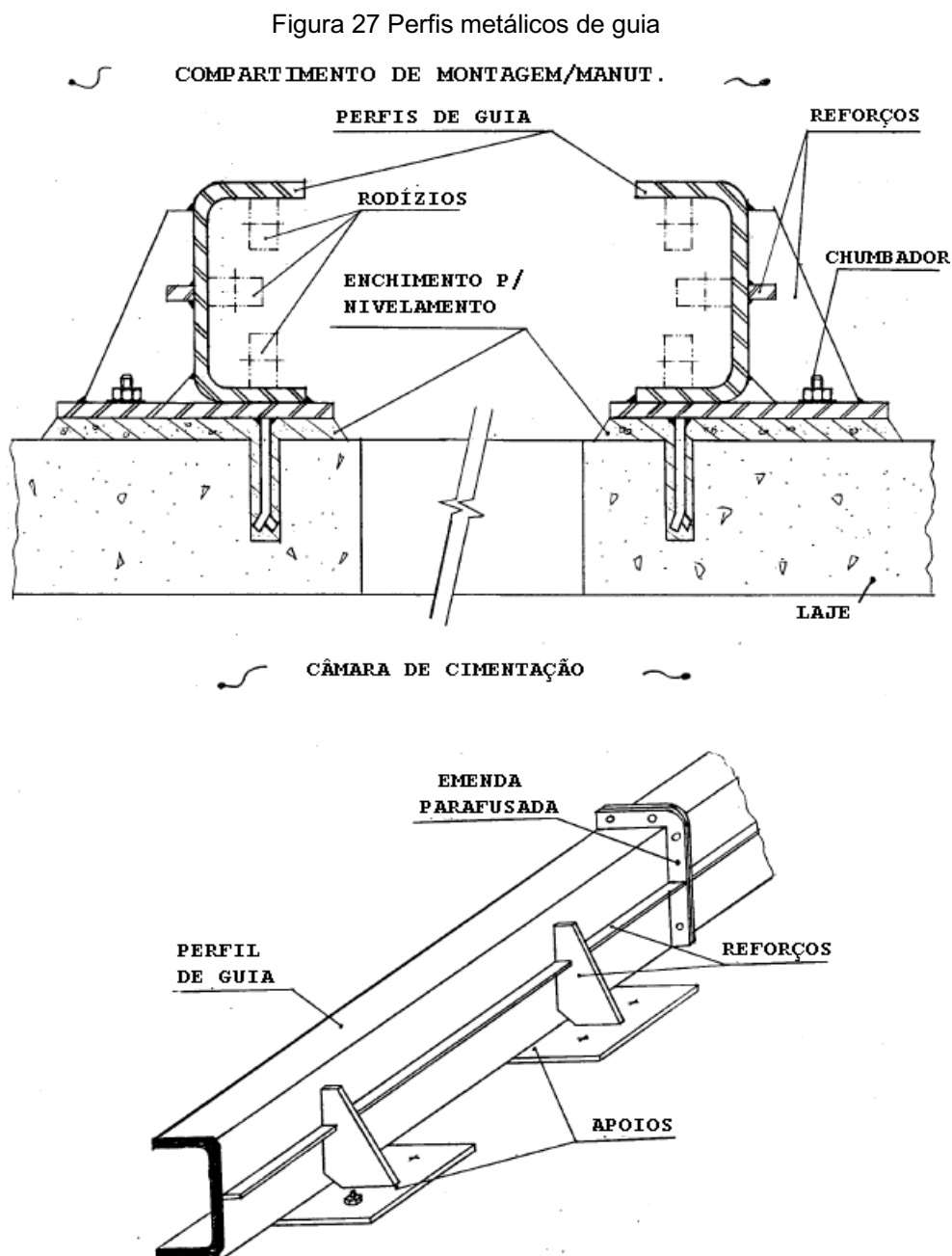
2 - MOVIMENTO DO CILINDRO DESTRAVANDO O GARFO



3 - MOVIMENTO DO CILINDRO ACOPLANDO O GARFO AO TAMBOR

Fonte: Ref. [30]

Os três carros metálicos, responsáveis pela movimentação dos garfos suspensos, são interligados através de perfis metálicos aparafusados às suas estruturas e movimentam-se no interior de perfis metálicos de guia, ilustrados na Figura 27 e localizados no compartimento de montagem/manutenção [30].



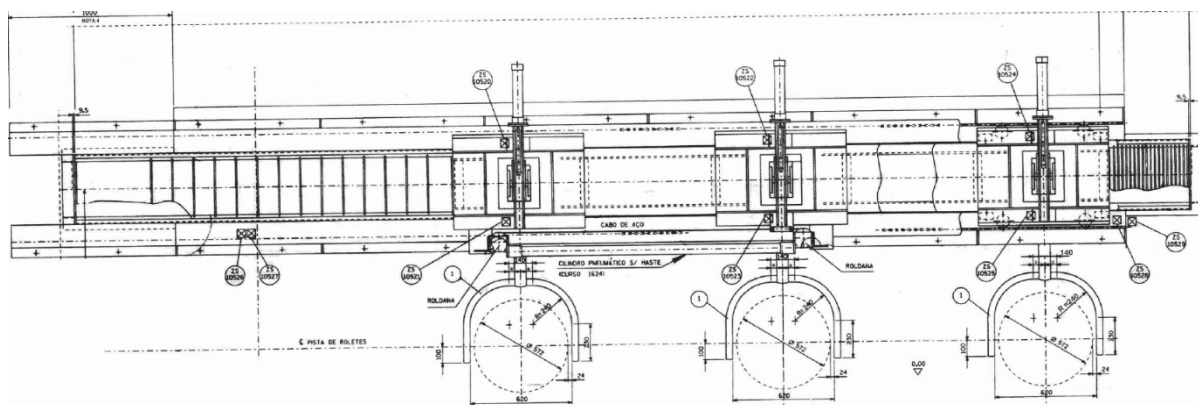
Fonte: Ref. [30]



Conforme demonstrado na Figura 28 há três carros interligados, acionados por cilindros pneumáticos e que são responsáveis pela movimentação dos três garfos que movimentarão os tambores entre as quatro posições supracitadas.

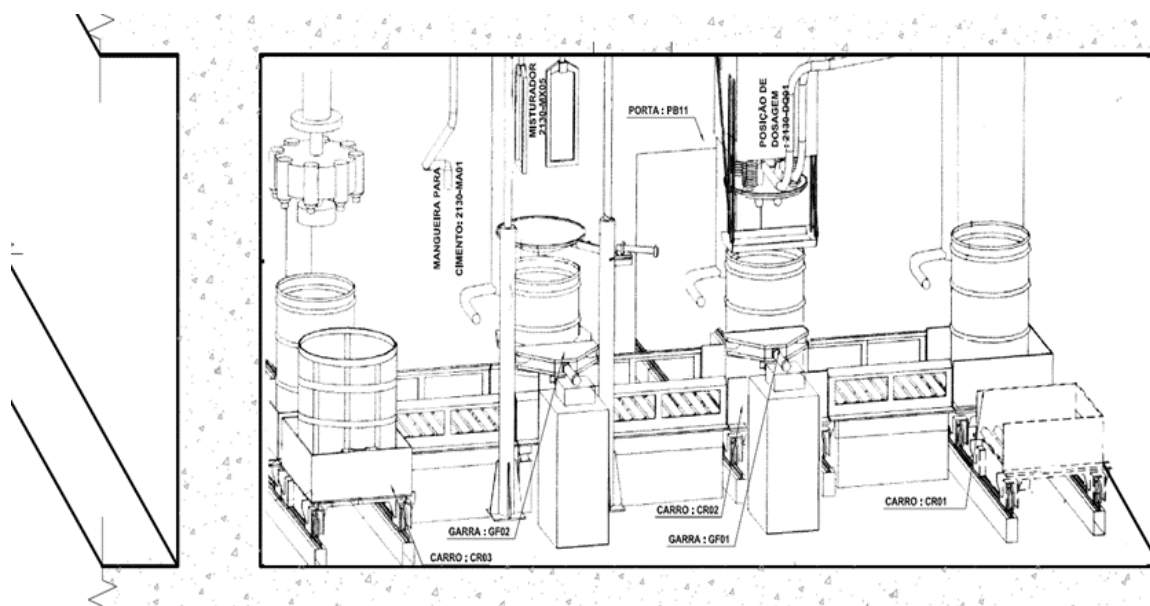
Desta forma, os carros de roletes e o equipamento de movimentação de tambores compõem todo o sistema de funcionamento da câmara de cimentação (Figura 29). Além do EMT, integrado pelos três garfos que movimentam tambores, pelos três carros de movimentação dos garfos e pelos quatro cilindros de acionamento pneumático, o sistema possui três carros de roletes com acionamento elétrico, responsáveis por transportar o tambor para o interior da câmara de cimentação e para leva-lo até câmara de monitoração e descontaminação [28].

Figura 28 Conjunto mecânico do EMT



Fonte: Ref. [30]

Figura 29 Equipamento de Movimentação de Tambores



Fonte: Ref. [30]

Não obstante seja um projeto conceitual elaborado para garantir todos os meios adequados de controlar a liberação de materiais radioativos do LABGENE, o objetivo deste trabalho é apresentar sugestões de estudo ao projeto vigente, referente ao sistema de movimentação de tambores e aos carros de roletes, no sentido de obter uma forma alternativa de otimização, preservando as mesmas condições de segurança e eficácia que uma planta rejeitos radioativos requer, mantendo os mesmos resultados do processo de cimentação e com uma simplificação na arquitetura da planta.

Em relação ao EMT percebe-se uma redundância de equipamentos que o compõe e uma alternativa ao projeto vigente pode ser alcançada com a substituição da função dos três garfos, dos três carros de movimentação e dos quatro motores pneumáticos, excluindo-os e adotando um sistema de pista de roletes acionados por um motor elétrico.

Conforme descrito no presente estudo, grande parte dos equipamentos que compõem o EMT localizam-se no compartimento de montagem e manutenção, situado acima da câmara de cimentação, ou seja, fora da câmara. Com a substituição dos três garfos projetados por uma esteira de roletes acionados, todo o sistema de movimentação de tambores ficaria localizado no interior da câmara de cimentação, simplificando a arquitetura da planta, sem comprometer a atividade fim, que é o processo de cimentação. A Figura 30, a Figura 31 e a Figura 32 são exemplos de alguns equipamentos que poderiam constar numa proposta de otimização da estrutura mecânica do projeto vigente, uma esteira, com proteção lateral para dar segurança na movimentação dos tambores, de roletes acionados eletricamente.

Figura 30 Mecanismo de acionamento de roletes



Fonte: Ref. [31]

Figura 31 Roletes acionados



Fonte: Ref. [31]

Figura 32 Esteira transportadora com roletes acionados



Fonte: Ref. [32]

Além do mais a substituição dos garfos suspensos, movimentadores dos tambores, todo o equipamento de movimentação de tambores será instalado no interior da câmara de cimentação, permitindo um rearranjo do tanque de armazenamento de resina exaurida (2130-TQ03) em posição superior à câmara de cimentação, mais especificamente, em cima da área de dosagem.

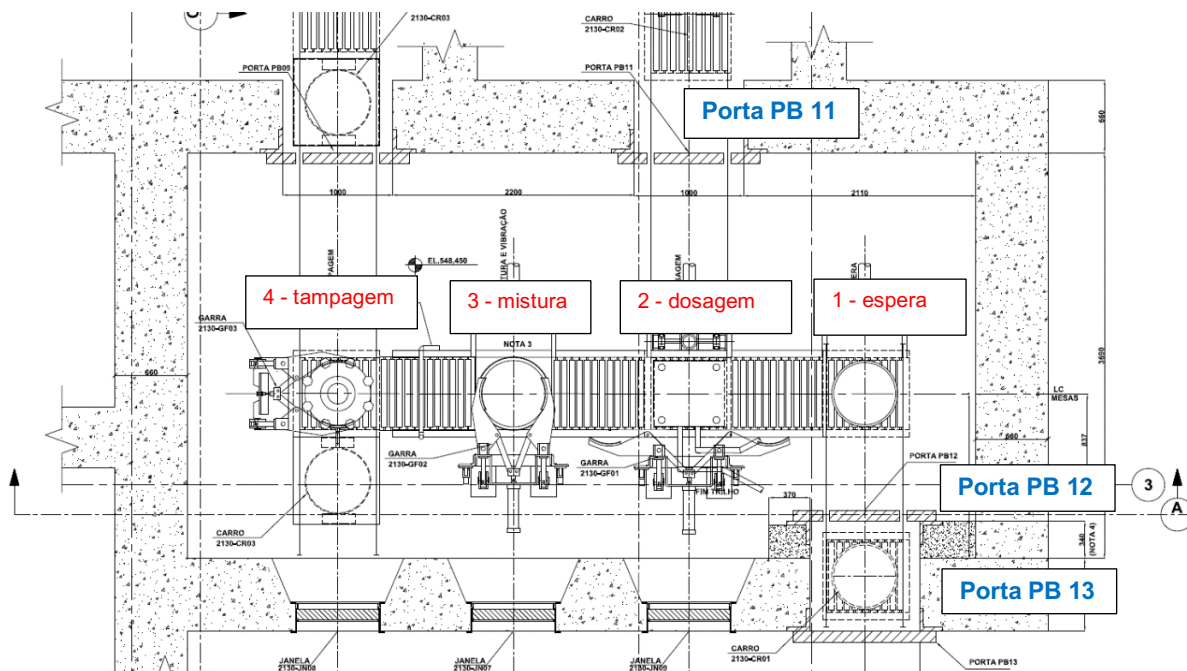
Desta forma a tubulação responsável pelo transporte de resina ao tambor passaria a ser vertical e sem curvas, garantindo um melhor escoamento aos tambores, não sendo necessária a existência da rosca dosadora de resina, prevista no projeto vigente.

Em relação aos carros de roletes elétricos, o projeto atual prevê três carros independentes, que se locomovem acionados por motores elétricos, com a função de movimentar o tambor até a câmara de cimentação e encaminhá-lo, após o processo, até a área de monitoração e descontaminação. A existência de três carros de roletes se justifica pelo fato de terem duas entradas de tambores distintas, uma para receber os rejeitos da área de filtros e outra referente à entrada de tambores que receberão rejeitos advindos do SPRL, conforme ilustrado na Figura 33.

Conforme ilustração da Figura 33 há um carro de roletes que movimenta os tambores através da área de filtros até a porta PB 11 e um outro carro de roletes entre as portas PB 12 e PB 13. A segunda proposta de estudo objetivando otimizar a

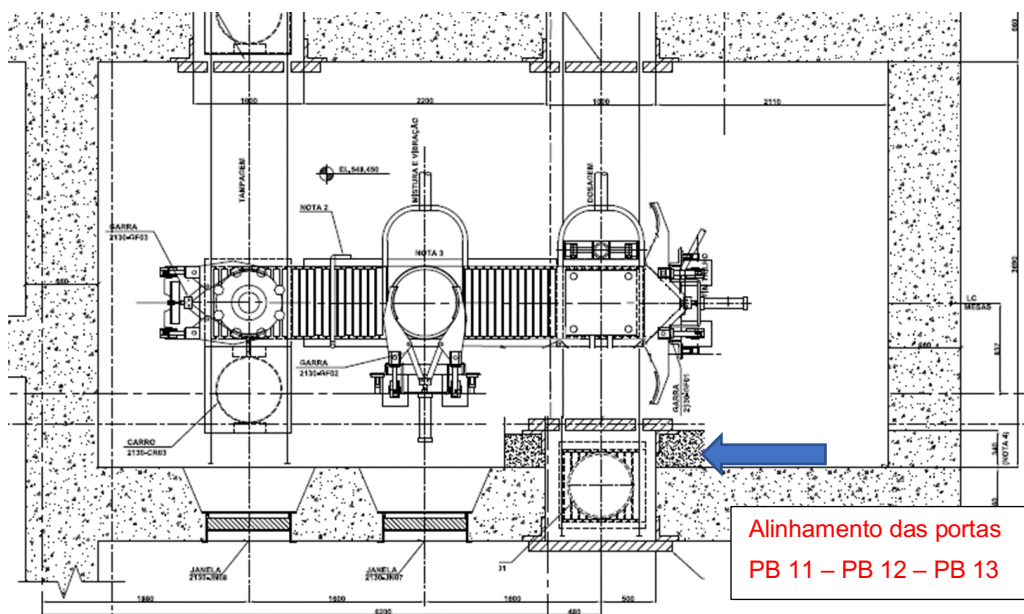
estrutura mecânica da planta, sem que se perca a finalidade precípua do processo de cimentação, é a exclusão de um dos carros de entrada alinhando as portas PB 11, PB 12 e PB 13, conforme demonstrado na Figura 34, de forma que o mesmo carrinho realize, em momentos distintos, a entrada de rejeitos sólidos advindos da área de filtros, para encapsulamento, e de rejeitos decorrentes do SPRL, para cimentação.

Figura 33 Arranjo geral do grupo de mistura



Fonte: Ref. [29]

Figura 34 Arranjo geral do grupo de mistura modificado



Fonte: Ref. [29]

#### 4 RESULTADOS

A busca por alternativas para a substituição do mecanismo de garfos mecânicos suspensos, controlados remotamente, por esteiras rolantes, com roletes acionados, por exemplo, visa obter uma proposta mais vantajosa para o LABGENE, observando os critérios de segurança nuclear exigidos.

Não obstante haja um projeto consolidado e aprovado, a finalidade da linha comparativa exposta no presente trabalho foi obter um sistema que seja tão eficaz quanto seguro, a um custo mais baixo e com os níveis de segurança exigidos pelo órgão regulamentador.

Face aos dados obtidos no decorrer deste estudo, conclui-se que o sistema de movimentação de tambores dentro da câmara de cimentação, desde os carros de roletes até a entrada na área de monitoração e decontaminação não justificam a implementação de um sistema muito robusto e com custos de instalação, operação e manutenção desnecessariamente elevados.

Como proposta adicional a eliminação de um dos carros de roletes e o alinhamento das portas PB 11, PB 12 e PB 13, representa uma clara redução de custo uma otimização na estrutura mecânica da planta e do sistema de movimentação de tambores, já que o processamento dos rejeitos radioativos sólidos e líquidos dar-se-ão em momentos distintos, não justificando a redundância de equipamentos.

Uma singela pesquisa de mercado poderia corroborar a presente proposta, demonstrando que a alternativa sugerida neste trabalho poderia otimizar a instalação mecânica de parte da planta de rejeitos radioativos do LABGENE, tanto no tocante à operação, quanto no tocante à manutenção.

Outrossim a alternativa aqui sugerida pode ser implementada com equipamentos facilmente encontrados no parque industrial nacional, o que já demonstra uma redução de custo na aquisição, operação e manutenção do sistema, sem deixar de cumprir a finalidade precípua da planta de rejeitos radioativos, representando uma proposta mais vantajosa para a Administração Naval, cumprindo, desta forma, os princípios fundamentais dispostos no art. 3º da lei 8.666/93.

## 5 CONCLUSÕES

Entre todos os temas envolvidos na atividade nuclear, o gerenciamento de rejeitos radioativos é extremamente relevante, pelo risco que representa para a sociedade e para o meio ambiente, e por estar presente em todas as fases de funcionamento, abrangendo todo o ciclo do combustível, a fase de licenciamento, a operação do reator e o descomissionamento da instalação. Todas as fases do gerenciamento dos rejeitos devem ser rigorosamente controladas e monitoradas, visando à salvaguarda da vida humana, presente e futura, e à preservação do meio ambiente.

O presente trabalho buscou estabelecer considerações técnicas e logísticas acerca das etapas do gerenciamento de rejeitos radioativos, adotadas no cenário interno e internacional, abordando alguns dos requisitos necessários para se obter uma gestão adequada.

A metodologia desenvolvida neste estudo, por meio de pesquisa bibliográfica e dados de projeto, teve por objetivo mostrar-se uma ferramenta viável para a tomada de decisão acerca do armazenamento de rejeitos do LABGENE, ainda em projeto conceitual. A proposta de adequação ao projeto vigente, visa, única e exclusivamente, obter um sistema eficaz, seguro, observando os requisitos impostos pelo órgão regulamentador e apresentar a proposta mais vantajosa, de ordem técnica e econômica, para a Administração Naval.

Face ao ineditismo e à magnitude do projeto do LABGENE, este trabalho representa um processo de cognição sumária com o objetivo de, eventualmente, instaurar uma discussão mais profunda acerca de alternativas mais simples e igualmente eficazes no tocante à planta de rejeitos radioativos, seja do LABGENE I ou do LABGENE II, sempre buscando a solução mais vantajosa para o PNM.

## REFERÊNCIAS

1. BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF. 1988.
2. MOREIRA, J. M. L. **Situação Atual dos Rejeitos Radioativos no Brasil e no Mundo**. Associação Brasileira de Energia Nuclear. [S.l.]. 2006.
3. BRASIL. **Lei nº 7.781, de 27 de jun. de 1989. Dá nova redação aos artigos 2º, 10 e 19 da Lei nº 6.189, de 16 de dezembro de 1974**. Brasília, DF. 1989.
4. CNEN Quem somos. **CNEN**. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/quem-somos>>. Acesso em: abril 2018.
5. CNEN. **Glossário de Segurança Nuclear**. [S.l.]. setembro de 2015.
6. IAEA. **IAEA. Overview**. Disponível em: <<https://www.iaea.org/about/overview>>. Acesso em: mai 2018.
7. IAEA. **Radioactive waste management glossary**. IAEA, Vienna. 2003.
8. CNEN **Posição Regulatória 1.26/001**. [S.l.]. mar de 2008.
9. CNEN normas Técnicas. **CNEN**. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/normas-tecnicas>>. Acesso em: abr 2018.
- 10 CNEN **CNEN NN 9.01 Descomissionamento de Usinas Nucleoelétricas**. [S.l.].  
. nov de 2012.
- 11 IAEA. **Safety Series. Classification of Radioactive Waste**. [S.l.]. 2009.  
.
- 12 CNEN **CNEN NN 8.01 Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação**. [S.l.]. dez de 2014.  
.
- 13 SOUZA, D. C. B. D. **Desenvolvimento de método para caracterização de embalados de rejeitos radioativos**. Instituto de Pesquisas Enegeticas e Nucleares. São Paulo. 2013.  
.
- 14 IAEA. **IAEA Safety Series. Principles of Radioactive Waste Management Safety Fundamentals**. [S.l.]. 1995.  
.



- 15 ELETRONUCLEAR, E. Central Nuclear. Angra 2. **Eletronuclear**. Disponível em:  
. <<http://www.eletronuclear.gov.br/Aempresa/CentralNuclear/Angra2.aspx>>.  
Acesso em: abril 2018.
- 16 ELETRONUCLEAR. Perguntas frequentes. temas gerais. rejeitos.  
. **ELETRONUCLEAR**. Disponível em:  
<<http://www.eletronuclear.gov.br/Saibamais/Perguntasfrequentes/Temasgeraisrejeitos.aspx>>. Acesso em: abril 2018.
- 17 BRASIL. **Lei 10.308, 20 de novembro de 2001. Dispõe sobre a seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos de rejeitos radioativos.** Brasília, DF. 2001.
- 18 CNEN Armazenamento de rejeitos radioativos.  
. **www.cnen.gov.br/armazenamento-de-rejeitos-radioativos**, 2015. Acesso em:  
07 maio 2018.
- 19 CNEN **CNEN NN 8.02 Licenciamento de Depósitos de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação.** [S.l.]. abril de 2014.
- 20 ELETRONUCLEAR, E. Gerenciamento de resíduos radioativos.  
. **www.eletronuclear.gov.br/Saibamais/Gerenciamentoderesíduos/Resíduosradioativos.aspx**. Acesso em: abr. 2018.
- 21 IAEA. **IAEA, Safety Standards. Storage of Radioactive Waste.** Vienna. nov  
. 2006.
- 22 ELETRONUCLEAR, E. Central nuclear. Angra 1. **Eletronuclear**. Disponível em:  
. <[www.eletronuclear.gov.br/Aempresa/CentralNuclear/Angra1.aspx](http://www.eletronuclear.gov.br/Aempresa/CentralNuclear/Angra1.aspx)>. Acesso em:  
07 maio 2018.
- 23 GUIMARÃES, L. D. S. O desafio da aceitação pública da energia nuclear. **Revista Marítima Brasileira**, Rio de Janeiro, dez. 2015.
- 24 CTMSP. **Relatório Preliminar de Análise de Segurança.** CTMSP. São Paulo.  
. 2013. (Relatório em desenvolvimento).
- 25 CTMSP. **Prédio Auxiliar Controlado - Sistema de Processamento de Rejeitos Radiotivos Sólidos - Descrição do Sistema Integrado. Doc: R11.06-2130-MS-0001.** CTMSP. São Paulo. 2013. (Documento Interno Reservado).

- 26 CTMSP-. **Prédio Auxiliar Controlado - Sistema de Processamento de Rejeitos Radioativos Sólidos - Descrição de Sistema. Doc: R11.06-2130-MS-0003.** CTMSP. [S.l.]. 2012. (Documento Interno Reservado).
- 27 CTMSP. **Projeto Executivo de Arquitetura Planta EL. 548.50 Doc nº R11.06-6000-CA-0401.** CTMSP. São Paulo. (Documento Interno Reservado).
- 28 CTMSP-. **Prédio Auxiliar Controlado - Sistema de Processamento de Rejeitos Radioativos Sólidos - Memorial descritivo do transportador de roletes. Doc: R11.06-2130-ME-0003.** CTMSP. São Paulo. 2013. (Documento Interno Reservado).
- 29 CTMSP. **Prédio Auxiliar Controlado - Sistema de Processamento de Rejeitos Radioativos Sólidos - Arranjo Geral do Grupo de Mistura - Plantas. Doc nº R11.06-2130-QA-0020.** CTMSP. São Paulo. 2013. (Documento Interno Reservado).
- 30 CTMSP. **Prédio Auxiliar Controlado - Sistema de Processamento de Rejeitos Radioativos Sólidos - Equipamento de Movimentação de Tambores. Doc: R11.06-2130-ME-0401.** CTMSP. São Paulo. 2013. (Documento Interno Reservado).
- 31 LOGISMARKET. Roletes para transportadores. **LOGISMARKET.** Disponível em: <[www.logismarket.ind.br](http://www.logismarket.ind.br)>. Acesso em: 08 maio 2018.
- 32 SISTEMAS, L. Transportador de esteira tipo plataforma. **LOGITEC.** Disponível em: <[www.logitecsistemas.com.br](http://www.logitecsistemas.com.br)>. Acesso em: 08 maio 2018.