AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**Desenvolvimento de um método para gerenciamento de rejeitos radioativos no
laboratório de produção de fontes de iodo-125 utilizadas em braquiterapia**

DAIANE CRISTINI BARBOSA DE SOUZA

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

Orientadora:

Profa. Dra. Maria Elisa Chuery M. Rostelato

São Paulo

2018

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

**Desenvolvimento de um método para gerenciamento de rejeitos radioativos no
laboratório de produção de fontes de iodo-125 utilizadas em braquiterapia**

DAIANE CRISTINI BARBOSA DE SOUZA

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

Orientadora:
Profa. Dra. Maria Elisa Chuery M. Rostelato

Versão Corrigida
Versão Original disponível no IPEN

São Paulo
2018

Auxílio CAPES.

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

SOUZA, Daiane. C. B. Desenvolvimento de um Método para Gerenciamento de Rejeitos Radioativos no Laboratório de Produção de Fontes de Iodo-125 utilizadas em Braquiterapia. 127 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br>>.

Ficha Catalográfica

Barbosa de Souza, Daiane Cristini

Desenvolvimento de um Método para Gerenciamento de Rejeitos Radioativos no Laboratório de Produção de Fontes de Iodo-125 utilizadas em Braquiterapia / Daiane Cristini Barbosa de Souza; orientadora Maria Elisa Chuery Martins Rostelato. -- São Paulo, 2018. 127 p.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Aplicações) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2018.

1. Rejeito radioativo. 2. Braquiterapia. 3. Iodo-125.

I. Chuery Martins Rostelato, Maria Elisa, orient. II. Título.

Dedico este trabalho à minha amada família.
Em especial aos meus pais Barbosa e Cristina: minha fonte inesgotável de apoio e segurança.
Às minhas irmãs Suellen, Leidiana e Mônica: minhas amigas por toda vida.
Ao meu esposo, Alexandre Chagas, pelo apoio incondicional em todos os momentos,
principalmente nos mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

À minha querida orientadora Dra. Maria Elisa Rostelato, pela orientação e incondicional apoio na realização deste trabalho.

Ao Dr. Roberto Vicente por todo o suporte, orientação e incentivo que tornaram este trabalho possível.

Ao doutores Carlos Zeituni, Osvaldo Costa, Anselmo Feher e João Moura, pelas considerações, sugestões ao longo das etapas deste trabalho.

Aos colegas do grupo de braquiterapia: MSc. Bruna Rodrigues, MSc. Beatriz Nogueira, MSc. Diego Vergaças, Dra. Carla Daruich, Físicos Lucas Angelocci, Rodrigo Abreu, Trn. Paulo Souza, Trn. Nayane Barbosa, agradeço pelos trabalhos realizados, pela amizade e companherismo que tornaram esses anos de estudo muito mais agradáveis.

Em especial ao esforço e dedicação da Trn. Vitória de Carvalho, fundamentais nas etapas finais deste trabalho.

Aos amigos MSc. Rodrigo Tiezzi, Dr. Marcos Benega, Dr. Fernando Peleias Jr. mesmo distantes, sempre presentes.

Aos amigos do IPEN Dra. Bianca Geraldo, Dr. Eduardo Gurzoni, MSc. Maria Eugênia, Dra. Jéssica Machado, Dra. Anna Raquel, MSc. Adélia Kakoy, Patrícia Martinez e Jéssica Fratini, que ao longo de todos esses anos dedicados à pesquisa, se mostraram amigos para toda vida.

Aos professores da pós-graduação, especialmente aos professores Dr. Alberto Saburo Todo, Dr^a Sandra Bellintani, Dr. Luís Antônio Albiac Terremoto, Dr. Afonso Aquino, Dr. Leonardo Godim, por todo conhecimento transmitido ao longo desta jornada.

À Universidade Nove de Julho pelo apoio durante as etapas deste estudo e por ter sido minha base acadêmica. Aos professores MSc. Bergman Sanches, MSc. Álvaro Vilas Boas, MSc. Amaury Castro, Dr^a Márcia Campos e todos os membros dessa equipe que também se tornaram uma família para mim.

À Faculdade de Ciências Médicas da Santa Casa de São Paulo que forneceu constante apoio e incentivo, na pessoal do Dr. Homero José Farias e Melo e equipe.

Aos colegas da University of Sheffield: PhD. John Provis, Dra. Laura Gardner, MSc. Rita Vasconcelos e MSc. Amber Mason pela parceria hospitalidade.

À CAPES pelo apoio financeiro concedido ao longo deste trabalho.

À IAEA pelo apoio concedido no *fellowship* na University of Sheffield.

“I am among those who think that science has great beauty. I am among those who think that science has great beauty. A scientist in his laboratory is not only a technician: he is also a child placed before natural phenomena which impress him like a fairy tale.”

“Estou entre aqueles que pensam que a ciência tem grande beleza. Um cientista em seu laboratório não é apenas um técnico: ele também é uma criança colocada diante de fenômenos naturais que o impressionam como um conto de fadas.”

**Marie Skłodowska Curie
(1867- 1934)**

RESUMO

SOUZA, Daiane C. B. **Desenvolvimento de um Método para Gerenciamento de Rejeitos Radioativos no Laboratório de Produção de Fontes de Iodo-125 utilizadas em Braquiterapia.** 2018. 127 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares – IPEN - CNEN/SP. São Paulo.

A braquiterapia é um tratamento clínico que consiste na aplicação de fontes radioativas seladas em certos tipos de tumores. Atualmente, está em fase de implantação o laboratório para produção de fontes de ^{125}I a fim de nacionalizar a produção de fontes para reduzir os custos na sua aplicação e atender a demanda da população brasileira. A tese defendida neste trabalho é o desenvolvimento de um método para o gerenciamento de rejeitos radioativos que serão gerados ao longo da produção dessas fontes. A metodologia aplicada consistiu na criação de etapas de gerenciamento de rejeitos radioativos aplicadas ao ^{125}I que contemplasse o gerenciamento na própria instalação produtora. Os rejeitos radioativos que serão gerados ao longo de todo processo de fabricação das fontes de ^{125}I serão produzidos dentro de três células estanques, localizadas dentro do laboratório. Para cada um dos cenários foram relacionados os rejeitos sólidos, líquidos e gasosos gerados em cada uma das três células de produção. Para rejeitos sólidos e líquidos foram estimados: volume, massa, taxa de entrada no depósito inicial e tempo para liberação em meio ambiente. Para rejeitos gasosos foi estimado: taxa de volatilização do ^{125}I e metodologia para medição dos filtros de carvão ativado. Os resultados apresentados permitem concluir que o laboratório tem condições de realizar o gerenciamento dos rejeitos que produzirá. Implantar um sistema de gerenciamento dentro do próprio laboratório, aperfeiçoará as atividades rotineiras e o licenciamento junto a CNEN.

Palavras-chave: Rejeito Radioativo; Braquiterapia; Iodo 125.

ABSTRACT

SOUZA, Daiane C. B. **Development of a Method for Radioactive Waste Management in Sources Production Laboratory iodine-125 used in brachytherapy.** 2018. 127 p. Thesis (Doctorate in Nuclear Technology) - Institute of Energy and Nuclear Research - IPEN - CNEN / SP. Sao Paulo.

Brachytherapy is a clinical treatment that consists of the application of sealed radioactive sources in certain types of tumors. The laboratory for the production of ^{125}I sources is currently being implemented in order to nationalize the production of sources to reduce the costs of its application and to meet the demand of the Brazilian population. The thesis defended in this work is the development of a method for the management of radioactive waste that will be generated during the production of these sources. The applied methodology consisted in the creation of steps of management of radioactive waste applied to ^{125}I that contemplated the management in the own production facility. The radioactive wastes that will be generated throughout the manufacturing process of ^{125}I sources will be produced within three sealed cells located inside the laboratory. For each of the scenarios the solid, liquid and gaseous wastes generated in each of the three production cells were related. For solid and liquid wastes were estimated: volume, mass, rate of entry into the initial deposit and time for release into the environment. For gaseous rejects it was estimated: ^{125}I volatilization rate and methodology for the measurement of activated carbon filters. The results presented allow us to conclude that the laboratory is able to perform the management of the wastes it will produce. Implementing a management system within the laboratory, will improve routine activities and licensing with CNEN.

Keywords: Radioactive Waste; Brachytherapy; Iodine 125.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Princípios fundamentais do GRR.	22
Tabela 2- Comparação das Classificações de rejeitos da IAEA e CNEN	24
Tabela 3 - Principais tipos de rejeitos radioativos gerados durante a produção e aplicação de radioisótopos.	37
Tabela 4 – Propriedades do ^{125}I	39
Tabela 5 - Etapas gerais do GRR Aplicáveis ao LPFRT.....	51
Tabela 6 – Descrição dos cenários utilizados para implementação do GRR no LPFRT, com os percentuais de reprovação já inclusos.....	56
Tabela 7 - Caracterização primária dos rejeitos gerados no LPFRT por etapa de produção. ...	57
Tabela 8- Dados utilizados na caracterização primária dos rejeitos sólidos.	59
Tabela 9 - Dados gerais dos rejeitos líquidos para Cenários 1, 2 e 3.	70
Tabela 10 - Dados gerais dos rejeitos líquidos para cenários de 5 e 20 lavagens na etapa de controle de qualidade (<i>hot cell</i> 3).	71
Tabela 11 - Relação de volume e massa para rejeitos sólidos gerados em cada célula de produção em três cenários.	81
Tabela 12 - Dados das perdas de atividade de ^{125}I para cada item do rejeito sólido e para cada cenário na <i>hot cell</i> 1.....	81
Tabela 13- Dados das perdas de atividade de ^{125}I para cada item do rejeito sólido e para cada cenário na <i>hot cell</i> 2.....	82
Tabela 14- Dados das perdas de atividade de ^{125}I para cada item do rejeito sólido e para cada cenário na <i>hot cell</i> 3.....	83
Tabela 15 - Massa total (kg) de rejeitos radioativos sólidos por célula de produção e por cenário.....	84
Tabela 16 - Volume total (L) acumulado nos rejeitos radioativos sólidos por célula de produção e por cenário.....	84
Tabela 17- Atividade semanal (Ci) presente nos embalados de rejeitos radioativos sólidos por célula de produção e por cenário.	88
Tabela 18- Volume de rejeito líquido semanal por cenário <i>hot cell</i> 1.....	94
Tabela 19 - Atividade e concentração de atividade semanal presente nos rejeitos líquidos da <i>hot cell</i> 1 para o cenário 1, 2 e 3.....	95
Tabela 20 - Número de processos de lavagem, volume de rejeito líquido e volume de água para lavagem para célula de produção 3.....	97
Tabela 21 - Especificações dos hidrômetros do IPEN e da média do consumo mensal de geração de esgoto.....	99
Tabela 22 - Tempo de armazenamentode rejeitos líquidos gerados semanalmente na <i>hot cell</i> 1 para liberação de na rede de esgoto do CTR.	102
Tabela 23 - Dados de concentração de atividade e atividade das amostras do filtro de carvão.	106
Tabela 24 - Concentração de atividade e atividade total do filtro de carvão.....	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estimativa de novos casos de câncer incidentes (exceto pele) em homens e mulheres para 2018	12
Figura 2 - Diagrama das sementes de ^{125}I (Valores dados em milímetros).....	14
Figura 3 - Rota de produção do ^{125}I em reator nuclear*.....	19
Figura 4 - Relação das classes de rejeitos (fontes seladas em desuso) <i>versus</i> tempo de decaimento.....	25
Figura 5- Etapas básicas do GRR.	26
Figura 6 - Fluxograma do sistema de GRR no Brasil.....	26
Figura 7- Fluxograma do gerenciamento de fontes seladas.	45
Figura 8- Representação dos filtros utilizados nos sistemas de exaustão na produção de fontes radioativas.....	46
Figura 9- Representação gráfica da linha de produção de FxFDG. Duas bolsas de 10 L e 40 L TEDLAR são conectadas ao sistema de ventilação e à saída da bomba de vácuo, respectivamente.	49
Figura 10- Fotografia de uma bolsa TEDLAR de 1L.....	50
Figura 11- Balança analítica usada na estimativa da massa dos itens do rejeito sólido.....	59
Figura 12- Itens do rejeito sólido: da esquerda para direita - frasco <i>PerkinElmer</i> , tubo de ensaio, frasco usado na linha de produção e filtro poroso usados no teste de estanqueidade.....	60
Figura 13 - Representação dos espaços vazios no armazenamento dos frascos dentro do embalado de rejeito.....	61
Figura 14- Fluxograma do processo das perdas de atividade de ^{125}I para cada item do rejeito sólido na <i>hot cell</i> 1 e para cada cenário.	63
Figura 15- Fluxograma do processo das perdas de atividade de ^{125}I para cada item do rejeito sólido na <i>hot cell</i> 2 e para cada cenário.	64
Figura 16- Fotografia dos sistema de recepção de fontes após a segunda solda. Blindagem de chumbo padrão (à direita tracejado em vermelho) receberá as sementes com soldas reprovadas na inspeção visual.	65
Figura 17 – Fluxograma dos processo e rejeitos que ocorrem na <i>hot cell</i> 3.....	66
Figura 18- Suporte de tubos para teste de estanqueidade em banho ultrassônico.....	67
Figura 19 - Representação da posição das bombonas de rejeitos líquidos na linha de produção dentro de caixas de aço inoxidável revestidas externamente de chumbo.....	73
Figura 20 – Tanque de decaimento e da pia de descontaminação do LPFRT.....	75
Figura 21 – À esquerda, fotografia do conjunto de filtros da <i>hot cell</i> 3; à direita: conjunto de filtros em destaque.....	78
Figura 22 - Filtros de carvão e grosso, respectivamente, utilizados no sistema de exaustão...78	
Figura 23 - Da esquerda para direita: fonte padrão utilizada no experimento, pesagem do carvão triturado e unidade do filtro de carvão.....	79
Figura 24 – Gráfico da atividade (Bq) e massa (kg) acumulados no depósito em 5 anos de operação – Cenário 1.	85
Figura 25 - Gráfico da atividade (Bq) e volume (L) acumulados no depósito em 5 anos de operação – Cenário 1.	85
Figura 26 - Gráfico da atividade (Bq) e massa (kg) acumulados no depósito em 5 anos de operação – Cenário 2.	86
Figura 27 - Gráfico da atividade (Bq) e volume (L) acumulados no depósito em 5 anos de operação – Cenário 2.	86

Figura 28 - Gráfico da atividade (Bq) e massa (kg) acumulados no depósito em 5 anos de operação – Cenário 3.	87
Figura 29 - Gráfico da atividade (Bq) e volume (L) acumulados no depósito em 5 anos de operação – Cenário 3.	87
Figura 30– Atividade (Bq) no depósito inicial ao longo de 379 semanas de armazenamento - cenário 1.....	90
Figura 31 - Atividade (Bq) no depósito inicial ao longo de 385 semanas de armazenamento – cenário 2.....	91
Figura 32 - Atividade (Bq) no depósito inicial ao longo de 397 semanas de armazenamento – cenário 3.....	92
Figura 33 – Concentração de atividade (kBq.kg^{-1}) por massa acumulada no depósito inicial em 5 anos de Operação – Cenário 1 a 3.....	94
Figura 34 - Concentração de atividade (Bq.m^{-3}) e Volume (L) de rejeitos líquidos acumulados no depósito inicial em 5 anos de operação na Célula 1 (Cenários 1, 2 e 3).	96
Figura 35– Atividade (Bq) acumulada semanalmente e ao longo de 52 semanas (1 ano) de armazenamento na <i>hot cell</i> 1 – Cenário 1.....	100
Figura 36 - Atividade (Bq) acumulada semanalmente e ao longo de 52 semanas (1 ano) de armazenamento na <i>hot cell</i> 1 – Cenário 2.....	100
Figura 37 - Atividade (Bq) acumulada semanalmente e ao longo de 52 semanas (1 ano) de armazenamento na <i>hot cell</i> 1 – Cenário 3.....	101
Figura 38 – À esquerda: filtro de carvão. À direita: remoção do carvão granulado da colmeia 2.	104
Figura 39 – Espectro gama de amostras de carvão com ^{125}I - tempo de contagem de 47210,2 segundos: Colmeia 2- carvão granulado.....	105
Figura 40 - Espectro gama de amostras de carvão com ^{125}I - tempo de contagem de 30031,1 segundos: Colmeia 2- carvão triturado.	105
Figura 41 - Espectro gama de amostras de carvão com ^{125}I - tempo de contagem de 54028,3 segundos: Colmeia 5 - carvão granulado.....	105
Figura 42 - Espectro gama de amostras de carvão com ^{125}I - tempo de contagem de 43237,5 segundos: Colmeia 5- carvão triturado.	106
Figura 43 - À esquerda: representação tridimensional do depósito para armazenamento dos rejeitos radioativos; à direita: planta baixa do local.	109
Figura 44 - Modelo de etiqueta para registro dos embalados radioativos.	110
Figura 45 - Taxa de ocupação semanal do depósito ao longo das semanas (52 e 260) de armazenamento - rejeitos sólidos.....	112
Figura 46 - Taxa de ocupação semanal do depósito ao longo das semanas (52 e 260) de armazenamento - rejeitos líquidos.....	114

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVOS E ORIGINALIDADE	16
2.1 Geral	16
2.2 Específicos.....	16
2.3 Relevância e originalidade.....	16
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	17
3.1 História da braquiterapia e das fontes de ^{125}I	17
3.2 Produção de sementes de ^{125}I no Brasil	18
3.3 Rejeitos Radioativos e seu Gerenciamento	19
3.4 Princípios do GRR.....	21
3.5 Classificação de Rejeitos	23
3.6 Etapas do Gerenciamento de Rejeitos Radioativos	25
3.7 Fatores técnicos que afetam a seleção de tecnologias	33
3.8 Viabilidade Econômica do GRR.....	35
3.9 Gerenciamento de Rejeitos na Produção de Fontes Seladas.....	36
3.10 Características químicas e radiológicas do ^{125}I	37
3.11 Etapas do GRR na produção de fontes seladas de ^{125}I para braquiterapia.....	40
3.11.1 Rejeitos Líquidos	40
3.11.2 Rejeitos Sólidos	42
3.11.3 Rejeitos Gasosos	46
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	55
4.1 Cenários para gerenciamento dos rejeitos radioativos no LPFRT.....	55
4.2 Levantamento das etapas geradoras de rejeitos radioativos	56
4.3 Rejeitos Sólidos	58
4.3.1 Caracterização dos rejeitos sólidos: estimativa da massa, volume e atividade ...	58
4.3.2 Armazenamento Temporário dos Rejeitos Sólidos	68
4.4 Concentração de atividade e tempo necessário para liberação no meio ambiente	69
4.5 Rejeitos Líquidos	70
4.5.1 Caracterização dos Rejeitos Líquidos: Estimativa do Volume e Atividade	70
4.5.2 Armazenamento Temporário dos Rejeitos Líquidos	73
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
5.1 Rejeitos Sólidos	80
5.1.1 Caracterização dos rejeitos sólidos: estimativa de massa, volume e atividade ...	80
5.1.2 Armazenamento Temporário dos Rejeitos Sólidos	83

5.2 Rejeitos Líquidos	94
5.2.1 Caracterização dos rejeitos líquidos: estimativa do volume e atividade	94
5.2.2 Armazenamento Temporário dos Rejeitos Líquidos	98
5.3 Rejeitos Gasosos	104
5.4 Depósito Inicial de Rejeitos Radioativos	107
6. CONCLUSÕES	115
REFERÊNCIAS	117
APÊNDICE A.....	123
APÊNDICE B.....	124
ANEXO A	126

1 INTRODUÇÃO

A *International Agency for Research on Cancer* (IARC) estima 29,4 milhões de novos casos de câncer no mundo para 2035. Anteriormente foram estimados, pela mesma agência, 22 milhões para o ano de 2030. O aumento estimado leva em conta a leve redução nas taxas de mortalidade para alguns tipos de câncer. O maior efeito desse aumento vai incidir em países de renda média e baixa, sendo que mais da metade de todos os casos de câncer já ocorrem em países da América do Sul e Ásia (INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER, 2016).

No Brasil, a existência do Registro de Câncer de Base Populacional e Hospitalar (RCBP - RHC) e as recentemente divulgadas *Estimativas 2018: Incidência de Câncer no Brasil* permite o acompanhamento da evolução dos casos de câncer por todo o país. Estas fontes de dados apontam para 2018-2019 a ocorrência de 600 mil novos casos de câncer, reforçando a magnitude do problema no país. Excetuando-se o câncer de pele não-melanoma (170 mil novos casos), o câncer de próstata é o mais incidente no Brasil, com estimativa de 68.220 novos casos em 2018, seguido por 59.700 casos de câncer de mama. Esses dados indicam a necessidade de uma política de prevenção e tratamento ainda mais ativa (Figura 1) (INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER, 2017).

Figura 1- Estimativa de novos casos de câncer incidentes (exceto pele) em homens e mulheres para 2018

Localização Primária	Casos	%	Homens	Mulheres	Localização Primária	Casos	%
Próstata	68.220	31,7%			Mama Feminina	59.700	29,5%
Traqueia, Brônquio e Pulmão	18.740	8,7%			Cólon e Reto	18.980	9,4%
Cólon e Reto	17.380	8,1%			Colo do Útero	16.370	8,1%
Estômago	13.540	6,3%			Traqueia, Brônquio e Pulmão	12.530	6,2%
Cavidade Oral	11.200	5,2%			Glândula Tireoide	8.040	4,0%
Esôfago	8.240	3,8%			Estômago	7.750	3,8%
Bexiga	6.690	3,1%			Corpo do Útero	6.600	3,3%
Laringe	6.390	3,0%			Ovário	6.150	3,0%
Leucemias	5.940	2,8%			Sistema Nervoso Central	5.510	2,7%
Sistema Nervoso Central	5.810	2,7%			Leucemias	4.860	2,4%

*Números arredondados para múltiplos de 10.

Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER, 2017).

O câncer de próstata, quando rapidamente diagnosticado, pode ser tratado por braquiterapia, na qual fontes de Iodo-125 (^{125}I) são implantadas permanentemente na próstata.

A braquiterapia é um tratamento clínico que consiste na aplicação de fontes radioativas seladas (chamadas de sementes) em certos tipos de tumores, podendo variar entre

implantes intersticiais (no interstício dos tecidos – exemplo: coxa, mama) ou intracavitários (no interior da cavidade onde está o tumor – exemplo: útero). Uma vez implantada, a fonte liberará a dose na região ou por um curto período de tempo (implantes temporários) ou até ocorrer o decaimento da fonte (implantes permanentes). É importante enfatizar que a dose recebida pelos tecidos adjacentes é significativamente reduzida, devido à localização estratégica da fonte dentro da lesão ou do órgão afetado (SALVAJOLI; FARIA, 1998). Os implantes podem ser classificados também em relação à taxa de dose de radiação emitida durante o tratamento: baixa taxa de dose (*Low Dose Rate* - LDR) e alta taxa de dose (*High Dose Rate* - HDR).

O tratamento do câncer de próstata por braquiterapia consiste na colocação das sementes radioativas em contato com o tumor. As doses de radiação são liberadas continuamente, durante o decaimento radioativo da fonte. O tratamento que utiliza sementes de ^{125}I como fontes de radiação é classificado como braquiterapia do tipo LDR, com fontes seladas (PODGORSAK, 2005).

As fontes de ^{125}I implantadas na próstata não causam complicações futuras aos pacientes, visto que a cápsula na qual são seladas é constituída de material biocompatível, como o titânio. Após dois anos de implantação, as sementes emitem baixíssimos níveis de radiação e a eficácia do tratamento tem sido relatada em torno de 85-95% quando comparada aos tratamentos usuais (radioterapia e intervenções cirúrgicas). As principais vantagens do tratamento com sementes de ^{125}I têm sido a acentuada diminuição da dose fora da área do implante, preservação de tecidos sadios, menor incidência de efeitos colaterais como impotência e incontinência urinária e rápida recuperação (CAVALCANTI, 2017; ROSTELATO, 2005).

A produção dessas fontes é realizada por meio da fixação do ^{125}I em um fio de prata com 3 mm de comprimento e 0,5 mm de diâmetro. Esse fio é alojado dentro de uma cápsula de titânio, que serve como invólucro. A cápsula tem 4,5 mm de comprimento, 0,8 mm de diâmetro e 0,5 mm de espessura de parede (Figura 2) (ROSTELATO, 2005; SOUZA, 2012).

Devido à baixa energia dos fótons, a radiação do ^{125}I tem baixo poder de penetração, uma característica desejável para a braquiterapia, irradiando apenas os tecidos comprometidos próximos da fonte. Além disso possui também como vantagem meia-vida curta (< 100 dias) (KAPLAN, 1978; MEIGOONI, 2000).

Figura 2 - Diagrama das sementes de ^{125}I (Valores dados em milímetros).

Fonte: (SOUZA, 2012).

No Brasil, a maior demanda e aplicação para sementes de ^{125}I é para tratamento do câncer de próstata. Sementes para essa aplicação possuem atividade em torno de 0,5 mCi ($1,85 \times 10^7 \text{Bq}$)¹ (DICKINSON et al., 2014; SOUZA, 2012; ZHANG et al., 2016).

A demanda anual por sementes de ^{125}I , até meados de setembro de 2017, foi de mais de 11 mil unidades para tratamento em 19 clínicas no Brasil. Estima-se que com uma produção nacional, a demanda por essas fontes possa chegar a 8.000/mês (INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, 2017; SOUZA, C. D., 2016).

Atualmente está em fase de implantação, no IPEN, o laboratório para produção dessas fontes a fim de nacionalizar a produção, reduzir os custos de sua aplicação e atender a demanda da população brasileira. A implantação do novo laboratório poderá criar um mercado de fontes seladas para fins médicos no país (COSTA et al., 2017). As fontes serão produzidas com valores de atividade entre 1 e 2 mCi de ^{125}I a fim de compensar as perdas durante o processo de fabricação e o tempo de decaimento até o envio para os serviços médicos do país (COSTA et al., 2017).

A produção de fontes seladas para braquiterapia gera rejeitos radioativos que devem ser gerenciados, obedecendo aos regulamentos que, no Brasil, são estabelecidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

Quando há rejeitos radioativos envolvidos nas atividades, a equipe local de radioproteção deve fornecer orientações para a uma gestão correta e segura, criando um plano de Gerenciamento de Rejeitos Radioativos (GRR) na própria instalação, aprovado pelo órgão

¹ A unidade Curie (Ci) não é mais aceita como unidade do Sistema Internacional de unidades. Porém, ainda é uma unidade constantemente usada no meio clínico. Por essa razão foi utilizada neste trabalho. A unidade oficial é o Becquerel (Bq) que equivale a um decaimento por segundo. Parâmetros para conversão: $1 \text{ Ci} = 3,70 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

regulador e uma condição para a concessão de licença de operação da instalação. Nesse sentido, de acordo com o atual regulamento CNEN NN 8.01 (CNEN, 2014a), o GRR é um conjunto de atividades técnicas e administrativas envolvidas na coleta, segregação, manuseio, tratamento, acondicionamento, transporte, armazenamento, controle e deposição final.

2 OBJETIVOS E ORIGINALIDADE

2.1 Geral

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver um sistema para o gerenciamento de rejeitos radioativos gerados no laboratório de produção de sementes de ^{125}I , a fim de assistir o novo laboratório de produção de fontes do IPEN, em fase de implantação.

2.2 Específicos

- Caracterizar os rejeitos radioativos gerados;
- Identificar as etapas do processo que são geradoras de rejeitos;
- Especificar requisitos para o local de armazenamento;
- Desenvolver um sistema de gestão de rejeitos para a produção das fontes radioativas em três diferentes cenários de produção.

2.3 Relevância e originalidade

No Brasil, diversos trabalhos têm sido feitos a fim de se estabelecer protocolos de dosimetria, soldagem da cápsula, controle de qualidade e processo de fixação do ^{125}I para a fabricação das fontes. Todos esses trabalhos visam viabilizar a implementação da produção (FEHER, 2014; MOURA, 2009; MOURA, et al., 2012; ROSTELATO, 2005; ROSTELATO et al., 2008; SOUZA, 2012; SOUZA et al., 2010; SOUZA et al., 2011; ZEITUNI, 2008). Paralelamente, a construção do primeiro laboratório no hemisfério sul, para a produção de ^{125}I , está em andamento (MOURA, 2015; SOUZA, 2016; SOUZA, et al., 2011).

Todas essas atividades com material radioativo, incluindo a rotina de produção, necessitam de um planejamento da gestão dos rejeitos radioativos gerados. Um extenso levantamento bibliográfico foi feito sobre normatização e métodos de tratamento dos rejeitos radioativos em instalações para a produção de fontes seladas de ^{125}I . No entanto, a literatura é escassa ou pouco detalhada. Na questão da presença de contaminantes de meia-vida longa em rejeitos da produção de ^{125}I , ocorre a mesma escassez.

Mesmo sendo uma fonte emissora de radiação gama de baixa energia, o ^{125}I é volátil o que torna difícil e potencialmente perigosa sua manipulação, do ponto de vista radiológico. Além do mais, implantar um sistema de gerenciamento dentro do próprio laboratório, aperfeiçoará as atividades rotineiras e o licenciamento junto a CNEN.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 História da braquiterapia e das fontes de ^{125}I

A palavra “*Braqui*” origina-se do grego e traduzida para o português significa “perto”, assim, o termo braquiterapia aplica-se ao tratamento de doenças, como câncer, no qual a fonte radioativa fica próxima ou em contato direto com a lesão (MOULD, 2007b). No tratamento do câncer de próstata por meio da braquiterapia uma pequena fonte radioativa, semente, é implantada no órgão, liberando uma alta dose de radiação no tecido tumoral.

Nos anos seguintes à descoberta do isótopo Rádio por Marie Curie, várias pessoas, incluindo cientistas como Henry Becquerel e Pierre Curie, expuseram, deliberadamente ou não, partes de seus próprios corpos à radiação. Os relatos são de lesões inflamatórias que lembram queimaduras e que demoravam muitos meses para desaparecer. Por fim, as cicatrizes indicavam uma necrose profunda do tecido exposto (MOULD, 2007a, 2007b).

Vários médicos na França, Alemanha e EUA, ao testemunhar esses efeitos, conjecturaram que a nova substância poderia ter valor terapêutico. A partir de 1901, várias publicações médicas relataram tentativas de tratamento, incluindo acne, psoríase, lúpus, eczema, quelóide, câncer da célula basal, carcinoma epidermoide e câncer de mama, a maioria sem resultados satisfatórios, em parte porque a quantidade de rádio disponível para vários dos médicos foi considerada insuficiente para um tratamento eficaz. O primeiro sucesso na braquiterapia de Lúpus é atribuído a Henri Danlos de Paris (MOULD, 2007b).

Esses experimentos levaram a empresa alemã *Buchler* (ABBÉ, 1904) a competir com a francesa *Armet de Lisle*, para produzir comercialmente as primeiras fontes de rádio para radioterapia.

Entre 1913 a 1930 médicos e cientistas desenvolveram diversos protocolos de tratamento por braquiterapia. Durante esse período, em Paris, foi introduzida a braquiterapia intracavitária nas aplicações radioterápicas e vários protocolos foram criados. James Heyman descreveu método para tratamento de câncer cervical em Estocolmo, Suécia, na mesma época (KJELLGREN, 1995).

Em alguns protocolos, o tempo de aplicação das fontes em pacientes chegava a 120 horas. Isso levou os médicos a repensarem os procedimentos, por fim, criando em 1930, o protocolo Manchester, no Reino Unido que levava em consideração a dose liberada nos tecidos, bem como outras implicações das exposições por fontes em braquiterapia (MÖLLER et al., 2003).

Em 1972, no *Sloan-Kettering Cancer Center*, nos Estados Unidos, fontes de ^{125}I foram utilizadas no tratamento do câncer de próstata com resultados que apontavam a necessidade de melhorias na distribuição da dose (WHITMORE et al., 1974).

Essas melhorias vieram com os trabalhos do médico dinamarquês Hans Holm, na *Copenhagen University*, considerado o primeiro tratamento de câncer de próstata não cirúrgico utilizando fontes de ^{125}I , que foi bem-sucedido. Pouco mais tarde, a técnica foi modificada por outro grupo no *Seattle Prostate Institute* em Washington, Estados Unidos. O grupo formado por Haakon Ragde, John Blasko e Peter Grimm foi o primeiro a utilizar ultrassonografia para guiar o procedimento, tornando o tratamento mais eficaz e preciso (BLASKO et al., 1995).

3.2 Produção de sementes de ^{125}I no Brasil

Durante o processo de produção das sementes de ^{125}I , três etapas são realizadas. Na primeira, o ^{125}I em uma solução é fixado num fio de prata previamente modificada por processos de química de superfície. Na segunda etapa, o fio de prata, também chamado de núcleo da semente, é colocado no tubo que é soldado por um sistema a *laser* (FEHER, 2014). Na terceira, a semente é submetida a testes de controle de qualidade estabelecidos pela norma ISO-9978(ISO, 1992). Essa norma estabelece condições e faz recomendações para o teste de vazamento nas sementes, após a etapa de soldagem. Após aprovação nos testes de controle de qualidade, a fonte está pronta para tratamento dos pacientes.

O ^{125}I é produzido em reator nuclear, a partir da irradiação com nêutrons, de um alvo de Xenônio-124 (^{124}Xe), por meio da reação descrita na Equação 1. A reação nêutron-gama (n,γ) é aquela em que o núcleo alvo de um átomo, no caso, do ^{124}Xe , absorve um nêutron, transformando-se no isótopo ^{125}Xe , e emitindo, imediatamente, um fóton gama. Dois isótopos diferentes do ^{125}Xe podem ser formados na reação: um com estado energético mais alto, chamado metaestável, representado pelo símbolo $^{125\text{m}}\text{Xe}$, e um no estado energético fundamental, o ^{125}Xe , cada um com sua própria meia-vida, modo de decaimento e emissão de radiação. Cada um tem, também, uma probabilidade de ser formado. Na equação 1, os números que estão sobre as setas (28 b e 137 b), correspondem a essa probabilidade, expressa em termos da chamada seção de choque da reação: 28 barns ou 137 barns. Uma vez, formado, o isótopo metaestável decai por transição isomérica, com meia-vida de 57 segundos, emitindo fótons gama para se transformar no ^{125}Xe . Este, por sua vez, decai por emissão de pósitrons ou por captura eletrônica, transformando-se em ^{125}I .

O decaimento do ${}^{125}\text{I}$ ocorre por captura eletrônica e conversão interna para o ${}^{125}\text{Te}$, emitindo fótons gama de 35 keV (6,5%) e raios X de 27 keV e 31 keV (93,5%). Durante a irradiação do alvo de ${}^{124}\text{Xe}$ no reator, parte do iodo formado sofre nova reação com nêutrons e transforma-se no isótopo ${}^{126}\text{I}$, que também é radioativo e que estará presente em baixa concentração na semente, como um contaminante, porém sem efeitos indesejáveis. A Figura 3 apresenta a rota desses processos (KAPLAN, 1978). A baixa energia e longa vida resultam em uma taxa de dose que é ideal para o tratamento desse câncer, pois se encaixam perfeitamente com as características radiobiológicas do tecido em questão (KAPLAN, 1978; MEIGOONI, 2000).

Figura 3 - Rota de produção do ${}^{125}\text{I}$ em reator nuclear*.

Fonte: (COSTA, 2015)

* A seção de choque para a reação do ${}^{124}\text{Xe}$ com nêutron para formação do ${}^{125}\text{Xe}$ (165 b) refere-se à soma das seções de choque de formação do ${}^{125}\text{Xe}$ (137 b) e ${}^{125m}\text{Xe}$ (28 b). O valor de 165 b foi utilizado para fins práticos, uma vez que o estado metaestável decai com 57 segundos de meia-vida para o estado fundamental.

3.3 Rejeitos Radioativos e seu Gerenciamento

Rejeitos radioativos são fontes de radiação ionizante e como tal devem receber atenção especial a fim de evitar exposições desnecessárias do trabalhador, do público, do meio ambiente e das gerações futura, e contaminação ambiental.

A geração de rejeitos radioativos é um resultado inevitável da produção de fontes radioativas. Assim, é necessário mantê-los isolados até que, por decaimento, os níveis de atividade possam atingir os limites de segurança estabelecidos nos regulamentos nacionais e nas recomendações internacionais.

Apesar de existir uma série de normas e regulamentos disponíveis para o gerenciamento de rejeitos radioativos no mundo, cada país deve seguir sua regulamentação vigente, uma vez que cada autoridade tem a responsabilidade sobre o controle administrativo dos rejeitos gerados em seu território (ICRP, 1977).

No Brasil, a gestão desses rejeitos deve cumprir os regulamentos estabelecidos pelo órgão regulador nacional na área nuclear, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), tendo como base as recomendações de órgãos como a *Internacional Atomic Energy Agency* (IAEA) e a *Internacional Commission on Radiological Protection* (ICRP).

A CNEN, em seu glossário de segurança nuclear define rejeito radioativo como: “qualquer material resultante de atividades humanas, que contenha radionuclídeos em quantidades superiores aos limites de isenção [...] para o qual a reutilização é imprópria ou não prevista”(CNEN, 2015). Em sua atual regulamentação (CNEN-NN 8.01), o critério para classificar um material como sujeito à regulamentação para rejeitos radioativos é que a atividade ou a concentração de atividade sejam superiores aos níveis de dispensa para cada radionuclídeo. Os requisitos para que o material seja resultante de atividade humana e não tenha mais serventia estão implícitos. Os níveis de dispensa foram calculados de forma que a dose efetiva que pode ser recebida por qualquer indivíduo do público que venha a ser exposto, seja igual ou inferior a 10 μ Sv/ano.

Toda instalação que manipula ou produz fontes radioativas deve garantir que a exposição à radiação de um indivíduo, seja do público ou trabalhador, não exceda os limites de dose estabelecidos nos regulamentos (CNEN, 2014b).

Quando há rejeitos radioativos envolvidos nas atividades de uma instalação, os pedidos de licença à CNEN devem descrever em detalhe o plano de Gerenciamento de Rejeitos Radioativos (GRR) na instalação.

Uma vez que rejeitos radioativos também podem apresentar, além dos riscos físicos, riscos químicos e biológicos, esses riscos devem, também, ser considerados no programa de GRR.

Nesse sentido, de acordo com o atual regulamento da CNEN, a NN 8.01, o plano de Gerenciamento de Rejeitos Radioativos é um conjunto de atividades técnicas e

administrativas envolvidas na coleta, segregação, manuseio, tratamento, acondicionamento, transporte, armazenamento, controle e deposição final de rejeitos radioativos (CNEN, 2014a).

3.4 Princípios do GRR

Todo sistema de gerenciamento de rejeitos radioativos deve seguir a legislação vigente no país. Entretanto, a avaliação dos princípios que regem essas normas também tem papel importante na definição da política de gestão de rejeitos na instalação, uma que vez que permite melhor entendimento da legislação em vigor.

O objetivo do gerenciamento de rejeitos radioativos é definido como: “lidar com rejeitos radioativos de modo a proteger a saúde humana e o meio ambiente agora e no futuro sem impor encargos indevidos às gerações futuras” (IAEA, 2011). Assim, o gerenciamento de rejeitos radioativos baseia-se em princípios éticos fundamentais, por meio dos quais normas e regulamentos são elaborados, respeitando premissas básicas, tais como a segurança do público e do ambiente.

Existem diversos princípios norteadores aplicáveis ao GRR que são reconhecidos internacionalmente. Os recomendados pela IAEA, em seu documento “*The Principles of Radioactive Waste Management*” (IAEA, 1995) são nove. Esses princípios podem ser aplicados a todos os aspectos do gerenciamento, a todos os países e a todos os geradores de rejeitos; devem nortear a definição das políticas e o estabelecimento do sistema de gestão de rejeitos no país, garantindo assim a segurança não só da instalação, como também dos indivíduos potencialmente expostos e alcançando o objetivo da gestão segura, agora e no futuro.

Em 2005 o *Department for Environment, Food & Rural Affairs* (DEFRA), do Reino Unido, elaborou um documento preliminar, com princípios aplicáveis ao GRR que seguiam as recomendações da IAEA, mas que incluía aspectos não contemplados pela Agência. Em sua versão mais atual (2010) esses princípios foram novamente apresentados com inovações. Diferentemente dos princípios propostos pela IAEA, esses princípios foram agrupados em: princípios fundamentais (Tabela 1) e princípios derivados (ENVIRONMENT AGENCY, 2010).

A Tabela 1 apresenta os princípios fundamentais elaborados pela IAEA e pelo DEFRA. Alguns itens apresentam alguma correlação, como por exemplo: “Encargos para as gerações futuras”, da IAEA. Esse princípio orienta que os rejeitos radioativos devem ser gerenciados de tal forma que as futuras gerações não sejam obrigadas a gastar seus recursos

para se proteger dos rejeitos que foram gerados atualmente. Esse princípio está expresso como princípio do “Poluidor-pagador” da *Enviroment Agency* o qual orienta que os custos de gestão e deposição dos rejeitos radioativos seja de responsabilidade dos produtores, proprietários e usuários das substâncias radioativas. Em ambos os princípios se nota a preocupação com as gerações futuras sofrerem consequências ou terem que despender recursos para se proteger. Na mesma tabela, alguns itens são abordados de forma separada por um dos órgãos e unificada pelo outro, como é o caso dos itens “Proteção à saúde humana” e “Proteção do meio ambiente” da IAEA, com o item “Proteção à saúde humana e o meio ambiente” da *Enviroment Agency*. E há itens que não apresentam correlação ou ela é tênue, como por exemplo: “Segurança das instalações” da IAEA e “Incertezas e Princípio da Precaução” da DEFRA.

Tabela 1- Princípios fundamentais do GRR.

IAEA	UK <i>Enviroment Agency</i>
1. Proteção à saúde humana	A. Sustentabilidade
2. Proteção ao ambiente	B. Partes interessadas
3. Proteção para além das fronteiras nacionais	C. Planejamento Integrado
4. Proteção das gerações futuras	D. Seleção e implementação de opções de gerenciamento
5. Encargos para as gerações futuras	E. Proteção à saúde humana e o meio ambiente
6. Quadro jurídico nacional	F. Regulamento
7. Controle da geração de rejeitos radioativos	G. Melhor conhecimento científico
8. Interdependência na geração e gerenciamento de rejeitos radioativos	H. Incertezas e Princípio de Precaução
9. Segurança das instalações	I. Poluidor-Pagador
	J. Justificação de Práticas e Intervenções

Fonte: autora da tese.

Um ponto que se sobressai na lista da *Enviroment Agency* é a abordagem pormenorizada dos princípios fundamentais apresentados pela IAEA, na forma de princípios derivados. Os princípios derivados são divididos em princípios para avaliação regulatória e princípios para processo regulatório. Ao longo de cada item do sistema de GRR, que compõe esta tese, serão discutidos os princípios norteadores que foram utilizados para a tomada de decisão.

3.5 Classificação de Rejeitos

Criar um sistema de gerenciamento de rejeitos radioativos requer primeiramente conhecimento acerca do tipo de rejeito que será produzido ao longo do funcionamento da instalação. A normalização (ou etapa) dá-se o nome de caracterização de rejeitos.

A classificação de rejeitos requer informações sobre o tipo de radionuclídeo presente no rejeito e a meia-vida de cada um, os níveis de atividade, entre outras características cruciais para o planejamento da gestão. A IAEA como órgão orientador, fornece bases para essa classificação. Em seu TECDOC 1419 (IAEA, 2009a) os rejeitos são classificados em seis categorias, apresentadas a seguir:

- Rejeito isento - (*Exempt Waste*) – pode ser liberado do controle institucional imediatamente;
- Rejeito meia-vida muito curta (*Very Short Lived Waste*) – requer um período de armazenamento de poucos anos para decaimento, antes da dispensa;
- Rejeito nível muito baixo – (*Very Low Level Waste*) – requer um grau menor de isolamento para que o nível aceitável de segurança seja alcançado;
- Rejeito nível baixo - (*Low Level Waste*) – requer isolamento e contenção por períodos de até algumas centenas de anos;
 - Rejeito de nível intermediário (*Intermediate Level Waste*) – Rejeito alto nível (*High Level Waste*) – requer um grau ainda maior de contenção e isolamento.

A CNEN adotou essa classificação e a reorganizou em classes de 0 a 3 (Tabela 2) (CNEN, 2014a).

Pela classificação nacional, os rejeitos gerados na produção de fontes de ^{125}I para braquiterapia pertencem à Classe 1: Rejeitos de meia-vida muito curta (RVMC), equivalente a “*Very Short Lived Waste*” da IAEA. A CNEN definiu essa classe como a dos rejeitos com meia-vida inferior a 100 dias (CNEN, 2014a) (Figura 4).

Tabela 2- Comparação das Classificações de rejeitos da IAEA e CNEN

Classificação IAEA	Classificação CNEN	Nível de Atividade	Meia vida	Observações:
<i>EW</i>	Classe 0 RI	Abaixo do nível de dispensa.	Curta	Rejeito isento devido a baixos níveis de atividade.
<i>VSLW</i>	Classe 1 RVMC	Acima do nível de dispensa.	Curta	Rejeitos com atividade superior aos níveis de dispensa e com meia-vida de até 100 dias.
<i>VLLW</i> ²	-----	-----	-----	-----
<i>LLW, ILW</i>	Classe 2 RBMN	Acima do nível de dispensa (potência térmica inferior a 2kW/m ³).	Acima de 100 dias	Rejeitos com atividade superior aos níveis de dispensa e com meia-vida superior a 100 dias.
	Classe 2.1 RBMN-VC	Baixo e médio níveis de radiação contendo emissores beta/gama	Inferior ou igual a 30 anos	Rejeitos com concentração de radionuclídeos emissores alfa de meia-vida longa limitada em 3700 kBq/kg em volumes individuais e com um valor médio de 370 kBq/kg para o conjunto de volumes.
	Classe 2.2 RBMN-RNp	Radionuclídeos naturais, com atividade acima do limite de dispensa, da extração de petróleo.		Radionuclídeos das cadeias naturais do urânio e do tório produzidos na extração de petróleo e gás natural.
	Classe 2.3 RBMN-RNm	Radionuclídeos naturais, com atividade acima do limite de dispensa, da mineração.		Radionuclídeos das cadeias naturais do urânio e do tório produzidos na extração de matérias primas minerais.
<i>HLW</i>	Classe 2.4 RBMN-VL	Emissores alfa com atividade acima do nível de dispensa e baixa concentração de emissores beta e gama.		Deposição é feita em repositório geológico com profundidade definida pela avaliação de segurança.
	Classe 3 RAN	Potência térmica superior a 2 kW por metro cúbico.	Sem limite, mas com tempo de decaimento tipicamente superior a 300 anos.	Deposição é feita em repositório geológico com profundidade definida pela avaliação de segurança.

Fonte: (Adaptado CNEN, 2014a; IAEA, 2009a).

² Sem correspondência na classificação brasileira.

Figura 4 - Relação das classes de rejeitos (fontes seladas em desuso) *versus* tempo de decaimento.

Fonte: (Adaptado IAEA, 2009a).

3.6 Etapas do Gerenciamento de Rejeitos Radioativos

O GRR consiste no conjunto de tecnologias que são aplicadas ao rejeito desde a sua geração até a deposição final. Assim, as etapas aplicáveis ao gerenciamento de rejeitos radioativos envolvem a caracterização primária (segregação), embalagem, armazenamento temporário e liberação no meio ambiente (IAEA, 2003).

Para o gerenciamento seguro e eficaz dos rejeitos radioativos, cada etapa deve complementar e ser compatível com as demais. Nenhuma etapa deve impedir ou comprometer a etapa subsequente.

Uma vez gerados, os rejeitos radioativos passarão por algumas etapas em seu gerenciamento. As etapas pelas quais o rejeito passará dependerão da classe de rejeitos, estado físico, composição química e da estratégia adotada para sua gestão (Figura 5).

Determinar quais etapas serão empregadas para um rejeito em particular é uma ação que depende do tempo de isolamento necessário. Em alguns casos, as etapas individuais podem estar intimamente ligadas ou realizadas em conjunto. Todo o processo precisa ocorrer de forma que cada etapa seja compatível com as etapas seguintes.

Figura 5- Etapas básicas do GRR.

Fonte: Adaptado (IAEA, 2011).

De modo geral, a estratégia geral da gestão dos rejeitos radioativos envolve: minimizar a quantidade de rejeitos; manter o controle sobre eles em todas as etapas; e minimizar simultaneamente os custos da gestão e as doses recebidas pelos operadores e pelo público. Recomendações como diluir e dispersar (D&D) os rejeitos, reter e retardar (R&R) sua liberação e conter e confinar (C&C) fazem parte dessa estratégia (Figura 6) (VICENTE. R., 2014).

Figura 6 - Fluxograma do sistema de GRR no Brasil³.

Fonte: (VICENTE. R., 2014).

³ O princípio Alara é o acrônimo de "As Low As Reasonable Achievable" ou "Tão baixo quanto razoavelmente exequível" em português.

A IAEA recomenda que os embalados de rejeitos armazenados para decaimento sejam inspecionados regularmente (pelo menos semanalmente) para garantir que estão intactos e ainda presentes no depósito (IAEA, 1998).

Caracterização Primária

A classificação primária é a etapa introdutória do sistema de gerenciamento de rejeitos. Essa etapa deve ser realizada logo após a geração do rejeito; requer informações sobre a forma física, massa, conteúdo de radionuclídeo e atividade, entre outras características.

A caracterização é necessária uma vez que permite determinar as etapas necessárias para o gerenciamento e a forma de deposição final do rejeito (ENVIRONMENT AGENCY, 2010).

A caracterização deve ser realizada:

- Quando há falta de informação ou conhecimento suficiente;
- Quando a informação pode estar desatualizada ou as propriedades alteradas (ex: rejeitos históricos);
- Para garantia de qualidade ou verificação das características dos rejeitos;
- Nos estágios de um processo em que a informação pode ser avaliada com segurança para se tornar parâmetro de minimização de incertezas nas medições, ou quando caso contrário, as informações podem ser perdidas.

Esta etapa orienta-se também, pelo princípio da “Segregação de Rejeitos”, para o qual as melhores técnicas disponíveis devem ser usadas para evitar misturas entre substâncias radioativas e outros materiais, entre substâncias radioativas com meias-vidas muito diferentes, como também estados físicos diferentes e, sempre que essa mistura comprometa o gerenciamento efetivo subsequente, aumente os impactos e os riscos ambientais ou aumente os custos (ENVIRONMENT AGENCY, 2010).

Pré-tratamento

O pré-tratamento é o passo subsequente à etapa de caracterização primária. Pode envolver subetapas tais como: coleta, segregação, tratamento químico e descontaminação e pode também incluir um período de armazenamento temporário.

O pré-tratamento é considerado uma etapa fundamental, uma vez que oferece, em muitos casos, a melhor oportunidade para segregar o rejeito em grupos que serão gerenciados de maneiras semelhantes e isolar rejeitos não-radioativos ou materiais que ainda podem ser reciclados (IAEA, 2003, 2009a, 2011; ONR, 2015).

Nessa etapa, os rejeitos radioativos devem ser segregados de acordo com suas propriedades físicas, químicas, biológicas e radiológicas, dentre as quais, os parâmetros mais importantes são: estado físico, químico, radionuclídeos presentes, tempos de meia vida, atividade, taxa de exposição etc.

A etapa de segregação deve ser abordada no planejamento do sistema de GRR. Materias com propriedades físico-químicas incompatíveis devem ser mantidos segregados desde a fase inicial de geração de rejeitos. Aqueles que possuem mesmas características podem ser misturados a fim de facilitar e baratear o gerenciamento.

Tratamento

Nessa etapa é realizada a redução no volume do rejeito, por meio de tratamento químico e físico que separe substâncias inertes não radioativas, e as operações destinadas a alterar as características dos rejeitos radioativos para melhorar a segurança ou reduzir os custos.

O princípio aplicável a essa etapa é “Uso da melhor técnica disponível - *Best Available Technique* – BAT, para minimizar a quantidade de rejeito”. Em termos simples, as melhores técnicas disponíveis devem ser utilizadas para garantir que a quantidade do rejeito, o nível de atividade e a meia-vida sejam os menores possíveis e, ainda assim, viáveis para a realização dos processos que geram os rejeitos (ENVIRONMENT AGENCY, 2010).

As operações típicas de tratamento, para redução de volume incluem: compactação de rejeitos sólidos secos ou incineração de resíduos líquidos ou sólidos orgânicos⁴; filtração, troca iônica e precipitação de rejeitos líquidos para a concentração dos radionuclídeos em fase sólida de pequeno volume e dispensa da fase líquida de volume maior. Alguns tratamentos químicos visam a mudança de composição do rejeito para otimizar etapas posteriores da gestão (IAEA, 2011; ONR, 2015).

Muitas vezes, vários desses processos são usados em combinação para fornecer descontaminação efetiva de fluxos de resíduos líquidos. Isso pode levar a vários tipos de

⁴ No Brasil não é permitida a incineração de rejeitos radioativos.

rejeitos radioativos secundários que também deverão ser gerenciados, como filtros contaminados, resinas de troca iônica usadas, lamas etc. (ONR, 2015).

Imobilização

A imobilização ou solidificação envolve a transformação dos rejeitos radioativos líquidos em uma forma sólida monolítica adequada para transporte, armazenamento e deposição. Aplica-se, também, ao encapsulamento de rejeitos sólidos para formar um bloco sólido monolítico.

Os métodos típicos de imobilização incluem a solidificação de rejeitos de baixo e médio nível de atividade em matriz de cimento ou betume e de rejeitos radioativos de alto nível de atividade em uma matriz de vidro.

Os rejeitos imobilizados são colocados em tambores de aço de 200 litros ou outros recipientes robustos para criar um embalado de rejeito. Em muitos casos, o tratamento e o condicionamento ocorrem em uma estreita combinação (IAEA, 2011; ONR, 2015).

Ao fim dessa etapa, deve ser realizada a caracterização secundária, caracterização essa que antecede o armazenamento final do rejeito. A caracterização secundária é necessária para verificar se o rejeito tratado cumpre com os regulamentos para o transporte e para o armazenamento final, tais como limites de atividade, concentração de atividade, volume, massa etc.

Armazenamento

O armazenamento de rejeitos radioativos pode ocorrer em qualquer fase do gerenciamento de rejeitos radioativos. O objetivo dessa etapa é manter o rejeito radioativo isolado de outros materiais, a fim de proteger o ambiente e facilitar as etapas seguintes, até sua deposição final.

Os rejeitos podem ser armazenados por muitos anos antes de passar pelas etapas de caracterização final, tratamento e deposição final. Algumas instalações de armazenamento estão localizadas dentro da instalação geradora licenciada, outras são instalações centralizadas que armazenam rejeitos de diversos geradores.

No armazenamento, os embalados de rejeitos radioativos devem ser claramente identificados como radioativos e devem também apresentar outras informações necessárias para sua identificação. Deve-se garantir, também, que os registros relacionados aos embalados

sejam rastreáveis e acessíveis (CNEN, 2014a). As seguintes informações devem ser colocadas na ficha de identificação dos embalados de rejeitos (IAEA, 1998):

- Número de identificação;
- Radionuclídeos presentes;
- Atividade (se medida ou estimada) / data de medição;
- Origem (sala, laboratório, indivíduo, etc., se aplicável);
- Perigos potenciais/reaais (químicos, infecciosos, etc.);
- Taxa de dose de superfície / data de medição;
- Quantidade (peso ou volume);
- Pessoa responsável.

Os recipientes de armazenamento devem ser marcados para indicar o nível máximo de enchimento, geralmente até 80%, e rotulados com o símbolo da radiação e marcados com um número de identificação. Deve ser tomado cuidado especial com a identificação quando os recipientes são reutilizados (IAEA, 1998).

O rejeito, nessa etapa, é levado para o local de armazenamento temporário ou final (deposição), devendo seguir a norma específica para o transporte: CNEN NE - 5.0 (CNEN, 1988).

O princípio “Armazenamento em um estado passivamente seguro” (ENVIRONMENT AGENCY, 2010) norteia também essa etapa. Nesse princípio, as substâncias radioativas devem ser armazenadas usando as melhores técnicas disponíveis para que seus riscos e impacto ambientais sejam minimizados e de modo que a segurança seja independente de ações contínuas dos operadores.

As substâncias radioativas devem ser armazenadas em um estado passivamente seguro ou seja, o armazenamento de rejeitos radioativos deve ser feito de modo a minimizar a necessidade de controle e segurança ativa, manutenção, monitoramento, e intervenção humana imediata. Caso os rejeitos gerados por uma instalação não estejam em um estado passivamente seguro, deve-se avaliar os benefícios de torná-lo seguro por meio da imobilização, como já foi discutido antes (ENVIRONMENT AGENCY, 2010).

Dispensa e Deposição final

Etapa final, na qual o rejeito armazenado para decaimento é, posteriormente, descartado como rejeito comum, respeitando-se os limites para dispensa de acordo com a CNEN NN 8.01 (CNEN, 2014a), ou enviado para deposição.

De acordo com recomendações da UK *Environmental Agency* em seu princípio “Requisitos e condições para dispensa de rejeitos”, para o descarte de rejeitos radioativos, os requisitos devem ser estabelecidos e impostos de modo a proteger adequadamente as pessoas e o meio ambiente (ENVIRONMENT AGENCY, 2010).

A dispensa inclui a descarga de efluentes líquidos ou gasosos no ambiente dentro dos limites autorizados (CNEN, 2014a). O princípio “Limites e níveis de descargas” orienta para o estabelecimento de limites nas quantidades de radioatividade que podem ser descarregados de modo a garantir a proteção da saúde humana e do meio ambiente (ENVIRONMENT AGENCY, 2010). No Brasil, esses limites são estabelecidos pela CNEN no regulamento NN 8.01 (2014).

A deposição final é o último passo no sistema de gerenciamento dos rejeitos radioativos que não podem ser dispensados. Consiste na colocação dos rejeitos numa instalação com garantia razoável de segurança no isolamento do ambiente, sem a intenção de recuperação e sem dependência de vigilância e manutenção em longo prazo. O isolamento é alcançado colocando-se barreiras ao redor do rejeito radioativo para restringir a liberação de radionuclídeos para o ambiente. As barreiras podem ser naturais ou artificiais e um sistema de isolamento pode consistir de uma ou mais barreiras (IAEA, 2009a; ONR, 2015).

Registros

O registro das informações sobre os rejeitos, desde sua caracterização primária até o descarte ou deposição, é um item fundamental no GRR. Esses registros garantem a transmissão das informações relativas ao GRR para etapas seguintes e para os futuros responsáveis pelos rejeitos.

De acordo com a CNEN-NN 8.01 toda instalação deve manter um sistema atualizado de registro de rejeitos radioativos. Os embalados de rejeitos radioativos devem apresentar fichas de identificação, afixadas externamente, informando seu número de registro e a taxa de dose na superfície.

Os itens obrigatórios para registros dos rejeitos são:

- A identificação do tipo de rejeito, sua origem e a localização da embalagem que o contém;
- A procedência e o destino do rejeito radioativo;
- A data de ingresso dos volumes no depósito;
- Os radionuclídeos presentes em cada volume, respectivas atividades e atividade total;
- A taxa de dose máxima em contato com a superfície;
- A data estimada para que se alcance o nível de dispensa;
- As dispensas de rejeitos realizadas, particularizando as atividades diárias liberadas;
- As transferências externas e internas;
- Manter registros em bancos de dados informatizados;
- Outras informações pertinentes à segurança.

Qualquer modificação ou correção realizada nos dados constantes nos registros deve ser claramente justificada e documentada a fim de evitar erros de registro. A CNEN determina também que os registros, bem como os documentos relativos a suas correções, sejam mantidos na instalação.

Os registros devem facilitar a administração das diferentes etapas do GRR, demonstrar o cumprimento dos requisitos, que os padrões estabelecidos no sistema de GRR foram alcançados e para fornecer informações e garantia contínua sobre o impacto ambiental (dados de monitoração ambiental) e os riscos das operações realizadas, incluindo a etapa de descarte de rejeitos em meio ambiente.

Esses relatórios devem ser claros, atualizados, informar as incertezas relacionadas a uma medida e estarem disponíveis sempre que solicitados (por exemplo: inspeções da CNEN) ou para serem fornecidos quando solicitados, até o fim do descomissionamento da instalação (CNEN, 2014a; ENVIRONMENT AGENCY, 2010).

3.7 Fatores técnicos que afetam a seleção de tecnologias

As instalações que geram rejeitos radioativos devem estar atentas as “melhores técnicas disponíveis” (*Best available Techniques* - BAT) em diversas fases do gerenciamento de seus rejeitos.

Esse princípio aplica-se a diversas fases do GRR. Permite garantir, por exemplo na fase de geração do rejeito, que o volume de rejeito seja nulo ou, quando isso não for possível, minimizado em relação à atividade e quantidade. Pode ser aplicado, também, na fase de segregação a fim de evitar mistura de substâncias radioativas com outros materiais tornando o GRR ainda mais oneroso (ENVIRONMENT AGENCY, 2010).

Definir a melhor ou as melhores técnicas disponíveis exige uma avaliação contínua das novas tecnologias disponíveis no mercado. Isso envolve a seleção de um processo a ser utilizado; o projeto e implementação de instalações e sistemas que possam ser implantadas na planta de operação levando em consideração não apenas a tecnologia envolvida, mas também custos e a viabilidade econômica para a instalação em questão. Vale lembrar que a “melhor técnica disponível” significa o estágio mais efetivo e avançado no desenvolvimento da atividade e seus métodos de operação, mas que nem sempre significará alto custo. Se algum benefício ou redução em detrimento, por menor que seja, pode ser alcançado usando poucos ou nenhum recurso adicional, então deve ser garantido e esta será considerada a melhor técnica disponível (ENVIRONMENT AGENCY, 2010).

Evidentemente, determinar qual é a melhor técnica disponível pode gerar uma série de interpretações tendenciosas. Assim recomenda-se que a seleção da melhor técnica seja feita caso a caso, por meio de processos transparentes e inclusivos, com base em dados de boa qualidade e corretamente documentados e levando em consideração também os custos e vantagens de cada técnica. O operador precisa garantir também um equilíbrio entre segurança, questões ambientais, sociais e econômicas ao decidir qual é a melhor técnica (ENVIRONMENT AGENCY, 2010).

Assim, o público e todos os interessados devem ter acesso às informações relacionadas a escolha da melhor técnica. Essa atitude, quando tomada, permite a criação de uma relação de confiança entre autoridades e público em geral, algo de grande valor principalmente em uma área tão vulnerável à opinião pública como a de gestão de rejeitos.

A elaboração de uma estratégia adequada (de acordo com a política nacional de GRR) e escolha de uma técnica apropriada são pontos chave para o desenvolvimento de um programa de gerenciamento de rejeitos bem-sucedido. Idealmente, a estratégia deve ser

determinada antes de o sistema ser colocado em prática. Uma mistura de estratégias é possível, tais como: gerenciamento *on-site*, (no local) gerenciamento em uma instalação centralizada e uma mistura dessas duas opções. Lembrando que, quando possível, o gerenciamento de rejeitos no mesmo local onde são gerados sempre é uma opção interessante, uma vez que reduz os riscos associados ao transporte, de rejeitos não condicionados, para uma instalação centralizada (IAEA, 2003).

Na falta de repositório licenciado na instalação armazenadora de rejeitos, deve ser dada atenção para o acúmulo de rejeitos em local de armazenamento com potenciais problemas de segurança. Entretanto, alguns rejeitos de meia-vida muito curta nunca irão necessitar de armazenamento em uma central e, geralmente, é mais benéfico manter esse tipo de rejeito na própria instalação geradora (IAEA, 2003).

Escala de aplicação da tecnologia - Quantidade de rejeitos

A quantidade de rejeitos que será gerada na instalação tem grande impacto no sistema de GRR a ser implantado. Pequenos volumes de rejeitos requerem estratégias de gestão simples, de baixo custo e mais genéricas, quando comparados com instalações que geram grandes volumes. Por exemplo, sistemas de compactação e super-compactação são considerados de larga escala, comumente não aplicáveis a pequenas quantidades de rejeitos.

Maturidade da tecnologia

Existem numerosas opções tecnológicas para o GRR, no entanto antes de escolhê-las deve-se avaliar o grau de maturidade dessas técnicas disponíveis (IAEA, 2003):

- O nível de aplicação (passado e presente)
- O tipo de rejeito processado
- O *status* da licença da tecnologia em questão
- A disponibilidade de fornecedores e serviços
- A experiência prática operacional (eficiência, custos, manutenção, conformidade)

Usar tecnologia madura e evitar extensas modificações e desenvolvimento também é considerada uma vantagem para redução de custos e riscos.

Robustez da tecnologia

Pode ser definida como o grau de confiabilidade de uma tecnologia para diferentes condições de operação e, quando necessário, condições de manutenção. Deve-se avaliar se a tecnologia dependerá de informações detalhadas sobre o rejeito (caracterização primária) e se ela poderá ser obtida. Caso contrário, a tecnologia poderá não ser confiável devido à limitação de informações acerca do rejeito e requererá ainda mais qualificação profissional com a finalidade de adaptar a tecnologia às condições da instalação (IAEA, 2003).

Flexibilidade da tecnologia

Esse critério trata do equilíbrio entre uma tecnologia com instalação pequena e simples à qual uma instalação geradora de pequenas quantidades de rejeitos deve recorrer, e uma tecnologia maior e mais versátil que poderá ser usada por uma instalação maior, por exemplo, uma central de processamento (IAEA, 2003).

Um exemplo aplicável é apresentado no documento técnico da IAEA: TECDOC-1371, no qual processos biológicos podem ser utilizados para degradar e destruir materiais orgânicos tóxicos e podem operar a baixo custo, enquanto um incinerador pode destruir praticamente todos os materiais orgânicos, mas requer uma quantidade relativamente alta de investimento financeiro (IAEA, 2003).

Para rejeitos contendo iodo, as tecnologias aplicáveis para recuperação do ^{125}I para reduzir os volumes de rejeitos gerados semanalmente, por exemplo, são variadas tanto quanto à tecnologia, quanto aos custos envolvidos.

3.8 Viabilidade Econômica do GRR

Um financiamento adequado para o GRR deve ser garantido desde a fase de planejamento da instalação. Uma vez que a falta de fundos adequados pode comprometer a eficiência e segurança do sistema de GRR como um todo, um estudo de viabilidade econômica é recomendável.

Partes do custo total do ciclo de vida que devem ser consideradas:

- Todos os custos para investimentos, depreciação, operação, descomissionamento e mão de obra;

- Custos associados à manipulação de rejeitos secundários, à vigilância e à manutenção;
- Custos para pesquisa e desenvolvimento, demonstração, validação e/ou adaptação do sistema de GRR (IAEA, 2003).

Todas as etapas intermediárias do sistema de GRR são dispendiosas. No entanto, nas primeiras decisões, valores confiáveis de custos podem não ser conhecidos. A redução do volume do rejeito inicialmente gerado reduz também o volume do rejeito a ser depositado e os efeitos do custo desse processo.

3.9 Gerenciamento de Rejeitos na Produção de Fontes Seladas

A produção de radioisótopos é, geralmente, realizada em instalações radioativas como reatores de pesquisa e aceleradores. Os rejeitos oriundos dessa atividade refletem a tecnologia aplicada nos processos químicos e radioquímicos. Apesar de geralmente serem gerados em pequenos volumes, possuem, tipicamente, elevada atividade e podem conter vários radionuclídeos, incluindo produtos de fissão, isótopos do urânio e um número variado de nuclídeos de meia-vida muito curta. Além disso, os rejeitos podem estar na forma de efluentes gasosos, efluentes líquidos orgânicos ou aquosos, resinas de troca iônica, rejeitos sólidos compactáveis e não compactáveis. (IAEA, 2003).

Os rejeitos gerados envolvem desde materiais descartados durante a produção, como luvas, sapatilhas, papéis de forração, ou por exemplo, as próprias fontes utilizadas no tratamento dos pacientes, ao fim de sua vida útil ou reprovadas no processo de fabricação.

Assim, o gerenciamento dos rejeitos durante a produção e após o uso das fontes deve ser previamente determinado, a fim de minimizar as exposições dos profissionais envolvidos durante todas as etapas (IAEA, 2007).

De modo geral, nos laboratórios em que se produzem fontes radioativas seladas de ^{125}I são bem conhecidos tanto os tipos de radionuclídeos, bem como os níveis de atividade que são manipuladas. A maioria dos radionuclídeos é de meia-vida curta, o que facilita o gerenciamento dos rejeitos gerados na produção. O armazenamento, por um curto período de tempo, deve ser usado como estratégia de gerenciamento para que ocorra o decaimento da atividade a níveis aceitáveis (ICRP, 1977).

Um dos princípios básicos do GRR é que a segurança da instalação que gera ou gerencia o rejeito radioativo seja garantida durante seu tempo de funcionamento (IAEA, 2003). O projeto da instalação deve ser desenvolvido tendo como princípio prevenir acidentes

e limitar suas consequências negativas, caso ocorram. Para isso, deve contemplar vários níveis de proteção, ou seja, barreiras múltiplas, para limitar as consequências radiológicas.

Dependendo das características do material, o acúmulo de rejeitos na área de trabalho, como em capelas dos laboratórios, salas de produção, ou na própria instalação, deve ser evitado e, para isso, é necessário um sistema de coleta e transferência para o local de armazenamento, chamado depósito inicial, que atue com a frequência adequada.

Lixeiras com sistema de abertura de tampa por pedais, contendo sacos plásticos não porosos, devem ser utilizadas para coleta e armazenamento temporário dos rejeitos sólidos nos laboratórios. Devem ser claramente identificadas, para evitar erros decorrentes da falta de informação. A Tabela 3 apresenta os principais tipos de rejeitos radioativos gerados durante a produção e aplicação de radioisótopos.

Tabela 3 - Principais tipos de rejeitos radioativos gerados durante a produção e aplicação de radioisótopos.

Categoria do Rejeito	Tipo de Rejeito
Líquido aquoso	Efluentes de laboratórios Efluentes de células de produção de isótopos Rejeitos da piscina de armazenamento de combustível (reatores de pesquisa) Efluentes de descontaminação Águas de depósito e de lavagem Rejeitos da mineração e moagem de urânio e tório de plantas de extração.
Líquido orgânico	Óleos de bombas, etc. Líquidos de cintilação Solventes de extração (tributilfosfato (TBP); querosene, amina, etc.).
Sólidos compactáveis	Tecidos de forração, cotonete, papel, papelão, plásticos (policloreto de vinila, polietileno), luvas de borracha, roupas de proteção, filtros e vidraria.
Sólidos não compactáveis	Sucata metálica, fragmentos de alvenaria, fontes seladas, agulhas, resina de troca iônica, carcaças de animais e excretas.

Fonte: (IAEA, 2001).

3.10 Características químicas e radiológicas do ^{125}I

O Laboratório de Produção de Fontes Para Radioterapia (LPFRT), no qual este trabalho está sendo desenvolvido, gerará rejeitos com radionuclídeos de meia-vida muito curta, entrando na classe 1, de acordo com o estabelecido pela CNEN como Rejeito de meia-

vida muito curta (RVMC), (CNEN, 2014a; IAEA, 2009a). Possuem atividade maior que os níveis de dispensa, entretanto, decaem rapidamente (^{125}I : meia-vida de 59,43 dias) (Tabela 4).

O átomo de iodo é um halogênio, elementos bastante reativos devido a sua grande eletronegatividade. Possui sete elétrons na camada de valência, o que significa que eles podem ganhar elétrons de outros elementos para satisfazer a regra do octeto; o iodeto (I^-) forma uma molécula diatômica, $\text{I}_2(\text{g})$, com ligações covalentes; as moléculas são agrupadas por forças intermoleculares fracas conhecidas como forças de dispersão do tipo *Van Der Walls-London*. Essas características contribuem para o alto valor de volatilidade do material (SOUZA, 2016).

Tabela 4 – Propriedades do ^{125}I .**Propriedades físico-químicas**

Classificação química do elemento: Não metal, halogênio, 5º período

Densidade: $4,93 \text{ g.cm}^{-3}$

Estado físico à temperatura ambiente: sólido

Ponto de fusão: $386,8 \text{ K}$ Ponto de ebulição: $457,6 \text{ K}$ **Propriedades radiológicas**

Meia-vida: 59,43 dias

Modo de decaimento: Captura eletrônica (100%)

Emissões:

Gama: 35 keV (6,5 %)Elétrons de conversão: Ec K: $3,68 \text{ keV}$ (80,3 %)Ec L₁: $30,6 \text{ keV}$ (9,52%)Ec L₂: $30,9 \text{ keV}$ (0,764%)Ec L₃: $31,2 \text{ keV}$ (0,191%)Ec M: $34,7 \text{ keV}$ media (2,09%)Ec N: $35,5 \text{ keV}$ media (0,496%)Raios X: K α 1: $27,5 \text{ keV}$ (74,1 %)K α 2: $27,2 \text{ keV}$ (39,8%)K α 1: $31,0 \text{ keV}$ (14,0 %)K α 2: $31,7 \text{ keV}$ (4,30 %)K α 3: $30,9 \text{ keV}$ (7,20 %)K α 5: $31,2 \text{ keV}$ (0,144 %)L α : $37,7 \text{ keV}$ media (6,14 %)L α : $40,9 \text{ keV}$ media (5,93 %)

Camada semi-redutora de chumbo: 0,02 mm

Classificação de rejeito (CNEN-NN-8.01): Classe 1

Propriedades radiobiológicasRadiotoxicidade (ingestão): $3,44 \times 10^{-7} \text{ Sv.Bq}^{-1}$ (1273 mrem.mCi⁻¹)Radiotoxicidade (inalação): $2,16 \times 10^{-7} \text{ Sv.Bq}^{-1}$ (799 mrem.mCi⁻¹)Constante gama: $7,43 \times 10^{-5} \text{ mSv.m}^2.\text{h}^{-1}.\text{MBq}^{-1}$ (0,27 mrem.m².h⁻¹.mCi⁻¹)

Meia-vida biológica: 120 a 138 dias

Meia-vida efetiva: 42 dias

Órgão crítico: Tireóide

Rotas de incorporação: ingestão, inalação e penetração pela pele ou em ferimentos

Risco: exposição externa e incorporação

Aplicações:

Fonte para braquiterapia; traçador em Radioimunoensaio

3.11 Etapas do GRR na produção de fontes seladas de ^{125}I para braquiterapia

3.11. 1 Rejeitos Líquidos

Caracterização Primária de Rejeitos Líquidos Contendo ^{125}I

De acordo com a IAEA (IAEA, 2009b), o volume do rejeito em potencial, classificado como RVMC pode ser reduzido por apropriada caracterização para separar aqueles componentes que podem ser liberados como rejeito isento.

Mesmo utilizando-se apenas um radionuclídeo, a classificação primária (segregação) envolve a separação pelo estado físico do rejeito: sólido, líquido e gasoso. Por exemplo, rejeitos sólidos deverão ser separados em sacos plásticos enquanto os líquidos transferidos para recipientes plásticos (bombonas). A segregação deve, sempre que possível, ser realizada no local onde serão produzidos os rejeitos.

Entre todas as etapas, a caracterização primária é uma etapa crítica e deve receber atenção especial visto que com seus resultados se determinam as etapas seguintes da gestão. Os rejeitos podem ser classificados de diferentes modos: de acordo com a atividade ou concentração de atividade (classes 1, 2 e 3); de acordo com o estado físico (sólido, líquido e gasoso) e de acordo com o tempo de meia-vida (muito curta – $T_{1/2} < 100$ dias; curta – $T_{1/2} < 30$ anos; ou longa)(CNEN, 2014a).

No decorrer da gestão de rejeitos, após a caracterização inicial, o rejeito poderá ser descartado (dispensa), confinado temporariamente para decaimento e dispensa ou confinado permanentemente (deposição final). A decisão para cada um desses procedimentos dependerá das características inicialmente identificadas dos rejeitos gerados.

Assim, para realizar adequadamente as etapas do GRR, é imprescindível o conhecimento das características físico-químicas dos radionuclídeos presentes que devem ser obtidas na caracterização primária.

Os volumes de rejeitos líquidos contendo ^{125}I gerados semanalmente pelo LPFRT deverão ser registrados a fim de determinar com adequada precisão a capacidade de armazenamento necessária para confinar o rejeito líquido até o momento do descarte ou informar o momento no qual o sistema de contenção de rejeitos líquidos deverá ser substituído devido ao aumento ou redução na demanda de produção das fontes radioativas.

Armazenamento do Rejeitos Líquidos Contendo ¹²⁵I

O armazenamento para decaimento é normalmente considerado para rejeitos que podem ser liberados do controle regulatório em poucos anos (dezenas de anos em alguns casos). Essa classe, contém radionuclídeos de meia-vida curta. Uma vez que a concentração de atividade desta classe de rejeito está acima dos níveis de dispensa, necessitam do armazenamento temporário, até atingirem os níveis de dispensa. (IAEA, 2016).

Os RVMC são armazenados em áreas próximas de onde são gerados até o momento de serem transportados para um depósito inicial adequado ou serem liberados como resíduo comum. Durante esse estágio, um abrigo temporário para manter os rejeitos livres de intempéries (precipitações e ventos) e contato com o público, e atendendo as recomendações nacionais e internacionais, pode ser apropriado para fornecer adequada segurança enquanto decaem (IAEA, 2009b).

Para rejeitos líquidos o armazenamento deverá ser feito “sobre bacia de contenção, bandeja, recipiente ou material absorvente com capacidade de conter ou absorver o dobro do volume do líquido presente na embalagem” (CNEN, 2014a). Assim, as células de produção que gerarão rejeitos líquidos terão sistema de coleta por meio de bombonas localizadas abaixo de cada célula, com o dobro da capacidade semanal dos rejeitos líquidos gerados. Deverão ser identificadas (data, atividade, volume, massa, etc.) no momento em que forem enviadas para armazenamento. Ao fim de cada semana de produção os níveis de atividade e concentração de atividade serão medidos, registrados e as bombonas serão direcionadas para o galpão de armazenamento temporário (depósito inicial) localizado no mesmo andar da instalação (no laboratório nº. 50 – ANEXO A).

Dispensa de Rejeitos Líquidos Contendo ¹²⁵I

Nesta etapa, os rejeitos contendo ¹²⁵I poderão ser descartados na rede de esgoto de acordo com sua classificação, desde que atendam os seguintes critérios: o rejeito deve ser prontamente solúvel ou de fácil dispersão em água; a quantidade de cada radionuclídeo liberada mensalmente, diluída no volume médio mensal da instalação, deve atender aos limites de concentração média especificados na norma 8.01 da CNEN; a quantidade anual total de radionuclídeos liberada na rede de esgoto sanitário deve atender os valores também especificados na mesma norma.

O limite de concentração para dispensa dos rejeitos líquidos contendo ^{125}I de acordo com a norma CNEN NN-8.01, é: $3,7 \times 10^4 \text{ Bq.m}^{-3}$ ($1,0 \times 10^{-6} \mu\text{Ci.m}^{-3}$) (CNEN, 2014a).

Os rejeitos gerados pelo LPFRT serão descartados ao atingirem os valores de dispensa. O cálculo será realizado com base no volume médio mensal do próprio laboratório, uma vez que seu sistema de esgoto é independente dos demais sistemas no Centro de Tecnologia das Radiações, onde o LPFRT está localizado.

Os limites mensais de dispensa, estabelecidos em norma levam em consideração apenas concentração por volume de rejeito, e os anuais, a atividade total do rejeito. O gerador de rejeito deverá atentar para os valores médios de dispensa e os limites aplicáveis devem estar definidos antes da dispensa do material.

A fim de se aprimorar os processos de gerenciamento de rejeitos até o momento da deposição final, é necessário que cada instalação radiativa tenha seu sistema de gestão de rejeitos implantado. Etapas como caracterização primária que envolve a correta identificação e segregação do rejeito, dentro da área de trabalho, fazem diferença no tratamento ou dispensa a ser aplicada para o rejeito.

Registros e inventários atualizados dos rejeitos serão mantidos, descrevendo: Identificação dos rejeitos e do embalado que os contém e sua localização; Origem e destinação; Transferências externas e internas; Dispensas realizadas e as atividades diárias na liberação e outras informações relacionadas com a segurança do gerenciamento.

3.11.2 Rejeitos Sólidos

Caracterização Primária de Rejeitos Sólidos Contendo ^{125}I

Os rejeitos sólidos gerados na produção das fontes de ^{125}I consistem em papéis de forração de bancadas, frascos contendo resíduos de soluções de ^{125}I e outros frascos usados na produção, filtros do sistema de exaustão de ar e fontes que tenham sido descartadas no controle de qualidade.

Na fase de caracterização primária, os dados de cada um dos itens que serão tratados como rejeitos sólidos devem ser levantados a fim de se poder estimar massa e volume dos rejeitos gerados semanalmente, bem como determinar a capacidade de armazenamento do depósito inicial.

Os rejeitos sólidos podem ser também segregados em compactáveis (papéis e tecidos de forração) e não compactáveis (frascos e fontes não aprovadas no controle de qualidade). Essa ação permite uma adequada gestão e redução dos volumes de rejeitos, mesmo sendo um volume inicialmente pequeno, a otimização sempre deve ser uma prioridade nos sistemas de GRR.

Armazenamento do Rejeitos Sólidos Contendo ^{125}I

Para o armazenamento dos rejeitos sólidos, embalagens plásticas reforçadas (0,5 mm de espessura) são recomendáveis uma vez que o tempo de armazenamento poderá causar degradação em embalagens mais frágeis. A vedação pode ser feita com fitas adesivas (IAEA, 1998).

Os embalados podem ser transferidos para um recipiente maior (também revestido) quando necessário. Rejeitos afiados e pontiagudos devem ser recolhidos separadamente e armazenados em materiais rígidos, resistentes a perfurações, recipientes (de preferência de metal) e claramente rotulados "Perfurocortante" (IAEA, 1998).

Os registros de cada embalado (massa, volume, data, atividade) deverão ser anotados tanto na própria embalagem bem como em livro de registro, que também deverá ser de fácil acesso quando for necessária a consulta.

O tempo necessário para o armazenamento será determinado por meio de cálculos de decaimento radioativo. No momento do registro do embalado, antes de ser enviado para o depósito inicial, a data prevista para o descarte já deverá ser visivelmente anotada.

Para as fontes não aprovadas no controle de qualidade um sistema de armazenamento específico deve ser estabelecido. Isso envolve a caracterização da atividade atual da fonte, análise da possibilidade de reutilização e adequado armazenamento (blindagens de chumbo).

As fontes seladas de ^{125}I fora de uso que não possuam mais aplicação (por falha na produção) e apresentem vazamento devem ser imediatamente embaladas em um recipiente blindado, minimizando riscos de exposição e transferidas para uma área de armazenamento (depósito inicial). São classificadas como fontes de meia-vida muito curta e, portanto, devem ficar armazenadas até a atingirem os níveis de liberação. Ao atingirem os níveis poderão ser eliminadas como material não radioativo (APÊNDICE A).

Eliminação de Rejeitos Sólidos Contendo ^{125}I

Uma vez que os embalados atendam os limites de concentração de atividade estabelecidos pela CNEN- NN 8.01, para Dispensa de Materiais em quantidade de concentração de atividade menor que 1000 kg, $1 \times 10^3 \text{ Bq.g}^{-1}$, os rejeitos deverão ser descartados como lixo comum nos sistemas de coleta urbana e essa ação deverá também ser anotada no livro de registros da instalação. Toda sinalização presente no recipiente deverá ser removida.

Recipientes que contenham ^{125}I líquido residual só poderão ser descartados após a remoção do líquido radioativo remanescente (atendendo aos requisitos para rejeitos líquidos). A fim de determinar o tempo de decaimento necessário para dispensa desses rejeitos sólidos, deve ser considerado que 10% do conteúdo radioativo inicialmente presente no recipiente, ficam fixados nas paredes dos recipientes (CNEN, 2014a).

Gerenciamento de fontes seladas

A etapa final da linha de produção das fontes de ^{125}I consiste no controle de qualidade e mensuração da atividade das fontes produzidas. Fontes reprovadas nesta fase serão tratadas como rejeitos sólidos e segregadas inicialmente em fontes reutilizáveis ou não reutilizáveis. Além disso, serão segregadas de acordo com o motivo da reprovação: vazamento ou níveis de atividade abaixo dos valores adequados para uso.

As fontes com vazamento que apresentem risco de contaminação durante sua manipulação, necessitam de precauções radiológicas durante o manuseio e armazenamento. Deve ser dada atenção especial ao monitoramento da contaminação superficial e de área. Essas fontes devem ser armazenadas em uma área dedicada com sistema de exaustão apropriado (BASRAN; BAXTER; BECKHAM, 2015; IAEA, 1998; SOUZA et al., 2015).

Devem ser mantidos registros detalhados para todas as fontes seladas usadas ou reprovadas no armazenamento.

As fontes de ^{125}I entram na classificação de fontes de meia-vida curta (< 100 dias). Essas fontes não devem ser compactadas, trituradas ou incineradas. Para este tipo de fonte selada, o armazenamento para decaimento é uma opção para seu gerenciamento (IAEA, 1998). A Figura 7 apresenta o fluxograma para o gerenciamento.

Figura 7- Fluxograma do gerenciamento de fontes seladas.

Fonte: (Adaptado de IAEA, 2003).

3.11.3 Rejeitos Gasosos

Rejeitos radioativos na forma gasosa têm se mostrado um desafio ambiental. Diversos centros de pesquisa e produção de radioisótopos têm procurado solucionar essa questão (COFFEY, 2002; JI et al., 2008; OGUNSEITAN; ROBBINS, 2011).

Caracterização Primária de Rejeitos Gasosos Contendo ^{125}I

Rejeitos gasosos gerados na produção de fontes de ^{125}I decorrem da volatilidade do iodo. Essa característica deve ser levada em consideração em cada etapa de produção das fontes e da gestão de rejeitos, a fim de evitar contaminação do ar.

Os sistemas de produção de fontes consistem em células estanques (*hot cells*) que possuem, além da blindagem, sistema de exaustão e filtração para gases ou aerossóis radioativos. Nesse sistema os filtros realizam trocas gasosas durante a operação. Os filtros tipicamente utilizados são filtros grossos (pré-filtro), HEPA (*High Efficiency Particulate Arrestance*) e Carvão ativado (Figura 8).

Figura 8- Representação dos filtros utilizados nos sistemas de exaustão na produção de fontes radioativas.

Fonte: Adaptado (CHUGH, 2015).

O filtro HEPA foi projetado na década de 1940 e usado no Projeto Manhattan para evitar a propagação de contaminantes radioativos no ar (OGUNSEITAN; ROBBINS, 2011). Até hoje são amplamente usados na área nuclear devido sua elevada eficiência na remoção de particulados finos. São constituídos por uma esteira de fibras dispostas aleatoriamente. As

fibras são tipicamente compostas de fibra de vidro e possuem diâmetros entre 0,5 e 2,0 micrômetros (μm). O espaço entre as fibras do filtro HEPA é maior que 0,3 μm e são projetados para conter poluentes e partículas muito pequenos. A eficiência do filtro é maior que 99,97% de retenção das partículas transportadas pelo ar com 0,3 μm de diâmetro, aproximadamente. Ao passar pelos filtros de carvão ativado e filtros HEPA, os gases ou vapores contaminantes com ^{125}I são aprisionadas (ASME AG-1a, 2004).

A recomendação inicial dos fabricantes é que, após nove meses de uso, os filtros de carvão sejam substituídos e tratados como rejeitos sólidos, quando serão caracterizados e armazenados para decaimento. Os filtros grossos e HEPA são substituídos quando apresentam perda de carga superior àquela recomendada pelo fabricante ou definida pelo projeto do sistema de ventilação.

Caracterização de Filtros usados em sistemas de exaustão

Filtros do tipo HEPA, carvão ativado e filtro grosso, utilizados em aplicações nucleares, após o seu uso, são tratados como rejeitos sólidos de nível baixo e transurânicos (TRU). Essa classificação dependerá dos nuclídeos presentes e suas respectivas concentrações. Para instalações que produzem fontes radioativas para pesquisa em indústria, os filtros são classificados como rejeitos de nível baixo e deverão ser armazenados para decaimento (COFFEY, 2002).

A caracterização dos filtros (radionuclídeos presentes e atividade) é vinculada a instalação e será determinada pelo processo de pesquisa ou produção realizados na instalação. A caracterização poderá ser realizada por meio do conhecimento do processo, amostragem e análise radioquímica ou uma combinação de todos essas métodos (COFFEY, 2002; JI et al., 2008).

Coffey (2002) sugeriu um método de caracterização utilizando o programa *MicroShield (Version 5.01)*. O Método fornece uma abordagem para o cálculo da quantidade de radionuclídeos emissores gama presentes nos filtros. Os emissores gama são então usados para calcular os emissores não gama presentes no filtro, por meio de fatores de escala.

O método consiste na colocação do filtro em análise em um saco de polietileno e em seu armazenamento em um contêiner para decaimento e posterior descarte. Uma vez que o contêiner esteja cheio de rejeitos, as quantidades de nuclídeos dos itens individuais dentro do recipiente são combinadas para determinar as quantidades totais de nuclídeos carregadas

dentro desse contêiner. O modelo calcula a taxa de dose gama total emitida a partir do recipiente com base em 37 GBq (1Ci) de gama total atividade dentro do contêiner. A atividade gama total do modelo foi dividida pela taxa de dose calculada para determinar o coeficiente de conversão Bq (Ci) para *Sievert* (Sv) por hora (mrem/hr), para calcular os nuclídeos emissores gama presentes (COFFEY, 2002).

Armazenamento de filtros usados em sistemas de exaustão

Na fase de armazenamento, os filtros gastos devem ser embalados de modo a permitir a contenção do material radioativo particulado, evitando contaminação do ambiente (sala de armazenamento de rejeitos, laboratórios, etc.). A recomendação para embalagens utilizadas no processo de segregação, coleta ou armazenamento preconizada na CNEN - NN 8.01 é que estas devem ser adequadas às características físicas, químicas, biológicas e radiológicas dos rejeitos para os quais são destinadas, ter suas condições de integridade asseguradas, possuir vedação adequada para evitar perda do seu conteúdo e ser claramente identificada (ficha de identificação afixada externamente), (CNEN, 2014a). Institutos que já utilizam esses tipos de filtros têm recomendado a utilização de sacos de polietileno ou envoltos em folhas de plástico para manter a contenção do material radioativo quando transferido para o recipiente de descarte (COFFEY, 2002).

Figura 9- Representação gráfica da linha de produção de FxFDG. Duas bolsas de 10 L e 40 L TEDLAR são conectadas ao sistema de ventilação e à saída da bomba de vácuo, respectivamente.

Fonte: (SCHWEIGER, 2011).

Pesquisadores da Universidade de Aberdeen, no Reino Unido, tem proposto a utilização da TEDLAR®, um tipo de bolsa coletora de gases, no gerenciamento do rejeito gasoso de sua instalação, como medida complementar ao sistema de retenção de gases radioativos e aerossóis liberados na síntese de fluordesoxiglicose marcada com flúor-18 (18F-FDG).

Nesse sistema, foram implantadas duas bolsas com 10 L e 40 L de volume. Elas são esvaziadas semanalmente (segundas-feiras de manhã antes do início da produção do flúor-18), e trocadas a cada três meses. A média de produção de FDG na instalação é de uma vez ao dia, três dias por semana. As bolsas coletoras de gás posicionadas na saída de gás resultaram na redução dos níveis de radiação medidos, permitindo que qualquer descarga radioativa potencial seja armazenada na bolsa dentro da *hot cell* protegida por chumbo (Figuras 9 e 10).

Figura 10- Fotografia de uma bolsa TEDLAR de 1L.

Fonte: (“Tedlar Sampling Bags with Combination Valve from Cole-Parmer India”, [s.d.]).

Uma vez que os gases radioativos gerados na linha de produção possuem meia-vida muito curta (<100 dias), os sacos TEDLAR com gás podem ser facilmente esvaziados e reutilizados. Esta técnica tem se mostrado eficaz, segura, confiável e econômica (SCHWEIGER, 2011).

Eliminação de Rejeitos Gasosos Contendo ^{125}I

Embora o ^{125}I necessite ser manipulado em sistemas que possuam blindagem e exaustão, mesmo com o conjunto de filtros, parte desse particulado ainda escapa para o meio ambiente. Isso representa risco de incorporação (contaminação da pele, pulmões e trato digestivo e, eventualmente, acumula-se na glândula tireoide) e contaminação ambiental (SOUZA et al., 2015; UNIVERSITY OF MICHIGAN, [s.d.]).

De acordo com a CNEN – NN 8.01: “Art. 29 A dispensa incondicional de rejeitos radioativos gasosos está sujeita à autorização da CNEN, com base na análise técnica dos fatores pertinentes, e deve tomar como referência valores especificados na Coluna 2 do Anexo II, Tabela II.1.” O limite estabelecido em norma para rejeitos gasosos contendo ^{125}I é de: $1,51 \times 10^{-10} \mu\text{Ci.m}^{-3}$ ($5,6 \text{ Bq.m}^{-3}$) (CNEN, 2014a). No caso de institutos com diversas fontes emissoras de radiação, como o IPEN, toda e qualquer liberação adicional também deve ser incorporada no cálculo de dose realizado pelo departamento de radiometria ambiental.

Na Tabela 5 são apresentadas as etapas gerais do GRR aplicáveis ao laboratório de produção de fontes.

Tabela 5 - Etapas gerais do GRR Aplicáveis ao LPFRT

Etapas do Gerenciamento de Rejeitos Radioativos Aplicáveis ao LPFRT	Ações/Justificativas
1. Caracterização (Segregação)	<p>A segregação <i>in loco</i>, considerando o subsequente tratamento, pode contribuir significativamente para a minimização de rejeito, redução das doses e dos custos das subseqüentes operações de processamento (IAEA, 2003).</p> <p>Os rejeitos gerados em cada fase da linha de produção serão segregados na própria célula de produção em rejeitos sólidos e líquidos.</p> <p>Dados de massa, volume, atividade e concentração de atividade serão previamente estimados com base nas características levantadas em estudos preliminares.</p>
2. Embalagem	Durante as etapas de produção das fontes, os rejeitos gerados serão inicialmente armazenados em embalados localizados abaixo das células de produção. Assim, os embalados cheios serão esvaziados após semanas de produção.
3. Armazenamento	Após semanas de produção os rejeitos são enviados para o depósito inicial, reduzindo o volume de rejeitos armazenados nas células de produção. Nesse processo, as atividades serão aferidas para registro no inventário. Ficarão armazenados por período determinado para decaimento radioativo.
4. Descarte: Liberação para meio ambiente	Após o período determinado de armazenamento, as atividades dos embalados armazenados serão medidas para verificar se atendem os limites de concentração de atividade para liberação no meio ambiente.

Fonte: autora da tese.

3.12 Seleção de opções eficientes para processamento e armazenamento de rejeitos radioativos em pequenas quantidades

A seleção de tecnologias para o processamento de rejeitos é fortemente influenciada pela radioproteção requerida para os trabalhadores, indivíduos do público e o meio ambiente (IAEA, 2003).

Selecionar técnicas adequadas de processamento de rejeitos a fim de minimizar quantidades de rejeitos radioativos gerados, não é um processo simples. De acordo com

TECDOC-1371 há duas razões para essa dificuldade, sendo elas o custo do processamento do rejeito e as diversidades nas características dos rejeitos gerados (IAEA, 2003).

No primeiro caso, custo do processamento, em grandes instalações, como usinas nucleares, poderá ser embutido no custo da energia gerada. Em instalações menores nem sempre isso é possível e quando, acarretará maior impacto no preço do produto fornecido.

Apesar do pequeno volume, quando comparado com os rejeitos gerados em outras instalações, os rejeitos gerados nas aplicações da energia nuclear, como produção de radioisótopos, possuem uma grande diversidade em termos de características do rejeito.

A seleção de processamento do rejeito é definida pelo volume e características dos rejeitos e deve estar de acordo com a regulamentação nacional aplicável.

Tratamentos de rejeitos líquidos: Técnicas de Membrana - Osmose reversa

Um estudo realizado em 2000 (ARNAL et al., 2000) avaliou a aplicabilidade de técnicas de separação por membrana como: microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose reversa (RO) em rejeitos líquidos contendo ^{125}I oriundos de Radioimunoensaio. Em Rejeitos de eletrodialise também tem sido aplicada essa técnica (INOUE et al., 2004). Os resultados apontaram que o uso da técnica de osmose reversa permitiu a redução do volume de rejeitos líquidos gerados em um fator 10:1. Entretanto o estudo recomenda o pré-tratamento dos rejeitos a fim de otimizar o processo de osmose reversa. O pré-tratamento recomendado é a ultrafiltração ou microfiltração a fim de remover particulados maiores que poderiam comprometer a durabilidade da membrana usada na osmose reversa (ARNAL et al., 2000).

Apesar de estarem estabelecidos para operações de larga escala, sistemas de osmose reversa em escala laboratorial estão comercialmente disponíveis para purificação de água e podem ser adaptados para algumas aplicações de tratamento de rejeitos líquidos radioativos (IAEA, 2001).

Sancho (SANCHO et al., 2006) também realizaram estudos mostrando a aplicabilidade da osmose reversa no tratamento de rejeitos radioativos líquidos contendo ^{125}I . Nas técnicas de osmose reversa e ultrafiltração o índice de retenção foi relatado em torno de 50% após a UF e 95% após RO (RANA et al., 2013).

Armazenamento e Tratamento de rejeitos gasosos contendo ^{125}I

Tipicamente os rejeitos gasosos não são armazenados e sim liberados rotineiramente dentro dos limites estabelecidos. O gerenciamento de rejeitos gasosos consiste na retenção de parte dos gases e aerossóis em um conjunto de filtros dispostos no sistema de exaustão dentro das células de produção. Como já discutido esses filtros, após o término de sua vida útil, são tratados como rejeitos sólidos e após caracterizados e devidamente embalados são armazenados para decaimento.

Sistemas com filtros de carvão ativado, absorventes químicos e armadilhas de nitrogênio líquido são as mais comuns formas encontradas em *hot cells* dedicadas para produção de radioisótopos (CALANDRINO et al., 2007).

A eletrodiálise também tem se mostrado uma técnica bem eficaz. Um estudo avaliando a remoção de iodo de rejeitos radioativos, realizado na *Radioisotope Institute for Basic and Clinical Medicine* em Kurume, Japão, utilizou eletrodiálise com membrana de troca iônica com resultados significativos (INOUE et al., 2004).

A retenção eficiente dos gases liberados durante as etapas de produção é parte obrigatória da estratégia do GRR de uma instalação. O principal objetivo é reter, de modo seguro, a maior quantidade possível de gases radioativos para retardar sua liberação para o meio ambiente (SCHWEIGER, 2011).

Requisitos para Depósito inicial para armazenamento de rejeitos de meia-vida curta

O armazenamento dos rejeitos radioativos gerados na produção de fontes radioativas pode ser realizado na própria instalação, desde que atenda aos requisitos de segurança. Salas de armazenamento são aplicáveis para esse tipo de instalação.

De acordo com CNEN NN 8.01 o depósito inicial deve além de conter com segurança os rejeitos até que possam ser descartados ou removidos para outro local, garantir a proteção física dos rejeitos, com provisão de barreiras de segurança e evitando o acesso não autorizado.

Para isso o depósito deve possuir:

- Um sistema de monitoração de área; situar-se em local cercado e sinalizado, com acesso restrito ao pessoal autorizado;

- Ter piso e paredes impermeáveis e de fácil descontaminação; apresentar delimitação clara das áreas supervisionadas e controladas e, se necessário, locais reservados à monitoração e descontaminação individuais;
- Dispor de procedimentos apropriados sempre afixados em paredes, quadros e outros lugares bem visíveis, para facilitar o manuseio de materiais, minimizar a exposição de Indivíduos Ocupacionalmente Expostos (IOE) e dos indivíduos do público, orientar as ações de resposta a emergências e dar outras instruções;
- Permitir, a qualquer momento, acesso para inspeção visual e identificação dos volumes;
- Dispor de meios para proteção e combate a incêndio; e
- Ter capacidade de armazenamento adequada, de modo a minimizar riscos de acidentes durante o manuseio de rejeitos pelo tempo que se fizer necessário (CNEN, 2014a).

A IAEA (1998) também possui recomendações para os depósitos destinados a armazenamento temporários. As características desejáveis para salas de armazenamento estão listadas abaixo:

- As entradas devem ser adequadas tanto para pessoal como para embalados de rejeitos radioativos;
- As portas devem ser protegidas por uma fechadura e o acesso deve ser restrito a pessoas autorizadas;
- Devem ser fornecidas áreas separadas para cada tipo de resíduo embalado, para diferentes tipos de radionuclídeos (por exemplo, de curta duração para decaimento) e para fontes seladas exauridas;
- Para o armazenamento de resíduos radioativos não condicionados, as salas devem incluir ventilação e um sistema de proteção contra incêndio. Se um sistema de ventilação e filtragem não estiver disponível, a ventilação natural deve ser considerada.

Os sistemas modulares metálicos de armazenamento resistentes à corrosão (por exemplo, contêineres marítimos) podem ser considerados como uma alternativa potencial a uma sala de armazenamento (IAEA, 1998, 2003).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Cenários para gerenciamento dos rejeitos radioativos no LPFRT

A metodologia aplicada neste estudo consistiu no desenvolvimento do sistema de gerenciamento dos rejeitos radioativos gerados na produção de fontes seladas de ^{125}I e teve por objetivo o gerenciamento dos rejeitos na própria instalação produtora, o LPFRT.

Os rejeitos radioativos que serão gerados ao longo de todo processo de fabricação das fontes serão produzidos dentro de três células estanques, localizadas no LPFRT. O LPFRT está localizado dentro do Centro de Tecnologia das Radiações (CTR) e conta, dentro da própria instalação, com uma sala reservada para o armazenamento temporário de rejeitos radioativos.

Uma vez que os métodos de produção das fontes de ^{125}I para braquiterapia estão em fase de estudo e validação, foram idealizados três cenários a fim de desenvolver o sistema de gerenciamento de rejeitos com três diferentes demandas de produção.

O primeiro cenário para a produção de sementes é considerado conservador, uma vez que representa a menor expectativa para produção de fontes: 500 sementes por semana. O cenário referência representa a estimativa mais próxima da atual demanda das sementes no mercado brasileiro, com 1.000 sementes por semana. O terceiro e último cenário é o otimista, visto que superestima a produção, representando 2.000 sementes por semana.

O número de sementes para cada cenário refere-se às unidades de sementes prontas para a venda. No entanto, a rotina dos fabricantes internacionais, tem-se notado, que um percentual considerável de sementes acaba sendo reprovado na fase de controle de qualidade, ou parte das sementes apresenta valores de atividade fora da faixa exigida para tratamento. Isso significa que para que seja atendida uma determinada demanda semanal é necessário acrescentar um percentual entre 30-50% no número de sementes produzidas. Para este trabalho, assumiu-se uma taxa de reprovação de sementes de: 30% devido a falhas na segunda solda, 5% devido a vazamentos na etapa de controle de qualidade e 10% de sementes fora dos valores requeridos de atividade, totalizando uma margem de 45% de reprovação. Nesse cenário a margem de aproveitamento é de 55%. Utilizando o cenário 1 como exemplo, com uma demanda de 500 sementes por semana, teríamos que produzir 909 sementes para atingirmos a taxa de aproveitamento de 55% e atender a demanda semanal. Visto que: $500/0,55 = 909$ sementes.

Os valores de atividade para cada semente de ^{125}I , no mercado atual, estão em torno de 0,5 mCi. Entretanto, sabe-se que sementes com valores de 2 mCi tem maior probabilidade de venda, uma vez que podem ser armazenadas por maior período após a aquisição por clínicas e hospitais, fornecendo assim um estoque pronto para tratamento (COMUNICAÇÃO PESSOAL⁵). Assim, o valor inicial de 2 mCi (74 MBq) por semente na linha de produção foi utilizado neste estudo.

Os três cenários idealizados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Descrição dos cenários utilizados para implementação do GRR no LPFRT, com os percentuais de reprovação já inclusos.

Cenários	Nº de Sementes semanal	Nº de Sementes mensal	Atividade Semanal	Atividade Mensal
Cenário 1: Conservador	909	3.636	1,82Ci (67,3 GBq)	7,27Ci (269 GBq)
Cenário 2: Referência	1818	7.273	3,64Ci (135 GBq)	14,5Ci (538 GBq)
Cenário 3: Otimista	3.636	14.545	7,27Ci (269 GBq)	29,1Ci (1.076 GBq)

Fonte: autora da tese.

Para esse estudo, o período de cinco anos foi escolhido como tempo de operação a fim de simular o tempo de gerenciamento dos rejeitos necessário caso o LPFRT deixasse de funcionar ou mudasse suas atividades. Estudo com dois, oito e mais anos de operação também foram realizados.

4.2 Levantamento das etapas geradoras de rejeitos radioativos

Para a estimativa do volume de rejeitos, foi levantada inicialmente uma relação dos rejeitos que serão gerados em cada célula de produção, e em cada fase da linha produção. A Tabela 7 apresenta a relação desses materiais e o Anexo A, apresenta um fluxograma da produção.

⁵ Informação verbal obtida por meio de entrevista com Dr. Carlos Alberto Zeituni. Tecnologista Sênior do IPEN.

Tabela 7 - Caracterização primária dos rejeitos gerados no LPFRT por etapa de produção.

Etapas de produção	Descrição do processo	Rejeitos gerados
1ª - Fixação do ^{125}I no núcleo de prata.	Na <i>Célula 1</i> , o material radioativo utilizado na fabricação entrará em linha de produção. A deposição do ^{125}I irá ocorrer no núcleo de prata por meio de tratamento químico.	Sólidos: frascos <i>Perkin Elmer</i> , frascos de produção, papéis de forração e descontaminação. Líquidos: Atividade restante no frasco após reação. Gasosos: ^{125}I volatilizado.
2ª - Soldagem do tubo de titânio.	Na <i>Célula 2</i> , o núcleo será colocado dentro de uma cápsula de titânio e a semente será soldada a <i>laser</i> .	Sólidos: fontes reprovadas na soldagem. Gasosos: ^{125}I volatilizado no processo de soldagem.
3ª - Realização de teste de controle de qualidade da fonte/semente produzida.	Na <i>Célula 3</i> , será realizado o controle de qualidade das fontes produzidas por meio de ensaio de estanqueidade.	Sólidos: fontes reprovadas no controle de qualidade. Líquidos: água destilada utilizada no teste de controle de qualidade. Gasosos: ^{125}I volatilizado no caso de contaminação superficial.
4ª – Medição de atividade.	Ainda na <i>Célula 3</i> , as fontes já seladas terão suas atividades mensuradas individualmente, sendo posteriormente separadas por faixas de atividade.	Fontes que estiverem fora de faixa de atividade para aplicação imediata (0,1 mCi a 1mCi) poderão ser armazenadas para decaimento, e posteriormente, vendidas ou descartadas ou, ainda utilizadas em estudos de dosimetria e calibração.

Fonte: autora da tese.

Após a estimativa dos rejeitos sólidos, líquidos e gasosos gerados em cada uma das três células de produção (*hot cell*), foram determinados os seguintes parâmetros para cada tipo de rejeito:

Rejeitos sólidos

- Massa
- Volume
- Atividade
- Taxa de entrada (massa, volume e atividade) na sala de armazenamento (depósito inicial)
- Tempo para liberação em meio ambiente

Rejeitos líquidos

- Volume
- Atividade
- Taxa de entrada (volume e atividade) no depósito inicial
- Tempo para liberação em meio ambiente

Rejeitos gasosos

- Concentração de atividade dos sistemas de filtros
- Taxa de volatilização do ^{125}I
- Metodologia para medição do conjunto de filtros utilizados no sistema de exaustão do laboratório

4.3 Rejeitos Sólidos

4.3.1 Caracterização dos rejeitos sólidos: estimativa da massa, volume e atividade

Ao longo da linha de produção, estarão disponíveis embalagens em cada célula para o armazenamento inicial dos rejeitos sólidos. Ao término de cada semana de produção, os embalados de rejeitos sólidos terão suas atividades e características mensuradas, registradas e serão enviados para armazenamento inicial no próprio LPFRT. Assim, é necessário determinar massa, volume e atividade presentes nesses embalados após cada semana de produção no momento da entrada no depósito.

Estimativa da massa dos rejeitos sólidos

As massas de rejeitos sólidos foram estimadas pela pesagem de cada item do rejeito em balança analítica disponível no laboratório (*Shimadzu* Modelo AUY220) (Figura 11). Para estimativa da massa semanal e anual, os dados de massa foram multiplicados pelo número de itens utilizados por semana e por ano para cada um dos cenários (Tabela 8).

Figura 11- Balança analítica usada na estimativa da massa dos itens do rejeito sólido.

Fonte: autora da tese.

Tabela 8- Dados utilizados na caracterização primária dos rejeitos sólidos.

Itens do Rejeito Sólido	Características dos itens	Nº de itens usados por semana de produção por cenário (unidades)			Fórmula aplicada para estimativa do Volume de cada item
Frasco <i>Perkin Elmer</i>	Altura: 2,6 cm Largura: 2,6 cm Comprimento: 5,3 cm Massa: 25,74 g Material: plástico Densidade: 0,76 g/cm³	C1*	C2	C3	$V = c \cdot l \cdot h$ Volume paralelepípedo
		1	1	1	
Filtro Grosso/Carvão/HEPA	Comprimento: 59,3 cm Altura: 29,2 cm Largura: 59,3 cm Massa: ~7 kg	1 por ano			
Frasco de produção	Altura: 1,8 cm Diâmetro Interno: 0,7 cm Raio: 0,45 cm Espessura Da Parede: 0,1cm Massa: 0,97 g Densidade (Pirex): 2,13 g/cm³	30	61	121	$V = \pi \cdot r^2 \cdot h$ Volume cilindro
Frascos usados no teste de estanqueidade	altura: 8 cm diâmetro externo: 1,2 cm espessura da parede: 0,2 cm massa: 4,18g densidade medida: 0,46 g/cm³	5	19	36	
Filtro poroso do CQ	massa: 0,65g diâmetro: 0,7cm densidade medida:0,15 g/cm³ altura: 2cm	5	19	36	
Fontes reprovadas (na 2ª solda; no CQ e faixa de atividade)	Comprimento: 0,45cm Massa: 0,01g Diâmetro externo: 0,08 cm	409	818	1.636	

*C1, C2 e C3: Cenário 1, 2 e 3 respectivamente.

Fonte: autora da tese.

Estimativa do volume dos rejeitos sólidos

Para estimar o volume de cada embalado, foram utilizadas amostras disponíveis de cada item do rejeito sólido que serão usadas na linha de produção. A estimativa da quantidade de itens usados foi obtida com base na experiência dos operadores em ensaios já realizados (Figura 12).

Figura 12- Itens do rejeito sólido: da esquerda para direita - frasco *PerkimElmer*, tubo de ensaio, frasco usado na linha de produção e filtro poroso usados no teste de estanqueidade.

Fonte: autora da tese.

Por meio das amostras, foram obtidas as médias de altura, largura e demais dados necessários para a estimativa do volume. Equações usuais para determinar volume de cilindro e paralelepípedo foram utilizadas para estimar o volume dos itens na linha de produção.

A estimativa dos volumes semanais e anuais foi obtida por meio da multiplicação do volume de cada item pelo número de itens usados semanal e anualmente. Na Tabela 8 são apresentadas as características de cada item do rejeito sólido e as fórmulas aplicadas para estimativa dos volumes.

A fim de estimar corretamente o volume final de cada embalado gerado semanalmente, foi considerado que os rejeitos sólidos não compactáveis (frascos de vidro) colocados no embalado, ocupam maior capacidade do embalado, já que não permanecem em sua posição original, visto que são rígidos e deixam espaços vazios e não são passíveis de compactação (Figura 13). Portanto, foi utilizado um fator de correção de 1,4 multiplicado ao volume semanal dos rejeitos sólidos (Equação 2)(VICENTE. R., 2014).

Figura 13 - Representação dos espaços vazios no armazenamento dos frascos dentro do embalado de rejeito.

Fonte: autora da tese.

$$V_f = 1,4 \cdot V_i \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

V_f = volume efetivo semanal (m^3)

V_i = volume semanal do embalado (m^3)

1,4 = fator de correção

Estimativa da atividade dos rejeitos sólidos

Para estimar a atividade total presente no rejeito sólido, para cada cenário, determinou-se a taxa de volatilização do ^{125}I com base em experimentos realizados nas etapas de fixação do iodo no fio de prata (SOUZA, 2016). Os experimentos realizados indicaram que aproximadamente 72% do ^{125}I é fixado no fio de prata. Logo, 28% do iodo é perdido durante o processo. Considerando que 10% fixa-se no próprio frasco utilizado na linha de produção, haverá 18% como o percentual de ^{125}I volatilizado dentro da *hot cell* 1.

Considerando que 18% do ^{125}I volatiliza levando consigo também a atividade correspondente, assumiu-se que, para cada recipiente usado na linha de produção, 10% da atividade do ^{125}I fica em cada item do rejeito que tem contato direto com iodo antes da fixação no fio de prata.

Para estimar o valor da atividade em cada item do rejeito, foi calculado inicialmente uma perda de 18% sobre o valor da atividade de entrada em cada cenário, devido a volatilização. Por exemplo: no cenário 1 a atividade de entrada é de 1,82 Ci de ^{125}I . Assim, 18% deste valor corresponde a uma perda 0,33 Ci, restando 1,49 Ci da atividade de entrada. O ^{125}I entra na célula de produção em um frasco da empresa *Perkim Elmer*[®] e ao ser retirado, considera-se que 10% da atividade fica no frasco, portanto: 10% de 1,49 Ci corresponde a 0,15 Ci, restando 1,21 Ci da atividade de entrada. Finalmente, durante toda a manipulação do radionuclídeo papéis de forração são usados para conter eventuais derramamentos e, conseqüentemente, contaminações dentro de cada *hot cell*. Assim, mais 10% de perda é considerada. Portanto, da atividade ainda presente nessa fase, 1,21 Ci, 10% (0,12 Ci) ficará neste último item do rejeito, restando 1,09 Ci da atividade que entrou na linha de produção.

Para se determinar a atividade média de cada semente, ao término da fixação na *hot cell* 1, desconta-se todas as perdas de atividade presente na solução de ^{125}I que entra na célula de produção e divide-se pelo número de sementes na linha de produção.

Uma vez que a linha de produção ainda está em fase de construção, não é possível determinar com exatidão o percentual de atividade que será perdida para cada item do rejeito, ou mesmo a probabilidade de contaminação dos papéis de forração. Mas, para fins de estimativas iniciais e com base na rotina de serviços que utilizam fontes não seladas, assume-se a recomendação da CNEN de 10%, como uma forma de zelar pela radioproteção dos indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) e principalmente como medida de segurança na gestão de rejeitos.

Na Figura 14 são apresentadas as perdas de atividade parciais e totais, em Ci, para cada item e para cada cenário.

Figura 14- Fluxograma do processo das perdas de atividade de ^{125}I para cada item do rejeito sólido na *hot cell* 1 e para cada cenário.

Fonte: autora da tese.

Na *hot cell* 2 é realizada a segunda solda do tubo de titânio. Nesta solda, o fio de prata, núcleo da semente contendo aproximadamente 1,2 mCi de ^{125}I , já está posicionado dentro do tubo de titânio. Assim, falhas na solda podem ocasionar vazamento do ^{125}I . O percentual de risco de falha na segunda solda é de 30%. Este valor é determinado com base no teste visual realizado ao término de cada solda, pelo grupo durante o desenvolvimento do sistema de soldagem a laser (FEHER, 2014). Apesar de ser um valor elevado, ele é realístico, visto que foi obtido dentro da rotina da própria linha de produção. Uma vez instalada e comissionada a linha de produção passará por ajustes que reduzirão este percentual de falhas.

As sementes reprovadas nesta etapa da produção serão tratadas como rejeitos sólidos. O sistema de soldagem possui um mecanismo automatizado para o envio das sementes com solda reprovadas para uma blindagem de chumbo (Figuras 15 e 16).

Figura 15- Fluxograma do processo das perdas de atividade de ^{125}I para cada item do rejeito sólido na *hot cell 2* e para cada cenário.

Fonte: autora da tese.

Figura 16- Fotografia dos sistema de recepção de fontes após a segunda solda. Blindagem de chumbo padrão (à direita tracejado em vermelho) receberá as sementes com soldas reprovadas na inspeção visual.

Fonte: autora da tese.

Para se determinar o número de sementes reprovadas, multiplicou-se o percentual de reprovação (30%) pelo número de sementes produzidas semanalmente em cada cenário.

A estimativa da atividade total presente nos rejeitos sólidos da *hot cell 2* é o produto do número de fontes reprovadas pela atividade estimada para cada semente.

Para estimar a atividade presente nos rejeitos oriundos da *hot cell 3*, primeiramente determinou-se o número de sementes aprovadas na segunda solda. Essas sementes continuarão na linha de produção, irão para a *hot cell 3* e passarão pela etapa de controle de qualidade (Figura 17).

Figura 17 – Fluxograma dos processo e rejeitos que ocorrem na *hot cell* 3.

Fonte: autora da tese.

O controle de qualidade consiste no ensaio de estanqueidade. Neste teste, as sementes de ^{125}I são separadas em grupos contendo 10 unidades, cada grupo é colocado em um frasco de poliestireno (tubo de ensaio) fechado com 2 ml de água. O sistema de teste possui uma plataforma circular que acomoda 18 frascos espaçados e realiza movimentos giratórios para realizar operações automatizadas durante o controle de qualidade (colocação e retirada de água dos tubos, por exemplo) (Figura 18). Após a colocação das sementes nos frascos, o conjunto será direcionado para um banho ultrassônico na mesma célula de produção. O banho causará a vibração do sistema, o que permitirá a identificação de falhas e vazamento mais facilmente.

Figura 18- Suporte de tubos para teste de estanqueidade em banho ultrassônico.

Fonte: autora da tese.

O teste de estanqueidade permite a detecção de vazamentos nas sementes ou contaminações na superfície das sementes, caso não tenham sido detectados na etapa anterior (avaliação visual da solda). O percentual de sementes com contaminação ou vazamento foi determinado com base na experiência da equipe de produção de fontes. Do total de sementes que entram na *hot cell* 3, para cada cenário, 5% apresentam alguma falha na solda ou contaminação (MOURA, J. A., 2015).

As sementes estarão divididas em 18 frascos do controle de qualidade. Assim, o vazamento será detectado por meio de uma alíquota de água retirada de cada frasco. Caso a amostra de água, coletada com o auxílio de uma pipeta, apresente contaminação acima de 5 nCi (185 Bq) – estabelecido na norma ISO 9978 – será considerado que o frasco apresenta sementes com vazamento de material radioativo. Nesse caso, todo o tubo será considerado rejeito radioativo, uma vez que devido à presença de água, será difícil e trabalhoso determinar qual semente está com vazamento.

Uma vez identificado o vazamento e a contaminação, água, tubo de ensaio, ponteira da pipeta e sementes serão tratados como rejeitos radioativos. Para estimativa da atividade dos itens do rejeito sólido na *hot cell* 3 levou-se em consideração o percentual de sementes com vazamento (5%). Multiplicando-se esse percentual pelo número de sementes aprovadas para a fase de CQ obteve-se o número de sementes com vazamento para cada cenário.

Considerando um cenário conservador do ponto de vista da radioproteção e levando em consideração que as sementes, na fase de controle de qualidade, serão divididas em grupos de 10 unidades, foi determinado o número de tubos de ensaio e ponteiras de pipeta

contaminados com o vazamento. Para isso dividiu-se o número de sementes contaminadas por 10. A atividade destes itens foi obtida considerando o vazamento de uma semente por tubo de ensaio, considerando que 10% aderiu ao próprio tubo e ao filtro poroso.

As sementes aprovadas no ensaio de estanqueidade passarão pela etapa final do CQ: a avaliação das atividades.

4.3.2 Armazenamento Temporário dos Rejeitos Sólidos

Taxa de entrada de massa no depósito inicial

Para determinar a quantidade de massa de rejeito sólido que entram no depósito inicial (taxa de entrada bruta), cada item do rejeito foi pesado e após isso somaram-se todas as massas de rejeitos gerados após uma semana de produção.

Taxa de entrada de volume no depósito inicial

Para a estimativa do volume de rejeito sólido que entra no depósito semanalmente (taxa de entrada bruta), somaram-se todos os volumes de rejeitos gerados e aplicou-se o fator de correção (1,4) ao volume final gerado após uma semana de produção.

Taxa de entrada de atividade no depósito inicial

A taxa de entrada de atividade semanal no depósito foi obtida pela somatória das atividades presentes nos rejeitos sólidos, em cada uma das células de produção.

Para estimar corretamente, o valor residual de atividade presente em cada embalado armazenado na linha de produção, foi aplicada a fórmula usual para decaimento radioativo, utilizando como tempo decorrido, o período de setes dias de armazenamento na linha de produção até a entrada no depósito (Equação 3):

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

A: Atividade no instante t (Bq)

A_0 : Atividade inicial (Bq)

λ : constante de decaimento radioativo (dia^{-1})

t: tempo decorrido (dias)

Somando as atividades semanais decaídas de cada embalado que entra no depósito, é obtida a atividade total dos rejeitos sólidos armazenados semanalmente. A equação 4 foi utilizada para determinar a atividade no depósito em um instante qualquer.

$$A = \frac{f}{\lambda} (1 - e^{-\lambda \cdot t}) \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

A: atividade no depósito no instante t (Bq)

f: taxa de entrada de material no depósito ($\text{Bq} \cdot \text{semana}^{-1}$)

λ : constante de decaimento (semana^{-1})

t: tempo (semanas)

Adaptando a equação de decaimento radioativo (3), teremos o tempo necessário de armazenamento para cada embalado (equação 5):

$$t = \frac{\ln(\frac{A}{A_0}) \cdot t_{1/2}}{-\ln 2} \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

T: Tempo estimado de armazenamento (dias)

A: atividade final para descarte (Bq)

A_0 : Atividade no início do armazenamento (Bq)

$T_{1/2}$: Tempo de meia-vida (dias)

4.4 Concentração de atividade e tempo necessário para liberação no meio ambiente

Para determinar a concentração de atividade ($\text{kBq} \cdot \text{kg}^{-1}$) de cada embalado, foi utilizada a atividade semanal presente no embalado de rejeitos sólidos dividida pela massa de rejeito do

embalado (Equação 6). A mesma equação pode ser usada para estimativa da concentração de atividade presente no depósito inicial ao longo do tempo de armazenamento.

$$C = \frac{\text{Atividade}}{\text{massa}} \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

C: Concentração de atividade (kBq.kg⁻¹)

A: Atividade semanal que entra no depósito (kBq.sem⁻¹)

m: Massa de rejeito radioativo sólido que entra no depósito (kg.sem⁻¹)

4.5 Rejeitos Líquidos

4.5.1 Caracterização dos Rejeitos Líquidos: Estimativa do Volume e Atividade

No LPFRT, os rejeitos líquidos gerados semanalmente serão armazenados em bombonas de 60 L para decaimento e posterior liberação em meio ambiente (rede sanitária de esgoto), uma vez que o laboratório não possuirá sistema próprio de esgoto.

Estimativa do Volume de Rejeitos Líquidos

Para estimar o volume de rejeitos líquidos gerados semanalmente, foram utilizadas como parâmetro, as práticas realizadas durante as fases de teste em cada *hot cell* e a experiência dos operadores em ensaios já realizados. Somente as células de produção 1 e 3 irão gerar rejeitos líquidos. Para estimar os volumes em cada célula foram utilizados os dados de entrada listados na Tabela 9.

Tabela 9 - Dados gerais dos rejeitos líquidos para Cenários 1, 2 e 3.

Dados gerais	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Número de sementes (semana. ⁻¹)	909	1818	3636
Atividade por semana de produção (mCi)	1.818	3.636	7.273
Atividade (por núcleo de prata) (mCi)	1,05	1,05	1,05
Número de núcleos de prata por frasco	30	30	30
Número de frascos por semana	30	61	121
Volume de solução (NaI ¹²⁵ + H ₂ O) por frasco (μl)	300	300	300

Fonte: autora da tese.

O volume de rejeito líquido na *hot cell* 1 é produto do número de frascos pelo volume de solução de iodo utilizados na linha de produção por semana (Tabela 9).

Na *hot cell* 3 ocorre a etapa de controle de qualidade das fontes produzidas. Essa etapa é dividida em dois processos: teste de estanqueidade e avaliação das atividades das fontes produzidas. Como já mencionado, o teste de estanqueidade consiste na avaliação de vazamentos e contaminação por toda a semente. Para isso, as fontes são distribuídas em 18 tubos de ensaio, dispostos em um carrossel, 2 ml de água são colocados em cada tubo. Caso alguma contaminação superficial seja identificada será realizada a descontaminação por meio de lavagens das fontes. O número de lavagens foi determinado em ensaios realizados pela equipe de produção: 5 a 20 lavagens. Se após as lavagens a atividade detectada na água atender os limites estabelecidos em norma 5 nCi (185 Bq) as sementes serão consideradas descontaminadas, caso contrário serão tratados como rejeito sólido (IAEA, 2003).

O número de sementes por tubo de ensaio (lavagem) é dez, o número de tubos usados por produção é 18 e volume de água por tubo é 2 ml. A água utilizada no teste é um potencial rejeito líquido. O volume de água contaminada gerada foi determinado por meio dos dados de entrada apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Dados gerais dos rejeitos líquidos para cenários de 5 e 20 lavagens na etapa de controle de qualidade (*hot cell* 3).

Dados gerais	Cenários 1 a 3
Nº de sementes por tubo de lavagem	10
Nº de tubos de lavagem usados por produção	18
Volume de água para lavagem por tubo (ml)	2
Nº de ciclos de lavagem de CQ por produção	5 a 20

Fonte: autora da tese.

Para cada um dos 3 cenários foram determinadas as seguintes informações:

- Número de processos de lavagens por semana: definirá o volume de água usada nas lavagens por semana (Equação 7).

$$N_{lavagens} = \left(\frac{N_{sementes}}{N_{tubos}} \right) / N \quad \text{Equação 7}$$

Em que:

$N_{lavagens}$ = Número de processos de lavagens por semana

N_{sementes} = Número de sementes produzidas por semana

N_{tubos} = Número de tubos usados na produção

N = Número de sementes por tubo de lavagem

- Volume de água para lavagem por semana (Equação 8):

$$V_{\text{água}} = V_{\text{tubos}} \cdot (N \cdot N_{\text{lavagens}}) \quad \text{Equação 8}$$

Em que:

$V_{\text{água}}$ = Volume de água para lavagem por semana (m^3)

V_{tubos} = Volume de água de lavagem por tubo (m^3)

N = Número de tubos usados na produção (18 unidades)

N_{lavagens} = Número de tubos de lavagens por semana

- Volume de rejeito líquido gerado por semana (Equação 9):

$$V_{\text{rejeito}} = V_{\text{água}} \cdot N_{\text{ciclos}} \quad \text{Equação 9}$$

Em que:

V_{rejeitos} = Volume de rejeito líquido gerado por semana (m^3)

$V_{\text{água}}$ = Volume de água para lavagem por semana (m^3)

N_{ciclos} = Número de ciclos de lavagem por produção (5 ou 20 lavagens)

Estimativa da Atividade e Concentração de Atividade dos Rejeitos Líquidos

Durante as fases de teste da linha de produção, que antecederam ao desenvolvimento dessa tese, um experimento foi realizado pela equipe responsável pelo laboratório com o objetivo de simular um cenário de vazamento total de uma semente de iodo com 1 mCi na etapa de controle de qualidade. A atividade detectada na água ao fim de 5 lavagens foi de 71 kBq (1,92 μCi). Esse valor foi utilizado como atividade máxima presente no rejeito líquido, no caso de vazamento total de uma semente, e referência para cálculo de concentração de atividade, uma vez que representa um cenário bem realista.

A concentração de atividade presente no rejeito líquido por semana de produção foi estimada por meio da fórmula usual para concentração de atividade (Equação 6) sendo utilizada na equação a atividade detectada ao final das lavagens e o volume de rejeito líquido gerado por semana.

4.5.2 Armazenamento Temporário dos Rejeitos Líquidos

Para gerenciar o volume e a atividade dos rejeitos líquidos armazenados em bombonas, primeiramente determinou-se o número máximo de semanas de operação para o preenchimento das bombonas colocadas abaixo das células de produção 1 e 3 (Figura 19). A bombona abaixo da célula 2 será usada como espaço adicional quando a demanda de produção for excedida.

Figura 19 - Representação da posição das bombonas de rejeitos líquidos na linha de produção dentro de caixas de aço inoxidável revestidas externamente de chumbo.

Fonte: autora da tese.

Conhecendo o volume semanal de rejeitos líquidos gerados na *hot cell* 1 e 3 foi possível estimar quando as bombonas de armazenamento (60 L) precisarão ser trocadas ou esvaziada, por meio da equação 10:

$$N_{produções} = \frac{C_{máxima(75\%)}}{V_{rejeito}} \quad \text{Equação 10}$$

Em que:

$N_{\text{produções}}$ = Número de produções (semanas) até encher o frasco de armazenamento

$C_{\text{máxima}}$ = Capacidade máxima da bombona de armazenamento (L)

V_{rejeito} = Volume de rejeito líquido gerado por n° ciclos de lavagem (L)

Ao atingirem 75% da sua capacidade máxima (45 L), as bombonas serão retiradas da linha de produção e terão a concentração de atividade de rejeito líquido medida. Caso esteja acima dos limites de dispensa, as bombonas serão enviadas para o depósito inicial para decaimento. Em caso contrário, o rejeito será liberado na rede de esgoto do CTR.

A equação 5 foi usada para determinar o tempo de armazenamento necessário até atingir os níveis de dispensa.

Estimativa da liberação de rejeitos líquidos na rede de esgoto

Em sua norma de rejeitos, a CNEN determina que a dispensa de rejeitos líquidos só deve ser feita em rede de esgoto sanitário. Assim, foi realizado um estudo para garantir que se houvesse necessidade de liberar os rejeitos líquidos gerados semanalmente na rede de esgoto, estes atenderiam aos requisitos da NN 8.01.

O sistema de escoamento de esgoto no CTR acontece pela união dos três registros. Por meio do levantamento dos dados de cada hidrômetro, obtidos na Prefeitura do IPEN, foi possível estimar a média do volume de mensal de esgoto no qual os rejeitos serão lançados com a finalidade de estabelecer os limites para descarga de rejeitos líquidos.

Assim, para determinar a concentração de atividade que será liberada na rede de esgoto semanalmente foi realizado a seguinte cálculo (Equação 11):

$$C = \frac{A_{\text{semanal}}}{V_{\text{esgoto}}} \quad \text{Equação 11}$$

Em que:

C = Concentração de atividade no volume de esgoto (Bq.m^{-3})

A_{semanal} = Atividade semanal lançada no esgoto (Bq.sem^{-1})

V_{esgoto} = Volume médio mensal de esgoto (m^3)

Estimativa do volume e taxa de ocupação do tanque de decaimento

Um tanque externo para decaimento radioativo de rejeitos líquidos gerados em caso de contaminação durante a produção (Figura 20) foi implantado na fase inicial de construção do laboratório. O LPFRT não possui ralo da sala de operação, ou seja, caso ocorra uma contaminação de material na sala, esta ficará restrita ao ambiente. Assim, para lidar com possíveis contaminações durante as produções, o laboratório foi projetado com uma pia para lavagem das mãos. A tubulação da pia está conectada ao tanque de decaimento localizado na área externa ao laboratório.

O tanque está dividido em duas partes: a primeira corresponde ao tanque de contenção que possui uma válvula de escoamento controlando a passagem da água contaminada para a segunda parte do tanque que se conecta ao sistema de esgoto do CTR. A água contaminada será liberada para o esgoto somente após análise radioativa.

Figura 20 – Tanque de decaimento e da pia de descontaminação do LPFRT.

Fonte: autora da tese.

Os dados usados para determinar o volume de rejeito líquido, gerado durante a lavagem das mãos, são:

- Volume de água corrente durante a lavagem das mãos com torneira aberta durante 1 minuto: 15 litros de água
- Capacidade do tanque de contenção: 100 L ($0,1 \text{ m}^3$)

O volume de rejeito líquido gerado é obtido pela multiplicação do tempo em minutos de lavagem das mãos por 15 litros. A taxa de ocupação do tanque pode ser determinada pela Equação 12:

$$T_o = \frac{V_{rejeito}}{V_{tanque}} \cdot 100 \quad \text{Equação 12}$$

Em que:

T_o = Taxa de ocupação (%)

$V_{rejeito}$ = Volume de rejeito líquido gerado na descontaminação das mãos (L)

V_{tanque} = Capacidade do tanque de decaimento (L)

4.6 Depósito Inicial de Rejeitos Radioativos

Estimativa do Local para Armazenamento dos Rejeitos

A orientação na CNEN 8.01 é de que o local de armazenamento inicial de rejeitos faça parte do projeto da instalação. Os critérios para a seleção do local para o armazenamento dos rejeitos radioativos contendo ^{125}I (Classe 1) são apresentados pela mesma norma e foram levados em consideração na seleção do local para depósito.

Taxa de Ocupação do Depósito Inicial

As equações usadas para determinar o volume total do depósito e taxa de ocupação do depósito para ambos os tipos de rejeitos são apresentadas a seguir (Equação 13 e 14):

$$V_t = N_e \cdot V_e \quad \text{Equação 13}$$

Em que:

V_t = Volume total do depósito (L)

N_e = Número de embalados/bombonas armazenados no depósito

V_e = Volume dos embalados/bombonas armazenados no depósito (L)

$$T_o = \frac{V_{efetivo} \cdot T_{armazenamento}}{V_{total} \cdot 365_{dias}} \cdot 100 \quad \text{Equação 14}$$

Em que:

T_o = Taxa de ocupação do depósito (%)

$T_{\text{armazenamento}}$ = Tempo de armazenamento necessário para posterior liberação do rejeito (dias)

V_{efetivo} = Volume dos embalados/bombonas armazenados no depósito (L.ano^{-1})

V_{total} = Capacidade máxima do depósito (L.ano^{-1})

4.7 Rejeitos Gasosos

Descrição do sistema de controle para emissões gasosas das células de produção

Toda a produção de fontes será realizada em células estanques e blindadas, produzidas em aço inoxidável austenítico (ABNT 304 L) com 5 mm espessura. As laterais das três *hot cell* possuem cantos arredondados para facilitar a descontaminação. Para a blindagem utiliza-se vidro temperado com 10 mm de espessura.

As sementes de ^{125}I só serão retiradas da *hot cell* após os testes de vazamento e mensuração de atividade.

Na saída de ar de cada *hot cell* estão instalados um conjunto de filtros absolutos (filtro grosso), filtro de carvão ativado e HEPA. Após o conjunto de filtros há um detector de Iodeto de Sódio dopado com Tálcio (NaI/Tl). Caso a atividade do ar seja acima do permitido para liberação ao ambiente, a válvula de saída de ar selará automaticamente, isolando as *hot cell*.

Serão instalados no laboratório, detectores de área com alarme sonoro. O laboratório de produção estará sempre com pressão negativa em relação ao ambiente externo, assim, caso ocorra um vazamento, este não se espalhará.

O sistema de exaustão das células de produção está projetado e instalado com potência para retirar o ar interno das *hot cell* mesmo com uma ruptura total da blindagem de vidro.

Estimativa do Volume e Concentração de Atividade dos Rejeitos Gasosos

Nas três células de produção ocorrerá geração de rejeitos gasosos, sendo a *hot cell* 1 e 2 as mais críticas. Em cada uma delas o ar entra por um filtro de papel e, posteriormente, num filtro tipo HEPA, circula por dentro das células e sai por um conjunto de três filtros: HEPA, carvão ativado e HEPA. O interior das células está numa depressão de 20 a 25 mmHg em relação ao ambiente. Assim todo o material radioativo gasoso será capturado por este conjunto de filtros (Figura 21).

Figura 21 – À esquerda, fotografia do conjunto de filtros da *hot cell* 3; à direita: conjunto de filtros em destaque.

Fonte: autora da tese.

Assim, foi realizado um experimento para estimativa da concentração de atividade que estará presente nos filtros do sistema de exaustão das células de produção, com um sistema de exaustão equivalente ao das células em construção, disponível em um dos laboratórios do LPFRT. O sistema possui filtro grosso: Modelo *Poly-pleat Green G4-EN-779* dimensões: 595 x 595 x 45 mm, e de carvão ativado: Modelo *Carvo- Ative DC*, dimensões 593 x 593 x 292 mm ambos da marca *VECOFlow* (Figura 22).

Figura 22 - Filtros de carvão e grosso, respectivamente, utilizados no sistema de exaustão.

Fonte: autora da tese.

O experimento consistiu na estimativa da concentração de atividade presente no filtro de carvão ativado. Para isso, quatro amostras de carvão granulado, da região central dos filtros, foram obtidas e trituradas para melhorar a geometria da fonte. Após isso, foram medidas em um detector Espectrômetro Gama, constituído por um detector de germânio

hiper-puro (HPGe) (Modelo GX 2518 da *Canberra Industries*), com resolução (FWHM) a 1332 keV:1,8keV, acoplado a um analisador multicanal com 8186 canais. Uma fonte padrão de ^{125}I foi utilizada para calibração (Figura 23).

Figura 23 - Da esquerda para direita: fonte padrão utilizada no experimento, pesagem do carvão triturado e unidade do filtro de carvão.

Fonte: autora da tese.

Foram obtidas medidas da massa e volume dos filtros e determinada a concentração de atividade por massa de filtro durante o período avaliado. Este dado poderá ser utilizado como base para estudos posteriores com o rejeito gasoso (Equação 6).

A taxa de fixação do ^{125}I também foi determinada com base em um estudo já realizados pelo grupo de braquiterapia. Nesse estudo, três núcleos de prata pré-tratados foram colocados em uma solução água e ^{125}I durante 24 horas. A atividade presente na solução foi medida no início e após 24 horas. Eficiência total da fixação foi de 72% (SOUZA, 2016). A Equação 15 permite obter a taxa de fixação da solução utilizando esse método.

$$T_{\text{fixação}} = \frac{A_{\text{após 24h}}}{A_{\text{inicial}}} \cdot 100 \quad \text{Equação 15}$$

Em que:

$T_{\text{fixação}}$ = Taxa de fixação do ^{125}I (%)

$A_{\text{após 24h}}$ = Atividade após 24h de fixação (Bq)

A_{inicial} = Atividade no início do experimento (Bq)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Rejeitos Sólidos

Os rejeitos sólidos serão segregados na própria célula onde serão produzidos, e serão divididos em compactáveis (papéis absorventes) e não compactáveis (frascos de vidro e fontes). A fim de estimar a ocupação do depósito inicial ao longo dos anos de operação do laboratório, esse estudo apresenta massa, volume e atividade totais que entram, ficam armazenados e são liberados semanalmente no depósito.

5.1.1 Caracterização dos rejeitos sólidos: estimativa de massa, volume e atividade

Ao longo da linha de produção, embalagens estarão disponíveis em cada célula para o armazenamento inicial dos rejeitos sólidos. Ao término de cada semana de produção, os embalados de rejeitos sólidos terão suas atividades, massas e volumes determinados e registrados serão então, enviados para armazenamento temporário no próprio LPFRT. Neste estudo foram estimados massa, volume e atividade presentes nesses embalados após cada semana de produção.

A fim de estimar corretamente o volume final de cada embalado gerado semanalmente, considerou-se que os rejeitos sólidos não compactáveis colocados no embalado, ocupam maior capacidade do embalado. Portanto, foi utilizado um fator de correção de 1,4 multiplicado pelo volume semanal dos rejeitos sólidos. Esse valor foi obtido com base na experiência no sistema de armazenamento da Gerência de Rejeitos Radioativos do IPEN.

As estimativas das massas e volumes de rejeitos compactáveis ou não, são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Relação de volume e massa para rejeitos sólidos gerados em cada célula de produção em três cenários.

Cenário	Rejeito Compactável?	Volume semanal (L*)			Massa (kg)		
		<i>hot cell 1</i>	<i>hot cell 2</i>	<i>hot cell 3</i>	<i>hot cell 1</i>	<i>hot cell 2</i>	<i>hot cell 3</i>
1 (1,4 Ci)	Não	$7,8 \times 10^{-2}$	$6,2 \times 10^{-4}$	$6,2 \times 10^{-2}$	$6,6 \times 10^{-2}$	$2,7 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-2}$
	Sim	$2,0 \times 10^{-1}$			$2,3 \times 10^{-1}$		
2 (2,9 Ci)	Não	$1,2 \times 10^{-1}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-1}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$5,4 \times 10^{-3}$	$8,5 \times 10^{-2}$
	Sim	$2,0 \times 10^{-1}$			$2,3 \times 10^{-1}$		
3 (5,8 Ci)	Não	$2,1 \times 10^{-1}$	$2,5 \times 10^{-3}$	$4,1 \times 10^{-1}$	$1,9 \times 10^{-1}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-1}$
	Sim	$2,0 \times 10^{-1}$			$2,3 \times 10^{-1}$		

Fonte: autora da tese.

* Para fins práticos de gestão, o volume semanal foi convertido de cm^3 para litros (L).

Estimativa da atividade dos rejeitos sólidos

Para a estimativa da atividade semanal, foi considerada a recomendação da norma NN 8.01 da CNEN na qual está estabelecido que, quando não é possível determinar a atividade do rejeito, é possível assumir que 10% do conteúdo radioativo inicial ficam fixados no frasco e outros materiais que tiverem contato com material radioativo líquido. Assim, a fração da radioatividade presente nos rejeitos sólidos foi determinada por meio da multiplicação do valor da atividade que entra em cada célula de produção, para cada cenário, pelo percentual de 10% para cada item do rejeito sólido (Tabela 12).

Tabela 12 - Dados das perdas de atividade de ^{125}I para cada item do rejeito sólido e para cada cenário na *hot cell 1*.

<i>Hot Cell 1</i>	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Atividade de ^{125}I entrada/semana (Ci)	1,8	3,6	7,3
Taxa de Volatilização do ^{125}I (%)	18	18	18
Fração de atividade no rejeito sólido (%)	10	10	10
Atividade residual no Frasco <i>Perkim Elmer</i> ® (Ci)	0,2	0,3	0,6
Atividade residual de ^{125}I (Ci)	1,3	2,7	5,3
Atividade residual no Frasco de produção (Ci)	0,1	0,3	0,5
Atividade residual de ^{125}I (Ci)	1,2	2,4	4,8
Atividade residual no papel de forração (Ci)	0,1	0,2	0,5
Atividade residual de ^{125}I (Ci)	1,1	2,2	4,4
Atividade de ^{125}I por semente (Ci)	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$
Atividade presente nos rejeitos sólidos/semana (Ci)	0,4	0,8	1,6
Atividade presente nos rejeitos sólidos/semana (mCi)	404	808	1.616

Fonte: autora da tese.

A atividade total presente nos rejeitos sólidos da *hot cell 2* é o produto do número de fontes reprovadas pela atividade estimada para cada semente (Tabela 13).

Tabela 13- Dados das perdas de atividade de ^{125}I para cada item do rejeito sólido e para cada cenário na *hot cell 2*.

<i>Hot cell 2</i>	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Atividade de ^{125}I Entrada/semana (Ci)	1,8	3,6	7,3
Atividade de ^{125}I por semente (Ci)	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$
Número de fontes produzidas semanalmente	909	1.818	3.636
Percentual de reprovação na 2ª solda (%)	30	30	30
Número de fontes reprovadas (2ª solda)	273	545	1.091
Atividade presente nos rejeitos sólidos/semana (Ci)	0,3	0,7	1,3

Fonte: autora da tese.

Para estimativa da atividade dos itens do rejeito sólido na *hot cell 3*, foi levado em consideração o percentual de sementes com vazamento (5%). Multiplicando-se esse percentual pelo número de sementes aprovadas para a fase de CQ obteve-se o número de sementes com vazamento para cada cenário. A atividade das sementes reprovadas foi determinada por meio da multiplicação do número de sementes reprovadas pela atividade média de cada semente. As sementes fabricadas poderão apresentar variações nos valores de atividade. Assim, a atividade média medida de cada semente com vazamento produzida experimentalmente, foi determinada com base nos valores máximos e mínimos de fixação de ^{125}I obtidos em estudos laboratoriais (atividade média por semente: 0,77 mCi) (SOUZA, 2016). A atividade de 1,2 mCi por semente, utilizada nessa tese, refere-se a sementes sem vazamento.

Além das sementes reprovadas, o rejeito sólido da célula de produção três consiste também nos tubos de ensaios e filtros porosos usados nessa fase da produção. A atividade dos tubos de ensaio foi obtida pelo percentual de 10% da atividade presente no vazamento de uma semente (1,2 mCi). A atividade do filtro poroso foi obtida por meio do percentual de 10% da atividade residual presente no vazamento (após perda de 10% nos tubos de ensaio). Os resultados também são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14- Dados das perdas de atividade de ^{125}I para cada item do rejeito sólido e para cada cenário na *hot cell* 3.

<i>Hot cell</i> 3	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Percentual de aprovação na 2ª solda (%)	70	70	70
Nº de sementes aprovadas para fase de CQ	636	1.273	2.545
Percentual de reprovação por vazamento (%)	5	5	5
Percentual de sementes fora da faixa de atividade (%)	10	10	10
Nº de fontes reprovadas (por vazamento)	32	64	127
Nº de fontes reprovadas (por atividade)	64	127	255
Nº de filtros poros do CQ	3	6	13
Nº de tubos de ensaio + tampa	3	6	13
Atividade por semente (Ci)	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$
Atividade por tubos de ensaio com vazamento de 1 semente (Ci)	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$
Atividade média por semente com vazamento (Ci)	$7,7 \times 10^{-4}$	$7,7 \times 10^{-4}$	$7,7 \times 10^{-4}$
Atividade residual por tubo do CQ (Ci)	$1,2 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-4}$
Atividade residual filtro poroso (Ci)	$1,1 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$
Atividade presente nos rejeitos sólidos/semana (Ci)	0,03	0,05	0,10
Atividade presente nos rejeitos da sólidos/semana (mCi)	25	51	101

Fonte: autora da tese.

Após término da produção, as sementes com atividade abaixo de 0,1 mCi poderão ser usadas como marcadores cirúrgicos para mama, mas caso não encontrem aplicação em outras áreas, serão armazenadas para decaimento ou usadas para estudos da linha de produção e outras aplicações em pesquisa. As sementes que estiverem acima de 1 mCi, serão armazenadas na própria célula de produção para decaimento ou poderão ser liberadas para uso médico desde que se atendam aos requisitos de dosimetria para a aplicação destinada. As que apresentarem atividade na faixa de 0,1 a 1 mCi estarão prontas para serem enviadas para os hospitais e clínicas solicitantes.

5.1.2 Armazenamento Temporário dos Rejeitos Sólidos

O armazenamento dos rejeitos gerados será feito inicialmente na própria célula de produção. Ao término de cada semana, os embalados gerados nas células de produção serão enviados para depósito inicial da instalação a fim de liberar espaço. As fontes reprovadas serão armazenadas inicialmente em suas próprias células de produção em blindagem adequada (castelo de chumbo). Ao término de cada semana as fontes que não forem aproveitadas em outras aplicações serão enviadas, para o depósito inicial a fim de evitar exposição desnecessária da equipe de operação, devido ao acúmulo de atividade.

Sabe-se que cada embalado de rejeitos possuirá valores de massa, volume e atividades que refletirão as características da produção semanal. A atividade do embalado será o critério

mandatório para o descarte dele. Uma vez que os níveis de atividade atingirem o valor de dispensa, os embalados com sua massa e volume já conhecidos poderão ser retirados do depósito. Apesar de a atividade ser o critério mais importante do ponto de vista de radioproteção, a taxa de entrada de massa e o volume devem ser conhecidos para estimativa do percentual de ocupação do depósito ao longo das semanas de produção e garantir uma adequada gestão desses embalados.

Taxa de entrada de massa e volume no depósito inicial

Para gerenciar a massa, volume e atividade dos rejeitos que entram no depósito inicial determinou-se a taxa de entrada bruta para cada um desses parâmetros. A taxa de entrada líquida foi determinada por meio da somatória dos valores de massa, volume e atividade dos embalados que entram no depósito semanalmente, subtraindo-se os mesmos valores dos embalados que são liberados após o decaimento. Por meio dessa relação temos a taxa de entrada líquida (Tabela 15 e 16).

Tabela 15 - Massa total (kg) de rejeitos radioativos sólidos por célula de produção e por cenário.

Massa de rejeitos sólidos por semana	Cenário 1 (kg)	Cenário 2(kg)	Cenário 3(kg)
<i>Hot cell 1</i>	0,291	0,331	0,411
<i>Hot cell 2</i>	0,003	0,005	0,011
<i>Hot cell 3</i>	0,023	0,085	0,169
Massa total (kg)	0,317	0,421	0,591

Fonte: autora da tese.

Tabela 16 - Volume total (L) acumulado nos rejeitos radioativos sólidos por célula de produção e por cenário.

Volume rejeitos sólidos	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Hot Cell 1 (cm ³)	278	321	405
Hot Cell 2 (cm ³)	1	1	2
Hot Cell 3 (cm ³)	62	206	411
Volume total (cm ³)	341	527	819
Volume total (L) x 1,4	0,45	0,74	1,15

Fonte: autora da tese.

As massas e volumes de rejeitos sólidos, que entrarão no depósito ao longo de cinco anos de operação são apresentados nas Figuras 24 e 25. Para cada semana de produção serão gerados 0,48 L e 0,32 kg de rejeitos sólidos para o cenário 1 (1,82 Ci). Após os cinco anos de operação a massa total acumulada de rejeitos será de cerca de 40 kg e o volume total será de 60 L.

Figura 24 – Gráfico da atividade (Bq) e massa (kg) acumulados no depósito em 5 anos de operação – Cenário 1.

Fonte: autora da tese.

Figura 25 - Gráfico da atividade (Bq) e volume (L) acumulados no depósito em 5 anos de operação – Cenário 1.

Fonte: autora da tese.

As massas e os volumes de rejeitos sólidos que entrarão no depósito ao longo de cinco anos de operação, para o cenário 2, são apresentados nas Figuras 26 e 27. Para cada semana de produção serão gerados 0,74 L e 0,42 kg de rejeitos sólidos para o cenário 2 (3,6 Ci). Após os cinco anos de operação a massa total acumulada de rejeitos será de aproximadamente 55 kg e o volume total será de 135 L.

Figura 26 - Gráfico da atividade (Bq) e massa (kg) acumulados no depósito em 5 anos de operação – Cenário 2.

Fonte: autora da tese.

Figura 27 - Gráfico da atividade (Bq) e volume (L) acumulados no depósito em 5 anos de operação – Cenário 2.

Fonte: autora da tese.

As massas e os volumes de rejeitos sólidos que entrarão no depósito ao longo de cinco anos de operação, para o cenário 3, são apresentados nas Figuras 28 e 29. Para cada semana de produção serão gerados 1,15 L e aproximadamente 0,60 kg de rejeitos sólidos para o cenário 3 (7,3 Ci). Após os cinco anos de operação a massa total acumulada de rejeitos será de aproximadamente 85 kg e o volume total será de 230 L.

Figura 28 - Gráfico da atividade (Bq) e massa (kg) acumulados no depósito em 5 anos de operação – Cenário 3.

Fonte: autora da tese.

Figura 29 - Gráfico da atividade (Bq) e volume (L) acumulados no depósito em 5 anos de operação – Cenário 3.

Fonte: autora da tese.

Semanalmente, embalados de rejeitos de cada célula serão enviados para o depósito. Na *hot cell 2* os rejeitos gerados serão as fontes reprovadas na segunda solda. Elas serão armazenadas em blindagens de chumbo. No entanto, do ponto de vista da proteção radiológica, é adequado remover essas fontes não utilizáveis da célula de produção a fim de reduzir a dose de exposição dos operadores. Assim, semanalmente as fontes descartadas serão transferidas para o depósito de armazenamento temporário, onde serão também armazenadas em blindagens de chumbo dispostas no local. Para a *hot cell 3* as fontes reprovadas no ensaio de estanqueidade serão descartadas como rejeitos sólidos, após serem separadas da água do teste (por meio de bomba de vácuo). Essas fontes terão o mesmo armazenamento das fontes da *hot cell 2*.

Na *hot cell 3*, além das fontes reprovadas no ensaio de estanqueidade, haverá fontes reprovadas devido à faixa de atividade. Estas fontes não servirão para aplicações em braquiterapia de câncer de próstata, mas poderão ser usadas para outros fins. Portanto, poderão a qualquer momento sair da linha de produção, não necessitando ser enviadas para armazenamento em depósito inicial.

Taxa de entrada líquida de atividade no depósito

A etapa final da caracterização dos rejeitos sólidos consistiu na estimativa da atividade de cada embalado gerado semanalmente bem como o seu decaimento ao longo do armazenamento no depósito inicial da instalação (taxa de entrada líquida). Na tabela 17 são apresentadas as atividades semanais por embalado que entram no depósito.

Tabela 17- Atividade semanal (Ci) presente nos embalados de rejeitos radioativos sólidos por célula de produção e por cenário.

Atividade total	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
<i>Hot cell 1</i> (Ci)	0,40	0,81	1,62
<i>Hot cell 2</i> (Ci)	0,33	0,65	1,30
<i>Hot cell 3</i> (Ci)	0,03	0,05	0,10
Atividade total (Ci)	0,76	1,51	3,02

Fonte: autora da tese.

Estima-se que a cada semana de operação um embalado entrará no depósito. No cenário 1, o primeiro embalado atingirá o nível de dispensa e poderá ser removido do depósito

depois de 126 semanas (882 dias) de armazenamento. A taxa líquida de entrada de atividade semanal no depósito foi obtida pela somatória das atividades presentes nos rejeitos sólidos ainda armazenados, subtraindo as atividades dos embalados já liberados.

Na 126ª semana de armazenamento o depósito terá uma atividade total acumulada de $3,40 \times 10^{11}$ Bq para o cenário 1. Após isso, toda semana um embalado entrará no depósito e outro sairá o que representa o equilíbrio da taxa de entrada líquida do depósito, representada pela linha horizontal contínua do gráfico.

Os embalados de rejeitos sólidos, gerados semanalmente, serão armazenados nas células de produção, até o primeiro dia útil da semana de operação, durante a parada para manutenção da linha de produção. Cada embalado radioativo decairá pelo período de sete dias na linha de produção até ser enviado para depósito inicial. Isso ocorrerá porque os rejeitos serão removidos da linha de produção apenas uma vez por semana. Ou seja, no cenário 1, um embalado com atividade de 0,76 Ci ($2,81 \times 10^{10}$ Bq) ficará por sete dias na linha de produção antes de entrar no depósito. Após o término da semana de produção, entrará no depósito com atividade decaída para 0,72 Ci ($2,67 \times 10^{10}$ Bq).

Para o cenário 1, a taxa de entrada de atividade semanal no depósito inicial estimada é de $2,67 \times 10^{10}$ Bq. Na Figura 30, é apresentada a entrada e o decaimento semanal da atividade presente nos embalados de rejeitos ao longo de cinco anos de operação da instalação. A mesma figura mostra que em um cenário no qual a operação da instalação fosse encerrada após 255 semanas de operação, os rejeitos gerados e armazenados no depósito atenderiam aos níveis de dispensa ($1,0 \times 10^6$ Bq) após mais dois anos (semana 379) de armazenamento.

A taxa de entrada de atividade semanal no depósito inicial estimada é de $5,34 \times 10^{10}$ Bq (1,44 Ci) para cenário 2. Na Figura 31, é apresentada a entrada e o decaimento semanal da atividade presente nos embalados de rejeitos ao longo de cinco anos de operação da instalação. Considerando um cenário no qual a operação da instalação fosse encerrada após 255 semanas de operação, os rejeitos gerados e armazenados no depósito atenderiam aos níveis de dispensa após mais dois anos (semana 385) de armazenamento.

Para o cenário 3, a taxa de entrada de atividade semanal no depósito inicial estimada é de $1,07 \times 10^{11}$ Bq (2,89 Ci). Na Figura 32, é apresentada a entrada e o decaimento semanal da atividade presente nos embalados de rejeitos ao longo de cinco anos de operação da instalação. Em um cenário no qual a operação da instalação fosse encerrada após 255 semanas de operação, os rejeitos gerados e armazenados no depósito atenderiam aos níveis de dispensa após mais dois anos (semana 397) de armazenamento.

Figura 30– Atividade (Bq) no depósito inicial ao longo de 379 semanas de armazenamento - cenário 1.

Fonte: autora da tese.

Figura 31 - Atividade (Bq) no depósito inicial ao longo de 385 semanas de armazenamento – cenário 2.

Fonte: autora da tese.

Figura 32 - Atividade (Bq) no depósito inicial ao longo de 397 semanas de armazenamento – cenário 3.

Fonte: autora da tese.

Concentração de atividade e tempo necessário para liberação no meio ambiente

A norma CNEN 8.01 estabelece os níveis de atividade e concentração de atividade requeridos para dispensa de rejeitos sólidos como resíduo comum ou reutilização no caso dos frascos de produção (1×10^3 kBq.kg⁻¹ ou 1×10^6 Bq, respectivamente). Ambos os parâmetros poderão ser usados como critério para liberação dos rejeitos, no entanto, aquele que favorece a liberação dentro das condições da instalação deve ser usado.

Utilizando a Equação 11 e os dados de massa (kg) foi obtida a concentração de atividade gerada semanalmente.

No cenário 1 a concentração de atividade foi de $8,42 \times 10^7$ kBq.kg⁻¹ para 0,32 kg de rejeito sólido que entra no armazenamento semanalmente, ao longo de cinco anos de operação. Em um cenário no qual a operação da instalação fosse encerrada após 255 semanas de operação, os rejeitos gerados e armazenados no depósito atenderiam aos níveis de dispensa (Limite de Concentração de Atividade para Dispensa de Materiais contendo I¹²⁵ $1,0 \times 10^3$ Bq) após mais 12 semanas (semana 397) de armazenamento. Atendendo ao critério de concentração de atividade tem-se um período maior de armazenamento equivalente a 12 semanas (84 dias) comparado ao critério atividade.

Para o cenário 2, a concentração de atividade foi de $1,27 \times 10^8$ kBq.kg⁻¹ para 0,42 kg de rejeito sólido. Em um cenário no qual a operação da instalação fosse encerrada após 255 semanas de operação, os rejeitos gerados e armazenados no depósito atenderiam aos níveis de dispensa após mais dois anos (semana 403) de armazenamento. Atendendo o critério de concentração de atividade teremos um período maior de armazenamento equivalente a 18 semanas (126 dias).

Para o cenário 3, a concentração de atividade foi de $1,81 \times 10^8$ kBq.kg⁻¹ para 0,59 kg de rejeito sólido. Em um cenário no qual a operação da instalação fosse encerrada após 255 semanas de operação, os rejeitos gerados e armazenados no depósito atenderiam aos níveis de dispensa após mais dois anos (semana 408) de armazenamento. Atendendo o critério de concentração de atividade teremos um período maior de armazenamento equivalente a 11 semanas (77 dias).

Na Figura 33 são apresentadas as concentrações de atividade ao longo das semanas de armazenamento.

Figura 33 – Concentração de atividade (kBq.kg^{-1}) por massa acumulada no depósito inicial em 5 anos de Operação – Cenário 1 a 3.

Fonte: autora da tese.

5.2 Rejeitos Líquidos

5.2.1 Caracterização dos rejeitos líquidos: estimativa do volume e atividade

Estimativa do Volume e Atividade de Rejeitos Líquidos – hot cell 1

Na linha de produção, os rejeitos líquidos serão gerados nas *hot cell 1* (solução de ^{125}I + NaOH utilizada na fixação do iodo no núcleo de prata) e na *hot cell 3* (líquidos oriundos das lavagens do CQ – ensaio de estanqueidade). O volume de rejeito líquido na *hot cell 1* é o produto do número de frascos pelo volume de solução de iodo utilizados na linha de produção por semana (Tabela 18 e 19).

Tabela 18- Volume de rejeito líquido semanal por cenário *hot cell 1*.

Volume de Rejeito Líquido Semanal	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Volume <i>hot cell 1</i> : (μL)	$9,1 \times 10^3$	$1,8 \times 10^4$	$3,6 \times 10^4$
Volume <i>hot cell 1</i> : (L)	$9,1 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-2}$	$3,6 \times 10^{-2}$

Fonte: autora da tese.

De toda a atividade disponível para o processo de fixação do ^{125}I no fio de prata, assume-se que 10% não é absorvido pelo fio, ficando no volume de rejeito líquido.

Para o cenário 1, por exemplo, tem-se a seguinte situação: 1,82 Ci de atividade entra na linha de produção. Desse total 18% volatiliza, sobrando 1,49 Ci. Desse valor, consideramos uma perda de 10% para o frasco da empresa fornecedora, mais outra perda de 10% no frasco usado na linha de produção e finalmente 10% é perdida nos papéis de forração durante a manipulação na *hot cell*. Assim, apenas 1,09 Ci, de um total de 1,49 Ci estarão disponíveis para o processo de fixação.

O processo de fixação ainda apresenta perdas de atividade, assim podemos assumir que 10% da atividade na fixação não será adsorvida pelo fio de prata, ficando na própria solução.

Usando os valores da Tabela 18, apresentada anteriormente, foi possível estimar a atividade presente nos rejeitos líquidos da *hot cell 1* para os cenários de 1 a 3 e estimar também a concentração de atividade por semana (Tabela 19).

Tabela 19 – Atividade e concentração de atividade semanal presente nos rejeitos líquidos da *hot cell 1* para o cenário 1, 2 e 3.

Atividade nos Rejeitos Líquidos <i>hot cell 1</i>	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Atividade por semana de produção (após as perdas no rejeito sólido e por volatilização) (mCi)	1.087	2.174	4.347
Atividade por frasco (mCi)	36	36	36
Atividade por frasco (Bq)	$1,3 \times 10^9$	$1,3 \times 10^9$	$1,3 \times 10^9$
Atividade no rejeito líquido (mCi)	109	217	435
Concentração de atividade (Bq.m ³)	$4,4 \times 10^{14}$	$4,4 \times 10^{14}$	$4,4 \times 10^{14}$

Fonte: autora da tese.

Na Figura 34 são apresentados a concentração de atividade ao longo de 260 semanas de operação (5 anos) na *hot cell 1*, para os três cenários e os diferentes volumes para cada cenário ao longo do período de armazenamento. O volume de rejeito líquido acumulado é apresentado também na mesma figura.

Figura 34 - Concentração de atividade (Bq.m^{-3}) e Volume (L) de rejeitos líquidos acumulados no depósito inicial em 5 anos de operação na Célula 1 (Cenários 1, 2 e 3).

Fonte: autora da tese.

Estimativa do Volume e Atividade de Rejeitos Líquidos – hot cell 3

O maior volume de rejeitos líquidos será produzido na *hot cell 3*. Os rejeitos nessa célula originam-se das lavagens realizadas na etapa de controle de qualidade nos ensaios de estanquidade das fontes seladas.

O número de processos de lavagens varia de acordo com o número de sementes por semana. Conhecendo esse valor é possível estimar o volume de água usada nas lavagens por semana (Equação 7):

$$N_{\text{lavagens}} = \left(\frac{909 \text{ sementes}}{18 \text{ tubos}} \right) / 10_{\text{sementes}}$$

$$N_{\text{lavagens}} = 5$$

Com o número de processos de lavagem é possível estimar o volume de água usada em uma lavagem (Equação 8):

$$V_{\text{água}} = 2 \text{ ml} \cdot (18 \cdot 5)$$

$$V_{\text{água}} = 180 \text{ ml}$$

O volume de rejeitos líquidos gerado semanalmente de acordo com o número de lavagens é dado a seguir (Equação 9):

$$V_{\text{rejeito}} = 180\text{ml} \cdot 5 \quad V_{\text{rejeito}} = 180\text{ml} \cdot 20$$

$$V_{\text{rejeito}} = 900\text{ml} \quad \text{ou} \quad V_{\text{rejeito}} = 3600\text{ml}$$

Na Tabela 20 são apresentados os resultados para número de processos de lavagens por semana, volume de água para lavagem por semana e volume de rejeito líquido gerado por semana.

Tabela 20 - Número de processos de lavagem, volume de rejeito líquido e volume de água para lavagem para célula de produção 3.

Dados Obtidos	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
	5	20	5	20	5	20
	lavagens	lavagens	lavagens	lavagens	lavagens	lavagens
Nº de processo de lavagem por semana	5	5	10	10	20	20
Volume de água para lavagem por semana (ml)	180	180	360	360	720	720
Volume de rejeito líquido gerado por semana por nº ciclos de lavagem (ml)	910	3.640	1.820	7.270	3.640	14.550

Fonte: autora da tese.

O nível de atividade presente no rejeito líquido da *hot cell* 3 dependerá da contaminação ou vazamento das fontes produzidas. Um estudo realizado por Moura (2016) simulou um vazamento de todo o material radioativo de uma fonte com 1 mCi ($3,7 \times 10^7$ Bq) em um dos tubos de ensaio do controle de qualidade. Após o número mínimo de cinco lavagens, a atividade máxima mensurada na água, usada para descontaminação das fontes, foi de $7,10 \times 10^4$ Bq.

O número de lavagens para descontaminação pode variar de 5 a 20. Dividindo a atividade presente no rejeito líquido ($7,10 \times 10^4$ Bq) pelo volume médio mensal de esgoto, é possível estimar a concentração de atividade no momento da dispensa do rejeito líquido (Equação 6):

$$C = \frac{7,1 \cdot 10^4 \text{ Bq}}{211,4 \text{ m}^{-3}}$$

$$C = 3,36 \cdot 10^2 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$$

É possível observar que os rejeitos oriundos da *hot cell* 3 poderão semanalmente liberados na rede de esgoto do CTR, uma vez que a concentração de atividade estará abaixo do nível de dispensa estabelecido em norma.

Caso seja observado um aumento no número de fontes com vazamento no ensaio de estanqueidade, novos cálculos deverão ser realizados para averiguar se ainda atenderão os limites de dispensa.

5.2.2 Armazenamento Temporário dos Rejeitos Líquidos

As bombonas serão retiradas da linha de produção ao atingirem 75% da sua capacidade máxima (45 L) e terão a concentração de atividade de rejeito líquido medida. Caso esteja acima dos limites de dispensa, as bombonas serão enviadas para o depósito inicial para decaimento. Em caso contrário, o rejeito será liberado na rede de esgoto do CTR.

Estimativa da Liberação de Rejeitos Líquidos na Rede de Esgoto

Os rejeitos líquidos poderão ser liberados na rede de esgoto da instalação ao atenderem os níveis de dispensa. No entanto, durante a produção os rejeitos estarão armazenados nas bombonas e cercados por blindagem do próprio carrinho de transporte (veja a Figura 19). Quando a bombona estiver com 75% de sua capacidade máxima ocupada esses rejeitos serão removidos da linha de produção. Nesse momento terão sua atividade mensurada e com base nos dados do volume médio mensal de esgoto, será analisado se o rejeito poderá ser liberado ou deverá ser armazenado para decaimento.

A diluição da atividade do rejeito também será uma possibilidade, no entanto, acarretará em maior espaço para diluição e tempo dos operadores, e equipe de radioproteção. Assim, para as condições do LPFRT, o armazenamento inicial é a solução escolhida.

A tabela 21 apresenta a localização, números de registro e número dos hidrômetros, bem como o volume médio mensal do esgoto no período de setembro de 2017 a abril de 2018.

Tabela 21 - Especificações dos hidrômetros do IPEN e da média do consumo mensal de geração de esgoto.

	(ADM FÍSICA*)	(ALMOXERIFADO)	(R. BIOLOGIA)
Nº Registro (RGI)	419686622	419686037	419687602
Nº Hidrômetro	Y16F001681	A06F052697	G99PV13840
Mês			
Set/17	24	83	436
Out/17	43	83	557
Nov/17	62	93	613
Dez/17	124	97	473
Jan/18	121	88	532
Fev/18	123	87	421
Mar/18	93	63	313
Abr/18	100	77	368
Volume médio mensal por registro (cm³)	86,25	83,88	464,13

* Localização dos hidrômetros: IPEN- Av. Prof. Lineu Prestes 2242. Cid. Universitária – São Paulo/SP.
Fonte: autora da tese.

O volume médio de esgoto é de aproximadamente $211,42\text{m}^3.\text{mês}^{-1}$ ($52,85\text{m}^3.\text{sem}^{-1}$). De acordo com a norma CNEN 8.01 (Tabela II. 1 do Anexo II) o nível de dispensa para rejeitos líquidos contendo ^{125}I é de $3,7 \times 10^4$ (Bq.m⁻³). A mesma norma (Tabela II.2 do Anexo II) informa o limite máximo para liberação anual total de ^{125}I , na rede de esgoto, respeitando os limites de $3,7 \times 10^4$ (Bq.m⁻³) é de 1×10^8 Bq.ano⁻¹. Assim, a quantidade ^{125}I liberada mensalmente na rede de esgotos não deve exceder a quantidade que, se fosse diluída no volume médio mensal de esgoto liberado pela instalação, resultasse numa concentração média de $3,7 \times 10^4$ (Bq.m⁻³). Evidentemente, esse valor de concentração, a ser liberado, deve ser somado as demais liberações de outras instalações do IPEN, a fim de que atendam às restrições de dose estabelecidas pela CNEN para todo o instituto⁶ (CNEN, 2014b).

Utilizando o cenário 1 inicialmente como exemplo, podemos estimar a concentração de atividade e o tempo de armazenamento necessário para uma bombona que possui rejeito líquido acumulado durante uma semana de produção. Semanalmente serão lançados 3,97 GBq (107 mCi) de ^{125}I na bombona de armazenamento localizada na *hot cell* 1. Após 52 semanas a atividade acumulada e decaída do rejeito líquido será 4×10^{10} Bq.

⁶ De acordo com a norma CNEN 3.01 item 5.4.3.4: “Como condição limitante do processo de otimização da proteção radiológica em uma instalação, deve ser adotado um valor máximo de 0,3 mSv para a restrição da dose efetiva anual média para indivíduos do grupo crítico, referente à liberação de efluentes. (alterado pela Portaria CNEN 07/2006, DOU em 18/01/2006)”.

Nas figuras de 35 a 37 são apresentadas as atividades acumuladas semanalmente e ao longo de um ano de produção.

Figura 35– Atividade (Bq) acumulada semanalmente e ao longo de 52 semanas (1 ano) de armazenamento na *hot cell* 1 – Cenário 1.

Fonte: autora da tese.

Figura 36 - Atividade (Bq) acumulada semanalmente e ao longo de 52 semanas (1 ano) de armazenamento na *hot cell* 1 – Cenário 2.

Fonte: autora da tese.

Figura 37 - Atividade (Bq) acumulada semanalmente e ao longo de 52 semanas (1 ano) de armazenamento na *hot cell* 1 – Cenário 3.

Fonte: autora da tese.

Utilizando a equação para concentração de atividade e os dados do volume mensal da rede de esgoto (211,43 m³) podemos estimar qual seria a concentração de atividade do rejeito ao fim de uma semana e a fim de um ano (52 semanas), respectivamente:

$$C = \frac{3,97 \cdot 10^9 Bq}{211,43 m^3} \quad \text{ou} \quad C = \frac{1,63^{11} Bq}{211,43 m^3}$$

$$C = 1,88 \cdot 10^7 Bq \cdot m^{-3} \quad C = 7,72 \cdot 10^8 Bq \cdot m^{-3}$$

A CNEN 8.01 determina que a concentração de atividade para rejeitos líquidos contendo ¹²⁵I lançados na rede de esgoto seja de 3,7x10⁴ Bq.m⁻³. Para o cenário 1, a concentração de atividade da bombona da *hot cell* 1 está acima do limite de dispensa. Assim, o armazenamento será necessário.

Sabendo que o limite de concentração de atividade permitido é de 3,7x10⁴ Bq.m⁻³ e conhecendo o volume mensal de esgoto, podemos estimar, por meio da equação de decaimento radioativo, por quantos dias o rejeito deverá ser armazenado antes de ser liberado no esgoto:

Tempo de armazenamento necessário para rejeito gerado na *hot cell* 1 ao fim de uma semana de produção:

$$T = \frac{\ln\left(\frac{3,7 \times 10^4 \text{ Bq.m}^{-3} \times 211,4 \text{ m}^3}{3,97 \times 10^9 \text{ Bq}}\right) \cdot 59,43 \text{ dias}}{-\ln 2}$$

$$T = 534 \text{ dias}$$

O tempo de armazenamento necessário para rejeito gerado na *hot cell* 1 ao fim de 52 semanas de produção será de:

$$T = \frac{\ln\left(\frac{3,7 \times 10^4 \text{ Bq.m}^{-3} \times 211,4 \text{ m}^3}{1,6 \times 10^{11} \text{ Bq}}\right) \cdot 59,43 \text{ dias}}{-\ln 2}$$

$$T = 853 \text{ dias}$$

Supondo que a bombona contenha $1,6 \times 10^{11}$ Bq de atividade, esta deverá aguardar aproximadamente 853 dias antes de ser liberada no esgoto.

Na tabela 22 são apresentados os tempos de armazenamento necessário para cada um dos cenários.

Tabela 22 – Tempo de armazenamento de rejeitos líquidos gerados semanalmente na *hot cell* 1 para liberação de na rede de esgoto do CTR.

Parâmetros para determinação do tempo de armazenamento	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Concentração de atividade para liberação de ^{125}I (Bq.m ³)	$3, \times 10^4$	$3,7 \times 10^4$	$3,7 \times 10^4$
Volume mensal do esgoto da instalação (m ³)	211,43	211,43	211,43
Atividade semanal (Bq)	$3,97 \times 10^9$	$7,95 \times 10^9$	$1,59 \times 10^{10}$
Tempo de armazenamento (dias)	534	594	653

Fonte: autora da tese.

Dentro das condições esperadas para a linha de produção, os rejeitos líquidos da *hot cell* 3 não necessitarão de armazenamento. Simulando uma situação extrema de vazamento das fontes, na qual 5% das fontes do cenário 3 (182 unidades com 1 mCi cada) no ensaio de estanqueidade vazem todo seu conteúdo, teremos $6,73 \times 10^9$ Bq presente no rejeito líquido. Para esse cenário, considerando volume de esgoto da instalação, a concentração de atividade seria de $3,18 \times 10^7$ Bq.m⁻³, valor acima dos níveis de dispensa. O tempo de armazenamento necessário para o rejeito ser lançado na rede de esgoto é dado a seguir:

$$T = \frac{\ln\left(\frac{3,7 \times 10^4 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \times 211,4 \text{ m}^3}{6,73 \times 10^9 \text{ Bq}}\right) \cdot 59,43 \text{ dias}}{-\ln 2}$$

$$T = 579 \text{ dias}$$

Estimativa da taxa de ocupação do tanque de decaimento

Dentre as medidas de radioproteção no laboratório de produção de sementes de ^{125}I está a implantação de um tanque externo para decaimento radioativo de rejeitos líquidos gerados em caso de contaminação da equipe de operação. Além disso, o LPFRT não possui ralo da sala de operação, ou seja, caso ocorra uma contaminação de material na sala, a contaminação ficará restrita ao ambiente.

Durante a operação, os operadores trabalharão com luvas descartáveis por dentro da luva de chumbo, da célula de produção, e em todo fim de operação, deverão realizar monitoramento. Caso alguma contaminação seja detectada a produção será interrompida para se identificar a falha.

A fim de estimar a ocupação do tanque em caso de contaminação dos operadores, foi simulada a seguinte situação de contaminação: um operador, durante a produção das sementes, tem as luvas descartáveis contaminadas com 1 mCi de ^{125}I e percebe que elas estão rasgadas. Após descartar as luvas como rejeito em um recipiente no lado externo das células de produção, realiza a lavagem das mãos na pia dentro do laboratório para diminuir a contaminação.

Considerando um cenário no qual a atividade de contaminação é totalmente removida durante a lavagem das mãos, durante 1 minuto de lavagem, teremos 1 mCi ($3,7 \times 10^7 \text{ Bq}$) de ^{125}I no volume do tanque de contenção. O tanque, em sua segunda parte, conecta-se à rede de esgoto do CTR. Assim, é necessário calcular o tempo de decaimento para o rejeito ser lançado na rede de esgoto:

$$T = \frac{\ln\left(\frac{3,7 \times 10^4 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \times 211,4 \text{ m}^3}{3,7 \times 10^7}\right) \cdot 59,43 \text{ dias}}{-\ln 2}$$

$$T = 133 \text{ dias}$$

A taxa de ocupação do tanque é apresentada a seguir:

$$T_o = \frac{15l}{100l} \cdot 100$$

$$T_o = 15\%$$

Com 100 litros de capacidade e com 15 litros gastos a cada lavagem de mão, o tanque poderá armazenar a água gerada em até ~7 lavagens emergenciais.

5.3 Rejeitos Gasosos

Estimativa do Volume e Concentração de Atividade dos Rejeitos Gasosos

Os laboratórios do LPFRT utilizam filtros de carvão ativado no sistema de exaustão. Foi realizado um experimento com o objetivo de padronizar um método para determinação da atividade presente nos filtros que serão usados no sistema de exaustão. Um dos filtros disponíveis foi utilizado como base para a criação do método.

O filtro utilizado no experimento é dividido em seis painéis com estrutura de colmeia. O experimento consistiu na remoção dos grãos de carvão de duas regiões do filtro: denominada colmeia 2 e colmeia 5 (Figura 38). Ambas as regiões foram selecionadas por serem representativas e estarem na posição central. As amostras de carvão granulado foram posteriormente trituradas para melhorar a geometria da fonte. As medidas foram realizadas em um detector espectrômetro gama (Figuras 39 a 42). Uma fonte padrão de ^{125}I foi utilizada na calibração (Figura 38 a 41).

Figura 38 – À esquerda: filtro de carvão. À direita: remoção do carvão granulado da colmeia 2.

Fonte: autora da tese.

Figura 39 – Espectro gama de amostras de carvão com ^{125}I - tempo de contagem de 47210,2 segundos: Colmeia 2- carvão granulado.

Fonte: autora da tese.

Figura 40 - Espectro gama de amostras de carvão com ^{125}I - tempo de contagem de 30031,1 segundos: Colmeia 2- carvão triturado.

Fonte: autora da tese.

Figura 41 - Espectro gama de amostras de carvão com ^{125}I - tempo de contagem de 54028,3 segundos: Colmeia 5 - carvão granulado.

Fonte: autora da tese.

Figura 42 - Espectro gama de amostras de carvão com ^{125}I - tempo de contagem de 43237, 5 segundos: Colmeia 5- carvão triturado.

Fonte: autora da tese.

Os resultados do experimento são apresentados na Tabela 23 e 24.

Tabela 23 – Dados de concentração de atividade e atividade das amostras do filtro de carvão.

Amostra do filtro	Concentração de atividade (Bq.g^{-1})	Incerteza da atividade	Massa da amostra (g)	Atividade (Bq)
Colmeia 2 - carvão granulado	$1,03 \times 10^2$	2,3	1,92	$1,98 \times 10^2$
Colmeia 2- carvão triturado	$1,08 \times 10^2$	2,41	2,95	$3,17 \times 10^2$
Colmeia 5 - carvão granulado	$8,98 \times 10^1$	2	2,15	$1,93 \times 10^2$
Colmeia 5 - carvão triturado	$9,79 \times 10^1$	2,19	3,38	$3,31 \times 10^2$
Total	3,98E+02	8,9	10,4	1,04E+03

Fonte: autora da tese.

Tabela 24 – Concentração de atividade e atividade total do filtro de carvão.

Dados para determinação da concentração de atividade	Valores
Nº de colmeias	6
Altura da colmeia (cm)	20
Largura da colmeia (cm)	59,3
Profundidade da colmeia (cm)	1,5
massa da colmeia (kg)	0,25
Volume da colmeia (m^3)	1779
Massa total do filtro (kg)	1,5
Média de atividade por colmeia (Bq)	$5,19 \times 10^2$
Massa total do filtro (seis colmeias) (g)	1500
Atividade total do filtro carvão (Bq)	$3,12 \times 10^3$
Concentração de atividade do filtro (Bq.m^{-3})	1,75

Fonte: autora da tese.

É estabelecido em norma o valor de $5,6 \text{ Bq.m}^{-3}$ para nível de dispensa para rejeitos gasosos contendo ^{125}I . O filtro utilizado no experimento possui concentração de atividade abaixo do nível de isenção podendo ser liberado como lixo comum.

A durabilidade dos filtros de carvão é garantida por um ano pelo fabricante. A troca dos filtros durante as operações será realizada a cada nove meses, a fim de garantir a eficiência da retenção de iodo volatilizado. Novas medidas de atividade e concentração de atividade serão realizadas quando a linha entrar em operação e os filtros forem trocados. Após remoção da linha de produção, o filtro será armazenado também no depósito de rejeitos sendo monitorado e liberado para descarte após o decaimento.

A taxa de fixação do iodo foi determinada com base em experimentos iniciais, realizados durante a fixação de iodo no fio de prata. A taxa obtida é apresentada a seguir:

$$T_{\text{fixação}} = \frac{2,31 \text{ mCi}}{3,04 \text{ mCi}} \cdot 100$$

$$T_{\text{fixação}} = 76\%$$

Do total de ^{125}I utilizado na fixação aproximadamente 76% adere a superfície do fio de prata. Assim, aproximadamente 24% do iodo é perdido na superfície dos itens da linha de produção (frascos, papéis, etc.) e parte volatiliza e fica nos filtros de carvão.

5.4 Depósito Inicial de Rejeitos Radioativos

Determinação do Local para Armazenamento dos Rejeitos

O Art. 26 da norma CNEN 8.01 estabelece que “O armazenamento de rejeitos radioativos líquidos deve ser feito sobre bacia de contenção, bandeja, recipiente ou material absorvente com capacidade de conter ou absorver o dobro do volume do líquido presente na embalagem”. Assim, as bombonas serão colocadas no depósito inicial em caixas plásticas com capacidade para 120 L para garantir a contenção em caso de vazamento.

Os critérios utilizados para seleção do local para depósito são apresentados a seguir:

- O depósito deve garantir a proteção física dos rejeitos, com provisão de barreiras de segurança e evitar o acesso não autorizado: Sala possui controle de acesso e blindagem.

- Dispor de um sistema de monitoração de área: Monitor de área será colocado acima da porta de acesso ao depósito.
- Dispor de lava olhos na saída da sala de armazenamento.
- Situar-se em local cercado e sinalizado, com acesso restrito a pessoal autorizado: A antessala também possui controle de acesso e blindagem.
- Ter piso e paredes impermeáveis e de fácil descontaminação.
- Apresentar delimitação clara das áreas supervisionadas e controladas e, se necessário, locais reservados à monitoração e descontaminação individuais.
- Dispor de procedimentos apropriados sempre afixados em paredes, quadros e outros lugares bem visíveis para orientar as ações de resposta a emergências e dar outras instruções: serão colocados ao lado da porta de acesso.
- Permitir, a qualquer momento, acesso para inspeção visual e identificação dos volumes: A equipe de radioproteção possuirá acesso liberado.
- Dispor de meios para proteção e combate a incêndio: Extintor de incêndio será colocado ao lado da entrada do depósito.
- Ter capacidade de armazenamento adequada, de modo a minimizar riscos de acidentes durante o manuseio de rejeitos pelo tempo que se fizer necessário: o depósito atente à capacidade esperada.
- O armazenamento de rejeitos radioativos líquidos deve ser feito sobre bacia de contenção, com capacidade de conter ou absorver o dobro do volume do líquido presente na embalagem: as bombonas serão armazenadas dentro de caixas plásticas de 120 L.
- Dispor de lava-olhos para situações emergenciais.

O local selecionado para o depósito é o laboratório 50 (ANEXO A), localizado no mesmo corredor do laboratório de produção (Figura 43).

Figura 43 – À esquerda: representação tridimensional do depósito para armazenamento dos rejeitos radioativos; à direita: planta baixa do local.

Fonte: autora da tese.

Durante o armazenamento, todos os itens (embalados, filtros, bombonas, blindagens) serão cadastradas nos registros do depósito, tendo sua numeração, volume e posição devidamente identificados. A data da retirada da bombona será marcada em sua própria etiqueta. A figura 44 apresenta um modelo de etiqueta para os embalados.

Figura 44 – Modelo de etiqueta para registro dos embalados radioativos.

LABORATÓRIO DE PRODUÇÃO DE FONTES PARA RADIOTERAPIA

Dados gerais:

Nº de identificação do embalado: _____

Gerado por: _____

Data de entrada no depósito: _____

____/____/____

Características Físicas:

Massa (kg): _____

Volume (L): _____

Estado físico: _____

Conteúdo: _____

Características Radiológicas:

Radionuclídeo: _____

Atividade (Bq): _____ Medida () ou Estimada ()

Taxa de exposição (mSv/h): _____

1 metro: _____ Superfície: _____

Data da Monitoração: ____/____/____

Risco biológico/químico: _____

Observações: _____

Data estimada para atingir nível de dispensa: ____/____/____

Nome do responsável: _____

Telefone: _____

Assinatura do Supervisor de Radioproteção: _____

Data: ____/____/____

Fonte: autora da tese.

Volume Total e Taxa de Ocupação do Depósito

Os rejeitos sólidos serão armazenados no depósito inicial: uma sala com acesso restrito localizada no mesmo corredor do LPFRT. A área total da sala é de 7,5 m².

A sala possuirá nove prateleiras para armazenamento dos rejeitos sólidos e três prateleiras inferiores (sobre o piso) para armazenamento dos rejeitos líquidos. As prateleiras possuirão 300 x 30 cm e 220 x 30 cm (largura e profundidade respectivamente).

Os embalados de rejeitos sólidos serão colocados dentro de caixas (papelão ou plástica) de 25x25 cm. Cada caixa comporta em média 10 embalados (cerca de 5 meses de produção). Todas as prateleiras suspensas possuem três fileiras. A maior prateleira comporta 36 caixas (300x30 cm), a segunda menor 26 caixas (220x30 cm) e a terceira fileira 14 caixas.

Seguindo as recomendações da CNEN 8.01, as bombonas com rejeitos líquidos serão colocadas dentro de um recipiente com o dobro do volume. Esses recipientes serão armazenados nas três prateleiras inferiores. Cada recipiente possui 50 cm de largura. A maior prateleira comporta 6 recipientes, a segunda 4, e a terceira (ao lado da porta) 3 recipientes.

Usando o cenário de maior produção de fontes (cenário 3) como base, a capacidade máxima do depósito é:

- Rejeito sólido: 76 caixas contendo 760 embalados de rejeitos sólidos com aproximadamente 590 gramas e 1,15 L cada = 449 kg e 874 L.
- Rejeito líquido: 13 recipientes com 13 bombonas com 45 L de rejeito líquido: 585 L

O volume (L) máximo de armazenamento de rejeitos sólidos para cada cenário é apresentado a seguir:

Cenário 1

$$V_t = 760 \cdot 0,48l$$

$$V_t = 365litros$$

Cenário 2

$$V_t = 760 \cdot 0,74l$$

$$V_t = 565litros$$

Cenário 3

$$V_t = 760 \cdot 1,15l$$

$$V_t = 874litros$$

A taxa de ocupação anual do depósito inicial para rejeitos sólidos foi determinada nas seguintes circunstâncias (Figura 45):

- Considerado um ano de armazenamento de rejeitos (365 dias)
- Considerando 5 anos de operação da instalação (260 semanas)
- Considerando um volume máximo de ocupação de 760 embalados (874 L)
- Considerando que a cada 7 dias um embalado com 300 a 590 gramas é enviado para o depósito inicial.

Taxa de ocupação cenário 1:

$$T_o = \frac{25l \cdot 882d}{874l \cdot 365_{dias}} \cdot 100$$

$$T_o = 6,9\%$$

Taxa de ocupação cenário 2:

$$T_o = \frac{38l \cdot 938d}{874l \cdot 365_{dias}} \cdot 100$$

$$T_o = 11,3\%$$

Taxa de ocupação cenário 3:

$$T_o = \frac{57l \cdot 1001d}{874l \cdot 365_{dias}} \cdot 100$$

$$T_o = 18,7\%$$

Figura 45 – Taxa de ocupação semanal do depósito ao longo das semanas (52 e 260) de armazenamento - rejeitos sólidos.

Fonte: autora da tese.

Os dados apresentados acima indicam que o depósito possui capacidade máxima superior ao volume de rejeitos sólidos que serão armazenados ao longo das semanas de operação em todos os cenários.

A capacidade máxima do depósito para o armazenamento de rejeitos líquidos é dada multiplicando-se a quantidade máxima de bombonas que podem ser armazenadas por volume armazenado em cada bombona:

$$V_t = 13 \cdot 45l$$

$$V_t = 585 \text{ litros}$$

A taxa de ocupação anual do depósito para rejeitos líquidos foi determinada nas seguintes circunstâncias (Figura 46):

- Considerado um ano de armazenamento de rejeitos (365 dias)
- Considerando a capacidade máxima do depósito: 585 L (13 bombonas)
- Considerando o volume de $9,1 \times 10^{-3}$ L gerado semanalmente na *hot cell* 1 – cenário 1
- Considerando o volume anual: $9,1 \times 10^{-3}$ L x 52 semanas (0,47 L)

Taxa de ocupação cenário 1:

$$T_o = \frac{0,47l \cdot 3848d}{585l \cdot 365_{dias}} \cdot 100$$

$$T_o = 0,8\%$$

Taxa de ocupação cenário 2:

$$T_o = \frac{0,95l \cdot 4264d}{585l \cdot 365_{dias}} \cdot 100$$

$$T_o = 1,9\%$$

Taxa de ocupação cenário 3:

$$T_o = \frac{1,89l \cdot 4680d}{585l \cdot 365_{dias}} \cdot 100$$

$$T_o = 4,1\%$$

Figura 46 - Taxa de ocupação semanal do depósito ao longo das semanas (52 e 260) de armazenamento - rejeitos líquidos.

Fonte: autora da tese.

As taxas de ocupação apresentadas indicam que o depósito possui capacidade máxima superior ao volume de rejeitos líquidos que serão armazenados ao longo das semanas de operação em todos os cenários.

6 CONCLUSÕES

Por meio desse estudo observou-se que três tipos de rejeitos radioativos (sólidos, líquidos e gasosos) serão gerenciados nas futuras instalações do LPFRT. Cada um deles requer uma avaliação e gerenciamento próprios.

As estimativas realizadas nesse estudo tiveram por finalidade estimar parâmetros para estabelecimento do sistema de GRR da instalação. Durante a operação da instalação os embalados gerados terão suas atividades, massas e volumes mensurados e anotados nos registros do depósito, permitindo a readequação e otimização do GRR implantado, caso seja necessário.

Os rejeitos sólidos poderão ser segregados em compactáveis e não compactáveis. O volume de rejeitos foi estimado levando em consideração os espaços vazios deixados dentro do embalado. Os itens desse tipo de rejeito são pequenos tanto em volume como em massa.

As fontes seladas reprovadas nas etapas de solda e controle de qualidade serão armazenadas em castelo de chumbo e semanalmente enviadas para o depósito inicial. As fontes com atividade fora da faixa prevista para utilização poderão ser utilizadas em outras aplicações ou ser deixadas para decaimento até atingir valores que permitam sua aplicação clínica.

O percentual de reprovação de fontes na segunda solda é elevado, bem como o percentual por vazamento. O aprimoramento da linha de produção ocorrerá durante a operação da instalação. Assim, esses percentuais poderão ser reduzidos significativamente, o que terá impacto positivo na redução da atividade presente nos rejeitos.

A atividade total que estará presente nos rejeitos foi estimada seguindo recomendações da norma CNEN 8.01 de considerar que 10% da atividade inicial é absorvida pelos materiais utilizados em laboratório, e, portanto, fica no rejeito. Entretanto acredita-se, com base na experiência dos operadores, que o valor da atividade residual presente no rejeito será menor.

Para o armazenamento dos rejeitos líquidos, serão utilizadas bombonas de 60 L de capacidade localizadas abaixo de cada célula de produção. Com os volumes já estimados nesse estudo, sabe-se que no cenário com maior tempo de produção e armazenamento (Cenário 3), a cada três semanas será necessária a substituição desse tanque primário. Assim, a atividade do rejeito líquido será mensurada antes da liberação na rede de esgoto da instalação.

Os rejeitos produzidos na *hot cell* 1 possuirão menor volume, mas maior atividade quando comparados com os gerados na *hot cell* 3. Para este rejeito será necessário o armazenamento até atingir os níveis de dispensa e pode ser liberado na rede de esgoto. Para os rejeitos da *hot cell* 3, o armazenamento para decaimento dependerá do percentual de vazamento ou contaminação de sementes avaliadas na etapa de controle de qualidade. Caso o armazenamento seja necessário, o depósito inicial também possuirá capacidade suficiente.

O local selecionado para o depósito atende aos requisitos estabelecidos na norma 8.01. A taxa de ocupação estimada do depósito ao longo da operação da instalação permite concluir que o LPFRT tem capacidade para gerenciar seus próprios rejeitos durante e após o término de suas atividades, permitindo a implantação e autorização para a produção nacional de fontes para braquiterapia no IPEN.

Para o gerenciamento dos rejeitos gasosos foi criada um método para mensuração dos filtros de carvão. Outros métodos e *softwares* poderão ser usados para aprimorar o método proposto.

Durante a realização deste estudo, a instalação passou por reestruturação e adequação de alguns parâmetros norteadores. Ao término dessas adequações, novos estudos serão realizados para complementar o sistema de gerenciamento de rejeitos. Os trabalhos futuros sugeridos são:

- Avaliar possibilidade de reciclagem do rejeito que contenha ^{125}I ;
- Redução da taxa de volatilização do ^{125}I ;
- Criação de sistema informatizado para GRR da instalação.
- Criação de um sistema de Controle e Garantia de Qualidade.

REFERÊNCIAS

ABBÉ R. **The subtle power of radium.** *Med Record*. [s.l.] New York, 1904. v. 66:321

Addenda to ASME AG-1–2003 Code on Nuclear Air and Gas Treatment. American Society of Mechanical Engineers, 2004. Disponível em: <<https://www.asme.org/products/codes-standards/ag1-2003-code-nuclear-air-gas-treatment>>. Acesso em: 26 mar. 2018

ARNAL ARNAL, J. M. et al. Declassification of radioactive waste solutions of iodine (I125) from radioimmune analysis (RIA) using membrane techniques. **Desalination**, v. 129, n. 2, p. 101–105, 10 jul. 2000.

BASRAN, P. S.; BAXTER, P.; BECKHAM, W. A. Reducing radiation risks to staff for patients with permanently implanted radioactive sources requiring unrelated surgery. **Journal of Applied Clinical Medical Physics**, v. 16, n. 5, p. 159–166, set. 2015.

BLASKO, J. C. et al. Prostate Specific Antigen Based Disease Control Following Ultrasound Guided sup 125 Iodine Implantation for Stage T1/T2 Prostatic Carcinoma. **The Journal of Urology**, v. 154, n. 3, p. 1096–1099, 1 set. 1995.

CALANDRINO, R. et al. Measurement and control of the air contamination generated in a medical cyclotron facility for PET radiopharmaceuticals. **Health Physics**, v. 92, n. 5 Suppl, p. S70-77, maio 2007.

CAVALCANTI, V. **Braquiterapia: bons resultados na luta contra o câncer - Portal Educação.** Disponível em: <<https://www.portaleducacao.com.br/conteudo/artigos/educacao/braquiterapia-bons-resultados-na-luta-contra-o-cancer/1298>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

CHUGH, A. **Moonbow - A 5-Stage Air Purifier with UV-Light Filter & Refreshing Energizers** *Review Center India*, 15 dez. 2015. Disponível em: <<http://www.reviewcenter.in/3497/moonbow-air-purifier-a-5-stage-purifier-with-uv-light-filter/>>. Acesso em: 26 mar. 2018

CNEN. Norma CNEN – NN-5.01. Transporte de materiais radioativos. 1988.

CNEN. NORMA CNEN NN 8.01. GERÊNCIA DE REJEITOS RADIOATIVOS DE BAIXO E MÉDIO NÍVEIS DE RADIAÇÃO. 2014 a.

CNEN. Norma CNEN NN 3.01. DIRETRIZES BÁSICAS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA. 2014 b.

CNEN. **Glossário de Segurança Nuclear** Diretoria de Radioproteção e Segurança Nuclear Divisão de Normas – DINOR, 2015. Disponível em: <<http://appasp.cnem.gov.br/seguranca/normas/pdf/glossario.pdf>>. Acesso em: 4 fev. 2019

COFFEY, D. E. **Abstract**. . In: WASTE MANAGEMENT SYMPOSIA 2002 CONFERENCE. Tucson, AZ: Oak Ridge National Laboratory, 2002

COSTA, O. et al. **Brazilian Demand for Iodine-125 Seeds in Cancer Treatment after a Decade of Medical Procedures**. Conference: International Nuclear Atlantic Conference (INAC), 2017, Belo Horizonte.

COSTA, O. L. **Estudo e desenvolvimento de uma nova metodologia de produção de iodo-125 a partir de xenônio-124 pelo método de ativação neutrônica**. Tese (Doutorado)—São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2015.

DICKINSON, P. D. et al. Five-year outcomes after iodine-125 seed brachytherapy for low-risk prostate cancer at three cancer centres in the UK. **BJU International**, 2014.

ENVIRONMENT AGENCY. **Radioactive Substances Regulation – Environmental Principles v2**, abr. 2010. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/296388/geh_o0709bqsb-e-e.pdf>

FEHER, A. **Estudo e desenvolvimento de um sistema de soldagem a laser para produção de fontes seladas de iodo-125 para aplicação em braquiterapia**. Tese (Doutorado)—São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2014.

IAEA. **Management of small quantities of radioactive waste**, 1998. Disponível em: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1041_prn.pdf>

IAEA. Handling and Processing of Radioactive Waste from Nuclear Applications. 2001.

IAEA. **Selection of efficient options for processing and storage of radioactive waste in countries with small amounts of waste generation**, 2003. Disponível em: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1371_web.pdf>

IAEA. **The Use and Management of Sealed Radioactive Sources**, 2007. Disponível em: <https://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC56/GC56InfDocuments/English/gc56inf-3-att6_en.pdf>

IAEA. **Classification of Radioactive Waste**, 2009a. Disponível em: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1419_web.pdf>

IAEA. Policies and Strategies for Radioactive Waste Management. 2009b.

IAEA. **The Principles of Radioactive Waste Management**, 2011. Disponível em: <<http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/rwmp-3/INTRODUCTION.pdf>>

IAEA. Predisposal Management of Radioactive Waste from Nuclear Fuel Cycle Facilities. 2016.

ICRP. **The Handling, Storage, Use and Disposal of Unsealed Radionuclides in Hospitals and Medical Research Establishments**. Disponível em: <<http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2025>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

INOUE, H. et al. Radioactive iodine waste treatment using electrodialysis with an anion exchange paper membrane. **Applied Radiation and Isotopes: Including Data, Instrumentation and Methods for Use in Agriculture, Industry and Medicine**, v. 61, n. 6, p. 1189–1193, dez. 2004.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. **Sementes de Iodo-125 em 2017** Diretoria de Radiofarmácia - DIRF, , 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER. **Instituto Nacional de Câncer - Estimativa 2018-2019**. Disponível em: <<http://www1.inca.gov.br/estimativa/2018/>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER. **IARC Biennial Report 2016-2017**. [s.l: s.n.].

ISO. ISO – 9978. Radiation protection – sealed radioactive sources – leakage test methods. . 1992.

Jl, Y.-Y. et al. Radioactive Analysis of a Spent HEPA Filter Using the Distribution Characteristics of the Captured Radionuclide. **Journal of Nuclear Science and Technology**, v. 45, n. sup5, p. 439–442, jun. 2008.

KAPLAN, I. **Física Nuclear**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978. v. Vol. 2

KJELLGREN, OLLE. The Development Of Gynecological Radiotherapy/ Oncology In Sweden. 1995.

MEIGOONI, A. S. **Dosimetric characterization of low energy brachytherapy sources: measurements**. Proceedings of the 22nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (Cat. No.00CH37143). **Anais...** In: PROCEEDINGS OF THE 22ND ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE IEEE ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY SOCIETY (CAT. NO.00CH37143). 2000

MÖLLER, T. R. et al. Radiotherapy and cancer care in Sweden. **Acta Oncologica (Stockholm, Sweden)**, v. 42, n. 5–6, p. 366–375, 2003.

MOULD, R. F. Pierre Curie, 1859–1906. **Current Oncology**, v. 14, n. 2, p. 74–82, abr. 2007a.

MOULD, R. F. Priority for radium therapy of benign conditions and cancer. **Current Oncology**, v. 14, n. 3, p. 118–122, jun. 2007b.

MOURA, J. A. **Estudo e desenvolvimento de metodologia para controle de qualidade em processo de produção de fontes seladas de Iodo-125 para aplicação em braquiterapia**. DISSERTAÇÃO MESTRADO—Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2009.

MOURA, J. A. et al. Tubing decontamination during the leak test of iodine-125 seeds. **Nukleonika - Technical note**, v. 55 (3), p. 409–413, 2012.

MOURA, J. A. et al. Leakage test methodology development in iodine-125 seeds production. **Elsevier – Progress in Nuclear Energy**, v. 62 (2013), p. 79–82, 2013.

MOURA, J. A. **Desenvolvimento e construção de sistema automatizado para controle de qualidade na produção de sementes de iodo-125**. Tese (Doutorado)—Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2015.

NCPHS. **Nuclide Safety Data Sheet Iodine-125**, 2000. Disponível em: <<http://www.hpschapters.org/northcarolina/NSDS/125IPDF.pdf>>

OGUNSEITAN, O.; ROBBINS, P. **Green Health: An A-to-Z Guide - Oladele Ogunseitan - Google Books**. EUA: [s.n.].

ONR. **Basic principles of radioactive waste management - An introduction to the management of higher activity radioactive waste on nuclear licensed sites** Joint guidance from the Office for Nuclear Regulation, the Environment Agency, the Scottish Environment Protection Agency, and Natural Resources Wales, fev. 2015. Disponível em: <<http://www.onr.org.uk/wastemanage/basic-principles.pdf>>

PODGORSK E.B. **Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students** INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2005. Disponível em: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1196_web.pdf>

RANA, D. et al. Radioactive decontamination of water by membrane processes — A review. **Desalination**, Special Issue: Radioactive Decontamination of Water. v. 321, p. 77–92, 15 jul. 2013.

ROSTELATO, M. E. C. M. **Estudo e desenvolvimento de uma metodologia para confecção de sementes de Iodo-125 para aplicação em braquiterapia**. Tese (Doutorado)—São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares., 2005.

ROSTELATO, M. E. C. M. et al. Development and production of radioactive sources used for cancer treatment in Brazil. **Nukleonika - Technical note**, v. (Supplement 2):S99-S103, n. 53, 2008.

SALVAJOLI, J.V (ÚLTIMO); FARIA, S.L. **Radioterapia em Oncologia**. [s.l.] Editora Médica-Científica, 1998. v. 2.

SANCHO, M. et al. Ultrafiltration and reverse osmosis performance in the treatment of radioimmunoassay liquid wastes. **Desalination**, v. 201, n. 1, p. 207–215, 30 nov. 2006.

SCHWEIGER, L. An effective technique for the storage of short lived radioactive gaseous waste. **Applied Radiation and Isotopes: Including Data, Instrumentation and Methods for Use in Agriculture, Industry and Medicine**, v. 69, n. 9, p. 1185–1188, set. 2011.

SOUZA, C. D et al. **Apresentação de uma metodologia de otimização para confecção de fontes utilizadas em braquiterapia: comparação de processos de fixação**. In: VI CONFIAM-CONGRESSO DE FÍSICA APLICADA À MEDICINA. Botucatu - SP, 2010.

SOUZA, C. D. et al. Preliminary proposal for radioactive liquid waste management in a brachytherapy sources production laborator. **Nutech - Annals of Nutec**, Krakóvia 2011.

SOUZA, C. D et al. Analysis of the necessary radioprotection procedures in manufacture of iodine-125 sources used in brachytherapy: A preliminary study. **Elsevier – Progress in Nuclear Energy**, v. 53 (2011), p. 66–72, 2011.

SOUZA, C. D. **Comparação entre métodos de fixação do iodo radioativo em substrato de prata para confecção de fontes utilizadas em braquiterapia**. Dissertação (Mestrado)—São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo., 2012.

SOUZA, C. D. **Parâmetros para produção de confecção de fontes de iodo-125 utilizadas em braquiterapia**. Tese (Doutorado)—São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2016.

SOUZA, D. C. B. et al. ASSESSMENT OF THE RISKS ASSOCIATED WITH IODINE-125 HANDLING PRODUCTION SOURCES FOR BRACHYTHERAPY. **São Paulo**, p. 12, 2015.

Tedlar Sampling Bags with Combination Valve from Cole-Parmer India. Disponível em: <<https://www.coleparmer.in/p/tedlar-sampling-bags-with-combination-valve/45621>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

UNIVERSITY OF MICHIGAN. **IODINE - 125 [I-125]**, [s.d.]. Disponível em: <<https://ehs.umich.edu/wp-content/uploads/sites/37/2016/04/Iodine-125.pdf>>

VICENTE. R. **Gestão de rejeitos radioativos na indústria, medicina e pesquisa – introdução**. Apresentação power point apresentado em Disciplina TNA5787. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2014.

WHITMORE, W. F. et al. Implantation of 125I in Prostatic Cancer. **Surgical Clinics of North America**, Surgical Oncology. v. 54, n. 4, p. 887–895, 1 ago. 1974.

ZEITUNI, C. **Dosimetria de fontes de Iodo-125 aplicadas braquiterapia**. Tese (Doutorado)—Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008.

ZHANG, W. et al. Brachytherapy with Iodine-125 seeds strand for treatment of main portal vein tumor thrombi: an experimental study in a rabbit model. **American Journal of Cancer Research**, v. 6, n. 3, p. 587–599, 15 fev. 2016.

APÊNDICE A- Gerenciamento dos Rejeitos Radioativos sólidos gerados na produção das fontes de Iodo-125

Fonte: (IAEA, 2005).

**APÊNDICE B – Fluxograma da produção de fontes de iodo-
125 e etapas geradoras de rejeitos radioativos**

ANEXO A – PLANTA BAIXA LPFRT
(Laboratórios 48-50)

CENTRO DE TECNOLOGIA DAS RADIAÇÕES SÃO PAULO	
POSIÇÃO	NOME	DATA	TÍTULO GESTÃO DE REJEITOS	
DES.	FRANCISCO E. SPRENGER	24/04/2018		
CLIENTE	DAIANE CRISTINI B. DE SOUZA		CONJUNTO LABORATÓRIOS DE PRODUÇÃO DE SEMENTES DE IODO 125	
CARIMBO RESP.				
ESCALA 1:125	DESENHO: CTR-1804/0000.01-I-4.00			DATA REV. —
				FOLHA 01/01

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada
à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela
Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do
Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.**