



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

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO ALGORÍTMICO DE SISTEMA
PARA A CARACTERIZAÇÃO DE REJEITOS RADIOATIVOS**

ANA PAULA GIMENES TESSARO

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

Orientador:
Prof. Dr. Roberto Vicente

São Paulo
2021

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

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO ALGORÍTMICO DE
SISTEMA PARA A CARACTERIZAÇÃO DE REJEITOS
RADIOATIVOS**

Versão Corrigida
Versão Original disponível no IPEN

ANA PAULA GIMENES TESSARO

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

Orientador:
Prof. Dr. Roberto Vicente

São Paulo

2021

Fonte de Financiamento: CNPq

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

Como citar:

TESSARO, A. P. G. **DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO ALGORÍTMICO DE SISTEMA PARA A CARACTERIZAÇÃO DE REJEITOS RADIOATIVOS**. 2021. 234 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

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

Tessaro, Ana Paula Gimenes
DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO ALGORÍTMICO DE SISTEMA PARA A
CARACTERIZAÇÃO DE REJEITOS RADIOATIVOS / Ana Paula Gimenes
Tessaro; orientador Roberto Vicente. -- São Paulo, 2021.
234 p.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia
Nuclear (Aplicações) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e
Nucleares. Universidade de São Paulo. 2021.

1. Rejeitos Radioativos. 2. sistema de caracterização. 3.
gerenciamento de informações. 4. inventário radioisotópico. 5.
caracterização de rejeitos radioativos. I. Vicente, Roberto,
orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Ana Paula Gimenes Tessaro

Título: Desenvolvimento de um modelo algorítmico de sistema para a caracterização de rejeitos radioativos.

Tese apresentada ao Programa de Pós – Graduação em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutora em Ciências.

Data: 16 / 08 / 2021

Banca Examinadora

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____ **Julgamento:** _____

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____ **Julgamento:** _____

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____ **Julgamento:** _____

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____ **Julgamento:** _____

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq pelo fomento disponibilizado para a idealização da tese que aqui se apresenta.

Agradeço ao meu orientador, Roberto Vicente, que desde a iniciação científica contribui para a minha formação acadêmica, científica, e diretamente, como solucionadora de problemas, apta a raciocinar de forma crítica e lógica para alcançar os melhores resultados.

Agradeço aos alunos da Gerência de Rejeitos Radioativos do IPEN, sem os quais não seria possível testar e trazer melhorias a tese aqui apresentada, em especial:

Júlio de Oliveira por apoiar o desenvolvimento do trabalho, agregando valor com as discussões sobre lógica de programação;

Victor Keichi por apoiar com a interpolação de dados dada a grande volumetria e ser participativo nas discussões sobre lógica de programação;

Renato Cara por se apoiar a programação do front-end para que possamos implantar um piloto do sistema na Gerência de rejeitos radioativos do IPEN;

Natalie Rolindo por todo apoio na revisão de navegação de telas, no processo de revisão da tese até a etapa final, participação em artigos publicados, congressos e parceria pessoal;

Leandro Goulart pelo apoio na elaboração dos artigos científicos publicados durante o doutorado, assim como as discussões que agregaram valor aos testes realizados no trabalho.

Aos professores que participaram das etapas de qualificação e seminário de área, que possibilitaram um melhor direcionamento da tese.

Agradeço imensamente a outras pessoas que, direta ou indiretamente, apoiaram a idealização da tese, com conversas informais, críticas, sugestões e apoio pessoal.

Agradeço a CPG, em especial, as secretárias da pós-graduação, que sempre estão prontas para nos ajudar com documentos, esclarecimentos e organização.

Finalmente, agradeço ao IPEN por possibilitar esses quase 10 anos de parceria na ciência.

Vamos a mais!

“Try not. Do or do not. There is no try.”

Star Wars - Episode V

Yoda

“Adaptar-se é estar recluso a uma posição específica; é conformar-se, submeter-se, por isso, ao ter de buscar tudo que precisamos, romper a acomodação e enfrentar a realidade passa a ser uma questão de necessidade, não de liberdade. Que ferramenta temos? Não é a racionalidade, pois não basta pensar para que as coisas aconteçam. Nossa interferência no mundo se dá pela ação transformadora consciente, ou seja, uma capacidade de agir intencionalmente em busca de uma mudança no ambiente que nos favoreça.”

Trecho adaptado da obra “A escola e o conhecimento”

Mário Sérgio Cortella

RESUMO

TESSARO, A.P.G. **Desenvolvimento de um modelo algorítmico de sistema para a caracterização de rejeitos radioativos**. 2021. 234 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares –IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

Para garantir a segurança dos rejeitos radioativos, é necessário gerenciá-los, cumprindo os requisitos estabelecidos pelas autoridades reguladoras. Para determinar as etapas do gerenciamento, é necessário executar a caracterização que pode ser primária ou final. A caracterização primária é usada para obter as propriedades físicas, químicas e radiológicas e estabelecer os níveis de proteção contra radiação necessários. Já a caracterização final, visa atender aos objetivos de segurança estabelecidos pelo regulador para a deposição final ou descarte de rejeitos. A análise de segurança dos repositórios exige que o inventário de radionuclídeos do material seja conhecido, garantindo a segurança da radiação a longo prazo. Com o objetivo de integrar os principais métodos de caracterização, iniciou-se o processo de desenvolvimento de um software para o gerenciamento dessas etapas, capaz de lidar com o grande volume e atividades de rejeitos gerados, a diversidade de tipos e também a garantia da qualidade das informações exigidas pelas autoridades reguladoras. A idealização de um sistema que preve a estruturação de um banco de dados, análise dos dados de entrada necessários, dados de saída esperados, integração dos métodos de caracterização, formulação dos algoritmos desses métodos, avaliação e definição dos níveis de permissão de acesso, tem como objetivo garantir a qualidade das informações geradas e especificações técnicas da aplicação. O trabalho resulta em um conjunto de fluxogramas com os métodos de caracterização usados no processo de gerenciamento de rejeitos radioativos, esboços de algoritmos, visão e descrição da interface do usuário (wireframes), relatórios finais gerados pela aplicação e especificações funcionais para implementação. Este trabalho permitiu obter parte do material necessário para o desenvolvimento do algoritmo e documentação do modelo com as especificações funcionais da aplicação. Espera-se que o produto final também sirva de referência para a aplicação em diferentes segmentos, como por exemplo, na indústria de petróleo.

Palavras-chave: Rejeitos Radioativos, Sistema de Caracterização, Gestão da Informação, Caracterização de Rejeitos, Métodos de Caracterização, Inventário de Rejeitos, Repositório Final.

ABSTRACT

TESSARO, A.P.G. **Desenvolvimento de um modelo algorítmico de sistema para a caracterização de rejeitos radioativos**. 2021. 234 p. Thesis (PhD in Nuclear Technology – Applications) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo (in Portuguese).

To ensure the safety of radioactive waste, it is necessary to manage this waste, complying with the requirements established by regulatory authorities, and for determining the steps of radioactive waste management, it is necessary to perform the characterization that can be primary or final. The primary characterization is used to obtain the physical, chemical, and radiological properties of the wastes and to establish the radiation protection levels needed. The final characterization is intended to meet the safety objectives set by the regulator for the transportation and disposal of the wastes in a final repository. The safety analysis of repositories requires that the inventory of radionuclides of the disposed of material is known, ensuring radiation safety in the long term. With the objective of integrating the primary characterization methods, the process of developing an application for the management of these steps was started, which is capable of to deal with the large volume and activities of wastes generated, the diversity of wastes types and to guarantee the quality of the information required by the regulatory authorities. The idealization of a system composed of a database structure, analysis of the necessary input data and expected output data, integration of the characterization methods and formulation of the algorithms of these methods, evaluation and definition of levels of access permission, has as objective to guarantee the quality of the generated information and technical specifications of the application software. The work results in a set of flowcharts with the characterization methods used in the radioactive waste management process, algorithm drafts, vision and description of the user interface (wireframes), final reports generated by the application, and functional specifications for implementation. This work allowed us to obtain part of the necessary material for the development of the model algorithm and documentation with the functional specifications of the application software. In the end, with the model finalized and complete, it will be possible to implement an application software that guarantees the quality of the information generated in the characterization step, making it possible to comply with the regulations for final deposition. It is expected that the final product will also serve as a reference for the application in different segments, for example, in the oil industry.

Key- Words: Radioactive Waste, Characterization System, Management Information, Waste characterization, Characterization Methods, Waste Inventory, Final Repository.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação nacional e internacional de rejeitos radioativos	31
Tabela 2 - Propriedade dos rejeitos radioativos avaliadas no gerenciamento	36
Tabela 3 - Itens que devem compor a documentação de sistemas ou aplicações	50
Tabela 4 - Relação entre RDM's e RC's.....	72
Tabela 5 - Inventário radioativo do rejeito líquido de eluição da coluna Biorex	78
Tabela 6 - Radionuclídeos relevantes em rejeitos provenientes de atividades de mineração e aceleradores.....	79
Tabela 7 - Radionuclídeos relevantes em rejeitos provenientes da produção de radioisótopos e fontes seladas (continua).....	79
Tabela 8 - Radionuclídeos relevantes em rejeitos provenientes da operação de reatores (continua).....	80
Tabela 9 - Identificação de atores do sistema	88
Tabela 10 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC01)	102
Tabela 11 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC02)	102
Tabela 12 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC03)	103
Tabela 13 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC04)	103
Tabela 14 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC05)	104
Tabela 15 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC06)	104
Tabela 16 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC07)	105
Tabela 17 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC08)	105
Tabela 18 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC09)	106
Tabela 19 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC10)	107
Tabela 20 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC11)	108
Tabela 21 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC12)	109
Tabela 22 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC13)	110
Tabela 23 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC14)	111
Tabela 24 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC15)	112
Tabela 25 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC16)	113
Tabela 26 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC17)	114
Tabela 27 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC18)	115
Tabela 28 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC19)	116
Tabela 29 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC20)	117

Tabela 30 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC21)	118
Tabela 31 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC22)	119
Tabela 32 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC23)	120
Tabela 33 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC24)	121
Tabela 34 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC25)	122
Tabela 35 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC26)	123
Tabela 36 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC27)	124
Tabela 37 – Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC28) (continua)	125
Tabela 38 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC29)	128
Tabela 39 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC29)	129
Tabela 40 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC31)	130
Tabela 41 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC32)	131
Tabela 42 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC33)	132
Tabela 43 - Dados de entrada caso 1	141
Tabela 44 – Resultados esperados caso 1	141
Tabela 45 - Resultados obtidos caso 1	141
Tabela 46 - Dados de entrada caso 2	142
Tabela 47 - Resultados esperados caso 2	143
Tabela 48 - Resultados obtidos caso 2	143
Tabela 49 - Dados de entrada caso 3	144
Tabela 50 - Resultados esperados caso 3	144
Tabela 51 - Resultados obtidos caso 3	144
Tabela 52 - Dados de entrada caso 4	145
Tabela 53 - Resultados esperados caso 4	145
Tabela 54 - Resultados obtidos caso 4	145
Tabela 55 - Dados de entrada caso 5	146
Tabela 56 - Resultados esperados caso 5	147
Tabela 57 - Resultados obtidos caso 5	147
Tabela 58 - Dados de entrada 1 caso 6	148
Tabela 59 - Dados de entrada 2 caso 6	149
Tabela 60 - Resultados esperados dados de entrada 1 caso 6	149
Tabela 61 - Resultados esperados dados de entrada 2 caso 6	149
Tabela 62 - Cálculo dos valores totais, sendo volume a + volume b= total do embalado	150

Tabela 63 - Resultados obtidos dados de entrada 1 caso 6.....	150
Tabela 64 - Resultados obtidos dados de entrada 2 caso 6.....	150
Tabela 65 - Cálculo dos valores totais, sendo volume a + volume b= total do embalado	150
Tabela 66 - Dados de entrada caso 7 para Co-60.....	151
Tabela 67 - Dados de entrada caso 7 para Cs- 137.....	151
Tabela 68 - Dados de entrada caso 7 para Fe-55.....	152
Tabela 69 - Dados de entrada caso 7 para Ni-59.....	152
Tabela 70 - Dados de entrada caso7 para Ni- 63.....	152
Tabela 71 - Dados de entrada caso7 para Sr-90.....	153
Tabela 72 - Dados de entrada caso7 para Ag- 108M.....	153
Tabela 73 - Dados de entrada caso 7 para U-234.....	153
Tabela 74 - Dados de entrada caso 7 para U-238.....	154
Tabela 75 - Dados de entrada caso 7 para Pu- 238.....	154
Tabela 76 - Dados de entrada caso 7 para Am- 241.....	154
Tabela 77 - Dados de entrada caso 7 para Pu- 241.....	155
Tabela 78 - Resultados esperados de fatores de escala.....	155
Tabela 79 -Resultados obtidos de fatores de escala.....	156
Tabela 80 - Resultados obtidos caso 8 para cadeia de Pu-238.....	157
Tabela 81 - Informações e suas respectivas aplicações no sistema RaWSys (continua)...	158

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gerenciamento de rejeitos radioativos.....	34
Figura 2 - Gerenciamento das etapas e suas respectivas ações	35
Figura 3 - Gestão de rejeitos radioativos líquidos	40
Figura 4 - Gestão de rejeitos radioativos sólidos.....	40
Figura 5 - Hierarquia de informações	43
Figura 6 - Notação de elementos utilizados na modelagem C4.....	52
Figura 7 - Método radioquímico.....	59
Figura 8 - Fluxograma da determinação sequencial dos isótopos de U, Np, Pu, Am, Cm e Sr-90 e exemplo de dados que serão armazenados no sistema.....	60
Figura 9 - Curvas para build-up do concreto	63
Figura 10 - Curvas para build-up do ferro	64
Figura 11 - Curvas para build-up do chumbo	64
Figura 12 - Curvas para build-up da água	65
Figura 13 - Geometria puntiforme	66
Figura 14 - Geometria placa infinita (cúbica).....	67
Figura 15 - Geometria cilíndrica.....	68
Figura 16 - Método de point kernel	69
Figura 17 - Método de fatores de escala	72
Figura 18 - Método de função de correlação	74
Figura 19 - Etiquetas identificadoras de fontes seladas.....	75
Figura 20 – Diagrama de produção de Mo-99.....	77
Figura 21 - Ajuste polinomial para fatores de build up com comportamento esperado.....	81
Figura 22 - Ajuste polinomial para curvas com comportamento anômalo.....	82
Figura 23 - Diagrama de sequência RaWSys (ampliação em 150% para leitura).....	87
Figura 24 - Diagrama de boas práticas de RNF's	100
Figura 25 - Agente fiscalizador	100
Figura 26 - Gerente da instalação	101
Figura 27 - Operador da instalação.....	101
Figura 28 - Visão lógica- interfaces do sistema.....	133
Figura 29 - Visão lógica- restrição de acesso WEB por ator.....	133
Figura 30 - Visão lógica -plataforma MOBILE	134

Figura 31 – Visão lógica, aplicação Web	135
Figura 32 – Visão lógica, módulo de manutenção de informações de rejeitos	136
Figura 33 – Visão lógica, módulo de caracterização de rejeitos	137
Figura 34 – Visão lógica do módulo de armazenamento e consulta de bibliografia.....	138
Figura 35 – Visão lógica do módulo de geração, validação e consulta de relatórios	139
Figura 36 - Tela de login para aplicação Web	160
Figura 37 - Tela de segunda autenticação de login para aplicação Web	161
Figura 38 - Tela de cadastro para aplicação Web	161
Figura 39 - Tela de menu de tarefas para aplicação Web	162
Figura 40 - Tela de aceite de registro de usuário para aplicação Web	162
Figura 41 - Tela de consulta de cadastro de usuário para aplicação Web	163
Figura 42 - Tela de cadastro de instalação para aplicação Web	163
Figura 43 - Tela de consulta de cadastro de instalação para aplicação Web	164
Figura 44 - Tela de aceite de novos métodos de caracterização para aplicação Web	164
Figura 45 - Tela de verificação e validação de métodos para aplicação Web	165
Figura 46 - Tela de pedido de verificação de métodos para aplicação Web	165
Figura 47 - Tela de rotina de gerenciamento de rejeitos para aplicação Web	166
Figura 48 - Tela de cadastro de rejeito para aplicação Web	166
Figura 49 -Tela de exibição e validação de etiqueta para aplicação Web	167
Figura 50 - Tela de cadastro de amostra para aplicação Web	167
Figura 51 - Tela de exibição e validação de etiqueta de amostra para aplicação Web.....	168
Figura 52 - Tela de consulta de rejeito para aplicação Web.....	168
Figura 53 - Tela de para consulta de instalações cadastradas aplicação Web	169
Figura 54 - Tela de fluxo de caracterização para aplicação Web	169
Figura 55 -Tela de fluxo de caracterização após localização de ID, para aplicação Web .	170
Figura 56 - Tela de fluxo de caracterização- método radiométrico- para aplicação Web .	170
Figura 57 - Tela de fluxo de caracterização- método radioquímico- para aplicação Web	171
Figura 58 - Tela de fluxo de caracterização- método dose- para- atividade- para aplicação Web.....	171
Figura 59 - Tela de fluxo de caracterização- método modelagem da instalação- para aplicação Web.....	172
Figura 60 - Tela de fluxo de caracterização- método modelagem de instalação, busca de materiais- para aplicação Web	172

Figura 61- Tela de fluxo de caracterização- método gerador fornece a informação- para aplicação Web.....	173
Figura 62- Tela de fluxo de caracterização- escolha de FE ou FC- para aplicação Web .	173
Figura 63- Tela de fluxo de caracterização- novo cálculo de FE ou FC- para aplicação Web	174
Figura 64- Tela de fluxo de caracterização- atualização de dados para cálculo de FE ou FC- para aplicação Web	174
Figura 65- Tela de fluxo de caracterização- aplicação de FE existente- para aplicação Web	175
Figura 66- Tela de fluxo de caracterização- aplicação de FC existente- para aplicação Web	175
Figura 67- Busca de relatório, aplicação Web.....	176
Figura 68- Seleção/ combinação de itens para gerar relatório, aplicação Web	176
Figura 69- Exibição de relatório, aplicação Web	177
Figura 70- Avaliação de relatório, aplicação Web	177
Figura 71- Interface da aplicação mobile. A) Tela de login. B) Tela de abertura de escaneamento de etiqueta.....	178
Figura 72: Interface da aplicação mobile. C) Tela de câmera para escaneamento de etiqueta. D) Tela com etiqueta de confirmação e dados após escaneamento.....	179
Figura 73: Interface da aplicação mobile. E) Tela para inserção de informações do detector utilizado para medir taxa de dose. F) Tela para inserção de dados de taxa de dose medida em duas distâncias.	180
Figura 74- Modelo de relatório- página de informações gerais.....	181
Figura 75- Modelo de relatório- página de informações de amostragem.....	182
Figura 76- Modelo de relatório- página de dados de caracterização	183
Figura 77- Modelo de relatório- relatório final com exibição de etiqueta.....	184
Figura 78- Modelo de relatório- página de detalhamento de inventário	185
Figura 79- Etiqueta identificadora para embalados de rejeito radioativo.....	186

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 JUSTIFICATIVA	19
3 ORIGINALIDADE	20
4 OBJETIVOS	21
4.1 Objetivos específicos	21
5. REVISÃO DA LITERATURA	22
5.1 Legislação vigente e recomendações	22
5.2 Classificação dos rejeitos	29
5.3. Gerenciamento de rejeitos radioativos	32
5.3.1 Caracterização de rejeitos radioativos	35
5.3.2 Tratamento	37
5.3.4 Armazenamento, dispensa e deposição	38
5.4 Esforços mundiais para manutenção da informação	41
6 MÉTODOS	45
6.1 Elicitação de requisitos	46
6.2 Pseudocódigo	48
6.3 Documentação	49
6.4 Arquitetura do sistema	51
6.5 Teste de funcionalidade	52
6.6 Prototipação	53
7 RESULTADOS	55
7.1 Métodos de caracterização	55
7.1.1 Radioquímico	58
7.1.2 Radiometria: dose para atividade (<i>dose-to-activity</i>)	61
7.1.3 Fator de escala e função de correlação	70
7.1.4 Gerador fornece as informações	75
7.1.5 Modelagem da instalação	76
7.2 Catálogo de radionuclídeos relevantes no gerenciamento de rejeitos radioativos	78
7.3 Ajuste Polinomial	81
7.4 Equação de Bateman	82
8. ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA	84
1. INTRODUÇÃO	84
2. OBJETIVOS DO PRODUTO	84

2.1 Objetivos específicos do produto	84
3. ESTADO DA ARTE/ SITUAÇÃO ATUAL/ DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	85
4. ESCOPO DO PRODUTO E DELIMITAÇÃO	86
4.1 Módulos propostos	86
5. ORIENTAÇÃO DA ESTRUTURA DE MÓDULOS	87
6. ATORES DO SISTEMA	88
7. REQUISITOS FUNCIONAIS (RF)	89
8. REQUISITOS NÃO FUNCIONAIS	99
9. CASOS DE USOS	100
10. VISÃO LÓGICA DO SISTEMA	132
11. TESTES UNITÁRIOS	140
11.1 Caso de teste 1	140
11.2 Caso de teste 2	142
11.3 Caso de teste 3	143
11.4 Caso de teste 4	144
11.5 Caso de teste 5	146
11.6 Caso de teste 6	147
11.7 Caso de teste 7	151
11.8 Caso de teste 8	156
12. PROTOTIPAÇÃO DE TELAS PARA AS APLICAÇÕES WEB, MOBILE E RELATÓRIOS	158
9. CONCLUSÃO	187
REFERÊNCIAS	188
APÊNDICE A - (CD COM ALGORITIMOS)	196
APÊNDICE B - CASOS DE TESTE	197
CASO DE TESTE 1- FONTE PUNTIFORME	198
CASO DE TESTE 2- FONTE DE IRIDIO APROXIMAÇÃO CILINDRICA	201
CASO DE TESTE 3- FONTE CILINDRICA DE IRIDIO	206
CASO DE TESTE 4- FONTE CUBICA	211
APÊNDICE C- RELATÓRIOS	230

1 INTRODUÇÃO

Embora alguns países tenham o programa de gerenciamento de rejeitos radioativos consolidado, em outros países o processo ainda está em fase de desenvolvimento ou de melhoria, com diferentes necessidades de implantação, exigindo estudos e elaboração de planos específicos.

Os padrões de segurança da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) requerem que o conteúdo radioativo seja conhecido, possibilitando classificar os rejeitos, definir o tipo de coleta e transporte, tratamento, armazenamento, critérios de aceitação na deposição, estabelecimento dos planos de segurança para o manuseio dos rejeitos durante as fases operacionais e após o encerramento da atividade dos repositórios (IAEA, 2003; CNEN, 2014 a; CNEN, 2014 b, CNEN, 2014 c).

O conjunto dessas atividades é denominado gerenciamento de rejeitos radioativos (GRR) e tem como objetivo reduzir os custos e também reduzir as doses operacionais durante as etapas de manuseio destes rejeitos. Cabe à Gerência de Rejeitos zelar por esses materiais enquanto constituírem fonte potencial de perigo (CNEN, 2014 a; CUMO, 2010).

Tratando das análises de segurança de repositórios finais, é primordial que se tenha conhecimento quanto ao inventário radioisotópico dos rejeitos radioativos para que seja possível garantir o nível adequado de segurança radiológica em longo prazo. Por isso, uma das etapas mais importantes do gerenciamento de rejeitos radioativos é a caracterização. Esta é feita através da obtenção do conjunto das propriedades físicas, químicas e radiológicas do rejeito.

A caracterização consiste de duas fases, chamadas de caracterização primária e caracterização do produto final. Na caracterização primária o objetivo é avaliar o rejeito “in natura” e então obter o conjunto de características necessárias para estabelecer o inventário radioisotópico e qual o melhor método de tratamento para o rejeito radioativo. Após o tratamento e imobilização deste material, seguindo os requisitos de órgãos reguladores e seus padrões de boas práticas, é realizada a caracterização final para que se possa confirmar que o material atende aos critérios para ser aceito no repositório (CNEN, 2002).

Com a participação no programa de construção do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB) e do Repositório Nacional de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio

Níveis de Radiação (RBMN), com o objetivo de integrar os principais métodos de caracterização, iniciou-se o desenvolvimento de um sistema informatizado para o gerenciamento da etapa de caracterização, capaz de lidar com o grande volume e atividades de rejeitos gerados, a diversidade de tipos de rejeitos e garantir a qualidade das informações exigidas pelas autoridades reguladoras.

A contribuição que um sistema informatizado para a caracterização de rejeitos radioativos pode trazer ao processo de gerenciamento, considerando uma base consolidada de informações é: redução de trabalho repetitivo, confiabilidade de dados, controle de acesso a informações, rastreabilidade, manutenção de informações de longo prazo e identificação de responsabilidades.

A idealização de um sistema composto por uma estrutura de banco de dados, análise dos dados de entrada necessários e dados de saída esperados, integração dos métodos de caracterização e formulação dos algoritmos desses métodos, avaliação e definição de níveis de permissão de acesso terá como objetivo garantir a qualidade das informações geradas e as especificações técnicas do sistema (AGUILAR, 2011; SCHACH, 2010; BIRREL e OULD, 1985; SOMMERVILLE, 1997).

O trabalho propõe a investigação e documentação dos métodos de caracterização utilizados no processo de gerenciamento de rejeitos radioativos e a formulação da documentação do sistema.

Com a documentação completa, espera-se que seja possível, no futuro, implementar um sistema que garanta a qualidade da informação gerada no passo de caracterização, possibilitando o cumprimento das normas para a deposição final, e que o produto final também sirva de referência para a aplicação em diferentes segmentos industriais, como por exemplo, na indústria do petróleo.

2 JUSTIFICATIVA

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) publicou em setembro de 2002 a norma CNEN-NN-6.09, intitulada “Critérios de Aceitação para Deposição de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação”, na qual estabelece no item 4.1, “Conteúdo de Radionuclídeos”, que: “O tipo, a composição e o conteúdo de radionuclídeos do rejeito radioativo tratado na forma final devem ser conhecidos e documentados com suficiente precisão para apresentar evidência de sua conformidade com os limites autorizados” (CNEN, 2002).

Porém, em voto proferido no Tribunal de Contas da União, o relator do Relatório TCU 024.258/2013-0, “Levantamento e Identificação de Riscos Acerca do Gerenciamento Seguro de Rejeitos Radioativos e de Combustível Nuclear Usado”. Determinações. Recomendações. Arquivamento” em que a Comissão Nacional de Energia Nuclear é ré, escreve que:

“ 6.4.14. Entretanto, verificou-se também que não há um sistema integrado em que sejam registradas as conclusões dos relatórios ou efetuado o acompanhamento das exigências formuladas em cada um deles. O controle é efetuado apenas em arquivos isolados (tipo Word e Excel) controlados isoladamente pela COREJ. Os relatórios são registrados apenas no sistema ‘SisDoc’, que trata do controle de documentos no âmbito da CNEN.”

O relator se refere à documentação dos processos na CNEN, em particular daqueles relacionados à gestão do rejeito radioativo no país, atividades essas que são atribuição da Coordenadoria de Rejeitos Radioativos (COREJ) da Diretoria de Radioproteção e Segurança Nuclear, no que tange ao licenciamento e fiscalização, e da Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento, no que tange ao projeto, escolha de local e construção.

É importante, destacar que, pelo que se pode observar, nos grandes geradores de rejeito radioativo do país, o controle a que se refere o relator é, também, incipiente ou inexistente, apesar das mudanças introduzidas ao longo dos últimos anos pelo Sistema Eletrônico de Informações (SEI).

3 ORIGINALIDADE

A gestão de rejeitos radioativos tem uma característica particular que está, em geral, ausente nas considerações feitas em projetos de engenharia: as ações realizadas devem contemplar séculos ou milênios à frente, assim como as informações geradas hoje devem estar disponíveis em iguais horizontes de tempo. Uma das informações necessárias, senão a principal, é o conjunto de características do rejeito, em particular, o conteúdo de radionuclídeos. É isso que fundamenta as ações de proteção do homem e do ambiente hoje ou em futuros distantes.

A caracterização de rejeitos radioativos, embora praticada regularmente por razões operacionais e de segurança radiológica desde as décadas de 1950 e 1960, só passou a ser objeto de recomendação e diretrizes da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) recentemente e como resultado da necessidade de atender aos requisitos do sistema de garantia de qualidade. A caracterização, como uma atividade sistemática das etapas de gestão de rejeitos é, portanto, relativamente nova (IAEA, 2007; IAEA, 2009 (a)).

Essa deve ser a razão do porquê poucas coisas são encontradas na literatura acerca de sistemas de automatização destinados às ações de caracterização.

A presente tese objetiva contribuir para que informações provenientes de ações de caracterização sejam processadas, armazenadas e disponibilizadas de forma exata, precisa, responsável, rastreável e reproduzível quando forem necessárias.

Contribuição original

- Automatização dos processos de produção, revisão e aprovação dos resultados das ações de caracterização de rejeito radioativo.

- Sistematização dos métodos de produção e arquivamento de informações sobre a caracterização de rejeito radioativo.

4 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo estabelecer a documentação de um sistema informatizado, contendo as especificações funcionais que permitam seu desenvolvimento com o intuito de gerenciar informações na etapa de caracterização de rejeitos radioativos, seja ela inicial ou final. O sistema deverá integrar os métodos de caracterização para que o inventário radioisotópico e a atividade total do rejeito radioativo e da instalação sejam fornecidos com confiabilidade e de acordo com as exigências estabelecidas pelos órgãos reguladores.

4.1 Objetivos específicos

- a) Mapear os métodos de caracterização primária e final utilizados na rotina do gerenciamento de rejeitos radioativos no país;
- b) Mapear os dados de entrada necessários em cada método de caracterização primária, para a obtenção do inventário radioisotópico do rejeito;
- c) Catalogação de materiais mais comuns na gestão de rejeitos radioativos, assim como seus fatores de *build-up* e também catalogação dos radionuclídeos relevantes de acordo com as atividades geradoras do rejeito;
- d) Estruturar de forma concatenada as especificações de requisitos de acordo com os métodos de caracterização;
- e) Gerar a documentação das especificações funcionais do modelo algorítmico, para a implementação futura de um sistema eletrônico que contempla:
 - Registro das fases do gerenciamento de rejeitos radioativos;
 - Atribuição de responsabilidade;
 - Categorização do rejeito, de acordo com as normas estabelecidas;
 - Documentação dos métodos de caracterização;
 - Documentação dos protocolos de caracterização utilizados na rotina operacional;
 - Segurança da informação com controle de acesso;
 - Garantia da qualidade da informação gerada;
 - Emissão de relatórios, conforme os padrões estabelecidos pelo órgão regulador.

5. REVISÃO DA LITERATURA

5.1 Legislação vigente e recomendações

A CNEN, autarquia federal com autonomia administrativa e financeira, criada pela L4118/1962, hoje vinculada à Secretaria de Gestão do Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão, tem entre suas funções regulamentar, licenciar, autorizar, controlar e fiscalizar ações de pesquisa, desenvolvimento e promoção da utilização da energia nuclear para fins pacíficos estabelecidos pelas leis L7781/89 e L10308/01.

As Normas Nucleares estabelecidas pela CNEN se dividem em 9 grupos de 1 a 9, quais sejam, Instalações Nucleares; Controle de Materiais Nucleares, Proteção Física e Proteção contra Incêndio; Proteção Radiológica; Materiais, Minérios e Minerais Nucleares; Transporte de Materiais Radioativos; Instalações Radiativas; Certificação e Registro de Pessoas; Rejeitos Radioativos e Descomissionamento, respectivamente.

Dentre elas serão abordadas as que dispõem sobre gerenciamento de rejeito radioativo e deposição, quais sejam CNEN NN **1.10** (Segurança de sistemas de barragem de rejeitos contendo radionuclídeos), CNEN NN **6.06** (Seleção e escolha de locais para depósitos de rejeitos radioativos), CNEN NN **2.02** (Controle de materiais nucleares), CNEN NN **6.09** (Critérios de aceitação para deposição de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação). CNEN NN **9.01** (Descomissionamento de usinas nucleoeletricas) e CNEN NN **8.01** (Gerência de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação em que estabelece os critérios gerais) e CNEN NN **8.02** (Licenciamento de depósitos de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação), todas em vigor.

A norma CNEN NN 8.01 estabelece os critérios gerais e requisitos básicos de segurança e proteção radiológica relativos à gerência de rejeitos radioativos, servindo com alicerce para as demais normas aqui abordadas e estipulando um roteiro a ser seguido, que abrange descrição e classificação dos rejeitos radioativos, procedimentos para coleta, segregação, acondicionamento e identificação de rejeitos radioativos, armazenamento em depósito inicial, tratamento, dispensa de rejeitos, registros e inventários.

As normas abordadas, estipulam uma classificação para os rejeitos radioativos, classificando-os em 3 tipos, totalizando oito espécies, apresentados na tabela 1, de acordo com seus níveis e natureza da radiação, bem como suas meias-vidas, são eles:

Rejeitos isentos; rejeitos de meia-vida muito curta; rejeitos de baixo e médio níveis de radiação; rejeitos de baixo e médio níveis; rejeitos contendo radionuclídeos naturais (petróleo e mineral); rejeitos de meia-vida longa; rejeitos de alto nível de radiação.

A caracterização primária abrange as ações de coleta, de segregação, de acondicionamento e identificação para encaminhá-los ao tratamento e/ou transporte e/ou armazenamento.

Os critérios de coleta e segregação estipulados pela Norma CNEN NN 8.01 estabelece que deve ser realizada ou no mesmo local em que foram gerados ou em ambiente apropriado de acordo com sua caracterização:

- I. Estado físico;
- II. Meia-vida;
- III. Compactáveis ou não compactáveis;
- IV. Orgânicos ou inorgânicos;
- V. Biológicos (putrescíveis e patogênicos);
- VI. Outras características perigosas (explosividade, combustibilidade, inflamabilidade, corrosividade e toxicidade química).

A Norma CNEN NN 8.01, em sua Seção III estipula como se dará o acondicionamento, que se trata da colocação de rejeitos radioativos em embalagem própria, visando cumprir os requisitos de segurança estabelecidos e minimizar os custos das etapas de gerenciamento posteriores, que são destinadas à segregação, coleta, transporte e aos rejeitos não isentos.

Estes devêm ser devidamente identificadas com o símbolo internacional de presença de radiação, fixado de forma clara e visível; devêm ser adequadas às características físicas, químicas, biológicas e radiológicas dos rejeitos para os quais são destinadas; devêm ter suas condições de integridade asseguradas; devêm possuir vedação adequada para evitar perda do seu conteúdo; e devêm apresentar fichas de identificação, afixadas externamente, informando seu número de registro e a taxa de dose na superfície e acompanhados de ficha com as informações.

Ademais, quanto ao transporte, as normas coadunam e estabelecem que além dos veículos proverem de meios de fixação adequados para os volumes, de modo a evitar danos

aos mesmos, após cada transporte os volumes devem ser monitorados e, se necessário, descontaminados.

Quanto a transferência de rejeitos radioativos, a NN 8.01 determina que toda exportação de rejeito radioativo, só pode ser efetivada mediante autorização prévia da CNEN e que a transferência de rejeitos radioativos de uma instalação para outra é permitida em território nacional, mas exclusivamente para locais pré-determinados pela CNEN em conformidade com a NN 6.06.

Além disso, foi determinado que é proibida a importação de rejeitos radioativos e que a admissão temporária no país, para fins de tratamento, é permitida mediante autorização prévia.

A NN 8.01 estabelece os critérios mínimos para o armazenamento inicial e intermediário de rejeitos de meia-vida muito curta, quais sejam:

- I. Conter com segurança os rejeitos até que possam ser eliminados ou removidos para local determinado pela CNEN;
- II. Garantir a proteção física dos rejeitos, com provisão de barreiras de segurança e evitando o acesso não autorizado;
- III. Dispor de controle de liberação de material radioativo para o meio ambiente;
- IV. Dispor de um sistema de monitoração de área;
- V. situar-se em local cercado e sinalizado, com acesso restrito a pessoal autorizado;
- VI. Ter piso e paredes impermeáveis e de fácil descontaminação;
- VII. apresentar delimitação clara das áreas supervisionadas e controladas e, se necessário, locais reservados à monitoração e descontaminação individuais;
- VIII. Dispor de meios para evitar decomposição de rejeito biológico;
- IX. 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;

- X. Permitir, a qualquer momento, acesso para inspeção visual e identificação dos volumes;
- XI. Dispor de meios para proteção e combate a incêndio; e
- XII. Ter capacidade de armazenamento adequada, de modo a minimizar riscos de acidentes durante o manuseio de rejeitos pelo tempo que se fizer necessário.

Já a NN 8.02 estabelece os critérios mínimos para o armazenamento inicial e intermediário para todos os rejeitos de classe 2 (rejeitos de baixo e médio níveis de radiação; rejeitos de baixo e médio níveis; rejeitos contendo radionuclídeos naturais - petróleo e mineral - e rejeitos de meia-vida longa), que deve conter além dos requisitos básicos já estabelecidos pela NN 8.01 os seguintes quesitos:

- I. Possuir blindagem para o exterior que assegure o cumprimento dos requisitos de proteção radiológica;
- II. Possuir sistemas de ventilação, exaustão e filtragem;
- III. Dispor de meios que evitem a entrada de animais que possam provocar a dispersão do rejeito;
- IV. Assegurar as condições ambientais necessárias para evitar a degradação dos volumes;
- V. Possuir sistemas de tanques e drenos de piso para coleta de líquidos provenientes de eventuais vazamentos e descontaminações;
- VI. Prover segurança contra ação de eventos induzidos por fenômenos naturais;
- VII. Possuir barreiras físicas que visem minimizar a dispersão e migração de material radioativo para o meio ambiente;
- VIII. Dispor de acessos com dimensões suficientes para permitir deslocamentos e manobras de volumes; e

Quanto aos tratamentos, a NN 8.01 dispõe que, sejam quaisquer forem, devem estar sujeitos a aprovação da CNEN. Em relação a dispensa de rejeitos, esta é dividida entre rejeitos gasosos, líquidos e sólidos, cada qual com sua especificidade de acordo com valores especificados em tabela trazida como anexo à norma (Anexo II, Tabela II.1 e Anexo VI)

Outrossim, a NN 8.01, estabelece quanto ao registro de informações, que toda instalação deve manter um sistema atualizado de registro de rejeitos radioativos, devendo constar:

- I. A identificação do tipo de rejeito, sua origem e a localização da embalagem que o contém;
- II. A procedência e o destino do rejeito radioativo;
- III. A data de ingresso dos volumes no depósito;
- IV. Os radionuclídeos presentes em cada volume, respectivas atividades e atividade total;
- V. A taxa de dose máxima em contacto com a superfície;
- VI. A data estimada para que se alcance o nível de dispensa, se aplicável;
- VII. As dispensas de rejeitos realizadas, particularizando as atividades diárias liberadas;
- VIII. As transferências externas e internas;
- IX. Outras informações pertinentes à segurança;

Há também estipulação determinando que as informações estejam sempre atualizadas, que contenham especificações da data estimada para o decaimento do rejeito e documentações justificatórias às modificações ou correções eventualmente feitas.

A Norma CNEN NN-6.09, dispõe sobre critérios de aceitação para deposição de rejeitos radioativos, para os processos e embalagens compreendendo os requisitos de segurança.

Ademais, tal norma determina que as embalagens devem ser preferencialmente metálicas ou de concreto e ter formas cilíndricas e características geométricas ou dispositivos que permitam o manuseio e o deslocamento vertical, especificando os requisitos mínimos de fabricação.

De acordo com a NN 6.09, a contaminação superficial externa do material embalado deve ser inferior a 4 Bq/cm^2 para emissores Beta e Gama, e $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ para emissores Alfa.

A NN 6.06, estabelece os requisitos mínimos aplicáveis ao processo de seleção e escolha de locais para depósitos de rejeitos radioativos, objetivando garantir o confinamento seguro de materiais, aplicando-se aos depósitos finais, intermediários e

provisórios para rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação, gerados em decorrência de atividades desenvolvidas no território nacional.

Para tal, referida norma estabeleceu critérios para que sejam estabelecidos repositórios, depósitos intermediários e depósitos provisórios, quais sejam, adequação do local, capacidade de retenção de radionuclídeos, critérios gerais hidro geológicos, fatores de seleção, estudos ecológicos, estudos socioeconômicos, estudos geológicos, estudos fisiográficos e trabalhos para caracterização do local.

A NN 1.10, estabelece critérios para segurança de sistemas de barragem de rejeitos contendo radionuclídeos, estabelecendo requisitos mínimos para a emissão do “Certificado de Aprovação do Relatório de Análise de Segurança relativo ao sistema de barragem de rejeitos” contendo radionuclídeos, assegurando níveis baixos de radioatividade ao meio ambiente; estabelece diretrizes de elaboração de projeto e elaboração de barragens, análise de segurança, programas básicos de segurança, análises geomorfológica, meteorológica, hidrológica, geosísmicas e análises de impacto na fauna e flora.

A NN 2.02, dispõe sobre controle de materiais nucleares e princípios básicos para seu controle, definindo a utilização e transferência de material nuclear, critérios para o sistema de controle, moldes de realização de inspeções e estabelecimento de diretrizes para a aplicação de penalidades.

A NN 9.01, dispõe critérios para descomissionamento de usinas nucleoeletricas estabelecendo os requisitos básicos de segurança nuclear a serem atendidos durante o planejamento e a implementação, definindo seu campo de aplicação, suas responsabilidades, dos critérios de autorização para descomissionamento, das estratégias e planejamento a serem utilizadas no descomissionamento, da análise de segurança, dos recursos financeiros empregados, da gerência e condução do descomissionamento.

A NN 8.02, dispõe sobre licenciamento de depósitos de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis, estabelecendo critérios gerais e requisitos básicos de segurança e proteção radiológica relativos ao licenciamento de depósitos iniciais, intermediários e finais de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação. Destaca-se na Seção V que deve haver controle institucional, por no máximo 300 anos, com a finalidade de garantir o encerramento seguro de depósitos próximos à superfície.

Em análise às regulamentações de órgãos internacionais, com a IAEA – International Atomic Energy Agency, encontram-se orientações, tais como, sobre o que é, como é caracterizado e o que deve acontecer com rejeito radioativo, seus princípios básicos,

objetivos de gerenciamento de rejeitos, hierarquia entre os rejeitos, políticas regulatórias governamentais, objetivos regulatórios, especificações dos agentes responsáveis pelo gerenciamento, formas de regulação, impactos ambientais, critérios de proteção, sistema de evacuação, sistemas emergenciais, considerações sobre contaminação em terra e lençóis freáticos.

Em comparação entre as normas brasileiras e as orientações internacionais, constata-se diferenças principalmente entre os critérios de tipificação, em que uma faz uma abordagem voltada à aplicação cotidiana enquanto a outra aborda de uma maneira mais conceitual.

As orientações internacionais preocupam-se precipuamente com recomendações de segurança, esclarecimentos conceituais e princípios direcionadores, através de meios de elaboração para critérios de segurança, estratégias antes mesmo da necessidade de haver algum rejeito radioativo.

Distinguem-se também em sua forma de classificar os rejeitos, em que as normas brasileiras, trazem especificações geradas pela necessidade e especificações ocasionadas pelo meio em que vivemos, como por exemplo a classificação de radionuclídeos naturais derivados de petróleo e radionuclídeos derivados de minerais.

O sistema de gerenciamento de rejeitos radioativos recomendado pela IAEA estabelece a seguinte ordem de atividades: pré-tratamento, tratamento, condicionamento, armazenamento, recuperação e descarte, distinguindo-se da classificação brasileira que estabelece como ordem: coleta, caracterização, tratamento, caracterização final, armazenamento temporário, transporte e deposição ou descarte.

Sabe-se que, independentemente da ordem que se siga, tanto as recomendações internacionais quanto as normas vigentes no Brasil trazem como principal requisito que as etapas iniciais do gerenciamento viabilizem o conhecimento do inventário radioisotópico para que só então as próximas etapas possam ser iniciadas. É de extrema importância que o inventário radioisotópico esteja atualizado de acordo com a etapa em que o gerenciamento do rejeito se encontra. Além disso, é necessário que os dados históricos dos rejeitos sejam mantidos para auditorias e consultas futuras.

5.2 Classificação dos rejeitos

Pensando no gerenciamento de rejeitos radioativos, é necessário que esses materiais sejam classificados a fim de definir os melhores processos relacionados tanto ao tratamento quanto a deposição ou descarte. Para tanto, são levadas em consideração informações como os tipos de radionuclídeos presentes no material e suas respectivas meias-vidas, os níveis de atividade e quais atividades que geraram esse rejeito.

No Brasil, os rejeitos são classificados em quatro categorias, que vão de 0 a 3, dependendo do nível de radioatividade que apresentam e de acordo com a meia-vida dos radionuclídeos presentes (CNEN, 2014 b). Desta forma, têm-se:

Classe 0: Rejeitos Isentos (RI): são os rejeitos contendo radionuclídeos com atividade ou concentração de atividade em massa ou volume, inferiores ou iguais aos respectivos níveis de dispensa estabelecidos pela autoridade regulatória;

Classe 1: Rejeitos de Meia-Vida Muito Curta (RVMC): rejeitos com meia-vida inferior a 100 dias, com níveis de atividade ou de concentração superiores aos respectivos níveis de dispensa;

Classe 2: Rejeitos de Baixo e Médio Níveis de Radiação (RBMN): rejeitos com meia vida superior a dos rejeitos da Classe 1, com níveis de atividade ou de concentração em atividade superiores aos níveis de dispensa e com potência térmica inferior a 2 kW.m-3;

Os rejeitos da Classe 2 são subdivididos em quatro categorias:

Classe 2.1: Meia-Vida Curta (RBMN-VC): rejeitos de baixo e médio níveis de radiação contendo emissores β e γ , com meia-vida inferior a 30 anos e com concentração de radionuclídeos emissores α de meia-vida longa limitada em 3.700 kBq .kg⁻¹ em volumes individuais e com um valor médio de 370 kBq.kg-1 para o conjunto de volumes;

Classe 2.2: Rejeitos Contendo Radionuclídeos Naturais (RBMN-RN): rejeitos provenientes da extração e exploração de petróleo, que contenham radionuclídeos das séries do urânio e tório em concentrações de atividade acima dos níveis de dispensa;

Classe 2.3: Rejeitos Contendo Radionuclídeos Naturais (RBMN-RN): rejeitos contendo matérias primas minerais, naturais ou industrializadas, com radionuclídeos das séries do urânio e do tório em concentrações de atividade acima dos níveis de dispensa;

Classe 2.4: Rejeitos de Meia-Vida Longa (RBMN-VL): rejeitos não enquadrados nas Classes 2.2 e 2.3, com concentrações de radionuclídeos de meia-vida longa que excedam as limitações para classificação como rejeitos de meia-vida curta;

Classe 3: Rejeitos de Alto Nível de Radiação (RAN): rejeitos com potência térmica maior que 2kW.m⁻³ e com concentrações de radionuclídeos de meia-vida longa que excedam as limitações para classificação como rejeitos de meia-vida curta.

Já a IAEA classifica os rejeitos em seis categorias da seguinte forma:

Rejeitos isentos (*Exempt waste and waste below the clearance level*): rejeito que atende aos critérios de isenção ou liberação definidos no BSS¹ da IAEA (IAEA,2009 (a)) e, portanto, não está sujeito ao controle para fins de proteção radiológica;

Rejeitos de meia-vida muito curta (*Very short-lived waste*): requer um período de armazenamento para decaimento até que alcance o limite de dispensa;

Rejeito de nível muito baixo (*Very low level waste*): rejeito que não atende os critérios para isenção, mas que não precisa de um alto nível de contenção e isolamento, tornando-se apto para o descarte em instalações do tipo aterro próximo da superfície;

Rejeito de baixo nível (*Low level waste*): rejeito que está acima dos níveis de liberação e isenção, mas com quantidades limitadas de radionuclídeos de longa duração;

Rejeito intermediário (*Intermediate level waste*): rejeito que, devido ao seu inventário de radionuclídeos, particularmente os radionuclídeos de vida longa, exigem um maior grau de contenção e isolamento, não sendo aptos para o descarte próximo à superfície;

Rejeitos de alto nível (*High level waste*): rejeito com níveis de concentração de atividade suficientemente altos para gerar quantidades significativas de calor por decaimento radioativo ou ainda, com grandes quantidades de radionuclídeos de meia-vida longa que precisa ser colocado em local apropriado, como um depósito profundo.

¹ BSS: International Basic Safety Standards

Tabela 1 - Classificação nacional e internacional de rejeitos radioativos

Classe	Nomenclatura e sigla (CNEN)	Nomenclatura e sigla (IAEA)	Meia-vida	Característica	Método de dispensa ou deposição
Classe 0	Rejeitos Isentos (RI)	Rejeitos Isentos (EW)	Curta	Rejeitos contendo radionuclídeos com valores de atividade ou de concentração de atividade, em massa ou volume, inferiores ou iguais aos respectivos níveis de dispensa.	Dispensados sem restrições
Classe 1	Rejeitos de Meia-Vida Muito Curta (RVMC)	Rejeito de Meia Vida Muito Baixa (VSLdW)	Curta	Rejeitos com meia-vida inferior ou da ordem de 100 dias, com níveis de atividade ou de concentração em atividades superiores aos respectivos níveis de dispensa.	Armazenados até o decaimento e após, podem ser dispensados
Classe 2	Rejeitos de Baixo e Médio Nível de Radiação (RBMN)	-	>100 dias	Rejeitos com meia-vida superior à dos rejeitos da Classe 1, com níveis de atividade ou de concentração em atividade superiores aos níveis de dispensa e com potência térmica inferior a 2 kW/m ³ .	-
Classe 2.1	Meia - Vida Curta (RBMN- VC)	Rejeito de Muito Baixo Nível (VLLW) OU Rejeito de Baixo Nível (LLW)	≤30 anos	Rejeitos contendo emissores beta/gama de meia-vida inferior a 30 anos e com concentração de radionuclídeos emissores alfa de meia-vida longa inferior a 3700 Bq/g em volumes individuais e 370 Bq/g para a média do conjunto;	Devem ser acondicionados em depósitos próximos a superfície
Classe 2.2	Rejeitos contendo Radionuclídeos Naturais (RBMN- RN)	Rejeito de Médio Nível (ILW)		Rejeitos de extração e exploração de petróleo, contendo radionuclídeos das séries do urânio e tório em concentrações de atividade ou atividades acima dos níveis de dispensa;	Devem ser acondicionados em depósito próximo a superfície ou em profundidade definida por análise de segurança
Classe 2.3				Rejeitos contendo matérias primas minerais, naturais ou industrializadas, com radionuclídeos das séries do urânio e do tório em concentrações de atividade ou atividades acima dos níveis de dispensa;	
Classe 2.4				Rejeitos de Meia-Vida Longa (RBMN- VL)	
Classe 3	Rejeitos de Alto Nível de Radiação (RAN)	Rejeito de Alto Nível (HLW)	Superior a 300 anos	Rejeitos com potência térmica superior a 2kW/m ³ e com concentrações de radionuclídeos de meia-vida longa que excedam as limitações para classificação como rejeitos de meia-vida curta.	Sem definição para deposição final

Fonte: autora da tese (adaptado de CNEN,2014 (a); IAEA,2009 (a); LEE 2013)

5.3 Gerenciamento de rejeitos radioativos

Cada tipo de rejeito radioativo requer um tratamento e uma destinação final que garantam que os riscos radiológicos, ou mesmo os de natureza convencional, sejam aceitáveis tanto hoje quanto num futuro distante, enquanto os radionuclídeos não tenham decaído a ponto de deixar de representar perigo para o homem e/ou para o meio ambiente.

Seguem-se nove princípios básicos para a gestão de rejeitos sugerido pela IAEA:

- 1- Proteção da saúde humana: garantir por meio da proteção radiológica e das normas vigentes o controle da exposição à radiação ionizante advinda de rejeitos radioativos.
- 2- Proteção do meio ambiente: planos de minimização de impacto e controle dos efeitos dos rejeitos radioativos devem ser criados e aplicados.
- 3- Proteção além das fronteiras: os rejeitos radioativos devem ser gerenciados de forma a garantir segurança ao meio ambiente e à saúde humana além das fronteiras nacionais.
- 4- Proteção das gerações futuras: Os rejeitos radioativos devem ser gerenciados de forma que os impactos previstos na saúde das gerações futuras não sejam maiores que os níveis relevantes de impactos hoje aceitáveis.
- 5- Ônus às gerações futuras: os rejeitos radioativos devem ser geridos no presente para que as gerações futuras não sejam oneradas tendo que gerenciar rejeitos radioativos produzidos por gerações passadas.
- 6- Estabelecimento de estrutura legal apropriada: os rejeitos radioativos devem ser gerenciados dentro de uma estrutura legal nacional apropriada, **incluindo a clara atribuição de responsabilidades** e a provisão de funções reguladoras independentes.
- 7- Minimização da geração de rejeitos radioativos: toda e qualquer atividade deve ser executada visando minimização da geração de rejeitos radioativos.
- 8- Interdependência entre geração e gerência de rejeitos: As interdependências entre todas as etapas na geração e gerenciamento de rejeitos radioativos devem ser adequadamente levadas em consideração.
- 9- Garantia da segurança de instalações de gerenciamento de rejeitos radioativos: durante as etapas de seleção de local, projeto, construção, comissionamento, operação e descomissionamento de uma instalação de gerenciamento de rejeitos ou de um repositório, a prioridade deve ser a garantia de segurança durante toda a sua vida útil (IAEA, 1995).

Assim, os princípios propostos pela IAEA estabelecem que os rejeitos radioativos devem ser gerenciados visando evitar consequências sobre gerações futuras, aplicando soluções que sejam seguras, viáveis e ambientalmente aceitáveis tratando de rejeitos radioativos.

Com isso, dá se o nome de ‘gestão’ ou ainda, ‘gerenciamento de rejeitos radioativos’ a cadeia de etapas e processos interligados que se inicia com a própria geração do rejeito e vai até a destinação final adequada. Em geral essas etapas são compostas por: coleta, caracterização, tratamento, acondicionamento, armazenamento, transporte e por último, dispensa, caso aplicável, ou a deposição final que visa principalmente à diminuição de custos e das doses operacionais (LEE e OJOVAN, 2013 (a); MARINGER et al. 2013)

Os métodos para gerenciar rejeitos radioativos podem sofrer adaptações, não seguindo qualquer tipo de modelo padrão, pois dependem de fatores tecnológicos, políticos, sociais, tipo de rejeito que está sendo gerado e quantidade (AMPHLETT, 1961; IAEA, 1983a; IAEA, 1983b; IAEA, 1984; IAEA, 1992; MARUMO, 2006). Mesmo porque, o gerenciamento de rejeitos radioativos não se restringe unicamente a programas nucleares realizados por órgãos governamentais ou indústria e a atividades de mineração (PASCHOA e TRANJAN, 1995; BEKEN et al., 2009).

O fluxograma (FIG. 1) apresenta as etapas do programa de gerenciamento de rejeitos radioativos e suas possíveis sequências, adotando o princípio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable* ou “Tão baixo quanto razoavelmente exequível”) e visando sempre a minimização da quantidade de rejeitos, o controle sobre o material em todas as etapas do gerenciamento e uso e/ou desenvolvimento de métodos economicamente viáveis que também minimizem as doses para o indivíduo público e operacional. As etapas e estratégias de gerenciamento são baseadas em:

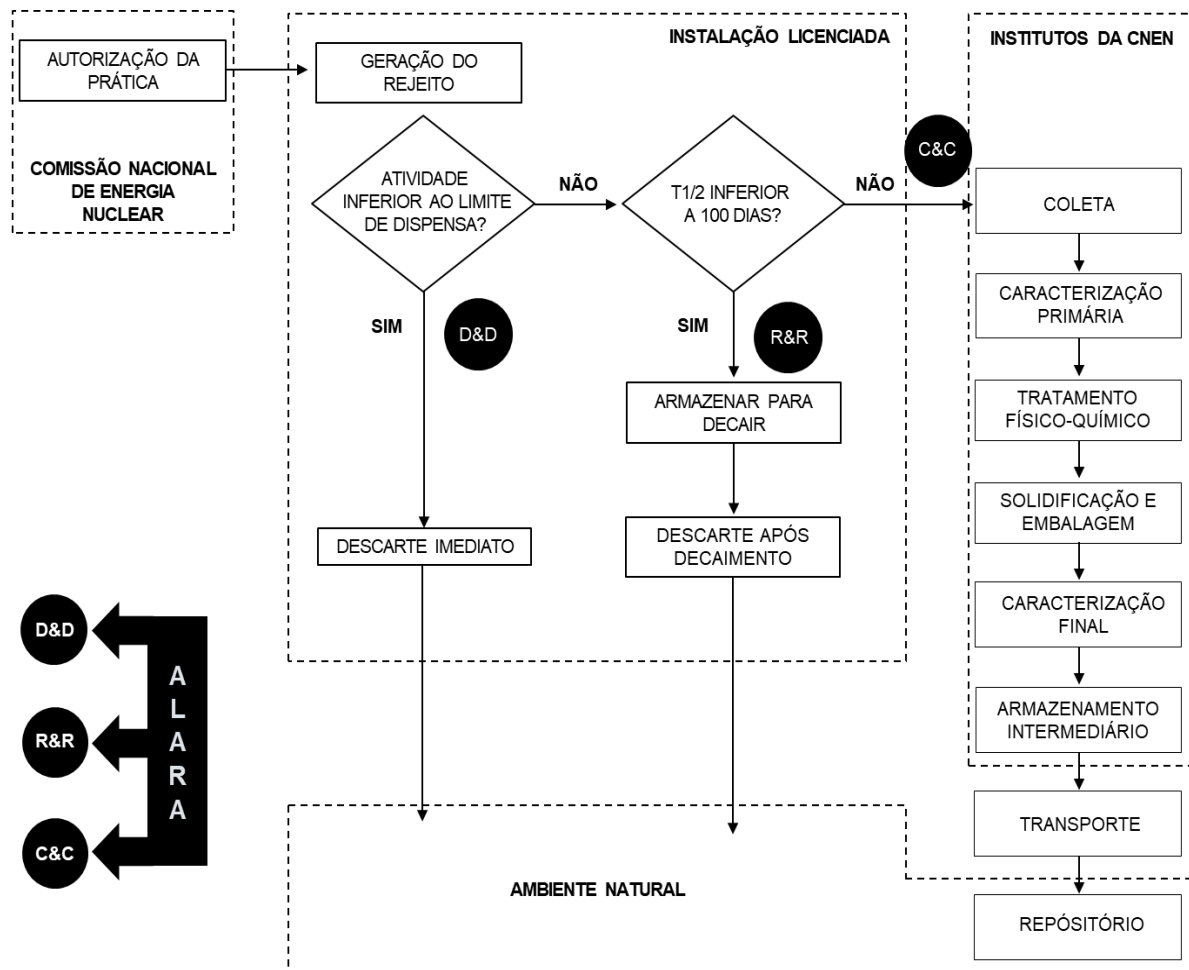
- Diluir e dispensar (D&D);
- Reter e retardar a liberação (R&R);
- Concentrar e confinar (C&C).

Todas as etapas apresentadas no fluxograma se inter-relacionam. A exemplo disso: as características de um repositório final podem determinar os processos que melhor se adequam ao tratamento.

O gerenciamento de rejeitos deve ocorrer avaliando diferentes alternativas para cada etapa, possibilitando obter um sistema que cumpra com os princípios de proteção estabelecidos pelos órgãos reguladores. Entretanto, é necessário ressaltar que todos os modelos

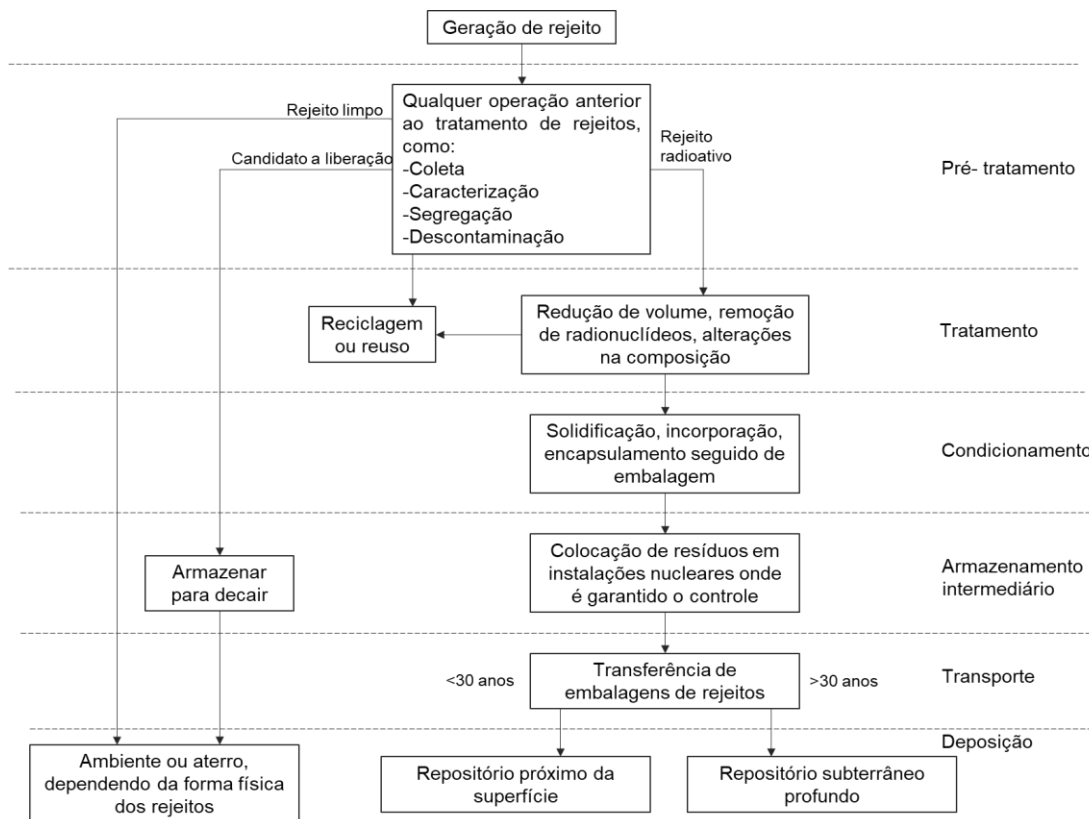
de entradas e saídas de um programa de gerenciamento de rejeitos radioativos são caracterizados pela alta complexidade (BEKEN et al., 2009).

Figura 1 - Gerenciamento de rejeitos radioativos



Fonte: autora da tese

Tratando com maior detalhamento, e desmembrando as etapas do gerenciamento, se apresenta o fluxograma na figura 2, abordando quais são as ações mais comuns dentro de cada uma das etapas.

Figura 2 - Gerenciamento das etapas e suas respectivas ações

Fonte: adaptado de LEE, OJOVAN, JANTZEN *et al.*, 2013 (b).

5.3.1 Caracterização de resíduos radioativos

A natureza e a composição dos resíduos devem ser minuciosamente compreendidas e caracterizadas, visto que as etapas seguintes consistem em processamento e armazenamento ou descarte. As propriedades avaliadas são de natureza radiológica, física, química e biológica (TAB. 2) (KEKKI e TIITTA, 2000).

A avaliação **radiológica** tem por objetivos:

- Evitar a mistura de fluxos com conteúdo e distribuição isotópicas diferentes;
- Impedir criticalidade;
- Projetar instalações e planos de segurança para armazenamento ou descarte;
- Otimizar o planejamento da proteção radiológica, incluindo as blindagens necessárias;
- Definir considerações sobre manuseio e transporte;
- Minimizar a geração de resíduos, incluindo resíduos secundários.

Já a avaliação das propriedades **físicas** e **químicas** visa:

- Definir técnicas de processamento dos resíduos;

- Avaliar dimensões, peso, compatibilidade química;
- Verificar o estado físico das amostras;
- Considerar a compatibilidade dos fluxos de rejeitos;
- Verificar a compatibilidade dos rejeitos para armazenamento ou equipamentos de processamento.

E por fim, o intuito de verificar as propriedades **biológicas** e patogênicas é evitar a ocorrência de acidentes durante a manipulação ou dispersão do agente patogênico, visando que todo o ciclo do rejeito atenda às normas / regulamentações.

Assim, a caracterização é utilizada para a determinação e avaliação de parâmetros dos rejeitos viabilizando a segregação, reutilização, escolha de descarte ou o tipo de armazenamento (ENVIRONMENT AGENCY, 2010).

A caracterização deve ser aplicada em casos onde:

- Não há informação suficiente sobre o rejeito;
- Houve alteração das propriedades do rejeito;
- As informações estão desatualizadas ou não são consistentes;
- É necessário garantir a qualidade quanto às características do rejeito.

Tabela 2 - Propriedade dos rejeitos radioativos avaliadas no gerenciamento

Propriedade	Parâmetro	Propriedade	Parâmetro
Radiológica	Criticalidade Meia-vida Geração de calor Intensidade de radiação Atividade e concentração de radionuclídeos Contaminação da superfície Fatores de dose de radionuclídeos relevantes	Química	Risco químico potencial Resistência à corrosão Corrosividade Conteúdo orgânico Combustibilidade Reatividade Geração de gás Sorção de radionuclídeos
	Física		Estado físico (sólido, líquido, gás) Tamanho, volume e peso Compressibilidade Dispersibilidade Volatilidade Solubilidade e miscibilidade

Fonte: autora da tese

Diversas técnicas podem ser utilizadas para a obtenção desses parâmetros e após a avaliação desses parâmetros é possível classificá-los de acordo com os regulamentos estabelecidos.

Técnicas de caracterização devem ser aplicadas também após a fase de imobilização do rejeito, com o intuito de verificar se o rejeito tratado atende as regulamentações para armazenamento.

5.3.2 Tratamento

O tratamento de rejeitos radioativos abrange três objetivos: a redução de volume, a remoção de radionuclídeos dos rejeitos e a alteração da composição física e química (OJOVAN, 2011). Para tanto, o tratamento pode ser dividido em duas etapas, sendo elas o **pré-tratamento** e o **tratamento**.

O **pré-tratamento** abrange ações de segregação, descontaminação, tratamento químico ou ainda, o próprio armazenamento temporário. É considerado fundamental pois permite formar grupos de rejeitos que devem ser gerenciados da mesma maneira.

O pré-tratamento pode ser iniciado antes mesmo da caracterização, como meio de ação afirmativa para que seja feita a segregação de rejeitos ainda no seu núcleo gerador, devendo então fazer parte do plano de gestão de rejeitos de cada instalação.

Já o **tratamento** propriamente dito consiste em ações destinadas a alterar as características “*in natura*” do rejeito para que este se enquadre nos padrões de segurança exigidos. Tratamentos comumente são aplicados com a finalidade de redução de volume de rejeitos ou ainda, segregar com métodos físico-químicos, substâncias inertes não radioativas que estejam presentes nos embalados. Técnicas de compactação, incineração e precipitação podem ser utilizadas. Recentemente, estudos foram iniciados para a aplicação de reatores de plasma para a redução do volume e vitrificação da matriz de rejeitos (PRADO et. Al, 2020).

5.3.3 Imobilização

A solidificação ou imobilização é a fase onde o rejeito é trabalhado para que se torne adequado para o transporte, armazenamento e deposição. Consiste em ter sua matriz recondicionada em forma sólida utilizando, comumente, cimento ou betume para rejeitos de baixo e médio nível, ou a vitrificação para rejeitos de alta atividade.

5.3.4 Armazenamento, dispensa e deposição

As etapas de gerenciamento podem levar vários anos, pois dependem da complexidade do material e também da tecnologia disponível. Assim, o armazenamento de rejeitos radioativos pode ocorrer em qualquer etapa do gerenciamento e tem como objetivo manter o rejeito isolado e seguro até sua destinação final.

Seguindo a premissa apontada no registro e controle de informações, todo rejeito armazenado deve estar devidamente identificado e com suas informações atualizadas. Essas informações consistem em ID (número de identificação), radionuclídeos presentes, taxa de dose com sua respectiva data, atividade (se disponível) com data, informação de origem e gerador, peso ou volume e perigos potenciais tais como risco químico, físico ou biológico (CNEN, 2014 (a); ENVIROMENTY AGENCY, 2010).

Os rejeitos devem ser armazenados de maneira que seja viabilizada a minimização de manutenção, monitoramento, controle e segurança ativa. Caso o rejeito não atenda essas características deve ser mantido em um depósito intermediário ou temporário.

Após o gerenciamento é possível decidir a possível destinação final que são divididas em dispensa ou deposição.

Dispensa é o nome que se dá ao descarte do rejeito num meio qualquer do ambiente, como esgoto, rios ou aterros sanitários, para que os radionuclídeos presentes sejam diluídos e dispersados.

Tratando do ponto de vista de proteção ao meio ambiente, a ideia de dispensa pode parecer inaceitável, entretanto o impacto gerado à saúde humana e ao meio ambiente é menor na dispersão do rejeito do que no isolamento do rejeito do ambiente.

A regulamentação vigente estabelece para cada radionuclídeo, estado físico do rejeito e para cada instalação, os limites de dispensa anuais. Sendo assim, sempre se leva em consideração que os riscos de dispensa devem ser inferiores aos limites considerados aceitáveis.

Tratando de **deposição**, esse é o nome dado à colocação definitiva de um rejeito num local sem que exista a intenção de removê-lo de lá, de maneira que esse rejeito fique isolado da biosfera, e que, considerando todos os cenários concebíveis de ações antrópicas ou fenômenos naturais, seja improvável que alguém seja exposto à radiação ou ainda, se exposto, as doses sejam tão baixas que não correspondam riscos à saúde.

Para a deposição final, o fator mais importante é o tempo de isolamento do rejeito e, o critério para que se estabeleça esse tempo é a dose potencial que um indivíduo poderia receber, no presente ou no futuro, caso ocorresse a exposição acidental à radiação emitida pelo rejeito. O consenso que se tem é que, para o rejeito que deve permanecer isolado, o risco no futuro seja no máximo igual ao aceito hoje. Isso se enquadra no princípio ético de proteção às futuras gerações, considerando que estas não sofram danos à saúde causados por rejeitos gerados no presente.

O período de armazenamento dependerá da meia-vida de cada radionuclídeo e da concentração de atividade no rejeito. Quanto maiores às duas grandezas, por mais tempo o rejeito deverá ser mantido em isolamento. Existem rejeitos que necessitam de isolamento por centenas de anos e alguns outros por milênios para que o risco de contaminação do meio ambiente e da população sejam inferiores aos aceitáveis.

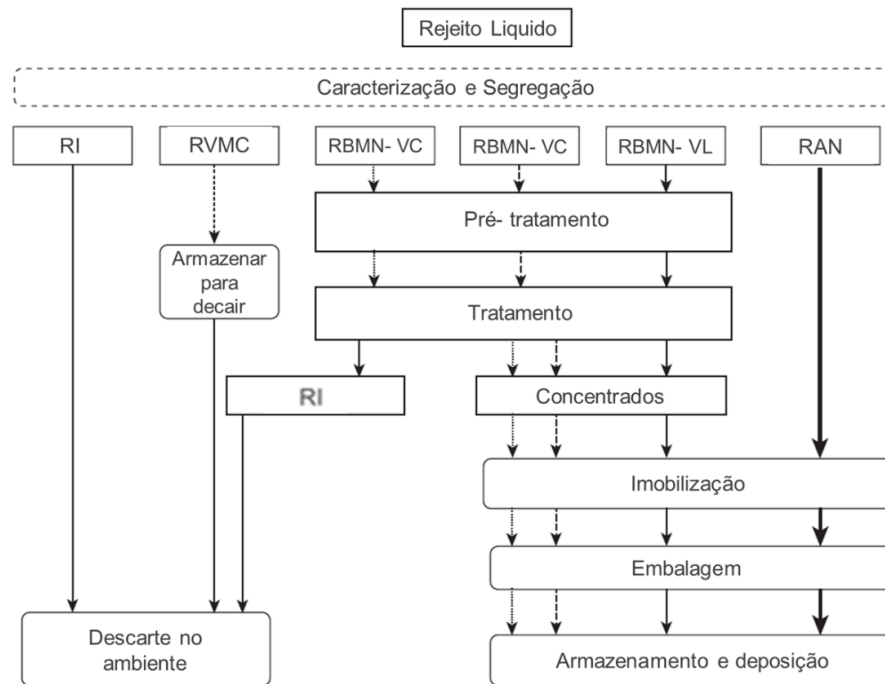
Com a tecnologia atual, o isolamento por alguns séculos pode ser alcançado em **repositórios** próximos à superfície, com cerca de 30m de profundidade. Essa destinação é aplicada principalmente aos rejeitos de baixo e médio nível de radiação, que são rejeitos gerados na operação de usinas nucleares e em aplicações da tecnologia nuclear, como na medicina, indústria e pesquisa.

Para rejeitos de alta atividade, que normalmente são gerados na reciclagem do combustível nuclear ou para alguns rejeitos particulares de aplicações industriais, recomenda-se a deposição em cavidades profundas, com mais de 400m ou 500m, em formações geológicas apropriadas, assegurando o isolamento pelos milhares de anos necessários e para que o risco ao homem e ao meio ambiente alcance valores aceitáveis.

Todas as etapas do gerenciamento que antecedem a dispensa ou deposição são definidas para que uma das alternativas seja aplicada e se garanta o menor risco possível (BURCL, 2013).

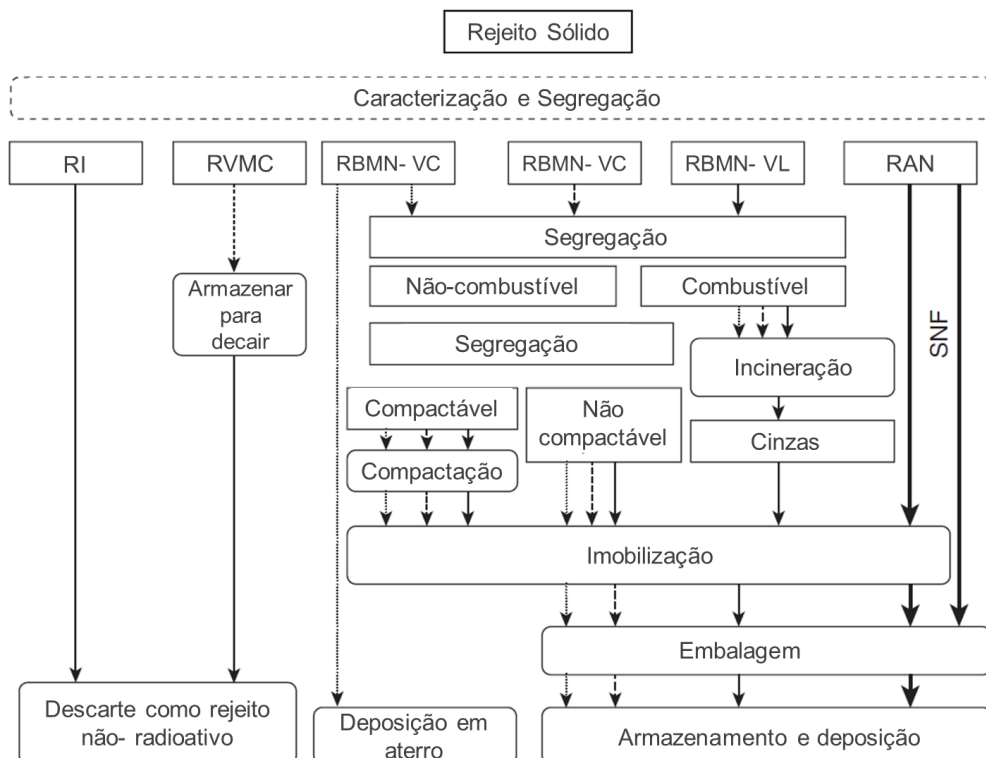
A exemplo das etapas de tratamento e dispensa ou deposição, as figuras 3 e 4 apresentam os métodos mais comuns utilizados no tratamento de rejeitos líquidos e sólidos de acordo com a classificação a qual esses rejeitos são enquadrados.

Figura 3 - Gestão de rejeitos radioativos líquidos



Fonte: adaptado de LEE, OJOVAN, JANTZEN *et al.*, 2013 (b).

Figura 4 - Gestão de rejeitos radioativos sólidos



Fonte: adaptado de LEE, OJOVAN, JANTZEN *et al.*, 2013 (b).

Como já citado anteriormente, os fluxos apresentados nas figuras 2, 3 e 4 deixam evidente a inter-relação das etapas e a dependência direta da etapa de caracterização para a tomada de decisão do fluxo a ser seguido.

Para a escolha ideal dos processos e tecnologias empregados em cada etapa do gerenciamento de rejeitos radioativos, é necessário que as instalações ou responsáveis avaliem continuamente o que existe a disposição para uso, escalabilidade técnica e viabilidade econômica (ENVIRONMENT AGENCY, 2010).

No que diz respeito a escalabilidade técnica, devem ser levados em consideração essencialmente três aspectos: robustez da tecnologia- que define o grau de confiabilidade do processo, considerando diferentes condições de operação-; maturidade da tecnologia- considera o tipo de rejeito, quantidades, experiência operacional e disponibilidade no fornecimento de materiais e serviços- e finalmente a flexibilidade da tecnologia- define o equilíbrio entre as técnicas aplicadas a depender do tamanho da instalação, tipo da instalação, e viabilidade de aplicação de estratégias mistas para garantia da qualidade do processo de gerenciamento.

Tratando da viabilidade econômica, é altamente recomendável que o plano de gerenciamento seja feito antes do início da operação da instalação geradora de rejeito, considerando custos de operação, descomissionamento, manipulação de rejeitos e rejeitos perigosos, custos de validação de técnicas e métodos ou ainda de adaptações no plano de gerenciamento.

Para que as técnicas sejam escolhidas de forma correta, órgãos como a IAEA e Environment Agency (EA) recomendam que a avaliação seja feita caso a caso, com transparência em relação as escolhas, consulta e registros em bases de dados de confiança e que principalmente, se garanta o equilíbrio ideal tratando de questões socioambientais, econômicas e de segurança (ENVIRONMENT AGENCY, 2010; IAEA, 2003).

5.4 Esforços mundiais para manutenção da informação

Atualmente, no Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) exige que toda e qualquer instalação radiativa deve manter seus registros atualizados, destacando itens que são obrigatórios:

- a) Procedência e destino do rejeito;

- b) Radionuclídeos presentes e a atividade total relacionada a cada um e atividade total do rejeito;
- c) Taxa de dose em contato com a superfície do embalado e a um metro de distância;
- d) Data de entrada do rejeito assim como a data estimada para a dispensa (se aplicável);
- e) Registro de transferências, sejam elas internas ou externas;
- f) Se o rejeito for apto a dispensa, registro da data em que a mesma foi feita.

A CNEN indica que esses registros devem ser mantidos em bancos de dados informatizados e que os mesmos devem se manter atualizados. A finalidade é viabilizar a administração das diferentes etapas da gerência de rejeitos e garantia do cumprimento das normas. Além disso, o registro visa garantir também tanto a segurança ambiental como a segurança de operações (CNEN, 2014 (a)).

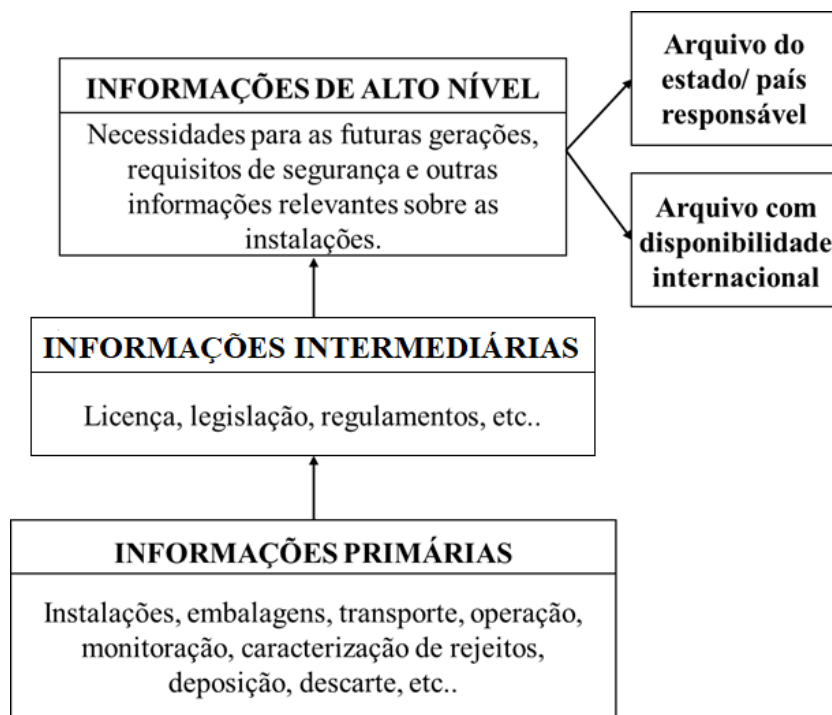
No cenário mundial, desde a década de 90 esforços vêm sendo feitos para garantir o acesso as informações coletadas no gerenciamento de rejeitos radioativos e preservação das mesmas em longo prazo visando a segurança das gerações futuras e dos repositórios até mesmo após o período de controle institucional (BENBENNICK *et al.*, 1994; IAEA, 1999; ANDERSON, 2001; LEE *et al.*, 2004; ANDERSON e KIRK, 2005; ANDERSON *et al.*, 2005; HADDAL *et al.*, 2016; WISBEY *et al.*, 2017).

Os documentos da IAEA, denominados TECDOC 1097 (1999) e TECDOC 1222 (2001) fazem menção a necessidade de criação de meios para que ocorra a transmissão da informação para as gerações futuras em relação aos rejeitos armazenados em repositórios. Tratando em especial do TECDOC 1097, cita-se o controle passivo que ultrapassa o período de controle institucional e que, para que as informações sejam transmitidas, as autoridades devem desenvolver políticas e sistemas para lidar com a manutenção desses registros. O sistema de gerenciamento de registros deve ser concebido levando em conta quais informações realmente tem valor para as gerações futuras e as medidas a serem tomadas para garantia de manutenção e acesso a essas informações, garantindo a migração das mesmas para as tecnologias de acesso disponíveis. Para isso algumas recomendações quanto ao tipo de armazenamento de dados são dadas, destacando: os meio escolhido deve ser capaz de armazenar os dados exigidos, deve ser legível e compreensível, deve ser resistente a adulterações, deve ser recuperável por longos períodos de tempo, deve possibilitar a transposição de dados sem perda de informação.

Além disso, sugere-se hierarquizar informações em três níveis (FIG. 5), sendo:

- Conjunto de informações primárias, que é desenvolvido e alimentado continuamente durante o ciclo de vida de instalações e repositórios;
- Conjunto de informações de nível intermediário: documentação condensada para que exista compreensão quanto a estrutura dos repositórios e seus conteúdos incluindo requisitos legislativos (validos durante o ciclo de vida do repositório) e registros de licenciamento. Nas informações de médio nível também deve haver referências de como acessar as informações de alto nível;
- Conjunto de informações de alto nível: compreende também informações condensadas, mas que trazem conhecimento fundamental sobre as instalações e repositórios. As informações de alto nível devem ser escolhidas pelas autoridades reguladoras, que devem decidir também se a disponibilização dessas informações será a nível nacional ou internacional.

Figura 5 - Hierarquia de informações



Fonte: adaptado de IAEA, 1999

O intuito de registrar essas informações consiste também em atribuir responsabilidades aos órgãos responsáveis pela gestão das instalações. Com o registro dos dados corretos, é possível, se necessário entrar em contato com os principais geradores de

rejeitos e recuperar seus dados sobre o descarte de rejeitos, verificar e confrontar informações disponíveis com as decisões dos órgãos reguladores, estimar as quantidades de rejeitos descartados.

Levando em consideração as informações abordadas nesse capítulo, as etapas de gerenciamento precisam ser documentadas, de modo que as informações estejam disponíveis para acesso sempre que necessário, cabendo a proposta de automatizar os métodos de caracterização e disponibilizar a proposta de um sistema para o gerenciamento das informações obtidas nessa etapa.

Além disso, a proposta de sistema tem a finalidade de garantir a qualidade do inventário radioisotópico, a reprodutibilidade de métodos aplicados para a caracterização, e a atribuição de responsabilidade legal às informações nele contidas por todo o tempo que seja necessário durante o período de custódia institucional do rejeito, ou seja, o processo de *compliance* 2 em longo prazo.

2 *Compliance* é definido como o conjunto de atividades para que se façam cumprir normas e regulamentos institucionais assim como detectar inconformidades que possam ocorrer (GÓIS, 2014).

6 MÉTODOS

O método adotado para a elaboração conceitual e lógica do projeto consiste na consideração de processos e procedimentos utilizados na rotina operacional da gerência de rejeitos radioativos, em especial aqueles utilizados no Serviço de Gerência de Rejeitos Radioativos do IPEN (SeGRR), com o intuito de levantar todos os passos necessários para a construção de um sistema informatizado específico para a atividade de caracterização de rejeitos radioativos.

A partir da observação e compreensão dos fluxos de materiais e informação da rotina que envolvem o processo de caracterização de rejeitos radioativos e as necessidades atuais, foi possível definir os módulos que devem estar presentes no sistema assim como as informações de entrada necessárias em cada um desses módulos.

Para atender à proposta de desenvolvimento do sistema, foram adotadas três linhas de pesquisa, análise e atividades construtivas, sendo:

- I. Avaliação de documentação
 - a) Artigos publicados;
 - b) Teses e dissertações com o tema gerência de rejeitos radioativos;
 - c) Leis e regulamentos nacionais e recomendações da IAEA.

- II. Especificação dos requisitos e módulos do sistema:
 - a) Análise de situação e processo atual: levantamento dos dados;
 - b) Sequenciamento do procedimento de caracterização do rejeito;
 - c) Modelos de relatórios requeridos pela CNEN e outras organizações;
 - d) Modelos para o armazenamento de informações.

- III. Especificação técnica dos métodos de caracterização de rejeitos referenciados nos módulos:

- a) Modelos algoritmos especificados em linguagem pseudotécnica (Portugol - modelo de especificação adotado devida a versatilidade posterior de codificação em qualquer linguagem de programação padrão de mercado);
- b) Especificação de bibliotecas características de rejeitos como rendimentos enérgicos, radionuclídeos relevantes, densidades dos materiais, coeficientes de atenuação e *buid-up*;
- c) Layouts de telas e relatórios.

A seguir, serão abordados conceitos técnicos utilizados na construção da documentação do sistema.

6.1 Elicitação de requisitos

Requisitos podem ser definidos, segundo Sommerville (2011), como sendo a descrição do que o sistema deve fazer, os serviços oferecidos pelo sistema e as restrições relacionadas ao seu funcionamento. Já a norma IEEE std. 610 (1990), define requisitos como:

- I. Uma condição necessária para que o usuário solucione um problema ou atinja um objetivo;
- II. Uma condição que necessariamente precisa ser atendida em um sistema ou componente afim de satisfazer norma, especificação ou outro documento formal;
- III. A representação documentada de uma condição definida nos itens anteriores.

Requisitos podem ser divididos entre requisitos de usuário, requisitos de sistema e dentro dos requisitos de sistema temos requisitos funcionais e não funcionais.

Tratando dos requisitos de usuário, este tem o intuito de declarar o que o sistema oferece e as restrições desse sistema e explicitar se o sistema atende as características que o usuário deseja.

Já requisitos de sistema abrangem com detalhamento as funções, restrições e serviços, definindo e expressando exatamente aquilo que deverá ser implementado.

Requisitos funcionais são definidos como sendo aqueles que declaram as funções oferecidas pelo sistema e como se dá o comportamento do sistema em situações particulares ou específicas. Requisitos funcionais também podem, em alguns casos, explicitar o que o sistema não deve fazer.

Requisitos não-funcionais expressam as restrições relacionadas às funções abordadas pelo sistema, tais como tempo de processamento, restrições no desenvolvimento, segurança, usabilidade, custo, entre outras.

Apesar de haver definição na literatura do que são requisitos funcionais e não funcionais, autores concordam que a diferença entre eles as vezes pode não ser muito clara, visto que nem sempre os requisitos são independentes e que em muitas circunstâncias um requisito não funcional, ao ser seccionado, pode gerar requisitos funcionais (PETERS e PEDRYCZ, 2001).

Justamente por isso, o documento gerado no processo de elicitação é chamado de “especificação de requisitos”.

Na literatura é possível encontrar diferentes propostas para a elicitação de requisitos tais como método de perguntas e respostas, entrevistas com clientes, brainstorming e redução de ideias, *storyboards*, prototipagem, questionários, etnografia e casos de uso.

Neste trabalho, foram escolhidas três técnicas para a elicitação:

- a) Brainstorming e redução de ideias: sendo conhecida como uma técnica de elicitação eficiente para grupos pequenos, consiste em discutir ideias e determinar o que é importante para o sistema. É definida em duas fases, sendo uma levantar requisitos preliminares e a outra, ao final do projeto para consolidar os requisitos apontados (PAETSCH et al., 2003);
- b) Prototipagem: essa técnica consiste em avaliar as interações entre usuários finais e sistema. Para tanto, protótipos são desenvolvidos utilizando requisitos preliminares ou reaproveitados de outros sistemas. A avaliação do protótipo possibilita refinar os requisitos levantados (SHAMS-UL-ARIF e GAHYUR, 2009; ZOWGHI e COULIN, 2005);
- c) Casos de uso: o caso de uso pode ser definido como a criação de uma narrativa que envolve algum ator identificado como usuário do sistema e a sequência de transações realizadas por esse ator. Os casos de uso podem ser também

representados por diagramas que explicitam as interações usuário-sistema (BOOCH et al. 1998; RUMBAUGH *et al.*, 1999). Nesse contexto, além de possibilitar a avaliação de requisitos, permite descrever uma solução em alto nível (SOMMERVILLE, 2011).

O levantamento de requisitos não necessariamente precisa ser guiado por um único método (ALZAQEBAH et al., 2018). Na engenharia de requisitos, explicita-se que os métodos podem ser trabalhados em conjunto para atingir os objetivos, que consistem em eliciar requisitos corretamente, revisar esses requisitos e refiná-los para que a documentação do sistema seja compreensível aos desenvolvedores (GUNDA, 2008).

Para validar os requisitos elicitados, foram utilizados casos de uso e prototipação da interface do sistema assim como dos documentos que o mesmo deverá emitir.

6.2 Pseudocódigo

Pseudocódigo é uma técnica que se utiliza de palavras mais gerais para descrever um programa de computador. Sua linguagem, também chamada de linguagem natural, pode se assemelhar a uma linguagem de programação, entretanto não considera sintaxes específicas nem palavras chave da linguagem de programação propriamente dita, justamente por isso se emprega o termo “pseudo”.

O pseudocódigo apresenta vantagens sobre o vernáculo na especificação de algoritmos. O fato de ele ser claro e conciso, faz com que a implementação seja meramente a tradução dos comentários na linguagem de programação escolhida ou recomendada, sendo necessário apenas que na sua construção se tome atenção para que não existam instruções ambíguas (SCHACH, 2009).

Na Literatura, são encontrados resultados empíricos (GILMORE e GREEN, 1988; JONES, 1984; NORMAN, 1983) que concluem que quando os usuários ou programadores são apresentados ao um algoritmo construído com pseudocódigo, eles executam a codificação com maior precisão independente da linguagem escolhida, reduzindo a carga mental e auxiliando no processo de compreensão e depuração do programa (RAMADHAN, 2000).

A técnica PDL (Program Design Language), segundo Schach (2009), é justamente o modelo de escrita genérica e embasa o uso do Português Estruturado, mais conhecido como Portugol.

O acrônimo PORTUGOL é formado pelas palavras:

PORTUguês + alGOl + pascaL

Criado por Antonio Carlos Nicolodi e Antonio Manso em 1986, teve seu ponto de partida da tradução da linguagem de programação Pascal para a língua portuguesa, chamada ALGOL. A linguagem Algol foi muito usada em *mainframes* (computadores de grande porte) nas décadas de 80 e 90.

O nome Algol vem de “*Algorithmic Language*” e é considerada uma linguagem de programação de alto nível, sendo voltada principalmente para aplicações científicas.

No caso do emprego de pseudocódigo neste trabalho, apesar do uso de linguagem natural, foram considerados comandos comuns na linguagem python, sendo possível verificar esses traços ao longo do documento exposto neste trabalho.

É importante destacar que os algoritmos apresentados no trabalho não representam o algoritmo do sistema completo. Eles são apresentados com o intuito de guiar a implementação de passos desconhecidos por desenvolvedores que não conhecem técnicas de caracterização ou os modelos matemáticos nelas empregadas.

6.3 Documentação

A documentação de uma aplicação pode ser definida como sendo um artefato que é gerado com o objetivo de explicitar informações relacionadas ao sistema, claras o suficiente para fornecer conhecimento e cumprir a necessidade de comunicação (AMBLER, 2002; HUNT e THOMAS, 2000).

Alguns autores destacam que mesmo que exista atualização da documentação, a mesma pode ser considerada limitada devido ao uso de linguagem natural para descrever processos sistêmicos (JANICKI *et. al.*, 1997), possibilitando dubiedades em sua compreensão, que pode acarretar em problemas no desenvolvimento de softwares (COCKBURN e HIGHSMITH, 2001).

Na prática, a documentação é frequentemente disponibilizada de forma incompleta ou desatualizada, fazendo com que os padrões de qualidade não sejam atendidos. A falta da documentação em longo prazo pode acarretar na construção de códigos incompreensíveis ou

ainda, tornar quase inviável a detecção de erros no sistema. De acordo com Chapin (2000), à medida que a documentação se torna obsoleta, a confiança do sistema é drasticamente reduzida e o custo de manutenção é aumentado.

Alguns padrões de documentação são propostos pelo ISO 12207 e 6592, assim como pelo IEEE, nos documentos 829, 830 e 1074 e ISO/IEC/IEEE 29148. Esses documentos apresentam propostas de quais conteúdos devem ser incluídos na documentação considerando alguns fatores como complexidade do sistema, custo, tempo e outros.

Apesar da literatura apresentar pontos positivos e negativos, é consenso que mesmo que não totalmente compreensível ou atualizada, a documentação se faz extremamente necessária principalmente se tratando de sistemas complexos.

Como citado anteriormente, alguns padrões de documentação podem ser encontrados na literatura. Avaliando esses documentos, é possível observar que alguns itens, considerados primordiais e que agregam informações importantes à documentação de aplicação (TAB. 3), se repetem em todos os documentos, sendo estes:

Tabela 3 - Itens que devem compor a documentação de sistemas ou aplicações

ITEM	DESCRIÇÃO
Prefácio	Define a quem o documento interessa, descrevendo seu histórico, versões e responsável pela entrega do documento.
Introdução	Apresenta a necessidade que o sistema propõe suprir e como atenderá aos objetivos gerais solicitados pelo cliente.
Definição e especificação de requisitos	Descreve as ferramentas do sistema assim como seus requisitos, funcionais ou não funcionais. Pode utilizar diagramas, linguagem natural, tabelas, etc.
Arquitetura de sistema	Apresenta uma visão geral do sistema, mostrando a distribuição de funções entre os módulos.
Teste	Especifica detalhes da abordagem do teste e define o conjunto de casos de teste realizados junto às suas evidências.
Apêndices ou Atributos	Fornecer informações detalhadas sobre a aplicação como as configurações mínimas ideais para o sistema e resultados de testes e prototipação.

Fonte: autora da tese

Considerando a importância da documentação dos itens mais repetidos na literatura, a documentação foi construída levando em consideração os tópicos declarados na tabela 2.

6.4 Arquitetura do sistema

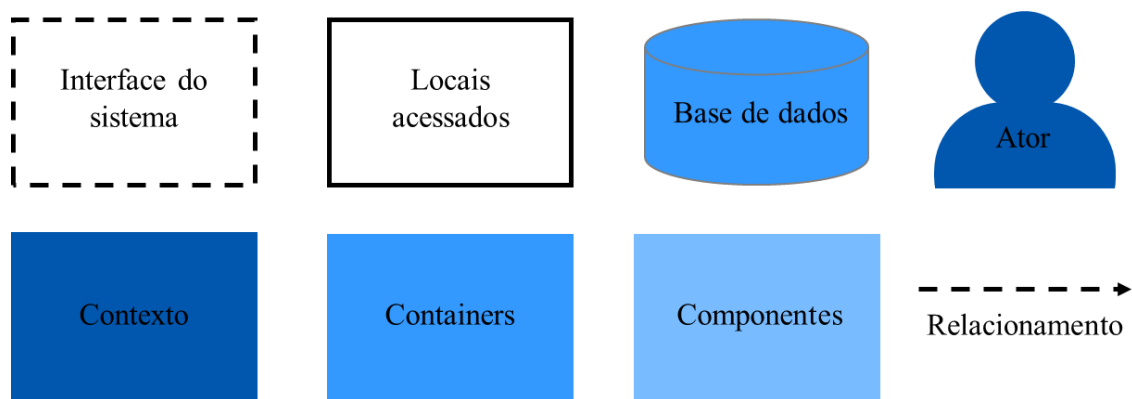
Tratando da arquitetura, esta é utilizada para demonstrar a estrutura do sistema em termos de elementos e o relacionamento entre esses elementos. Além disso, é possível definir os níveis de restrições e demonstrar a funcionalidade das interações entre os elementos do sistema. A arquitetura pode ser feita utilizando diferentes níveis de abstração, isso é, explicitando e restringindo regras e conceitos para que o escopo seja mantido dentro dos requisitos e proposta principal (ISO\IEC, 1996; DING *et al.* 2014).

A abstração utilizada na arquitetura do sistema desenvolvido neste trabalho se concentra na abstração de análise lógica, sendo aquela que decompõe o sistema em um conjunto de subsistemas ou ações possibilitando assim validar se o sistema terá o comportamento desejado, se há possibilidade de manutenção e/ou adaptação.

O modelo escolhido para a representação da arquitetura do sistema é baseado na modelagem C4. Esse tipo de modelagem apresenta a sintaxe mais simples e flexível do que a sintaxe apresentada na modelagem em UML (SIAU e LOO, 2006). Assim, temos o primeiro nível, chamado de diagrama de contexto, concentrado em apresentar de forma geral o sistema a ser modelado, e apresentar se existem interações externas que terão relação com sistema. O segundo nível decompõe o sistema em containers, descrevendo todos os componentes necessários para que o sistema desempenhe as funcionalidades que foram planejadas. Sendo assim, chegamos finalmente nos componentes que alimentam os contêineres, onde a relação entre os componentes deve fornecer a funcionalidade descrita no segundo nível (BROWN, 2017; VÁZQUEZ *et al.*, 2020). Para exemplificar a notação utilizada na modelagem C4, exemplos de relação são apresentados na figura 6.

É importante ressaltar que todos esses níveis podem ser divididos em outros níveis caso seja necessário para a melhora da compreensão das relações entre os itens que compõe o modelo. A modelagem C4, por possuir descrições explícitas e flexibilidade em sua construção, pode evitar a ambiguidade de termos e de compreensão de funções (VÁZQUEZ *et al.*, 2020).

O último nível dentro da modelagem C4 é a própria codificação, que não será abordada na tese.

Figura 6 - Notação de elementos utilizados na modelagem C4

Fonte: adaptado de *Structurizr tool* (<https://structurizr.com/>).

6.5 Teste de funcionalidade

Testes funcionais de algoritmo são limitados a determinação das saídas esperadas das funções aplicadas a um determinado conjunto ou massa de dados. Esse tipo de teste é utilizado para identificar funções incorretas, erro na ordem de variáveis ou falhas de comportamento (BRUNELLI, 2006).

De acordo com Pressman (2009), os componentes essenciais de um teste correspondem a descrição do comportamento esperado, uma descrição do domínio da função e uma forma de avaliar se o comportamento observado no teste está de acordo com o esperado.

Para validação dos algoritmos desenvolvidos em pseudocódigo, foram executados testes funcionais. Para isso, casos de teste³ foram construídos com dados obtidos de rejeitos radioativos reais. Os dados foram disponibilizados pelo Serviço de Gerência de Rejeitos Radioativos do IPEN e foram gerados por outros estudos que fizeram uso dos mesmos métodos algoritmizados.

Na elaboração e execução dos testes, em primeiro momento foi adotado o uso de testes de mesa, com intuito de avaliar a lógica transcrita para o algoritmo percorrendo por todas as funções.

³ Casos de teste são um conjunto de entradas, condições para execução, e resultados esperados desenvolvidos para um objetivo específico, como por exemplo executar passos de um algoritmo ou verificar a conformidade dos resultados esperados de acordo com os requisitos [IEEE,1991].

Ao final da elaboração dos algoritmos, os mesmos foram codificados na linguagem R e novos testes foram realizados utilizando a mesma massa de dados, permitindo revalidar o algoritmo e também a interpretação em desenvolvimento. Os resultados foram disponibilizados em folhas de teste e os artefatos gerados em R são apresentados no APENDICE B.

6.6 Prototipação

Um protótipo pode ser definido como uma representação de interface para simular funcionalidades a partir de requisitos e especificações preliminares. Dumas e Redish (1994), Rubin (1994) e Pearrow (2000; 2007) destacam em seus estudos que protótipos são utilizados como estudo exploratório para elucidar questões acerca do projeto de uma determinada aplicação ou ainda, trazer melhorias para um projeto. Os protótipos não necessariamente necessitam ser completos ou funcionais. Podem ser somente uma representação de módulos específicos ou ainda podem ser protótipos horizontais (no qual o usuário pode se mover lateralmente, mas não permite a navegação em profundidade) ou verticais (na qual toda a funcionalidade é representada por um grupo de atividades, tornando obrigatória a execução de determinadas tarefas).

Dumas e Redish (1994) também classificam os protótipos como estáticos, que são feitos em papel, ou interativos, feitos em ferramentas específicas para prototipação. Ambos os tipos, segundo Mayhew (1999) e Klee (2000) podem ser avaliados por dimensões que definem a fidelidade, sendo:

- Detalhamento: quantidade de detalhes envolvidas no protótipo;
- Grau de funcionalidade: extensão no detalhamento e completude de operações;
- Refinamento estético: quão realista o modelo é;
- Similaridade de interação: similaridade de operações em comparação ao produto final.

Considerando essas dimensões, estabelecem-se os seguintes níveis: protótipos de baixa, média e alta fidelidade (PETRIE, 2006).

Para protótipos de baixa fidelidade, não se apresentam detalhamento e interações. Os protótipos podem ser desenvolvidos em papel com o desenho das telas em sequência e normalmente é utilizado para avaliação do projeto inicial.

Já protótipos de média fidelidade se diferenciam do primeiro nível pois apresentam fidelidade próxima à esperada do produto final. Além disso, é feita em aplicativos dedicados e possibilita a navegação entre telas permitindo a avaliar o comportamento do usuário.

Protótipos de alta fidelidade são chamados também de protótipos executáveis. Comumente são produzidos utilizando alguma linguagem de programação e já possuem funcionalidades implementadas. Esses protótipos normalmente são reaproveitados no produto final.

Neste trabalho, optou-se por utilizar a prototipação em médio nível, visto que seu desenvolvimento teve o intuito de validar os requisitos elicitados e realizar correções desses requisitos. A ferramenta escolhida para a modelagem foi o FIGMA[®], que possibilitou a construção de um protótipo navegável, simulando o acesso de um ator sem restrições dentro do sistema. A navegação não incluiu atividades executáveis (como exemplo uso dos módulos de cálculo). A prototipação também incluiu o modelo da plataforma mobile assim como relatórios e etiquetas gerados pelo sistema.

7 RESULTADOS

7.1 Métodos de caracterização

A caracterização físico-química do rejeito requer, em geral, métodos simples de pesagem, medição do volume, determinação de pH e, às vezes, análises mais elaboradas para determinação da composição química. No entanto, esses métodos são de aplicação simples. A caracterização radiológica é a que demanda métodos complexos, caros e de difícil execução, em muitos casos. O sistema informatizado para automatizar a garantia da qualidade e o registro das informações de caracterização tem, como alvo principal, a caracterização radiológica dos rejeitos.

Para que o gerenciamento de rejeitos radioativos possa ser realizado alcançando os objetivos de segurança e economicidade, é necessário efetuar a caracterização isotópica, cuja primeira etapa consiste na determinação das concentrações de atividade dos radionuclídeos contidos neles (IAEA, 2007). Essa informação é indispensável para que o rejeito radioativo final acondicionado cumpra com os critérios de aceitação do repositório onde será depositado de forma definitiva (SINGLEDECKER *et al.*, 2012; ICRP, 2007; ISO, 2007).

Os métodos de caracterização radiológica que foram identificados, para cumprir com o objetivo específico (a), que estão em uso ou prestes a serem usados no país, são:

1. Informação do gerador

Consiste em obter, verificar, certificar e adotar as informações fornecidas pelo gerador. Essas informações, uma vez assegurada sua validade, são inseridas no sistema de gerenciamento do rejeito, dispensando outras análises.

2. Análise radioquímica de amostras

Consiste em obter amostras representativas do rejeito e nelas efetuar as análises já consagradas para determinar as concentrações dos radionuclídeos relevantes, por meio de separação química dos elementos alvo e medição apropriada da intensidade das emissões de radiação de cada radioisótopo relevante presente. Instrumentos específicos para

determinação da concentração de emissores de raios alfa, beta, gama e X são usados para cada radioisótopo em particular. A atividade de cada radionuclídeo é calculada a partir dessas concentrações e registrada no sistema.

3. Análise radiométrica simples de amostras ou de embalagens completas

Consiste em:

- a) medir a intensidade da emissão total de raios alfa, total de raios beta, em amostras, nos casos específicos em que os resultados já bastam para determinação do inventário dos emissores desses tipos de radiação;
- b) medir a intensidade da emissão de raios gama e X em amostras, nos casos específicos em que os resultados já bastam para determinação do inventário dos emissores desses tipos de radiação;
- c) medir a intensidade de emissão no volume total do rejeito, particularmente no caso de fontes seladas, mas também em embalagens completas, nos casos, por exemplo, de radionuclídeo único na embalagem.

4. Aplicação da relação dose x atividade em embalagens completas

Consiste em medir a intensidade da emissão total de raios gama em pontos a distâncias pré-estabelecidas da superfície da embalagem, e, por meio de modelagem da geometria fonte-detector, como Point-Kernel ou Monte Carlo, calcular a concentração de atividade dos emissores.

5. Aplicação de fatores de escala e funções de correlação a embalagens completas

Consiste em aplicar o método dose x atividade em embalagens completas para calcular as atividades dos emissores de raios gama e aplicar fatores de escala pré-determinados para calcular as atividades dos RDM.

6. Análise radiométrica de varredura de embalagens completas

Consiste em fazer uma varredura gama na embalagem de rejeito e aplicar a modelagem de um software aos resultados de modo a reconstruir a distribuição espacial de atividade.

7. Análise radiométrica tomográfica de embalagens completas

Consiste em aplicar a varredura gama e a modelagem do software do item anterior, mas corrigir os resultados por meio dos resultados de uma tomografia que indique a variação de densidade de um rejeito heterogêneo.

8. Radiometria passiva de nêutrons em embalagens completas

Consiste em estimar a quantidade de actínídeos presentes em uma embalagem de rejeito, principalmente Pu-238, Pu-240, Pu-242 e Cm-242, Cm-244, medindo a emissão dos dois a quatro nêutrons que ocorre após fissão espontânea desses radioisótopos, ou a emissão de um nêutron que ocorre em reações (a,n) que ocorrem na interação das partículas alfa emitidas pelos actínídeos com núcleos dos átomos de Be, B, C, O, F etc., presentes no rejeito.

9. Radiometria ativa de nêutrons em embalagens completas

Consiste em irradiar a embalagem com nêutrons e medir os nêutrons imediatos e atrasados das fissões induzidas, para identificar e quantificar os isótopos físséis presentes.

10. Modelagem da instalação geradora

Em algumas instalações, os fluxos de rejeito são bastante estáveis do ponto de vista de características físico-químicas e de inventário radioisotópico. Dois exemplos desse tipo de instalação que podem ser citados são uma planta de purificação de yellow-cake e uma planta de produção de radioisótopos. Nos dois casos, os rejeitos rotineiros são gerados sempre em quantidades iguais, campanha a campanha de operação e de produção. Quando isso ocorre, os fluxos de rejeito podem ter sua composição radioquímica determinada por meio de uma modelagem dos processos da instalação. Na referência Vicente & Dellamano (1989), há um exemplo de modelagem de uma instalação piloto de refino e conversão de urânio de modo a determinar as concentrações de radionuclídeos nos fluxos de rejeito da instalação e em Endo & Dellamano (1991) e Vicente et al. (1991) a modelagem de uma planta para produção de Mo-99 de fissão pela via alcalina faz uma estimativa das atividades dos fluxos de rejeito produzidos.

Cada um desses métodos de caracterização de rejeitos está em estágio mais ou menos avançado de uso na rotina operacional das instalações radiativas e nucleares.

Dentre os métodos de caracterização utilizados atualmente, foram selecionados os métodos radioquímico, dose-to activity, fatores de escala e função de correlação para modelagem no presente trabalho de modo a possibilitar a elaboração do código (APÊNDICE

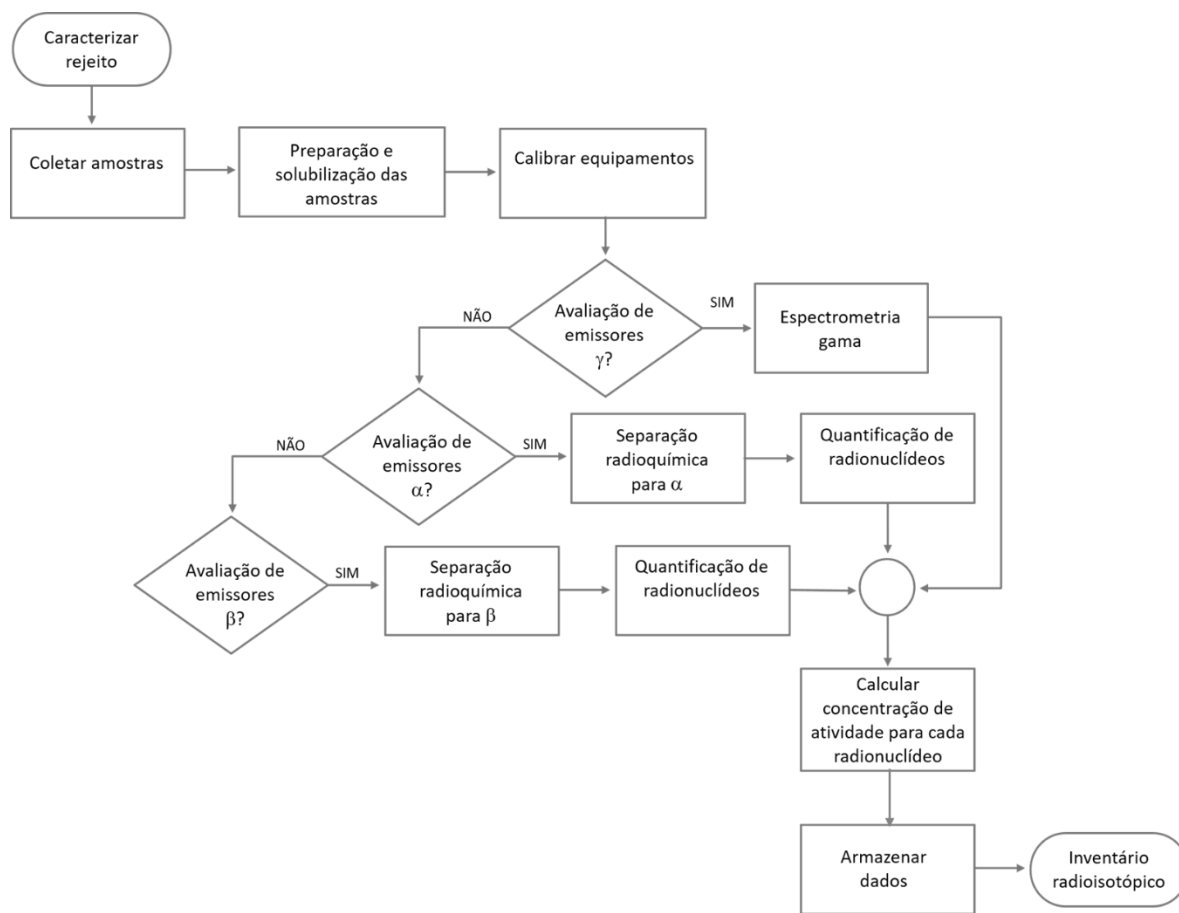
A) para a documentação. Os outros métodos serão modelados em futuros trabalhos na instituição, à medida que forem sendo implantados.

7.1.1 Radioquímico

Um dos grandes problemas enfrentados na caracterização de rejeitos radioativos é a presença de emissores alfa ou beta puros, o que torna impossível realizar medições diretas do embalado de rejeito (KEKKI e TIITTA, 2000). Deste modo, para a obtenção do inventário radioisotópico é necessário utilizar métodos radioquímicos para a caracterização. Esses métodos consistem na retirada e processamento de amostras de rejeitos radioativos e aplicação de técnicas para isolar o elemento químico, por exemplo, precipitação, extração com solventes, cromatografia e troca iônica.

As informações que podem ser obtidas como dados do método para entrada no sistema informatizado são: informações gerais do rejeito (origem, data de geração, características físicas e químicas, responsáveis, informações de proteção radiológica, dados da embalagem), resultados de espectrometria de raios gama e de partículas alfa, medição dos emissores beta, normas de análise e status de validação do método, equipamentos utilizados, e outras informações relevantes para o histórico do rejeito (FIG. 7).

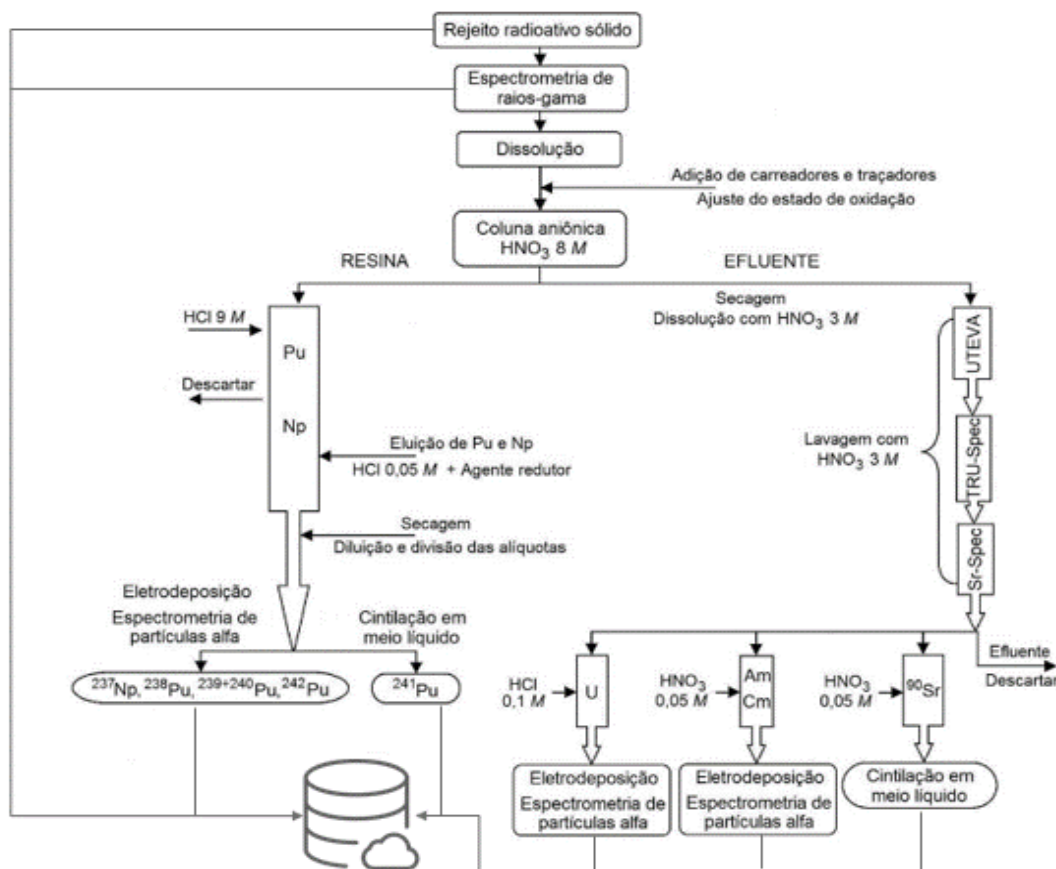
Figura 7 - Método radioquímico



Fonte: autora da tese

Ao longo da última década, a maioria dos radionuclídeos relevantes foi contemplada no desenvolvimento de métodos de análise radioquímica como resultado de projetos de caracterização de rejeito de usinas nucleares e outras instalações do ciclo do combustível nuclear, reatores de pesquisa, plataformas de petróleo e outras minerações. A Figura 8 é um exemplo de fluxograma de processo que será arquivado no sistema.

Figura 8 - Fluxograma da determinação sequencial dos isótopos de U, Np, Pu, Am, Cm e Sr-90 e exemplo de dados que serão armazenados no sistema



Fonte: adaptado de Taddei, 2013

Assim, na aplicação desenvolvida o material ou rejeito é registrado e o sistema gera uma etiqueta, seja ela para a amostra ou embalagem. Os relatórios obtidos nas análises alfa, beta e gama devem ser carregados ou digitados manualmente com a construção de uma tabela para que permaneçam acessíveis ao longo do tempo para uso posterior. Além disso, o registro das taxas de dose para amostras e embalagens deve ser mantido. Esses registros podem ser atualizados por um módulo móvel, a partir da leitura das etiquetas geradas pelo sistema, incluindo novamente o detector utilizado, data da medida, registro da calibração e data de calibração.

7.1.2 Radiometria: dose para atividade (*dose-to-activity*)

Para os emissores de raios gama, existem métodos que determinam a atividade com certa exatidão e que consistem em medir a taxa de dose a certa distância da embalagem final (PROKHORETS et al. 2007; LIERSE et al. 1995), em combinação com modelos físico-matemáticos do processo de medição. Dentre eles destaca-se o método de *Point-Kernel* e a modelagem pelo método de Monte Carlo.

Essas duas modelagens são utilizadas para estimar o número de fótons emitidos pelo rejeito com atividade unitária que passa por um ponto, o ponto onde é feita a medição. A dose resultante desse fluxo é comparada com o valor medido e a proporção entre eles é usada para corrigir o valor inicial da atividade.

O método ‘dose para atividade’ é bastante usado na rotina de gerenciamento de rejeitos radioativos pelo baixo custo, rapidez e por resultar em dose baixa para o operador, principalmente quando os rejeitos analisados são de médio ou alto níveis de radiação (ANTILLA, 1996; KLOOSTERMAN e HOOGENBOOM, 1988).

O método de *Point Kernel* descrito por Rockwell (ROCKWELL, 1956) é um método semiempírico em que se calcula a contribuição de cada radionuclídeo para o fluxo de fótons no ponto de medição e esse para a taxa dose de radiação (EQ. 1).

$$\dot{D} = \phi \cdot G \quad (1)$$

Onde:

\dot{D} : Taxa de dose no ponto P, dado em Gy.h⁻¹;

ϕ : fluxo de fótons no ponto P, dado em cm⁻².s⁻¹;

G: fator de dose por unidade de fluxo de fóton, dado em Gy. h⁻¹.cm².s

Para calcular a dose corretamente, é necessário levar em consideração dois fatores: *build-up* e coeficientes de atenuação.

Em especial, o fator de *build-up* permite que se obtenha um valor intermediário entre coeficiente de atenuação linear e energia (KLOOSTERMAN e HOOGENBOOM, 1988; HERMAN, 1991; ANTILLA, 1996; AMERICAN NUCLEAR SOCIETY, 1988; AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, 1991; CHIBANI, 2001). Esse meio termo é

necessário pois a interação de fótons gama com a matéria pode se dar de várias formas, tais como efeito fotoelétrico, efeito Compton, produção de pares e difusão elástica, sendo que a ocorrência de cada um desses fenômenos dependerá diretamente da intensidade do feixe de fótons e do meio pelo qual esse feixe deverá atravessar até um ponto específico (ponto P).

O coeficiente de atenuação linear, declarado μ , pode ser considerado como sendo a fração de fótons de energia que interagem com a blindagem, por centímetro de material da blindagem. Este coeficiente assume que todos os fótons que interagem são removidos e ignora o espalhamento Compton e também a produção de pares, portanto, subestima a taxa de dose calculada (EQ. 2). (KLOOSTERMAN e HOOGENBOOM, 1988).

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (2)$$

Em que:

I= Taxa de dose que foi blindada

I_0 = Taxa de dose inicial

μ = coeficiente de atenuação linear em cm^{-1}

X= espessura da blindagem em cm

O coeficiente de atenuação mássico, declarado (μ/ρ), é considerado como sendo a fração de energia dos fótons removidos por meio de blindagem, por centímetro de material de blindagem, *ou* ainda a fração de energia absorvida pela própria fonte. Este coeficiente leva em conta o espalhamento Compton e produção de pares, *mas* supõe-se que todos os fótons espalhados chegam ao detector (EQ. 3).

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu/\rho \cdot x} \quad (3)$$

Em que:

I= Taxa de dose que foi blindada;

I_0 = Taxa de dose inicial;

μ = coeficiente de absorção linear de energia em cm^{-1} ;

ρ = densidade do meio material da blindagem (g/cm^3);

X= espessura da blindagem em cm.

Sabendo disso, os valores de *build-up* podem ser obtidos pela equação de Taylor (EQ. 4):

$$B = A_1 \cdot e^{-\alpha_1 \mu_s x} + A_2 \cdot e^{-\alpha_2 \mu_s x} \quad (4)$$

Em que:

B: é o fator de *build-up* para os fótons espalhados de energia = E (MeV);

A₁, e α₁, α₂: são coeficientes do fator de *Build-up*, parâmetros empíricos que dependem da energia do fóton e do meio absorvedor;

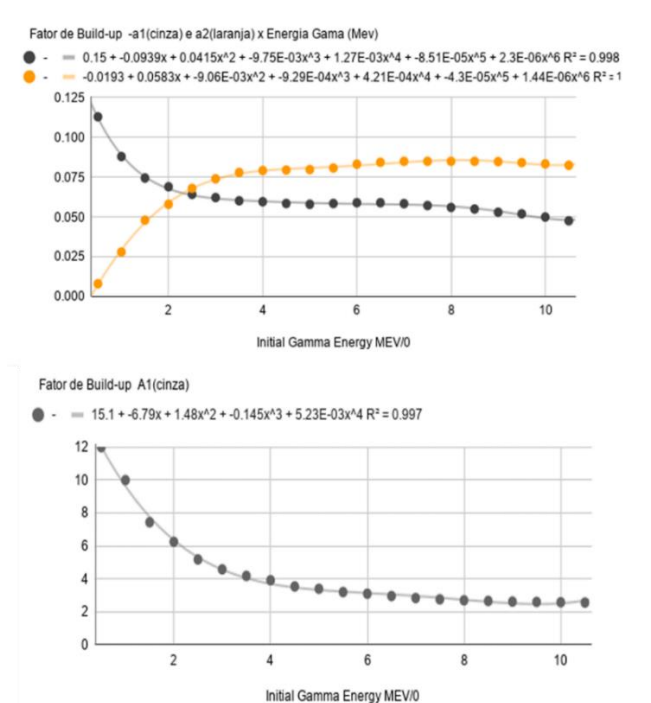
A₂ = 1- A₁;

μ_s: são os coeficientes de atenuação linear do material da blindagem;

x: a espessura do material da blindagem.

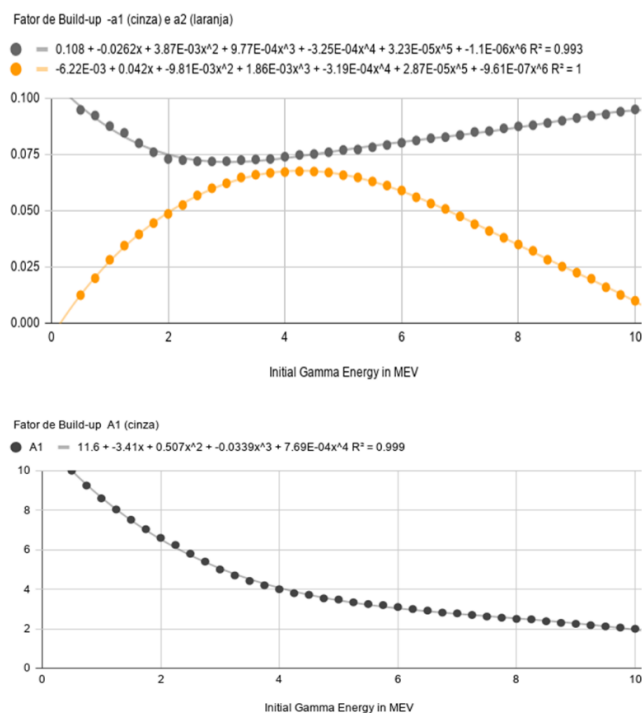
Para a construção do algoritmo, os valores de *build-up* foram previamente interpolados para os quatro materiais mais comuns utilizados na blindagem de rejeitos radioativos: concreto (FIG.9), ferro (FIG. 10), chumbo (FIG. 11) e água (FIG. 12). Os valores utilizados para a obtenção das curvas dos parâmetros A₁, e α₁, α₂ foram retirados dos gráficos apresentados por Rockwell (1956).

Figura 9 - Curvas para build-up do concreto



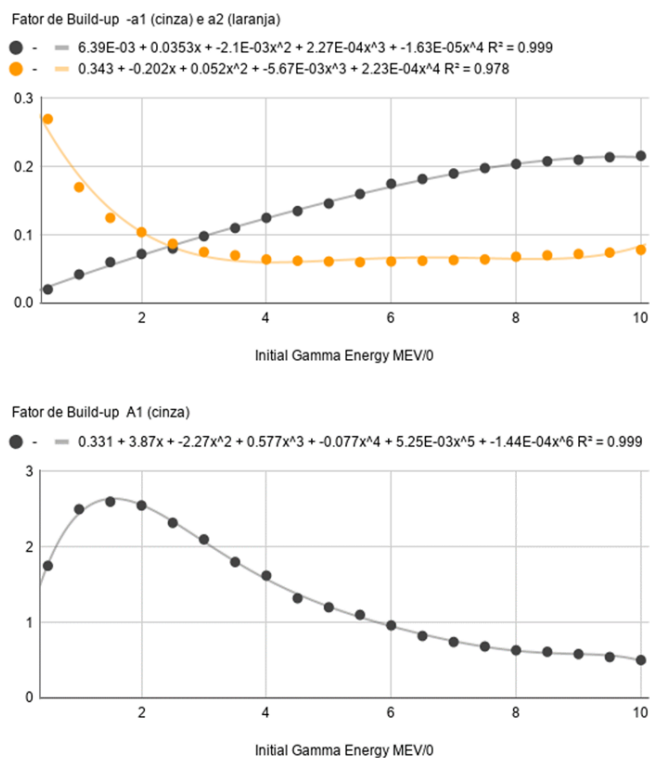
Fonte: autora da tese

Figura 10 - Curvas para build-up do ferro



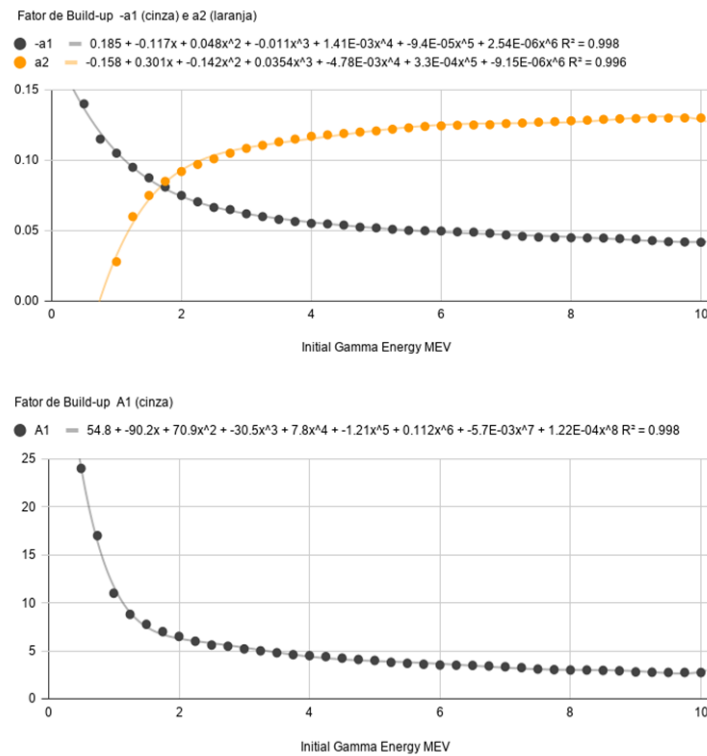
Fonte: autora da tese

Figura 11 - Curvas para build-up do chumbo



Fonte: autora da tese

Figura 12 - Curvas para build-up da água



Fonte: autora da tese

No método “*dose-to activity*” ou “*dose-para-atividade*”, ou ainda “*dose-para Bequerel*”, define-se uma equação específica para cada tipo de geometria para o cálculo de fluxo de fótons.

Para este trabalho, foram definidas três geometrias que são mais usuais: puntiforme (EQ. 5, FIG. 13), placa infinita (EQ. 6, FIG. 14) e cilindro (EQ. 7, FIG. 15).

$$\phi = B \frac{S}{4\pi a^2} e^{-b_1} \tag{5}$$

em que:

ϕ : fluxo de fótons no ponto de medida P

B é o fator de *build up* da blindagem

S é a concentração de atividade, dada fótons.seg⁻¹

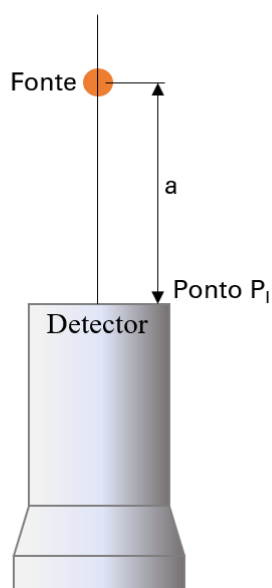
a é a distância do ponto de medição até a fonte, dada em cm

b_1 somatória de todas as atenuações de radiação das blindagens = $\sum_i^n \mu_i t_i$

em que: μ_i é o coeficiente de atenuação da radiação de cada material de blindagem, dado em cm⁻¹

e t_i é a espessura de cada blindagem.

Figura 13 - Geometria puntiforme

Puntiforme

Fonte: autora da tese

$$\phi = \frac{BS_V}{2\mu_s} [E_2(b_1) - E_2(b_3)] \quad (6)$$

Onde:

ϕ : fluxo de fótons no ponto de medida P

B é o fator de build up da blindagem

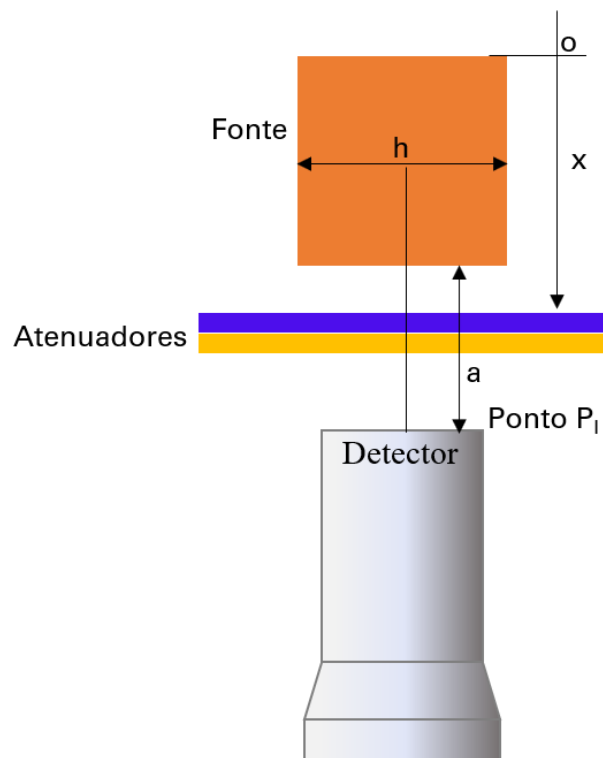
S_V é a concentração de atividade, dada em fótons. $\text{cm}^{-3} \cdot \text{seg}^{-1}$

b_1 somatória de todas as sessões de choque multiplicados pela espessura das blindagens da fonte ($\sum_i^n \mu_i t_i$)

b_3 é b_1 somado a sessão de choque da fonte multiplicado pela sua espessura ($b_1 \mu_s h$)

μ_s é o coeficiente de atenuação da fonte, e

h é a espessura da placa.

Figura 14 - Geometria placa infinita (cúbica)**CUBICA**

Fonte: autora da tese

$$\phi = \frac{BS_V R_0^2}{2(a + Z)} F(\theta, b_2) \quad (7)$$

em que:

 ϕ : fluxo de fótons no ponto de medida P

B é o fator de build up da blindagem

 S_V é a concentração de atividade, dada em fótons. $\text{cm}^{-3} \cdot \text{seg}^{-1}$. R_0 é o raio do tambor, dado em cm;

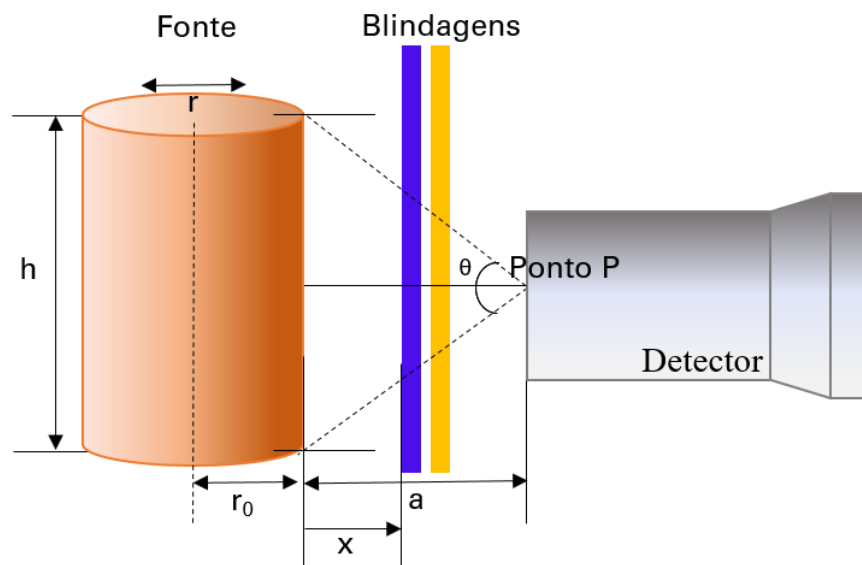
a é a distância do ponto de medição até a superfície da fonte, dado em cm;

Z é chamada de distância equivalente de atenuação, dada em cm;

 $b_2 = b_1 + \mu_s \cdot Z$ em que μ é o coeficiente de atenuação na fonte, dada em cm^{-1} , e $\theta = \theta_1 = \theta_2$, para ponto P no plano mediano do cilindro.

Figura 15 - Geometria cilíndrica

CILINDRO

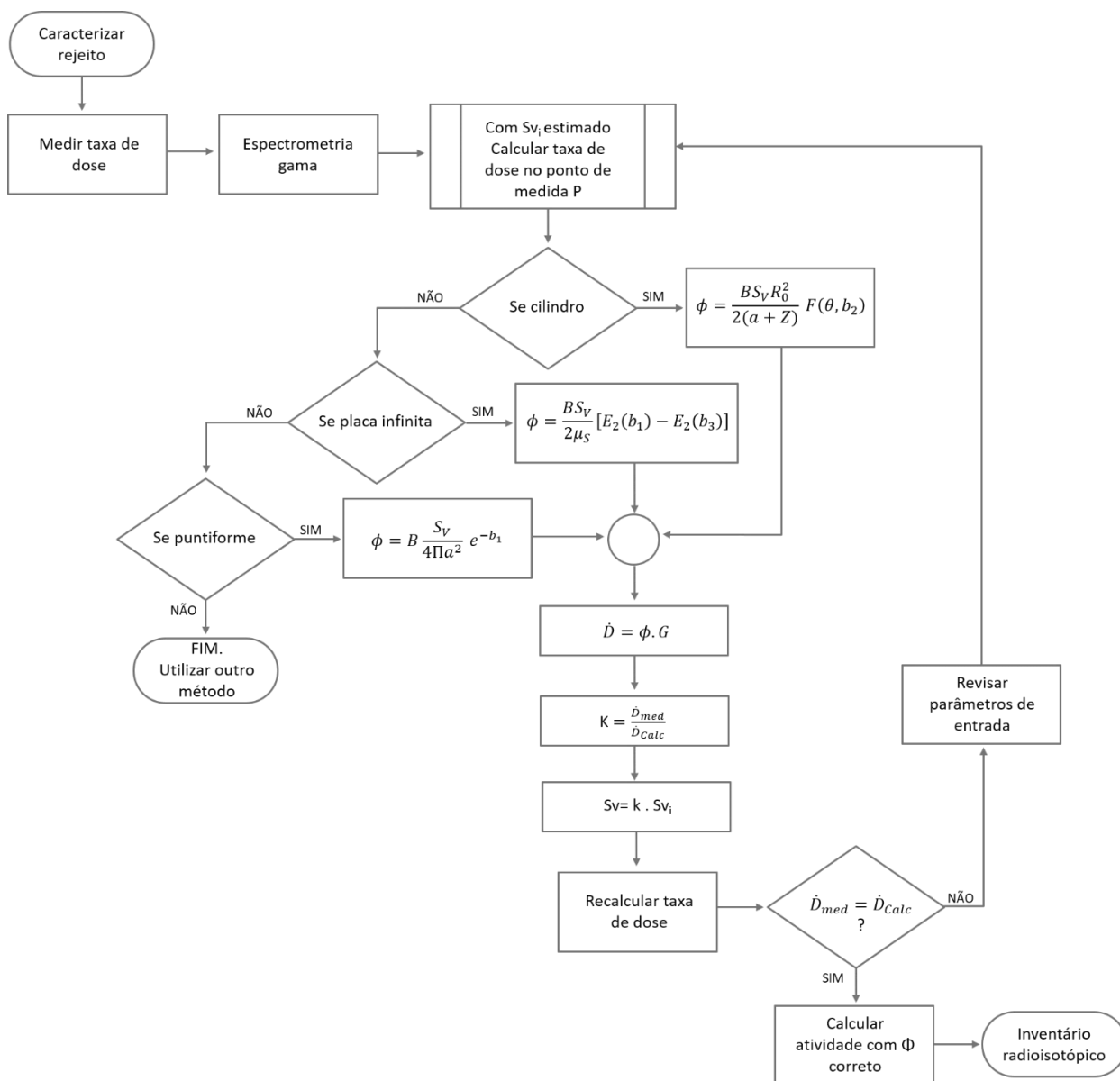


Fonte: autora da tese

O cálculo inicial da taxa de dose nas posições de medição pode ser feito com quaisquer valores de S_{Vj} , desde que as proporções entre as taxas de emissão de qualquer par de energias de fótons estejam de acordo com as taxas detectadas ou determinadas anteriormente.

Finalmente, os valores de S_v são ajustados para que a taxa de dose calculada coincida com o valor medido. O ajuste é feito calculando a média das proporções entre os valores medidos e calculados na distância escolhida, no caso de múltiplas medidas, e multiplicando a média pela estimativa inicial dos valores de S_{Vj} . Para verificar a precisão do método, os novos valores calculados de S_{Vj} de cada energia são traduzidos para a atividade dos radionuclídeos correspondentes, considerando o rendimento da emissão de fótons por decaimento. As atividades são usadas para calcular a taxa de dose nas posições de medição (FIG. 16).

Figura 16 - Método de point kernel



Fonte: autora da tese

Um conjunto de aproximadamente 5.000 pontos de dados foi interpolado manualmente para obter as curvas polinomiais usadas no algoritmo dose-para-atividade. Uma biblioteca de energias e rendimentos foi construída a partir da identificação e categorização de radioisótopos comuns decorrentes de atividades de mineração, operação de reatores, operação de aceleradores, produção de radioisótopos e descarte de fontes seladas, que poderá ser aplicada em todos os métodos apresentados. Também foi construída uma biblioteca de materiais, com 102 materiais na última atualização, para possibilitar o cálculo dos coeficientes de atenuação e estabelecer densidades padronizadas em uma única referência. Os valores dos coeficientes de

atenuação para a construção das curvas foram retirados do NIST Standard Reference. As curvas construídas incluem energias de 1 keV a 20 MeV.

Para materiais não contemplados ou materiais mistos, um módulo de aproximação foi construído no sistema apenas inserindo o percentual da composição. Como retorno, um material base é definido para viabilizar o cálculo. Após o cálculo, os valores de atividade corrigidos e os valores de dose corrigidos são gerados. Esses valores serão então comparados com os valores medidos para validação.

Os valores obtidos farão parte do inventário radioisotópico do embalado do rejeito, que também poderá ter suas taxas de dosagem atualizadas com o módulo móvel.

7.1.3 Fator de escala e função de correlação

Na identificação e determinação de radionuclídeos de difícil medição (RDM'S) em rotina de caracterização de rejeitos é possível utilizar o método radioquímico associado com o método radiométrico (TADDEI, 2013a), chamado de método dos fatores de escala.

No método de fatores de escala (EQ. 8), as concentrações dos RDM's são avaliadas multiplicando as concentrações dos radionuclídeos-chave (RC's), determinadas pelo método radiométrico, por fatores calculados previamente com base nos dados dos radionuclídeos obtidos por meio de análise radioquímica. Em outras palavras, é estabelecida uma correlação entre as atividades dos RDM's e dos RC's (IAEA, 2009 (c); TADDEI et al. 2013b) que se pode aplicar a uma grande quantidade de embalagens de rejeitos, a partir de uma amostra representativa delas, tanto para rejeitos já existentes como para aqueles que venham a ser gerados na mesma instalação e pelos mesmos processos (FIG. 17).

Assim, a atividade de um RDM é dada por:

$$A_{RDM} = FE \cdot A_{RC} \quad (8)$$

Onde:

A_{RDM} : atividade de um radionuclídeo de difícil medição;

FE: fator de escala;

A_{RC} : atividade do radionuclídeo chave.

A determinação do fator de escala deve seguir os seguintes passos:

- a) Calcular o valor da proporção P_i entre as atividades do RDM e do RC obtidas nas medições de N amostras do rejeito;
- b) Calcular o logaritmo natural de cada razão;
- c) Somar os resultados e dividir pelo número total N de medições;
- d) Elevar a base “e” dos logaritmos naturais ao resultado do item anterior para obter o valor da média geométrica das proporções.

Assim, FE é dado por:

$$\overline{FE} = e^{\frac{\sum_{i=1}^n \ln P_i}{N}} \quad (9)$$

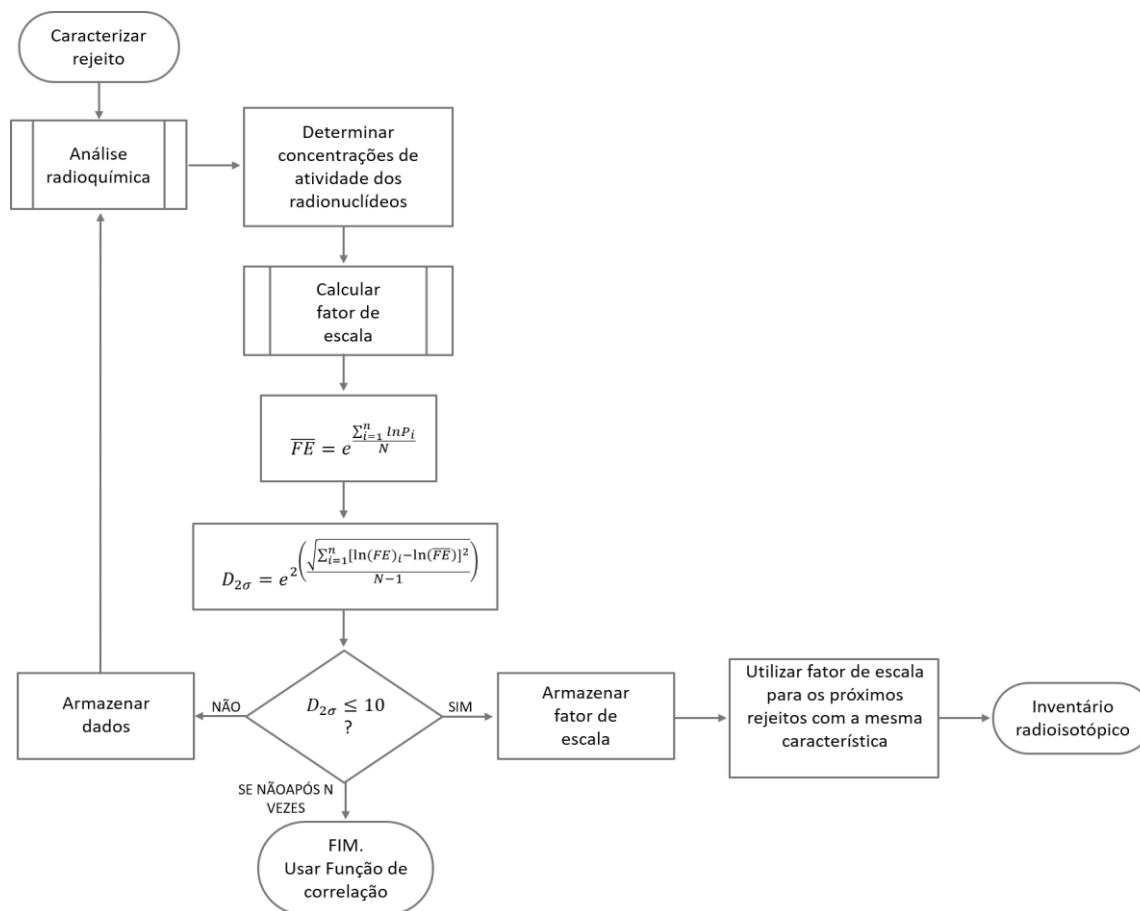
Esse fator de escala é a média geométrica das proporções obtidas em cada medição das atividades do par RDM e RC, porque esses valores usualmente variam por ordens de grandeza para um mesmo rejeito e um mesmo radionuclídeo em diferentes medições. Um fator de escala pode ser considerado aplicável na determinação das atividades de RDM'S se a dispersão dos resultados individuais das proporções, 2σ , for menor ou igual a 10.

$$D_{2\sigma} = e^{2 \left(\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n [\ln (FE)_i - \ln (\overline{FE})]^2}}{N-1} \right)} \quad (10)$$

A existência de um FE útil para o conjunto de dados é definida pelo critério de aplicabilidade, o qual requer que 95,5% das proporções obtidas nas medições estejam dentro da faixa:

$$\frac{\overline{FE}}{10} \leq (FE)_i \leq \overline{FE} \cdot 10 \rightarrow D_{2\sigma} \leq 10 \quad (11)$$

Figura 17 - Método de fatores de escala



Fonte: autora da tese

Alguns radionuclídeos de difícil medição já foram correlacionados com radionuclídeos chave, como apresentado na tabela 4.

É importante ressaltar que cada instalação deve ter seus próprios valores de função de escala estabelecidos.

Tabela 4 - Relação entre RDM's e RC's

RDM's	RC's
C-14, Fe-55, Ni-59, Zr-93, Nb-94, Tc-99, Ag-108m	Co-60
Sr-90, I-129, Pu-239	Co-60, Cs-137
Cs-135	Cs-137
U-238, Pu-238, Pu-240, Pu-241, Pu-242, Am-241, Cm-242, Cm-243, Cm-244	Pu-239

Fonte: adaptado de TADDEI 2013 e GERALDO 2018

Os fatores de escala dependem diretamente de um conjunto de resultados para a obtenção do $D_{2\sigma} \leq 10$, segundo Kashiwagi et al. (2000), o número de dados para o limite de confiança está entre 20 e 40 dados. Segundo seu estudo, o valor ideal de um conjunto de dados é aquele em que não se observa mais melhoria estatística e o investimento para a obtenção de mais dados também não produzirá melhorias apreciáveis.

A obtenção de um conjunto de $N=20$ ou mais é viável em algumas situações, entretanto, quando se trata de rejeitos de alta atividade ou que não são produzidos constantemente, $N=20$ ou mais pode demorar anos para ser obtido. Nesses casos, é possível que se obtenha fatores de escala com um conjunto menor de dados (TADDEI, 2013).

Há casos de rejeitos em que não se obtém nenhum fator de escala, porque as proporções variam em função da concentração. Nesses casos, é feita uma segunda tentativa de relacionar a atividade de um RDM com um RC, buscando por uma função de correlação (EQ. 12), com base no pressuposto de que existe uma função que descreve a relação entre as atividades. Nesse caso:

$$A_{RDM} = a \cdot (A_{RC})^b \quad (12)$$

Onde a e b são constantes. De uma forma mais conveniente, essa relação pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\ln(A_{RDM}) = \ln(a) + b \cdot \ln(A_{RC}) \quad (13)$$

Assim, uma linha reta poderá ser ajustada aos valores dos logaritmos das atividades medidas utilizando o método dos mínimos quadrados ou regressão linear de logaritmos.

Tratando de a e b , esses são calculados pela equação:

$$\begin{bmatrix} \ln(a) \\ b \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N \frac{X_i^2}{\sigma_i^2} & -\sum_{i=1}^N \frac{X_i}{\sigma_i^2} \\ -\sum_{i=1}^N \frac{X_i}{\sigma_i^2} & \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{\sigma_i^2} \\ \sum_{i=1}^N \frac{y_i X_i}{\sigma_i^2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Em que:

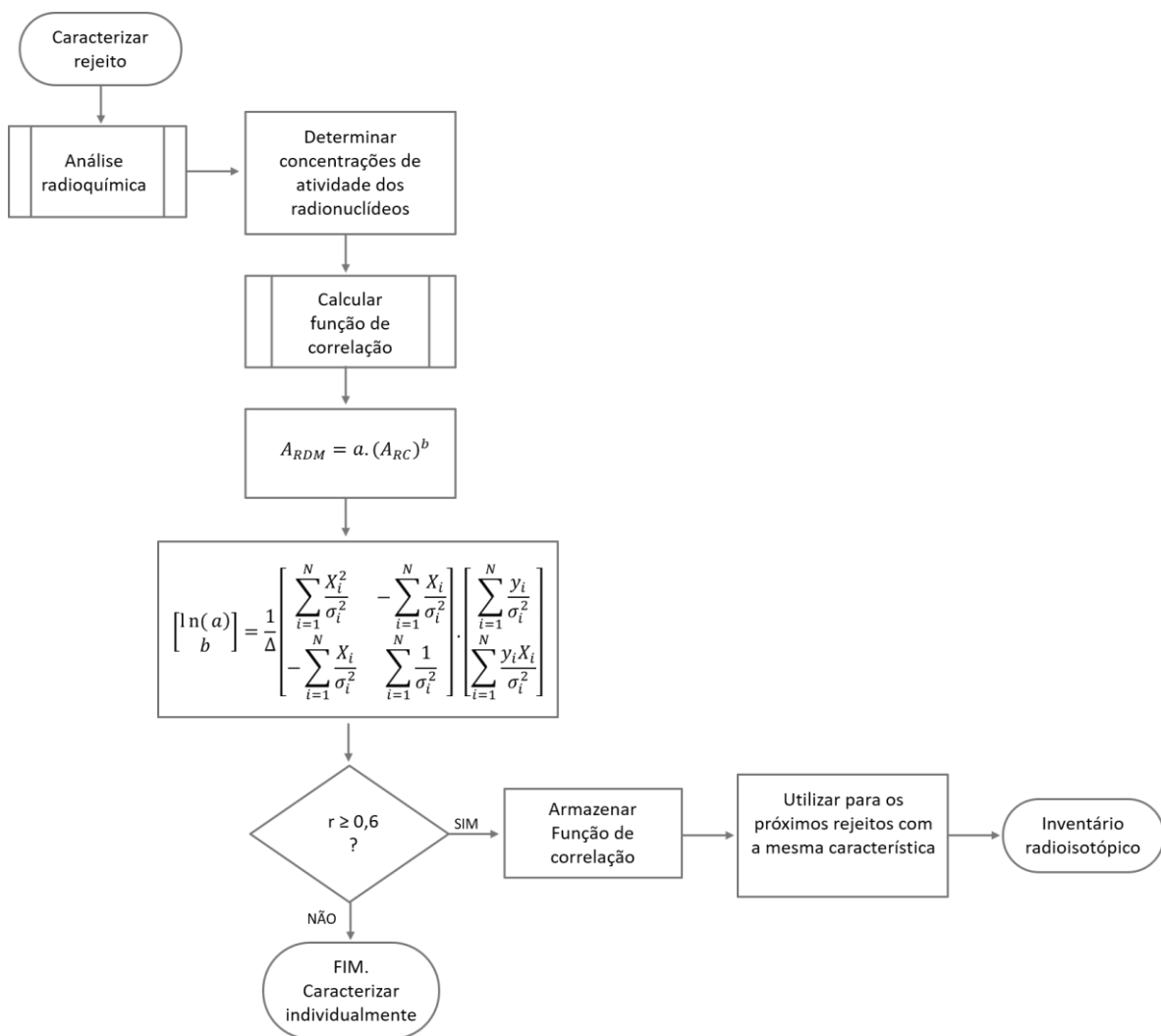
$$\Delta = \left[\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^N \frac{X_i^2}{\sigma_i^2} \right] - \left[\sum_{i=1}^N \frac{X_i}{\sigma_i} \right]^2 \quad (15)$$

A medida do grau de correlação entre as duas atividades é fornecida pelo Coeficiente de Correlação r :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N X_i y_i - \frac{(\sum_{i=1}^N X_i) \cdot (\sum_{i=1}^N y_i)}{N}}{\sqrt{\left[\left(\sum_{i=1}^N X_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N X_i)^2}{N} \right) \left(\sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N y_i)^2}{N} \right) \right]}} \quad (16)$$

A existência de uma função de correlação aceitável para o conjunto de dados é definida pelo critério $r \geq 0,6$ (FIG. 18).

Figura 18 - Método de função de correlação



Fonte: autora da tese

O algoritmo construído para fatores de escala e função de correlação destaca os chamados 'radionuclídeos chave' e os 'radionuclídeos difíceis de medir'. Caso não seja possível obter o

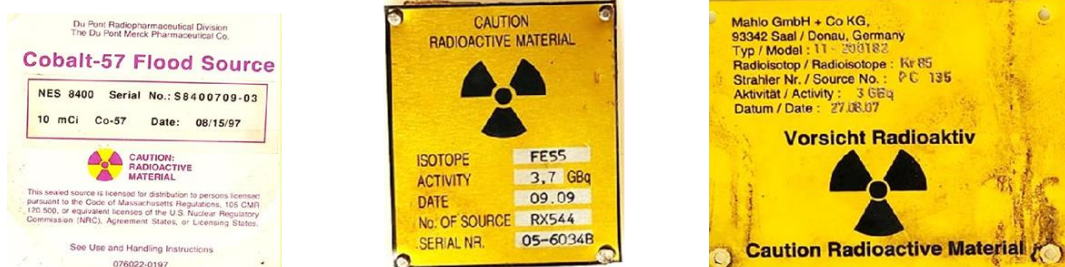
fator de escala quando da dispersão dos dados de medição $D2\sigma \leq 10$, conforme método e critérios aqui expostos, o usuário será orientado a calcular uma função de correlação. Se atender aos critérios para aceitar a existência de uma função de correlação, ou seja, o valor do coeficiente de correlação $(r) \geq 0,6$, o loop apropriado do algoritmo será encerrado. Caso contrário, será acionado o armazenamento das informações para que, ao inserir novas informações no sistema, ocorra novamente o cálculo dos fatores de escala e/ou função de correlação, considerando os valores anteriores mais os valores atuais. Gráficos serão gerados para verificar pontos distantes da média, permitindo a exclusão de *outliers*, mas não de forma permanente. A razão para isso é que novos dados podem alterar o status dos dados anteriores, de dados discrepantes para dados consistentes à medida que novas informações são coletadas. Em versões futuras, o sistema permitirá a exclusão dos outliers automaticamente, mas, novamente, não permanentemente.

7.1.4 Gerador fornece as informações

Há situações em que o gerador do rejeito radioativo especifica as características físico-químicas do material e os radionuclídeos presentes, bastando que as informações sejam confirmadas para que o rejeito esteja disponível para a próxima etapa do processo de gerenciamento.

Um bom exemplo da aplicação desse método é para fontes seladas, as quais chegam com etiquetas (FIG. 19) que contém informação da atividade da fonte, data de fabricação e radioisótopo presente bastando inserir as informações no sistema. Caso existam divergências nas informações fornecidas pelas etiquetas, o rejeito deverá ser caracterizado utilizando outros métodos para a obtenção das informações e adequação para as etapas seguintes do gerenciamento.

Figura 19 - Etiquetas identificadoras de fontes seladas



Fonte: autora da tese

Para esse método, foi criada uma página de verificação para que a imagem da etiqueta declarada pelo gerador possa ser inserida em formato PNG ou JPG e para que os campos de confirmação sejam preenchidos pelo operador da instalação. Um exemplo comum da aplicação desse módulo é na caracterização de fontes radioativas seladas em desuso que são coletadas para tratamento e descarte. Em rotinas futuras, o operador verificará a dose e adicionará o valor no campo devido, declarando o detector usado, data da medida, número de calibração do detector e data de calibração.

Caso a etiqueta não corresponda ao conteúdo da fonte, a fonte deverá ser recharacterizada por algum dos outros métodos disponíveis, entretanto a ocorrência ficará registrada no inventário de rejeito radioativo.

7.1.5 Modelagem da instalação

Esse método consiste na representação das fontes de rejeito de uma instalação, por meio de um diagrama de processo. Assim, um modelo matemático pode ser usado para exprimir o inventário radioisotópico.

No IPEN, a SEGRR modelou dois processos de geração de rejeitos no passado: o refino e a conversão de urânio em UF_6 , e a produção de Mo-99 por fissão e separação radioquímica do molibdênio pelo processo alcalino.

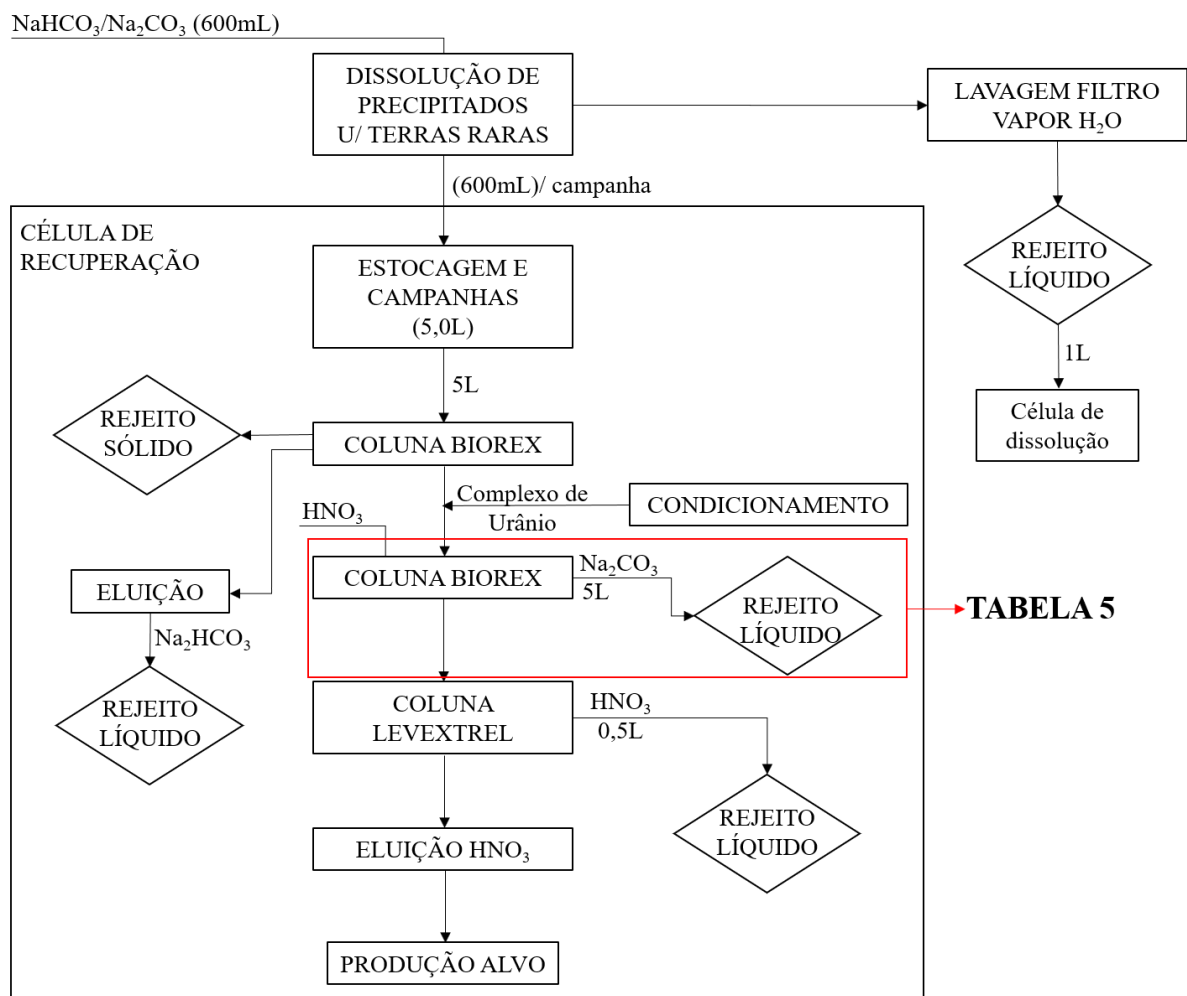
Sabe-se, também, informalmente, que a Bélgica usa a modelagem de suas usinas nucleares para caracterizar os rejeitos. No entanto, por ainda não haver nenhum modelo validado em uso em instalação radiativa ou nuclear no país, a especificação do sistema deixará uma abertura para inclusão futura desse método, bem como, o arquivamento dos métodos utilizados para a validação e documentos gerados.

No algoritmo, as modelagens de instalação deverão ser inseridas no sistema assim como a documentação de validação dessas modelagens. Após o registro, as modelagens ficarão disponíveis para os usuários aplicarem na caracterização de rejeitos que sejam cadastrados vindos da mesma instalação para a qual a modelagem foi desenvolvida. No documento de inventário ampliado, a modelagem também ficará disponível para consulta.

Para exemplificar esse método, na figura 20 e Tabela 5 se mostra um diagrama de processo de uma das etapas de produção de M-99o por fissão e separação por via alcalina, adaptado de Endo et al. (1992). Na figura está, também, a tabela resultante da aplicação do modelo, para um dos fluxos de rejeito, com os radionuclídeos presentes e suas atividades.

Um dos rejeitos radioativos do processo de produção é constituído por um rejeito líquido gerado na eluição da coluna de resina de troca iônica catiônica Bio-Rex, com carbonato de sódio. No modelo para caracterização, se utiliza as atividades da solução de entrada na coluna, as frações de cada elementos químicos retidas e as frações eluídas para gerar a tabela com as atividades esperadas de cada um dos radionuclídeos produtos de fissão que estarão presentes nesse rejeito líquido. As atividades e as concentrações de atividade assim calculadas são de cada campanha de produção. Num segundo modelamento, (Vicente et al. 1992), calcula-se a atividade acumulada nos tanques de rejeito da instalação, considerando as atividades e os volumes gerados em cada campanha e a capacidade de cada tanque, para acomodar as campanhas de produção ao longo do tempo.

Figura 20 – Diagrama de produção de Mo-99



Fonte: adaptado de Vicente, et al.,1992.

Tabela 5 - Inventário radioativo do rejeito líquido de eluição da coluna Biorex

RADION.	FRAÇÃO (F)	ATIVIDADE (BQ)	RADION.	FRAÇÃO (F)	ATIVIDADE (BQ)
Zr-95	0,024	2,30 E+11	Rh-105M	0,0018	2,68 E+08
Zr – 97	0,024	2,81 E+11	Rh-105	0,0018	4,95 E+09
Nb-95M	0,024	1,53 E+09	Rh-106	0,0018	2,48 E+08
Nb-95	0,024	9,86 E+10	Ce-141	0,026	3,54 E+11
Nb-96	0,024	3,43 E+07	Ce-143	0,026	3,95 E+11
Nb-97M	0,024	2,66 E+11	Ce-144	0,026	5,93 E+10
Nb-97	0,024	3,00 E+11	Pr-143	0,026	4,81 E+11
Ru-103	0,0018	1,17E+10	Pr-144M	0,026	7,10 E+08
Ru-105	0,0018	9,54 E+08	Pr-144	0,026	5,93 E+10
Ru-106	0,0018	2,48 E+08	Pr-145	0,026	8,29 E+10
Rh-103M	0,018	1,05 E+10			
Total					2,63 E+12

Fonte: adaptado de Vicente, et al.,1992.

7.2 Catálogo de radionuclídeos relevantes no gerenciamento de rejeitos radioativos

Para a construção do catálogo, optou-se por incluir apenas radionuclídeos de meia vida acima de 100 dias, considerando também a formação dos isótopos filhos e suas respectivas influências na atividade e radiotoxicidade total em longo prazo tratando da deposição intermediária ou final de rejeitos radioativos. As tabelas 6, 7 e 8 trazem os radionuclídeos relevantes para o gerenciamento de rejeitos de acordo com a atividade que os gerou.

Para o código, os dados relacionados aos radionuclídeos foram preservados, tais como tipo de emissão, energias e *yields* correspondentes. Os valores deverão ser incluídos em um banco de dados para então serem usados no sistema.

Tabela 6 - Radionuclídeos relevantes em rejeitos provenientes de atividades de mineração e aceleradores

MINERAÇÃO			ACELERADORES		
Nuclídeo	T/2	Unidade	Nuclídeo	T/2	Unidade
Po-210	138	d	Na-22	2.6	y
Pb-210	22.3	y	Al-26	7.2E+05	y
Ra-226	1600	y	Mn-53	3.7E+06	y
Ra-228	5,75	y	Mn-54	312.2	d
Ac-227	21.8	y	Co-56	77.7	d
Th-228	1.9	y	Co-57	272	d
Th-230	75400	y	Co-60	5.3	y
Pa-231	32760	y	Zn-65	244	d
U-234	2.5E+05	y	Cs-134	2.1	y
U-238	4.5E+09	y	Eu-152	13.3	y
			Eu-154	8.8	y
			Bi-207	31.55	y

Fonte: a autora

Tabela 7 - Radionuclídeos relevantes em rejeitos provenientes da produção de radioisótopos e fontes seladas (continua)

PRODUÇÃO DE RADIOISÓTOPOS			FONTES SELADAS		
Nuclídeo	T/2	Unidade	Nuclídeo	T/2	Unidade
H-3	12.3	y	H-3	12.3	y
Be-10	1.51E+6	y	C-14	5730	y
C-14	5730	y	Na-22	2.6	y
Fe-55	2.7	y	Cl-36	3.0E+05	y
Ni-59	7.6E+4	y	K-40	1.3E+09	y
Ni-63	100.1	y	Fe-55	2.7	y
Co-60	5.3	y	Co-60	5.3	y
Se-79	1.13E+06	y	Ni-63	100.1	y
Sr-90	28.8	y	Se-75	119.8	d
Zr-93	1.5E+6	y	Kr-85	10.8	y
Nb-94	2.0E+04	y	Sr-90	28.8	y
Tc-99	2.1E+05	y	Ba-133	10.5	y
Pd-107	6.5E+06	y	Cs-137	30.07	y
Ag-108m	418	y	Pm-147	2.6	y
Ag-110m	249.79	d	Sm-151	90	y
Sn-121m	55	y	Eu-152	13.5	y
Sn-126	1.0E+05	y	Ir-192	74.0	d
Sb-125	2.8	y	Ir-192m	241.0	y

Tabela 7 - (Continuação) Radionuclídeos relevantes em rejeitos provenientes da produção de radioisótopos e fontes seladas

I-129	1.6E+07	y	Tl-204	3.8	y
Cs-134	2.0648	y	Ra-226	1600	y
Cs-135	2.3E+06	y	Th-228	1.9	y
Cs-137	30.07	y	Th-232	1.4E+10	y
Sm-151	90	y	U-233	1.6E+05	y
Eu-154	8.6	y	U-234	2.5E+05	y
Eu-155	4.8	y	U-235	7.0E+08	y
U-235	7.0E+08	y	U-238	4.5E+09	y
U-236	2.3E+07	y	Np-237	2.1E+06	y
U-238	4.5E+09	y	Pu-238	87.7	y
Np-237	2.1E+06	y	Pu-239	24110	y
U-233	1.6E+05	y	Am-241	432.2	y
U-234	2.5E+05	y	Cm-244	18.1	y
Pu-238	87.7	y	Pu-244	8.1E+07	y
Th-230	7.5E+04	y	Cm-248	3.4E+05	y
Pu-239	24110	y			
Pu-240	6563	y			
Pu-241	14.4	y			
Am-241	432.2	y			
Pu-242	3.7E+05	y			
Am-243	7370	y			
Cm-243	29.1	y			
Cm-244	18.1	y			

* Obs.: A maioria dos radionuclídeos contidos em rejeitos da produção de radioisótopos decorre da produção de Mo-99 por fissão.

Fonte: a autora

Tabela 8 - Radionuclídeos relevantes em rejeitos provenientes da operação de reatores (continua)

OPERAÇÃO DE REATORES NUCLEARES					
Nuclídeo	T/2	Unidade	Nuclídeo	T/2	Unidade
H-3	12.3	Y	Cs-137	30.0	Y
C-14	5730	Y	Sm-151	90	Y
Fe-55	2.7	Y	Eu-152	13.3	Y
Ni-59	7.6E+4	Y	Eu-154	8.8	Y
Ni-63	100.1	Y	Eu-155	4.8	Y
Co-60	5.3	Y	Th-230	7.5E+04	Y
Se-79	1.13E+06	Y	U-233	1.6E+05	Y
Sr-90	28.8	Y	U-234	2.5E+05	Y
Zr-93	1.5E+6	Y	U-235	7.0E+08	Y

Tabela 8 – (Continuação) Radionuclídeos relevantes em rejeitos provenientes da operação de reatores

Nb-94	2.0E+04	Y	U-236	2.3E+07	Y
Mo-93	3500	Y	U-238	4.5E+09	Y
Tc-99	2.1E+05	Y	Np-237	2.1E+06	Y
Pd-107	6.5E+06	Y	Pu-238	87.7	Y
Ag-108m	418	Y	Pu-239	24110	Y
Ag-110m	249.79	D	Pu-240	6563	Y
Sn-121m	55	Y	Pu-241	14.4	Y
Sn-126	1.0E+05	Y	Am-241	432.2	Y
Sb-125	2.8	Y	Pu-242	3.7E+05	Y
I-129	1.6E+07	Y	Am-243	7370	Y
Cs-134	2.1	Y	Cm-243	29.1	Y
Cs-135	2.3E+06	Y	Cm-244	18.1	Y

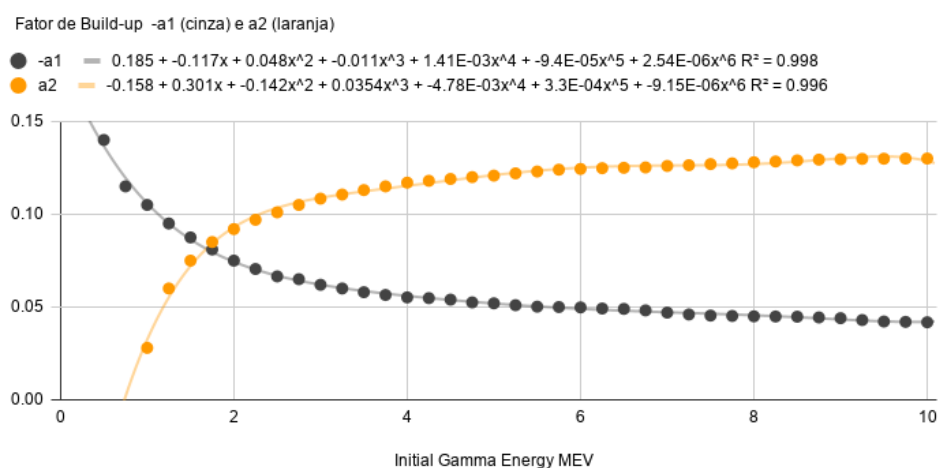
Fonte: a autora

7.3 Ajuste Polinomial

A coleta de dados do trabalho consistiu em grande parte na extração de dados de tabelas e gráficos impressos, o que dificulta determinar valores de referência entre os pontos de tabelas ou de difícil distinção nos gráficos.

Assim, com ajuda de ferramentas computacionais, determinou-se curvas que descrevem com grande similaridade a relação entre os dados de leitura e suas consequências (FIG. 21). A confiabilidade dessas curvas foi determinada pelo coeficiente de determinação (R^2) com valores superiores a 0.88, além da análise visual de cada intervalo de importância.

Figura 21 - Ajuste polinomial para fatores de build up com comportamento esperado

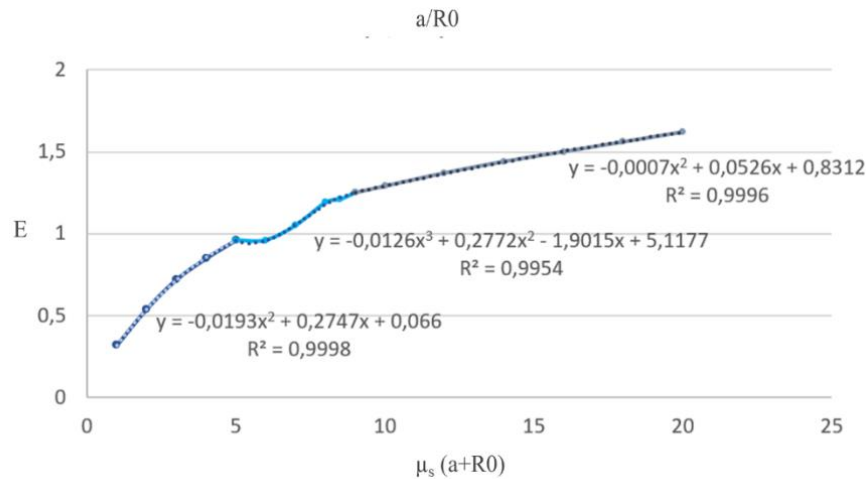


Fonte: autora da tese

Quando a curva gerada apresentou comportamento anômalo em diferentes intervalos, foram traçadas funções para pequenos intervalos onde estas mostraram descrever bem o comportamento da curva geral (FIG. 22).

Sendo assim, o sistema não compilado, contém, ao invés de tabelas, curvas exponenciais e polinomiais que descreve com grande similaridade os dados coletados.

Figura 22 - Ajuste polinomial para curvas com comportamento anômalo



Fonte: autora da tese

Os polinômios gerados tanto dos materiais quanto para o método de *point-kernel* foram agrupados em bibliotecas relacionadas a cada função e implementados no código fonte.

Devido ao tamanho do documento gerado, foi preferível ocultar a apresentação da biblioteca construída para implementação.

7.4 Equação de Bateman

Para manter o inventário atualizado, foi desenvolvido um módulo de decaimento baseado na equação de Bateman. O módulo é capaz de calcular o decaimento dos radioisótopos iniciais atualizando suas atividades em função do tempo, além de permitir estimar a atividade dos isótopos presentes na cadeia de decaimento.

De acordo com HARR (2007), a equação de Bateman pode ser derivada por transformadas de Laplace, chegando a fórmula a seguir:

$$A_n(t) = \sum_{i=1}^n \left[A_i(0) \times \left(\prod_{j=1}^{n-1} \lambda_j \right) \times \left(\sum_{j=1}^n \left(\frac{e^{-\lambda_j t}}{\prod_{p=i, p \neq j}^n (\lambda_p - \lambda_j)} \right) \right) \right] \quad (14)$$

Onde:

$A_n(t)$ é a atividade em função do tempo para o radioisótopo n da cadeia de decaimento (Bq);

t é tempo (anos);

λ_p é a constante de decaimento do isótopo filho p;

λ_j é a constante de decaimento do isótopo pai j.

Para a aplicação da equação de Bateman, as cadeias dos radionuclídeos catalogados foram consideradas de forma que radionuclídeos que têm meia-vida muito curta em comparação com o radionuclídeo original, tenham suas atividades aproximadas como sendo equivalentes a seu radionuclídeo original em qualquer momento. Foram feitas expansões denominadas de Bateman 0 a Bateman 4, o que permite estimar a atividade das cadeias de radionuclídeos para mais de 300 mil anos.

8 ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA

1. INTRODUÇÃO

O presente documento tem a finalidade de apresentar uma visão geral do sistema RaWSys usando diversas visões arquiteturais, com requisitos funcionais e não funcionais e testes realizados com os algoritmos desenvolvidos. O sistema tem como finalidade auxiliar no gerenciamento e garantir a qualidade das informações obtidas na rotina operacional do gerenciamento de rejeitos radioativos.

2. OBJETIVOS DO PRODUTO

O produto visa atender as necessidades de automatização de métodos complexos utilizados para caracterizar rejeitos radioativos e controlar o inventário radioisotópico destes considerando cada instalação geradora.

O sistema tem como objetivo fundamental facilitar e documentar os processos de caracterização. A interface desenvolvida apresenta todos os campos para inserir as informações necessárias a etapa de inventariação dos rejeitos radioativos, tais como radioisótopos, características químicas e físicas, classe, identificação, etc. A interface também garante que o usuário não possa inserir informações não condizentes aos campos e também evita que dados incompletos sejam registrados sem notas claras do motivo pelo qual a informação não foi disponibilizada. O sistema foi desenvolvido modularmente, caso seja necessário acrescentar novos requisitos, a interface não será perdida, assim como as informações previamente cadastradas no sistema.

2.1. Objetivos específicos do produto

O sistema deve integrar os métodos de caracterização mais usuais identificados na rotina operacional das instalações de rejeitos radioativos, dando suporte ao controle do inventário dos rejeitos.

Deverá armazenar dados referentes aos rejeitos tais como:

- Características radiológicas, químicas e físicas;

- Identificação dos rejeitos e amostras (id's);
- Classificação do material;
- Dados referentes ao status e atualização do rejeito (se tratado, se dispensado, se imobilizado ou se transferido para depósito final);
- Informações relacionadas aos métodos utilizados para a caracterização e métodos de processamento e medidas de rejeitos.

Deverá permitir:

- Extração de diversos relatórios com o uso de filtros ou ainda relatórios da instalação completa;
- Impressão de etiquetas;
- Acesso do agente fiscalizador ao relatório da instalação e de rejeitos específicos;
- A sinalização de conformidade ou inconformidade de relatórios e processos;
- A assinatura e identificação dos executores de cada etapa e também da avaliação dos relatórios;
- Rastreamento de dados pelos id's dos rejeitos, amostras ou pela instalação;
- Registro de documentos da instalação assim como o registro da ação de descomissionamento.

3. ESTADO DA ARTE/ SITUAÇÃO ATUAL/ DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Não foi identificado qualquer sistema integrado para a caracterização de rejeitos radioativos com automatização de métodos de cálculo. Após avaliação, foi reconhecido que diversos métodos podem ser aplicados na etapa de caracterização, mas não há agrupamento das informações nem garantia da qualidade acerca das informações geradas.

No mais, identificou-se a necessidade de formalizar os relatórios relacionados ao inventário radioisotópico, com as devidas atribuições de responsabilidade e rastreabilidade da informação fornecida.

É de importância que estes relatórios estejam disponíveis no sistema para que possam ser acessados por órgãos fiscalizadores sempre que necessário.

Identificou-se falta de segurança relacionada ao acesso das informações geradas atualmente, sendo necessário definir níveis de acesso para garantia da segurança das informações em longo prazo.

4. ESCOPO DO PRODUTO E DELIMITAÇÃO

A proposta visou principalmente a cobertura da etapa de caracterização e documentação das informações pertinentes a esta etapa, seja ela primária ou final e atender as necessidades identificadas no serviço de gerenciamento de rejeitos radioativos relacionados a depósitos intermediários e finais.

O conteúdo do sistema é segmentado em módulos afim de simplificar o desenvolvimento e implementação.

Há a necessidade de estudar, planejar e integrar módulos para uma completa gestão de rejeitos radioativos, que se estendem além do aqui proposto, que podem ser tratadas em trabalhos futuros.

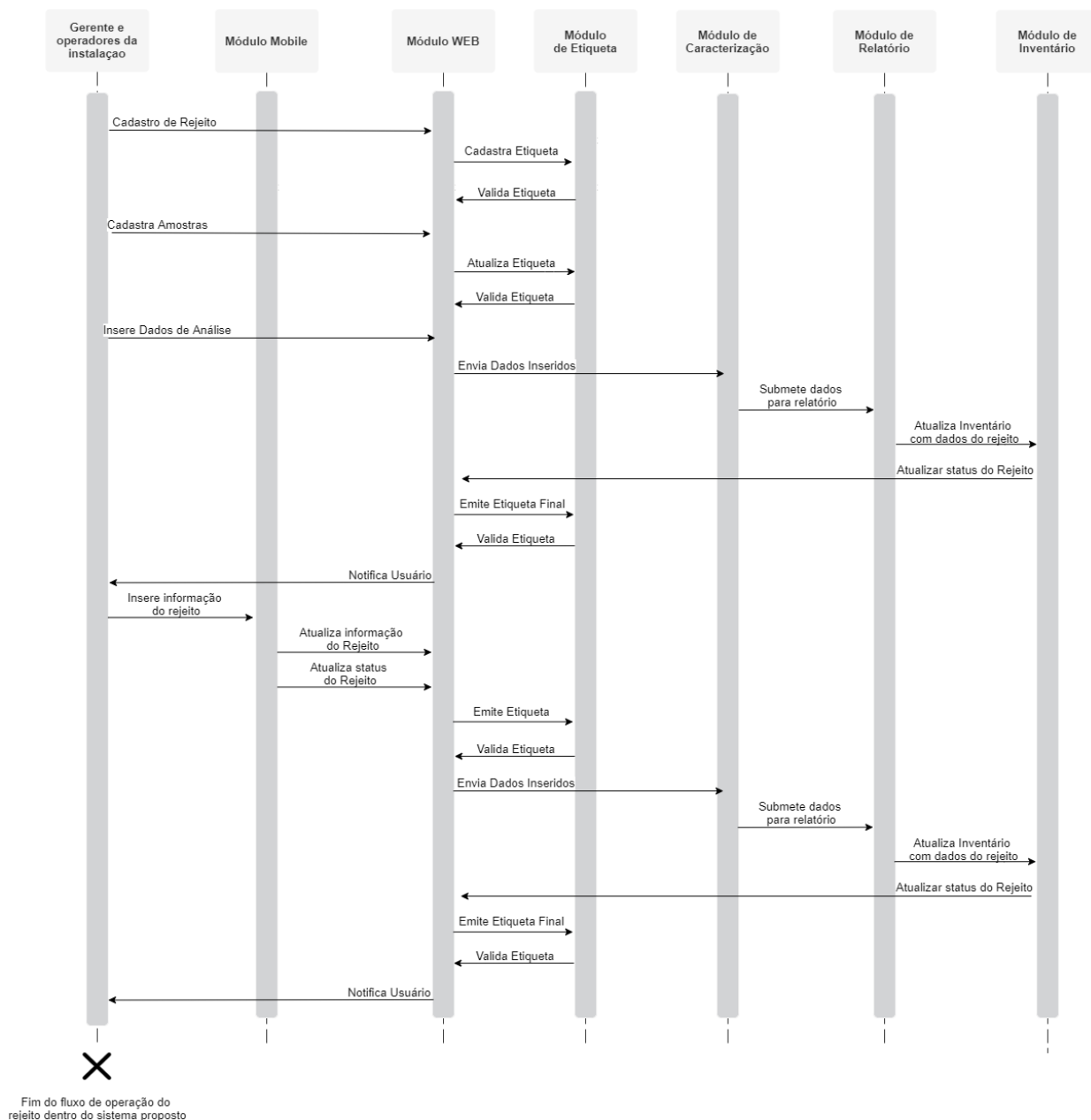
4.1. Módulos propostos

- a) Cadastro para acesso ao sistema com limitação de funções de acordo com a autenticação do usuário (níveis de acesso e segurança);
- b) Cadastro de rejeitos;
- c) Registro de histórico de ações realizadas para a caracterização de cada rejeito individualmente ou por lotes;
- d) Armazenamento de dados relacionados aos métodos de caracterização;
- e) Aplicação de métodos pré-estabelecidos: *point-kernel*, fator de escala e função de correlação, radioquímico, informação fornecida pelo gerador;
- f) Correção do inventário com uso da equação de Bateman;
- g) Geração de etiqueta padronizada com informações primordiais e sistema de código de barras;
- h) Geração de relatórios parciais ou finais, incluindo inventário radioisotópico;
- i) Atualização de taxa de dose com uso de código de barras e sistema mobile.
- j) Atualização de relatórios de acordo com normas vigentes e/ou atualizadas.

5. ORIENTAÇÃO DA ESTRUTURA DE MÓDULOS

Este trabalho se orienta no diagrama de sequência apresentado na figura 23, nela é apresentada a sequência de processo que está diretamente relacionado aos casos de uso em ordenação temporal entre objetos e respostas.

Figura 23 - Diagrama de sequência RaWSys (ampliação em 150% para leitura)



Fonte: autora da tese

6. ATORES DO SISTEMA

No levantamento das atividades e responsabilidades do dia a dia em atuação (TAB. 9) no ciclo de caracterização de rejeitos, se entende que são três os papéis fundamentais que compõe os relacionamentos com os processos que integram todas a rotinas abordadas.

Temos:

Tabela 9 - Identificação de atores do sistema

ATOR	DEFINIÇÃO
Gerente da instalação*	Responsável pela conta administradora do sistema, aprovação de cadastro de usuários e autorização de inserção de novos módulos. O gerente poderá incluir, alterar e/ou excluir dados de relatórios e de rejeitos previamente cadastrados ou novos e será diretamente responsável por responder as mensagens do agente fiscalizador.
Operador da instalação*	Responsável por inserir informações da rotina operacional no sistema, fazer upload de arquivos e aplicar os módulos matemáticos disponibilizados para processamento dos dados. É responsável pela atualização de dados dos inventários e relatórios. Não poderá excluir dados de rejeitos previamente cadastrados, podendo somente incluir dados ou editar dados durante a inserção antes de finalizar a tarefa. O gerente pode sinalizar o operador para que ele faça a ação de revisar o relatório de outro operador.
Agente fiscalizador	Responsável pela fiscalização de relatórios e atividades e sinalizar conformidades ou inconformidades. Tem contato direto com o gerente da instalação. O agente fiscalizador poderá se cadastrar, fazer buscas e enviar mensagens dentro do sistema, mas não poderá incluir ou excluir informações dos relatórios visualizados.

Fonte: autora da tese

***Nota:** Com o intuito de evitar dúvidas de entendimento, devido a natureza deste trabalho compartilhar as especificações de desenvolvimento de sistemas com o levantamento das atividades laborais de gerenciamento de rejeitos, deve-se observar que quando citada a palavra **Instalação**, se faz referência ao local físico onde são exercidas as atividades.

7. REQUISITOS FUNCIONAIS (RF)

RF01: Cadastrar operadores

O sistema deve permitir que o operador se cadastre previamente. O cadastro deverá ser avaliado e aceito pelo gerente da instalação, gerando login e senha de acesso que deverão ser enviados por e-mail.

RF02: Cadastrar agente fiscalizador

O sistema deve permitir o cadastro de agente fiscalizador previamente. O agente receberá senha e login por e-mail. Para acessar uma instalação, a ficha de cadastro do agente fiscalizador deverá estar disponível para avaliação do gerente. Ao avaliar e aceitar, o sistema deverá enviar token de acesso com validade de 48 horas para o agente fiscalizador.

RF03: Credenciar conta ADM para gerente da instalação

O sistema deve comportar cadastro de administrador para o gerente da instalação. O login e senha deverão ser entregues via documento oficial pela equipe de administração do sistema.

RF04: Cadastrar instalação

O sistema deve ter como atividade inicial para o gerente, o cadastro da instalação. A cada instalação inserida na aplicação, uma sigla será criada na lista de busca de instalações disponível para o agente fiscalizador.

RF05: Encerrar instalação

O sistema deve apresentar uma área seguinte ao cadastro de instalação com espaço para upload de documentos relacionados ao processo de descomissionamento. Essa ação desencadeia o armazenamento de todas as informações de histórico de rejeitos e bloqueio de todos os usuários operadores vinculados à instalação.

RF06: Consultar e editar operador

O sistema deve apresentar uma página que permite ao gerente consultar os operadores ativos e inativos presentes na instalação. Essa página permite que o gerente possa

desvincular um operador ativo, passando-o para o estado de inativo no sistema. O operador removido por essa ação não poderá mais efetuar login no sistema.

RF07: Gerenciar módulos de caracterização

O sistema deve permitir que o gerente da instalação gerencie os módulos utilizados no módulo de caracterização. Na página de gerenciamento, deverão aparecer módulos novos para avaliação do gerente, lista de módulos já utilizados na instalação e lista de módulos disponíveis no sistema. O gerente poderá bloquear o uso de módulos e solicitar revalidação dos módulos.

RF08: Gerenciar informação sobre rejeito

O sistema deve comportar um módulo para o gerenciamento de informações sobre os rejeitos da instalação (lotes, embalagens individuais, amostras [...]).

RF08.1: Registrar rejeito e consultar informações

O sistema deve permitir ao operador e gerente cadastrar um novo rejeito para ser armazenado na instalação. As informações que devem ser inseridas no cadastro são:

Sobre o gerador: gerador do rejeito, endereço do gerador, data de chegada na instalação.

Sobre o rejeito: matriz do rejeito/estado físico, radionuclídeos presentes (ou suspeitos), classe do rejeito, atividade total (ou estimada), atividade por radionuclídeo (se conhecida), taxa de dose na superfície do embalado e a um metro de distância, peso do embalado, compactável ou não compactável, orgânicos e inorgânicos; biológicos (putrescíveis e patogênicos); outras características perigosas (explosividade, combustibilidade, inflamabilidade, corrosividade e toxicidade química).

- O gerente da instalação poderá inserir dados, excluir dados, editar dados;
- O operador da instalação poderá inserir e editar dados, mas não poderá excluir dados armazenados anteriormente;
- Após o rejeito cadastrado, os operadores e gerentes podem realizar busca dessas informações pelo número de etiqueta.

RF08.2: Registrar amostra

O sistema deve permitir ao operador e gerente cadastrar uma nova amostra no inventário da instalação. As informações que devem ser inseridas no cadastro são:

Número do embalado (se embalado estiver já armazenado na instalação), quantidade de amostras retiradas, matriz da amostra, quantidade (g, ml [...]), data de coleta, laboratório responsável, radionuclídeos presentes.

RF08.3: Registrar informações da caracterização

O sistema deve abrir um campo para cada rejeito ou amostra registrada para que o processo de caracterização seja descrito brevemente. Incluindo: processamento de amostra ou rejeito feitos, tipo de avaliação de radioisótopos, químico utilizados, estado final da matriz.

RF08.4: Exibir dados de armazenamento

O sistema deve exibir os dados atuais da situação de armazenamento da instalação. Os dados exibidos devem se referir à quantidade total do armazenamento ocupada, quantidade disponível, lista dos últimos rejeitos recebidos e lista dos últimos rejeitos removidos.

RF08.5: Exibir estado de rejeito ou amostra

O sistema deve permitir escolher o estado do rejeito (embalado, lote, fonte selada, amostra): se aguardando caracterização, se caracterizado, se tratado, se imobilizado, se aguardando descarte ou se aguardando deposição. O estado deverá ser exibido ao acessar relatório de rejeito.

RF08.6: Notificar deposição ou descarte

O sistema deve permitir que operadores e gerente atualizem o estado de uma amostra ou rejeito como “material descartado” ou “material enviado para a deposição”.

- Para descarte: deverão ser descritas as condições de descarte, meio de descarte, motivo do descarte e responsável;

- Para deposição: data de envio para deposição, data de chegada no local de deposição, responsável pelo transporte, local de deposição, responsável do local de deposição.

RF08.7: Atualizar taxa de dose

O sistema deve permitir a atualização da taxa de dose dos rejeitos ou amostras nos relatórios. A taxa de dose poderá ser atualizada tanto pela plataforma web quanto pela plataforma mobile. As taxas de dose deverão ter em seu registro: medida na superfície, medida a uma determinada distância, data de calibração do detector, modelo do detector e responsável pela medida.

RF09: Emitir etiqueta

O sistema deve viabilizar a emissão de etiquetas com as informações declaradas dos rejeitos. A etiqueta deverá apresentar código de barras contendo o conjunto alfanumérico que esteja relacionado às informações previamente declaradas.

O código alfanumérico é gerado usando a seguinte fórmula:

- ID PROVISÓRIA = Número de registro documental (sequencial) + Quantidade de amostras/rejeitos contidos no lote.
- ID FINAL = ID PROVISÓRIA + método de caracterização + Emissões Principais + Estado Físico Predominante do Rejeito + Número da Amostra/rejeito dentro do lote + data de geração da ID FINAL.
- ID AMOSTRA= A + Número de registro documental (sequencial) +Número de amostra dentro do conjunto.

Os números e letras que deverão ser extraídos de cada informação devem obedecer aos seguintes critérios:

Número do registro documental: Número inteiro gerado de forma sequencial a cada novo registro recebido pelo sistema.

- Quantidade: INT-XXX (Qualquer valor numérico inteiro);

- Emissões Principais: A, B, G, RX, N (Todas as letras que se aplicam);
- Estado Físico: S, L, G, FS, NS (Todas as letras que se aplicam);
- Número da amostra no lote: INT-XXX (Qualquer valor numérico inteiro menor ou igual ao de Quantidade);
- Data: dia/mês/ano de emissão da etiqueta;
- A: amostra;
- Número de amostra dentro do conjunto: indicar a qual amostra se refere dentro do total de amostras existentes.

Para rejeitos com características perigosas deve-se acrescentar o símbolo universal de “atenção” na etiqueta.

Para rejeitos com características biológicas deve-se acrescentar o símbolo universal de “risco biológico” na etiqueta.

Todas as etiquetas devem conter o símbolo universal de “radiação ionizante” como marca d'água ao fundo.

RF09.1: Emitir etiqueta de rejeito

Deve ser gerada uma etiqueta para cada embalado ou fonte selada ou não selada com identificação individual. Em caso de lotes, a etiqueta deverá indicar a qual embalado se refere dentro do total de embalados existentes. Para rejeitos não caracterizados, deverá ser utilizada a ID PROVISÓRIA. Quando já caracterizados, utilizar a ID FINAL.

RF09.2: Emitir etiqueta de amostra

No caso de registro de amostra, deve ser gerada uma etiqueta para cada amostra com identificação individual. Em caso de um conjunto de amostras, a etiqueta deverá indicar a qual amostra se refere dentro do total de amostras existentes, com indicação de qual embalado originalmente ela pertence. Utilizar ID AMOSTRA.

RF10: Atualizar inventário

O sistema deve permitir a atualização dos valores de atividade dos rejeitos armazenados na instalação. O sistema também deverá projetar a atividade de um embalado, lote ou total para uma data específica escolhida pelo usuário. A atualização deverá contemplar os radionuclídeos presentes e os radionuclídeos da cadeia de decaimento.

RF10.1: Atualizar inventário de rejeitos

O sistema deve permitir a atualização dos valores de atividade dos rejeitos armazenados na instalação de forma individual (por embalado ou lote).

RF10.2: Atualizar inventário de instalação

O sistema deve permitir a atualização dos valores de atividade do inventário total da instalação, decaindo todos os rejeitos armazenados.

RF11-Consultar bibliografia

O sistema deve viabilizar a consulta a uma lista de bibliografias previamente cadastrada ou ainda permitir a consulta de informações disponibilizadas pelo cadastramento de informações de rejeitos e amostras.

Dentre as bibliografias pré cadastradas, recomenda-se que estejam presentes:

- Métodos de processamento de amostras, métodos de medida, normas e recomendações, guias de boas práticas e uma tabela de núclídeos e um guia de conversão de unidades.

O sistema deve permitir a busca de informações indexadas com o uso de pesquisa por palavra-chave, podendo ser utilizada uma API externa.

RF12- Consultar relatórios

O sistema deve comportar um módulo de relatórios e permitir ao usuário realizar buscas de acordo com diversos critérios, sendo:

Busca por relatório de material individual, lote, amostra, classe, tipo, emissor, gerador, instalação total, data, etiqueta ou ainda pela combinação de qualquer um dos itens descritos. Os relatórios são alimentados por informações sobre a instalação, informações sobre os rejeitos, sobre amostras, estado do material, processos de caracterização e atualização por taxa de dose e decaimento de atividade.

RF12.1- Enviar relatório para análise

O sistema deve permitir que os operadores da instalação solicitem a análise de relatórios pelo gerente da instalação.

RF12.2- Fiscalizar instalação

O sistema deve permitir que o agente fiscalizador realize buscas de relatórios e notifique o gerente sobre inconsistências. Caso consistente, o agente deve assinar digitalmente os itens fiscalizados.

RF13- Gerenciar relatórios

O gerente da instalação deve ter a permissão para avaliar, aprovar ou reprovar ou ainda, excluir um relatório no caso de pedido de avaliação pelo operador da instalação. O gerente pode também, enviar um relatório com pedido de revisão de outro operador. O sistema deverá notificar o operador sobre o resultado da avaliação ou se existem relatórios para a revisão, com os apontamentos realizados pelo gerente. Caso as informações sejam consistentes, o gerente deverá assinar digitalmente os itens avaliados.

O gerente pode responder o agente fiscalizador caso ele aponte inconsistência.

RF14- Caracterizar rejeitos

O sistema deve comportar um módulo para a caracterização de rejeitos. O módulo deve estar acessível para operadores da instalação e gerente da instalação. O módulo deve comportar os métodos escolhidos pelo gerente da instalação, incluindo modelagens matemáticas e agrupamento de informações. Os métodos que devem estar presentes são módulos de informações do gerador, módulo radioquímico, módulo radiométrico, módulo dose para atividade, módulo de fator de escala e função de correlação, módulo de modelagem da instalação.

RF14.1- Módulo de Informações do gerador

O usuário deve confirmar as informações presentes na etiqueta do gerador do rejeito, tais como radionuclídeos presentes, data de fabricação ou produção do rejeito, atividade relacionada a cada radionuclídeo, tipos de emissão, atividade total, informações de quem produziu o material. O sistema deve comportar o upload de imagens no formato JPG ou PNG

para o armazenamento de foto da etiqueta fornecida pelo gerador. O usuário deve confirmar as informações e atualizar a taxa de dose.

RF14.2- Módulo radioquímico

O módulo deve ter campo para a descrição do processamento aplicado às amostras analisadas. As amostras devem ser identificadas por suas respectivas etiquetas. O sistema deve apresentar uma lista com check box contendo o nome dos radionuclídeos ordenados por atividade geradora do rejeito. O usuário deve indicar qual o tipo de emissores analisados e fazer upload dos relatórios de análise ou ainda, indicar, de forma manual os resultados das análises. É necessário, para tanto, que o sistema permita a criação de tabelas sem limite de número de linhas e colunas. O sistema deve permitir o cálculo da atividade total do embalado ao qual a amostra pertence. O sistema deve armazenar e conservar os valores originais de amostra cadastradas neste método. O sistema deve apresentar “dados originais de amostras” e “amostras decaídas”.

RF14.3- Módulo radiométrico

O módulo deve apresentar uma lista com check box contendo o nome dos radionuclídeos ordenados por atividade geradora do rejeito. O usuário deve indicar qual o tipo de emissores analisados e fazer upload dos relatórios de análise ou ainda, indicar, de forma manual os resultados das análises. É necessário, para tanto, que o sistema permita a criação de tabelas sem limite de número de linhas e colunas. O sistema deve permitir o cálculo da atividade total do embalado caso a caracterização tenha sido realizada em uma amostra.

RF14.4- Módulo dose para atividade

O módulo de dose para atividade deve permitir a seleção da geometria do rejeito. As geometrias que devem estar disponíveis são: puntiforme, cilindro e cubo. No caso de materiais mistos, deve haver um meio de dividir o embalado (em especial, tambores). O módulo deve apresentar uma lista com check box contendo o nome dos radionuclídeos ordenados por atividade geradora do rejeito, de forma que o seja possível buscar no banco de dados os valores de energia e yield. Caso necessário, o sistema deve permitir inserir os valores de energia e yield manualmente após a seleção dos radionuclídeos. Uma lista de materiais deve estar disponível para seleção. Caso o material não esteja disponível na listagem, deve ser viabilizada a aproximação de algum material pré cadastrado tanto para blindagens quanto para fontes. O

módulo deve calcular a taxa de dose com as informações inseridas inicialmente e comparar o resultado com a taxa de dose medida. Se necessário, deve calcular um fator de correção e corrigir as atividades de cada radionuclídeo. Os radioisótopos da embalagem devem ser somados com o intuito de apresentar a atividade total do rejeito caracterizado.

RF14.5- Módulo fator de escala e função de correlação

O sistema deve comportar um módulo para o cálculo de fator de escala e/ou função de correlação. O operador deve escolher um conjunto de radionuclídeo difícil de medir/radionuclídeo chave e o sistema deve buscar os valores de “dados originais” de atividades dessas amostras que estão armazenados no banco de dados. Os métodos devem ser aplicados de forma cíclica, seguindo a regra: caso não se obtenha fator de escala, aplicar a função de correlação com regressão linear dos valores de radionuclídeos chave e radionuclídeos de difícil medição. O sistema também deve esboçar os gráficos com os valores das atividades medidas dos radionuclídeos difíceis de medir em torno da média das atividades. Outro gráfico também deve ser gerado com os fatores de escala para cada conjunto de amostras de radionuclídeo difícil de medir / radionuclídeo chave em torno do valor do fator de escala médio. Os gráficos devem conter uma checkbox que permita ao usuário excluir pontos que possam ser considerados outliers. Quando algum ponto é excluído por esse procedimento, os valores não devem desaparecer dos respectivos relatórios, apenas devem ser omitidos no cálculo de fator de escala. Se pelo menos um ponto for removido por ser considerado outlier, o sistema deverá recalculer o fator de escala novamente. Caso não se obtenha a fator de escala ou função de correlação, o sistema deve armazenar os valores de amostra obtidos nas análises e entrar em aguardo de inserção de novos valores, ou ainda, questionar se mesmo fora da margem estatística adotada no método, o usuário deseja utilizar o valor calculado de fator de escala. Caso se obtenha fator de escala ou função de correlação, o sistema deve armazenar o valor obtido da relação escolhida entre radionuclídeo de difícil medição e radionuclídeo chave e aplicar para os rejeitos seguintes que preencham as mesmas características dos rejeitos caracterizados por esses métodos.

RF14.6- Módulo de informação da instalação (modelagem)

O sistema deve comportar um módulo para a inserção de modelagens de instalação. Os relatórios devem ser inseridos no módulo, de modo que possam ser usados sempre que rejeitos forem cadastrados no sistema. As modelagens devem ser utilizadas para caracterizar o material e calcular a atividade estimada de acordo com as referências da modelagem. Os rejeitos

caracterizados com as modelagens devem ter em seus relatórios o número de referência da modelagem utilizada.

RF14.7- Atualizar atividades

Os módulos “Informações do gerador”, “radioquímico”, "radiométrico", “dose para atividade” e “modelagem da instalação” devem ter seus resultados atualizados pelo módulo de decaimento com o intuito de que as atividades estejam sempre atualizadas.

RF15- Atualizar módulos de caracterização

O sistema deve permitir a inserção de novos métodos de caracterização, assim como a revisão dos métodos já inseridos anteriormente. O gerente da instalação deve ter permissão de solicitar a revisão de métodos para o grupo responsável pelo desenvolvimento do sistema.

RF16- Consultar instalação (agente fiscalizador)

Ao entrar com login e senha no sistema, o agente fiscalizador deverá ser encaminhado para uma lista de instalações cadastradas no sistema. Ao selecionar uma instalação, as informações sobre: nome da instalação, gerente, responsável de radioproteção, tipo de instalação, atividade que executa e número de identificação deverão ser exibidos na tela. O agente fiscalizador deverá ter permissão para solicitar o acesso à instalação. Tendo seu acesso aprovado pelo gerente da instalação, o agente fiscalizador deverá receber um token de acesso que permitirá acesso somente à instalação selecionada previamente pelo agente fiscalizador. O agente fiscalizador poderá acessar somente os relatórios da instalação e de rejeitos da instalação e não poderá alterar dados.

RF17- Avaliar relatório (agente fiscalizador)

O agente fiscalizador deve ter a permissão para consultar relatórios de instalação e rejeitos para avaliar, podendo aprovar ou reprovar um relatório. O sistema deverá notificar o gerente da instalação sobre o resultado da avaliação com os apontamentos realizados pelo agente fiscalizador. Caso as informações sejam consistentes, o agente fiscalizador deverá assinar digitalmente os itens avaliados.

O agente e o gerente podem responder os apontamentos em caso de inconsistência.

RF18- Atualizar módulos sistema

O desenvolvimento do sistema deve ser planejado para permitir a atualização de seus módulos e upgrades das ferramentas, de forma desacoplada sem a necessidade de reconstrução dos já existentes e referências que forem implementadas, implantadas, devendo os usuários (gerentes de instalação) avaliarem se desejam utilizar os upgrades ou manter a versão corrente do sistema.

8. REQUISITOS NÃO FUNCIONAIS

RNF01- A aplicação deve ser implementada em plataforma on line.

RNF02- A aplicação deve ter persistência redundante em banco de dados com cópia de segurança para banco em nuvem.

RNF03- A aplicação deve ser desenvolvida em Progressive Web Apps (PWA) para contemplar todas as plataformas.

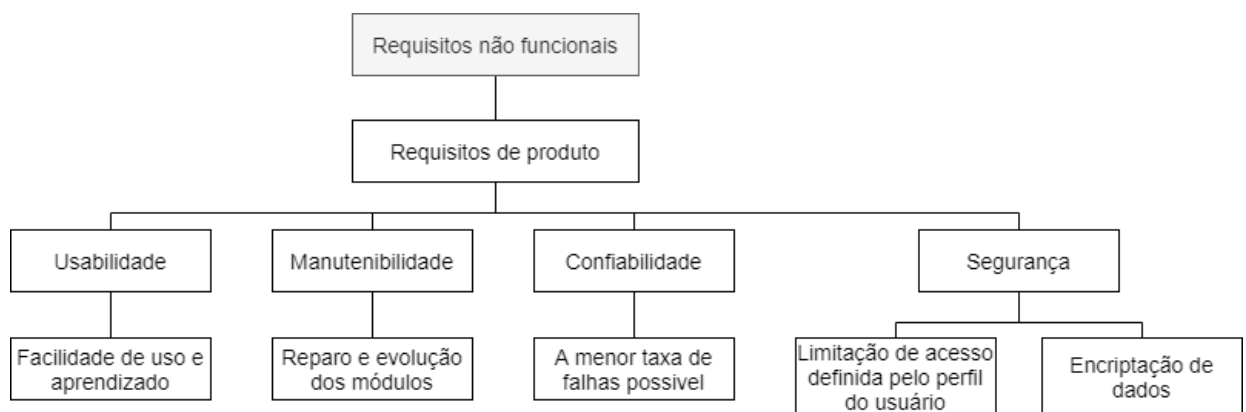
RNF04- Para segurança do acesso, o sistema deverá solicitar senha. O padrão exigido deve seguir um sistema de senhas de alta complexidade. O sistema deve assegurar que, a cada 6 meses, a senha dos usuários expire e solicitar renovação.

RNF05- Para acesso de usuários externos à instalação, deverá ser solicitado uma senha que siga os padrões descritos no requisito anterior, mais token.

RNF06- Dados devem ser criptografados ao serem enviados para banco de dados.

RNF07- O sistema deve ser arquitetado e desenvolvido de forma modular.

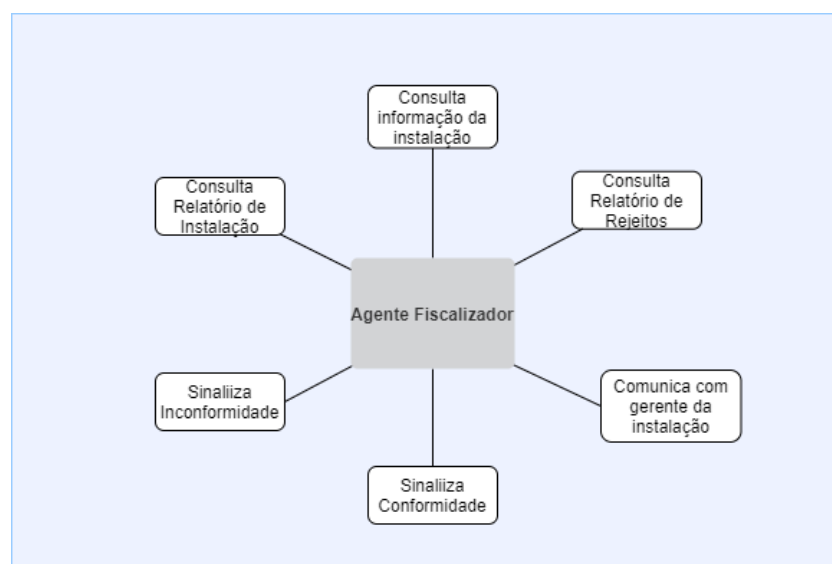
RNF08 – O sistema deve ser desenvolvido, observando garantir e resguardar as características de boas práticas apresentadas na Figura 24.

Figura 24 - Diagrama de boas práticas de RNF's

Fonte: autora da tese

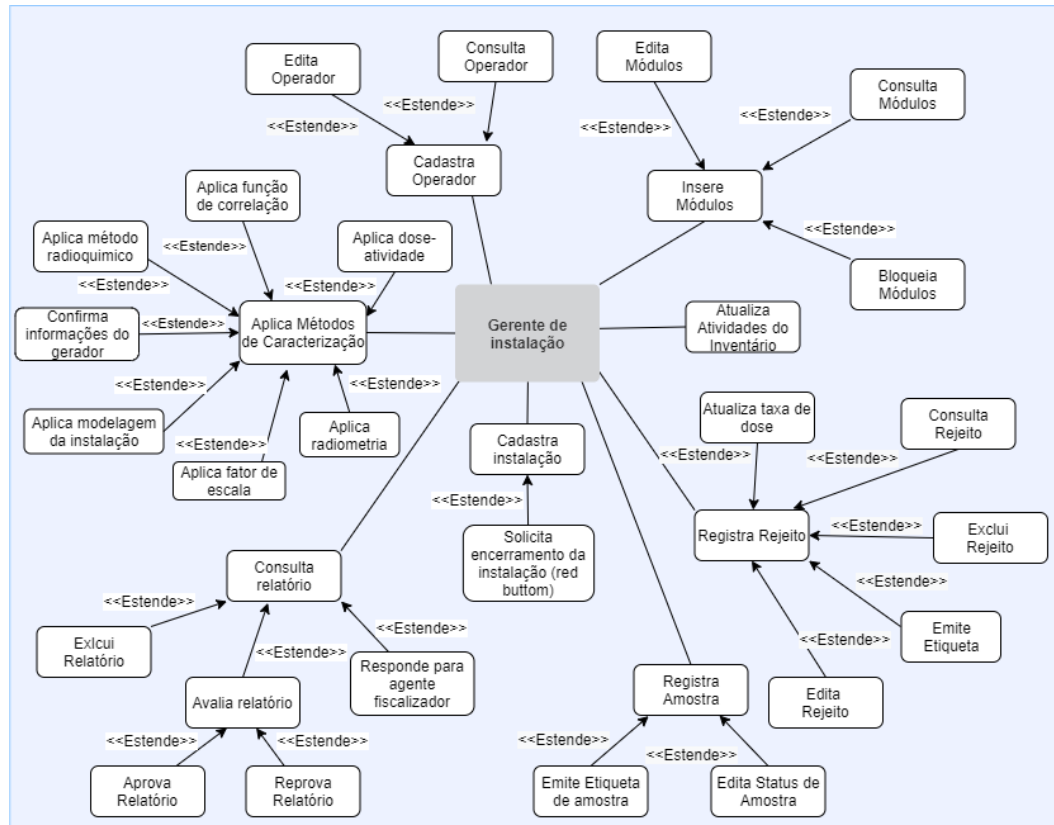
9. CASOS DE USOS

Representação das unidades funcionais do sistema por ator identificado (agente fiscalizador, gerente da instalação e operador da instalação) (FIG. 25-27). Cada ação desempenhada no sistema -casos de uso (TAB. 10- 42) - condiz com o nível de acesso que o ator terá a depender do cadastro realizado. As restrições de acesso partem da conta de gerente da instalação (com maior nível de acesso) a agente fiscalizador (com menor nível de acesso sem permissão de exclusão de dados).

Figura 25 - Agente fiscalizador

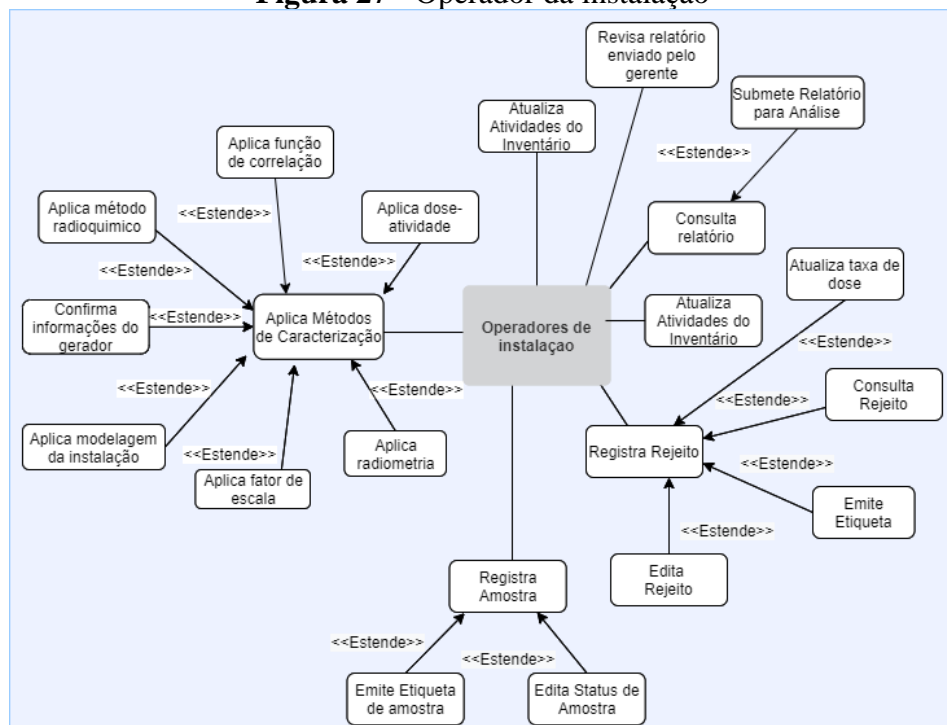
Fonte: autora da tese

Figura 26 - Gerente da instalação



Fonte: autora da tese

Figura 27 - Operador da instalação



Fonte: autora da tese

Tabela 10 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC01)

UC01	Cadastra operador
Descrição	O gerente da instalação deverá aprovar ou não a solicitação de cadastro
Referência	RF01, RF03
Atores	Gerente da instalação
Pré-condições	O gerente deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de gerenciamento.
Pós- condições	O sistema deverá liberar o acesso do usuário caso o gerente aprove o cadastro ou enviar um e-mail de sinalização com a mensagem “cadastro não aprovado [text: motivo] com descrição da recusa do cadastro ou pendências.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O gerente deverá fazer login; 2. O gerente deverá acessar a guia "usuários"; 3. Clicar em “novas solicitações”; 4. Avaliar ficha cadastral; 5. Aprovar ou rejeitar cadastro.

Fonte: autora da tese

Tabela 11 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC02)

UC02	Consulta operador
Descrição	O gerente da instalação poderá consultar lista de usuários operadores ativos.
Referência	RF06
Atores	Gerente da instalação
Pré-condições	O gerente deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de gerenciamento.
Pós- condições	O sistema deverá trazer a lista de operadores com a opção de gerar relatório de atividades (log) de tarefas executadas por cada usuário no sistema.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O gerente deverá fazer login; 2. O gerente deverá acessar a guia "usuários"; 3. Clicar em “lista de usuários”; 4. Selecionar nome; 5. Clicar em “gerar relatório de atividades”.

Fonte: autora da tese

Tabela 12 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC03)

UC03	Edita operador
Descrição	O gerente da instalação poderá consultar e desvincular operadores ativos
Referência	RF06
Atores	Gerente da instalação
Pré-condições	O gerente deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de gerenciamento.
Pós- condições	O sistema deverá trazer a lista de operadores com a opção “desvincular usuário”. Após desvincular, o histórico de atividades deverá ser arquivado no banco de dados e o usuário desvinculado não poderá mais executar tarefas dentro do sistema.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O gerente deverá fazer login 2. O gerente deverá acessar a guia "usuários" 3. Clicar em “lista de usuários" 4. Selecionar nome 5. Clicar em “desvincular usuário"

Fonte: autora da tese

Tabela 13 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC04)

UC04	Inserir módulos
Descrição	O gerente da instalação poderá desbloquear novos módulos que forem inseridos por upgrades do sistema.
Referência	RF07
Atores	Gerente da instalação
Pré-condições	O gerente deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de gerenciamento.
Pós- condições	O sistema deverá exibir a lista de novos módulos. Após verificar a documentação dos novos módulos de caracterização, o gerente poderá ou não desbloquear esses módulos para uso dentro da instalação de sua responsabilidade.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O gerente deverá fazer login; 2. O gerente deverá acessar a guia "solicitação de métodos”; 3. Verificar documentação de novos métodos clicando nos hiperlinks; 4. Após verificação, aprovar ou rejeitar desbloqueio do método.

Fonte: autora da tese

Tabela 14 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC05)

UC05	Consulta módulos
Descrição	O gerente da instalação poderá consultar os módulos disponíveis para uso no sistema.
Referência	RF07
Atores	Gerente da instalação
Pré-condições	O gerente deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de gerenciamento.
Pós- condições	O sistema deverá exibir a lista de módulos disponíveis.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O gerente deverá fazer login; 2. O gerente deverá acessar a guia "solicitação de métodos"; 3. Na guia “gerenciar métodos de caracterização”, o sistema deverá exibir a lista de métodos disponíveis; 4. Verificar documentação dos métodos clicando nos hiperlinks.

Fonte: autora da tese

Tabela 15 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC06)

UC06	Bloqueia módulos
Descrição	O gerente da instalação poderá bloquear os módulos disponíveis para uso no sistema.
Referência	Rf07
Atores	Gerente da instalação
Pré-condições	O gerente deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de gerenciamento.
Pós- condições	O sistema deverá exibir a lista de módulos disponíveis. Após clicar em “bloquear uso”, o método não estará mais disponível para uso na instalação
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O gerente deverá fazer login; 2. O gerente deverá acessar a guia "solicitação de métodos"; 3. Na guia “gerenciar métodos de caracterização”, o sistema deverá exibir a lista de métodos disponíveis; 4. Verificar documentação dos métodos clicando nos hiperlinks; 5. Clicar em “bloquear uso”.

Fonte: autora da tese

Tabela 16 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC07)

UC07	Edita módulos
Descrição	O gerente da instalação poderá revisão dos módulos disponíveis no sistema.
Referência	RF07, RF15
Atores	Gerente da instalação
Pré-condições	O gerente deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de gerenciamento.
Pós- condições	O sistema deverá exibir a lista de módulos disponíveis. Após clicar em “bloquear uso”, o método não estará mais disponível para uso na instalação. O gerente pode solicitar revisão do método para equipe de manutenção do sistema. O sistema deverá exibir a mensagem “Sua solicitação foi enviada. Aguarde o retorno do suporte”.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O gerente deverá fazer login; 2. O gerente deverá acessar a guia "solicitação de métodos”; 3. Na guia “gerenciar métodos de caracterização”, o sistema deverá exibir a lista de métodos; 4. Verificar documentação dos métodos clicando nos hiperlinks; 5. Clicar em “bloquear uso”; 6. Clicar em “solicitar revisão”; 7. Preencher campo em branco; 8. Clicar em “enviar”.

Fonte: autora da tese

Tabela 17 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC08)

UC08	Cadastra Instalação
Descrição	O gerente da instalação deve cadastrar a sua instalação.
Referência	RF04
Atores	Gerente da instalação
Pré-condições	O gerente deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de gerenciamento.
Pós- condições	Após cadastrar a instalação, a instalação deverá ser acrescentada na lista de instalações que ficam disponíveis no sistema para a fiscalização.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O gerente deverá fazer login; 2. O gerente deverá acessar a guia "cadastro de instalação”; 3. Preencher o formulário; 4. Clicar em “finalizar cadastro”.

Fonte: autora da tese

Tabela 18 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC09)

UC09	Encerra Instalação
Descrição	O gerente da instalação poderá solicitar o encerramento da sua instalação.
Referência	RF05
Atores	Gerente da instalação
Pré-condições	O gerente deverá estar logado no sistema e aceitar os termos de encerramento com a mensagem “ALERTA, essa ação bloqueia todos os operadores e armazena todos os dados, deseja prosseguir?”
Pós- condições	Após solicitar encerramento, o sistema deverá arquivar todos os dados gerados na instalação. Após encerramento, nenhum operador estará mais vinculado e nem poderá executar nenhuma ação no sistema.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O gerente deverá fazer login; 2. O gerente deverá acessar a guia "cadastro de instalação”; 3. O gerente deverá clicar no botão vermelho; 4. Concordar com os termos exibidos na tela; 5. Fazer upload de documentação de descomissionamento; 6. Concordar com a mensagem de alerta exibida; 7. Clicar em “finalizar”.

Fonte: autora da tese

Tabela 19 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC10)

UC10	Consulta Relatório
Descrição	o usuário pode pesquisar relatórios disponíveis da instalação e de rejeitos.
Referência	RF12
Atores	Gerente da instalação, operador da instalação e agente fiscalizador.
Pré-condições	O usuário deverá estar logado no sistema. O usuário deverá ter acesso ao módulo de relatório.
Pós- condições	Após definir os filtros, o sistema deverá retornar os relatórios disponíveis em hiperlinks que levarão a um arquivo em PDF.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O usuário deverá fazer login; 2. O gerente deverá acessar a guia "relatórios"; 3. Preencher os campos de filtro; 4. Clicar em “buscar”; 5. Clicar nos hiperlinks gerados; 6. Verificar o arquivo PDF; 7. Encerrar tarefa.

Fonte: autora da tese

Tabela 20 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC11)

UC11	Avalia Relatório
Descrição	O gerente da instalação poderá pesquisar relatórios disponíveis da instalação e avaliar os mesmos.
Referência	RF13
Atores	Gerente da instalação.
Pré-condições	O gerente deverá estar logado no sistema. O gerente deverá ter acesso ao módulo de gerenciamento de relatório.
Pós- condições	Após definir os filtros, o sistema deverá retornar os relatórios disponíveis em hiperlinks que levarão a um arquivo em PDF. O arquivo, se reprovado, deverá ser justificado e a mensagem de justificativa deverá ser enviada ao operador responsável. Se aprovado, o sistema deverá inserir verificação digital do gerente da instalação.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O gerente deverá fazer login; 2. O gerente deverá acessar a guia "relatórios"; 3. Preencher os campos de filtro; 4. Clicar em “buscar”; 5. Clicar nos hiperlinks gerados; 6. Verificar o arquivo PDF; 7. Clicar em “avaliar relatório”; 8. Reprovar o relatório e preencher [text:motivo] e enviar mensagem para operador ou; 9. Aprovar o relatório e inserir rubrica digital; 10. Encerrar tarefa.

Fonte: autora da tese

Tabela 21 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC12)

UC12	Exclui Relatório
Descrição	O gerente da instalação poderá pesquisar relatórios disponíveis da instalação e excluir os mesmos.
Referência	RF13
Atores	Gerente da instalação.
Pré-condições	O gerente deverá estar logado no sistema. O gerente deverá ter acesso ao módulo de gerenciamento de relatório.
Pós- condições	Após definir os filtros, o sistema deverá retornar os relatórios disponíveis em hiperlinks que levarão a um arquivo em PDF. O arquivo, se reprovado e impossibilitado de ser modificado, deverá ser justificado e excluído do sistema. O log de exclusão com justificativa deverá ser arquivado.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O gerente deverá fazer login; 2. O gerente deverá acessar a guia "relatórios"; 3. Preencher os campos de filtro; 4. Clicar em “buscar”; 5. Clicar nos hiperlinks gerados; 6. Verificar o arquivo PDF; 7. Clicar em “avaliar relatório”; 8. Reprovar o relatório e preencher [text:motivo]; 9. Clicar em “excluir relatório”; 10. Encerrar tarefa.

Fonte: autora da tese

Tabela 22 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC13)

UC13	Responde Agente Fiscalizador
Descrição	Ao receber uma notificação de relatório inconsistente vinda do agente fiscalizador, o gerente poderá responder à mensagem.
Referência	RF12.2, RF13
Atores	Gerente da instalação e agente fiscalizador.
Pré-condições	O gerente deverá estar logado no sistema. O gerente deverá ter acesso ao módulo de gerenciamento de relatório.
Pós- condições	Após verificar a mensagem do agente fiscalizador, o gerente deve responder à mensagem enviada com a justificativa e/ou link do relatório com as devidas correções.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O gerente deverá fazer login; 2. O gerente deverá acessar a guia "relatórios"; 3. Clicar em “notificação de pendências”; 4. Verificar as mensagens; 5. Responder as mensagens; 6. Preencher o campo com hiperlink de relatório; 7. Clicar em “enviar”; 8. Encerrar tarefa.

Fonte: autora da tese

Tabela 23 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC14)

UC14	Cadastra Rejeito
Descrição	O usuário pode cadastrar novos rejeitos no sistema .
Referência	RF08, RF08.1
Atores	Gerente da instalação e operador da instalação.
Pré-condições	O usuário deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de manutenção de informação.
Pós- condições	O sistema deverá armazenar as informações do rejeito e elas se tornarão disponíveis para consulta no sistema.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. o operador deverá fazer login; 2. o operador deverá acessar o módulo de Manutenção de Informação; 3. o operador deverá acessar a guia de Cadastrar Rejeito; 4. o operador deverá entrar com os parâmetros do rejeito sendo cadastrado; 5. o sistema deverá armazenar os dados do rejeito.

Fonte: autora da tese

Tabela 24 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC15)

UC15	Consulta Rejeito
Descrição	O usuário pode consultar os lotes de rejeitos cadastrados na instalação por meio de diversos parâmetros e filtros de busca.
Referência	RF08, RF08.1
Atores	Gerente da instalação e operador da instalação.
Pré-condições	O usuário deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de manutenção de informação.
Pós- condições	O sistema deverá exibir o relatório contendo os rejeitos consultados e hiperlink para acesso aos seus relatórios específicos.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O operador deverá fazer login; 2. O operador deverá acessar o módulo de manutenção de informação; 3. O operador deverá acessar a guia de consultar rejeito; 4. O operador deverá entrar com os parâmetros de busca; 5. O sistema deverá exibir os resultados; 6. O operador deverá selecionar o lote de rejeitos que deseja visualizar; 7. O sistema deverá exibir o relatório referente ao lote selecionado.

Fonte: autora da tese

Tabela 25 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC16)

UC16	Edita Rejeito
Descrição	O usuário pode editar rejeitos cadastrados no sistema.
Referência	RF08, RF08.1, RF08.3, RF08.5, RF08.6
Atores	Gerente da instalação e operador da instalação.
Pré-condições	O usuário deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de manutenção de informação.
Pós- condições	O sistema deverá atualizar as informações dos rejeitos editados e arquivar as informações anteriores e atuais.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O operador deverá fazer login; 2. O operador deverá acessar o módulo de manutenção de informação; 3. O operador deverá acessar a guia de consultar rejeito; 4. O operador deverá entrar com os parâmetros de busca; 5. O sistema deverá exibir os resultados; 6. O operador deverá selecionar o lote de rejeitos que deseja editar; 7. O operador deverá clicar em “editar”; 8. O operador deverá entrar com os parâmetros que deseja acrescentar ao rejeito; 9. O sistema deverá armazenar as novas informações de torná-las disponíveis para consulta.

Fonte: autora da tese

Tabela 26 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC17)

UC17	Registra Amostra
Descrição	O usuário pode registrar a retirada de amostra de um rejeito cadastrado ou uma nova amostra.
Referência	RF08, RF08.2
Atores	Gerente da instalação e operador da instalação.
Pré-condições	O usuário deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de manutenção de informação.
Pós- condições	Ao cadastrar uma amostra, o sistema deverá emitir uma micro-etiqueta para cada amostra cadastrada e armazenar as informações de cadastro.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O operador deverá fazer login; 2. O operador deverá acessar o módulo de manutenção de informação; 3. O operador deverá acessar a guia de cadastrar amostra; 4. O operador deverá entrar com os parâmetros da amostra sendo cadastrada; 5. O sistema deverá armazenar os dados da amostra.

Fonte: autora da tese

Tabela 27 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC18)

UC18	Edita Amostra
Descrição	O usuário pode editar o status de uma amostra ou rejeito cadastrado.
Referência	RF08, RF08.5
Atores	Gerente da instalação e operador da instalação.
Pré-condições	O usuário deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de manutenção de informação.
Pós- condições	O sistema deverá atualizar as informações das amostras editadas e arquivar as informações anteriores e atuais.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O operador deverá fazer login; 2. O operador deverá acessar o módulo de manutenção de informação; 3. O operador deverá acessar a guia de consultar rejeito; 4. O operador deverá entrar com os parâmetros de busca; 5. O sistema deverá exibir os resultados; 6. O operador deverá selecionar a amostra que deseja editar; 7. O operador deverá clicar em “editar”; 8. O operador deverá entrar com os parâmetros que deseja acrescentar ao rejeito; 9. O sistema deverá armazenar as novas informações de torná-las disponíveis para consulta.

Fonte: autora da tese

Tabela 28 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC19)

UC19	Emitir Etiqueta
Descrição	O usuário pode emitir etiquetas dos rejeitos e amostras cadastrados.
Referência	RF08, RF09, RF09.01, RF09.2
Atores	Gerente da instalação e operador da instalação.
Pré-condições	O usuário deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de manutenção de informação.
Pós- condições	O sistema deverá armazenar e possibilitar a consulta de informações do rejeito ou da amostra pela numeração gerada.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O usuário deverá fazer login; 2. O usuário deverá acessar o módulo de manutenção de informação; 3. O usuário deverá acessar a guia de cadastrar rejeito ou cadastrar amostra; 4. O usuário deverá entrar com os parâmetros solicitados na página de cadastro; 5. Clicar em “armazenar dados”; 6. Clicar em “gerar etiqueta”; 7. Encerrar tarefa.

Fonte: autora da tese

Tabela 29 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC20)

UC20	Atualiza Taxa de Dose
Descrição	O usuário pode atualizar a taxa de dose de um rejeito ou amostra.
Referência	RF08, RF08.7
Atores	Gerente da instalação e operador da instalação.
Pré-condições	O usuário deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de manutenção de informação.
Pós- condições	O sistema deverá atualizar o campo de taxa de dose no registro do rejeito ou da amostra e arquivar as informações anteriores e atuais.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O usuário deverá fazer login; 2. O usuário deverá acessar o módulo de manutenção de informação; 3. O usuário deverá acessar a guia de” busca de rejeito”; 4. Inserir a numeração da etiqueta; 5. Clicar em “atualizar taxa de dose”; 6. Preencher os campos indicados na página; 7. Clicar em “armazenar dados”; 8. Encerrar tarefa.
Fluxo de tarefas alternativo para plataforma mobile	<ol style="list-style-type: none"> 1. O usuário deverá fazer login; 2. O usuário deverá clicar em “escanear etiqueta”; 3. O usuário deverá confirmar as informações do escaneamento; 4. Preencher os campos indicados; 5. Clicar em “armazenar dados”; 6. Escanear outro rejeito ou; 7. Encerrar tarefa.

Fonte: autora da tese

Tabela 30 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC21)

UC21	Atualiza Atividade de Inventário ou de Rejeito
Descrição	O usuário pode atualizar a atividade do inventário completo ou de rejeitos específicos para data atual ou fazer projeção da atividade para uma determinada data.
Referência	RF10, RF10.1, RF10.2, RF14.7
Atores	Gerente da instalação e operador da instalação.
Pré-condições	O usuário deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de decaimento.
Pós- condições	O sistema deverá atualizar os valores de atividade do rejeito ou da amostra e arquivar as informações anteriores e atuais.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O usuário deverá fazer login; 2. O usuário deverá acessar o módulo de manutenção de informação; 3. O usuário deverá acessar a guia de "atualizar atividade"; 4. Clicar em "instalação" ou inserir a numeração de uma etiqueta; 5. Para projeção, digitar data desejada no campo "data"; 6. Clicar em "atualizar atividade"; 7. Se data atual, clicar em "armazenar dados"; 8. Encerrar tarefa.

Fonte: autora da tese

Tabela 31 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC22)

UC22	Submete Relatório Para Análise
Descrição	O usuário pode enviar um relatório para a análise do gerente da instalação
Referência	RF12, R12.1
Atores	Operador da instalação.
Pré-condições	O usuário deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de relatório.
Pós- condições	O sistema deverá sinalizar ao gerente da instalação que existem relatórios com avaliação pendente.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. o operador deverá fazer login; 2. o operador deverá acessar o módulo de Manutenção de Informação; 3. o operador deverá acessar a guia de Consultar Rejeito; 4. o operador deverá entrar com os parâmetros de busca; 5. o sistema deverá exibir os resultados; 6. o operador deverá selecionar o rejeito que deseja visualizar; 7. o sistema deverá exibir o relatório referente ao rejeito selecionado; 8. O operador deverá clicar em “submeter relatório para análise”; 9. Uma caixa de mensagens será aberta; 10. O operador pode ou não inserir texto na caixa; 11. O operador deve clicar em “submeter”; 12. O sistema enviará uma sinalização para o gerente da instalação sobre a pendência de avaliação; 13. encerrar tarefa.

Fonte: autora da tese

Tabela 32 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC23)

UC23	Aplica Métodos de Caracterização
Descrição	O usuário pode selecionar diferentes métodos de caracterização para aplicar aos rejeitos e amostras cadastrados.
Referência	RF14
Atores	Gerente da instalação e operador da instalação.
Pré-condições	O usuário deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de caracterização.
Pós- condições	O sistema deverá direcionar o usuário para a tela de escolha de métodos.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O usuário deverá fazer login; 2. O usuário deverá acessar o Módulo de Rejeitos; 3. O usuário deverá acessar a guia de Métodos de Caracterização; 4. O usuário deverá selecionar o método desejado; 5. O sistema apresentará a tela do método escolhido.

Fonte: autora da tese

Tabela 33 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC24)

UC24	Confirma Informações do Gerador
Descrição	O usuário caracteriza o rejeito utilizando informações prévias do gerador.
Referência	RF14, RF14.1. RF08.7, RF14.7
Atores	Gerente da instalação e operador da instalação.
Pré-condições	O usuário deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de caracterização.
Pós- condições	O sistema deverá armazenar as informações e atualizar as informações disponíveis no módulo de manutenção da informação e módulo de relatórios.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O usuário deverá fazer login; 2. O usuário deverá acessar o módulo de rejeitos; 3. O usuário deverá acessar a guia de métodos de caracterização; 4. O usuário deverá selecionar o método “informações do gerador”; 5. O sistema apresentará a tela do método escolhido; 6. O usuário deverá digitar o número da etiqueta do rejeito ou amostra; 7. O usuário deverá preencher os campos indicados na tela; 8. O usuário deverá fazer upload da imagem da etiqueta; 9. Atualizar taxa de dose; 10. Clicar em “armazenar dados”; 11. Encerrar tarefa.

Fonte: autora da tese

Tabela 34 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC25)

UC25	Aplica Método Radioquímico
Descrição	O usuário caracteriza o rejeito utilizando método radioquímico.
Referência	RF14, RF14.2, RF14.7
Atores	Gerente da instalação e operador da instalação.
Pré-condições	O usuário deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de caracterização.
Pós- condições	O sistema deverá armazenar as informações e atualizar as informações disponíveis no módulo de manutenção da informação e módulo de relatórios.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O usuário deverá fazer login; 2. O usuário deverá acessar o “módulo de rejeitos”; 3. O usuário deverá acessar a guia de “métodos de caracterização”; 4. O usuário deverá selecionar “método radioquímico”; 5. O sistema apresentará a tela do método escolhido; 6. O usuário deverá digitar o número da etiqueta do rejeito ou amostra; 7. O usuário deverá descrever de forma sucinta o tipo de processamento realizado no rejeito ou amostra; 8. O usuário deverá indicar o tipo de análise realizada, equipamentos utilizados e outros documentos que sejam de importância para o método; 9. O usuário deverá escolher na lista o tipo de atividade geradora do rejeito; 10. Selecionar os radionuclídeos presentes na lista que aparecerá na tela; 11. O usuário deve selecionar os tipos de emissores identificados; 12. Importar os relatórios de análise ou; 13. Inserir dados manualmente; 14. No caso de amostras, os valores de atividade deverão ser inseridos nos campos indicados; 15. No caso de amostra, o usuário poderá clicar em “propagar valor para embalado total”; 16. Clicar em “armazenar dados”; 17. Encerrar tarefa.

Fonte: autora da tese

Tabela 35 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC26)

UC26	Aplica Método Radiométrico
Descrição	O usuário caracteriza o rejeito utilizando método radiométrico.
Referência	RF14, RF14.3, RF14.7
Atores	Gerente da instalação e operador da instalação.
Pré-condições	O usuário deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de caracterização.
Pós- condições	O sistema deverá armazenar as informações e atualizar as informações disponíveis no módulo de manutenção da informação e módulo de relatórios.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O usuário deverá fazer login; 2. O usuário deverá acessar o “módulo de rejeitos”; 3. O usuário deverá acessar a guia de “métodos de caracterização”; 4. O usuário deverá selecionar “método radiométrico”; 5. O sistema apresentará a tela do método escolhido; 6. O usuário deverá digitar o número da etiqueta do rejeito ou amostra; 7. O usuário deverá indicar o tipo de análise realizada, equipamentos utilizados e outros documentos que sejam de importância para o método; 8. O usuário deverá escolher na lista o tipo de atividade geradora do rejeito; 9. Selecionar os radionuclídeos presentes na lista que aparecerá na tela; 10. O usuário deve selecionar os tipos de emissores identificados; 11. Importar os relatórios de análise ou; 12. Inserir dados manualmente; 13. No caso de amostras, os valores de atividade deverão ser inseridos nos campos indicados; 14. No caso de amostra, o usuário poderá clicar em “propagar valor para embalado total”; 15. Clicar em “armazenar dados”; 16. Encerrar tarefa.

Fonte: autora da tese

Tabela 36 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC27)

UC27	Aplica Método Dose para Atividade
Descrição	O usuário caracteriza o rejeito utilizando o método dose para atividade.
Referência	RF14, RF14.4, RF08.7, RF14.7
Atores	Gerente da instalação e operador da instalação.
Pré-condições	O usuário deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de caracterização.
Pós- condições	O sistema deverá armazenar as informações e atualizar as informações disponíveis no módulo de manutenção da informação e módulo de relatórios.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O usuário deverá fazer login; 2. O usuário deverá acessar o “módulo de rejeitos”; 3. O usuário deverá acessar a guia de “métodos de caracterização”; 4. O usuário deverá selecionar “método dose para atividade”; 5. O sistema apresentará a tela do método escolhido; 6. O usuário deverá digitar o número da etiqueta do rejeito ou amostra; 7. Selecionar a geometria a ser aplicada; 8. Informar dimensões da geometria selecionada; 9. O usuário deverá escolher na lista o tipo de atividade geradora do rejeito; 10. Selecionar os radionuclídeos presentes na lista que aparecerá na tela; 11. Clicar em “materiais”; 12. Selecionar na lista o(s) material(is) da fonte; 13. Selecionar o(s) material(is) da blindagem e informar espessura(s); 14. Clicar em “valores de entrada”; 15. Inserir taxa de dose medida e distância; 16. Inserir valores de atividade estimados para cada radionuclídeo selecionado anteriormente; 17. Clicar em “calcular caso”; 18. o sistema deverá exibir os resultados e comparar com os dados de entrada; 19. O usuário deverá clicar em “aceitar” ou “rejeitar” os resultados; 20. Em caso de aceite, o usuário deve clicar em “armazenar dados”; 21. Em caso de recusa, o sistema deve voltar para o menu de métodos de caracterização; 22. Encerrar tarefa.

Fonte: autora da tese

Tabela 37 – Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC28)
(continua)

UC28	Aplica Método Fator de Escala e Função de Correlação
Descrição	O usuário caracteriza o rejeito utilizando o método de fator de escala ou de função de correlação.
Referência	RF14, RF14.5, RF14.2
Atores	Gerente da instalação e operador da instalação.
Pré-condições	O usuário deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de caracterização.
Pós- condições	O sistema deverá armazenar as informações de fatores de escala e função de correlação para as relações de radionuclídeo difícil de medir/radionuclídeo chave ou calcular atividade de RDM com valores já armazenados de FE ou FC. O sistema deverá armazenar as informações e atualizar as informações disponíveis no módulo de manutenção da informação e módulo de relatórios.
Fluxo de tarefas para escolher método	<ol style="list-style-type: none"> 1. O usuário deverá fazer login; 2. O usuário deverá acessar o “módulo de rejeitos”; 3. O usuário deverá acessar a guia de “métodos de caracterização”; 4. O usuário deverá selecionar “método fator de escala e função de correlação”; 5. O sistema apresentará a tela do método escolhido; 6. O sistema apresentará uma tela com uma lista de rejeitos que já possuem mais de 10 amostras com análise radioquímica cadastrada por lote, mas sem fator de escala calculado; 7. Uma segunda lista será exibida contendo os lotes que já possuem fator de escala calculado; 8. O usuário deve escolher “calcular novo FE/FC”, “atualizar FE/FC” ou “aplicar FE/FC”.
Fluxo de tarefas para calcular FE ou FC	<ol style="list-style-type: none"> 1. Selecionar lote; 2. Os valores de “dados originais” devem ser exibidos; 3. Clicar em “continuar”; 4. Uma lista de RDM’s e RC’s será exibida; 5. O usuário pode escolher múltiplos RDM’s mas somente um RC; 6. O sistema fará o cálculo de fator de escala para as relações RDM/RC escolhidas pelo usuário; 7. O sistema exibirá o gráfico de atividades dos núcleos difíceis de medir em torno da atividade média, com suas respectivas incertezas. O sistema exibirá o gráfico dos valores de fator de escala em torno do fator de escala médio; 8. O usuário pode usar os gráficos como critério para remover possíveis outliers, selecionando os pontos que deseja excluir do cálculo; 9. O sistema recalcula o fator de escala usando os novos conjuntos de dados; 10. Caso o usuário clique em “prosseguir” sem excluir mais conjuntos de amostra, o sistema prossegue com os cálculos; 11. O sistema apresenta o valor de $D2\sigma$ e verifica se é menor ou igual a 10. Se verdadeiro, o usuário deverá clicar em “armazenar dados de fator de escala” e a tarefa é encerrada; 12. Se falso, o usuário poderá aceitar fator de escala fora da margem estatística ou clicar em calcular função de correlação. Se o usuário clica em “aceitar”, o botão “armazenar dados de fator de escala” aparecerá na tela, o usuário deverá clicar e a tarefa será encerrada;

Tabela 37 – (Continuação) Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC28) (continua)

Fluxo de tarefas para calcular FE ou FC	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se o usuário clicar em “calcular função de correlação”, o sistema usará regressão linear para calcular a função de correlação, exibirá o valor de R^2 na tela e verifica se é maior que 0.6. Se for, o sistema perguntará se o usuário deseja usar a função de correlação obtida; 2. Se maior que 0.6, o usuário deverá clicar em “armazenar dados de função de correlação”. Se menor, o sistema armazenará “dados originais” sem modificações; 3. A tela deve retornar para menu de caracterização.
Fluxo de tarefas para melhorar/atualizar FE ou FC	<ol style="list-style-type: none"> 1. Selecionar lote; 2. Os valores de “dados originais” devem ser exibidos; 3. Clicar em “continuar” e “atualizar valores”; 4. Caso não existam valores novos de amostra, o sistema exibirá a mensagem: “não existem novos valores” e a atividade encerra e o usuário volta para o menu de caracterização; 5. Caso existam valores novos, o sistema fará o cálculo de fator de escala para as relações RDM/RC que já estavam armazenadas; 6. O sistema exibirá o gráfico de atividades dos nuclídeos difíceis de medir em torno da atividade média, com suas respectivas incertezas. O sistema exibirá o gráfico dos valores de fator de escala em torno do fator de escala médio; 7. O usuário pode usar os gráficos como critério para remover possíveis outliers, selecionando os pontos que deseja excluir do cálculo; 8. O sistema recalcula o fator de escala usando os novos conjuntos de dados; 9. Caso o usuário clique em “prosseguir” sem excluir mais conjuntos de amostra, o sistema prossegue com os cálculos; 10. O sistema apresenta o valor de $D2\sigma$ e verifica se for menor ou igual a 10. Se verdadeiro, o usuário deverá clicar em “armazenar dados de fator de escala” e a tarefa é encerrada; 11. Se falso, o usuário poderá aceitar fator de escala fora da margem estatística ou clicar em calcular função de correlação. Se o usuário clica em “aceitar”, o botão “armazenar dados de fator de escala” aparecerá na tela, o usuário deverá clicar e a tarefa é encerrada; 12. Se o usuário clicar em “calcular função de correlação”, o sistema usará regressão linear para calcular a função de correlação, exibirá o valor de R^2 na tela e verifica se é maior que 0.6. Se for, o sistema perguntará se o usuário deseja usar a função de correlação obtida; 13. Se maior que 0.6, o usuário deverá clicar em “armazenar dados de função de correlação”. Se menor, o sistema armazenará “dados originais” sem modificações.; 14. A tela deve retornar para menu de caracterização.

Tabela 37 – (Continuação) Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC28)

Fluxo de tarefas para aplicar FE ou FC	<ol style="list-style-type: none">1. Selecionar lote;2. O usuário deve digitar etiqueta do rejeito;3. Selecionar RC na lista que aparecerá na tela;4. Selecionar RDM's na lista que aparecerá na tela;5. Inserir atividade de RC;6. Clicar em “aplicar FE/FC”;7. O usuário deverá clicar em “armazenar dados de atividade”;8. A tela deve retornar para menu de caracterização.
--	--

Fonte: autora da tese

Tabela 38 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC29)

UC29	Aplica Método Modelagem da Instalação
Descrição	O usuário caracteriza o rejeito utilizando o método de modelagem da instalação.
Referência	RF14, RF14.6, RF14.7
Atores	Gerente da instalação e operador da instalação.
Pré-condições	O usuário deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de caracterização.
Pós-condições	Armazenar as informações de modelagem da instalação vinculadas a numeração de etiqueta do rejeito e atualizar as informações disponíveis no módulo de manutenção da informação e módulo de relatórios.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O usuário deverá fazer login; 2. O usuário deverá acessar o “módulo de rejeitos”; 3. O usuário deverá acessar a guia de “métodos de caracterização”; 4. O usuário deverá clicar em “modelagem da instalação”; 5. Uma tela exibirá as modelagens disponíveis para cada material vinculado a sua respectiva instalação; 6. O usuário seleciona a modelagem desejada; 7. após verificar o documento o usuário poderá clicar em “caracterizar”; 8. O usuário deverá inserir número da etiqueta do rejeito no campo indicado; 9. O usuário deverá clicar em “armazenar dados”; 10. Encerrar tarefa.

Fonte: autora da tese

Tabela 39 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC29)

UC30	Consulta Bibliografia
Descrição	O usuário consulta a bibliografia disponível.
Referência	RF02, RF16, RF12, RF17
Atores	Gerente da instalação e operador da instalação.
Pré-condições	O usuário deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de bibliografia.
Pós-condições	O sistema deverá exibir para o usuário a referência bibliográfica consultada.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O usuário deverá acessar a guia "bibliografia"; 2. Preencher os campos de filtro; 3. Clicar em "buscar"; 4. Clicar nos hiperlinks gerados; 5. Verificar o arquivo PDF.

Fonte: autora da tese

Tabela 40 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC31)

UC31	Consulta Informação da Instalação
Descrição	O agente fiscalizador consulta as informações de cadastro da instalação.
Referência	RF02, RF16
Atores	Agente fiscalizador e Gerente da instalação.
Pré-condições	O usuário deverá estar logado no sistema com a acesso a tela de “solicitação de acesso”.
Pós-condições	O sistema deverá enviar notificação de pedido de acesso para o gerente da instalação.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O agente fiscalizador deverá fazer login; 2. Uma tela com uma lista de instalações cadastradas será exibida; 3. O agente fiscalizador deverá selecionar uma instalação; 4. Uma tela com as informações da instalação deverá ser exibida; 5. O agente fiscalizador deverá clicar e “solicitar acesso”; 6. O pedido de solicitação de acesso será enviado ao gerente da instalação; 7. Encerrar tarefa.

Fonte: autora da tese

Tabela 41 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC32)

UC32	Consulta e Avalia Relatório
Descrição	O agente fiscalizador consulta relatórios da instalação ou de rejeitos e avalia relatórios.
Referência	RF02, RF16, RF12, RF17
Atores	Agente fiscalizador e Gerente da instalação.
Pré-condições	O usuário deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de consulta de relatórios.
Pós-condições	O sistema deverá exibir para o usuário a os relatórios disponíveis e uma caixa de diálogo para inserção do parecer. Se aprovado o relatório deverá ser rubricado digitalmente, se reprovado, enviar sinalização para o gerente da instalação.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O agente fiscalizador deverá fazer login e inserir token; 2. agente fiscalizador deverá acessar a guia "relatórios"; 3. Preencher os campos de filtro; 4. Clicar em “buscar”; 5. Clicar nos hiperlinks gerados; 6. Verificar o arquivo PDF; 7. Clicar em “avaliar relatório”; 8. Reprovar o relatório e preencher [text:motivo] e enviar mensagem para o gerente da instalação OU; 9. Aprovar o relatório e inserir rubrica digital; 10. Encerrar tarefa.

Fonte: autora da tese

Tabela 42 - Descrição das unidades funcionais do sistema por operação (UC33)

UC33	Revisa Relatório
Descrição	O operador da instalação consulta se existem relatórios indicados para a revisão pelo gerente, avaliando o relatório e reenviando para o gerente.
Referência	RF13
Atores	Operador da instalação e Gerente da instalação.
Pré-condições	O usuário deverá estar logado no sistema e ter acesso ao módulo de consulta de relatórios.
Pós-condições	O sistema deverá exibir para o usuário se existem relatórios com revisão pendente. Após a revisão, o sistema deverá sinalizar para o gerente da instalação que o relatório está revisado e pronto para avaliação final.
Fluxo de tarefas	<ol style="list-style-type: none"> 1. O operador deverá fazer login; 2. O operador deverá acessar a guia "relatórios"; 3. Verificar se existem relatórios indicados para a sua revisão; 4. Caso existam relatórios pendentes, clicar em “acessar”; 5. Verificar o arquivo PDF; 6. Clicar em “avaliar relatório”; 7. Preencher avaliação [text:motivo]; 8. Clicar em “enviar relatório com revisão”; 9. O relatório será enviado para o gerente da instalação; 10. Encerrar tarefa.

Fonte: autora da tese

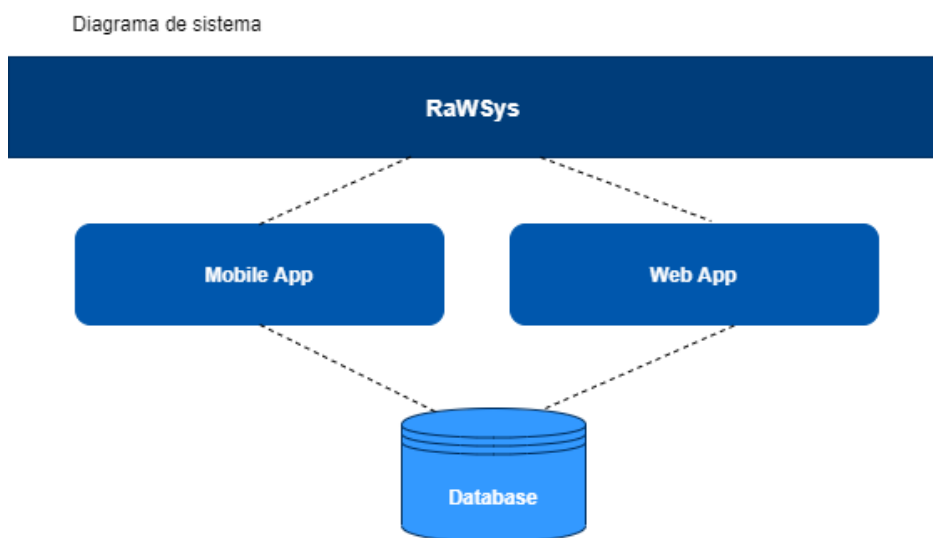
10. VISÃO LÓGICA DO SISTEMA

A visão lógica define a estrutura da arquitetura do sistema. Abaixo, apresentam-se os diagramas para guiar o desenvolvimento.

O sistema deverá estar acessível por duas plataformas: WEB e MOBILE. A plataforma MOBILE tem como intuito auxiliar operadores e gerentes no trabalho de campo (rotina operacional) para atualização de dados de taxa de dose. Assim, não deverá oferecer acesso a outros módulos do sistema.

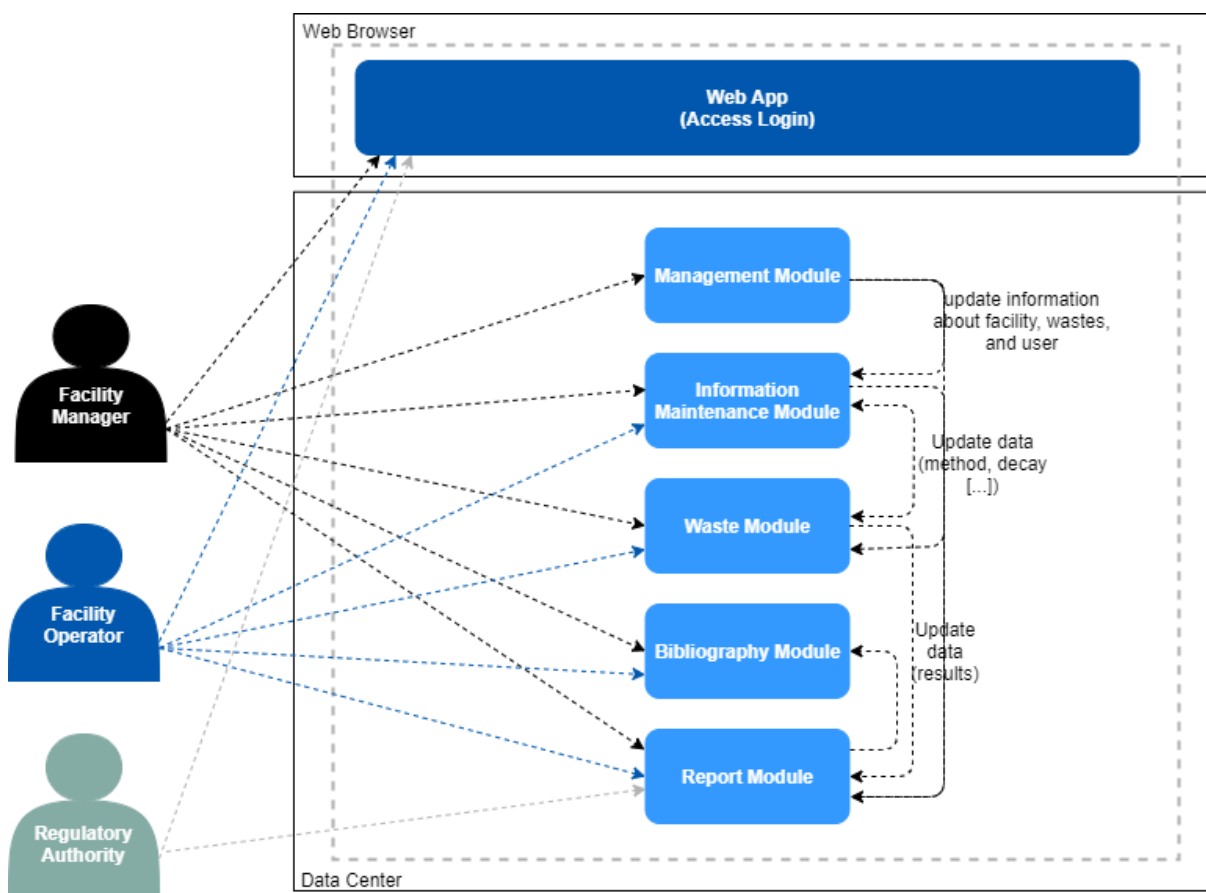
A plataforma WEB deverá permitir o acesso a outros módulos, pertinentes a rotina de gerenciamento de rejeitos radioativos, de acordo com o acesso definido para cada ator.

Figura 28 - Visão lógica- interfaces do sistema



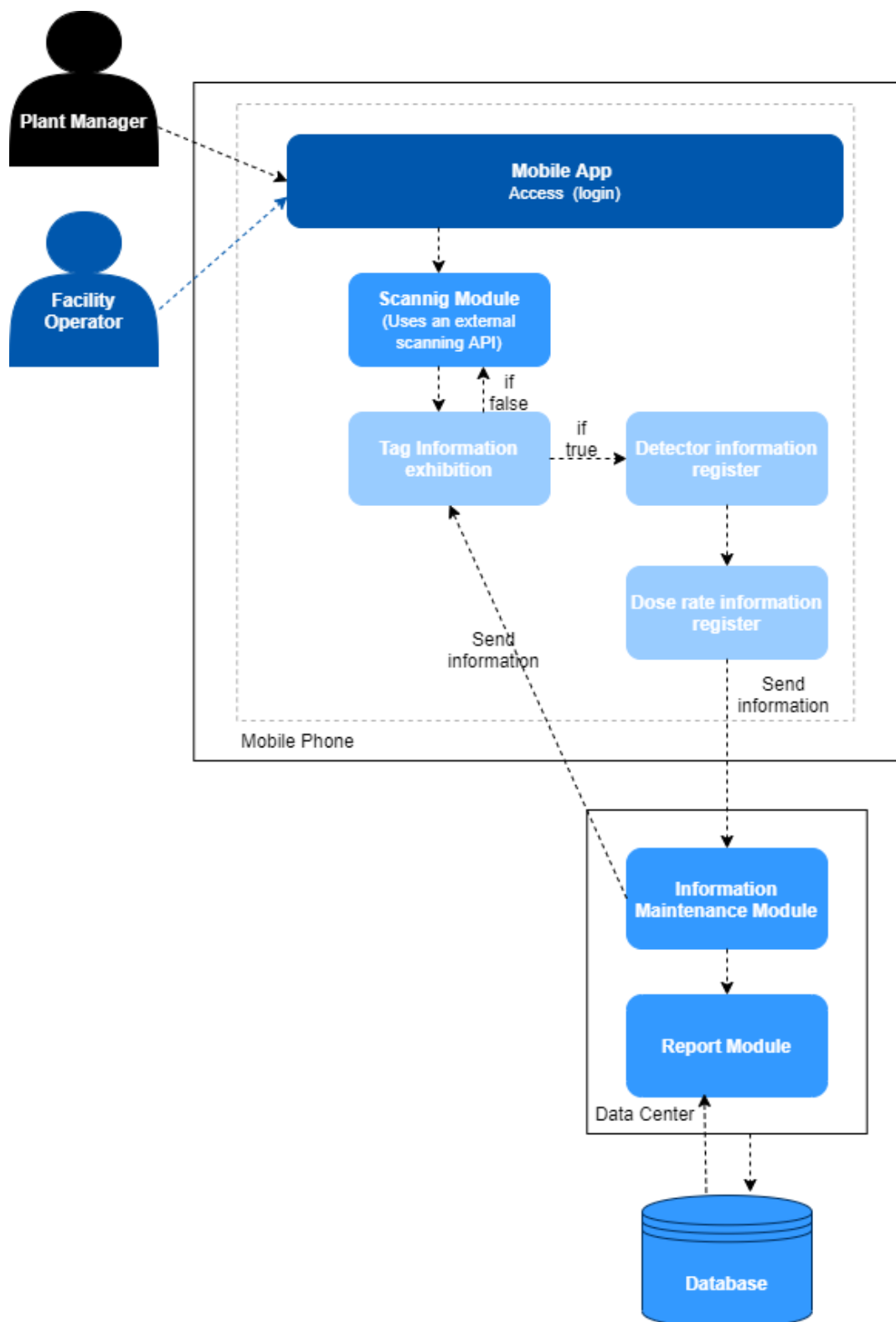
Fonte: autora da tese

Figura 29 - Visão lógica- restrição de acesso WEB por ator



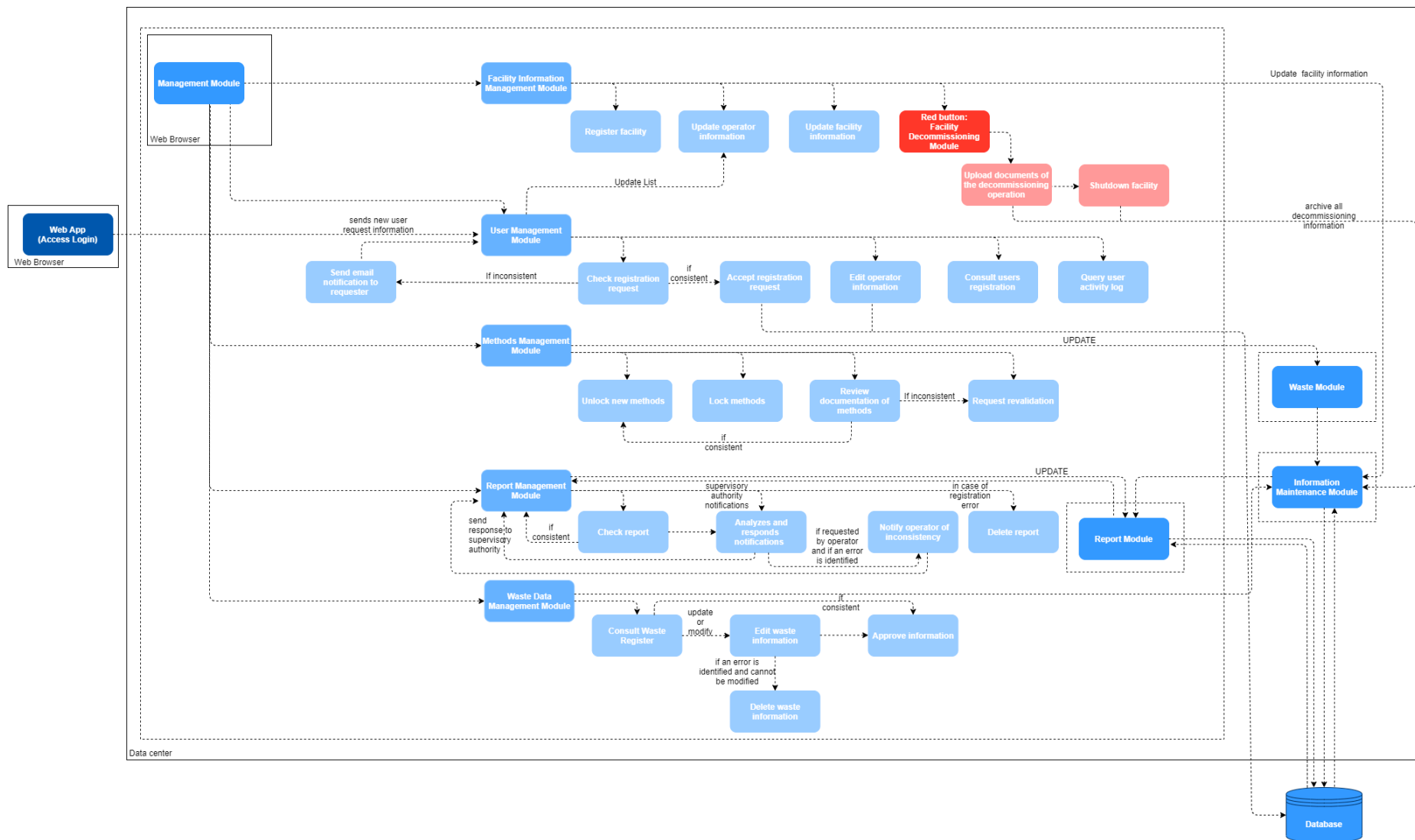
Fonte: autora da tese

Figura 30 - Visão lógica -plataforma MOBILE



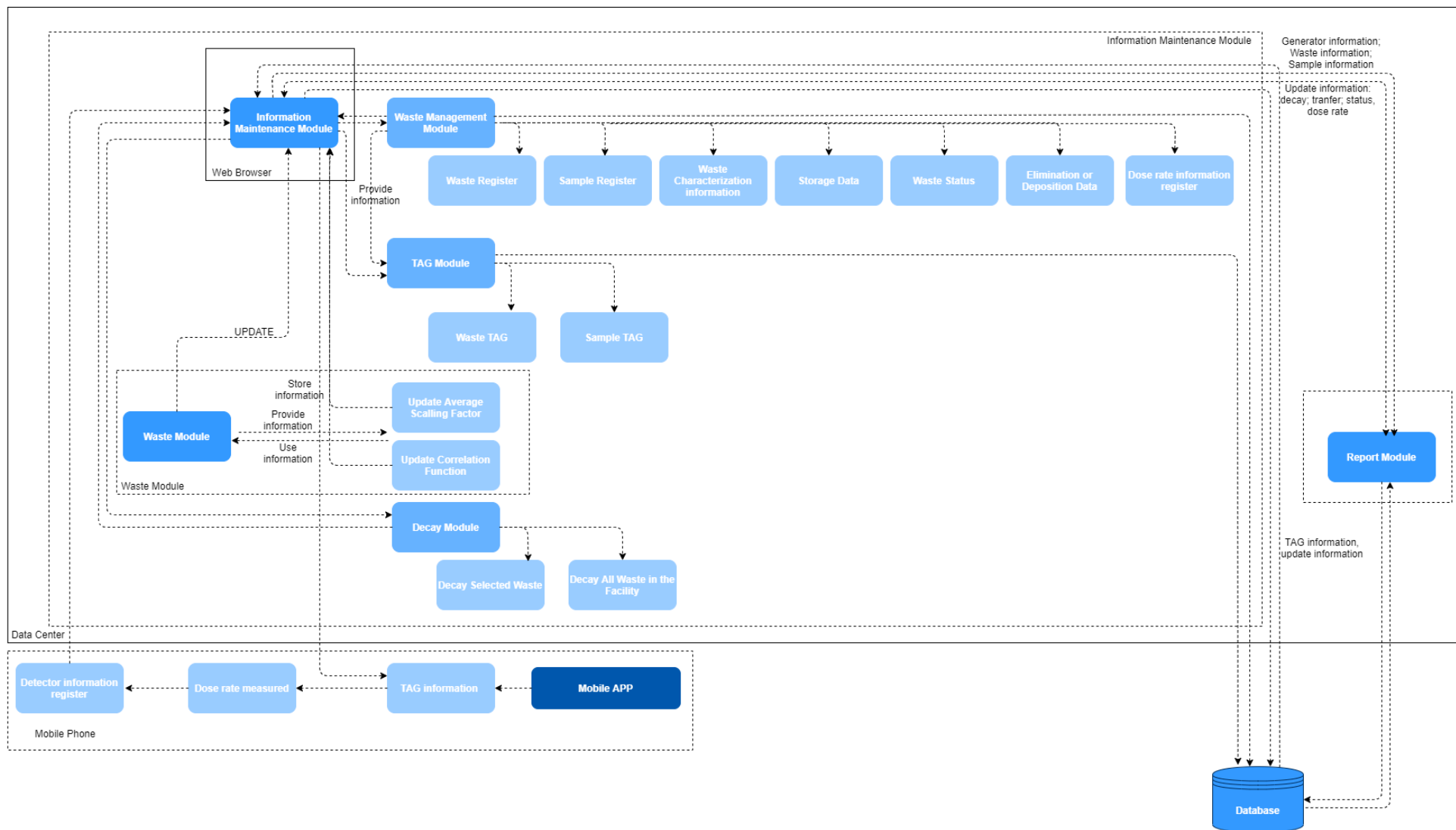
Fonte: autora da tese

Figura 31 – Visão lógica, aplicação Web (ampliar em 170% para leitura)



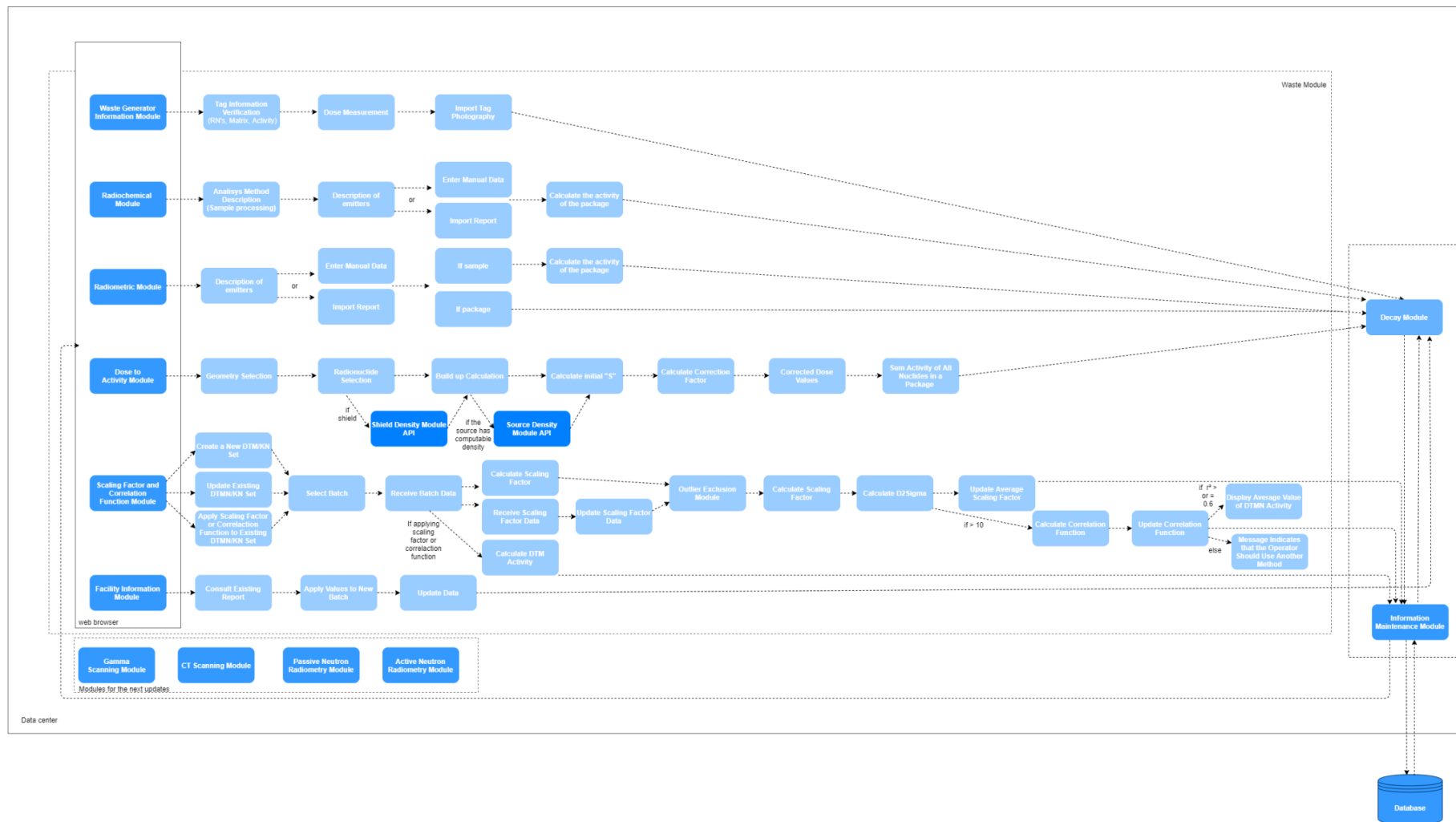
Fonte: autora da tese

Figura 32 – Visão lógica, módulo de manutenção de informações de rejeitos (ampliar em 170% para leitura)



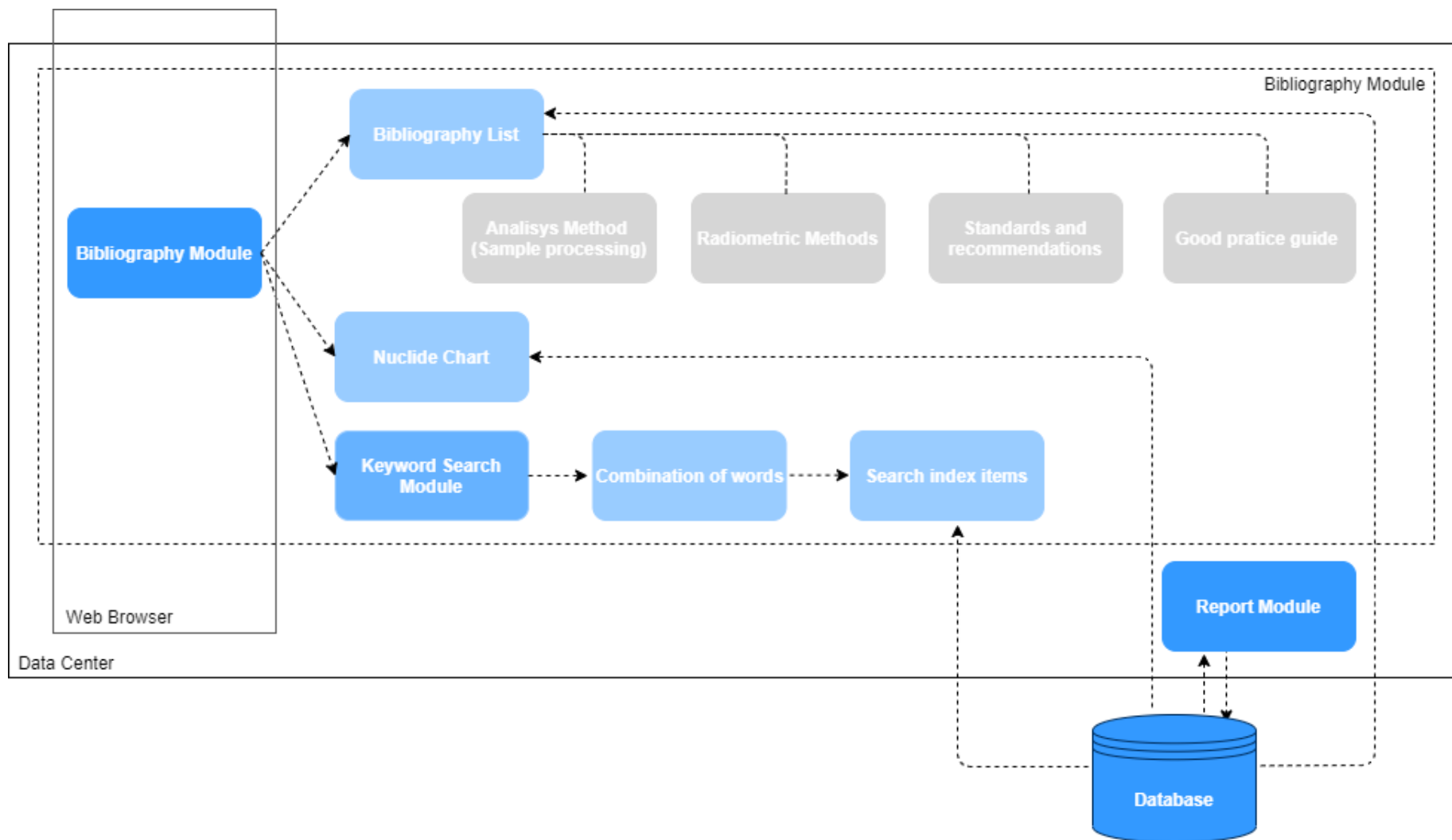
Fonte: autora da tese

Figura 33 – Visão lógica, módulo de caracterização de rejeitos (ampliar em 170% para leitura)



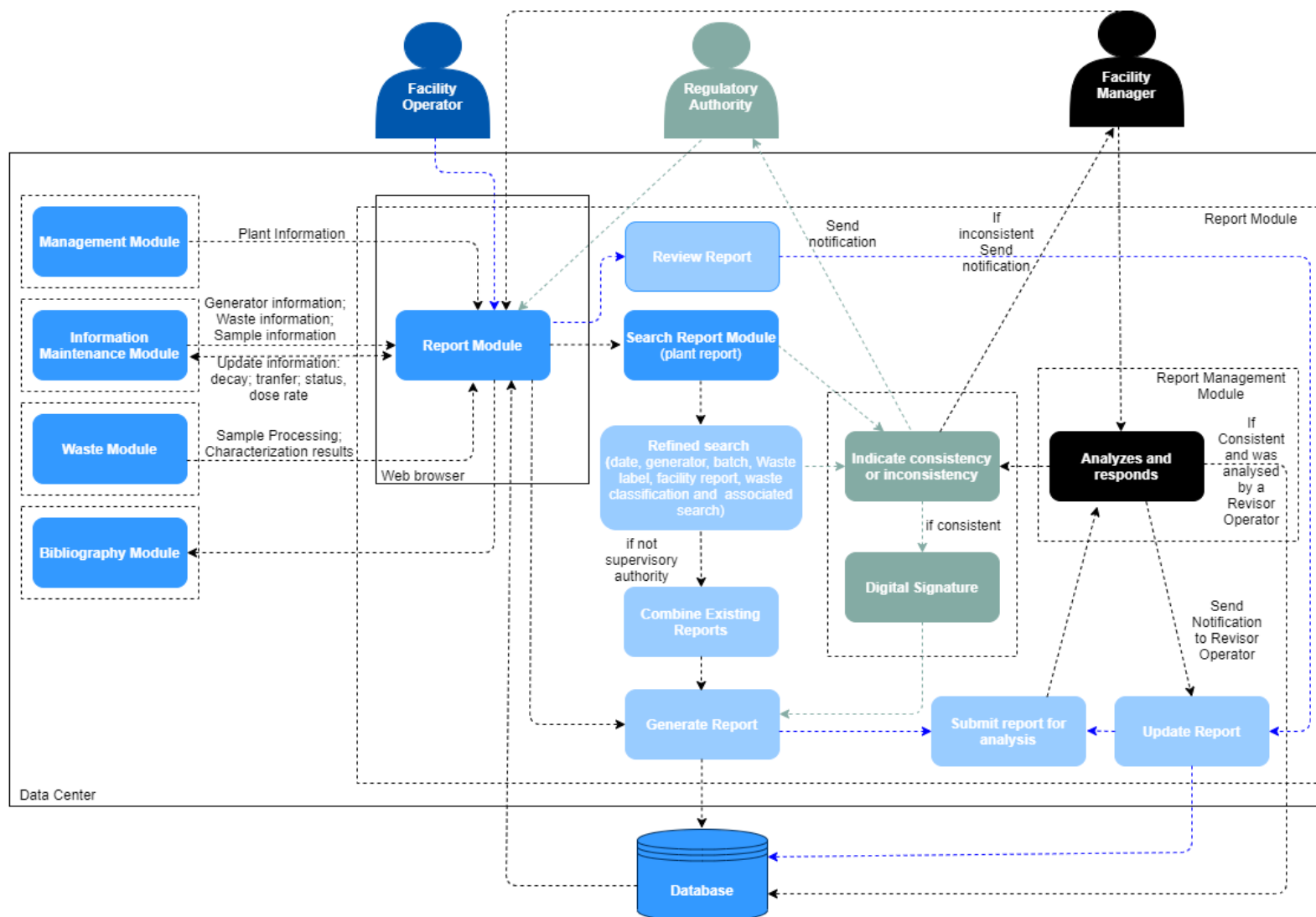
Fonte: autora da tese

Figura 34 – Visão lógica do módulo de armazenamento e consulta de bibliografia (ampliar em 120% para leitura)



Fonte: autora da tese

Figura 35 – Visão lógica do módulo de geração, validação e consulta de relatórios (ampliar em 120% para leitura)



Fonte: autora da tese

11. TESTES UNITÁRIOS

Por não serem modelos matemáticos, os testes não foram realizados para os métodos (1) informação do gerador, (2) análise radioquímica de amostras, (3) análise radiométrica e (4) análise radiométrica de varredura gama. Os métodos estão descritos na documentação e na prototipagem de telas consolidando as informações obrigatórias para o armazenamento e rastreamento do histórico de rejeitos radioativos. Para os métodos dose-para-atividade, fatores de escala e funções de correlação, Bateman, oito testes foram realizados (Apêndice B), usando dados extraídos da literatura para a composição dos cenários:

- Fonte selada radioativa com a aplicação do modelo para fonte pontual Ir-192 e Co-60
- Fonte selada radioativa com a aplicação do modelo para fonte pontual Ir-192 e Co-60, mas usando, em vez de fonte pontual, o modelo de fonte cilíndrica;
- Várias fontes Ir-192 e Co-60 agrupadas em um cilindro de plástico (50 fontes exatamente) avaliadas pelo modelo de fonte cilíndrica para determinar atividades Ir-192 e Co-60 independentemente;
- Fonte cúbica para caixas de papel contaminados com Cs-137 / Ba-137M;
- Fonte cilíndrica para tambor de 200 L contendo resina de troca iônica gasta com Cs-137 / Ba-137M e Co-60;
- Fonte cilíndrica para tambores contendo dois tipos de rejeitos mistos com Cs-137 / Ba-137M e Co-60;
- Fatores de escala para a determinação da atividade de Pu-238, U-234, Th-230, Ra-226
- Decaimento utilizando Bateman para a série de decaimento Pu-238.

11.1. Caso de teste 1

Fluxo de caracterização- Método “Dose- to- activity” para fonte **puntiforme**.

Objetivo:

- Calcular a dose utilizando os parâmetros oferecidos no tópico “pré-condições”;
- Calcular o fator de correção;
- Calcular atividade corrigida para nuclídeo 1;
- Calcular atividade corrigida para nuclídeo 2.
- Calcular nova taxa de dose;

- Verificar se o valor de atividade para nuclídeo 1 está correto;
- Verificar se o valor de atividade para nuclídeo 2 está correto.

Pré-condições:

Considere geometria “puntiforme”.

Dados de entrada (ROLINDO, 2020):

Tabela 43 - Dados de entrada caso 1

	Parâmetro	Unidade	Valor	Tipo
FSDR 29* (Ir-192)	Altura	cm	0,4	-
	Raio	cm	0,15	-
	Distância para medida de taxa de dose	cm	5,5	-
	Altura da medida da taxa de dose em relação a fonte	cm	0,2	-
	Blindagem 1 (espessura)	cm	0,08	-
	Densidade da fonte	g/cm ³	22,5	Irídio
	Densidade da blindagem	g/cm ³	7,87	Aço
	Taxa de dose medida	μSv.h ⁻¹	11,0	
	Nuclídeo 1	Atividade (Bq)	9,5E+03	Ir-192
	Nuclídeo 2	Atividade (Bq)	6,6E+04	Co-60

Fonte: autora da tese

Considerando geometria puntiforme, os resultados esperados são apresentados na tabela 44:

Tabela 44 – Resultados esperados caso 1

	Parâmetro	Unidade	Valor	Tipo
FSDR 29* (Ir-192)	Dose calculada	μSv.h ⁻¹	6,6	-
	Fator de correção	-	1,66	-
	Atividade corrigida para Nuclídeo 1	Atividade (Bq)	1,6E+04	Ir-192
	Atividade corrigida para Nuclídeo 2	Atividade (Bq)	1,1E+05	Co-60

Fonte: autora da tese

Considerando os passos feitos para geometria puntiforme, os resultados obtidos foram:

Tabela 45 - Resultados obtidos caso 1

	Parâmetro	Unidade	Valor	Tipo
FSDR 29* (Ir-192)	Dose calculada	μSv.h ⁻¹	8,9	-
	Fator de correção	-	1,23	-
	Atividade corrigida para Nuclídeo 1	Atividade (Bq)	1,17E+04	Ir-192
	Atividade corrigida para Nuclídeo 2	Atividade (Bq)	8,15E+04	Co-60
	Dose calculada após correção da atividade	μSv.h ⁻¹	11,0	-

Fonte: autora da tese

Resultado final do teste:

Sucesso Insucesso

Se necessário, descreva:

 Defeito Erro Falha

Observações: as diferenças observadas entre os valores de atividade calculados manualmente pela referência e pelo algoritmo desenvolvido se deve pela consideração de pontos na curva dos materiais utilizados para o cálculo.

11.2. Caso de teste 2

Fluxo de caracterização - Método “Dose- to- activity” para fonte **cilíndrica**

Objetivo:

- Calcular a dose utilizando os parâmetros oferecidos no tópico “pré-condições”;
- Calcular o fator de correção;
- Calcular atividade corrigida para nuclídeo 1;
- Calcular atividade corrigida para nuclídeo 2.
- Calcular nova taxa de dose;
- Verificar se o valor de atividade para nuclídeo 1 está correto;
- Verificar se o valor de atividade para nuclídeo 2 está correto.

Pré-condições:

Considere geometria “puntiforme”.

Dados de entrada (ROLINDO, 2020):

Tabela 46 - Dados de entrada caso 2

	Parâmetro	Unidade	Valor	Tipo
FSDR 29* (Ir- 192)	Altura	cm	0,4	-
	Raio	cm	0,15	-
	Distância para medida de taxa de dose	cm	5,5	-
	Altura da medida da taxa de dose em relação a fonte	cm	0,2	-
	Blindagem 1 (espessura)	cm	0,08	-
	Densidade da fonte	g/cm ³	22,5	Írídio
	Densidade da blindagem	g/cm ³	7,87	Aço
	Taxa de dose medida	µSv.h ⁻¹	11,0	-
	Nuclídeo 1	Atividade (Bq)	9,5E+03	Ir-192
	Nuclídeo 2	Atividade (Bq)	6,6E+04	Co-60

Fonte: autora da tese

Considerando geometria puntiforme, os resultados esperados são:

Tabela 47 - Resultados esperados caso 2

	Parâmetro	Unidade	Valor	Tipo
FSDR 29* (Ir- 192)	Dose calculada	$\mu\text{Sv.h}^{-1}$	6,6	-
	Fator de correção	-	1,66	-
	Atividade corrigida para Nuclídeo 1	Atividade (Bq)	1,6E+04	Ir-192
	Atividade corrigida para Nuclídeo 2	Atividade (Bq)	1,1E+05	Co-60

Fonte: autora da tese

Considerando os passos feitos para geometria puntiforme, os resultados obtidos foram:

Tabela 48 - Resultados obtidos caso 2

	Parâmetro	Unidade	Valor	Tipo
FSDR 29* (Ir- 192)	Dose calculada	$\mu\text{Sv.h}^{-1}$	11,0	-
	Fator de correção	-	1,0	-
	Atividade corrigida para Nuclídeo 1	Atividade (Bq)	9,48E+03	Ir-192
	Atividade corrigida para Nuclídeo 2	Atividade (Bq)	6,59E+04	Co-60
	Dose calculada após correção da atividade	$\mu\text{Sv.h}^{-1}$	11,0	-

Fonte: autora da tese

Resultado final do teste:

- Sucesso
 Insucesso

Se necessário, descreva:

- Defeito
 Erro
 Falha

Observações: O algoritmo se mostrou eficiente se tratando da aproximação cilíndrica. Sabendo que os dados de entrada estavam corretos e que foram considerados os valores de auto atenuação da fonte, o algoritmo chegou nos mesmos valores, diferente dos valores apontados pela referência ao utilizar um software secundário para o cálculo.

11.3. Caso de teste 3

Fluxo de caracterização- Método “Dose-to- activity” para fonte **cilíndrica**

Objetivo:

- Calcular a dose utilizando os parâmetros oferecidos no tópico “pré-condições”;
- Comparar taxa de dose medida com taxa de dose calculada;
- Verificar se o valor de atividade para nuclídeo 1 está correto;
- Verificar se o valor de atividade para nuclídeo 2 está correto.

Pré-condições:

Considere geometria “cilíndrica”.

Dados de entrada (ROLINDO, 2020):

Tabela 49 - Dados de entrada caso 3

	Parâmetro	Unidade	Valor	Tipo
Cilindro com grupo de FRSD (Ir-192)	Altura	cm	8	-
	Raio	cm	1,75	-
	Distância para medida de taxa de dose	cm	21,75	-
	Altura da medida da taxa de dose em relação a fonte	cm	4	-
	Densidade da fonte	g/cm ³	2,28	Irídio
	Taxa de dose medida	μSv.h ⁻¹	26,07	-
	Nuclídeo 1	Atividade (Bq)	1,1E+06	Ir-192
	Nuclídeo 2	Atividade (Bq)	4,1E+06	Co-60

Fonte: autora da tese

Tabela 50 - Resultados esperados caso 3

	Parâmetro	Unidade	Valor
Cilindro com grupo de FRSD (Ir-192)	Taxa de dose medida	μSv.h ⁻¹	26,07
	Dose calculada	μSv.h ⁻¹	27,37

Fonte: autora da tese

Considerando os passos feitos para geometria cilíndrica, os resultados obtidos foram:

Tabela 51 - Resultados obtidos caso 3

	Parâmetro	Unidade	Valor	Tipo
Cilindro com grupo de FRSD (Ir-192)	Dose calculada	μSv.h ⁻¹	29,0	-
	Fator de correção	-	0,9	-
	Atividade corrigida para Nuclídeo 1	Atividade (Bq)	9,89E+05	Ir-192
	Atividade corrigida para Nuclídeo 2	Atividade (Bq)	3,68E+06	Co-60
	Dose calculada após correção da atividade	μSv.h ⁻¹	26,07	-

Fonte: autora da tese

Resultado final do teste:

- Sucesso
 Insucesso

Se necessário, descreva:

- Defeito
 Erro
 Falha

Observações: a aplicação de fator de correção que acontece em um dos passos do algoritmo mostra que os resultados de atividade podem ser ajustados até que tenham correspondência com a taxa de dose medida.

11.4. Caso de teste 4

Fluxo de caracterização- Método “Dose-to- activity” para fonte **cubica**

Objetivo:

- Calcular a dose utilizando os parâmetros oferecidos no tópico “pré-condições”;
- Calcular o fator de correção;
- Calcular atividade corrigida para nuclídeo 1;
- Calcular nova taxa de dose;
- Verificar se o valor de atividade para nuclídeo 1 está correto.

Pré-condições:

Considere geometria “cubo”.

Dados de entrada (SMITH *et al.*,2019):

Tabela 52 - Dados de entrada caso 4

	Parâmetro	Unidade	Valor	Tipo
Caixa Goiânia (Cs-137)	Altura	cm	120	-
	Largura	cm	120	-
	Profundidade	cm	120	-
	Distância para medida de taxa de dose	cm	220	-
	Altura da medida da taxa de dose em relação a fonte	cm	60	-
	Blindagem 1 (espessura)	cm	0,6	-
	Densidade da fonte	g/cm ³	0,20	Celulose
	Densidade da blindagem	g/cm ³	7,87	Aço
	Taxa de dose medida	μSv.h ⁻¹	8,3	-
	Nuclídeo 1	Atividade (Bq)	1,62E+09	Cs-137

Fonte: autora da tese

Tabela 53 - Resultados esperados caso 4

	Parâmetro	Unidade	Valor	Tipo
Caixa Goiânia (Cs-137)	Dose calculada	μSv.h ⁻¹	18,0	-
	Fator de correção	-	0,56	-
	Atividade corrigida para Nuclídeo 1	Atividade (Bq)	8,99E+08	Cs-137

Fonte: autora da tese

Considerando os passos feitos para geometria cubica, os resultados obtidos foram:

Tabela 54 - Resultados obtidos caso 4

	Parâmetro	Unidade	Valor	Tipo
Caixa Goiânia (Cs-137)	Dose calculada	μSv.h ⁻¹	30,26	-
	Fator de correção	-	0,27	-
	Atividade corrigida para Nuclídeo 1	Atividade (Bq)	4,45E+08	Cs-137
	Dose calculada após correção da atividade	μSv.h ⁻¹	8,30	-

Fonte: autora da tese

Resultado final do teste:

Sucesso

Insucesso

Se necessário, descreva:

Observações: o algoritmo foi capaz de reajustar a atividade para correspondência com a taxa de dose medida, mostrando que era necessário ajustar os parâmetros de entrada iniciais, diferente do que foi executado dentro dos resultados esperados que utilizou dos dados sem ajuste para cálculo da taxa de dose.

- Defeito
- Erro
- Falha

11.5. Caso de teste 5

Fluxo de caracterização- Método “Dose- to- activity” para fonte **cilíndrica**.

Objetivo:

- Calcular a dose utilizando os parâmetros oferecidos no tópico “pré-condições”;
- Calcular nova taxa de dose;
- Verificar se o valor de atividade para nuclídeo 1 está correto;
- Verificar se o valor de atividade para nuclídeo 2 está correto;
- Calcular a atividade total do embalado.

Pré-condições:

Considere geometria “cilindro”.

Para uma fonte **cilíndrica** com as seguintes características (SOUZA, 2013)

Tabela 55 - Dados de entrada caso 5

	Parâmetro	Unidade	Valor	Tipo
Tambor de resina	Altura	cm	28	-
	Raio	cm	28	-
	Distância para medida de taxa de dose	cm	100	-
	Altura da medida da taxa de dose em relação a fonte	cm	14	-
	Blindagem 1 (espessura)	cm	0,12	-
	Densidade da fonte	g/cm ³	1,27	Resina de troca iônica
	Densidade da blindagem	g/cm ³	7,87	Ferro
	Taxa de dose medida	μSv.h ⁻¹	132	-
	Nuclídeo 1	Atividade (Bq)	1,10E+09	Co-60
	Nuclídeo 2	Atividade (Bq)	1,20E+08	Cs-137

Fonte: autora da tese

Se valores incorretos para atividade:

- Calcular fator de correção;
- Corrigir as atividades;
- Recalcular a taxa de dose.

Se valores de entrada corretos:

- Calcule a atividade total do embalado.

Tabela 56 - Resultados esperados caso 5

	Parâmetro	Unidade	Valor	Tipo
Tambor com resina	Dose calculada	$\mu\text{Sv.h}^{-1}$	95,8	-
	Fator de correção	-	-	-
	Atividade corrigida para Nuclídeo 1	Atividade (Bq)	1,03E+09	Co-60
	Atividade corrigida para Nuclídeo 2	Atividade (Bq)	1,52E+07	Cs-137
	Atividade total do embalado	Atividade (Bq)	1,05E+09	-

Fonte: autora da tese

Considerando os passos feitos para geometria cilíndrica, os resultados obtidos foram:

Tabela 57 - Resultados obtidos caso 5

	Parâmetro	Unidade	Valor	Tipo
Tambor com resina	Dose calculada	$\mu\text{Sv.h}^{-1}$	78,96	-
	Fator de correção	-	1,67	-
	Atividade corrigida para Nuclídeo 1	Atividade (Bq)	1,84E+09	Co-60
	Atividade corrigida para Nuclídeo 2	Atividade (Bq)	2,01E+08	Cs-137
	Atividade total do embalado	Atividade (Bq)	2,04E+09	-
	Dose calculada após correção da atividade	$\mu\text{Sv.h}^{-1}$	132,0	-

Fonte: autora da tese

Resultado final do teste:

- Sucesso
 Insucesso

Se necessário, descreva:

- Defeito
 Erro
 Falha

Observações: foram observados valores de build up utilizados pela referência diferentes de valores interpolados. A correção dos dados de entrada foi realizada, permitindo o cálculo correto das atividades e taxa de dose.

11.6. Caso de teste 6

Fluxo de caracterização- Método “Dose- to- activity” para fonte **cilíndrica mista**.

Objetivo:

- Calcular a dose utilizando os parâmetros oferecidos no tópico “pré-condições”;
- Calcular nova taxa de dose;
- Verificar se o valor de atividade para nuclídeo 1 está correto;
- Verificar se o valor de atividade para nuclídeo 2 está correto;
- Calcular taxa de dose para líquido (volume a);

- Calcular taxa de dose para sólido (volume b);
- Calcular atividade total para nuclídeo 1;
- Calcular atividade total para nuclídeo 2;
- Calcular taxa de dose total do embalado;
- Calcular a atividade total do embalado.

Pré-condições 1:

Considere geometria “cilindro” para volume a

Para uma fonte **cilíndrica** com as seguintes características (SOUZA, 2013):

Tabela 58 - Dados de entrada 1 caso 6

	Parâmetro	Unidade	Valor	Tipo
Tambor de resina	Altura	cm	72	-
	Raio	cm	28	-
	Distância para medida de taxa de dose	cm	128	-
	Altura da medida da taxa de dose em relação a fonte	cm	36	-
	Blindagem 1 (espessura)	cm	0,12	-
	Densidade da fonte	g/cm ³	1	Água
	Densidade da blindagem	g/cm ³	7,87	Ferro
	Taxa de dose medida	μSv.h ⁻¹	60	-
	Nuclídeo 1	Atividade (Bq)	7,59E+05	Co-60
	Nuclídeo 2	Atividade (Bq)	1,08E+05	Cs-137

Fonte: autora da tese

Se valores incorretos para atividade:

- Calcular fator de correção;
- Corrigir as atividades;
- Recalcular a taxa de dose.

Se valores de entrada corretos, refaça os cálculos com a “pré-condições 2”.

Pré-condições 2:

Considere geometria “cilindro” para volume b.

Para uma fonte **cilíndrica** com as seguintes características

Tabela 59 - Dados de entrada 2 caso 6

	Parâmetro	Unidade	Valor	Tipo
Tambor de resina	Altura	cm	40	-
	Raio	cm	28	-
	Distância para medida de taxa de dose	cm	128	-
	Altura da medida da taxa de dose em relação a fonte	cm	20	-
	Blindagem 1 (espessura)	cm	0,12	-
	Densidade da fonte	g/cm ³	1,29	Resina de troca iônica
	Densidade da blindagem	g/cm ³	7,87	Ferro
	Taxa de dose medida	μSv.h ⁻¹	60	-
	Nuclídeo 1	Atividade (Bq)	7,14E+08	Co-60
	Nuclídeo 2	Atividade (Bq)	5,89E+06	Cs-137

Fonte: autora da tese

Se valores incorretos para atividade:

- Calcular fator de correção;
- Corrigir as atividades;
- Recalcular a taxa de dose.

Se valores de entrada corretos:

- Calcular atividade total para nuclídeo 1;
- Calcular atividade total para nuclídeo 2;
- Calcular taxa de dose do embalado;
- Calcular a atividade total do embalado.

Para “Pré-condições 1”

Tabela 60 - Resultados esperados dados de entrada 1 caso 6

Tambor com resina	Parâmetro	Unidade	Valor	Tipo
	Atividade corrigida para Nuclídeo 1	Atividade (Bq)	7,59E+05	Co-60
	Atividade corrigida para Nuclídeo 2	Atividade (Bq)	1,08E+05	Cs-137

Fonte: autora da tese

Para “Pré-condições 2”

Tabela 61 - Resultados esperados dados de entrada 2 caso 6

Tambor com resina	Parâmetro	Unidade	Valor	Tipo
	Atividade corrigida para Nuclídeo 1	Atividade (Bq)	7,14E+08	Co-60
	Atividade corrigida para Nuclídeo 2	Atividade (Bq)	5,89E+06	Cs-137

Fonte: autora da tese

Tabela 62 - Cálculo dos valores totais, sendo volume a + volume b= total do embalado

Tambor com resina	Parâmetro	Unidade	Valor
	Dose calculada	$\mu\text{Sv.h}^{-1}$	68
Atividade total do embalado	Atividade (Bq)	7,21E+8	

Fonte: autora da tese

Considerando os passos feitos para geometria cilíndrica, os resultados obtidos foram

Para “Pré-condições 1”

Tabela 63 - Resultados obtidos dados de entrada 1 caso 6

Tambor com resina	Parâmetro	Unidade	Valor	Tipo
	Dose calculada	$\mu\text{Sv.h}^{-1}$	0,03	-
Fator de correção	-	0,40	-	
Atividade corrigida para Nuclídeo 1	Atividade (Bq)	7,89E+04	Co-60	
Atividade corrigida para Nuclídeo 2	Atividade (Bq)	6,14E+05	Cs-137	
Dose calculada após correção da atividade	$\mu\text{Sv.h}^{-1}$	0,013	-	

Fonte: autora da tese

Para “Pré-condições 2”

Tabela 64 - Resultados obtidos dados de entrada 2 caso 6

Tambor com resina	Parâmetro	Unidade	Valor	Tipo
	Dose calculada	$\mu\text{Sv.h}^{-1}$	149,75	-
Fator de correção	-	0,40	-	
Atividade corrigida para Nuclídeo 1	Atividade (Bq)	9,59E+08	Co-60	
Atividade corrigida para Nuclídeo 2	Atividade (Bq)	8,83E+06	Cs-137	
Dose calculada após correção da atividade	$\mu\text{Sv.h}^{-1}$	59,99	-	

Fonte: autora da tese

Tabela 65 - Cálculo dos valores totais, sendo volume a + volume b= total do embalado

Tambor com resina	Parâmetro	Unidade	Valor
	Dose total calculada	$\mu\text{Sv.h}^{-1}$	60
Atividade total do embalado	Atividade (Bq)	9,69E+08	

Fonte: autora da tese

Resultado final do teste:

Sucesso

Insucesso

Se necessário, descreva:

Defeito

Erro

Falha

Observações: foi observado que nesse caso, a divisão do tambor em duas partes é funcional no algoritmo, permitindo que volumes mistos sejam calculados separadamente e depois somados para a obtenção dos valores totais. O relatório gerado ainda permite saber qual material contribui mais no valor de taxa de dose.

11.7. Caso de teste 7

Fluxo de caracterização - Método “Fatores de escala”.

Objetivo:

- Calcular os fatores de escala utilizando o conjunto de dados apresentado;
- Calcular valores de $D2\sigma$.

Pré-condições 1 (TADDEI, 2013):

Considerando os dados apresentados para radionuclídeos chave (RC's).

Tabela 66- Dados de entrada caso 7 para Co-60

RC							
Amostra	Co-60	Amostra	Co-60	Amostra	Co-60	Amostra	Co-60
1	5,03E+04	12	3,95E+04	23	3,29E+04	34	1,86E+04
2	2,79E+04	13	2,86E+04	24	1,35E+04	35	3,98E+04
3	4,58E+04	14	5,60E+03	25	3,87E+04	36	3,40E+03
4	2,59E+04	15	3,40E+04	26	1,56E+04	37	4,50E+03
5	3,37E+04	16	3,91E+04	27	2,49E+04	38	1,24E+04
6	3,17E+04	17	2,47E+04	28	2,30E+03	39	2,32E+04
7	3,05E+04	18	5,05E+04	29	2,39E+04	40	1,73E+04
8	3,76E+04	19	4,36E+04	30	4,75E+04	41	2,47E+04
9	1,82E+04	20	4,55E+04	31	3,36E+04	42	5,25E+04
10	8,10E+03	21	4,47E+04	32	4,21E+04		
11	2,33E+04	22	5,52E+04	33	5,13E+04		

Fonte: autora da tese

Tabela 67- Dados de entrada caso 7 para Cs- 137

RC							
Amostra	Cs-137	Amostra	Cs-137	Amostra	Cs-137	Amostra	Cs-137
1	3,64E+02	12	2,07E+02	23	2,10E+02	34	5,70E+01
2	1,64E+02	13	1,44E+02	24	6,20E+01	35	8,50E+01
3	3,11E+02	14	4,70E+01	25	1,53E+02	36	2,90E+01
4	1,52E+02	15	1,54E+02	26	5,60E+01	37	5,00E+01
5	9,80E+01	16	1,11E+02	27	1,72E+02	38	8,50E+01
6	1,85E+02	17	2,14E+02	28	4,50E+01	39	1,19E+02
7	2,39E+02	18	1,59E+02	29	1,87E+02	40	1,21E+02
8	1,20E+02	19	2,11E+02	30	1,37E+02	41	1,59E+02
9	9,10E+01	20	1,41E+02	31	1,82E+02	42	1,51E+02
10	5,00E+01	21	2,36E+02	32	2,19E+02		
11	1,53E+02	22	1,82E+02	33	1,20E+02		

Fonte: autora da tese

Pré-condições 2 (TADDEI, 2013):

Considerando os dados apresentados para radionuclídeos de difícil medição (RDM's).

Tabela 68- Dados de entrada caso 7 para Fe-55

RDM							
Amostra	Fe-55	Amostra	Fe-55	Amostra	Fe-55	Amostra	Fe-55
1	6,29E+03	12	3,90E+03	23	3,32E+03	34	6,66E+03
2	1,44E+03	13	9,90E+02	24	1,30E+02	35	1,53E+03
3	4,40E+03	14	5,70E+02	25	2,90E+02	36	1,60E+03
4	1,86E+03	15	9,74E+03	26	5,00E+02	37	2,09E+03
5	2,16E+03	16	1,29E+03	27	2,00E+03	38	3,35E+03
6	4,60E+02	17	1,15E+03	28	9,40E+02	39	7,17E+03
7	5,40E+02	18	8,40E+02	29	1,28E+03	40	3,02E+03
8	9,90E+02	19	6,60E+02	30	2,29E+03	41	6,90E+03
9	6,10E+02	20	7,40E+02	31	6,93E+03	42	3,27E+03
10	7,60E+02	21	7,15E+03	32	1,94E+03		
11	5,60E+03	22	5,90E+02	33	1,04E+03		

Fonte: autora da tese

Tabela 69- Dados de entrada caso 7 para Ni-59

RDM							
Amostra	Ni-59	Amostra	Ni-59	Amostra	Ni-59	Amostra	Ni-59
1	AI*	12	AI*	23	5,70E+00	34	1,03E+01
2	AI*	13	AI*	24	5,70E+00	35	2,16E+01
3	3,88E+01	14	AI*	25	2,07E+01	36	3,00E+00
4	2,43E+01	15	AI*	26	7,90E+00	37	2,80E+00
5	1,10E+01	16	AI*	27	7,60E+00	38	1,94E+01
6	AI*	17	7,10E+00	28	1,00E+00	39	9,90E+00
7	AI*	18	1,85E+01	29	8,30E+00	40	1,35E+01
8	AI*	19	AI*	30	2,19E+01	41	1,56E+01
9	1,56E+01	20	AI*	31	9,40E+00	42	3,91E+01
10	AI*	21	9,70E+00	32	2,11E+01		
11	AI*	22	4,60E+00	33	2,66E+01		

Fonte: autora da tese

Tabela 70- Dados de entrada caso 7 para Ni- 63

RDM							
Amostra	Ni-63	Amostra	Ni-63	Amostra	Ni-63	Amostra	Ni-63
1	2,63E+03	12	2,04E+03	23	1,10E+03	34	1,16E+03
2	2,26E+03	13	1,45E+03	24	8,90E+02	35	2,74E+03
3	2,26E+03	14	7,00E+02	25	RO**	36	4,40E+02
4	1,52E+03	15	1,61E+03	26	RO**	37	4,00E+02
5	1,18E+03	16	3,00E+03	27	1,00E+03	38	8,60E+02
6	1,48E+03	17	1,07E+03	28	3,80E+02	39	1,54E+03
7	1,58E+03	18	2,00E+02	29	RO**	40	1,15E+03
8	2,00E+03	19	1,61E+03	30	3,00E+03	41	1,99E+03
9	9,10E+02	20	2,70E+03	31	1,29E+03	42	3,60E+03
10	6,80E+02	21	1,45E+03	32	2,65E+03		
11	1,06E+03	22	2,34E+03	33	4,01E+03		

Fonte: autora da tese

Tabela 71- Dados de entrada caso7 para Sr-90

RDM							
Amostra	Sr-90	Amostra	Sr-90	Amostra	Sr-90	Amostra	Sr-90
1	1,34E+03	12	1,04E+03	23	9,01E+02	34	7,85E+02
2	1,09E+03	13	1,11E+03	24	1,02E+02	35	1,93E+03
3	1,35E+03	14	2,73E+02	25	7,70E+01	36	2,64E+02
4	9,08E+02	15	9,23E+02	26	4,69E+02	37	2,53E+02
5	9,83E+02	16	1,66E+02	27	7,59E+02	38	5,41E+02
6	1,24E+03	17	4,65E+02	28	2,02E+02	39	6,71E+02
7	1,28E+03	18	7,90E+01	29	6,00E+01	40	7,36E+02
8	9,80E+02	19	6,50E+01	30	9,92E+02	41	1,48E+03
9	5,55E+02	20	1,72E+02	31	1,82E+02	42	2,24E+02
10	3,65E+02	21	1,01E+03	32	1,81E+02		
11	1,51E+03	22	1,62E+02	33	2,38E+02		

Fonte: autora da tese

Tabela 72- Dados de entrada caso7 para Ag- 108M

RDM							
Amostra	Ag-108M	Amostra	Ag-108M	Amostra	Ag-108M	Amostra	Ag-108M
1	6,30E-01	12	6,80E-01	23	6,80E-01	34	3,60E-01
2	7,50E-01	13	3,40E-01	24	3,50E-01	35	1,36E+00
3	1,16E+00	14	RO**	25	3,45E+00	36	4,30E-01
4	AI*	15	1,39E+00	26	4,00E-01	37	4,90E-01
5	RO**	16	7,95E+00	27	5,00E-01	38	5,70E-01
6	6,80E-01	17	7,50E+00	28	6,70E-01	39	9,70E-01
7	4,83E+00	18	5,58E+00	29	6,08E+00	40	1,58E+00
8	AI*	19	6,25E+00	30	4,58E+00	41	1,49E+00
9	6,00E-01	20	6,41E+00	31	2,30E-01	42	1,63E+01
10	3,20E-01	21	1,20E+01	32	1,44E+01		
11	1,80E-01	22	7,13E+00	33	4,97E+00		

Fonte: autora da tese

Tabela 73- Dados de entrada caso 7 para U-234

RDM							
Amostra	U-234	Amostra	U-234	Amostra	U-234	Amostra	U-234
1	1,74E-01	12	2,43E-01	23	9,10E-02	34	9,30E-02
2	2,15E-01	13	2,88E-01	24	6,30E-02	35	2,09E-01
3	2,43E-01	14	1,35E-01	25	2,40E-02	36	9,90E-02
4	1,45E-01	15	2,15E-01	26	1,20E-01	37	1,06E-01
5	1,25E-01	16	6,30E-02	27	2,51E-01	38	1,05E-01
6	1,08E-01	17	5,30E-02	28	2,90E-01	39	1,33E-01
7	8,10E-02	18	6,50E-02	29	2,90E-02	40	9,30E-02
8	1,69E-01	19	4,40E-02	30	2,80E-02	41	1,39E-01
9	1,51E-01	20	7,10E-02	31	6,40E-02	42	3,90E-02
10	1,11E-01	21	1,41E-01	32	5,50E-02		
11	1,28E-01	22	4,40E-02	33	2,40E-02		

Fonte: autora da tese

Tabela 74- Dados de entrada caso 7 para U-238

RDM							
Amostra	U-238	Amostra	U-238	Amostra	U-238	Amostra	U-238
1	1,37E-01	12	1,64E-01	23	6,75E-02	34	7,13E-02
2	1,63E-01	13	1,51E-01	24	3,74E-02	35	2,08E-01
3	1,59E-01	14	6,75E-02	25	1,19E-02	36	7,23E-02
4	8,21E-02	15	1,37E-01	26	8,59E-02	37	8,70E-02
5	7,40E-02	16	8,20E-03	27	1,91E-01	38	7,73E-02
6	7,64E-02	17	8,50E-03	28	2,59E-01	39	1,17E-01
7	4,40E-02	18	1,02E-02	29	5,90E-03	40	6,77E-02
8	1,56E-01	19	6,60E-03	30	6,00E-03	41	1,15E-01
9	1,04E-01	20	7,00E-03	31	3,64E-02	42	6,20E-03
10	5,90E-02	21	1,25E-01	32	9,00E-03		
11	4,81E-02	22	6,80E-03	33	5,80E-03		

Fonte: autora da tese

Tabela 75- Dados de entrada caso 7 para Pu- 238

RDM							
Amostra	Pu-238	Amostra	Pu-238	Amostra	Pu-238	Amostra	Pu-238
1	1,15E+00	12	6,10E-01	23	5,30E-01	34	3,00E-01
2	6,40E-01	13	3,60E-01	24	2,00E-01	35	1,02E+00
3	1,07E+00	14	8,00E-01	25	2,40E-01	36	3,50E-01
4	3,80E-01	15	1,41E+00	26	4,50E-01	37	4,30E-01
5	4,70E-01	16	4,10E-01	27	5,30E-01	38	4,70E-01
6	6,00E-01	17	2,40E-01	28	7,10E-01	39	6,00E-01
7	3,30E-01	18	5,10E-01	29	1,40E-01	40	5,90E-01
8	1,12E+00	19	2,80E-01	30	2,10E-01	41	8,20E-01
9	6,30E-01	20	1,60E-01	31	1,80E-01	42	5,60E-01
10	4,20E-01	21	6,10E-01	32	3,40E-01		
11	2,00E-01	22	2,70E-01	33	2,90E-01		

Fonte: autora da tese

Tabela 76- Dados de entrada caso 7 para Am- 241

RDM							
Amostra	Am- 241	Amostra	Am- 241	Amostra	Am- 241	Amostra	Am- 241
1	9,60E-01	12	9,00E-01	23	6,30E-01	34	4,70E-01
2	1,01E+00	13	7,70E-01	24	3,50E-01	35	1,02E+00
3	1,01E+00	14	7,00E-01	25	1,30E-01	36	6,80E-01
4	6,60E-01	15	9,40E-01	26	6,30E-01	37	7,90E-01
5	5,20E-01	16	3,60E-01	27	1,79E+00	38	7,10E-01
6	6,60E-01	17	3,20E-01	28	2,18E+00	39	8,80E-01
7	5,60E-01	18	3,60E-01	29	2,70E-01	40	6,30E-01
8	1,12E+00	19	1,40E-01	30	2,70E-01	41	9,70E-01
9	9,40E-01	20	3,30E-01	31	3,60E-01	42	4,10E-01
10	6,30E-01	21	9,00E-01	32	4,70E-01		
11	2,90E-01	22	2,80E-01	33	2,20E-01		

Fonte: autora da tese

Tabela 77- Dados de entrada caso 7 para Pu- 241

RDM							
Amostra	Pu-241	Amostra	Pu-241	Amostra	Pu-241	Amostra	Pu-241
1	2,93E+01	12	1,23E+01	23	1,10E+01	34	1,06E+01
2	1,09E+01	13	5,61E+00	24	RO**	35	1,44E+01
3	2,35E+01	14	2,79E+01	25	2,39E+00	36	7,91E+00
4	1,24E+01	15	2,74E+01	26	1,02E+01	37	8,79E+00
5	2,90E+00	16	5,25E+00	27	1,06E+01	38	8,23E+00
6	1,33E+01	17	2,61E+00	28	1,17E+01	39	3,41E+01
7	9,40E+00	18	5,12E+00	29	1,64E+00	40	3,47E+01
8	1,95E+01	19	5,91E+00	30	2,27E+00	41	1,68E+01
9	1,42E+01	20	1,07E+00	31	3,42E+00	42	6,73E+00
10	1,98E+00	21	1,06E+01	32	3,14E+00		
11	2,36E+00	22	3,19E+00	33	5,69E+00		

*AI: AMOSTRA INVÁLIDA

**RO: REMOÇÃO DE OUTLIER

Fonte: autora da tese

Considerando os parâmetros apresentados nas pré-condições 1 e 2, os valores de fatores de escala esperados são:

Tabela 78- Resultados esperados de fatores de escala

FATORES DE ESCALA					
RDM/ RC	FATOR DE ESCALA	D2 σ	RDM/ RC	FATOR DE ESCALA	D2 σ
Fe-55/Co-60	6,41E-02	12,9	U-234/Co-60	3,98E-06	10,0
Fe-55/Cs-137	1,22E+01	9,1	U-234/Cs-137	7,75E-04	6,4
Ni-59/Co-60	4,93E-04	2,7	U-238/Co-60	1,86E-06	29,2
Ni-59/Cs-137	9,66E-02	3,9	U-238/Cs-137	3,63E-04	18,9
Ni-63/Co-60	5,54E-02	3,1	Pu-238/Co-60	1,78E-05	7,0
Ni-63/Cs-137	1,07E+01	3,3	Pu-238/Cs-137	3,47E-03	4,9
Sr-90/Co-60	1,85E-02	10,4	Am- 241/Co-60	2,29E-05	9,8
Sr-90/Cs-137	3,60E+00	8,1	Am- 241/Cs-137	4,45E-03	6,1
Ag-108m/Co-60	5,85E-05	9,3	Pu-241/Co-60	3,72E-04	12,4
Ag-108m/Cs-137	1,13E-02	10,7	Pu-241/Cs-137	7,21E-02	8,8

Fonte: autora da tese

Considerando os passos feitos para o cálculo de fatores de escala, considerando as pré condições 1 e 2, os resultados obtidos foram:

Tabela 79-Resultados obtidos de fatores de escala

FATORES DE ESCALA					
RDM/ RC	FATOR DE ESCALA	D2 σ	RDM/ RC	FATOR DE ESCALA	D2 σ
Fe-55/Co-60	6,69E-02	10,2	U-234/Co-60	3,98E-06	10,1
Fe-55/Cs-137	1,30E+01	7,5	U-234/Cs-137	7,75E-04	6,4
Ni-59/Co-60	5,04E-04	2,7	U-238/Co-60	1,86E-06	29,1
Ni-59/Cs-137	9,77E-02	4,0	U-238/Cs-137	3,63E-04	18,9
Ni-63/Co-60	5,53E-02	3,1	Pu-238/Co-60	1,78E-05	6,9
Ni-63/Cs-137	1,07E+01	3,3	Pu-238/Cs-137	3,47E-03	4,9
Sr-90/Co-60	1,85E-02	10,4	Am- 241/Co-60	2,29E-05	9,8
Sr-90/Cs-137	3,61E+00	8,0	Am- 241/Cs-137	4,45E-03	6,1
Ag-108m/Co-60	5,85E-05	9,3	Pu-241/Co-60	3,51E-04	12,5
Ag-108m/Cs-137	1,13E-02	10,8	Pu-241/Cs-137	6,00E-02	8,6

Fonte: autora da tese

Resultado final do teste:

Sucesso

Insucesso

Se necessário, descreva:

Defeito

Erro

Falha

Observações: Os valores obtidos com a aplicação do algoritmo correspondem aos valores apresentados pelo estudo de referência. O algoritmo apresenta ainda sugestões de valores considerados outliers, melhorando os resultados finais de fatores de escala.

11.8. Caso de teste 8

Módulo de Decaimento com uso de Bateman.

Objetivo:

- Calcular os valores de atividade dos radionuclídeos que compõe as cadeias apresentadas após um período de 50 anos;

Pré-condições 1:

Considere os dados apresentados no “caso de teste 7” para o radionuclídeo Pu-238.

Considerando os passos feitos para o cálculo de decaimento na cadeia do Pu-238 com os parâmetros oferecidos nas pré-condições 1, os resultados obtidos foram:

Tabela 80- Resultados obtidos caso 8 para cadeia de Pu-238

Tempo	Delta 0	Após 50 anos			
Nuclídeo	Pu-238	Pu-238	U-234	Th-230	Ra-226
N° da amostra	Atividade (Bq)				
1	1,15E+00	7,75E-01	3,75E-01	2,82E-05	4,43E-09
2	6,40E-01	4,31E-01	2,09E-01	1,57E-05	2,47E-09
3	1,07E+00	7,21E-01	3,49E-01	2,62E-05	4,12E-09
4	3,80E-01	2,56E-01	1,24E-01	9,31E-06	1,46E-09
5	4,70E-01	3,17E-01	1,53E-01	1,15E-05	1,81E-09
6	6,00E-01	4,04E-01	1,96E-01	1,47E-05	2,31E-09
7	3,30E-01	2,22E-01	1,08E-01	8,09E-06	1,27E-09
8	1,12E+00	7,54E-01	3,66E-01	2,74E-05	4,32E-09
9	6,30E-01	4,24E-01	2,06E-01	1,54E-05	2,43E-09
10	4,20E-01	2,83E-01	1,37E-01	1,03E-05	1,62E-09
11	2,00E-01	1,35E-01	6,53E-02	4,90E-06	7,71E-10
12	6,10E-01	4,11E-01	1,99E-01	1,49E-05	2,35E-09
13	3,60E-01	2,42E-01	1,18E-01	8,82E-06	1,39E-09
14	8,00E-01	5,39E-01	2,61E-01	1,96E-05	3,08E-09
15	1,41E+00	9,50E-01	4,60E-01	3,45E-05	5,43E-09
16	4,10E-01	2,76E-01	1,34E-01	1,00E-05	1,58E-09
17	2,40E-01	1,62E-01	7,83E-02	5,88E-06	9,25E-10
18	5,10E-01	3,44E-01	1,66E-01	1,25E-05	1,97E-09
19	2,80E-01	1,89E-01	9,14E-02	6,86E-06	1,08E-09
20	1,60E-01	1,08E-01	5,22E-02	3,92E-06	6,16E-10
21	6,10E-01	4,11E-01	1,99E-01	1,49E-05	2,35E-09
22	2,70E-01	1,82E-01	8,81E-02	6,62E-06	1,04E-09
23	5,30E-01	3,57E-01	1,73E-01	1,30E-05	2,04E-09
24	2,00E-01	1,35E-01	6,53E-02	4,90E-06	7,71E-10
25	2,40E-01	1,62E-01	7,83E-02	5,88E-06	9,25E-10
26	4,50E-01	3,03E-01	1,47E-01	1,10E-05	1,73E-09
27	5,30E-01	3,57E-01	1,73E-01	1,30E-05	2,04E-09
28	7,10E-01	4,78E-01	2,32E-01	1,74E-05	2,74E-09
29	1,40E-01	9,43E-02	4,57E-02	3,43E-06	5,39E-10
30	2,10E-01	1,41E-01	6,85E-02	5,15E-06	8,09E-10
31	1,80E-01	1,21E-01	5,88E-02	4,41E-06	6,94E-10
32	3,40E-01	2,29E-01	1,11E-01	8,33E-06	1,31E-09
33	2,90E-01	1,95E-01	9,47E-02	7,11E-06	1,12E-09
34	3,00E-01	2,02E-01	9,79E-02	7,35E-06	1,16E-09
35	1,02E+00	6,87E-01	3,33E-01	2,50E-05	3,93E-09
36	3,50E-01	2,36E-01	1,14E-01	8,58E-06	1,35E-09
37	4,30E-01	2,90E-01	1,40E-01	1,05E-05	1,66E-09
38	4,70E-01	3,17E-01	1,53E-01	1,15E-05	1,81E-09
39	6,00E-01	4,04E-01	1,96E-01	1,47E-05	2,31E-09
40	5,90E-01	3,97E-01	1,93E-01	1,45E-05	2,27E-09
41	8,20E-01	5,52E-01	2,68E-01	2,01E-05	3,16E-09
42	5,60E-01	3,77E-01	1,83E-01	1,37E-05	2,16E-09

Fonte: autora da tese

Resultado final do teste:

- Sucesso
 Insucesso

Se necessário, descreva:

- Defeito
 Erro
 Falha

Observações: Os valores obtidos com a aplicação do algoritmo para decaimento são consistentes com os valores de entrada utilizados. Apesar da baixa atividade das amostras apresentadas nas pré-condições, o algoritmo foi capaz de prever a atividade de cada nuclídeo da cadeia do Pu-238 após 50 anos, sendo possível ainda fazer previsões sem limite de tempo máximo.

12. PROTOTIPAGEM DE TELAS PARA AS APLICAÇÕES WEB, MOBILE E RELATÓRIOS

Para todos os métodos, os dados necessários para o ingresso no sistema informatizado são a origem do rejeito, data de geração, estado físico, composição química, informações de proteção radiológica, dados de embalagem, procedimentos de amostragem e questões de representatividade. A tabela 81 apresenta alguns campos com o tipo de informação que deverá conter.

Tabela 81- Informações e suas respectivas aplicações no sistema RaWSys (continua)

Exemplo de campos disponíveis para preenchimento no RaWSys	Uso	Exemplo de informação
Identificação da embalagem	ID, CQ, IG, link	Número gerado pelo sistema
Data de referencia	ID, CQ, IG	Data de entrada do rejeito, de medida, de caracterização, etc.
Informações do gerador	ID, IG, link	Registro do gerador. Depois de registrado uma vez, poderá ser identificado por sigla*
Indicador de aceitação (observações)	CQ, IG	Verificação se as informações correspondem com a entrada do rejeito ou se outras ações são necessárias
Classe do rejeito	CQ, IG, link	Classificação do rejeito de acordo com as suas características
Método de caracterização utilizado	CQ, IG, link	Declaração de qual método de caracterização foi aplicado ao material
Status	IG, link	Se aguardando caracterização, se caracterizado, se tratado e imobilizado ou dispersado ou aguardando deposição

Tabela 81- (Continuação) Informações e suas respectivas aplicações no sistema RaWSys

Matriz	CQ, IG	Se líquido, sólido, gasosos, misto, etc.
Tipo de embalagem	ID, IG	Se tambor, se caixa, se fonte selada, etc.
Volume da embalagem	IG	Dimensões da embalagem
Registro de lote	CQ, IG	Agrupar informações de rejeitos de mesma característica recebidos numa mesma data
Taxa de dose	ID, CQ, IG	Taxa de dose medida e data de atualização
Distâncias	ID, CQ, IG	Distâncias das medidas de taxa de dose
Atividade	ID, CQ, IG	Atividade total e por radionuclídeo ou emissor
Tipo de emissor	ID, CQ, IG, link	Se alfa, beta, gama, nêutrons, etc.
Local de armazenamento	IG, link	Depósito em que está e local dentro do depósito
Transferência de material	IG	Se o material for transferido de instalação
Lote de amostras	IG, link	Agrupar informações de rejeitos de mesma característica amostrados de um mesmo embalado ou lote
Massa	ID, IG	kg
Assinatura	CQ	Assinatura do responsável pela ação
Busca	ID, IG, link	Busca de qualquer informação como ID, status, data, classe, etc.

ID: Informação que identifica um rejeito (número de ID, gerador, classe, etc.)

CQ: Informação utilizada para controle de qualidade do gerenciamento de rejeitos radioativos, sejam processos ou qualidade da informação fornecida.

IG: Informações de gerenciamento relacionada a processos da instalação práticos ou burocráticos, locais de acondicionamento, embalagens presentes na instalação

Link: toda informação que pode proporcionar a geração de um relatório acessível por hiperlink dentro do sistema.

*O campo gerador identifica o gerador do rejeito ou o responsável pela entrega desse rejeito na instalação de gerenciamento. O campo pode conter o nome do gerador, uma ID ou sigla (desde que previamente cadastrada). Caso o rejeito radioativo não tenha gerador identificado, no caso de materiais radioativos abandonados por exemplo, a instalação de gerenciamento poderá ser identificada como geradora e o inventário deverá conter essa observação.

Fonte: autora da tese

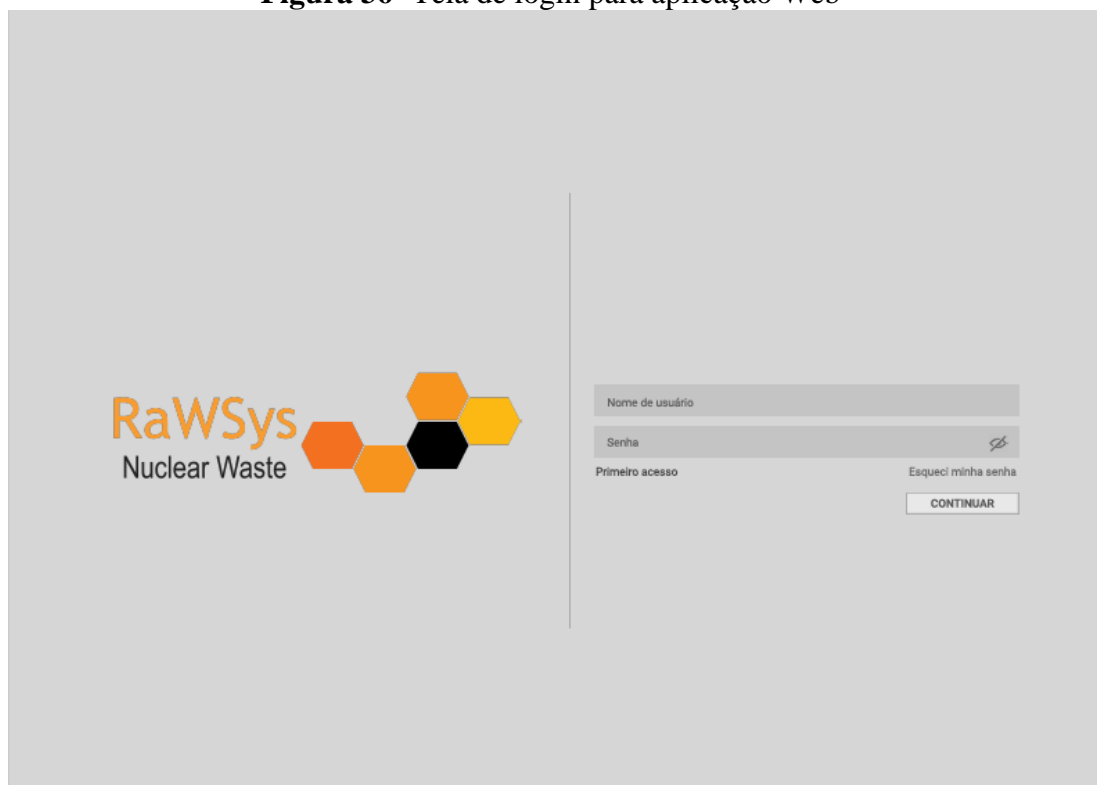
Para todos os métodos, informações obrigatórias são levantadas para rastrear os rejeitos e configurar o relatório de inventário radioisotópico. O operador irá detalhar no sistema a técnica utilizada para a caracterização, como por exemplo a separação química dos elementos e o tipo medição, permitindo assim a construção de uma biblioteca de métodos - evitando a perda ou mau aproveitamento das informações anteriores.

O sistema proposto permite a geração de etiquetas para rastrear os dados históricos de cada amostra e embalagem. Além disso, o sistema é capaz de armazenar a análise de cada

uma das amostras e embalados, a declaração de transferência (se aplicável), destino final e declaração dos responsáveis por estas ações.

Abaixo são apresentadas as telas (FIG. 36-70) desenvolvidas com base nos requisitos e arquiteturas apresentados para a aplicação WEB. O protótipo foi construído com base na conta com maior nível de acesso (de gerente da instalação) para que seja possível navegar por toda a interface disponível.

Figura 36- Tela de login para aplicação Web



Fonte: autora da tese

*Em alguns casos, recomenda-se a ampliação da imagem em 150% para a leitura dos campos descritos em cada tela.

Figura 37- Tela de segunda autenticação de login para aplicação Web

Utilize o número enviado para o seu celular por SMS

Token de acesso

ENTRAR

Fonte: autora da tese

Figura 38- Tela de cadastro para aplicação Web

NOVO USUÁRIO

1. DADOS DE LOGIN

e-mail Confirmar* Senha Confirmar*

2. DADOS DE CADASTRO

Nome Sobrenome Sexo Nome de usuário

Data de nascimento CPF RG Nacionalidade UF

CEP Endereço Bairro Número Complemento Cidade UF

3. DADOS DE CONTATO

DDD+ Telefone DDD+ Celular DDD+ Telefone para emergência*

4. DADOS DA EMPRESA

Nome Sigla Função Número de ID*

Setor Lotação Gerente Responsável e-mail do(a) Gerente Responsável

Telefone da Lotação Ramal

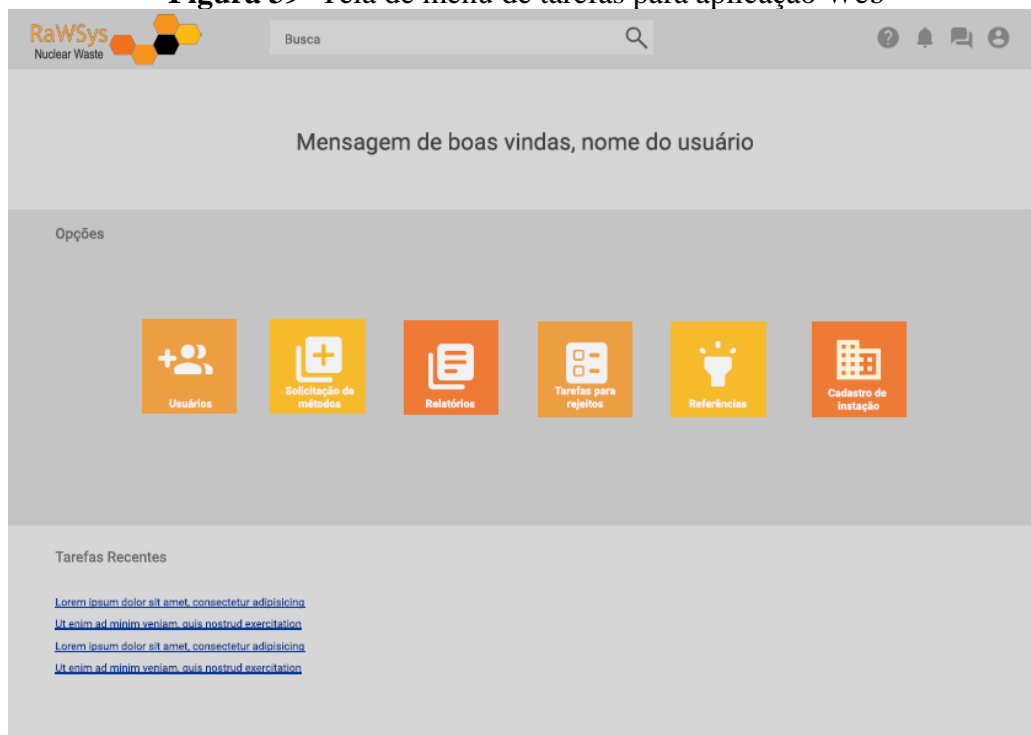
5. DADOS DE SEGURANÇA

Selecione imagem de ID profissional Selecione imagem de assinatura digital

FINALIZAR CADASTRO

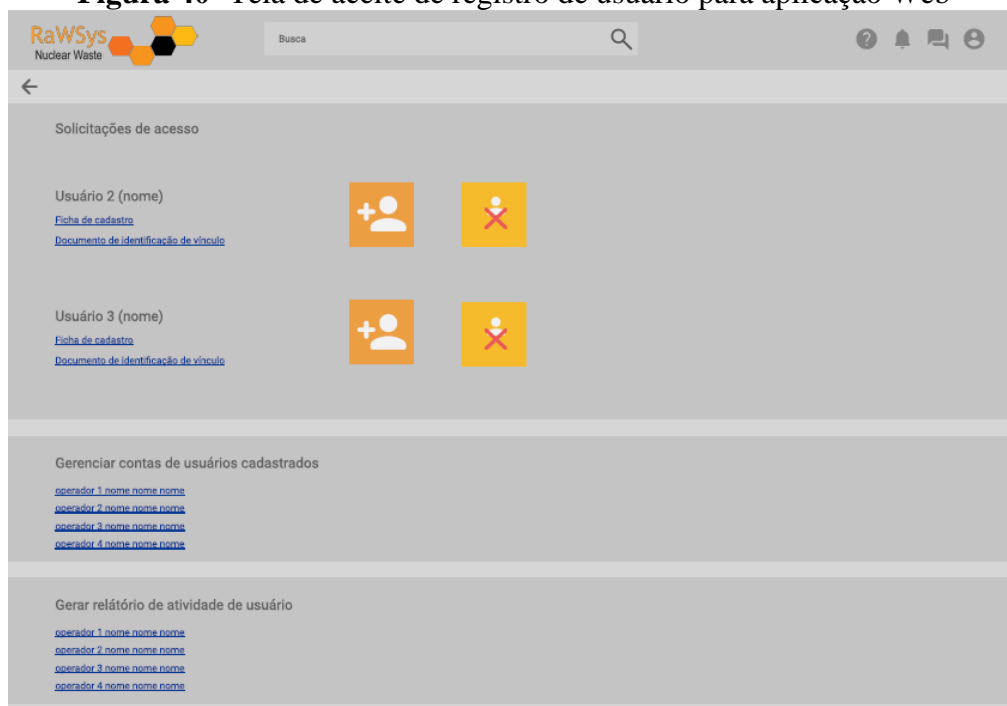
Fonte: autora da tese

Figura 39- Tela de menu de tarefas para aplicação Web



Fonte: autora da tese

Figura 40- Tela de aceite de registro de usuário para aplicação Web



Fonte: autora da tese

Figura 41- Tela de consulta de cadastro de usuário para aplicação Web

Fonte: autora da tese

Figura 42- Tela de cadastro de instalação para aplicação Web

Fonte: autora da tese

Figura 43- Tela de consulta de cadastro de instalação para aplicação Web

INFORMAÇÕES DA INSTALAÇÃO

1. INFORMAÇÕES GERAIS

Área / Tipo de instalação Subárea Matrícula CNEN Data / Autorização para operação

Instituição CNPJ Nº Licença de Operação

Endereço Logradouro Nº Bairro Complemento CEP Cidade UF

2. RESPONSÁVEL PELA INSTALAÇÃO

Nome completo e-mail Função

DDD+ Telefone DDD+ Celular DDD+ Telefone para emergência*

3. RESPONSÁVEL PELA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Nome completo e-mail Licença Credenciamento Validade

DDD+ Telefone DDD+ Celular DDD+ Telefone para emergência*

4. RESPONSÁVEL SUBSTITUTO PELA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Nome completo e-mail Licença Credenciamento Validade

DDD+ Telefone DDD+ Celular DDD+ Telefone para emergência*

*Anexe no campo abaixo TODOS os documentos relacionados ao processo de descomissionamento, incluindo autorização do órgão regular

Descrição do conteúdo do anexo

****IMPORTANTE:** ao dar continuidade nessa operação, todos os arquivos de rejeito ficarão armazenados no sistema e estarão disponíveis paenas para a consulta. Sendo assim, usuários operadores não poderão mais incluir ou alterar dados, sendo responsabilidade do gerente declarado da instalação realizar a manutenção ou restauração dos dados.

DESCOMISSONAR INSTALAÇÃO

Fonte: autora da tese

Figura 44- Tela de aceite de novos métodos de caracterização para aplicação Web

Solicitações de validação de métodos de caracterização

Método A1 (nome)

[Relatório de método](#) [Documentação do método](#) [Validação do método](#)

Modelagem de instalação B1 (nome)

[Relatório de modelagem](#) [Documentação de algoritmo](#) [Validação de algoritmo](#)

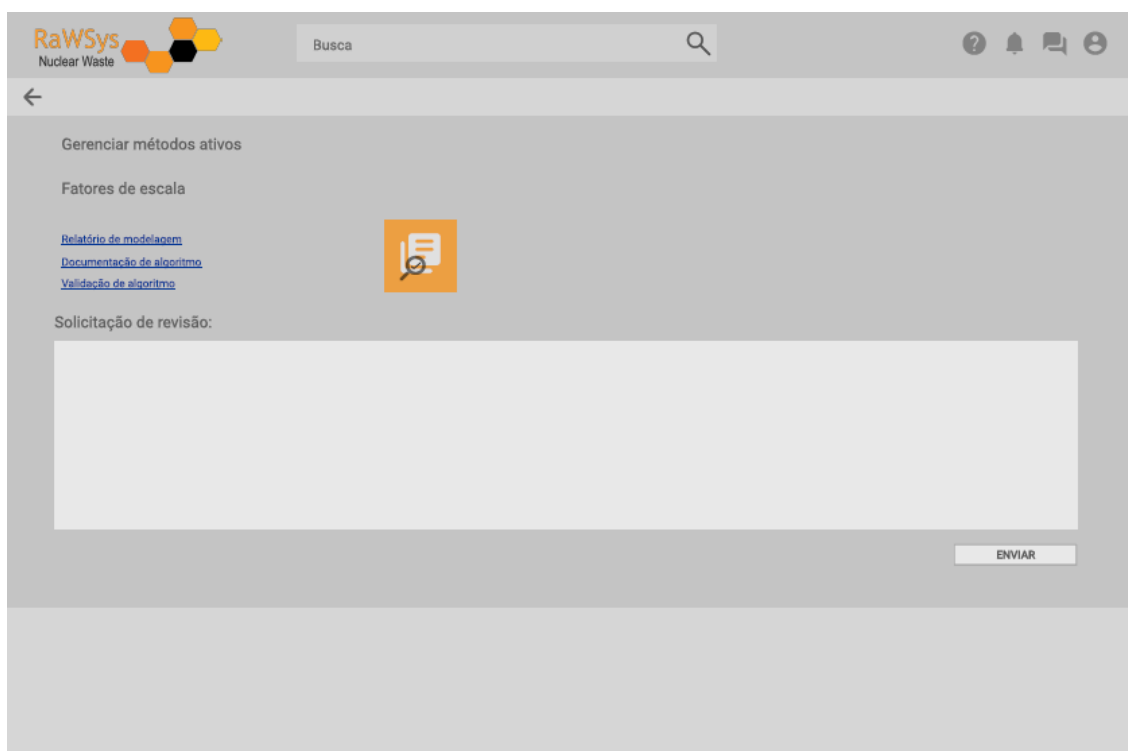
Gerenciar métodos de caracterização

[Fatores de escala](#) [Tomografia](#) [Modelagem de instalação](#) [Gamma scan](#) [Ver mais](#)

Fonte: autora da tese

Figura 45- Tela de verificação e validação de métodos para aplicação Web

Fonte: autora da tese

Figura 46- Tela de pedido de verificação de métodos para aplicação Web

Fonte: autora da tese

Figura 47- Tela de rotina de gerenciamento de rejeitos para aplicação Web



Fonte: autora da tese

Figura 48- Tela de cadastro de rejeito para aplicação Web

CADASTRO DE REJEITO

1. IDENTIFICAÇÃO DA INSTALAÇÃO GERADORA

Instituição _____ Gerador _____ Matrícula CNEN _____ CNPJ _____

2. INFORMAÇÕES SOBRE O REJEITO

Descreva abaixo a origem e as características físicas, químicas e radiológicas do material.

Matriz: _____
 Classe: _____
 RN's: _____

Número de embalados _____

EMBALADO N° _____

Taxa de dose embalado n° ____ (encostado) _____ Taxa de dose embalado n° ____ (1 metro) _____ Peso do embalado n° ____ _____ Data de recebimento _____
 $\mu\text{Sv/h}$ $\mu\text{Sv/h}$ kg

Selecione (se necessário) se o material no embalado n° ____ é:

explosivo quimicamente instável
 biológico outro: _____

Atividade declarada _____ Bq

3. RESPONSÁVEL PELA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Nome completo _____ e-mail _____ Licença _____ Credenciamento _____ Validade _____
 DDD+ Telefone _____ DDD+ Celular _____ DDD+ Telefone para emergência* _____

4. RESPONSÁVEL SUBSTITUTO PELA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Nome completo _____ e-mail _____ Licença _____ Credenciamento _____ Validade _____
 DDD+ Telefone _____ DDD+ Celular _____ DDD+ Telefone para emergência* _____

GERAR ETIQUETA FINALIZAR CADASTRO

Fonte: autora da tese

Figura 49- Tela de exibição e validação de etiqueta para aplicação Web

Rejeito ID 0000000000

Informações de etiqueta final

REJEITO RADIOATIVO
 PROIBIDO POR LEI FEDERAL DEPOSIÇÃO INADEQUADA
Se encontrado, entre em contato com a polícia ou autoridade de segurança pública mais próxima do local de proteção ambiental do Brasil.

Seu número de controle de documento: **21123456789**

REJEITO: Classe do rejeito, Matriz do rejeito, Destinação

RECORDE: RN presentes, Atividade total, Taxa de dose na superfície

Origem: Endereço, Telefone

IDENTIFICAÇÃO INTERNA: GERADOR (Departamento, Endereço, Código do documento de histórico aqui), DESTINAÇÃO (Data de chegada, Data de saída, Data de deposição: (se deposição final))

Em caso de liberação do material radioativo, entre em contato com a Comissão Nacional de Energia Nuclear +55 (11) 3133 - 9000 para obter assistência

Informações corretas?

IMPORTANTE: COLE A ETIQUETA EM LOCAL VISIVEL DO EMBALADO RADIOATIVO. SE NECESSÁRIO ATUALIZAR DADOS, REMOVA A ETIQUETA ANTERIOR ANTES DE COLAR A NOVA ETIQUETA.

Fonte: autora da tese

Figura 50- Tela de cadastro de amostra para aplicação Web

CADASTRO DE AMOSTRA

1. IDENTIFICAÇÃO DA INSTALAÇÃO GERADORA

Instituição Gerador

2. INFORMAÇÕES SOBRE A AMOSTRA

Número de amostras

AMOSTRA 1A
 Descreva abaixo a origem e as características físicas, químicas e radiológicas do material.

Matriz:
 Classe:
 RNs:

Taxa de dose da amostra n° (encostado) $\mu\text{Sv/h}$ Peso da amostra n° kg Data de coleta

Selecione (se necessário) se o material da amostra n° é:

explosivo quimicamente instável
 biológico outro:

Atividade estimada Bq

3. RESPONSÁVEL PELA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Nome completo e-mail Licença Credenciamento Validade

DDD+ Telefone DDD+ Celular DDD+ Telefone para emergência*

4. SE NECESSÁRIO TRANSFERIR AMOSTRA

Nome completo do responsável pela transferência e-mail Laboratório Instituto Finalidade da transferência


DDD+ Telefone DDD+ Celular Observações

Fonte: autora da tese

Figura 51- Tela de exibição e validação de etiqueta de amostra para aplicação Web

Rejeito ID 0000000000
Amostra ID 0000000000

Informações de etiqueta primária

SeGRR LAB	Embalado xxx	Amostra AA
	Coletado dd/mm/aaaa	Peso/Vol. xx kg
	 08121994113049912180	
	Composição RN	Ativ. Total Lab.

Informações corretas?

Fonte: autora da tese

Figura 52- Tela de consulta de rejeito para aplicação Web

CONSULTA DE REJEITO

←

PESQUISAR REGISTROS DE EMBALADO

1. IDENTIFICAÇÃO DA INSTALAÇÃO GERADORA

Instituição Gerador Matricula CNEN CNPJ

2. INFORMAÇÕES SOBRE O REJEITO

Número de embalados armazenados

Rejeito ID 8888888
Rejeito ID 8888888
Rejeito ID 8888888

Matriz:
Classe:
RN's:

Taxa de dose embalado n° ___ (encostado) $\mu\text{Sv/h}$ Taxa de dose embalado n° ___ (1 metro) $\mu\text{Sv/h}$ Peso do embalado kg Data de recebimento

Características especiais: Atividade declarada Bq Alterar status do material

3. RESPONSÁVEL PELA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Nome completo e-mail Licença Credenciamento Validade

DDD+ Telefone DDD+ Celular DDD+ Telefone para emergência*

Fonte: autora da tese

Figura 53- Tela de para consulta de instalações cadastradas aplicação Web

CADASTRO DE INSTALAÇÃO

1. INFORMAÇÕES GERAIS

Área / Tipo de instalação Subárea Matrícula CNEN Data / Autorização para operação

Instituição CNPJ N° Licença de Operação

Endereço Logradouro N° Bairro Complemento CEP Cidade UF

2. RESPONSÁVEL PELA INSTALAÇÃO

Nome completo e-mail Função

DDD+ Telefone DDD+ Celular DDD+ Telefone para emergência*

3. RESPONSÁVEL PELA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Nome completo e-mail Licença Credenciamento Validade

DDD+ Telefone DDD+ Celular DDD+ Telefone para emergência*

4. RESPONSÁVEL SUBSTITUTO PELA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Nome completo e-mail Licença Credenciamento Validade

DDD+ Telefone DDD+ Celular DDD+ Telefone para emergência*

FINALIZAR CADASTRO

Fonte: autora da tese

Figura 54- Tela de fluxo de caracterização para aplicação Web

RaWSys Nuclear Waste

ID do rejeito

Métodos de caracterização

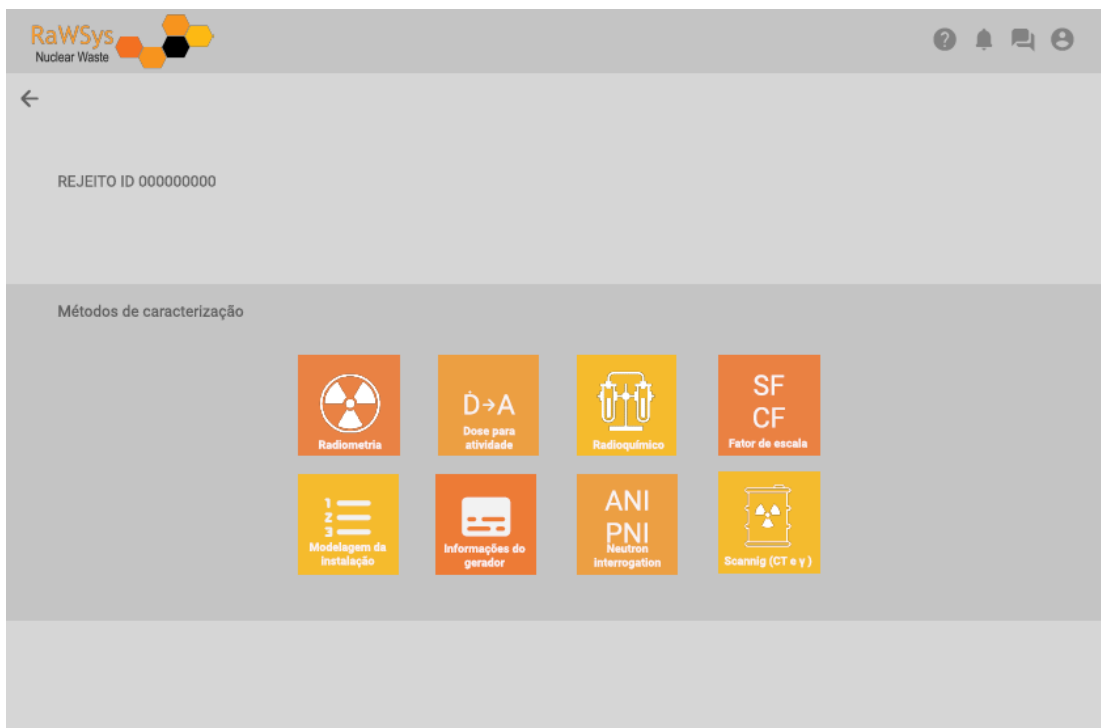
- Radiometria
- D → A Dose para atividade
- Radioquímico
- SF CF Fator de escala
- 1 2 3 Modelagem da instalação
- Informações do gerador
- ANI PNI Neutron Interrogation
- Scannig (CT e γ)

Rejeitos acessados recentemente

- [Rejeito ID 8888888](#)
- [Rejeito ID 9999999](#)
- [Rejeito ID 5555555](#)

Fonte: autora da tese

Figura 55-Tela de fluxo de caracterização após localização de ID, para aplicação Web



Fonte: autora da tese

Figura 56- Tela de fluxo de caracterização- método radiométrico- para aplicação Web



Fonte: autora da tese

Figura 57- Tela de fluxo de caracterização- método radioquímico- para aplicação Web

The screenshot displays the RaWSys Nuclear Waste web application interface for the radiochemical characterization method. The interface is titled 'REJEITO ID 000000000' and features a navigation bar with a back arrow and a search icon. The main content area is divided into two columns. The left column contains fields for 'Data de análise', 'Emissões identificadas' (with checkboxes for alpha, Beta, Gamma, X ray, and Neutron), 'Radionuclídeos' (with a dropdown for selecting present radionuclides), and a large text area for 'Descreva o processamento da amostra e equipamentos/detectores utilizados'. Below this are two input fields for 'Tx de dose μSv/h (0 cm)' and 'Tx de dose μSv/h (___ cm)'. The right column is titled 'Detalhes da análise' and includes a dropdown for selecting a PDF radiometric report, a field for 'Anexar relatório radiométrico', and several checkboxes for adding reports, manual data, and other samples. It also includes fields for 'Qntd. de linhas' and 'Qntd. de colunas', and checkboxes for calculating activity for packaging and displaying activity values. A 'SALVAR DADOS' button is located at the bottom right.

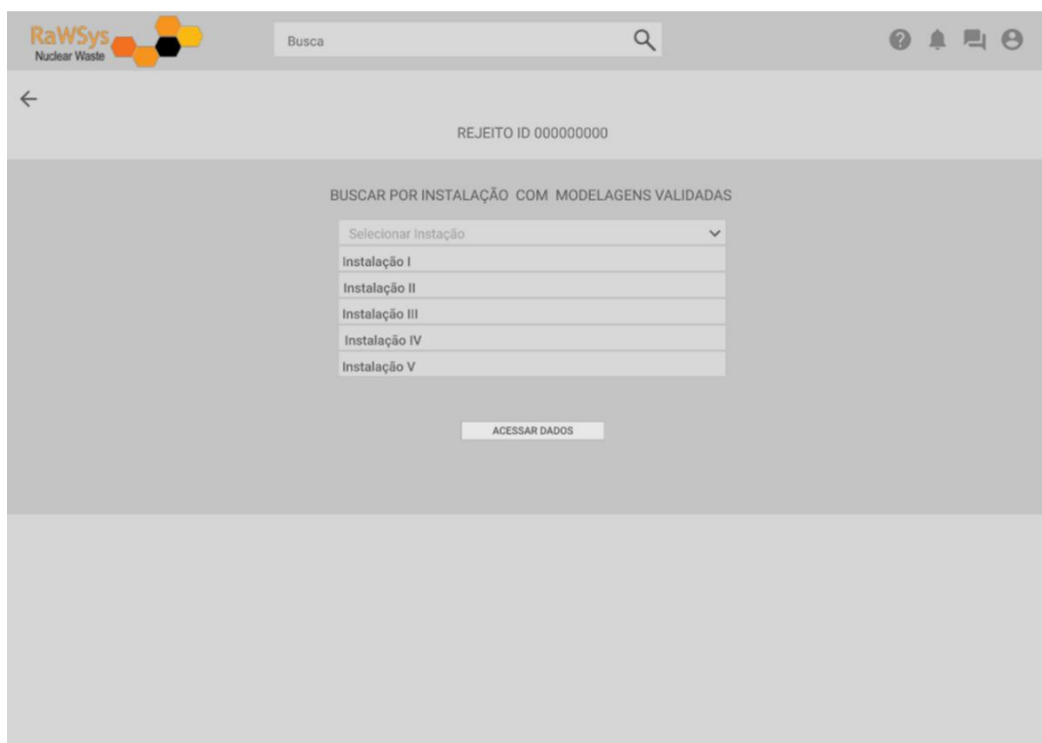
Fonte: autora da tese

Figura 58- Tela de fluxo de caracterização- método dose- para- atividade- para aplicação Web

The screenshot displays the RaWSys Nuclear Waste web application interface for the dose method. The interface is titled 'REJEITO ID 000000000' and features a navigation bar with a back arrow and a search icon. The main content area is divided into two columns. The left column contains a dropdown for 'Selecione a geometria', a table for 'Divisão do embalado' and 'Dimensões da geometria selecionada (cm)', a dropdown for 'Radionuclídeos', and dropdowns for 'Selecione o(s) material(is) da fonte' and 'Selecione o(s) material(is) da blindagem'. Below these are buttons for 'Espessura das blindagens (cm)' (Sh. 1, Sh. 2, Sh. 3, Sh. 4) and an input field for 'Tx de dose μSv/h (___ cm)'. The right column contains input fields for 'DistânciaTx de dose (___ cm)' and 'Altura Tx de dose (___ cm)', three input fields for 'Atividade nuclideo (Bq)', checkboxes for 'Calcular caso?' and 'Calcular atividade total?', and input fields for 'Fator de correção calculado' and 'Tx de dose calc. μSv/h (___ cm)'. It also includes a field for 'Atividade total do embalado (Bq)' and a checkbox for 'Visualizar relatório do caso e valores calculados para cada RN?'. A 'SALVAR DADOS' button is located at the bottom right.

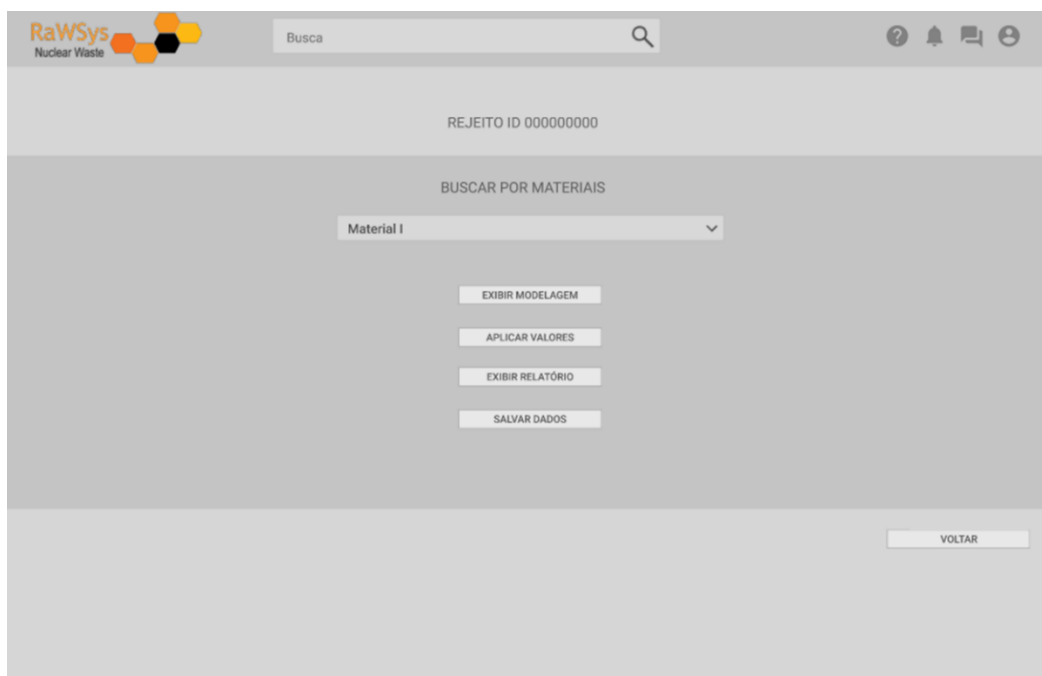
Fonte: autora da tese

Figura 59- Tela de fluxo de caracterização- método modelagem da instalação- para aplicação Web



Fonte: autora da tese

Figura 60- Tela de fluxo de caracterização- método modelagem de instalação, busca de materiais- para aplicação Web



Fonte: autora da tese

Figura 61- Tela de fluxo de caracterização- método gerador fornece a informação- para aplicação Web

The screenshot displays the 'RaWSys Nuclear Waste' interface. At the top, the header includes the logo and navigation icons. Below the header, the page title is 'REJEITO ID 000000000'. The main content area is a form with the following sections:

- Nome do gerador:** A text input field.
- Data de fabricação da fonte ou produção do rejeito:** A date picker field.
- Emissões identificadas:** A row of checkboxes for 'alpha', 'Beta', 'Gamma', 'X ray', and 'Neutron'.
- Radionuclídeos:** A dropdown menu with the text '*selecione os radionuclídeos presentes'.
- Atividade total (Bq):** A text input field.
- Observações (matriz, blindagem, outros):** A large text area for notes.
- Atividade por radionuclídeo selecionado:** A section with the instruction '*digite a atividade de cada radionuclídeo em seu respectivo campo'. It contains five text input fields, each labeled 'Atividade nuclídeo ____ (Bq)'.
- Tx de dose $\mu\text{Sv/h}$ (0 cm):** A text input field.
- Tx de dose $\mu\text{Sv/h}$ (____ cm):** A text input field.
- Anexe a imagem (PNG ou JPG) da etiqueta do gerador:** A file upload area with a paperclip icon.

A 'SALVAR DADOS' button is located at the bottom right of the form.

Fonte: autora da tese

Figura 62-Tela de fluxo de caracterização- escolha de FE ou FC- para aplicação Web

The screenshot shows the 'RaWSys Nuclear Waste' interface with the same header as Figure 61. The main content area is a menu with four orange buttons:

- Adicionar novo conjunto de dados:** Represented by a plus sign icon.
- Buscar e atualizar conjunto de dados:** Represented by a magnifying glass icon.
- Aplicar Fator de escala:** Represented by the letters 'SF'.
- Aplicar Função de correlação:** Represented by the letters 'CF'.

The page title 'REJEITO ID 000000000' is visible at the top of the main content area.

Fonte: autora da tese

Figura 63-Tela de fluxo de caracterização- novo cálculo de FE ou FC- para aplicação Web

The screenshot shows a web interface for 'RaWSys Nuclear Waste'. At the top, there is a navigation bar with a back arrow, the application logo, and user icons. Below the navigation bar, the page title is 'REJEITO ID 000000000'. The main content area is divided into two columns. The left column contains input fields for: 'Descreva o material', 'Digite a sigla do gerador', 'Digite o lote do material', 'Selecione os RC'S', 'Selecione os RDM'S', and buttons for selecting the number of samples for RC'S and RDM'S (RC 1+, RC 2+, RC 3+, RC 4+, RDM 1+, RDM 2+, RDM 3+, RDM 4+). The right column contains input fields for 'RC 1 - Amostra 1' (Atividade Bq, Incerteza), 'RDM 1 - Amostra 1' (Atividade Bq, Incerteza), and calculation options: 'Calcular Fator de Escala' (SIM, NÃO), 'Fator de escala calculado RDM 1/ RC 1' (D2 sigma), 'Fator de escala calculado RDM 2/ RC 1' (D2 Sigma), 'Excluir Outliers?' (SIM, NÃO), and 'Calcular F.C.?' (SIM, NÃO). There are 'SALVAR DADOS' buttons and a 'VER GRÁFICOS' button.

Fonte: autora da tese

Figura 64- Tela de fluxo de caracterização- atualização de dados para cálculo de FE ou FC- para aplicação Web

The screenshot shows the same web interface as Figure 63, but with a different layout for the input fields. The left column now has dropdown menus for 'Escolha o material', 'Escolha a sigla do gerador', 'Selecione os RC'S', and 'Selecione os RDM'S'. The right column contains input fields for 'RC 1 - Amostra 1' (Atividade Bq, Incerteza), 'RDM 1 - Amostra 1' (Atividade Bq, Incerteza), and calculation options: 'Calcular Fator de Escala' (SIM, NÃO), 'Fator de escala calculado RDM 1/ RC 1' (D2 sigma), 'Fator de escala calculado RDM 2/ RC 1' (D2 Sigma), 'Excluir Outliers?' (SIM, NÃO), and 'Calcular F.C.?' (SIM, NÃO). There are 'SALVAR DADOS' buttons and a 'VER GRÁFICOS' button.

Fonte: autora da tese

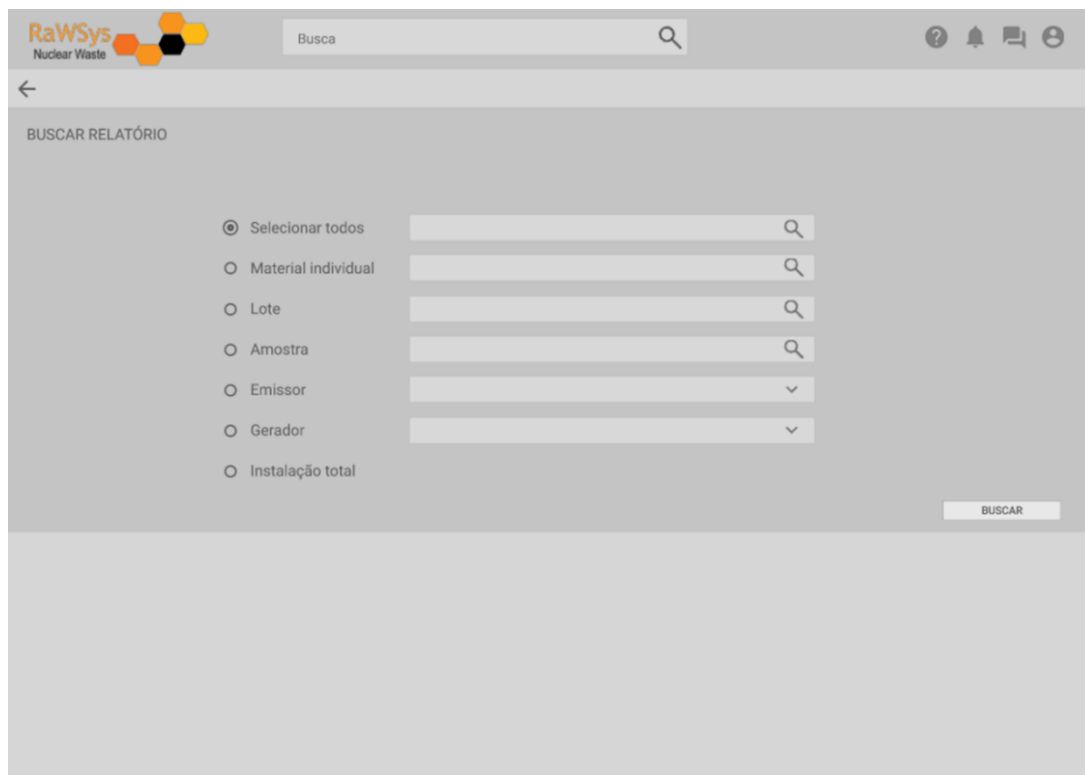
Figura 65- Tela de fluxo de caracterização- aplicação de FE existente- para aplicação Web

Fonte: autora da tese

Figura 66- Tela de fluxo de caracterização- aplicação de FC existente- para aplicação Web

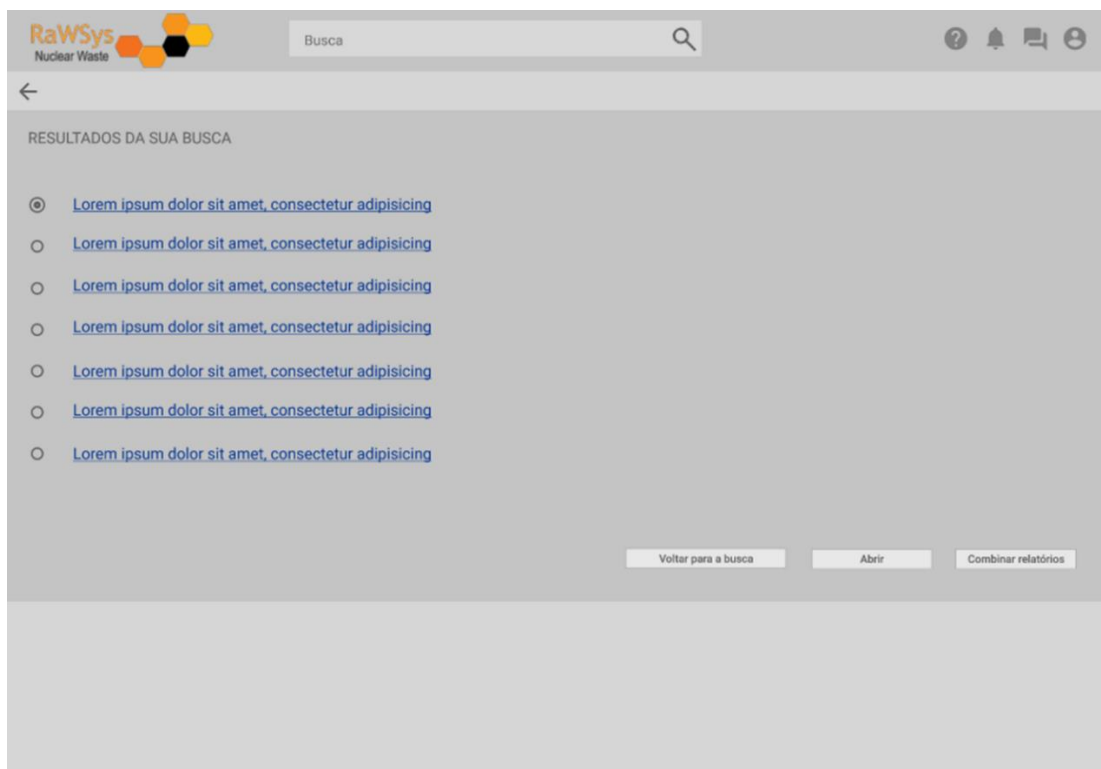
Fonte: autora da tese

Figura 67- Busca de relatório, aplicação Web



Fonte: autora da tese

Figura 68- Seleção/ combinação de itens para gerar relatório, aplicação Web



Fonte: autora da tese

Figura 69- Exibição de relatório, aplicação Web

Serviço de gestão de rejeitos radioativos (SEGRR)
 Instituto de pesquisas energéticas e nucleares
 Comissão Nacional de Energia Nuclear

Av. Prof. Lineu Prestes, 2242
 Cidade Universitária
 CEP 05508-000; São Paulo - SP

21123456789

1. INFORMAÇÕES GERAIS

NOME DO GERADOR: _____ Nº LICENÇA OPERA. _____

ENDEREÇO _____

CNPJ: _____ CLASSIF. LEGAL: _____ TIPO DE INSTALAÇÃO: _____

INSTALAÇÃO GERADORA: _____

RESP. INSTALAÇÃO: _____ FONE: _____ E-MAIL: _____

RESP. PROTEÇÃO RADIOLÓGICA: _____ FONE: _____ E-MAIL: _____

RESP. SUBS. PROTEÇÃO RADIOLÓGICA: _____ FONE: _____ E-MAIL: _____

"Declaro para os devidos fins, que as informações acima prestadas são verdadeiras e assumo a inteira responsabilidade pelas mesmas."

2. INFORMAÇÕES SOBRE O REJEITO

Descreva abaixo a origem e as características físicas, químicas e radiológicas do material.

Fonte: autora da tese

Figura 70- Avaliação de relatório, aplicação Web

Avaliação de dados de relatório

Relatório em conformidade? SIM NÃO Assinar

MOTIVAÇÃO

Caso "fora da conformidade" descreva aqui os motivos ou justificativa. O relatório será enviado com a avaliação para o operador revisor, gerente ou agente fiscalizador.

Enviar avaliação

Fonte: autora da tese

Abaixo são apresentadas as telas (FIG 71- 73) desenvolvidas com base nos requisitos e arquiteturas apresentados para a aplicação Mobile. É importante ressaltar que a plataforma mobile não permite o cadastro de usuários, sendo acessível apenas para usuários já cadastrados na aplicação Web.

O intuito é que o usuário possa utilizar um dispositivo eletrônico portátil (tablet ou celular) para atualização de informações de trabalho de campo em tempo real.

Figura 71-Interface da aplicação mobile. A) Tela de login. B) Tela de abertura de escaneamento de etiqueta



A

B

Fonte: autora da tese

Figura 72: Interface da aplicação mobile. C) Tela de câmera para escaneamento de etiqueta. D) Tela com etiqueta de confirmação e dados após escaneamento.



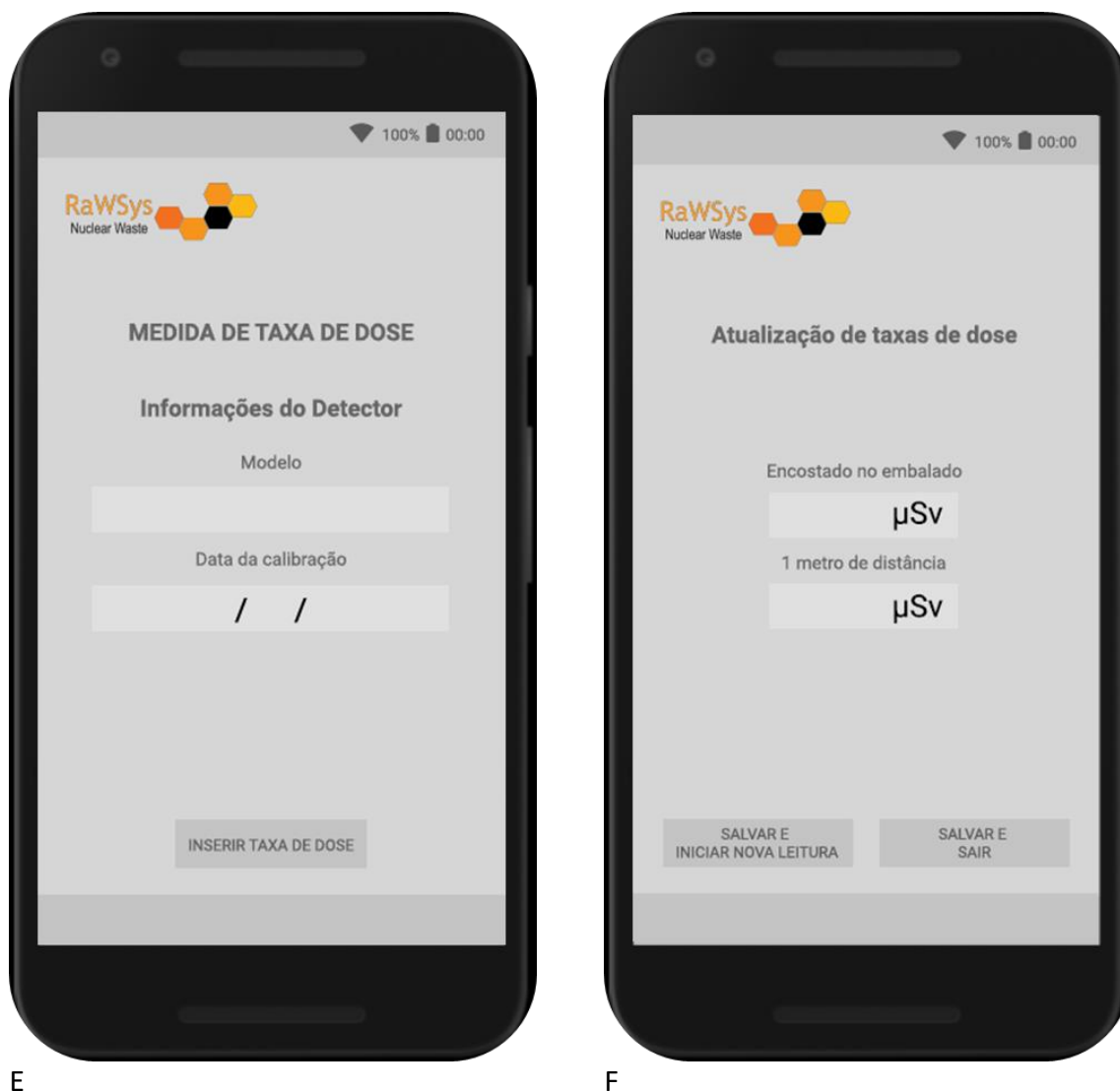
C



D

Fonte: autora da tese

Figura 73: Interface da aplicação mobile. E) Tela para inserção de informações do detector utilizado para medir taxa de dose. F) Tela para inserção de dados de taxa de dose medida em duas distâncias.




E

F


Fonte: autora da tese

Abaixo, nas figuras 74-79, são apresentados os relatórios assim como as etiquetas geradas pelo sistema, com a descrição das informações contidas nos respectivos campos indicados. É importante salientar que os relatórios podem ser gerados de diferentes formas, a depender das combinações e expansões de informações realizadas durante a visualização. O exemplo apresentado na tese exibe um relatório com informações detalhadas. O Apêndice C apresenta os relatórios sem os detalhamentos de campos.


Figura 74- Modelo de relatório- página de informações gerais



Serviço de gestão de rejeitos radioativos (SEGRR)
Instituto de pesquisas energéticas e nucleares
Comissão Nacional de Energia Nuclear



Av. Prof. Lineu Prestes, 2242
Cidade Universitária
CEP 05508-000; São Paulo - SP



21123456789

1. INFORMAÇÕES GERAIS

NOME DO GERADOR:	Nº LICENÇA OPERA.	
ENDEREÇO		
CNPJ:	CLASSIF. LEGAL:	TIPO DE INSTALAÇÃO:
INSTALAÇÃO GERADORA:		
RESP. INSTALAÇÃO:	FONE:	E-MAIL:
RESP. PROTEÇÃO RADIOLÓGICA	FONE:	E-MAIL:
RESP. SUBS. PROTEÇÃO RADIOLÓGICA:	FONE:	E-MAIL:

"Declaro para os devidos fins, que as informações acima prestadas são verdadeiras e assumo a inteira responsabilidade pelas mesmas."

2. INFORMAÇÕES SOBRE O REJEITO

Descreva abaixo a origem e as características físicas, químicas e radiológicas do material.

Upload de relatórios de caracterização fornecidos pelo gerador do rejeito (se houver)

Nº DE EMBALADOS: IDENTIFICAÇÃO NA ORIGEM:

TIPO DE EMBALAGEM:

PARA USO EXCLUSIVO DO SEGRR

DATA / HORA DO RECEBIMENTO:	<table border="0" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; font-size: x-small;">Nº SEGRR PARA EMBALADOS</td> <td style="width: 50%; font-size: x-small;">TAXA DE DOSE (µSv/h) Na superfície:</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center; font-size: x-small;">A 1m:</td> </tr> </table>	Nº SEGRR PARA EMBALADOS	TAXA DE DOSE (µSv/h) Na superfície:		A 1m:
Nº SEGRR PARA EMBALADOS	TAXA DE DOSE (µSv/h) Na superfície:				
	A 1m:				
DESTINO:					
RESPONSÁVEL:	RUBRICA: _____				
SUPERVISOR DE RADIOPROTEÇÃO:	RUBRICA: _____				

Pág.1/3

Autenticação do documento gerado pelo sistema.

O responsável pelo serviço de gerência deverá inserir todas as informações conhecidas da instalação geradora do rejeito. A assinatura digital diante do termo tem o intuito de assegurar que as informações foram verificadas previamente.

Descrever de forma objetiva as operações que resultaram na produção do rejeito recebido e transcrever as informações presentes na etiqueta fornecida pelo gerador. O número de embalados, características do material da embalagem, assim como sua identificação na origem (nº, letras, ou qualquer outro identificador), devem ser registrados. Se o gerador já tiver caracterizado o material, o operador deverá fazer upload de relatórios fornecidos no sistema.

Para cada embalagem que der entrada, um número de rastreio interno será gerado. Taxas de dose de cada embalado (na superfície e 1 metro de distância) deverão ser registradas.

O responsável pelo serviço de gerência deverá registrar no sistema informações de rastreio de entrada do rejeito no local (data de recebimento, quem recebeu o material, supervisor de radioproteção que acompanhou).

Fonte: autora da tese

Figura 75- Modelo de relatório- página de informações de amostragem

ipen **CNEN**

2123456789

3. INFORMAÇÕES DE AMOSTRAGEM

Nº EMBALADO SEGRR:

DATA/HORA: LOCAL:

RESP. OPERAÇÃO: RESP. RADIOPROTEÇÃO:

TIPO DA AMOSTRA:

A) AMOSTRA: (nº de referência) + Nº DO EMBALADO + Nº DA AMOSTRA DATA/HORA: RUBRICA:

DADOS DA AMOSTRAGEM: SÓLIDO COMPOSIÇÃO _____
 LÍQUIDO COMPOSIÇÃO _____
 GASOSO COMPOSIÇÃO _____

B) AMOSTRA: (nº de referência) + Nº DO EMBALADO + Nº DA AMOSTRA DATA/HORA: RUBRICA:

DADOS DA AMOSTRAGEM: SÓLIDO COMPOSIÇÃO _____
 LÍQUIDO COMPOSIÇÃO _____
 GASOSO COMPOSIÇÃO _____

C) AMOSTRA: (nº de referência) + Nº DO EMBALADO + Nº DA AMOSTRA DATA/HORA: RUBRICA:

DADOS DA AMOSTRAGEM: SÓLIDO COMPOSIÇÃO _____
 LÍQUIDO COMPOSIÇÃO _____
 GASOSO COMPOSIÇÃO _____

D) AMOSTRA: (nº de referência) + Nº DO EMBALADO + Nº DA AMOSTRA DATA/HORA: RUBRICA:

DADOS DA AMOSTRAGEM: SÓLIDO COMPOSIÇÃO _____
 LÍQUIDO COMPOSIÇÃO _____
 GASOSO COMPOSIÇÃO _____

NO CASO DE TRANSFERÊNCIA DE CUSTODIA DA AMOSTRA

LOCAL DESTINAÇÃO DAS AMOSTRAS:

Nº AMOSTRA: DATA/HORA DA TRANSFERÊNCIA: RUBRICA:
 Nº AMOSTRA:
 Nº AMOSTRA:
 MOTIVO DA TRANSFERÊNCIA:

Pág. 2/3

Identificação do operador que realizou amostragem.

Descrição objetiva do critério de amostragem, método e/ou referência utilizada para definição desse critério.

Registrar cada amostra retirada do embalado.
 O sistema deverá gerar automaticamente um número que correlacione a amostra ao embalado, permitindo o rastreio.
Micro etiquetas serão geradas para a identificação de cada amostra.
 Classificar cada amostra de acordo com seu estado físico e objetivamente descrever sua composição (ex: se resina de reator com água, se carvão, se material compactável).
 Inserir rubrica digital do operador responsável pela amostragem.

Caso seja necessário enviar a amostra para outro lugar, seja no mesmo instituto ou não, registrar número da micro etiqueta e motivo pelo qual a amostra foi transferida.
 Inserir rubrica digital do responsável que autorizou a transferência do material.

SeGRR LAB Embalado xxx Amostra A

HM-09-132-00234*0000043456753

Coletado: dd/mm/aa Laboratório:
 Compos: Peso/vol:

Fonte: autora da tese

Figura 76- Modelo de relatório- página de dados de caracterização

The image shows a report page with the following structure:

- Header:** Logos for 'ipen' and 'CEN', and a barcode with the number 21123456789.
- Section 4. DADOS CARACTERIZAÇÃO:** Contains three identical rows (A, B, and C) for sample data. Each row includes fields for:
 - AMOSTRA: (nº de referência) + Nº DO EMBALADO + Nº DA AMOSTRA
 - DATA/HORA:
 - RUBRICA:
 - RESPONSÁVEL:
 - MÉTODO ANALÍTICO:
 - DESCRIÇÃO (Descreve o método utilizado ou use referência de protocolo)
- Section 4.B. NOS CASOS DE TRABALHAR OS DADOS COM POINT KERNEL/FE/FC:** Contains fields for:
 - MÉTODOS:
 - RESULTADOS:
- Section 5. RESULTADO DAS ANÁLISES:** Contains fields for:
 - Nº AMOSTRA:
 - RESPONSÁVEL:
 - UPLOAD DOC. COM RESULTADOS
 - COMENTÁRIOS:
- Page Number:** Pág. 3/3

Three callout boxes provide instructions for each section:

- Callout 1 (for Section 4):** "Com as amostras registradas, descrever os métodos analíticos utilizados. Exemplo: - Se medida de taxa de dose: descrever as condições, detectores utilizados, distâncias tomadas para medição, detector utilizado; - Se radioquímico: descrever métodos de separação, materiais utilizados, modelos de detectores, curvas de calibração e, se houver, indicar a referência do método que utilizou para possibilitar consulta desses métodos posteriormente."
- Callout 2 (for Section 4.B):** "Ao utilizar os módulos de caracterização presentes no sistema, um registro será gerado, indicando qual módulo foi utilizado e seus respectivos resultados, parâmetros utilizados, materiais considerados e outros detalhes. Será possível exibir gráficos e tabelas."
- Callout 3 (for Section 5):** "Quando realizado análise para emissores α , β ou γ , análises elementares ou outra, os resultados gerados em formato de relatório deverão ser carregados no sistema para consulta posterior por meio de link. Inserir em comentários tipo de análise realizada."

Fonte: autora da tese

Figura 77- Modelo de relatório- relatório final com exibição de etiqueta

ipen **CNEN**

21123456789

6. RELATÓRIO FINAL

INVENTÁRIO RADIOISOTÓPICO ID DO EMBALADO #000000000

REJEITO RADIOATIVO

PROIBIDO POR LEI FEDERAL DEPOSIÇÃO INADEQUADA

Se encontrado, entre em contato com a polícia ou autoridade de segurança pública mais próxima do órgão de proteção ambiental do Brasil.

Nº dos embalados (se agrupados) Nº documento de histórico

REJEITO	Classe do rejeito	Atividade total	Destinação
	Matriz do rejeito	Taxa de dose na superfície	

Origem: _____ Telefone: _____

Endereço: _____

IDENTIFICAÇÃO INTERNA DO REJEITO

GERADOR	DESTINAÇÃO
Departamento: _____	Data de chegada: _____
Endereço: _____	Data de saída: _____
Código do documento de histórico aqui	Data de deposição: (se deposição final)

Em caso de liberação do material radioativo, entre em contato com a Comissão Nacional de Energia Nuclear +55 (11) 5155-9000 para obter assistência

MATERIAL	CLASSE	ATIVIDADE TOTAL (Bq)	MASSA (kg)	VOLUME (m ³)

RADIONUCLÍDEO	T 1/2	ATIVIDADE (Bq)

TAXA DE DOSE (µSv/h)	DATA
Na superfície:	00/00/00
1m de distância:	

LOCALIZAÇÃO STATUS

RESPONSÁVEL: _____

DATA/HORA: _____

LINK PARA PDF: _____

RUBRICA: _____

Pág. 3/3

Etiqueta que será disponibilizada no sistema após a caracterização (primária ou final). De acordo com as propriedades avaliadas, o sistema poderá emitir etiquetas de sinalização para risco químico, físico ou biológico. Todas as etiquetas e sinalizações devem ser coladas em local visível do respectivo embalado.

Descrição do material do embalado: classe, atividade total do embalado de acordo com os resultados obtidos pelos métodos de caracterização, massa total e volume total.

Detalhamento do inventário do embalado. São considerados cada radionuclídeo individualmente e sua respectiva atividade. Com uso da equação de Bateman, o inventário poderá ser atualizado periodicamente acrescentando os outros radionuclídeos das cadeias identificadas.

Com uso de sistema mobile, será possível fazer a leitura do código de barras do rejeito e, atualizar as taxas de dose no relatório assim que ocorrer a medição.

Localização do rejeito (galpão onde se encontra). Registro de situação: se aguardando tratamento, se tratado, se descartado ou enviado para deposição final. Responsável por conferência do material, rubrica digital e geração de link para download de PDF do relatório completo ou parcial.

Fonte: autora da tese

Figura 78- Modelo de relatório- página de detalhamento de inventário

The screenshot shows a report page with the following elements:

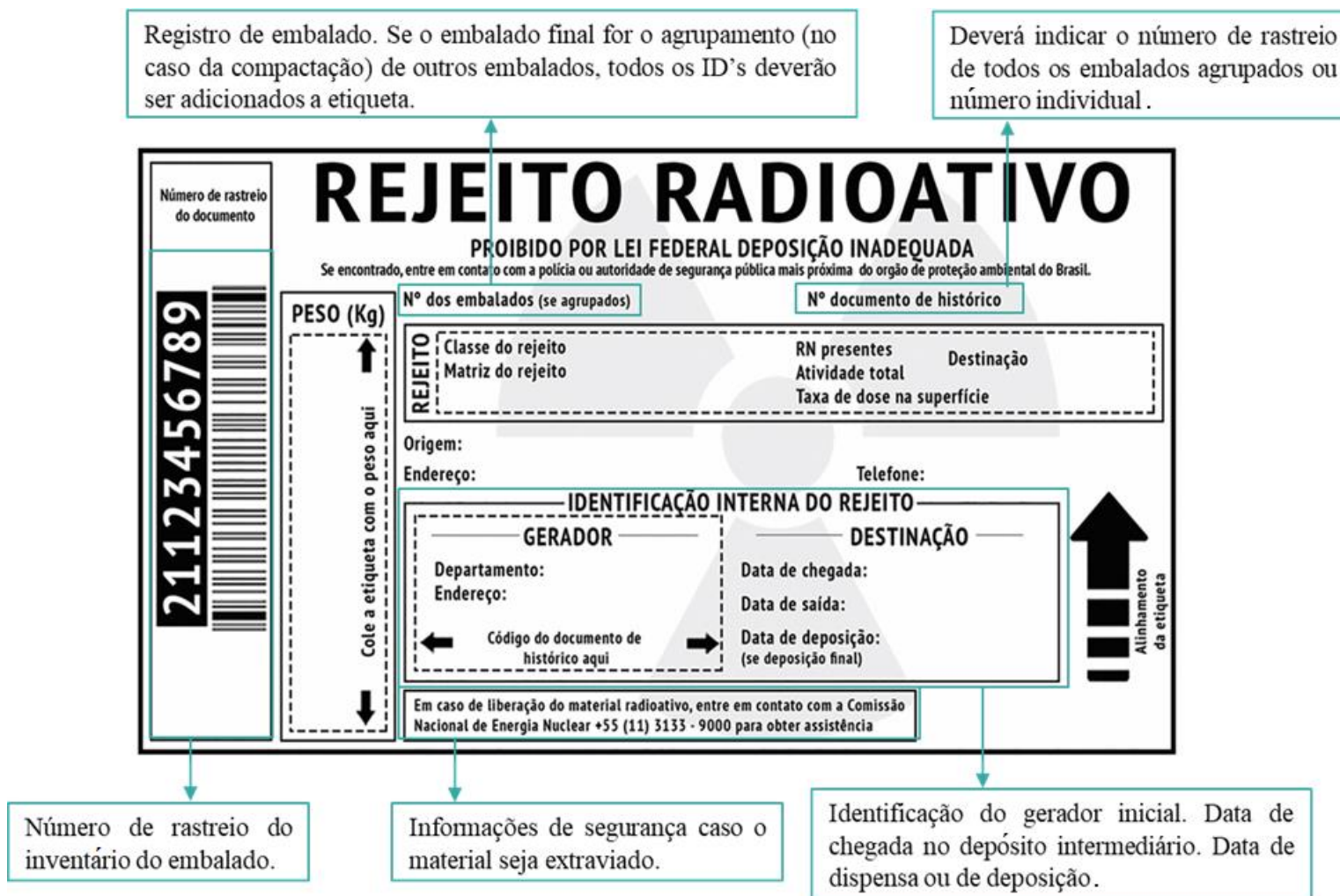
- Logos for **ipen** and **CNEN** at the top left.
- A barcode with the number **21123456789** at the top right.
- Section header: **6. RELATÓRIO FINAL**
- Sub-header: **INVENTÁRIO RADIOISOTÓPICO**
- A filter field: **CLASSE: fsda**
- A table with the following columns: **ID DO REJEITO**, **ATIVIDADE TOTAL (Bq)**, **RADIONUCLÍDEOS**, **MASSA (Kg)**, **VOLUME (m³)**, **LOCALIZAÇÃO**, and **STATUS**.
- A summary section at the bottom containing:
 - DATA:** 00/00/00
 - RESPONSÁVEL:**
 - DATA/HORA:**
 - LINK PARA PDF:**
 - RUBRICA:**

Three callout boxes provide additional information:

- Top Callout:** O sistema permite gerar relatórios utilizando filtros como classe do rejeito, lote de rejeito, status do rejeito ou todos os rejeitos já registrados.
- Middle Callout:** A exibição do relatório é feita por tabela, onde são discriminados os itens por ID do rejeito (que é clicável e leva para o relatório individual expandido). Para cada ID exibido, é possível verificar o valor de atividade total, lista de radionuclídeos presentes no embalado, massa, volume e confirmação de situação atual (status).
- Bottom Callout:** Ao final, exibe-se data e hora em que o relatório foi gerado, nome do responsável pela instalação, rubrica do responsável e link para download do relatório em formato PDF.

Pág. 3/3

Figura 79- Etiqueta identificadora para embalados de rejeito radioativo



Fonte: autora da tese

9 CONCLUSÃO

Por meio desse estudo, foi possível desenvolver o algoritmo para um sistema que poderá ser utilizado na caracterização de rejeitos radioativos em qualquer instalação que desempenhe essa atividade.

O objetivo principal do trabalho foi gerar as especificações e documentação para que seja possível viabilizar a implementação do sistema, permitindo o gerenciamento de informações e sua preservação em longo prazo. Os dados obtidos no trabalho permitiram a construção do código/ algoritmo em linguagem pseudotécnica, necessária à programação e implementação do sistema, batizado de RaWSys, além do documento de especificações com requisitos funcionais e não funcionais, com descrição detalhada das funções, campos para preenchimento e agrupamento das bibliotecas desenvolvidas, além do protótipo de interface navegável que complementa a documentação do sistema.

O sistema está atualmente em desenvolvimento para implementação e teste. A aplicação do sistema completo permitirá o armazenamento e a garantia da qualidade das informações geradas, a rastreabilidade dos dados e dos responsáveis pelas ações realizadas.

Após a implantação, os custos das operações serão reduzidos, pois o sistema evitará retrabalho ou perda de informações, mantendo o arquivamento do inventário radioisotópico em longo prazo. Além disso, permitirá o mapeamento de métodos já utilizados tanto para a caracterização quanto para o processamento de amostras, facilitando o gerenciamento de rejeitos que já possam ter sido analisados em algum momento. O sistema permite também a geração de diversos relatórios, com a aplicação de diferentes filtros de busca. Os relatórios passarão por dupla revisão, contando com a assinatura do executor da ação, do revisor e do gerente da instalação. Os relatórios ficarão disponíveis para o agente responsável pela fiscalização. Pretende-se com isso que as informações sejam verificáveis e garantir, se necessário, a comunicação direta entre gerentes de instalação e órgãos reguladores.

Do ponto de vista científico e tecnológico, a identificação, a descrição, a automação e a integração dos métodos de caracterização de rejeitos radioativos, empreendidas neste trabalho, contribuem para o aprimoramento da gestão, com segurança e com garantia da qualidade, podendo vir a se tornar um padrão para a indústria nuclear.

REFERÊNCIAS

- AGUILAR, Luis Joyanes., **Programação em C++: algoritmos, estruturas de dados e objetos**, McGraw- Hill, 2.ª Edição, 2011.
- ALZAQEBAH, Abdullah; MASADEH, Raja; HUDAIB, Amjad. Whale optimization algorithm for requirements prioritization. In: **2018 9th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS)**. IEEE, 2018. p. 84-89.
- AMBLER, Scott. **Agile modeling: effective practices for extreme programming and the unified process**. John Wiley & Sons, 2002.
- AMPHLETT, C. B. **Treatment and disposal of radioactive wastes**. International series of monographs on nuclear energy. Division V, v. 2, Pergamon Press, London, 1961.
- ANDERSON, ROBERT STEPHEN. **The Integrated Waste Tracking System-A Flexible Waste Management Tool**. Idaho National Laboratory (INL), 2001.
- ANDERSON, ROBERT STEPHEN, GREEN, KIRK. **The Integrated Waste Tracking Systems (IWTS)-A Comprehensive Waste Management Tool**. Idaho National Laboratory (INL), 2005.
- ANDERSON, R. S., GARAMSZEGHY, M., RODRIGUES, F., & NICHOLLS, E.. **Installing and Commissioning a New Radioactive Waste Tracking System-Lessons Learned**. Idaho National Laboratory (INL), 2005.
- ANTILLA. M. **Gamma and neutron dose rates on the outer surface of the nuclear waste disposal canisters**. VTT Energy. Dezembro. 1996 (ISSN 1239- 3096).
- BEKEN, Tom Vander; DORN, Nicholas; VAN DAELE, Stijn. Security risks in nuclear waste management: Exceptionalism, opaqueness and vulnerability. **Journal Of Environmental Management**. p. 940-948. dez. 2009.
- BENBENNICK, M. E., BROTON, M. S., FUOTO, J. S., & NOVGROD, R. L.; **Model tracking system for low-level radioactive waste disposal facilities: License application interrogatories and responses**. Idaho National Engineering Lab., Idaho Falls, ID (United States), 1994.
- BIRREL, N. D., OULD, M. A., **A Practical Handbook for Software Development**, Cambridge University Press, 1985.
- BOOCH, Grady; JACOBSON, Ivar; RUMBAUGH, James. Unified Modeling Language 1.3. **White paper, Rational Software Corp**, 1998.
- BRASIL. Lei nº 4118, de 1962. Dispõe sobre a política nacional de energia nuclear, cria a Comissão Nacional de Energia Nuclear, e dá outras providências. Brasília, 27 ago. 1962.
- BRASIL. Lei nº 7781, de 1989. Dá Nova Redação Aos Artigos 2º, 10 e 19 da Lei Nº 6.189, de 16 de Dezembro de 1974, e Dá Outras Providências. Brasília, 27 jun. 1989.

BRASIL. Lei nº 10308, de 2001. Dispõe sobre a política nacional de energia nuclear, cria a Comissão Nacional de Energia Nuclear, e dá outras providências. Brasília, 20 nov. 2001.

BROWN, S.. "Software Architecture for Developers—Volume 2: Visualise, document and explore your software architecture," ed: eBook, 2017.

BRUNELI, MARCOS VALERIO DE QUEIROZ. **A utilização de uma metodologia de teste no processo de melhoria da qualidade de software**. 2006. 49f. Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Computação, Campinas, 2006.

BURCL, R. **Radioactive waste (RAW) categories, characterization and processing route selection**. In: Radioactive Waste Management and Contaminated Site Clean-Up. Woodhead Publishing, p. 50-72. 2013.

CHAPIN, Ned; "Software maintenance types-a fresh view," Proceedings 2000 **International Conference on Software Maintenance**, San Jose, CA, USA, 2000, pp. 247-252, doi: 10.1109/ICSM.2000.883056.

COCKBURN, Alistair; HIGHSMITH, Jim. Agile software development, the people factor. **Computer**, v. 34, n. 11, p. 131-133, 2001.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR – CNEN. **Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação**. CNEN NN 8.01, Rio de Janeiro, 2014 a.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR – CNEN. **Licenciamento de Depósitos de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação**. CNEN NN 8.02, Rio de Janeiro, 2014 b.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR – CNEN. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. CNEN NN 3.01, Rio de Janeiro, 2014 c.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR – CNEN, **Descomissionamento de Usinas Nucleoelétricas**, CNEN-NE 9.01. Rio de Janeiro, 2012.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR – CNEN. **Critérios de Aceitação para Deposição de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação**. CNEN-NN-6.09. Rio de Janeiro, 2002.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR – CNEN, **Controle de Materiais Nucleares**, CNEN-NE 2.02. Rio de Janeiro, 1999.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR – CNEN. **Seleção e Escolha de Locais Para Depósitos de Rejeitos Radioativos**, CNEN-NE 6.06. Rio de Janeiro, 1990.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR – CNEN. **Segurança de Sistemas de Barragem de Rejeitos Contendo Radionuclídeos**, CNEN-NE 1.10. Rio de Janeiro, 1980.

CUMO, Maurizio. Decommissioning of Nuclear Plants. In: CACUCI, Dan Gabriel. **Handbook of Nuclear Engineering**. Alemanha: Springer, Cap. 27. p. 3005-3245. 2010.

- DING, W., LIANG, P., TANG, A., & VAN VLIET, H.. Knowledge-based approaches in software documentation: A systematic literature review. **Information and Software Technology**, v. 56, n. 6, p. 545-567, 2014.
- DUMAS, Joseph S.; REDISH, Janice C. **A Practical Guide to Usability Testing**, Revised Edition. Oregon. 1994.
- ENVIRONMENT AGENCY. Radioactive substances regulation –Environmental Principles, N° RSR 1, abr. 2010. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/296388/gho0709bqsb-e-e.pdf>
- GILMORE, D. & GREEN, T., Programming plans and programming expertise. **Journal of Experimental Psychology**, 40A (3), 67-82, 1988.
- GÓIS, Veruska Sayonara. A Lei de Compliance e sua Configuração Enquanto Política Pública Regulatória para o Setor Privado Brasileiro. **Revista Controle-Doutrina e Artigos**, v. 12, n. 2, p. 98-117, 2014.
- GUNDA, Sai Ganesh. **Requirements engineering: elicitation techniques**. 2008.
- HARR, Logan J. **Precise calculation of complex radioactive decay chains**. AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSON AFB OH SCHOOL OF ENGINEERING AND MANAGEMENT, 2007.
- HADDAL, RISA; FINCH, ROBERT; BALDWIN, GEORGE T. **Long-Term Information Management (LTIM) of Safeguards Data at Geological Repositories**. Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2016.
- HUNT, Andrew; THOMAS, David. The Pragmatic Programmer. **Addison Wesley**, v. 15, 2000.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, - ICRP **publication 103**, Ann. ICRP 37 (2–4), p. 1–332. 2007.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IAEA. **Classification of Radioactive Waste**, IAEA Safety Standards No. GSG-1, Vienna, 2009 (a).
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IAEA. **Policies and Strategies for Radioactive Waste Management**, IAEA Energy Series, No. NW-G-1.1, Vienna, 2009 (b).
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IAEA. **Determination and use of scaling factors for waste characterization in nuclear power plants**. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.18. Vienna, 2009 (c).
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IAEA **strategy and methodology for radioactive waste characterization**, (tecdoc-15237). Vienna: 2007.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA. **Radioactive waste management glossary**, Vienna, 2003.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Waste inventory record keeping**

systems (**WIRKS**) for the management and disposal of radioactive waste, IAEA, Vienna, 2001 (TECDOC-1222).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IAEA, **Maintenance of records for radioactive waste disposal**. IAEA, Vienna, 1999 (TECDOC, 1097).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IAEA. **The Principles of Radioactive Waste Management**. IAEA Nuclear Safety Series No. 111-F. Vienna, 1995.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Radioactive waste management – An IAEA source book**. Vienna, 1992.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Conditioning of low-and intermediate-level radioactive wastes**. Vienna, 1983 (a) (TECDOC, 222).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Handling and storage of conditioned high-level wastes**. Vienna, 1983 (b) (TECDOC, 229).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Treatment of low-and intermediate-level liquid radioactive wastes**. Vienna, 1984 (TECDOC, 236).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Nuclear Fuel Technology — The Scaling Factor method to determine the radioactivity of low and intermediate level radioactive waste packages generated at nuclear power plants**. ISO 21238:2007.

IEEE, COMPUTER SOCIETY SOFTWARE ENGINEERING STANDARDS COMMITTEE *et al.* **Standard for Developing a Software Project Life Cycle Process** (IEEE-STD-1074-2006). 2006.

IEEE Std. 829, “IEEE Std 829: **Standard for Software Test Documentation**”, Institute of Electrical and Electronic Engineers, USA, 1998.

IEEE. **Recommended practice for software requirements specifications**. In: IEEE Std. 830-1998. 1998.

IEEE Std. 610, “IEEE Std 610: **Standard Computer Dictionary**”, Institute of Electrical and Electronic Engineers, USA, 1991.

ISO\IEC IS 10746-2, **Open Distributed Processing – Reference Model: Foundations**, 1996.

ISO/IEC/IEEE International Standard - “**Systems and software engineering -- Life cycle processes -- Requirement’s engineering**,” in ISO/IEC/IEEE 29148:2018(E), vol., no., pp.1-104, 30 Nov. 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8559686.

ISO, ISO. IEC 12207: 2008 **Systems and software engineering-Software life cycle processes.**, 2008. **International Organization for Standardization: Geneva.**

ISO 6592: 2000. Information technology. - **Guidelines for the documentation of computer-based application systems.**

JANICKI, Ryszard; PARNAS, David Lorge; ZUCKER, Jeffery. Tabular representations in relational documents. In: **Relational methods in computer science**. p. 184-196, Springer, Vienna, 1997.

JONES, A., How novices learn to program. Paper presented at the First IFIP **Conference on Human-Computer Interaction**, London, 1984.

KASHIWAGI, M.; MÜLLER, W. **Considerations on the activity concentration determination method for low-level waste packages and nuclide data comparison between different countries**. 2000.

KEKKI, T.; TIITTA, A. **Evaluation of the radioactive waste characterization at the Olkiluoto nuclear power plant**. STUK-YTO-TR 162. Helsinki, 2000.

KLEE, Matthew. Five paper prototyping tips. **Eye for design**, North Andover, MA, p. 2-4. 2000.

KLOOSTERMAN. J. L.; HOOGENBOOM. J. E. **Marmer a flexible point-kernel shielding code**. Interfaculty Reactor Institute. Delft University of Technology. Disponível em: <<http://www.janleenkloosterman.nl/papers/klooster8801.pdf>>.

LEE, W. E.; OJOVAN, M. I. Fundamentals of radioactive waste (RAW): science, sources, classification and management strategies. In: **Radioactive Waste Management and Contaminated Site Clean-Up**. Woodhead Publishing, p. 3-50e. 2013 (a).

LEE, William E.; OJOVAN, Michael I.; JANTZEN, Carol M. (Ed.). **Radioactive waste management and contaminated site clean-up: Processes, technologies and international experience**. Elsevier, 2013 (b).

LEE, Y., CHO, H., SHON, J., KIM, K., HONG, K. P., & PARK, H. S. **Design of System and Prototype for the Radioactive Waste Management**. WM'04 Conference, Tucson, 2004.

LIERSE, C.; GOEBEL, H.; KACINIEL, E.; BUECHERL, T.; KREBS, K.. Application of digital radiography for the non-destructive characterization of radioactive waste packages. **American Society Of Mechanical Engineers**, Nova Iorque, 31 dez. 1995.

MARINGER, Franz-Josef et al. Radioactive waste management: Review on clearance levels and acceptance criteria legislation, requirements and standards. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 81, p. 255-260, 2013.

MARUMO, J.T. **Avaliação da contaminação provocada por pára-raios radioativos de Amerício-241 descartados em lixões**. Tese (Doutorado), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2006.

MAYHEW, Deborah J. **The usability engineering lifecycle: a practitioner's handbook for user interface desing**. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 1999.

NORMAN, D., Some observations on mental models. In D. Gentner & A. Stevens (Eds.), *Mental mod-els* (pp. 34-39). NJ: Erlbaum, 1983.

OJOVAN, Michael I. (Ed.). **Handbook of advanced radioactive waste conditioning technologies**. Elsevier, 2011.

OJOVAN, M. I.; LEE, W. E.; KALMYKOV, Stepan. Treatment of Radioactive Wastes. An **Introduction to Nuclear Waste Immobilization**, p. 171-203, 2011.

PAETSCH, Frauke; EBERLEIN, Armin; MAURER, Frank. **Requirements engineering and agile software development**. In: WET ICE 2003. Proceedings. Twelfth IEEE International Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises, 2003. p. 308-313. IEEE, 2003.

PASCHOA, A. S.; TRANJAN FILHO, A. Radioactive Waste Management in Developing and Newly Industrialized Countries. **Applied Radiation and Isotopes**. Grã-bretanha, p. 707-715.1995.

PEARROW, Mark. **Web site usability handbook**. Rockland, MA: Charles River Media, 2000.

PÉROT, Bertrand et al. **The characterization of radioactive waste: a critical review of techniques implemented or under development at CEA**, France. EPJ Nuclear Sciences & Technologies, v. 4, p. 3, 2018.

PETERS, James F.; PEDRYCZ, Witold. Engenharia de software: teoria e prática. **Rio de Janeiro: Campus**, v. 681, n. 519.683, p. 2, 2001.

PETRIE, Jennifer. **Mixed-fidelity prototyping user interfaces**. 2006. 136 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – College of Graduated Studies and Research, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canadá, 2006.

PRADO, Eduardo SP et al. Thermal plasma technology for radioactive waste treatment. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, 2020.

PRESSMAN, Roger S. **Engenharia de Software-ed. 7**. Editora Amgh, 2009.

PROKHORETS. I. M.; PROKHORETS. S. I.; KHAZHURADOV. M. A.; RUDYCHEV. E.V.; FEDORCHENKO. D.V. Point-Kernel Method For Radiation Fields Simulation. Problems Of Atomic Science and Technology. 2007. No 5. Series: **Nuclear Physics Investigations** (48). p.106-109. National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology". 61108. Kharkov. Ucrânia. 2007.

RAMADHAN, H. A., **Programming by discovery**. **Journal of Computer Assisted Learning**, (16), 83-93., 2000.

RAOUX, A.-C. et al. Transuranic waste assay by neutron interrogation and online prompt and delayed neutron measurement. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, v. 207, n. 2, p. 186-194, 2003.

ROCKWELL, Theodore. ed: **Reactor shielding design manual**. Authors: E.L. Czapek and others, Contributors: M.J. Abrams. Princeton, N.J. Van Nostrand, 1956.

ROLINDO, Natalie Costa. **Determinação da atividade de fontes radioativas seladas de irídio-192 em desuso**. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP, São Paulo, 2020.

RUBIN, Jeffrey. **Handbook of usability testing**. New York: John Wiley and Sons, 1994.

RUMBAUGH, J., JACOBSON, I., BOOCH, G., **The Unified Modeling Language**, Addison-Wesley, 1999.

SCHACH, Stephen R.; **Engenharia de Software: os paradigmas Clássico e Orientado a objetos**, 7.ª Edição, McGraw-hill, 2009.

SHAMS-UL-ARIF, Q. Khan; GAHYUR, S. A. K. Requirements engineering processes, tools/technologies, & methodologies. **International Journal of Reviews in Computing**, v. 2, n. 6, p. 41-56, 2009.

SIAU, KENG; LOO, POI-PENG. Identifying difficulties in learning UML. **Information Systems Management**, v. 23, n. 3, p. 43-51, 2006.

SINGLEDECKER, Steven J. et al. **Radioactive Waste Characterization Strategies; Comparisons Between AK/PK, Dose to Curie Modeling, Gamma Spectroscopy, and Laboratory Analysis Methods**. Wm2012 Conference. Phoenix, fev.2012.

SMITH, R. B.; TESSARO, A. P. G.; ROLINDO, N. C.; VICENTE, R.. **Further Analyses of the Unburied Goiania Accident Packages**. Waste Management Symposia, 2019, Phoenix. WM2019 Online Proceedings. Phoenix, AZ, 2019.

SOMMERVILLE, Ian., **Software Engineering**, Addison-Wesley, 5.ª Edição, 1997.

SOMMERVILLE, Ian. **Software engineering** 9th Edition. ISBN-10, v. 137035152, 2011.

SOUZA, Daiane Cristini Barbosa de. **Desenvolvimento de método para caracterização de embalados de rejeitos radioativos**. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP, São Paulo, 2013.

TADDEI, M. H. T. **Determinação de fatores de escala para estimativa do inventário de radionuclídeos em rejeitos de média e baixa atividade do reator IEA-R1**. Tese (Doutoramento) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP, São Paulo, 2013.

Tadei, M. H. T.; Vicente, R.; Marumo, J. T.; Sakata, S. K.; Terremoto, L. A. A. Determination of long-lived radionuclides in radioactive wastes from the IEA-R1 nuclear research reactor. **J Radioanal Nucl Chem**, v. 295, n. 2, p. 951-957, 2013 (b).

VÁZQUEZ-INGELMO, ANDREA; GARCÍA-HOLGADO, ALICIA; GARCÍA-PEÑALVO, FRANCISCO J. C4 model in a Software Engineering subject to ease the comprehension of UML and the software. In: **2020 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)**. IEEE, 2020. p. 919-924.

WISBEY, S.; HOTZEL, S.; DUMONT, J. N.; BERCKMANS, A.; CLAUDEL, A.; TUNBRANT, S.; CODRE, P. H. D. L.. **Development of an Integrated System for the**

Long-term Preservation of Records, Knowledge and Memory relating to Radioactive Waste Disposal Facilities. WM'17, Tempe, United States. 2017.

ZOWGHI, Didar; COULIN, Chad. Requirement's elicitation: A survey of techniques, approaches, and tools. In: **Engineering and managing software requirements.** Springer, Berlin, Heidelberg, 2005. p. 19-46.

APÊNDICE A - (CD COM ALGORITIMOS)

APÊNDICE B - CASOS DE TESTE

CASO DE TESTE 1- FONTE PUNTIFORME

```

N_fonts = 1
a = 5.5
radionuclides = 2
Activity_Ir_192 = 9.5e3
Activity_Co_60 = 6.6e4
blind = 1
thickness_blind = 0.08
material_density = 7.87
dose = 11
Energy_Ir_192 =
c(0.161,0.308,0.306,0.468)
Yield_Ir_192 = c(1.00E+00,2.97E-
01,8.28E-01,4.78E-01)
Energy_Co_60 = c(1.17,1.33)
Yield_Co_60 = c(9.99E-01,1.00E+00)

Coef_Ir_192 = 1
Coef_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = 0.731-
5.1*(Energy_Ir_192[i])+14.2*(Energy_
Ir_192[i])^2-
16.3*(Energy_Ir_192[i])^3+6.6*(Energy
y_Ir_192[i])^4
    Coef_Ir_192[i] = x
}

Coef_Co_60 = 1
Coef_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    if (Energy_Co_60[i] < 1)
    {
        x = 0.731-
5.1*(Energy_Co_60[i])+14.2*(Energy_C
o_60[i])^2-
16.3*(Energy_Co_60[i])^3+6.6*(Energy
_Co_60[i])^4
        Coef_Co_60[i] = x
    }
    else
    {
        x = 0.0732-
0.0191*(Energy_Co_60[i])+0.00286*(E
nergy_Co_60[i])^2-
0.000174*(Energy_Co_60[i])^3+0.00000
365*(Energy_Co_60[i])^4
        Coef_Co_60[i] = x
    }
}

mi_Ir_192 = 1
mi_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)

for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
material_density*Coef_Ir_192[i]
mi_Ir_192[i] = x
}

mi_Co_60 = 1
mi_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
material_density*Coef_Co_60[i]
mi_Co_60[i] = x
}

A1_Ir_192 = 1
A1_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = 11.6-
3.41*(Energy_Ir_192[i])+0.507*(Energ
y_Ir_192[i])^2-
0.0339*(Energy_Ir_192[i])^3+(0.00076
9)*(Energy_Ir_192[i])^4
    A1_Ir_192[i] = x
}

A1_Co_60 = 1
A1_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = 11.6-
3.41*(Energy_Co_60[i])+0.507*(Energ
_Co_60[i])^2-
0.0339*(Energy_Co_60[i])^3+(0.000769
)*(Energy_Co_60[i])^4
    A1_Co_60[i] = x
}

a1_Ir_192 = 1
a1_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = -1*(0.108-
0.0262*(Energy_Ir_192[i])+0.00387*(E
nergy_Ir_192[i])^2+0.000977*(Energy_
Ir_192[i])^3-
0.000325*(Energy_Ir_192[i])^4+0.0000
323*(Energy_Ir_192[i])^5-
0.0000011*(Energy_Ir_192[i])^6)
    a1_Ir_192[i] = x
}

a1_Co_60 = 1
a1_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)

```

```

for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = -1*(0.108-
0.0262*(Energy_Co_60[i])+0.00387*(En
ergy_Co_60[i])^2+0.000977*(Energy_Co
_60[i])^3-
0.000325*(Energy_Co_60[i])^4+0.00003
23*(Energy_Co_60[i])^5-
0.0000011*(Energy_Co_60[i])^6)
    a1_Co_60[i] = x
}

a2_Ir_192 = 1
a2_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = -
0.00622+0.042*(Energy_Ir_192[i])-
0.00981*(Energy_Ir_192[i])^2+0.00186
*(Energy_Ir_192[i])^3-
0.000319*(Energy_Ir_192[i])^4+0.0000
287*(Energy_Ir_192[i])^5-
0.000000961*(Energy_Ir_192[i])^6
    a2_Ir_192[i] = x
}

a2_Co_60 = 1
a2_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = -
0.00622+0.042*(Energy_Co_60[i])-
0.00981*(Energy_Co_60[i])^2+0.00186*
(Energy_Co_60[i])^3-
0.000319*(Energy_Co_60[i])^4+0.00002
87*(Energy_Co_60[i])^5-
0.000000961*(Energy_Co_60[i])^6
    a2_Co_60[i] = x
}

A2_Ir_192 = 1
A2_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = 1-A1_Ir_192[i]
    A2_Ir_192[i] = x
}

A2_Co_60 = 1
A2_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = 1-A1_Co_60[i]
    A2_Co_60[i] = x
}

B_Ir_192 = 1
B_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = (A1_Ir_192[i]*exp(-
a1_Ir_192[i]*mi_Ir_192[i]*thickness_
blind)) + (A2_Ir_192[i]*exp(-
a2_Ir_192[i]*mi_Ir_192[i]*thickness_
blind))
    B_Ir_192[i] = x
}

B_Co_60 = 1
B_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = (A1_Co_60[i]*exp(-
a1_Co_60[i]*mi_Co_60[i]*thickness_bl
ind)) + (A2_Co_60[i]*exp(-
a2_Co_60[i]*mi_Co_60[i]*thickness_bl
ind))
    B_Co_60[i] = x
}

b1_Ir_192 = 1
b1_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
mi_Ir_192[i]*thickness_blind
    b1_Ir_192[i] = x
}

b1_Co_60 = 1
b1_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
mi_Co_60[i]*thickness_blind
    b1_Co_60[i] = x
}

G_Ir_192 = 1
G_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
0.00000201*(Energy_Ir_192[i])-
0.00000000867
    G_Ir_192[i] = x*1e4
}

G_Co_60 = 1
G_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{

```



```

        if (Energy_Co_60[i] < 1)
        {
            x =
0.00000201*(Energy_Co_60[i])-
0.00000000867
            G_Co_60[i] = x*1e4
        }
        else
        {
            x =
0.00000097*(Energy_Co_60[i])+0.00000
126
            G_Co_60[i] = x*1e4
        }
    }

S0_Ir_192 = 1
S0_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
Yield_Ir_192[i]*Activity_Ir_192
    S0_Ir_192[i] = x
}

S0_Co_60 = 1
S0_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
Yield_Co_60[i]*Activity_Co_60
    S0_Co_60[i] = x
}

F_Ir_192 = 1
F_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
B_Ir_192[i]*S0_Ir_192[i]*exp(-
b1_Ir_192[i])/(4*pi*(a^2))
    F_Ir_192[i] = x
}

F_Co_60 = 1
F_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
B_Co_60[i]*S0_Co_60[i]*exp(-
b1_Co_60[i])/(4*pi*(a^2))
    F_Co_60[i] = x
}

Dose_Ir_192 = 1
Dose_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)]
= c(1)

for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
F_Ir_192[i]*G_Ir_192[i]
    Dose_Ir_192[i] = x
}

Dose_Co_60 = 1
Dose_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = F_Co_60[i]*G_Co_60[i]
    Dose_Co_60[i] = x
}

FR = dose/(sum(Dose_Ir_192) +
sum(Dose_Co_60))

Activity_Cor_Ir_192 =
FR*Activity_Ir_192

Activity_Cor_Co_60 =
FR*Activity_Co_60

Sum_Activity_Cor_Ir_192 =
Activity_Cor_Ir_192*length(Energy_Ir
_192)

Sum_Activity_Cor_Co_60 =
Activity_Cor_Co_60*length(Energy_Co_
60)

S0_Cor_Ir_192 = 1
S0_Cor_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192
)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
Activity_Cor_Ir_192*Yield_Ir_192[i]
    S0_Cor_Ir_192[i] = x
}

S0_Cor_Co_60 = 1
S0_Cor_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
Activity_Cor_Co_60*Yield_Co_60[i]
    S0_Cor_Co_60[i] = x
}

F_Cor_Ir_192 = 1
F_Cor_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)
] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
B_Ir_192[i]*S0_Cor_Ir_192[i]*exp(-
b1_Ir_192[i])/(4*pi*(a^2))

```

```

        F_Cor_Ir_192[i] = x
    }

F_Cor_Co_60 = 1
F_Cor_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
B_Co_60[i]*S0_Cor_Co_60[i]*exp(-
b1_Co_60[i])/(4*pi*(a^2))
    F_Cor_Co_60[i] = x
}

Dose_F_Ir_192 = 1
Dose_F_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192
)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
F_Cor_Ir_192[i]*G_Ir_192[i]
    Dose_F_Ir_192[i] = x
}

Dose_F_Co_60 = 1
Dose_F_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
F_Cor_Co_60[i]*G_Co_60[i]
    Dose_F_Co_60[i] = x
}

Energy_Ir_192
Yield_Ir_192
Energy_Co_60
Yield_Co_60
Coef_Ir_192
Coef_Co_60
mi_Ir_192
mi_Co_60
A1_Ir_192
A1_Co_60
a1_Ir_192
a1_Co_60
a2_Ir_192
a2_Co_60
A2_Ir_192
A2_Co_60
B_Ir_192
B_Co_60
mis_Ir_192
mis_Co_60
Z_Ir_192
Z_Co_60
b1_Ir_192
b1_Co_60
G_Ir_192
G_Co_60
S0_Ir_192

```

```

S0_Co_60
F_Ir_192
F_Co_60
Dose_Ir_192
Dose_Co_60
FR
Activity_Cor_Ir_192
Activity_Cor_Co_60
Sum_Activity_Cor_Ir_192
Sum_Activity_Cor_Co_60
S0_Cor_Ir_192
S0_Cor_Co_60
F_Cor_Ir_192
F_Cor_Co_60
Dose_F_Ir_192
Dose_F_Co_60

```

CASO DE TESTE 2- FONTE DE IRIDIO APROXIMAÇÃO CILINDRICA

```

N_cilinders = 1
Height_font = 0.4
Radius = 0.15
Height_measurement = 0.2
a = 5.5
radionuclides = 2
Activity_Ir_192 = 9.5e3
Activity_Co_60 = 6.6e4
shield = 1
thickness_shield = 0.08
density_material = 7.87
density_font = 22.5
dose = 11
Energy_Ir_192 =
c(0.161,0.308,0.306,0.468)
Yield_Ir_192 = c(1.00E+00,2.97E-
01,8.28E-01,4.78E-01)
Energy_Co_60 = c(1.17,1.33)
Yield_Co_60 = c(9.99E-01,1.00E+00)
Volume = pi*Height_font*(Radius^2)
distance_radius_parameter = a/Radius

Coef_Ir_192 = 1
Coef_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = 0.731-
5.1*(Energy_Ir_192[i])+14.2*(Energy_
Ir_192[i])^2-
16.3*(Energy_Ir_192[i])^3+6.6*(Energ
y_Ir_192[i])^4
    Coef_Ir_192[i] = x
}

Coef_Co_60 = 1
Coef_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))

```

```

{
    if (Energy_Co_60[i] < 1)
    {
        x = 0.731-
5.1*(Energy_Co_60[i])+14.2*(Energy_C
o_60[i])^2-
16.3*(Energy_Co_60[i])^3+6.6*(Energy
_Co_60[i])^4
        Coef_Co_60[i] = x
    }
    else
    {
        x = 0.0732-
0.0191*(Energy_Co_60[i])+0.00286*(En
ergy_Co_60[i])^2-
0.000174*(Energy_Co_60[i])^3+0.00000
365*(Energy_Co_60[i])^4
        Coef_Co_60[i] = x
    }
}

mi_Ir_192 = 1
mi_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
density_material*Coef_Ir_192[i]
    mi_Ir_192[i] = x
}

mi_Co_60 = 1
mi_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
density_material*Coef_Co_60[i]
    mi_Co_60[i] = x
}

Al_Ir_192 = 1
Al_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = 11.6-
3.41*(Energy_Ir_192[i])+0.507*(Ener
gy_Ir_192[i])^2-
0.0339*(Energy_Ir_192[i])^3+(0.00076
9)*(Energy_Ir_192[i])^4
    Al_Ir_192[i] = x
}

Al_Co_60 = 1
Al_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = 11.6-
3.41*(Energy_Co_60[i])+0.507*(Energy
_Co_60[i])^2-
0.0339*(Energy_Co_60[i])^3+(0.000769
)*(Energy_Co_60[i])^4
    Al_Co_60[i] = x
}

a1_Ir_192 = 1
a1_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = -1*(0.108-
0.0262*(Energy_Ir_192[i])+0.00387*(E
nergy_Ir_192[i])^2+0.000977*(Energy_
Ir_192[i])^3-
0.000325*(Energy_Ir_192[i])^4+0.0000
323*(Energy_Ir_192[i])^5-
0.0000011*(Energy_Ir_192[i])^6)
    a1_Ir_192[i] = x
}

a1_Co_60 = 1
a1_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = -1*(0.108-
0.0262*(Energy_Co_60[i])+0.00387*(En
ergy_Co_60[i])^2+0.000977*(Energy_Co
_60[i])^3-
0.000325*(Energy_Co_60[i])^4+0.00003
23*(Energy_Co_60[i])^5-
0.0000011*(Energy_Co_60[i])^6)
    a1_Co_60[i] = x
}

a2_Ir_192 = 1
a2_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = -
0.00622+0.042*(Energy_Ir_192[i])-
0.00981*(Energy_Ir_192[i])^2+0.00186
*(Energy_Ir_192[i])^3-
0.000319*(Energy_Ir_192[i])^4+0.0000
287*(Energy_Ir_192[i])^5-
0.000000961*(Energy_Ir_192[i])^6
    a2_Ir_192[i] = x
}

a2_Co_60 = 1
a2_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = -
0.00622+0.042*(Energy_Co_60[i])-
0.00981*(Energy_Co_60[i])^2+0.00186*
(Energy_Co_60[i])^3-
0.000319*(Energy_Co_60[i])^4+0.00002
87*(Energy_Co_60[i])^5-
0.000000961*(Energy_Co_60[i])^6
    a2_Co_60[i] = x
}

```

```

87*(Energy_Co_60[i])^5-
0.000000961*(Energy_Co_60[i])^6
    a2_Co_60[i] = x
}

A2_Ir_192 = 1
A2_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = 1-A1_Ir_192[i]
    A2_Ir_192[i] = x
}

A2_Co_60 = 1
A2_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = 1-A1_Co_60[i]
    A2_Co_60[i] = x
}

B_Ir_192 = 1
B_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = (A1_Ir_192[i]*exp(-
a1_Ir_192[i]*mi_Ir_192[i]*thickness_
shield)) + (A2_Ir_192[i]*exp(-
a2_Ir_192[i]*mi_Ir_192[i]*thickness_
shield))
    B_Ir_192[i] = x
}

B_Co_60 = 1
B_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = (A1_Co_60[i]*exp(-
a1_Co_60[i]*mi_Co_60[i]*thickness_sh
ield)) + (A2_Co_60[i]*exp(-
a2_Co_60[i]*mi_Co_60[i]*thickness_sh
ield))
    B_Co_60[i] = x
}

mis_Ir_192 = 1
mis_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = (11.3-
92.2*(Energy_Ir_192[i])+261*(Energy_
Ir_192[i])^2-
302*(Energy_Ir_192[i])^3+122*(Energy_
_Ir_192[i])^4)*density_font
    mis_Ir_192[i] = x
}

mis_Co_60 = 1
mis_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = (0.0785-
0.0208*Energy_Co_60[i]+0.00362*Ener
y_Co_60[i]^2-
0.00023*Energy_Co_60[i]^3+0.00000497
*Energy_Co_60[i]^4)*density_font
    mis_Co_60[i] = x
}

mis_r_Ir_192 = mis_Ir_192*Radius
mis_r_Co_60 = mis_Co_60*Radius

mis_z_Ir_192 = 1
mis_z_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)
] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = -
0.00189+0.571*mis_r_Ir_192[i]-
0.0342*mis_r_Ir_192[i]^2+0.000833*mi
s_r_Ir_192[i]^3
    mis_z_Ir_192[i] = x
}

mis_z_Co_60 = 1
mis_z_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = -
0.00189+0.571*mis_r_Co_60[i]-
0.0342*mis_r_Co_60[i]^2+0.000833*mi
_r_Co_60[i]^3
    mis_z_Co_60[i] = x
}

Z_Ir_192 = 1
Z_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
mis_z_Ir_192[i]/mis_Ir_192[i]
    Z_Ir_192[i] = x
}

Z_Co_60 = 1
Z_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
mis_z_Co_60[i]/mis_Co_60[i]
    Z_Co_60[i] = x
}

```

```

b1_Ir_192 = 1
b1_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
mi_Ir_192[i]*thickness_shield
    b1_Ir_192[i] = x
}

b1_Co_60 = 1
b1_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
mi_Co_60[i]*thickness_shield
    b1_Co_60[i] = x
}

b2_Ir_192 = 1
b2_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = b1_Ir_192[i] +
mis_z_Ir_192[i]
    b2_Ir_192[i] = x
}

b2_Co_60 = 1
b2_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = b1_Co_60[i] +
mis_z_Co_60[i]
    b2_Co_60[i] = x
}

G_Ir_192 = 1
G_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
0.00000201*(Energy_Ir_192[i])-
0.00000000867
    G_Ir_192[i] = x*1e4
}

G_Co_60 = 1
G_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    if (Energy_Co_60[i] < 1)
    {
        x =
0.00000201*(Energy_Co_60[i])-
0.00000000867
        G_Co_60[i] = x*1e4
    }
}

Sv_Ir_192 = 1
Sv_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
Yield_Ir_192[i]*Activity_Ir_192/Volu
me
    Sv_Ir_192[i] = x
}

Sv_Co_60 = 1
Sv_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
Yield_Co_60[i]*Activity_Co_60/Volume
    Sv_Co_60[i] = x
}

theta_Ir_192 = 1
theta_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
atan((Height_font/2)/(a+Z_Ir_192[i]))
*(180/pi)
    theta_Ir_192[i] = x
}

theta_Co_60 = 1
theta_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
atan((Height_font/2)/(a+Z_Co_60[i]))
*(180/pi)
    theta_Co_60[i] = x
}

Ftheta_Ir_192 = 1
Ftheta_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))

```

```

{
    x = 0.0514*exp(-
0.997*b2_Ir_192[i])
    Ftheta_Ir_192[i] = x
}

Ftheta_Co_60 = 1
Ftheta_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = 0.0514*exp(-
0.997*b2_Co_60[i])
    Ftheta_Co_60[i] = x
}

F_Ir_192 = 1
F_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
(B_Ir_192[i]*Sv_Ir_192[i]*(Radius^2)
*Ftheta_Ir_192[i])/(2*(a+Z_Ir_192[i]
))
    F_Ir_192[i] = x
}

F_Co_60 = 1
F_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
(B_Co_60[i]*Sv_Co_60[i]*(Radius^2)*F
theta_Co_60[i])/(2*(a+Z_Co_60[i]))
    F_Co_60[i] = x
}

Dose_Ir_192 = 1
Dose_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
F_Ir_192[i]*G_Ir_192[i]
    Dose_Ir_192[i] = x
}

Dose_Co_60 = 1
Dose_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = F_Co_60[i]*G_Co_60[i]
    Dose_Co_60[i] = x
}

FR = dose/(sum(Dose_Ir_192) +
sum(Dose_Co_60))

Activity_Cor_Ir_192 =
FR*Activity_Ir_192

Activity_Cor_Co_60 =
FR*Activity_Co_60

Sum_Activity_Cor_Ir_192 =
Activity_Cor_Ir_192*length(Energy_Ir
_192)

Sum_Activity_Cor_Co_60 =
Activity_Cor_Co_60*length(Energy_Co_
60)

Sv_Cor_Ir_192 = 1
Sv_Cor_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192
)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
Activity_Cor_Ir_192*Yield_Ir_192[i]/
Volume
    Sv_Cor_Ir_192[i] = x
}

Sv_Cor_Co_60 = 1
Sv_Cor_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
Activity_Cor_Co_60*Yield_Co_60[i]/Vo
lume
    Sv_Cor_Co_60[i] = x
}

F_Cor_Ir_192 = 1
F_Cor_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)
] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
(B_Ir_192[i]*Sv_Cor_Ir_192[i]*(Radiu
s^2)*Ftheta_Ir_192[i])/(2*(a+Z_Ir_19
2[i]))
    F_Cor_Ir_192[i] = x
}

F_Cor_Co_60 = 1
F_Cor_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
(B_Co_60[i]*Sv_Cor_Co_60[i]*(Radius^
2)*Ftheta_Co_60[i])/(2*(a+Z_Co_60[i]
))
    F_Cor_Co_60[i] = x
}

Dose_F_Ir_192 = 1

```

```

Dose_F_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192
)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
F_Cor_Ir_192[i]*G_Ir_192[i]
    Dose_F_Ir_192[i] = x
}

Dose_F_Co_60 = 1
Dose_F_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
F_Cor_Co_60[i]*G_Co_60[i]
    Dose_F_Co_60[i] = x
}

Energy_Ir_192
Yield_Ir_192
Energy_Co_60
Yield_Co_60
Coef_Ir_192
Coef_Co_60
mi_Ir_192
mi_Co_60
A1_Ir_192
A1_Co_60
a1_Ir_192
a1_Co_60
a2_Ir_192
a2_Co_60
A2_Ir_192
A2_Co_60
B_Ir_192
B_Co_60
mis_Ir_192
mis_Co_60
mis_r_Ir_192
mis_r_Co_60
mis_z_Ir_192
mis_z_Co_60
Z_Ir_192
Z_Co_60
b1_Ir_192
b1_Co_60
b2_Ir_192
b2_Co_60
G_Ir_192
G_Co_60
Sv_Ir_192
Sv_Co_60
theta_Ir_192
theta_Co_60
Ftheta_Ir_192
Ftheta_Co_60
F_Ir_192
F_Co_60
Dose_Ir_192
Dose_Co_60

```

```

FR
Activity_Cor_Ir_192
Activity_Cor_Co_60
Sum_Activity_Cor_Ir_192
Sum_Activity_Cor_Co_60
Sv_Cor_Ir_192
Sv_Cor_Co_60
F_Cor_Ir_192
F_Cor_Co_60
Dose_F_Ir_192
Dose_F_Co_60

```

CASO DE TESTE 3- FONTE CILINDRICA DE IRIDIO

```

N_cilinders = 1
Height_font = 8
Radius = 1.75
Height_measurement = 0.2
a = 21.75
radionuclides = 2
Activity_Ir_192 = 1.1e6
Activity_Co_60 = 4.1e6
shield = 0
thickness_shield = 0.00
density_material = 0
density_font = 2.28
dose = 26.07
Energy_Ir_192 =
c(0.161,0.308,0.306,0.468)
Yield_Ir_192 = c(1.00E+00,2.97E-
01,8.28E-01,4.78E-01)
Energy_Co_60 = c(1.17,1.33)
Yield_Co_60 = c(9.99E-01,1.00E+00)
Volume = pi*Height_font*(Radius^2)
distance_radius_parameter = a/Radius

Coef_Ir_192 = 1
Coef_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = 0.731-
5.1*(Energy_Ir_192[i])+14.2*(Energy_
Ir_192[i])^2-
16.3*(Energy_Ir_192[i])^3+6.6*(Energ
y_Ir_192[i])^4
    Coef_Ir_192[i] = x
}

Coef_Co_60 = 1
Coef_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    if (Energy_Co_60[i] < 1)
    {

```

```

                                x = 0.731-
5.1*(Energy_Co_60[i])+14.2*(Energy_Co_60[i])^2-
16.3*(Energy_Co_60[i])^3+6.6*(Energy_Co_60[i])^4
                                Coef_Co_60[i] = x
                                }
                                else
                                {
                                    x = 0.0732-
0.0191*(Energy_Co_60[i])+0.00286*(Energy_Co_60[i])^2-
0.000174*(Energy_Co_60[i])^3+0.00000365*(Energy_Co_60[i])^4
                                    Coef_Co_60[i] = x
                                }
}

mi_Ir_192 = 1
mi_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
density_material*Coef_Ir_192[i]
    mi_Ir_192[i] = x
}

mi_Co_60 = 1
mi_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
density_material*Coef_Co_60[i]
    mi_Co_60[i] = x
}

A1_Ir_192 = 1
A1_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = 11.6-
3.41*(Energy_Ir_192[i])+0.507*(Energy_Ir_192[i])^2-
0.0339*(Energy_Ir_192[i])^3+(0.000769)*(Energy_Ir_192[i])^4
    A1_Ir_192[i] = x
}

A1_Co_60 = 1
A1_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = 11.6-
3.41*(Energy_Co_60[i])+0.507*(Energy_Co_60[i])^2-
0.0339*(Energy_Co_60[i])^3+(0.000769)*(Energy_Co_60[i])^4
}

                                A1_Co_60[i] = x
}

a1_Ir_192 = 1
a1_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = -1*(0.108-
0.0262*(Energy_Ir_192[i])+0.00387*(Energy_Ir_192[i])^2+0.000977*(Energy_Ir_192[i])^3-
0.000325*(Energy_Ir_192[i])^4+0.0000323*(Energy_Ir_192[i])^5-
0.0000011*(Energy_Ir_192[i])^6)
    a1_Ir_192[i] = x
}

a1_Co_60 = 1
a1_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = -1*(0.108-
0.0262*(Energy_Co_60[i])+0.00387*(Energy_Co_60[i])^2+0.000977*(Energy_Co_60[i])^3-
0.000325*(Energy_Co_60[i])^4+0.0000323*(Energy_Co_60[i])^5-
0.0000011*(Energy_Co_60[i])^6)
    a1_Co_60[i] = x
}

a2_Ir_192 = 1
a2_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = -
0.00622+0.042*(Energy_Ir_192[i])-
0.00981*(Energy_Ir_192[i])^2+0.00186*(Energy_Ir_192[i])^3-
0.000319*(Energy_Ir_192[i])^4+0.0000287*(Energy_Ir_192[i])^5-
0.000000961*(Energy_Ir_192[i])^6
    a2_Ir_192[i] = x
}

a2_Co_60 = 1
a2_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = -
0.00622+0.042*(Energy_Co_60[i])-
0.00981*(Energy_Co_60[i])^2+0.00186*(Energy_Co_60[i])^3-
0.000319*(Energy_Co_60[i])^4+0.0000287*(Energy_Co_60[i])^5-
0.000000961*(Energy_Co_60[i])^6
    a2_Co_60[i] = x
}

```



```

}
A2_Ir_192 = 1
A2_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = 1-A1_Ir_192[i]
    A2_Ir_192[i] = x
}

A2_Co_60 = 1
A2_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = 1-A1_Co_60[i]
    A2_Co_60[i] = x
}

B_Ir_192 = 1
B_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = (A1_Ir_192[i]*exp(-
a1_Ir_192[i]*mi_Ir_192[i]*thickness_
shield)) + (A2_Ir_192[i]*exp(-
a2_Ir_192[i]*mi_Ir_192[i]*thickness_
shield))
    B_Ir_192[i] = x
}

B_Co_60 = 1
B_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = (A1_Co_60[i]*exp(-
a1_Co_60[i]*mi_Co_60[i]*thickness_sh
ield)) + (A2_Co_60[i]*exp(-
a2_Co_60[i]*mi_Co_60[i]*thickness_sh
ield))
    B_Co_60[i] = x
}

mis_Ir_192 = 1
mis_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = (0.213-
0.529*(Energy_Ir_192[i])+0.722*(Ener
gy_Ir_192[i])^2-
0.342*(Energy_Ir_192[i])^3)*density_
font
    mis_Ir_192[i] = x
}

mis_Co_60 = 1
mis_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = (0.0811-
0.022*(Energy_Co_60[i])+0.00308*(Ene
rgy_Co_60[i])^2-
0.000182*(Energy_Co_60[i])^3+0.00000
38*(Energy_Co_60[i])^4)*density_font
    mis_Co_60[i] = x
}

mis_r_Ir_192 = mis_Ir_192*Radius
mis_r_Co_60 = mis_Co_60*Radius

mis_z_Ir_192 = 1
mis_z_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = -
0.00189+0.571*mis_r_Ir_192[i]-
0.0342*mis_r_Ir_192[i]^2+0.000833*mi
s_r_Ir_192[i]^3
    mis_z_Ir_192[i] = x
}

mis_z_Co_60 = 1
mis_z_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = -
0.00189+0.571*mis_r_Co_60[i]-
0.0342*mis_r_Co_60[i]^2+0.000833*mi
s_r_Co_60[i]^3
    mis_z_Co_60[i] = x
}

Z_Ir_192 = 1
Z_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
mis_z_Ir_192[i]/mis_Ir_192[i]
    Z_Ir_192[i] = x
}

Z_Co_60 = 1
Z_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
mis_z_Co_60[i]/mis_Co_60[i]
    Z_Co_60[i] = x
}

b1_Ir_192 = 1

```

```

b1_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
mi_Ir_192[i]*thickness_shield
    b1_Ir_192[i] = x
}

b1_Co_60 = 1
b1_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
mi_Co_60[i]*thickness_shield
    b1_Co_60[i] = x
}

b2_Ir_192 = 1
b2_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = b1_Ir_192[i] +
mis_z_Ir_192[i]
    b2_Ir_192[i] = x
}

b2_Co_60 = 1
b2_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = b1_Co_60[i] +
mis_z_Co_60[i]
    b2_Co_60[i] = x
}

G_Ir_192 = 1
G_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
0.00000201*(Energy_Ir_192[i])-
0.00000000867
    G_Ir_192[i] = x*1e4
}

G_Co_60 = 1
G_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    if (Energy_Co_60[i] < 1)
    {
        x =
0.00000201*(Energy_Co_60[i])-
0.00000000867
        G_Co_60[i] = x*1e4
    }
}

}
else
{
    x =
0.00000097*(Energy_Co_60[i])+0.00000
126
    G_Co_60[i] = x*1e4
}
}

Sv_Ir_192 = 1
Sv_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
Yield_Ir_192[i]*Activity_Ir_192/Volu
me
    Sv_Ir_192[i] = x
}

Sv_Co_60 = 1
Sv_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
Yield_Co_60[i]*Activity_Co_60/Volume
    Sv_Co_60[i] = x
}

theta_Ir_192 = 1
theta_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)
] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
atan((Height_font/2)/(a+Z_Ir_192[i])
)*(180/pi)
    theta_Ir_192[i] = x
}

theta_Co_60 = 1
theta_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
atan((Height_font/2)/(a+Z_Co_60[i]))
*(180/pi)
    theta_Co_60[i] = x
}

Ftheta_Ir_192 = 1
Ftheta_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192
)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x = 0.174*exp(-
1.01*b2_Ir_192[i])
    Ftheta_Ir_192[i] = x
}
}

```

```

}
Ftheta_Co_60 = 1
Ftheta_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = 0.174*exp(-
1.01*b2_Co_60[i])
    Ftheta_Co_60[i] = x
}

F_Ir_192 = 1
F_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
(B_Ir_192[i]*Sv_Ir_192[i]*(Radius^2)
*Ftheta_Ir_192[i])/(2*(a+Z_Ir_192[i]
))
    F_Ir_192[i] = x
}

F_Co_60 = 1
F_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
(B_Co_60[i]*Sv_Co_60[i]*(Radius^2)*F
theta_Co_60[i])/(2*(a+Z_Co_60[i]))
    F_Co_60[i] = x
}

Dose_Ir_192 = 1
Dose_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
F_Ir_192[i]*G_Ir_192[i]
    Dose_Ir_192[i] = x
}

Dose_Co_60 = 1
Dose_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = F_Co_60[i]*G_Co_60[i]
    Dose_Co_60[i] = x
}

FR = dose/(sum(Dose_Ir_192) +
sum(Dose_Co_60))

Activity_Cor_Ir_192 =
FR*Activity_Ir_192

Activity_Cor_Co_60 =
FR*Activity_Co_60

Sum_Activity_Cor_Ir_192 =
Activity_Cor_Ir_192*length(Energy_Ir
_192)

Sum_Activity_Cor_Co_60 =
Activity_Cor_Co_60*length(Energy_Co_
60)

Sv_Cor_Ir_192 = 1
Sv_Cor_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192
)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
Activity_Cor_Ir_192*Yield_Ir_192[i]/
Volume
    Sv_Cor_Ir_192[i] = x
}

Sv_Cor_Co_60 = 1
Sv_Cor_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
Activity_Cor_Co_60*Yield_Co_60[i]/Vo
lume
    Sv_Cor_Co_60[i] = x
}

F_Cor_Ir_192 = 1
F_Cor_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192)
] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{
    x =
(B_Ir_192[i]*Sv_Cor_Ir_192[i]*(Radiu
s^2)*Ftheta_Ir_192[i])/(2*(a+Z_Ir_19
2[i]))
    F_Cor_Ir_192[i] = x
}

F_Cor_Co_60 = 1
F_Cor_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
(B_Co_60[i]*Sv_Cor_Co_60[i]*(Radius^
2)*Ftheta_Co_60[i])/(2*(a+Z_Co_60[i]
))
    F_Cor_Co_60[i] = x
}

Dose_F_Ir_192 = 1
Dose_F_Ir_192[1:length(Energy_Ir_192
)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ir_192))
{

```

```

        x =
F_Cor_Ir_192[i]*G_Ir_192[i]
        Dose_F_Ir_192[i] = x
    }
Dose_F_Co_60 = 1
Dose_F_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
F_Cor_Co_60[i]*G_Co_60[i]
        Dose_F_Co_60[i] = x
}

Energy_Ir_192
Yield_Ir_192
Energy_Co_60
Yield_Co_60
Coef_Ir_192
Coef_Co_60
mi_Ir_192
mi_Co_60
A1_Ir_192
A1_Co_60
a1_Ir_192
a1_Co_60
a2_Ir_192
a2_Co_60
A2_Ir_192
A2_Co_60
B_Ir_192
B_Co_60
mis_Ir_192
mis_Co_60
mis_r_Ir_192
mis_r_Co_60
mis_z_Ir_192
mis_z_Co_60
Z_Ir_192
Z_Co_60
b1_Ir_192
b1_Co_60
b2_Ir_192
b2_Co_60
G_Ir_192
G_Co_60
Sv_Ir_192
Sv_Co_60
theta_Ir_192
theta_Co_60
Ftheta_Ir_192
Ftheta_Co_60
F_Ir_192
F_Co_60
Dose_Ir_192
Dose_Co_60
FR
Activity_Cor_Ir_192
Activity_Cor_Co_60
Sum_Activity_Cor_Ir_192
Sum_Activity_Cor_Co_60

```

```

Sv_Cor_Ir_192
Sv_Cor_Co_60
F_Cor_Ir_192
F_Cor_Co_60
Dose_F_Ir_192
Dose_F_Co_60

```

CASO DE TESTE 4- FONTE CUBICA

```

N_slabs = 1
Height_font = 120
Height_measurement = 60
a = 220
radionuclides = 1
Activity_Ba_137 = 1.62e9
shields = 1
thickness_shield = 0.6
density_material = 7.87
density_font = 0.53
dose = 8.3
Energy_Ba_137 = c(0.662)
Yield_Ba_137 = c(8.98e-1)
Volume = Height_font^3

Coef_Ba_137 = 1
Coef_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = 0.731-
5.1*(Energy_Ba_137[i])+14.2*(Energy_
Ba_137[i])^2-
16.3*(Energy_Ba_137[i])^3+6.6*(Energ
y_Ba_137[i])^4
        Coef_Ba_137[i] = x
}

mi_Ba_137 = 1
mi_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
density_material*Coef_Ba_137[i]
        mi_Ba_137[i] = x
}

A1_Ba_137 = 1
A1_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = 11.6-
3.41*(Energy_Ba_137[i])+0.507*(Energ
y_Ba_137[i])^2-
0.0339*(Energy_Ba_137[i])^3+(0.00076
9)*(Energy_Ba_137[i])^4
        A1_Ba_137[i] = x
}

```

```

}
a1_Ba_137 = 1
a1_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = -1*(0.108-
0.0262*(Energy_Ba_137[i])+0.00387*(E
nergy_Ba_137[i])^2+0.000977*(Energy_
Ba_137[i])^3-
0.000325*(Energy_Ba_137[i])^4+0.0000
323*(Energy_Ba_137[i])^5-
0.0000011*(Energy_Ba_137[i])^6)
    a1_Ba_137[i] = x
}

a2_Ba_137 = 1
a2_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = -
0.00622+0.042*(Energy_Ba_137[i])-
0.00981*(Energy_Ba_137[i])^2+0.00186
*(Energy_Ba_137[i])^3-
0.000319*(Energy_Ba_137[i])^4+0.0000
287*(Energy_Ba_137[i])^5-
0.000000961*(Energy_Ba_137[i])^6
    a2_Ba_137[i] = x
}

A2_Ba_137 = 1
A2_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = 1-A1_Ba_137[i]
    A2_Ba_137[i] = x
}

B_Ba_137 = 1
B_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = (A1_Ba_137[i]*exp(-
a1_Ba_137[i]*mi_Ba_137[i]*thickness_
shield)) + (A2_Ba_137[i]*exp(-
a2_Ba_137[i]*mi_Ba_137[i]*thickness_
shield))
    B_Ba_137[i] = x
}

mis_Ba_137 = 1
mis_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = (0.252-
0.225*(Energy_Ba_137[i])+0.132*(Ener
gy_Ba_137[i])^2)*density_font
    mis_Ba_137[i] = x
}

b1_Ba_137 = 1
b1_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
mi_Ba_137[i]*thickness_shield
    b1_Ba_137[i] = x
}

b3_Ba_137 = 1
b3_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = b1_Ba_137[i] +
(Height_font*mis_Ba_137[i])
    b3_Ba_137[i] = x
}

Exb_Ba_137 = 1
Exb_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = 0.982-
3.29*(b1_Ba_137[i])+8.21*(b1_Ba_137[
i])^2-
11.9*(b1_Ba_137[i])^3+6.74*(b1_Ba_13
7[i])^4
    Exb_Ba_137[i] = x
}

Exb3_Ba_137 = 1
Exb3_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = 2.24*exp(-
1.1*(b3_Ba_137[i]))
    Exb3_Ba_137[i] = x
}

G_Ba_137 = 1
G_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{

```

```

        x =
0.00000201*(Energy_Ba_137[i]) -
0.00000000867
        G_Ba_137[i] = x*1e4
    }

Sv_Ba_137 = 1
Sv_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
Yield_Ba_137[i]*Activity_Ba_137/Volu
me
        Sv_Ba_137[i] = x
    }

F_Ba_137 = 1
F_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
(B_Ba_137[i]*Sv_Ba_137[i]/(2*mis_Ba_
137[i]))*(Exb_Ba_137[i] -
Exb3_Ba_137[i]))
        F_Ba_137[i] = x
    }

Dose_Ba_137 = 1
Dose_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
F_Ba_137[i]*G_Ba_137[i]
        Dose_Ba_137[i] = x
    }

FR = dose/(sum(Dose_Ba_137))

Activity_Cor_Ba_137 =
FR*Activity_Ba_137

Sum_Activity_Cor_Ba_137 =
Activity_Cor_Ba_137*length(Energy_Ba
_137)

Sv_Cor_Ba_137 = 1
Sv_Cor_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137
)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
Activity_Cor_Ba_137*Yield_Ba_137[i]/
Volume
        Sv_Cor_Ba_137[i] = x
    }

F_Cor_Ba_137 = 1
F_Cor_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)
] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
(B_Ba_137[i]*Sv_Cor_Ba_137[i]/(2*mis
_Ba_137[i]))*(Exb_Ba_137[i] -
Exb3_Ba_137[i]))
        F_Cor_Ba_137[i] = x
    }

Dose_F_Ba_137 = 1
Dose_F_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137
)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
F_Cor_Ba_137[i]*G_Ba_137[i]
        Dose_F_Ba_137[i] = x
    }

Energy_Ba_137
Yield_Ba_137
Coef_Ba_137
mi_Ba_137
A1_Ba_137
a1_Ba_137
a2_Ba_137
A2_Ba_137
B_Ba_137
mis_Ba_137
b1_Ba_137
b3_Ba_137
Exb_Ba_137
Exb3_Ba_137
G_Ba_137
Sv_Ba_137
F_Ba_137
Dose_Ba_137
FR
Activity_Cor_Ba_137
Sum_Activity_Cor_Ba_137
Sv_Cor_Ba_137
F_Cor_Ba_137
Dose_F_Ba_137

CASO DE TESTE 5- FONTE
CILINDRICA RESINA

N_cilinders = 1
Height_font = 28
Radius = 28
Height_measurement = 13
a = 100
radionuclides = 2
Activity_Ba_137 = 1.2e8
Activity_Co_60 = 1.1e9
shields = 1
thickness_shield = 0.12

```

```

density_material = 7.87
density_font = 1.27
dose = 132
Energy_Ba_137 = c(0.662)
Yield_Ba_137 = c(8.98e-1)
Energy_Co_60 = c(1.17,1.33)
Yield_Co_60 = c(9.99E-01,1.00E+00)
Volume = pi*Height_font*(Radius^2)
distance_radius_parameter = a/Radius

Coef_Ba_137 = 1
Coef_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = 0.731-
5.1*(Energy_Ba_137[i])+14.2*(Energy_
Ba_137[i])^2-
16.3*(Energy_Ba_137[i])^3+6.6*(Energy
y_Ba_137[i])^4
    Coef_Ba_137[i] = x
}

Coef_Co_60 = 1
Coef_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    if (Energy_Co_60[i] < 1)
    {
        x = 0.731-
5.1*(Energy_Co_60[i])+14.2*(Energy_C
o_60[i])^2-
16.3*(Energy_Co_60[i])^3+6.6*(Energy
_Co_60[i])^4
        Coef_Co_60[i] = x
    }
    else
    {
        x = 0.0732-
0.0191*(Energy_Co_60[i])+0.00286*(En
ergy_Co_60[i])^2-
0.000174*(Energy_Co_60[i])^3+0.00000
365*(Energy_Co_60[i])^4
        Coef_Co_60[i] = x
    }
}

mi_Ba_137 = 1
mi_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
density_material*Coef_Ba_137[i]
    mi_Ba_137[i] = x
}

mi_Co_60 = 1
mi_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
density_material*Coef_Co_60[i]
    mi_Co_60[i] = x
}

for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
density_material*Coef_Co_60[i]
    mi_Co_60[i] = x
}

A1_Ba_137 = 1
A1_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = 11.6-
3.41*(Energy_Ba_137[i])+0.507*(Energy
y_Ba_137[i])^2-
0.0339*(Energy_Ba_137[i])^3+(0.00076
9)*(Energy_Ba_137[i])^4
    A1_Ba_137[i] = x
}

A1_Co_60 = 1
A1_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = 11.6-
3.41*(Energy_Co_60[i])+0.507*(Energy
_Co_60[i])^2-
0.0339*(Energy_Co_60[i])^3+(0.000769
)*(Energy_Co_60[i])^4
    A1_Co_60[i] = x
}

a1_Ba_137 = 1
a1_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = -1*(0.108-
0.0262*(Energy_Ba_137[i])+0.00387*(E
nergy_Ba_137[i])^2+0.000977*(Energy_
Ba_137[i])^3-
0.000325*(Energy_Ba_137[i])^4+0.0000
323*(Energy_Ba_137[i])^5-
0.0000011*(Energy_Ba_137[i])^6)
    a1_Ba_137[i] = x
}

a1_Co_60 = 1
a1_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = -1*(0.108-
0.0262*(Energy_Co_60[i])+0.00387*(En
ergy_Co_60[i])^2+0.000977*(Energy_Co
_60[i])^3-
0.000325*(Energy_Co_60[i])^4+0.00003
23*(Energy_Co_60[i])^5-
0.0000011*(Energy_Co_60[i])^6)
    a1_Co_60[i] = x
}

```

```

}

a2_Ba_137 = 1
a2_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = -
0.00622+0.042*(Energy_Ba_137[i])-
0.00981*(Energy_Ba_137[i])^2+0.00186
*(Energy_Ba_137[i])^3-
0.000319*(Energy_Ba_137[i])^4+0.0000
287*(Energy_Ba_137[i])^5-
0.000000961*(Energy_Ba_137[i])^6
    a2_Ba_137[i] = x
}

a2_Co_60 = 1
a2_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = -
0.00622+0.042*(Energy_Co_60[i])-
0.00981*(Energy_Co_60[i])^2+0.00186*
(Energy_Co_60[i])^3-
0.000319*(Energy_Co_60[i])^4+0.00002
87*(Energy_Co_60[i])^5-
0.000000961*(Energy_Co_60[i])^6
    a2_Co_60[i] = x
}

A2_Ba_137 = 1
A2_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = 1-A1_Ba_137[i]
    A2_Ba_137[i] = x
}

A2_Co_60 = 1
A2_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = 1-A1_Co_60[i]
    A2_Co_60[i] = x
}

B_Ba_137 = 1
B_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = (A1_Ba_137[i]*exp(-
a1_Ba_137[i]*mi_Ba_137[i]*thickness_
shield)) + (A2_Ba_137[i]*exp(-
a2_Ba_137[i]*mi_Ba_137[i]*thickness_
shield))
    B_Ba_137[i] = x
}

B_Co_60 = 1
B_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = (A1_Co_60[i]*exp(-
a1_Co_60[i]*mi_Co_60[i]*thickness_sh
ield)) + (A2_Co_60[i]*exp(-
a2_Co_60[i]*mi_Co_60[i]*thickness_sh
ield))
    B_Co_60[i] = x
}

mis_Ba_137 = 1
mis_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = (0.213-
0.529*(Energy_Ba_137[i])+0.722*(Ener
gy_Ba_137[i])^2-
0.342*(Energy_Ba_137[i])^3)*density_
font
    mis_Ba_137[i] = x
}

mis_Co_60 = 1
mis_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
(0.0654*(Energy_Co_60[i])^-
0.49)*density_font
    mis_Co_60[i] = x
}

mis_r_Ba_137 = mis_Ba_137*Radius

mis_rsum_Ba_137 =
mis_Ba_137*(Radius+a)

mis_rsum_Co_60 =
mis_Co_60*(Radius+a)

mis_r_Co_60 = mis_Co_60*Radius

M_Ba_137 = 1
M_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
1.51+0.0994*(distance_radius_paramet
er)-
0.00397*(distance_radius_parameter)^
2
    M_Ba_137[i] = x
}

```



```

M_Co_60 = 1
M_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
1.37+0.0731*(distance_radius_paramet
er)-
0.00264*(distance_radius_parameter)^
2
    M_Co_60[i] = x
}

mis_zm_Ba_137 = 1
mis_zm_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137
)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = 0.939-
0.0431*(b1_Ba_137[i])+0.0739*(b1_Ba_
137[i])^2-
0.0275*(b1_Ba_137[i])^3+0.004411*(b1
_Ba_137[i])^4-
0.000364*(b1_Ba_137[i])^5+0.0000163*
(b1_Ba_137[i])^6-
0.000000376*(b1_Ba_137[i])^7+0.00000
00352*(b1_Ba_137[i])^8
    mis_zm_Ba_137[i] = x
}

mis_zm_Co_60 = 1
mis_zm_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = 0.939-
0.0431*(b1_Co_60[i])+0.0739*(b1_Co_6
0[i])^2-
0.0275*(b1_Co_60[i])^3+0.004411*(b1_
Co_60[i])^4-
0.000364*(b1_Co_60[i])^5+0.0000163*(
b1_Co_60[i])^6-
0.000000376*(b1_Co_60[i])^7+0.000000
00352*(b1_Co_60[i])^8
    mis_zm_Co_60[i] = x
}

Z_Ba_137 = 1
Z_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
mis_zm_Ba_137[i]*M_Ba_137[i]/mis_Ba_
137[i]
    Z_Ba_137[i] = x
}

Z_Co_60 = 1
Z_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
mis_zm_Co_60[i]*M_Co_60[i]/mis_Co_60
[i]
    Z_Co_60[i] = x
}

b1_Ba_137 = 1
b1_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
mi_Ba_137[i]*thickness_shield
    b1_Ba_137[i] = x
}

b1_Co_60 = 1
b1_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
mi_Co_60[i]*thickness_shield
    b1_Co_60[i] = x
}

b2_Ba_137 = 1
b2_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = b1_Ba_137[i] +
(mis_Ba_137[i]*Z_Ba_137[i])
    b2_Ba_137[i] = x
}

b2_Co_60 = 1
b2_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = b1_Co_60[i] +
(mis_Co_60[i]*Z_Co_60[i])
    b2_Co_60[i] = x
}

G_Ba_137 = 1
G_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
0.00000201*(Energy_Ba_137[i])-
0.00000000867
    G_Ba_137[i] = x*1e4
}

```

```

}

G_Co_60 = 1
G_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    if (Energy_Co_60[i] < 1)
    {
        x =
0.00000201*(Energy_Co_60[i])-
0.00000000867
        G_Co_60[i] = x*1e4
    }
    else
    {
        x =
0.00000097*(Energy_Co_60[i])+0.00000
126
        G_Co_60[i] = x*1e4
    }
}

Sv_Ba_137 = 1
Sv_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
Yield_Ba_137[i]*Activity_Ba_137/Volu
me
    Sv_Ba_137[i] = x
}

Sv_Co_60 = 1
Sv_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
Yield_Co_60[i]*Activity_Co_60/Volume
    Sv_Co_60[i] = x
}

theta_Ba_137 = 1
theta_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)
] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
atan((Height_font/2)/(a+Z_Ba_137[i])
)*(180/pi)
    theta_Ba_137[i] = x
}

theta_Co_60 = 1
theta_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
atan((Height_font/2)/(a+Z_Co_60[i]))
*(180/pi)
    theta_Co_60[i] = x
}

Ftheta_Ba_137 = 1
Ftheta_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137
)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = 0.137*exp(-
1.01*(b2_Ba_137[i]))
    Ftheta_Ba_137[i] = x
}

Ftheta_Co_60 = 1
Ftheta_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = 0.137*exp(-
1.01*(b2_Co_60[i]))
    Ftheta_Co_60[i] = x
}

F_Ba_137 = 1
F_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
(B_Ba_137[i]*Sv_Ba_137[i]*(Radius^2)
*Ftheta_Ba_137[i])/(2*(a+Z_Ba_137[i]
))
    F_Ba_137[i] = x
}

F_Co_60 = 1
F_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
(B_Co_60[i]*Sv_Co_60[i]*(Radius^2)*F
theta_Co_60[i])/(2*(a+Z_Co_60[i]))
    F_Co_60[i] = x
}

Dose_Ba_137 = 1
Dose_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
F_Ba_137[i]*G_Ba_137[i]
    Dose_Ba_137[i] = x
}

Dose_Co_60 = 1

```

```

Dose_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = F_Co_60[i]*G_Co_60[i]
    Dose_Co_60[i] = x
}

FR = dose/(sum(Dose_Ba_137) +
sum(Dose_Co_60))

Activity_Cor_Ba_137 =
FR*Activity_Ba_137

Activity_Cor_Co_60 =
FR*Activity_Co_60

Sum_Activity_Cor_Ba_137 =
Activity_Cor_Ba_137*length(Energy_Ba_
_137)

Sum_Activity_Cor_Co_60 =
Activity_Cor_Co_60*length(Energy_Co_
60)

Sv_Cor_Ba_137 = 1
Sv_Cor_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137
)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
Activity_Cor_Ba_137*Yield_Ba_137[i]/
Volume
    Sv_Cor_Ba_137[i] = x
}

Sv_Cor_Co_60 = 1
Sv_Cor_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
Activity_Cor_Co_60*Yield_Co_60[i]/Vo
lume
    Sv_Cor_Co_60[i] = x
}

F_Cor_Ba_137 = 1
F_Cor_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)
] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
(B_Ba_137[i]*Sv_Cor_Ba_137[i]*(Radiu
s^2)*Ftheta_Ba_137[i])/(2*(a+Z_Ba_13
7[i]))
    F_Cor_Ba_137[i] = x
}

F_Cor_Co_60 = 1
F_Cor_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
(B_Co_60[i]*Sv_Cor_Co_60[i]*(Radius^
2)*Ftheta_Co_60[i])/(2*(a+Z_Co_60[i]
))
    F_Cor_Co_60[i] = x
}

Dose_F_Ba_137 = 1
Dose_F_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137
)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
F_Cor_Ba_137[i]*G_Ba_137[i]
    Dose_F_Ba_137[i] = x
}

Dose_F_Co_60 = 1
Dose_F_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
F_Cor_Co_60[i]*G_Co_60[i]
    Dose_F_Co_60[i] = x
}

Energy_Ba_137
Yield_Ba_137
Energy_Co_60
Yield_Co_60
Coef_Ba_137
Coef_Co_60
mi_Ba_137
mi_Co_60
A1_Ba_137
A1_Co_60
a1_Ba_137
a1_Co_60
a2_Ba_137
a2_Co_60
A2_Ba_137
A2_Co_60
B_Ba_137
B_Co_60
mis_Ba_137
mis_Co_60
mis_r_Ba_137
mis_r_Co_60
M_Ba_137
M_Co_60
mis_zm_Ba_137
mis_zm_Co_60
Z_Ba_137
Z_Co_60
b1_Ba_137
b1_Co_60

```

```

b2_Ba_137
b2_Co_60
G_Ba_137
G_Co_60
Sv_Ba_137
Sv_Co_60
theta_Ba_137
theta_Co_60
Ftheta_Ba_137
Ftheta_Co_60
F_Ba_137
F_Co_60
Dose_Ba_137
Dose_Co_60
FR
Activity_Cor_Ba_137
Activity_Cor_Co_60
Sum_Activity_Cor_Ba_137
Sum_Activity_Cor_Co_60
Sv_Cor_Ba_137
Sv_Cor_Co_60
F_Cor_Ba_137
F_Cor_Co_60
Dose_F_Ba_137
Dose_F_Co_60

```

CASO DE TESTE 6- FONTE CILINDRICA MISTA

```

N_cilinders = 1
Height_font = 72
Radius = 28
Height_measurement = 36
a = 100
radionuclides = 2
Activity_Ba_137 = 1.53e6
Activity_Co_60 = 1.97e5
shields = 1
thickness_shield = 0.12
density_material = 7.87
density_font = 1
dose = 60
Energy_Ba_137 = c(0.662)
Yield_Ba_137 = c(8.98e-1)
Energy_Co_60 = c(1.17,1.33)
Yield_Co_60 = c(9.99E-01,1.00E+00)
Volume = pi*Height_font*(Radius^2)
distance_radius_parameter = a/Radius

Coef_Ba_137 = 1
Coef_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = 0.731-
5.1*(Energy_Ba_137[i])+14.2*(Energy_
Ba_137[i])^2-
16.3*(Energy_Ba_137[i])^3+6.6*(Energ
y_Ba_137[i])^4

```

```

    Coef_Ba_137[i] = x
}

Coef_Co_60 = 1
Coef_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    if (Energy_Co_60[i] < 1)
    {
        x = 0.731-
5.1*(Energy_Co_60[i])+14.2*(Energy_C
o_60[i])^2-
16.3*(Energy_Co_60[i])^3+6.6*(Energy
_Co_60[i])^4
        Coef_Co_60[i] = x
    }
    else
    {
        x = 0.0732-
0.0191*(Energy_Co_60[i])+0.00286*(En
ergy_Co_60[i])^2-
0.000174*(Energy_Co_60[i])^3+0.00000
365*(Energy_Co_60[i])^4
        Coef_Co_60[i] = x
    }
}

mi_Ba_137 = 1
mi_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
density_material*Coef_Ba_137[i]
mi_Ba_137[i] = x
}

mi_Co_60 = 1
mi_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
density_material*Coef_Co_60[i]
mi_Co_60[i] = x
}

A1_Ba_137 = 1
A1_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = 11.6-
3.41*(Energy_Ba_137[i])+0.507*(Energ
y_Ba_137[i])^2-
0.0339*(Energy_Ba_137[i])^3+(0.00076
9)*(Energy_Ba_137[i])^4
    A1_Ba_137[i] = x
}

A1_Co_60 = 1

```

```

A1_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = 11.6-
3.41*(Energy_Co_60[i])+0.507*(Energy
_Co_60[i])^2-
0.0339*(Energy_Co_60[i])^3+(0.000769
)*(Energy_Co_60[i])^4
    A1_Co_60[i] = x
}

a1_Ba_137 = 1
a1_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = -1*(0.108-
0.0262*(Energy_Ba_137[i])+0.00387*(E
nergy_Ba_137[i])^2+0.000977*(Energy_
Ba_137[i])^3-
0.000325*(Energy_Ba_137[i])^4+0.0000
323*(Energy_Ba_137[i])^5-
0.0000011*(Energy_Ba_137[i])^6)
    a1_Ba_137[i] = x
}

a1_Co_60 = 1
a1_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = -1*(0.108-
0.0262*(Energy_Co_60[i])+0.00387*(E
nergy_Co_60[i])^2+0.000977*(Energy_Co
_60[i])^3-
0.000325*(Energy_Co_60[i])^4+0.00003
23*(Energy_Co_60[i])^5-
0.0000011*(Energy_Co_60[i])^6)
    a1_Co_60[i] = x
}

a2_Ba_137 = 1
a2_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = -
0.00622+0.042*(Energy_Ba_137[i])-
0.00981*(Energy_Ba_137[i])^2+0.00186
*(Energy_Ba_137[i])^3-
0.000319*(Energy_Ba_137[i])^4+0.0000
287*(Energy_Ba_137[i])^5-
0.000000961*(Energy_Ba_137[i])^6
    a2_Ba_137[i] = x
}

a2_Co_60 = 1
a2_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = -
0.00622+0.042*(Energy_Co_60[i])-
0.00981*(Energy_Co_60[i])^2+0.00186*
(Energy_Co_60[i])^3-
0.000319*(Energy_Co_60[i])^4+0.00002
87*(Energy_Co_60[i])^5-
0.000000961*(Energy_Co_60[i])^6
    a2_Co_60[i] = x
}

A2_Ba_137 = 1
A2_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = 1-A1_Ba_137[i]
    A2_Ba_137[i] = x
}

A2_Co_60 = 1
A2_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = 1-A1_Co_60[i]
    A2_Co_60[i] = x
}

B_Ba_137 = 1
B_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = (A1_Ba_137[i]*exp(-
a1_Ba_137[i]*mi_Ba_137[i]*thickness_
shield)) + (A2_Ba_137[i]*exp(-
a2_Ba_137[i]*mi_Ba_137[i]*thickness_
shield))
    B_Ba_137[i] = x
}

B_Co_60 = 1
B_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = (A1_Co_60[i]*exp(-
a1_Co_60[i]*mi_Co_60[i]*thickness_sh
ield)) + (A2_Co_60[i]*exp(-
a2_Co_60[i]*mi_Co_60[i]*thickness_sh
ield))
    B_Co_60[i] = x
}

mis_Ba_137 = 1

```

```

mis_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = (0.204-
0.417*(Energy_Ba_137[i])+0.513*(Ener
gy_Ba_137[i])^2-
0.23*(Energy_Ba_137[i])^3)*density_f
ont
    mis_Ba_137[i] = x
}
mis_Co_60 = 1
mis_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = (0.0887-
0.0243*(Energy_Co_60[i])+0.00335*(En
ergy_Co_60[i])^2-
0.000197*(Energy_Co_60[i])^3+0.00000
409*(Energy_Co_60[i])^4)*density_fon
t
    mis_Co_60[i] = x
}

mis_r_Ba_137 = mis_Ba_137*Radius
mis_rsum_Ba_137 =
mis_Ba_137*(Radius+a)
mis_rsum_Co_60 =
mis_Co_60*(Radius+a)
mis_r_Co_60 = mis_Co_60*Radius

M_Ba_137 = 1
M_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
1.51+0.0994*(distance_radius_paramet
er)-
0.00397*(distance_radius_parameter)^
2
    M_Ba_137[i] = x
}
M_Co_60 = 1
M_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
1.37+0.0731*(distance_radius_paramet
er)-
0.00264*(distance_radius_parameter)^
2
    M_Co_60[i] = x
}

}
mis_zm_Ba_137 = 1
mis_zm_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137
)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = 0.939-
0.0431*(b1_Ba_137[i])+0.0739*(b1_Ba_
137[i])^2-
0.0275*(b1_Ba_137[i])^3+0.004411*(b1
_Ba_137[i])^4-
0.000364*(b1_Ba_137[i])^5+0.0000163*
(b1_Ba_137[i])^6-
0.000000376*(b1_Ba_137[i])^7+0.00000
000352*(b1_Ba_137[i])^8
    mis_zm_Ba_137[i] = x
}
mis_zm_Co_60 = 1
mis_zm_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = 0.939-
0.0431*(b1_Co_60[i])+0.0739*(b1_Co_6
0[i])^2-
0.0275*(b1_Co_60[i])^3+0.004411*(b1_
Co_60[i])^4-
0.000364*(b1_Co_60[i])^5+0.0000163*(
b1_Co_60[i])^6-
0.000000376*(b1_Co_60[i])^7+0.000000
00352*(b1_Co_60[i])^8
    mis_zm_Co_60[i] = x
}

Z_Ba_137 = 1
Z_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
mis_zm_Ba_137[i]*M_Ba_137[i]/mis_Ba_
137[i]
    Z_Ba_137[i] = x
}
Z_Co_60 = 1
Z_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
mis_zm_Co_60[i]*M_Co_60[i]/mis_Co_60
[i]
    Z_Co_60[i] = x
}

b1_Ba_137 = 1
b1_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)

```

```

for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
mi_Ba_137[i]*thickness_shield
    b1_Ba_137[i] = x
}

b1_Co_60 = 1
b1_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
mi_Co_60[i]*thickness_shield
    b1_Co_60[i] = x
}

b2_Ba_137 = 1
b2_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = b1_Ba_137[i] +
(mis_Ba_137[i]*Z_Ba_137[i])
    b2_Ba_137[i] = x
}

b2_Co_60 = 1
b2_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = b1_Co_60[i] +
(mis_Co_60[i]*Z_Co_60[i])
    b2_Co_60[i] = x
}

G_Ba_137 = 1
G_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
0.00000201*(Energy_Ba_137[i])-
0.00000000867
    G_Ba_137[i] = x*1e4
}

G_Co_60 = 1
G_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    if (Energy_Co_60[i] < 1)
    {
        x =
0.00000201*(Energy_Co_60[i])-
0.00000000867
        G_Co_60[i] = x*1e4
    }
    else
}

{
    x =
0.00000097*(Energy_Co_60[i])+0.00000
126
    G_Co_60[i] = x*1e4
}

Sv_Ba_137 = 1
Sv_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
Yield_Ba_137[i]*Activity_Ba_137/Volu
me
    Sv_Ba_137[i] = x
}

Sv_Co_60 = 1
Sv_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
Yield_Co_60[i]*Activity_Co_60/Volume
    Sv_Co_60[i] = x
}

theta_Ba_137 = 1
theta_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)
] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
atan((Height_font/2)/(a+Z_Ba_137[i]))
*(180/pi)
    theta_Ba_137[i] = x
}

theta_Co_60 = 1
theta_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
atan((Height_font/2)/(a+Z_Co_60[i]))
*(180/pi)
    theta_Co_60[i] = x
}

Ftheta_Ba_137 = 1
Ftheta_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)
] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = 0.344*exp(-
1.02*(b2_Ba_137[i]))
    Ftheta_Ba_137[i] = x
}

```

```

Ftheta_Co_60 = 1
Ftheta_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = 0.344*exp(-
1.02*(b2_Co_60[i]))
    Ftheta_Co_60[i] = x
}

F_Ba_137 = 1
F_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
(B_Ba_137[i]*Sv_Ba_137[i]*(Radius^2)
*Ftheta_Ba_137[i])/(2*(a+Z_Ba_137[i]
))
    F_Ba_137[i] = x
}

F_Co_60 = 1
F_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
(B_Co_60[i]*Sv_Co_60[i]*(Radius^2)*F
theta_Co_60[i])/(2*(a+Z_Co_60[i]))
    F_Co_60[i] = x
}

Dose_Ba_137 = 1
Dose_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
F_Ba_137[i]*G_Ba_137[i]
    Dose_Ba_137[i] = x
}

Dose_Co_60 = 1
Dose_Co_60[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = F_Co_60[i]*G_Co_60[i]
    Dose_Co_60[i] = x
}

Activity_Cor_Ba_137 =
FR*Activity_Ba_137

Activity_Cor_Co_60 =
FR*Activity_Co_60

Sum_Activity_Cor_Ba_137 =
Activity_Cor_Ba_137*length(Energy_Ba
_137)

Sum_Activity_Cor_Co_60 =
Activity_Cor_Co_60*length(Energy_Co_
60)

Sv_Cor_Ba_137 = 1
Sv_Cor_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137
)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
Activity_Cor_Ba_137*Yield_Ba_137[i]/
Volume
    Sv_Cor_Ba_137[i] = x
}

Sv_Cor_Co_60 = 1
Sv_Cor_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
Activity_Cor_Co_60*Yield_Co_60[i]/Vo
lume
    Sv_Cor_Co_60[i] = x
}

F_Cor_Ba_137 = 1
F_Cor_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137)
] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
(B_Ba_137[i]*Sv_Cor_Ba_137[i]*(Radiu
s^2)*Ftheta_Ba_137[i])/(2*(a+Z_Ba_13
7[i]))
    F_Cor_Ba_137[i] = x
}

F_Cor_Co_60 = 1
F_Cor_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
(B_Co_60[i]*Sv_Cor_Co_60[i]*(Radius^
2)*Ftheta_Co_60[i])/(2*(a+Z_Co_60[i]
))
    F_Cor_Co_60[i] = x
}

Dose_F_Ba_137 = 1
Dose_F_Ba_137[1:length(Energy_Ba_137
)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{

```



```

x =
F_Cor_Ba_137[i]*G_Ba_137[i]
Dose_F_Ba_137[i] = x
}
Dose_F_Co_60 = 1
Dose_F_Co_60[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
x =
F_Cor_Co_60[i]*G_Co_60[i]
Dose_F_Co_60[i] = x
}
N_cilindres = 1
Height_font2 = 40
Radius = 28
Height_measurement2 = 20
a = 100
radionuclides = 2
Activity_Ba_137_b = 2.21e7
Activity_Co_60_b = 2.39e9
shields = 1
thickness_shield = 0.12
density_material = 7.87
density_font_b = 1.27
dose = 60
Energy_Ba_137 = c(0.662)
Yield_Ba_137 = c(8.98e-1)
Energy_Co_60 = c(1.17,1.33)
Yield_Co_60 = c(9.99E-01,1.00E+00)
Volume_b =
pi*Height_font2*(Radius^2)
distance_radius_parameter = a/Radius

Coef_Ba_137_b = 1
Coef_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_137
)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
x = 0.731-
5.1*(Energy_Ba_137[i])+14.2*(Energy_
Ba_137[i])^2-
16.3*(Energy_Ba_137[i])^3+6.6*(Energy
y_Ba_137[i])^4
Coef_Ba_137_b[i] = x
}

Coef_Co_60_b = 1
Coef_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
if (Energy_Co_60[i] < 1)
{
x = 0.731-
5.1*(Energy_Co_60[i])+14.2*(Energy_C
o_60[i])^2-
16.3*(Energy_Co_60[i])^3+6.6*(Energy
_Co_60[i])^4
}
}

Coef_Co_60_b[i] =
x
}
else
{
x = 0.0732-
0.0191*(Energy_Co_60[i])+0.00286*(En
ergy_Co_60[i])^2-
0.000174*(Energy_Co_60[i])^3+0.00000
365*(Energy_Co_60[i])^4
Coef_Co_60_b[i] =
x
}
}

mi_Ba_137_b = 1
mi_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
x =
density_material*Coef_Ba_137_b[i]
mi_Ba_137_b[i] = x
}

mi_Co_60_b = 1
mi_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
x =
density_material*Coef_Co_60_b[i]
mi_Co_60_b[i] = x
}

Al_Ba_137_b = 1
Al_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
x = 11.6-
3.41*(Energy_Ba_137[i])+0.507*(Energy
_Ba_137[i])^2-
0.0339*(Energy_Ba_137[i])^3+(0.00076
9)*(Energy_Ba_137[i])^4
Al_Ba_137_b[i] = x
}

Al_Co_60_b = 1
Al_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
x = 11.6-
3.41*(Energy_Co_60[i])+0.507*(Energy
_Co_60[i])^2-
0.0339*(Energy_Co_60[i])^3+(0.000769
)* (Energy_Co_60[i])^4
Al_Co_60_b[i] = x
}
}

```

```

a1_Ba_137_b = 1
a1_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = -1*(0.108-
0.0262*(Energy_Ba_137[i])+0.00387*(E
nergy_Ba_137[i])^2+0.000977*(Energy_
Ba_137[i])^3-
0.000325*(Energy_Ba_137[i])^4+0.0000
323*(Energy_Ba_137[i])^5-
0.0000011*(Energy_Ba_137[i])^6)
    a1_Ba_137_b[i] = x
}

a1_Co_60_b = 1
a1_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = -1*(0.108-
0.0262*(Energy_Co_60[i])+0.00387*(En
ergy_Co_60[i])^2+0.000977*(Energy_Co
_60[i])^3-
0.000325*(Energy_Co_60[i])^4+0.00003
23*(Energy_Co_60[i])^5-
0.0000011*(Energy_Co_60[i])^6)
    a1_Co_60_b[i] = x
}

a2_Ba_137_b = 1
a2_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = -
0.00622+0.042*(Energy_Ba_137[i])-
0.00981*(Energy_Ba_137[i])^2+0.00186
*(Energy_Ba_137[i])^3-
0.000319*(Energy_Ba_137[i])^4+0.0000
287*(Energy_Ba_137[i])^5-
0.000000961*(Energy_Ba_137[i])^6
    a2_Ba_137_b[i] = x
}

a2_Co_60_b = 1
a2_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = -
0.00622+0.042*(Energy_Co_60[i])-
0.00981*(Energy_Co_60[i])^2+0.00186*
(Energy_Co_60[i])^3-
0.000319*(Energy_Co_60[i])^4+0.00002
87*(Energy_Co_60[i])^5-
0.000000961*(Energy_Co_60[i])^6
    a2_Co_60_b[i] = x
}

A2_Ba_137_b = 1
A2_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = 1-A1_Ba_137_b[i]
    A2_Ba_137_b[i] = x
}

A2_Co_60_b = 1
A2_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = 1-A1_Co_60_b[i]
    A2_Co_60_b[i] = x
}

B_Ba_137_b = 1
B_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = (A1_Ba_137_b[i]*exp(-
a1_Ba_137_b[i]*mi_Ba_137_b[i]*thickn
ess_shield)) + (A2_Ba_137_b[i]*exp(-
a2_Ba_137_b[i]*mi_Ba_137_b[i]*thickn
ess_shield))
    B_Ba_137_b[i] = x
}

B_Co_60_b = 1
B_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = (A1_Co_60_b[i]*exp(-
a1_Co_60_b[i]*mi_Co_60_b[i]*thicknes
s_shield)) + (A2_Co_60_b[i]*exp(-
a2_Co_60_b[i]*mi_Co_60_b[i]*thicknes
s_shield))
    B_Co_60_b[i] = x
}

mis_Ba_137_b = 1
mis_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_137)
] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = (0.191-
0.378*(Energy_Ba_137[i])+0.455*(Ener
gy_Ba_137[i])^2-
0.202*(Energy_Ba_137[i])^3)*density_
font_b
    mis_Ba_137_b[i] = x
}

mis_Co_60_b = 1
mis_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60)]
= c(1)

```

```

for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
(0.0654*(Energy_Co_60[i])^-
0.49)*density_font_b
    mis_Co_60_b[i] = x
}

mis_r_Ba_137_b = mis_Ba_137_b*Radius

mis_rsum_Ba_137_b =
mis_Ba_137_b*(Radius+a)

mis_rsum_Co_60_b =
mis_Co_60_b*(Radius+a)

mis_r_Co_60_b = mis_Co_60_b*Radius

M_Ba_137_b = 1
M_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
1.51+0.0994*(distance_radius_paramet
er)-
0.00397*(distance_radius_parameter)^
2
    M_Ba_137_b[i] = x
}

M_Co_60_b = 1
M_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
1.37+0.0731*(distance_radius_paramet
er)-
0.00264*(distance_radius_parameter)^
2
    M_Co_60_b[i] = x
}

Z_Ba_137_b = 1
Z_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
mis_zm_Ba_137_b[i]*M_Ba_137_b[i]/mis
_Ba_137_b[i]
    Z_Ba_137_b[i] = x
}

Z_Co_60_b = 1
Z_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)

for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
mis_zm_Co_60_b[i]*M_Co_60_b[i]/mis_C
o_60_b[i]
    Z_Co_60_b[i] = x
}

b1_Ba_137_b = 1
b1_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
mi_Ba_137_b[i]*thickness_shield
    b1_Ba_137_b[i] = x
}

b1_Co_60_b = 1
b1_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
mi_Co_60_b[i]*thickness_shield
    b1_Co_60_b[i] = x
}

b2_Ba_137_b = 1
b2_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = b1_Ba_137_b[i] +
(mis_Ba_137_b[i]*Z_Ba_137_b[i])
    b2_Ba_137_b[i] = x
}

b2_Co_60_b = 1
b2_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = b1_Co_60_b[i] +
(mis_Co_60_b[i]*Z_Co_60_b[i])
    b2_Co_60_b[i] = x
}

mis_zm_Ba_137_b = 1
mis_zm_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_1
37)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = 0.939-
0.0431*(b1_Ba_137_b[i])+0.0739*(b1_B
a_137_b[i])^2-
0.0275*(b1_Ba_137_b[i])^3+0.004411*(
b1_Ba_137_b[i])^4-
0.000364*(b1_Ba_137_b[i])^5+0.000016
3*(b1_Ba_137_b[i])^6-

```

```

0.000000376*(b1_Ba_137_b[i])^7+0.000
00000352*(b1_Ba_137_b[i])^8
    mis_zm_Ba_137_b[i] = x
}

mis_zm_Co_60_b = 1
mis_zm_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60
)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = 0.939-
0.0431*(b1_Co_60_b[i])+0.0739*(b1_Co
_60_b[i])^2-
0.0275*(b1_Co_60_b[i])^3+0.004411*(b
1_Co_60_b[i])^4-
0.000364*(b1_Co_60_b[i])^5+0.0000163
*(b1_Co_60_b[i])^6-
0.000000376*(b1_Co_60_b[i])^7+0.0000
0000352*(b1_Co_60_b[i])^8
    mis_zm_Co_60_b[i] = x
}

G_Ba_137_b = 1
G_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
0.00000201*(Energy_Ba_137[i])-
0.00000000867
    G_Ba_137_b[i] = x*1e4
}

G_Co_60_b = 1
G_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    if (Energy_Co_60[i] < 1)
    {
        x =
0.00000201*(Energy_Co_60[i])-
0.00000000867
        G_Co_60_b[i] =
x*1e4
    }
    else
    {
        x =
0.00000097*(Energy_Co_60[i])+0.00000
126
        G_Co_60_b[i] =
x*1e4
    }
}

Sv_Ba_137_b = 1
Sv_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
Yield_Ba_137[i]*Activity_Ba_137_b/Vo
lume_b
    Sv_Ba_137_b[i] = x
}

Sv_Co_60_b = 1
Sv_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
Yield_Co_60[i]*Activity_Co_60_b/Volu
me_b
    Sv_Co_60_b[i] = x
}

theta_Ba_137_b = 1
theta_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_13
7)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
atan((Height_font2/2)/(a+Z_Ba_137_b[
i]))*(180/pi)
    theta_Ba_137_b[i] = x
}

theta_Co_60_b = 1
theta_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60)
] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
atan((Height_font2/2)/(a+Z_Co_60_b[i
]))*(180/pi)
    theta_Co_60_b[i] = x
}

Ftheta_Ba_137_b = 1
Ftheta_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_1
37)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x = 0.174*exp(-
1.01*(b2_Ba_137_b[i]))
    Ftheta_Ba_137_b[i] = x
}

Ftheta_Co_60_b = 1
Ftheta_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60)
] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x = 0.174*exp(-
1.01*(b2_Co_60_b[i]))
    Ftheta_Co_60_b[i] = x
}

F_Ba_137_b = 1

```

```

F_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_137)]
= c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
    (B_Ba_137_b[i]*Sv_Ba_137_b[i]*(Radius^2)*Ftheta_Ba_137_b[i])/(2*(a+Z_Ba_137_b[i]))
    F_Ba_137_b[i] = x
}

F_Co_60_b = 1
F_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60)] =
c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
    (B_Co_60_b[i]*Sv_Co_60_b[i]*(Radius^2)*Ftheta_Co_60_b[i])/(2*(a+Z_Co_60_b[i]))
    F_Co_60_b[i] = x
}

Dose_Ba_137_b = 1
Dose_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_137)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
    F_Ba_137_b[i]*G_Ba_137_b[i]
    Dose_Ba_137_b[i] = x
}

Dose_Co_60_b = 1
Dose_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
    F_Co_60_b[i]*G_Co_60_b[i]
    Dose_Co_60_b[i] = x
}

FR = dose/(sum(Dose_Ba_137_b) +
sum(Dose_Co_60_b) + sum(Dose_Ba_137)
+ sum(Dose_Co_60))

Activity_Cor_Ba_137_b =
FR*Activity_Ba_137_b

Activity_Cor_Co_60_b =
FR*Activity_Co_60_b

Sum_Activity_Cor_Ba_137_b =
Activity_Cor_Ba_137_b*length(Energy_Ba_137)

Sum_Activity_Cor_Co_60_b =
Activity_Cor_Co_60_b*length(Energy_Co_60)

Sv_Cor_Ba_137_b = 1
Sv_Cor_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_137)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
    Activity_Cor_Ba_137_b*Yield_Ba_137_b[i]/Volume_b
    Sv_Cor_Ba_137_b[i] = x
}

Sv_Cor_Co_60_b = 1
Sv_Cor_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
    Activity_Cor_Co_60_b*Yield_Co_60_b[i]/Volume_b
    Sv_Cor_Co_60_b[i] = x
}

F_Cor_Ba_137_b = 1
F_Cor_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_137)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
    (B_Ba_137_b[i]*Sv_Cor_Ba_137_b[i]*(Radius^2)*Ftheta_Ba_137_b[i])/(2*(a+Z_Ba_137_b[i]))
    F_Cor_Ba_137_b[i] = x
}

F_Cor_Co_60_b = 1
F_Cor_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{
    x =
    (B_Co_60_b[i]*Sv_Cor_Co_60_b[i]*(Radius^2)*Ftheta_Co_60_b[i])/(2*(a+Z_Co_60_b[i]))
    F_Cor_Co_60_b[i] = x
}

Dose_F_Ba_137_b = 1
Dose_F_Ba_137_b[1:length(Energy_Ba_137)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Ba_137))
{
    x =
    F_Cor_Ba_137_b[i]*G_Ba_137_b[i]
    Dose_F_Ba_137_b[i] = x
}

Dose_F_Co_60_b = 1
Dose_F_Co_60_b[1:length(Energy_Co_60)] = c(1)
for (i in 1:length(Energy_Co_60))
{

```

```

        x =
        F_Cor_Co_60_b[i]*G_Co_60_b[i]
        Dose_F_Co_60_b[i] = x
    }

    Total_Dose_Ba_137 = Dose_F_Ba_137 +
    Dose_F_Ba_137_b

    Total_Dose_Co_60 = Dose_Co_60 +
    Dose_F_Co_60_b

    Energy_Ba_137
    Yield_Ba_137
    Energy_Co_60
    Yield_Co_60
    Coef_Ba_137
    Coef_Co_60
    mi_Ba_137
    mi_Co_60
    A1_Ba_137
    A1_Co_60
    a1_Ba_137
    a1_Co_60
    a2_Ba_137
    a2_Co_60
    A2_Ba_137
    A2_Co_60
    B_Ba_137
    B_Co_60
    mis_Ba_137_b
    mis_Co_60_b
    mis_r_Ba_137_b
    mis_rsum_Ba_137_b
    mis_rsum_Co_60_b
    mis_r_Co_60_b
    M_Ba_137_b
    M_Co_60_b
    Z_Ba_137_b
    Z_Co_60_b
    b1_Ba_137_b
    b1_Co_60_b
    b2_Ba_137_b
    b2_Co_60_b
    mis_zm_Ba_137_b
    mis_zm_Co_60_b
    G_Ba_137_b
    G_Co_60_b
    Sv_Ba_137_b
    Sv_Co_60_b
    theta_Ba_137_b
    theta_Co_60_b
    Ftheta_Ba_137_b
    Ftheta_Co_60_b
    F_Ba_137_b
    F_Co_60_b
    Dose_Ba_137_b
    Dose_Co_60_b
    FR
    Activity_Cor_Ba_137_b
    Activity_Cor_Co_60_b
    Sum_Activity_Cor_Ba_137_b
    Sum_Activity_Cor_Co_60_b
    Sv_Cor_Ba_137_b
    Sv_Cor_Co_60_b
    F_Cor_Ba_137_b
    F_Cor_Co_60_b
    Dose_F_Ba_137_b
    Dose_F_Co_60_b
    Dose_F_Ba_137
    Dose_F_Co_60
    Total_Dose_Ba_137
    Total_Dose_Co_60

```

APÊNDICE C- RELATÓRIOS



Serviço de gestão de rejeitos radioativos (SEGRR)
 Instituto de pesquisas energéticas e nucleares
 Comissão Nacional de Energia Nuclear



Av. Prof. Lineu Prestes, 2242
 Cidade Universitária
 CEP 05508-000; São Paulo - SP



1. INFORMAÇÕES GERAIS

NOME DO GERADOR: _____ Nº LICENÇA OPERA. _____

ENDEREÇO _____

CNPJ: _____ CLASSIF. LEGAL: _____ TIPO DE INSTALAÇÃO: _____

INSTALAÇÃO GERADORA: _____

RESP. INSTALAÇÃO: _____ FONE: _____ E-MAIL: _____

RESP. PROTEÇÃO RADIOLÓGICA _____ FONE: _____ E-MAIL: _____

RESP. SUBS. PROTEÇÃO RADIOLÓGICA: _____ FONE: _____ E-MAIL: _____

“Declaro para os devidos fins, que as informações acima prestadas são verdadeiras e assumo a inteira responsabilidade pelas mesmas.”

2. INFORMAÇÕES SOBRE O REJEITO

Descreva abaixo a origem e as características físicas, químicas e radiológicas do material.

Upload de relatórios de caracterização fornecidos pelo gerador do rejeito (se houver)

Nº DE EMBALADOS: _____ IDENTIFICAÇÃO NA ORIGEM: _____

TIPO DE EMBALAGEM: _____

PARA USO EXCLUSIVO DO SEGRR

DATA / HORA DO RECEBIMENTO: _____

DESTINO: _____

RESPONSÁVEL: _____

SUPERVISOR DE RADIOPROTEÇÃO: _____

Nº SEGRR PARA EMBALADOS	TAXA DE DOSE (µSv/h)
	Na superfície:
	A 1m:

RUBRICA: _____

RUBRICA: _____



3. INFORMAÇÕES DE AMOSTRAGEM

Nº EMBALADO SEGR: _____

DATA/HORA: _____

LOCAL: _____

RESP. OPERAÇÃO: _____

RESP. RADIOPROTEÇÃO: _____

TIPO DA AMOSTRA:

A) AMOSTRA: (nº de referência) + Nº DO EMBALADO + Nº DA AMOSTRA DATA/HORA: RUBRICA:

DADOS DA AMOSTRAGEM SÓLIDO COMPOSIÇÃO _____
 LIQUÍDO COMPOSIÇÃO _____
 GASOSO COMPOSIÇÃO _____

B) AMOSTRA: (nº de referência) + Nº DO EMBALADO + Nº DA AMOSTRA DATA/HORA: RUBRICA:

DADOS DA AMOSTRAGEM: SÓLIDO COMPOSIÇÃO _____
 LIQUÍDO COMPOSIÇÃO _____
 GASOSO COMPOSIÇÃO _____

C) AMOSTRA: (nº de referência) + Nº DO EMBALADO + Nº DA AMOSTRA DATA/HORA: RUBRICA:

DADOS DA AMOSTRAGEM: SÓLIDO COMPOSIÇÃO _____
 LIQUÍDO COMPOSIÇÃO _____
 GASOSO COMPOSIÇÃO _____

D) AMOSTRA: (nº de referência) + Nº DO EMBALADO + Nº DA AMOSTRA DATA/HORA: RUBRICA:

DADOS DA AMOSTRAGEM: SÓLIDO COMPOSIÇÃO _____
 LIQUÍDO COMPOSIÇÃO _____
 GASOSO COMPOSIÇÃO _____

NO CASO DE TRANSFERÊNCIA DE CUSTODIA DA AMOSTRA

LOCAL DESTINAÇÃO DAS AMOSTRAS:

Nº AMOSTRA: _____

DATA/HORA DA TRANSFERÊNCIA: _____

Nº AMOSTRA: _____

RUBRICA: _____

Nº AMOSTRA: _____

MOTIVO DA TRANSFERÊNCIA: _____



4. DADOS CARACTERIZAÇÃO

A) AMOSTRA: (nº de referência) + Nº DO EMBALADO + Nº DA AMOSTRA DATA/HORA: RUBRICA:

RESPONSÁVEL:

MÉTODO ANALÍTICO:

DESCRIÇÃO (Descreve o método utilizado ou use referência de protocolo)

B) AMOSTRA: (nº de referência) + Nº DO EMBALADO + Nº DA AMOSTRA DATA/HORA: RUBRICA:

RESPONSÁVEL:

MÉTODO ANALÍTICO:

DESCRIÇÃO (Descreve o método utilizado ou use referência de protocolo)

C) AMOSTRA: (nº de referência) + Nº DO EMBALADO + Nº DA AMOSTRA DATA/HORA: RUBRICA:

RESPONSÁVEL:

MÉTODO ANALÍTICO:

DESCRIÇÃO (Descreve o método utilizado ou use referência de protocolo)

...

4.B. NOS CASOS DE TRABALHAR OS DADOS COM POINT KERNEL/ MCNP/FE8FC

MÉTODOS:

RESULTADOS:

5. RESULTADO DAS ANÁLISES

Nº AMOSTRA:

RESPONSÁVEL:

UPLOAD DOC. COM RESULTADOS

COMENTÁRIOS:



6. RELATÓRIO FINAL

INVENTÁRIO RADIOISOTÓPICO

ID DO EMBALADO #00000000

Número de rastreio do documento

21123456789

REJEITO RADIOATIVO

PROIBIDO POR LEI FEDERAL DEPOSIÇÃO INADEQUADA

Se encontrado, entre em contato com a polícia ou autoridade de segurança pública mais próxima do órgão de proteção ambiental do Brasil.

Nº dos embalados (se agrupados)

Nº documento de histórico

REJEITO

Classe do rejeito Matriz do rejeito	RN presentes Atividade total Taxa de dose na superfície
Destinação	

Origem: _____ Telefone: _____

Endereço: _____

IDENTIFICAÇÃO INTERNA DO REJEITO

GERADOR	DESTINAÇÃO
Departamento: _____ Endereço: _____	Data de chegada: _____ Data de saída: _____ Data de deposição: _____ (se deposição final)
← Código do documento de histórico aqui →	

Em caso de liberação do material radioativo, entre em contato com a Comissão Nacional de Energia Nuclear +55 (11) 3133 - 9000 para obter assistência

MATERIAL	CLASSE	ATIVIDADE TOTAL (Bq)	MASSA (kg)	VOLUME (m ³)

RADIONUCLÍDEO	T 1/2	ATIVIDADE (Bq)

TAXA DE DOSE (µSv/h) DATA

Na superfície: 00/00/00

1m de distância:

LOCALIZAÇÃO
STATUS

RESPONSÁVEL:
DATA/HORA:
LINK PARA PDF:

RUBRICA:

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

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