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

**Desenvolvimento de um software livre, plataforma web, para a calibração da
eficiência absoluta de detectores do tipo HPGe**

THIAGO JOSÉ SAMPAIO KAISER

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

**Orientador:
Prof. Dr. Renato Semmler**

**São Paulo
2019**

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

**Desenvolvimento de um software livre, plataforma web, para a calibração da
eficiência absoluta de detectores do tipo HPGe**

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

THIAGO JOSÉ SAMPAIO KAISER

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

**Orientador:
Prof. Dr. Renato Semmler**

**São Paulo
2019**

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

Como citar:

KAISER, T. J. S. ***Desenvolvimento de um software livre, plataforma web, para a calibração da eficiência absoluta de detectores do tipo HPGe***. 2019. 81 p. Dissertação (Mestrado 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)

<p>Kaiser, Thiago José Sampaio Desenvolvimento de um software livre, plataforma web, para a calibração da eficiência absoluta de detectores do tipo HPGe / Thiago José Sampaio Kaiser; orientador Renato Semmler. -- São Paulo, 2019. 81 p.</p> <p>Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Aplicações) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2019.</p> <p>1. ativação neutrônica. 2. detector HPGe. 3. django. 4. eficiência. 5. k0. I. Semmler, Renato, orient. II. Título.</p>
--

**Dedico esse trabalho em especial à
minha esposa e minha mãe pelo
apoio, incentivo e paciência.**

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho e a todas elas quero expressar meu reconhecimento e minha gratidão. Agradeço em especial,

Ao Dr. Renato Semmler, por toda orientação, dedicação, companheirismo e amizade na caminhada para finalização deste trabalho.

Ao Dr. Mário Olímpio Menezes, por seu apoio e contribuição durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos Alberto Ayres Benicio e Gean Batista de Lima, por suas palavras de incentivo nessa árdua caminhada.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia, por todo apoio para execução desse trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) e a Universidade de São Paulo (USP), pela oportunidade concedida para execução desse trabalho.

RESUMO

KAISER, T. J. S. **Desenvolvimento de um software livre, plataforma web, para a calibração da eficiência absoluta de detectores do tipo HPGe.** 2019. 86p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN – CNEN/SP. São Paulo.

A técnica de análise por ativação com nêutrons instrumental tem sido amplamente utilizada pelo Laboratório de Ativação Neutrônica (LAN) do IPEN, com emprego do método comparativo, utilizando-se como fonte de nêutrons o reator de pesquisa do tipo piscina IEA-R1, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). Neste método uma amostra é irradiada, simultaneamente, com um padrão do elemento a ser determinado. Para contornar a dificuldade de uma análise multielementar, por ser necessário preparar vários padrões, foi desenvolvido o método k_0 de ativação neutrônica. No método k_0 a concentração dos elementos de interesse da amostra é calculada em relação a um elemento comparador, geralmente o ouro. Todavia, esse método requer, com precisão, a eficiência de detecção no intervalo de energia de interesse e na geometria do arranjo experimental. Para contornar o tratamento manual dos dados em planilhas eletrônicas, passíveis de incidência de erros, foi desenvolvido, então, um software web, com acesso de qualquer dispositivo com Internet, livre, para calibração da eficiência absoluta de detectores do tipo HPGe. Utilizou-se a linguagem de programação Python, livre, de baixa curva de aprendizagem e padronizada no projeto *eScience*, a qual o referido software faz parte, e o framework web Django. No sistema é possível realizar todos os cadastros das informações utilizadas no cálculo da eficiência. Além de calcular a eficiência, o sistema plota o gráfico com os pontos da eficiência, linha de regressão, com possibilidade de ajustes, e barra de erro representando as incertezas. Como parte integrante do projeto *e-science*, o software emite relatórios referentes aos dados dos espectros e da eficiência, permitindo seu compartilhamento.

Palavras-chave: ativação neutrônica; detector HPGe; django; eficiência; k_0 ; python; software livre.

ABSTRACT

KAISER, T. J. S. **Development of a web free Software for the absolute efficiency calibration for HPGe type detectors.** 2019. 86p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN – CNEN/SP. São Paulo.

The technique of instrumental neutron activation analysis has been widely used by IPEN's Neutron Activation Laboratory (LAN), using the comparative method, using the IEA-R1 pool-type research reactor as the neutron source Energy and Nuclear Research (IPEN). In this method a sample is simultaneously irradiated with a pattern of the element to be determined. In order to overcome the difficulty of a multielementary analysis, because it is necessary to prepare several standards, the k_0 method of neutron activation was developed. In method k_0 the concentration of the elements of interest of the sample is calculated in relation to a comparator element, generally gold. However, this method accurately requires the detection efficiency in the energy range of interest and the geometry of the experimental arrangement. In order to circumvent the manual processing of the data in electronic spreadsheets, which could lead to errors, a web software was developed with access from any free Internet device for calibration of the absolute efficiency of HPGe type detectors. It was used the free and low learning curve, Python programming language, standardized in the eScience project, to which the software is part, and the Django web framework. In the software it is possible to carry out all the registers of the information used in the calculation of the efficiency. In addition to calculating efficiency, the software plots the graph with the efficiency points, regression line, with possibility of adjustments, and error bar representing the uncertainties. As part of the e-science project, the software issues reports on spectra and efficiency data, allowing it to share.

Key words: django; efficiency; free software; hpge detector; k_0 ; neutron activation; python.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	15
1.2 Estrutura do trabalho	16
2 MATERIAIS E MÉTODOS	17
2.1 Engenharia de software	17
2.1.2 Determinação dos requisitos	17
2.2 Banco de dados.....	18
2.2.1 Sistema de gerenciamento de banco de dados (SGBD)	18
2.2.2 SQL	19
2.3 Interação da radiação gama com a matéria	20
2.3.1 Efeito fotoelétrico.....	22
2.3.2 Efeito Compton.....	24
2.3.3 Produção de pares	26
2.4 Calibração do sistema de detecção.....	30
2.4.1 Introdução	30
2.4.2 Calibração em energia	30
2.4.3 Eficiência de detecção.....	31
3 MODELAGEM DO SOFTWARE	34
3.1 Linguagem de modelagem unificada.....	34
3.2 Diagrama de casos de uso	35
3.2.1 Caso de uso: criar projeto	37
3.2.2 Caso de uso: criar subprojeto.....	37

3.2.3 Caso de uso: cadastrar espectro.....	37
3.2.4 Caso de uso: importar espectro	38
3.2.5 Caso de uso: visualizar eficiência	39
3.3 Diagrama de classes.....	39
4 IMPLEMENTAÇÃO DO SOFTWARE.....	41
4.1 Técnicas e ferramentas utilizadas	41
4.1.1 Python	41
4.1.2 Pycharm	41
4.2 Implementação do software	42
4.2.1 Criação de projetos e subprojetos.....	42
4.2.2 Importação dos dados do espectro	43
4.2.3 Cálculo da eficiência.....	44
4.2.4 Apresentação do gráfico da eficiência.....	44
5 PARTE EXPERIMENTAL	47
5.1 Descrição do espectrômetro de HPGe	47
5.2 Determinação da curva de eficiência do detector de HPGe	51
5.3 Aquisição e geração dos espectros gama	56
6 UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE.....	59
6.1 Projeto e subprojeto.....	59
6.1.1 Criando um projeto	59
6.1.2 Criando um subprojeto	60
6.2 Espectros e cálculo da eficiência	61
6.2.1 Cadastrando um espectro	61
6.2.2 Importando uma lista de espectros	62
7 RESULTADO E DISCUSSÃO	63
7.1 Calibração em energia	63
7.2 Calibração de eficiência absoluta de pico do espectrômetro de HPGe	64

7.3 Calibração de eficiência absoluta de pico obtida no software FEPE-WEB..	70
7.4 Integração ao projeto <i>e-Science</i>	71
8 CONCLUSÕES	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1 - Caso de uso: Criar projeto	37
Tabela 2 - Caso de uso: Criar subprojeto.....	37
Tabela 3 - Caso de uso: Cadastrar espectro.....	38
Tabela 4 - Caso de uso: Importar espectro	38
Tabela 5 - Caso de uso: Visualizar eficiência.....	39
Tabela 6 - Código fonte para criar projeto	42
Tabela 7 - Código fonte para criar subprojeto	43
Tabela 8 - Código fonte para cálculo da eficiência.....	44
Tabela 9 - Código fonte para obter os dados do gráfico da eficiência.....	44
Tabela 10 - Código fonte para gerar o gráfico da eficiência.....	45
Tabela 11 - Especificações do detector do tipo HPGe, modelo GX3018 - (Canberra 8).	48
Tabela 12 - Fontes radioativas padrão utilizadas para a calibração da eficiência de pico.....	54
Tabela 13 - Parâmetros nucleares das Fontes radioativas padrão utilizadas para a calibração da eficiência de pico.....	55
Tabela 14 - Nome do arquivo do espectro gama, data e hora e tempo de aquisição para cada fonte radioativa padrão utilizada no presente trabalho.	57
Tabela 15 - Valores obtidos para a eficiência de pico em função da energia radiação gama.	66
Tabela 16 - Valores das incertezas relativas percentuais consideradas no cálculo da incerteza da eficiência de detecção (%).....	67
Tabela 17 - Valores das áreas dos fotopicos (Np) obtidas pelo software CAX/Genie2000 e utilizadas pelo FEPE-WEB para o cálculo da eficiência.	68
Tabela 18 - Valores obtidos para a eficiência de pico em função da energia radiação gama.	69

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1 - Interação Usuário e SGBD.....	19
Figura 2 - Faixas de predominância dos três tipos de interação da radiação gama com a matéria	21
Figura 3 - Secção de choque de absorção fotoelétrica para o Germânio ($Z = 32$) em função da energia.....	23
Figura 4 - Representação do Efeito Compton	24
Figura 5 - Representação da produção de pares em um campo nuclear: Conversão de um fóton em um par elétron-pósitron	27
Figura 6 - Aniquilação de pares. A interação entre um pósitron e um elétron e a conversão de suas massas em dois fótons de 511 keV. de energia.....	28
Figura 7 - Espectro de reações de captura de nêutrons térmicos.	29
Figura 8 - Diagrama de casos de uso	36
Figura 9 - Diagrama de classes.....	40
Figura 10 - Sistema de espectrometria gama (Canberra 8)	47
Figura 11 - Representação esquemática das dimensões do detector do tipo HPGe, modelo GX3018 - (Canberra 8)	49
Figura 12 - Representação esquemática, fora de escala, do arranjo experimental para as medidas com o espectrômetro gama (Canberra 8).	50
Figura 13 - Representação esquemática do arranjo experimental para as medidas com o espectrômetro gama (canberra 8) – Detector e blindagem.	51
Figura 14 - Representação de algumas fontes radioativas padrão utilizadas no presente trabalho.	56
Figura 15 – Relação de projetos do usuário.....	59
Figura 16 – Criação de um novo projeto	59
Figura 17 – Relação de subprojetos de um projeto principal	60
Figura 18 – Criação de um novo subprojeto.....	60
Figura 19 – Relação de espectro de um subprojeto.....	61
Figura 20 – Inserção de um novo espectro a um subprojeto	62

Figura 21 – Importação de um arquivo de espectro a um subprojeto	62
Figura 22 - Calibração em energia do espectrômetro gama (Canberra 8) efetuada pelo software FEPE-WEB.	63
Figura 23 - Curva de eficiência absoluta de pico em função da energia da radiação gama incidente no detector de HPGe obtida pelo software FEPE-WEB.....	70
Figura 24 - Relatório de parte dos dados da eficiência em PDF	71
Figura 25 - Escolha da ordenação do relatório dos dados dos espectros	72
Figura 26 - Relatório de parte dos dados dos espectros em PDF.....	73
Figura 27 - Relatório dos dados da eficiência em CSV	73

1 INTRODUÇÃO

O IEA-R1 é um reator de pesquisa tipo piscina, moderado e refrigerado a água leve e que utiliza elementos de berílio e de grafite como refletores. O núcleo do reator está situado a 6,9 m da superfície da piscina, tem a forma de um paralelepípedo, e é composto por 20 elementos combustível padrão, 4 elementos combustível controle, cerca de 25 refletores e 7 posições de irradiação.

Projetado para operar a uma potência máxima de 5 MW, este reator, nas primeiras décadas, operou a potência de 2 MW. Sua primeira criticalidade ocorreu em 16 de setembro de 1957 e, após a fase inicial de testes e comissionamento, passou a operar na potência de 2 MW, segundo um ciclo de 8 horas por dia, 5 dias por semana. A partir de 1993 passou a operar em ciclos de 64 horas contínuas semanais a 3,5 MW de potência. A partir de agosto de 2011 passou a operar a 4,5 MW de potência. O aumento da potência para 4,5 MW permite a irradiação de materiais com fluxos de nêutrons térmicos e epitérmicos da ordem de $10^{13} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$.

Atualmente, o reator IEA-R1 é utilizado para as seguintes finalidades:

- a) Produção de radionuclídeos para uso em medicina nuclear;
- b) Produção de radionuclídeos utilizados em aplicações industriais;
- c) Pesquisas em Física Nuclear e Estado Sólido;
- d) Serviços de Neutronografia;
- e) Treinamento de pessoal licenciado para operação de reatores;
- f) Irradiação de amostras para a realização de análises multielementares utilizando a técnica de Análise por Ativação com Nêutrons em materiais geológicos, produtos industriais como plásticos e resinas, catalisadores, petróleo, metais e ligas metálicas, amostras arqueológicas, tecidos animais e humanos, vegetais, alimentos e amostras ambientais.

Dentre as utilizações do reator descritas acima, a técnica de análise por ativação com nêutrons instrumental (INAA), uma técnica importante e poderosa que

permite o conhecimento da concentração de elementos químicos em amostras, tem sido utilizada com sucesso em inúmeros experimentos realizados pelo Laboratório de Ativação Neutrônica (LAN) do IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares). Por mais de 40 anos o LAN vem analisando diferentes matrizes tais como geológicas, biológicas, arqueológicas e ambientais, dentre outras, empregando o método comparativo (LANGE *et al.*, 2017; FAVARO *et al.*, 2018; CARVALHO *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2018; SALES *et al.*, 2019; SAIKI, SOARES e ADACHI, 2008). Neste método comparativo, amostra e padrão (material com concentração e massa conhecidos do elemento a ser determinado) são irradiados simultaneamente com nêutrons, sob as mesmas condições, e os espectros gama, de ambos, são adquiridos nas mesmas condições experimentais. Desta forma, todos os parâmetros associados à irradiação e detecção são os mesmos, tanto para a amostra como para o padrão, tornando possível a determinação da concentração de um determinado elemento na amostra através de uma simples comparação entre as atividades induzidas na amostra e no padrão. Entretanto, para análises multielementares este procedimento requer a preparação ou aquisição de padrões para cada um dos elementos que se pretende analisar, o que torna o método muito trabalhoso, dispendioso e demorado, além de requerer reagentes de alta pureza, que são usualmente caros. O tempo despendido na análise também aumenta, devido ao tempo de medida dos padrões. Além disso, alguns elementos presentes na amostra não podem ser analisados devido à ausência de um padrão correspondente ou por causa de suas características nucleares.

Para contornar estas dificuldades foi desenvolvido o Método k_0 de ativação neutrônica pelo *Institute for Nuclear Sciences*, em Gent, Bélgica (DE CORTE, 1986). Esta é uma técnica de análise por ativação com nêutrons considerada “quase absoluta”, que, em razão da sua excelente exatidão, surgiu como alternativa ao método comparativo, eliminando algumas de suas desvantagens. Os fatores k_0 são independentes do espectro do reator e das características do detector e têm sido determinados experimentalmente para diversos núcleos-alvo (DE CORTE e SIMONITS, 2003; k_0 database, 2019). A concentração dos elementos é calculada em relação a um elemento comparador, geralmente ouro, eliminando a necessidade de padrões. O método k_0 , em razão de possibilitar a determinação da concentração elementar com grande exatidão, tem sido amplamente aceito por usuários em vários laboratórios do mundo, incluindo o

Brasil (TURRA *et al.*, 2019; SATHLER *et al.*, 2019; MARIANO *et al.*, 2014; PUERTA *et al.*, 2014; BACCHI, FERNANDES, DE OLIVEIRA, 2000).

Para a utilização do método k_0 de ativação neutrônica, atual interesse do Laboratório de Ativação Neutrônica do IPEN, uma caracterização precisa de cada posição de irradiação é requerida assim como uma caracterização do sistema de detecção. A caracterização precisa da instalação de irradiação requer a determinação da razão entre os fluxos de nêutrons térmico e epitérmico (f) e do parâmetro (α) relacionado com a distribuição de fluxo de nêutrons epitérmicos, aproximadamente dada por $1/E^{1+\alpha}$ (é uma medida de quanto se afasta o fluxo de nêutrons epitérmicos do comportamento ideal $1/E$) (DE CORTE, 1986). Estes parâmetros são característicos da posição de irradiação no reator nuclear. Na caracterização do sistema de detecção, um parâmetro de grande importância a ser determinado é a eficiência de detecção no intervalo de energia de interesse e na geometria do arranjo experimental.

Existem alguns softwares disponíveis que possibilitam a determinação da curva de eficiência, tais como o programa k_0 -IAEA, KayWin, Gespecor, Hyperlab, Hypermet. O programa k_0 -IAEA (BLAAUW, 2014) é fornecido gratuitamente pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) aos laboratórios de ativação com nêutrons. No entanto a sua estrutura de funcionamento, inserção de dados na base de dados permanente e a análise dos espectros não são amigáveis para serem realizadas. Os softwares KayWin (VAN SLUIJS, 2018), Gespecor (SIMA, ARNOLD e DOVLETE, 2001), Hyperlab (HYPERLABS SOFTWARE, 2014) tem custo elevado para aquisição (acima de três mil euros) e a última versão do Hypermet (FAZEKAS, 1997) é de 1998, o que o torna incompatível com os atuais sistemas de computacionais.

1.1 Objetivos

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e implementação de um software web, de uso livre, para a calibração da eficiência absoluta de um detector do tipo HPGe. O desenvolvimento deste trabalho faz parte do projeto de implementação do método k_0 de análise por ativação neutrônica no Laboratório de Ativação Neutrônica do IPEN.

De forma complementar objetivou-se integrar o software ao projeto *e-Science*, que abrange ferramentas tecnológicas para atender demanda de

pesquisas, contribuindo para o avanço de programas de pesquisas, com vistas à obtenção dos dados dos espectros de raios gama, dos projetos catalogados, com vistas à realização da calibração da eficiência absoluta determinação da curva de eficiência. Por projeto

Cabe ressaltar que o desenvolvimento visou atender às necessidades específicas do CERPq (Centro do Reator de Pesquisas do IPEN), aplicando os conceitos de usabilidade de software, a um custo extremamente baixo quando comparado à aquisição de softwares proprietários. Ressalta-se, ainda, por se tratar de um software web, o acesso às informações está disponível independentemente da localização geográfica, sendo necessário apenas acesso à Internet.

1.2 Estrutura do trabalho

O trabalho está estruturado em 8 capítulos. O primeiro é esta Introdução. O segundo capítulo, Metodologias, apresenta os conceitos básicos sobre engenharia de software, banco de dados, interação da radiação gama com a matéria e calibração do sistema de detecção. O terceiro capítulo, Modelagem do Software, apresenta a modelagem, documentação, do software desenvolvido. O capítulo quatro, Implementação do Software, apresenta os detalhes da implementação do software, descrevendo as ferramentas utilizadas. No quinto capítulo, Parte Experimental, são descritos os procedimentos adotados para obtenção dos dados utilizados no presente trabalho. O capítulo sexto, Utilização do Software, apresenta um manual resumido do usuário, que servirá de base para a utilização do software. No sétimo capítulo, Resultado e Discussão, são apresentados os principais resultados obtidos e algumas discussões pertinentes a estes resultados. O capítulo oito, Conclusões, apresenta as principais conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido sob o Termo de Cooperação firmado entre o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN e o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO e, dessa forma, as atividades relacionadas ao desenvolvimento do projeto aconteceram nas dependências do IFRO com eventuais visitas ao IPEN.

2.1 Engenharia de software

Um sistema de software complexo se caracteriza por um conjunto de componentes abstratos de software (estruturas de dados e algoritmos) encapsulados na forma de procedimentos, funções, módulos, objetos ou agentes interconectados entre si, compondo a arquitetura do software, que deverão ser executados em sistemas computacionais. Combinando essa complexidade com a crescente dependência de sistemas de software, “temos de ser capazes de produzir sistemas confiáveis econômica e rapidamente”. (SOMMERVILLE, 2011, p. 5). Nesse contexto tem-se a engenharia de software, que age como apoio ao desenvolvedor, ou equipe de desenvolvimento.

SOMMERVILLE afirma que:

Engenharia de software é uma disciplina de engenharia cujo foco está em todos os aspectos da produção de software, desde os estágios iniciais da especificação do sistema até sua manutenção, quando o sistema já está sendo usado. (SOMMERVILLE, 2001, p. 5)

Com essa abordagem sistemática, comumente chamada de processo de software, a engenharia de software apresenta uma “sequência de atividades que leva à produção de um produto de software”. (SOMMERVILLE, 2011, p.5)

2.1.2 Determinação dos requisitos

Através da Engenharia de Requisitos pode-se definir o que realmente deve ser construído em um software. O conjunto inicial de requisitos deve ser representar o que o usuário quer e precisa, haja vista que um software repleto de

opções e funcionalidades, uma vez que o cliente necessita de um sistema “enxuto” e simples, é desnecessário. Segundo GUEDES (2011, p. 22) “as etapas de levantamento e análise de requisitos trabalham com o domínio do problema e tenta determinar ‘o que’ o software deve fazer e se é realmente possível desenvolver o software solicitado”.

Neste sentido, para de fato compreender o problema a ser solucionado, faz-se necessário compreender os anseios do usuário no tocante ao sistema ora em projeção. Corroborando, GUEDES (2011, p. 22) elucida que “na etapa de levantamento de requisitos, o engenheiro busca compreender as necessidades do usuário e o que ele deseja que o sistema a ser desenvolvido realize”.

Verifica-se, então, a real necessidade de se levantar os requisitos de um software na etapa inicial de seu desenvolvimento.

2.2 Banco de dados

Entende-se por banco de dados todo e qualquer sistema de armazenamento de informações em ordem sobre um determinado assunto (KORTH; SILBERSCHATZ; SUDARSHAN, 2006). Uma lista telefônica, o registro de empregados em um livro, uma coleção de selos em um álbum, cada uma dessas séries de dados é um banco de dados.

Dentre as vantagens em se usar um banco de dados pode-se destacar a segurança, o armazenamento de dados de forma ordenada e a independência dos dados em relação às aplicações.

2.2.1 Sistema de gerenciamento de banco de dados (SGBD)

Um SGBD - Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados - é uma coleção de programas que permitem ao usuário definir, construir e manipular Bases de Dados para as mais diversas finalidades. O principal objetivo é retirar da aplicação cliente a responsabilidade de gerenciar o acesso, manipulação e organização dos dados (figura 1).

Figura 1 - Interação Usuário e SGBD

Fonte: autor da dissertação.

2.2.2 SQL

A *Structured Query Language*, SQL, que em português significa Linguagem de Consulta Estruturada, foi desenvolvida originalmente no início dos anos 70 nos laboratórios da IBM em San Jose, dentro do projeto w:System R, que tinha por objetivo demonstrar a viabilidade da implementação do modelo relacional proposto por Edgar Frank Codd (CODD, 1970).

A linguagem SQL é a mais usada e é um padrão nos bancos de dados, e isto decorre da sua simplicidade e facilidade de uso. Ela se diferencia de outras linguagens de consulta a banco de dados no sentido em que uma consulta SQL especifica a forma do resultado e não o caminho para se chegar lá.

ROB e CORONEL (2011) afirmam que:

Seu conjunto básico de comandos possui um vocabulário com menos de 100 palavras. E, o que é melhor, a SQL é uma linguagem não procedural: basta inserir o comando sobre o que deve ser feito. Não é necessário se preocupar com como deve ser feito. (ROB e CORONEL, 2011, p. 242)

A SQL apresenta uma série de comandos que permitem a definição dos dados, chamada de DDL (*Data Definition Language* – Definição de Dados Declarados), composta entre outros pelos comandos *Create*, que é destinado à criação do Banco de Dados, das tabelas que o compõe, além das relações

existentes entre as tabelas. Como exemplo da classe DDL temos os comandos *Create*, *Alter*, *Drop* e *Rename* (DATE, 2004).

Os comandos da série DML (*Data Manipulation Language* – Manipulação de Dados Declarados), destinados a consultas, inserções, exclusões e alterações em um ou mais registros de uma ou mais tabelas de maneira simultânea. Como exemplo de comandos da classe DML temos os comandos *Select*, *Insert*, *Update*, *Delete*, *Commit* e *Rollback*.

2.3 Interação da radiação gama com a matéria

Fótons emitidos por radionuclídeos são radiação eletromagnética que ocorrem na forma de raios X e raios gama. A diferença entre eles está na sua origem onde os raios X são emitidos durante um processo atômico envolvendo a desexcitação de elétrons e os raios gama são emitidos num processo de desexcitação do núcleo (KRANE, 1987). Uma vez que os raios X e raios gama são amplamente utilizados na pesquisa, na indústria e na medicina, é importante a identificação das principais características das amostras e das fontes radioativas. Isto pode ser possível via espectroscopia gama.

Um espectrômetro é um instrumento que fornece informações sobre a energia e a intensidade da radiação emitida por um radionuclídeo. Neste trabalho foram efetuadas medidas com fontes de radiação gama. No caso da detecção de raios gama, toda ou parte da energia do fóton incidente é transferida para um elétron no material do detector, produzindo um espectro que pode ser interpretado pela compreensão dos mecanismos básicos de interação dos fótons com o material do detector e pelas características do material do detector. Dentre os tipos de detectores usados em espectroscopia, destacam-se os semicondutores (KNOLL, 1989). Por conveniência, a palavra fóton, neste texto, se refere aos raios X e aos raios gama.

Para compreender o funcionamento dos detectores é necessário considerar as principais formas de interação da radiação gama com a matéria. Dentre os processos de interação da radiação gama com a matéria, os mais importantes, do ponto de vista de detecção da radiação gama, são o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares (TURNER, 2007). Cada um desses processos tem uma probabilidade de ocorrência que varia com a energia da radiação gama incidente e com o número atômico e a densidade do meio que

ocorrerá a interação. As faixas de número atômico e de energia em que cada um desses efeitos predomina podem ser observados na figura 2 (OKUNO, 2010). Podemos verificar que baixas energias e altos números atômicos favorecem o efeito fotoelétrico enquanto, para altas energias, a produção de pares é o único efeito importante.

Todos esses processos resultam em uma transferência parcial ou completa da energia da radiação gama para os elétrons do meio alvo e, assim, fornecem condições para sua detecção. Uma breve descrição de cada um desses principais processos será discutida a seguir.

O comportamento relativo destes três processos de interação da radiação gama com a matéria, para diferentes materiais absorvedores e energias dos fótons incidentes, é ilustrada na figura 2. A curva à esquerda representa a energia para a qual a absorção fotoelétrica e o espalhamento Compton são igualmente prováveis em função do número atômico do absorvedor. A curva à direita representa a energia para a qual o espalhamento Compton e a produção de pares são igualmente prováveis. Três regiões estão assim definidas na figura, dentro das quais a absorção fotoelétrica, espalhamento Compton, ou a produção de pares são dominantes.

Figura 2 - Faixas de predominância dos três tipos de interação da radiação gama com a matéria

Fonte: adaptado de OKUNO, 2010.

2.3.1 Efeito fotoelétrico

Efeito fotoelétrico é o processo pelo qual um fóton de energia $E = hf$ interage com um elétron ligado (maior probabilidade das camadas K e L), transferindo a ele toda a sua energia. Como resultado dessa interação, o fóton é totalmente absorvido pelo elétron ligado e desaparece. O elétron (fotoelétron) é ejetado com uma energia cinética E_c dada por

$$E_c = E - B \quad (1)$$

onde:

$E = hf$ é a energia do fóton incidente, em eV;

h é a constante de Planck ($h = 4,136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{Hz}^{-1}$);

f é a frequência do fóton incidente, em Hz;

B é a energia de ligação (*Binding Energy*) do elétron na respectiva camada, em eV.

O íon excitado formado após a emissão do fotoelétron, normalmente se desexcita por emissão de um ou mais fótons, que podem ter energia na faixa de raios X. No processo também pode haver a emissão de elétrons Auger (quando a energia de desexcitação do íon é transferida para um dos seus elétrons).

O efeito fotoelétrico não ocorre quando um fóton incide em um elétron livre. A absorção total somente ocorre se o elétron estiver ligado ao átomo pois o momento linear é conservado pelo recuo do átomo residual. Os elétrons mais ligados possuem maior probabilidade de absorção por efeito fotoelétrico, sendo que aproximadamente 80% dos processos de absorção fotoelétrica ocorrem na camada K, desde que a energia do fóton incidente exceda a energia de ligação correspondente.

A probabilidade de ocorrência do efeito fotoelétrico depende fortemente do número atômico Z do meio onde o efeito é observado e da energia $E = hf$ do fóton incidente, e pode ser representada pela secção de choque σ_{foto} para o efeito fotoelétrico. De uma maneira geral, a secção de choque σ_{foto} pode ser aproximada por (MUKKIN, 1987):

$$\sigma_{foto} \propto \frac{Z^5}{E^2} \quad (2)$$

Portanto, pela equação (2) observa-se que o efeito fotoelétrico é significativo em baixas energias e para materiais de elevado número atômico (figura 3) e é o principal mecanismo de interação da radiação gama com a matéria em baixas energias (até algumas centenas de *keV*).

A curva da secção de choque de absorção fotoelétrica para o Germânio, material semiconductor utilizado na detecção de radiação gama, em função da energia do fóton incidente, está, como exemplo, representada na figura 3 (XCOM, 2019).

A absorção fotoelétrica é o processo ideal quando há interesse em medir a energia do fóton incidente. Como a energia dissipada por emissão de raios X característicos e elétrons Auger frequentemente é absorvida no meio, um único pico (fotopico) aparece no espectro de energia absorvida, correspondendo à energia do raio gama incidente. O processo de absorção fotoelétrica converte a energia eletromagnética do fóton incidente em energia cinética de uma partícula carregada, um elétron.

Figura 3 - Secção de choque de absorção fotoelétrica para o Germânio ($Z = 32$) em função da energia

Fonte: adaptado de XCOM, 2019.

2.3.2 Efeito Compton

Efeito Compton ou espalhamento Compton é o processo pelo qual um fóton de energia $E = hf$ interage com um elétron livre (ou fracamente ligado) em repouso, transferindo a ele parte da sua energia. A energia do fóton incidente é muito maior a que a energia de ligação do elétron no átomo. Uma representação do efeito Compton pode ser vista na figura 4.

Figura 4 - Representação do Efeito Compton

Fonte: adaptado de MARTIN, 2006.

Como resultado dessa colisão elástica:

- o fóton é espalhado pelo elétron numa direção que forma um ângulo θ com a direção de propagação do fóton incidente e se propaga com uma energia $E' = hf'$ menor que a energia do fóton incidente ($E' < E$);
- o elétron é ejetado numa direção que forma um ângulo ϕ com a direção de propagação do fóton incidente e se propaga com uma energia $E_e = E - E'$.

Da conservação de energia e momento linear durante a colisão elástica entre o fóton incidente e o elétron livre, a energia E' do fóton espalhado é dada por (MUKKIN, 1987):

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (3)$$

onde (NIST, 2019):

m_0 é a massa de repouso do elétron ($m_0 = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$);

c é a velocidade da luz no vácuo ($c = 2,998 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$);

$m_0 c^2 = 8,187 \times 10^{-14} \text{ J} = 511 \text{ keV}$ é a energia de repouso do elétron.

A energia E_e do elétron ejetado é dada por (MUKKIN, 1987):

$$E_e = E - E' = E \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{E}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \right] \quad (4)$$

Verifica-se da equação (3) que a energia E' do fóton espalhado depende não apenas da energia E do fóton incidente, mas também do ângulo de espalhamento θ .

Para um ângulo de espalhamento muito pequeno, $\theta \cong 0$, o fóton espalhado se propaga aproximadamente na mesma direção de propagação do fóton incidente e carrega consigo praticamente toda a sua energia, ou seja, $E' \cong E$ e $E_e \cong 0$. O elétron, neste caso, possui uma energia muito baixa e nenhuma energia é transferida ao detector. Esse resultado mostra que a energia do fóton espalhado nunca deve exceder a energia do fóton incidente.

Para um ângulo de espalhamento igual a 180° o fóton incidente é retroespalhado e ocorre a máxima transferência de energia para o elétron na interação. A energia máxima ($E_{e_{max}}$) do elétron ejetado é dada por:

$$E_{e_{max}} = E \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{2E}{m_0 c^2}} \right] \quad (5)$$

Para ângulos de espalhamento entre 0 e 180° , a quantidade de energia transferida para o elétron deve estar entre $E_e \cong 0$ e $E_{e_{max}}$. Desta forma, no

espalhamento Compton, menos de 100% da energia dos fótons incidentes é transferida ao detector em cada interação.

Analisando a equação (5) com relação à energia dos fótons incidentes, para $E \gg m_0c^2$, a máxima energia que pode ser transferida ao elétron é aproximadamente igual à energia do fóton incidente, ou seja, $E_{e_{max}} \cong E$. Isto significa que à medida que a energia do fóton incidente aumenta, o padrão de espalhamento começa a favorecer que o fóton seja espalhado na direção do fóton incidente. Para valores de $E \ll m_0c^2$, a máxima energia que pode ser transferida ao elétron se aproxima de zero, ou seja, $E_e \cong 0$. Isto significa que quanto menor a energia do fóton incidente, menor a chance que uma interação proporcione uma grande transferência de energia ao elétron. Analisando a equação (3) para fótons incidentes de alta energia ($E \gg m_0c^2$), a energia dos fótons retroespalhados ($\theta = 180^\circ$) é aproximadamente igual a 255,5 keV, ou seja, $E' \cong m_0c^2/2$, enquanto que a energia dos fótons espalhados com ângulo de espalhamento $\theta = 90^\circ$ é aproximadamente igual a 511 keV, ou seja, $E' \cong m_0c^2$.

As relações que determinam a secção de choque Compton indicam que o espalhamento Compton é dominante em energias intermediárias (entre algumas centenas de keV até aproximadamente 5 MeV - Figura 2) (OKUNO, 2010) e são proporcionais à densidade de elétrons no meio, variando linearmente com Z. À medida que a energia do fóton incidente aumenta, diminui a probabilidade desta interação.

2.3.3 Produção de pares

Produção de pares é um processo de absorção no qual o fóton incidente desaparece após a interação, dando origem ao aparecimento de duas partículas carregadas: o elétron e um pósitron.

O processo ocorre dentro do campo coulombiano do núcleo¹, resultando na conversão de um fóton em um par elétron-pósitron: $\gamma \rightarrow e^- + e^+$ (Figura 6). O pósitron (e^+) é a antipartícula do elétron, sua carga é positiva e os valores de sua carga e massa são iguais às do elétron.

¹ A produção de pares também pode ocorrer, com menor probabilidade, no campo coulombiano de um elétron atômico. O presente texto aborda apenas a interação com o campo coulombiano do núcleo.

Dessa forma, como esse processo envolve a criação de massa a partir de energia ($E = m_0c^2$), a produção de pares só ocorre se a energia E do fóton incidente for, no mínimo, igual a soma das energias de repouso das duas partículas, ou seja, 1022 keV . Na prática, a evidência da produção de pares é vista apenas dentro de um espectro de raios gama, quando a energia é muito maior que 1022 keV . Se a energia do fóton incidente é maior que 1022 keV , ou seja, se $E > 2m_0c^2$, a energia em excesso é transferida na forma de energia cinética das partículas (E_{e^-} e E_{e^+}). Assim, como a energia é conservada no processo temos (MUKKIN, 1987):

$$E = 2m_0c^2 + E_{e^-} + E_{e^+} \quad (6)$$

onde E_{e^-} e E_{e^+} são as energias cinéticas do elétron e do pósitron, respectivamente.

As energias cinéticas do elétron e do pósitron não são, necessariamente, iguais, mas em média podemos considerar. Assim, a energia média do elétron e do pósitron é dada por:

$$\bar{E}_{e^-} = \bar{E}_{e^+} = \frac{E - 2m_0c^2}{2} \quad (7)$$

Figura 5 - Representação da produção de pares em um campo nuclear: Conversão de um fóton em um par elétron-pósitron

Fonte: adaptado de L'ANNUNZIATA, 2003.

A produção de pares é o mecanismo predominante de absorção de fótons para energias acima de 2 MeV (L'ANNUNZIATA, 2003).

O elétron e o pósitron penetram poucos milímetros antes de perder toda a energia cinética no meio absorvedor. No final do seu percurso, o pósitron interage com um elétron e sofre aniquilação. Nesse processo de aniquilação de pares, a massa das partículas é convertida em energia ($E = m_0c^2$) num processo inverso ao da produção de pares, onde um pósitron (e^+) e um elétron (e^-) se combinam para formar dois raios gama: $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$. Como a energia é conservada no processo, o equivalente ($m_0c^2 = 511 \text{ keV}$) às energias de repouso do elétron e do pósitron deve aparecer como energia (E_γ) dos fótons emitidos na aniquilação, ou seja, cada fóton é emitido com uma energia igual a 511 keV:

$$(m_0c^2)_{e^+} + (m_0c^2)_{e^-} = 2E_\gamma \quad (8)$$

Como o momento linear é conservado, os fótons de aniquilação são emitidos na mesma direção, mas em sentidos opostos (Figura 6).

Figura 6 - Aniquilação de pares. A interação entre um pósitron e um elétron e a conversão de suas massas em dois fótons de 511 keV. de energia

Fonte: adaptado de L'ANNUNZIATA, 2003.

Os fótons de aniquilação (raios gama) podem ser absorvidos ou escapar do cristal do detector. Os chamados picos de escape, observados nos espectros de raios gama onde o processo de produção de pares é predominante, são evidência disso. Se um dos fótons de aniquilação de 511 keV escapa do cristal do detector, então um pico na energia $E - m_0c^2$ é observado (escape simples ou primeiro escape). Neste caso, apenas um dos fótons de aniquilação foi absorvido no meio. E representa a energia do fóton incidente. Se ambos os fótons de aniquilação escaparem, então um pico na energia $E - 2m_0c^2$ é observado (escape duplo ou segundo escape). Este pico corresponde à energia cinética total do par elétron-pósitron (Figura 7). Caso ambos sejam absorvidos, os eventos corresponderão ao pico de absorção total na energia E (fotopico).

Figura 7 - Espectro de reações de captura de nêutrons térmicos.

AT = pico de absorção total, PE = pico de primeiro escape e SE = pico de segundo escape

Fonte: SEMMLER, 2006.

A detecção da radiação gama é possível pelas interações dos elétrons secundários produzidos pelos processos acima descritos, no meio absorvedor. Os fótons (raios X e radiação gama) produzem elétrons dentro do volume sensível dos

detectores, tais como cristais de iodeto de sódio, germânio e silício. No germânio e silício as interações produzem pares de elétrons-lacuna, que são coletados e dão origem a pulsos, cuja amplitude está relacionada com a energia depositada no cristal.

2.4 Calibração do sistema de detecção

2.4.1 Introdução

A espectrometria gama é um método analítico que permite identificar e quantificar a presença de radionuclídeos, a partir da análise dos espectros de emissão de energia da radiação gama. Para tal, o sistema de detecção utilizado é um espectrômetro gama.

Os detectores de HPGe são detectores semicondutores que apresentam grande poder de resolução em energia. A sua excelente resolução em energia torna este tipo de detector ideal para a aplicação em espectroscopia gama ou X. A superioridade dos detectores de germânio, em resolução de energia, permite a separação de energias próximas da radiação incidente, o que não é possível com detectores do tipo NaI (TI). Os detectores do tipo NaI (TI) podem ser vantajosos quando a separação entre os picos é grande e necessita-se de uma eficiência de detecção maior.

Na caracterização de um sistema de detecção, os parâmetros de grande importância a serem determinados são: calibração em energia e a calibração da eficiência de detecção em função da energia, no intervalo de energia de interesse e na geometria do arranjo experimental.

2.4.2 Calibração em energia

A análise de um espectro gama implica, primeiramente, na atribuição dos valores de energia aos picos do espectro e, posteriormente, na determinação do número de contagens de cada pico. A calibração em energia consiste na determinação de uma relação entre as energias dos raios gama detectados e as respectivas posições dos picos no espectro. O procedimento consiste na aquisição de espectros gama de fontes radioativas padrão cujas energias da radiação gama emitidas são conhecidas e posterior comparação com as posições dos respectivos fotopicos (GILMORE, 2008).

A relação entre as energias dos raios gama e as posições dos picos no espectro é, geralmente, representada pela função linear (GILMORE, 2008):

$$E = I + GC \quad (9)$$

onde:

E é a energia do raio gama, em *keV*;

I é o intercepto (coeficiente linear), em *keV*;

G é o coeficiente linear (gradiente da curva de calibração), em *keV/canal*;

C é o número do canal (centroide) que representa a posição do pico do espectro em relação à energia E , em *canal*.

Se houver a necessidade da determinação das posições dos fotopicos com alta precisão é necessário corrigir possíveis níveis de não linearidade do sistema e, neste caso, a relação das energias dos raios gama e as posições dos picos no espectro pode ser representada por uma função quadrática ou de ordem superior (GILMORE, 2008).

2.4.3 Eficiência de detecção

Quando o raio gama emitido por uma fonte radioativa incide sobre o cristal do detector, ele pode ser detectado através dos três processos: efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares. Os detectores semicondutores dão origem a um pulso ou sinal de saída depois que o fóton incidente interage dentro de seu volume ativo. A radiação, como os raios gama, deve primeiro passar por uma interação considerável no cristal do detector antes que a detecção seja possível. Uma vez que os fótons podem percorrer grandes distâncias entre as interações, os detectores, geralmente, têm uma eficiência menor que 100%. Por essa razão, é necessário ter um valor preciso da eficiência absoluta do sistema de detecção. Para fazer uma análise quantitativa com espectrometria de raios gama, é necessário relacionar a intensidade (contagens) dos fótons detectados com aqueles emitidos pela fonte ou amostra radioativa. Essa relação pode ser descrita por uma função da energia dos fótons incidentes e é definida como a razão do número de fótons que chegam ao detector (contagens), em relação ao número total de fótons emitidos pela fonte. A eficiência de detecção varia com a energia do fóton

incidente no detector e uma calibração do sistema de detecção deve ser determinada.

A eficiência absoluta depende não apenas das características do detector, mas também dos detalhes da geometria de contagem (ou seja, distância da fonte ao detector). Usualmente², consideram-se dois tipos de eficiências absolutas: a eficiência total (ε_T) e a eficiência de pico (ε_p).

A eficiência total (ε_T) relaciona o número de raios gama detectados com o número de raios gama emitidos pela fonte. Nesse caso, o número de raios gama detectados está relacionado com as contagens obtidas para todo o espectro gama. Isso leva em conta as contagens no pico de absorção total e todas as contagens representadas pelo contínuo Compton. A eficiência total pode variar de acordo com a energia da radiação gama, com as dimensões do cristal e com a distância entre a fonte radioativa e o cristal do detector.

A eficiência de pico (ε_p) relaciona o número de raios gama detectados no fotopico (absorção total) com o número de raios gama emitidos pela fonte, ou seja, relaciona a área do fotopico (contagens), para uma determinada energia dos fótons incidentes, com o número de raios gama emitidos pela fonte. A eficiência de pico é conhecida por *Full-Energy Peak Efficiency* (FEPE). A eficiência de pico é a eficiência de interesse no presente trabalho. No texto, a palavra "absoluta" foi omitida, assim, entende-se por eficiência absoluta de pico simplesmente eficiência de pico ou eficiência.

Em medidas de atividade de uma fonte radioativa, da probabilidade de emissão gama por decaimento de um radionuclídeo, ou na determinação da concentração de elementos em amostras utilizando-se o método k_0 de análise por ativação neutrônica, um dos parâmetros mais importantes é a eficiência de detecção, no intervalo de energia de interesse e na geometria do arranjo experimental. Há interesse em se determinar a razão entre o número de eventos registrados no pico de absorção total e o número de fótons emitidos pela fonte, ou seja, a eficiência de pico. Neste caso, a eficiência de pico (ε_p) pode ser representada por (KNOLL, 1989):

² As eficiências relativa e intrínseca não foram consideradas no presente trabalho.

$$\varepsilon_p(E) = \frac{N_p(E)}{A \cdot I_\gamma(E) \cdot t_m} \cdot f_i \quad (10)$$

onde:

$N_p(E)$ é a área sob o pico de absorção total para a energia gama considerada;

$I_\gamma(E)$ é a probabilidade da emissão gama por decaimento da linha considerada;

A é a atividade da fonte;

t_m é o tempo de medida;

f_i são fatores de correção para tempo morto, geometria de detecção, decaimento radioativo, atenuação na fonte, correção para soma em cascata.

Esta eficiência é obtida pela determinação das atividades de fontes radioativas padrão que possuem valores de intensidades gama por decaimento bem conhecidas. As atividades são obtidas através das contagens dos raios gama emitidos pelas fontes e que são detectados por um detector do tipo HPGe (Li). Uma vez obtidas as contagens, as atividades de calibração A_0 das fontes radioativas padrão são convertidas nas atividades efetivas A , correspondentes à data da medição, pela aplicação da lei exponencial do decaimento radioativo, isto é:

$$A = A_0 e^{-\lambda t_d} \quad (11)$$

onde:

$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ é a constante de desintegração;

$T_{1/2}$ é a meia-vida;

t_d é o tempo de decaimento decorrido desde que as fontes foram calibradas até a data da medição.

3 MODELAGEM DO SOFTWARE

3.1 Linguagem de modelagem unificada

A *Unified Modeling Language*, ou Linguagem de Modelagem Unificada, (UML) é a linguagem mais utilizada atualmente para especificação e projeto de software na abordagem orientada a objetos. A UML é o instrumento que permite a modelagem do software “visualmente”, tornando fácil partir dos requisitos do sistema à implementação de uma forma amigável, (BRAHA e RUMBAUGH, 2006).

GUEDES (2011) afirma que:

A UML – Unified Modeling Language ou Linguagem de Modelagem Unificada - é uma linguagem visual utilizada para modelar softwares baseados no paradigma de orientação a objetos. É uma linguagem de modelagem de propósito geral que pode ser aplicada a todos os domínios da aplicação. (GUEDES, 2011, p. 19)

A UML abrange todas as etapas da produção de software, mas principalmente é utilizada para traduzir os requerimentos do sistema (em alto nível e mais próximos do usuário) em componentes codificáveis (mais próximos da aplicação). Mesmo estando entre essas duas camadas, a UML pretende ser fácil de entender para todos os envolvidos (BRAHA e RUMBAUGH, 2006).

Neste sentido, GUEDES (2011) afirma que:

Deve ficar bem claro, porém, que a UML não é uma linguagem de programação, e sim uma linguagem de modelagem, uma notação, cujo objetivo é auxiliar os engenheiros de software a definirem as características do sistema (...). Tais características podem ser definidas por meio da UML antes do software começar a ser realmente desenvolvido. (GUEDES, 2011, p. 19)

A UML é uma linguagem, e como tal, é um meio de comunicação. PENDER (2004) afirma que através de diagramas gráficos é mais fácil discutir e visualizar as ideias e soluções entre a equipe, ou com o usuário. Muito mais simples do que com programas em código.

3.2 Diagrama de casos de uso

No intuito de fornecer ao usuário uma apresentação simples sobre as funcionalidades do sistema, o diagrama de casos de uso apresenta-se como alternativa viável, uma vez que, de acordo com GUEDES (2011, p. 52), “o diagrama de casos de uso procura, por meio de uma linguagem simples, possibilitar a compreensão do comportamento externo do sistema (...) por qualquer pessoa (...)”.

FOWLER (2005) afirma que:

Os casos de uso são uma técnica para captar os requisitos funcionais de um sistema. Eles servem para descrever as interações típicas entre os usuários de um sistema e o próprio sistema, fornecendo uma narrativa sobre como o sistema é utilizado. (FOWLER, 2005, p. 104)

Pode-se dizer que o diagrama de caso de uso fornece uma visão externa do sistema, delimitando o seu escopo e indicando os serviços que ele tem e os serviços que ele fornece (PENDER, 2004). O diagrama de casos de uso também é utilizado para demonstrar a interação do usuário, através de atores, com o sistema.

A figura 8 apresenta os casos de uso do sistema desenvolvido.

Figura 8 - Diagrama de casos de uso

Fonte: autor da dissertação.

3.2.1 Caso de uso: criar projeto

O usuário terá um menu para criar os projetos.

Tabela 1 - Caso de uso: Criar projeto

Ator primário	Pesquisador.
Ator secundário	Não há.
Resumo	Esse caso de uso demonstra as etapas para criar um projeto.
Pré-condições	Estar cadastrado no sistema e possuir perfil de pesquisador.
Fluxo principal	<ol style="list-style-type: none"> 1) Clicar no menu “Projetos”; 2) Clicar no submenu “Meus projetos”; 3) Clicar no botão “Adicionar”.
Fluxo alternativo	Caso não sejam inseridos todos os dados o sistema não conclui o cadastro do novo projeto.
Pós-condições	Criar um subprojeto.
Regra de negócio	Todos os campos são obrigatórios.

Fonte: autor da dissertação.

3.2.2 Caso de uso: criar subprojeto

O usuário terá um menu para criar os subprojetos de um projeto principal. Cada projeto principal pode possuir quantos subprojetos forem necessários, adequando-se à necessidade do pesquisador.

Tabela 2 - Caso de uso: Criar subprojeto

Ator primário	Pesquisador.
Ator secundário	Não há.
Resumo	Esse caso de uso demonstra as etapas para criar um subprojeto.
Pré-condições	Existir um projeto cadastrado no sistema.
Fluxo principal	<ol style="list-style-type: none"> 1) Clicar no ícone “Subprojetos”; 2) Clicar no botão “Adicionar”.
Fluxo alternativo	Caso não sejam inseridos todos os dados o sistema não conclui o cadastro do novo subprojeto.
Pós-condições	Não há.
Regra de negócio	Todos os campos são obrigatórios.

Fonte: autor da dissertação.

3.2.3 Caso de uso: cadastrar espectro

O usuário terá um menu para cadastrar os espectros de um subprojeto, de um projeto principal. Cada subprojeto pode possuir quantos espectros forem

necessários, adequando-se à necessidade do pesquisador. Os espectros cadastrados são atrelados, exclusivamente, a um único subprojeto, não havendo compartilhamento entre os subprojetos de um projeto principal.

Tabela 3 - Caso de uso: Cadastrar espectro

Ator primário	Pesquisador.
Ator secundário	Colaborador.
Resumo	Esse caso de uso demonstra as etapas para cadastrar um espectro.
Pré-condições	Existir um subprojeto cadastrado no sistema.
Fluxo principal	<ol style="list-style-type: none"> 1) Clicar no ícone “Subprojetos”; 2) Clicar no botão “Espectros”; 3) Clicar no botão “Adicionar”.
Fluxo alternativo	Caso não sejam inseridos todos os dados obrigatórios o sistema não conclui o cadastro do novo espectro do subprojeto selecionado.
Pós-condições	Não há.
Regra de negócio	Alguns campos são obrigatórios.

Fonte: autor da dissertação.

3.2.4 Caso de uso: importar espectro

O usuário terá um botão para realizar a importação dos dados de um espectro para um determinado subprojeto.

Tabela 4 - Caso de uso: Importar espectro

Ator primário	Pesquisador.
Ator secundário	Colaborador.
Resumo	Esse caso de uso demonstra as etapas para importar os dados de um espectro.
Pré-condições	Existir um subprojeto cadastrado no sistema.
Fluxo principal	<ol style="list-style-type: none"> 1) Clicar no ícone “Subprojetos”; 2) Clicar no botão “Espectros”; 3) Clicar no botão “Importar”.
Fluxo alternativo	Caso não sejam inseridos todos os dados obrigatórios e selecionado o arquivo o sistema não conclui a importação dos dados do espectro.
Pós-condições	Não há.
Regra de negócio	O arquivo a ser importado deve estar no formato XLS ou XLSX.

Fonte: autor da dissertação.

3.2.5 Caso de uso: visualizar eficiência

O usuário terá um menu para visualizar a eficiência absoluta, para cada subprojeto, de um projeto principal.

Tabela 5 - Caso de uso: Visualizar eficiência

Ator primário	Pesquisador.
Ator secundário	Colaborador.
Resumo	Esse caso de uso demonstra as etapas para visualizara o gráfico e o cálculo da eficiência para um subprojeto.
Pré-condições	Existir espectros cadastrados em um subprojeto no sistema.
Fluxo principal	1) Clicar no ícone “Subprojetos”; 2) Clicar no botão “Eficiência”.
Fluxo alternativo	Caso não haja espectros cadastrados não serão exibidos os gráficos e os cálculos.
Pós-condições	Não há.
Regra de negócio	Não há.

Fonte: autor da dissertação.

3.3 Diagrama de classes

O diagrama de classe fornece uma visão de todas as estruturas que são manipuladas e/ou gerenciadas pelo sistema. O elemento fundamental deste tipo de diagrama são as classes.

GUEDES, 2018 afirma que:

Seu principal enfoque está em permitir a visualização das classes que comporão o sistema com seus respectivos atributos e métodos, bem como em demonstrar como as classes do diagrama se relacionam, complementam e transmitem informações entre si. Esse diagrama apresenta uma visão estática de como as classes estão organizadas, preocupando-se em como definir a estrutura lógica delas. (GUEDES, 2018, p. 112)

Além de descrever os tipos de objetos presentes, é possível visualizar seus relacionamentos. FOWLER (2005) ratifica que:

Um diagrama de classes descreve os tipos de objetos presentes no sistema e os vários tipos de relacionamentos estáticos existentes entre eles. Os diagramas de classes também mostram as propriedades e as operações de uma classe e as restrições que se aplicam à maneira como os objetos estão conectados. (FOWLER, 2005, p. 52)

A figura 9 apresenta as classes do sistema desenvolvido e como elas se relacionam.

Figura 9 - Diagrama de classes

Fonte: autor da dissertação.

4 IMPLEMENTAÇÃO DO SOFTWARE

Têm-se, nesse capítulo, os tópicos referentes à implementação do software apresentado neste trabalho.

4.1 Técnicas e ferramentas utilizadas

Seguem, nos tópicos a seguir, a apresentação das principais ferramentas e técnicas utilizadas no desenvolvimento do presente software. Destaca-se o uso da linguagem de programação Python.

4.1.1 Python

Linguagem criada na década de 1990 por Guido van Rossum com foco em usuários como físicos e engenheiros. Por ser uma linguagem de altíssimo nível possui fácil entendimento “e que suporta múltiplos paradigmas de programação: imperativo, orientado a objetos e funcional” (CRUZ, 2015, p. 3).

Com uma linguagem clara e, de certa forma, resumida, a legibilidade do código escrito é favorecida, tornando-a uma linguagem com maior produtividade. (BORGES, 2010).

Dentre as principais características da linguagem Python destacam-se:

- a) Baixa curva de aprendizagem;
- b) Simplicidade do código;
- c) Biblioteca de funções;
- d) Multiplataforma;
- e) Software livre.

4.1.2 Pycharm

PyCharm é um ambiente integrado de desenvolvimento, isto é, um ambiente para programação que é capaz de proporcionar ao desenvolvedor um ambiente único, compreensivo e dotado de ferramentas que agilizam o processo de construção de um software, utilizado, especificamente para linguagem de programação Python. De propriedade da empresa JetBrains, possui versões paga

(*Professional*) e gratuita (*Community*). Neste trabalho, em virtude da condição de Professor do Instituto Federal de Rondônia, fora utilizada a versão profissional, uma vez que professores são contemplados com um programa da JetBrains de uso irrestrito de sua ferramenta de forma gratuita.

4.2 Implementação do software

Nos tópicos a seguir são apresentadas as implementações efetuadas e a operacionalização do software.

4.2.1 Criação de projetos e subprojetos

Para fins de organização, o software organiza-se com a criação de projetos e subprojetos. Para cada projeto é possível realizar a contagem do espectro em diferentes posições do detector o que reflete, diretamente, nos valores obtidos nas contagens e, posteriormente, no cálculo da eficiência absoluta e plotagem do gráfico. A fim de organizar esses dados, um projeto é dividido em subprojetos, a critério do pesquisador, para que seja possível organizar e sistematizar os dados das contagens dos espectros. Os trechos do código que seguem demonstram a rotina de criação de um projeto, Tabela 6, e a rotina de criação de um subprojeto, Tabela 7.

Tabela 6 - Código fonte para criar projeto

```
@login_required
def project_new(request):
    if request.method == 'POST':
        form = ProjetoForm(request.POST)

        if form.is_valid():
            projeto = Projeto()

            projeto.titulo = form.cleaned_data['titulo']
            projeto.inicio = form.cleaned_data['inicio']
            projeto.status = form.cleaned_data['status']
            projeto.detector = form.cleaned_data['detector']
            projeto.user = request.user

            projeto.save()

            messages.success(request, 'Projeto registrado.')

            return redirect('project')
        else:
            messages.error(request, 'Todos os campos são obrigatórios.')

    form = ProjetoForm()
```

```

context = {
    'form': form
}

return render(request, 'portal/project_new.html', context)

```

Fonte: autor da dissertação.

Tabela 7 - Código fonte para criar subprojeto

```

@login_required
def project_sub_new(request, project_id):
    projeto = get_object_or_404(Projeto, id=project_id)

    if request.method == 'POST':
        form = SubProjetoForm(request.POST)

        if form.is_valid():
            subprojeto = SubProjeto()

            subprojeto.posicao = form.cleaned_data['posicao'].upper()
            subprojeto.projeto = projeto

            subprojeto.user = request.user

            subprojeto.save()

            messages.success(request, 'Subprojeto registrado.')

            return redirect('project')

    form = SubProjetoForm()

    context = {
        'form': form,
        'projeto': projeto
    }
    return render(request, 'portal/project_sub_new.html', context)

```

Fonte: autor da dissertação.

4.2.2 Importação dos dados do espectro

No intuito de facilitar o processo de cadastro dos espectros, de um subprojeto, no sistema, será possível realizar a importação de um arquivo CSV (*Comma-Separated Values*), arquivo separado por vírgulas. Esse tipo de arquivo armazena dados, sem formatação, que podem ser usados nos mais variados sistemas de informação. O processo de importação minimiza, ainda mais, a incidência de erros no momento da digitação dos dados por parte do operador do sistema, o que garante maior confiabilidade nos dados inseridos no sistema e, posteriormente, nos cálculos por ele executados. São importados os dados como data da contagem, energia, contagem por segundo, resolução e canal.

4.2.3 Cálculo da eficiência

A eficiência é calculada, automaticamente, no momento da inserção ou da importação do espectro para o software. Nesse momento o sistema utiliza os parâmetros do espectro e da fonte radioativa e, sem intervenção do utilizador, realiza todo o cálculo da eficiência, conforme demonstrado na Tabela 8.

Tabela 8 - Código fonte para cálculo da eficiência

```
# CÁLCULO DA EFICIÊNCIA
    for i in fonte.dados:
        if i.energia == lista_energia[importado]:
            gamma = float(i.emissao_gama) / 100
            incerteza_gamma = float(i.incerteza_emissao_gama) /
10000
            inc_perc = 100 * incerteza_gamma / gamma

            eficiencia = float(lista_area[importado]) / (
                float(fonte.atividade_inicial) * float(gamma) *
fator_d * fator_c * float(
                imported_data[1][1]))

            incerteza = math.sqrt((float(lista_incerteza[importado]) ** 2) + (
                (float(fonte.incerteza_atividade_inicial) / 2) ** 2)
+ (
                (incerteza_gamma / gamma) ** 2) + (
incerteza_fator_d ** 2) + (incerteza_fator_c ** 2))) / 100

            incerteza_percentual = incerteza / eficiencia * 100
```

Fonte: autor da dissertação.

4.2.4 Apresentação do gráfico da eficiência

Para gerar o gráfico da eficiência, além de se obter os parâmetros que estão armazenados no banco de dados, conforme demonstrado na Tabela 9.

Tabela 9 - Código fonte para obter os dados do gráfico da eficiência

```
grafico = Espectro.objects.filter(subprojeto=subprojeto,
incluir=True).order_by(
    'fonte__certificado',
    'hora_contagem').values_list('ln_eff', 'ln_eg', 'eficiencia', 'energia',
    'ln_inc_eff', 'fonte__numero',
    'fonte__simbolo', 'fonte__certificado')

ln_eff = [float(obj[0]) for obj in grafico]
ln_eg = [float(obj[1]) for obj in grafico]
ln_inc_eff = [float(obj[4]) for obj in grafico]
fonte = ['<p style="font-size: 11pt"><strong>Fonte: </strong>' +
str(obj[5]) + obj[6] + ', ' + obj[
```

```

7] + '<br><strong>Energia (keV): </strong>' + str(obj[3]) +
'</p>' for obj in grafico]

eff = [float(obj[2]) for obj in grafico]
eg = [float(obj[3]) for obj in grafico]

dados_grafico = []
for i in range(0, grafico.count()):
    dados_grafico.append([ln_eg[i], ln_eff[i], ln_eff[i] +
ln_inc_eff[i], ln_eff[i] - ln_inc_eff[i], fonte[i]])

dados_grafico_linear = []
for i in range(0, grafico.count()):
    dados_grafico_linear.append([eg[i], eff[i]])

```

Fonte: autor da dissertação.

O software utiliza a biblioteca de criação de gráficos da Google, o Google *Charts*, através do código *JavaScript* embutido na página, conforme demonstrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Código fonte para gerar o gráfico da eficiência

```

<script type="text/javascript">
    google.charts.load("current", {packages: ["corechart"]});
    google.charts.setOnLoadCallback(drawChart);

    function drawChart() {
        var data = new google.visualization.DataTable();
        data.addColumn('number', 'x');
        data.addColumn('number', 'Energia (keV)');
        data.addColumn({type: 'number', role: 'interval'});
        data.addColumn({type: 'number', role: 'interval'});
        data.addColumn({type: 'string', role: 'tooltip', 'p':
{'html': true}});
        data.addRows([[ dados_grafico|safe ]]);

        var options = {
            title: 'Eficiência - "{ subprojeto.projeto.titulo
}} - {{ subprojeto.posicao }}"',
            tooltip: {
                showColorCode: true,
                isHtml: true,
            },
            hAxis: {
                title: 'Energia (keV)'
            },
            vAxis: {
                title: 'Eficiência'
            },
            pointShape: 'diamond',
            chartArea: {
                left: 60,
                top: 80,
                width: '90%'
            },
            legend: {
                position: 'bottom',

```

```

        alignment: 'start'
    },
    trendlines: {
        0: {
            type: 'polynomial',
            degree: {{ ajuste }},
            showR2: {{ r2|lower }},
            visibleInLegend: {{ legenda|lower }},
            lineWidth: 3,
            opacity: 0.5,
            color: 'red'
        }
    }
};
var chart = new
google.visualization.ScatterChart(document.getElementById('eficiencia')
);
{#var chart = new
google.visualization.LineChart(document.getElementById('eficiencia'));#
}

chart.draw(data, options);
var imageData = chart.getImageURI().split(',')[1];
$("#save-png").attr("href", "data:image/png;base64," +
imageData)
    .attr("download", "grafico_log_eficiencia_{{
subprojeto.projeto.titulo }} - {{ subprojeto.posicao }}.png");

var val_legend = chart('legend')

$('#legend_value').html(val_legend)
}

</script>

```

Fonte: autor da dissertação.

5 PARTE EXPERIMENTAL

5.1 Descrição do espectrômetro de HPGe

O detector utilizado foi um detector semicondutor do tipo germânio hiper puro (HPGe), marca Canberra modelo GX3018 (Canberra 8), de geometria cilíndrica e eficiência relativa de 30% para a energia de 1332,5 keV do ^{60}Co . Para esta energia, a resolução obtida experimentalmente foi de 1,66 keV. A eletrônica associada é a convencional para espectroscopia simples. O detector está ligado ao analisador multicanal integrado Canberra, modelo DSA-LX, de 16000 canais e um microcomputador PC compatível (Figura 10). O software de aquisição dos espectros gama foi o Genie 2000. O sistema de espectrometria gama está localizado em uma das salas de contagens do Laboratório de Ativação Neutrônica do Centro do Reator de Pesquisas do IPEN. A Tabela 11 apresenta algumas especificações do detector HPGe utilizado no presente trabalho

Figura 10 - Sistema de espectrometria gama (Canberra 8)

Fonte: autor da dissertação.

Tabela 11 - Especificações do detector do tipo HPGe, modelo GX3018 - (Canberra 8).

Eletrônica		DSA-LX
Software		Analizador Multicanal Canberra
Detector		Genie 2000
Crisotato		Canberra GX-3018
Número de série		7500LS
Tensão de operação (V)		5488
		(+) 4000
Cristal do Detector	Diâmetro (mm) A	62
	Comprimento (mm) B	40,7
	Esessura da Topo (mm) C	$0,3 \cdot 10^{-3}$
	cama morta Lateral (mm) I	1,26
Tampa superior	Diâmetro (mm) E	76,2
	Esessura (mm) F	0,6
	Material	Carbono
Distância da tampa superior ao cristal (mm) D		5
Núcleo do cristal	Diâmetro (mm) G	7,5
	Altura (mm) H	26
Volume sensível do cristal (cm³)		~122

Fonte: CANBERRA.

Um desenho esquemático das dimensões identificadas por A, B, C, D, E, F, G, H e I na Tabela 13 está apresentado na figura 11.

Figura 11 - Representação esquemática das dimensões do detector do tipo HPGe, modelo GX3018 - (Canberra 8)

Fonte: autor da dissertação.

Nas figuras 12 e 13 estão representados os diagramas esquemáticos do arranjo experimental para as medidas com o espectrômetro gama.

Figura 12 - Representação esquemática, fora de escala, do arranjo experimental para as medidas com o espectrômetro gama (Canberra 8).

Fonte: autor da dissertação.

Na Figura 12:

- 1: representa o invólucro de alumínio onde o cristal de germânio do detector está inserido. Na face superior do invólucro está a janela de carbono;
- 2: suporte de alumínio. O suporte de alumínio é encaixado na base da blindagem de chumbo (6). P₀, P₁, P₂ e P₃ são as posições (prateleiras) de contagem. A posição P₃ (posição de referência) está situada a 10 cm da face superior do invólucro de alumínio do detector. A posição P₃ foi a utilizada no presente trabalho;
- 3: porta amostras (disco) de lucite. Na parte central do porta amostras (1,1 mm de espessura) é colocada a fonte radioativa padrão para a medida da atividade. O porta amostra de lucite pode ser inserido nas prateleiras P₁, P₂ ou P₃. Para a posição P₀, outro porta amostras de lucite é utilizado.;
- 4: tampa de lucite (1,7 mm de espessura). A tampa de lucite está localizada abaixo da posição P₀ (5). A principal função da tampa de lucite é proteger a janela de carbono do detector e evitar riscos de contaminação do detector e efeitos de *Bremsstrahlung*;

- 5: Posição da tampa de lucite. A tampa de lucite está situada a 7,4 mm da face superior do invólucro de alumínio do detector. Quando a posição P_0 é utilizada, o porta amostras de lucite (3) é colocado sobre a tampa de lucite;
- 6: Blindagem modelo 747 - Canberra (Figura 13);
- 7: suporte de alumínio (2) com o porta amostras de lucite (3) colocado na posição de contagem P_3 e a tampa de lucite (4) localizada abaixo da posição P_0 (5).

Figura 13 - Representação esquemática do arranjo experimental para as medidas com o espectrômetro gama (canberra 8) – Detector e blindagem.

Fonte: autor da dissertação.

5.2 Determinação da curva de eficiência do detector de HPGe

A determinação da eficiência de pico em função da energia foi realizada medindo-se a eficiência de pico nas condições de referência, isto é, para fontes radioativas padrão puntiformes e para uma grande distância fonte-detector onde os efeitos de soma em cascata (*true-coincidence summing effects - TCS*) são desprezíveis. O efeito da soma em cascata depende da probabilidade de que dois raios gama emitidos simultaneamente sejam detectados simultaneamente. Esta é

uma função da geometria, do ângulo sólido subentendido no detector pela fonte. De acordo com GILMORE (2008), a chance de que dois raios gama emitidos simultaneamente alcancem o detector ao mesmo tempo é de 0,04% para uma distância fonte-detector igual a 10 cm.

Embora possa ser escolhida qualquer distância fonte-detector para a qual os efeitos de soma em cascata sejam desprezíveis (no presente trabalho acima de 10 cm), a distância não deve ser muito grande para evitar tempos de contagem excessivamente longos. A distância mínima requerida para manter as incertezas suficientemente pequenas, isto é, menor que um por cento, depende da eficiência e, portanto, do volume do detector. Todas as medidas foram feitas na posição P_3 , situada a 10 cm da face superior do invólucro de alumínio do detector. Desta forma, para o presente trabalho, o efeito da soma cascata foi considerado desprezível.

O suporte de alumínio e o porta amostras de lucite foram confeccionados de forma a permitir uma centralização e um posicionamento fácil e reproduzível das fontes radioativas de calibração, com a finalidade de se obter resultados confiáveis.

O porta amostras de lucite e a tampa de lucite, os quais estão posicionados entre a fonte e o detector, foram confeccionados de um material com baixa atenuação gama. O lucite, um tipo de acrílico, é também conhecido por polimetil-metacrilato, PMMA ou plexiglass e possui uma densidade igual a $1,18 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. As espessuras do porta amostras e da tampa de lucite, são, respectivamente, 1,1 mm e 1,7 mm. Como este material é permanente no arranjo experimental, as correções para atenuação gama foram desprezadas.

Para a determinação da eficiência de pico em função da energia, na posição de referência P_3 , foram utilizadas fontes radioativas puntiformes devidamente calibradas para os seguintes radionuclídeos (Tabelas 14 e 15): ^{22}Na , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs , e ^{152}Eu , com energias variando, no intervalo de interesse, de 121 keV até 1408 keV.

A eficiência de pico foi determinada através da equação (10) que foi adaptada com as devidas correções:

$$\varepsilon_p(E) = \frac{N_p(E)}{A_0 \cdot I_\gamma(E) \cdot D \cdot C \cdot t_m} \quad (12)$$

onde (DE CORTE, 1986):

D é o fator de decaimento – correção na atividade da fonte radioativa para a data de medição do espectro gama. t_d é o tempo de decaimento; (equação 13);

C é o fator de contagem – correção para o decaimento durante o tempo de medida t_m (equação 14).

$$D = e^{-\lambda t_d} \quad (13)$$

e

$$C = \frac{1 - e^{-\lambda t_m}}{\lambda t_m} \quad (14)$$

A curva de eficiência de pico do detector em função da energia foi obtida por meio de um polinômio em escala log-log do tipo (KIS, 1998 e GILMORE, 2008)

$$\ln \varepsilon_p(E) = \sum_{i=0}^n a_i (\ln E)^i \quad (15)$$

A partir do gráfico de $\ln \varepsilon_p(E)$ versus $\ln E$ ou dos coeficientes do polinômio ajustado, a eficiência é interpolada para qualquer valor de E . Todas as incertezas parciais envolvidas foram consideradas: área do fotopico, atividade inicial, correções para o decaimento, probabilidade de emissão gama por decaimento. Todas essas correções são feitas pelo FEPE-WEB.

No presente trabalho, para efeito de comparação e validação do software desenvolvido, a eficiência de pico foi obtida através de três processos distintos:

1) Cálculo manual de forma rotineira, utilizando planilhas do Microsoft® Office Excel. Os parâmetros nucleares e as atividades das fontes radioativas foram digitados manualmente e são os mesmos apresentados nas Tabelas 12 e 13. Os dados gerados na aquisição dos espectros como data e hora da aquisição, tempo de medida, área do fotopico também foram digitados manualmente. A eficiência de pico foi determinada através da equação (12).

Tabela 12 - Fontes radioativas padrão utilizadas para a calibração da eficiência de pico. Os valores das atividades de calibração foram retirados dos certificados emitidos pelos fabricantes.

Radionuclídeo	Certificado/Fonte	A ₀ (kBq)	inc., (%)	Data de referência	Energia (keV) ^d
²² Na	IRD ^a , 22S09	71,5	3,52	19/06/2009	1274,54
⁵⁷ Co	IPEN ^b , 57068	285	3,00	01/02/2012	122,06
					136,47
⁶⁰ Co	IRD, 26S09	64,1	0,80	08/06/2009	1173,23
					1332,49
¹³³ Ba	IAEA ^c , 104	376,6	1,50	01/01/1981	276,40
					302,85
					356,01
					383,85
¹³⁷ Cs	IRD, 66S08	25,7	0,90	19/06/2009	661,66
¹³⁷ Cs	IRD, 86S08	100,4	1,00	19/06/2009	661,66
¹³⁷ Cs	IPEN, 37044	75,2	2,50	01/10/1991	661,66
¹⁵² Eu	IAEA, 104	404	2,00	01/01/1981	121,78
					244,70
					344,28
					411,12
					867,38
					964,08
					1085,84
					1112,08
					1408,01

Fonte: autor da dissertação.

onde:

a - IRD: Instituto de Radioproteção e Dosimetria.

b - IPEN: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

c - IAEA: *International Atomic Energy Agency*.

d - Energias utilizadas na calibração (NUCLEIDE, 2017).

Tabela 13 - Parâmetros nucleares das Fontes radioativas padrão utilizadas para a calibração da eficiência de pico.

Radionuclídeo	Energia (keV) ³	Meia vida ³ (d)	inc., (%)	I_{γ}^3
²² Na	1274,54	950,69	0,03	99,94(13)
⁵⁷ Co	122,06	271,81	0,01	85,49(14)
	136,47			10,71(15)
⁶⁰ Co	1173,23	1925,23	0,02	99,85(3)
	1332,49			99,2826(6)
¹³³ Ba	276,40	3849,3	0,06	07,13(6)
	302,85			18,31(11)
	356,01			62,05(19)
	383,85			8,94(6)
¹³⁷ Cs	661,66	10975	0,27	84,99(20)
	121,78			28,41(13)
	244,70			7,55(4)
	344,28			26,59(12)
	411,12			2,238(1)
¹⁵² Eu	867,38	4939	0,12	4,243(23)
	964,08			14,50(6)
	1085,84			10,13(6)
	1112,08			13,41(6)
	1408,01			20,85(8)

Fonte: adaptado de NUCLEIDE, 2017.

2) Software Hypermet-PC (FAZEKAS, 1997). O programa tem um módulo para calcular a eficiência. O Hypermet ganhou aceitação geral e foi utilizado com sucesso em numerosos laboratórios de análise por ativação neutrônica no mundo. Seu notável desempenho de avaliação de pico foi demonstrado em intercomparações internacionais (HYPERMET, 2016). No entanto, por ser antigo, os sistemas operacionais suportados são MS-DOS 6.x, MS Windows 3.x, Sistema Windows 95/98/98SE/Me e Windows XP. Para conseguir executar o Hypermet-PC no sistema operacional de 64 bits Windows 10 Pro foi necessário utilizar um emulador de DOS. Os parâmetros nucleares atualizados e as atividades das fontes estão presentes no arquivo de dados do software. No Hypermet-PC, a eficiência de pico também foi determinada através da equação (12).

³ (NUCLEIDE, 2017)

3) Software FEPE-WEB desenvolvido no presente trabalho. O software utiliza dos dados das Tabelas 14 e 15 como parâmetros de entrada e a eficiência de pico também foi determinada através da equação (12).

Na figura 14 são representadas algumas fontes radioativas padrão utilizadas no presente trabalho.

Figura 14 - Representação de algumas fontes radioativas padrão utilizadas no presente trabalho.

Fonte: autor da dissertação.

5.3 Aquisição e geração dos espectros gama

Para aquisição e geração do espectro para cada fonte, a fonte radioativa padrão foi centralizada sobre o disco de lucite. O disco de lucite foi então colocado no suporte de alumínio na posição de referência P_3 (Figura 13).

O software de aquisição dos espectros gama utilizado foi o Genie 2000, conectado a um microcomputador PC. O tempo de aquisição (Tabela 14) foi determinado de modo que a incerteza na área do fotopico fosse menor ou igual a 1%.

Tabela 14 - Nome do arquivo do espectro gama, data e hora e tempo de aquisição para cada fonte radioativa padrão utilizada no presente trabalho.

Radionuclídeo e fonte	Espectro ⁴	Data e hora da aquisição	Tempo de aquisição (s)
²² Na - IRD, 22S09	EF0122S09C83A	17/09/2018 às 07:35:22	1801
⁵⁷ Co - IPEN, 57068	EF0157068C83B	17/09/2018 às 12:28:38	17501
⁶⁰ Co - IRD, 26S09	EF0126S09C83A	13/09/2018 às 15:49:38	600
¹³³ Ba - IAEA, 104	EF01IAEA133BaC83A	17/09/2018 às 08:13:22	4401
¹³⁷ Cs - IRD, 66S08	EF0166S08C83A	13/09/2018 às 11:50:51	600
¹³⁷ Cs - IRD, 86S08	EF0186S08C83A	13/09/2018 às 12:24:09	300
¹³⁷ Cs - IPEN, 37044	EF0137044C83A	13/09/2018 às 12:09:02	600
¹⁵² Eu - IAEA, 104	EF01IAEA152EuC83A	17/09/2018 às 09:36:24	5701

Fonte: autor da dissertação.

Antes de iniciar a aquisição dos espectros foi feita uma calibração em energia utilizando os próprios recursos do Genie 2000. O tempo morto nas aquisições dos espectros gama variou de 0,4% (para o ²²Na) a 3,2% (para o ¹⁵²Eu).

Os nomes dos espectros seguem um padrão para facilitar a identificação: #####FFFFFFNNNNNDP.M.CNF – ##### representa o projeto, FFFFF a identificação da fonte, NNNN o radionuclídeo, DP o detector, M a posição de contagem e N o número da medida (A para a primeira, B para a segunda, ..., quando a aquisição do espectro é repetida para a mesma fonte).

No procedimento manual utilizando planilhas do Microsoft® Office Excel, os cálculos das áreas correspondentes aos fotopicos foram feitos usando o programa Maestro (EG&G ORTEC, 1992). O programa calcula a área sob o fotopico de emissão gama nos espectros de energias por integração numérica. Como a versão do Genie 2000 disponível grava apenas espectros no formato CNF, que não pode ser aberto em nenhum outro software, os espectros foram convertidos para o formato CHN, que pode ser aberto pelo Maestro, usando o software Cambio⁵.

Os dados gerados na aquisição dos espectros como data e hora da aquisição, tempo de medida, área do fotopico foram digitados manualmente nas planilhas do Excel.

⁴ O arquivo gerado pelo Genie 2000 tem o formato CNF.

⁵ Sandia National Laboratories, Cambio v.080911. Disponível em: <<https://hekili.ca.sandia.gov/Cambio/>>.

O software Hypermet-PC tem um módulo para avaliar as áreas correspondentes aos fotopicos. O software Cambio foi utilizado para converter os espectros do formato CNF, gerados pelo Genie 2000, para o formato DAT, que pode ser aberto pelo Hypermet-PC. Antes de todas as áreas serem avaliadas e ajustadas de uma forma interativa com o usuário, foi feita a calibração em energia.

Para a utilização do software FEPE-WEB, desenvolvido no presente trabalho, os cálculos das áreas correspondentes aos fotopicos foram feitos usando o software, CAX (ZAHN, 2019). O CAX (*Convert and Analyze for eXcel*) utiliza os recursos de script do Genie-2000 e analisa automaticamente todos os arquivos de espectro no formato CNF gerando um arquivo de saída no formato CSV (*Comma-Separated Values*) que pode ser facilmente importado por qualquer software que abra este formato. O CAX é executado apenas em modo de comando, e em computadores onde o Genie-2000 está instalado corretamente. Como o FEPE-WEB faz a leitura dos arquivos do espectro com o formato CSV, utilizou-se essa opção.

6 UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE

Apresenta-se nesse capítulo o detalhamento das etapas para utilização do software.

6.1 Projeto e subprojeto

Cada usuário do sistema tem a sua disposição a relação de todos seus projetos, conforme demonstrado na figura 15.

Figura 15 – Relação de projetos do usuário

MEUS PROJETOS					
Pesquisar...					+ ADICIONAR
Título	Detector	Suporte	Início	Status	Ações
Defesa	Canberra 8	Suporte C8 - 0,00mm	23/02/2017	Em andamento	

Fonte: autor da dissertação.

6.1.1 Criando um projeto

Ao clicar no botão “Adicionar”, demonstrado na figura 15, o usuário é direcionado para uma nova tela do sistema, demonstrada na figura 16, que é responsável pelo cadastro de um novo projeto no sistema.

Figura 16 – Criação de um novo projeto

NOVO PROJETO

Título

Data de Início

dd / mm / aaaa

Status

Em andamento

Suporte

Sem suporte selecionado

✓

✗

Fonte: autor da dissertação.

6.1.2 Criando um subprojeto

Para cada projeto é possível criar quantos subprojetos sejam necessários para atender à demanda do pesquisador. A figura 17 demonstra a relação dos subprojetos de um projeto principal em específico.

Figura 17 – Relação de subprojetos de um projeto principal

Fonte: autor da dissertação.

Ao clicar no botão “Adicionar”, demonstrado na figura 17, o usuário é direcionado para uma nova tela do sistema, demonstrada na figura 18, que é responsável pelo cadastro de um novo subprojeto.

Figura 18 – Criação de um novo subprojeto

Fonte: autor da dissertação.

6.2 Espectros e cálculo da eficiência

Os espectros, adquiridos para as fontes radioativas padrão, são devidamente cadastrados e vinculados a um subprojeto, uma vez que cada subprojeto se relaciona com a posição (P_0 , P_1 , P_2 e P_3) em que a aquisição dos espectros foi realizada. A figura 19 demonstra a relação dos espectros, agrupados por fonte padrão, de um determinado subprojeto.

Figura 19 – Relação de espectro de um subprojeto

The screenshot shows a web application interface for managing spectra. At the top, there is a search bar labeled 'Pesquisar...' and three buttons: '+ ADICIONAR' (green), 'IMPORTAR' (blue), and 'PDF' (red). Below these is a table with the following columns: 'Fonte', 'Calibração', 'Atividade inicial(Bq)', 'Incerteza(%)', 'Meia-vida(dias)', 'Incerteza(%)', and 'Ações'. The table contains eight rows of data for different radioactive sources. Each row has a magnifying glass icon and a trash can icon in the 'Ações' column.

Fonte	Calibração	Atividade inicial(Bq)	Incerteza(%)	Meia-vida(dias)	Incerteza(%)	Ações
22Na / IRD, 22S09	19/06/2009 às 12:00:00	71454	3,52	950,69	0,03	[Magnifying Glass] [Trash]
57Co / IPEN, 57068	01/02/2012 às 12:00:00	285000	3,00	271,80	0,01	[Magnifying Glass] [Trash]
60Co / IRD, 26S09	08/06/2009 às 12:00:00	64119	0,80	1925,23	0,02	[Magnifying Glass] [Trash]
133Ba / IAEA, 104	01/01/1981 às 12:00:00	376600	1,50	3849,29	0,06	[Magnifying Glass] [Trash]
137Cs / IPEN, 37044	01/10/1991 às 12:00:00	75200	2,50	10975,53	0,27	[Magnifying Glass] [Trash]
137Cs / IRD, 66S08	19/06/2009 às 12:00:00	25736	0,90	10975,53	0,27	[Magnifying Glass] [Trash]
137Cs / IRD, 86S08	19/06/2009 às 12:00:00	100434	1,00	10975,53	0,27	[Magnifying Glass] [Trash]
152Eu / IAEA, 104	01/01/1981 às 12:00:00	404000	2,00	4938,81	0,12	[Magnifying Glass] [Trash]

Fonte: autor da dissertação.

6.2.1 Cadastrando um espectro

Ao clicar no botão “Adicionar”, demonstrado na figura 19, o usuário é direcionado para uma nova tela do sistema, demonstrada na figura 20, que é responsável pelo cadastro de um novo espectro para um subprojeto.

Figura 20 – Inserção de um novo espectro a um subprojeto

The form is titled "NOVO ESPECTRO" in a blue header. It contains several input fields and dropdown menus for recording spectrum data. At the bottom right, there are two buttons: a green one with a checkmark and a red one with an 'X'.

NOVO ESPECTRO			
Fonte -----	Data contagem ▼ dd / mm / aaaa	Hora contagem -- : -- : --	Medida A ▼
Live time (s) [icon]	Real time (s) [icon]	Dead time (%) [icon]	Energia (keV) [icon]
Canal [icon]	Área do pico [icon]	Incerteza área (%) [icon]	FHWM (%) [icon]
Observações -----			

Fonte: autor da dissertação.

6.2.2 Importando uma lista de espectros

Para facilitar os cadastros dos espectros de um subprojeto, é possível utilizar a função de importar os dados.

Ao clicar no botão “Importar”, demonstrado na figura 19, o usuário é direcionado para uma nova tela do sistema, demonstrada na figura 21, que é responsável pela importação de um espectro para um subprojeto.

Figura 21 – Importação de um arquivo de espectro a um subprojeto

The form is titled "IMPORTAR ESPECTRO - 'Defesa - 3'" in a blue header. It includes a button to select a file and a text label indicating the file format. Below, there are dropdown menus for selecting the source and measurement. At the bottom, there are three buttons: "SALVAR E ADICIONAR OUTRO", "SALVAR", and "CANCELAR".

IMPORTAR ESPECTRO - "Defesa - 3"	
SELECIONAR ARQUIVO	Arquivos no formato CSV
Fonte Sem fonte selecionada	Medida ▼ A
	▼ Observações
<div>SALVAR E ADICIONAR OUTRO</div> <div>SALVAR</div> <div>CANCELAR</div>	

Fonte: autor da dissertação.

7 RESULTADO E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento do sistema de calibração em eficiência absoluta de detectores do tipo HPGe, o software FEPE-WEB e os resultados das eficiências obtidas pelo cálculo manual e pelo software Hypermet-PC.

7.1 Calibração em energia

A figura 22 representa o ajuste linear da calibração em energia em função do número do canal, para o presente trabalho.

Figura 22 - Calibração em energia do espectrômetro gama (Canberra 8) efetuada pelo software FEPE-WEB.

Fonte: autor da dissertação.

A calibração em energia é dada pela equação (16), com um coeficiente de correlação próximo de 1:

$$E = -5,174 + 0,251C \quad (16)$$

O software permite que seja ajustada, por mínimos quadrados, uma função quadrática, se necessário.

7.2 Calibração de eficiência absoluta de pico do espectrômetro de HPGe

Na Tabela 15 estão apresentados os valores das eficiências absolutas de pico, em função da energia da radiação gama incidente no detector HPGe, obtidos no presente trabalho pelo cálculo manual utilizando planilhas do Microsoft® Office Excel (ε_{p_1}), pelo Software Hypermet-PC (ε_{p_2}) e pelo software FEPE-WEB desenvolvido no presente trabalho (ε_{p_3}) e na Tabela 16 os valores das incertezas relativas percentuais consideradas no cálculo da incerteza da eficiência. A incerteza no valor da eficiência foi obtida através da propagação das incertezas parciais envolvidas no cálculo.

Os espectros gama adquiridos pelo Genie 2000 foram os mesmos utilizados nos três procedimentos. Os parâmetros nucleares utilizados no cálculo da eficiência (meia-vida e a probabilidade da emissão gama por decaimento para a energia considerada) foram atualizados e mantidos iguais para os três procedimentos, assim como as atividades de calibração das fontes radioativas padrão. Por essa razão optou-se por analisar os espectros através de softwares diferentes uma vez que o único fator experimental determinante para o cálculo da eficiência é a área do fotopico.

Os valores das áreas dos fotopicos (N_p) obtidas pelo software CAX/Genie2000 e utilizadas pelo FEPE-WEB para o cálculo da eficiência são apresentados na Tabela 17.

Os valores de ε_{p_3} obtidos pelo software FEPE-WEB foram, de uma maneira geral, satisfatórios quando comparados aos valores de ε_{p_1} e ε_{p_2} . Verifica-se na Tabela 17 que são poucos os casos onde a diferença percentual foi maior do que 1%. Para as energias 1173,23 keV (^{60}Co), 411,12 keV (^{152}Eu) e 867,38 keV (^{152}Eu) houve uma boa concordância entre os valores de ε_{p_3} e ε_{p_2} mas entre ε_{p_3} e ε_{p_1} as diferenças excederam 3%. Para as energias iguais a 302,85 keV (^{133}Ba) e 383,85 keV (^{133}Ba), devido ao efeito soma entre as energias de 80,99 keV ($I_\gamma = 33,31 - ^{133}\text{Ba}$) e 302,85 keV ($I_\gamma = 18,31 - ^{133}\text{Ba}$) houve uma diminuição na área do fotopico de 302,85 keV e um aumento na área do fotopico de 383,85 keV o que ocasionou as diferenças apresentadas na Tabela 15. Para a energia igual a 1085,84 keV (^{152}Eu), há um dubleto devido à energia igual 1089,74 keV ($I_\gamma = 1,73 - ^{152}\text{Eu}$) que o software Maestro não conseguiu resolver. O mesmo ocorreu para a

energia igual a 1112,08 keV (^{152}Eu) onde há um dubleto devido à energia igual 1109,17 keV ($I_\gamma = 0,186$ - ^{152}Eu) que o software Maestro não conseguiu resolver.

Tabela 15 - Valores obtidos para a eficiência de pico em função da energia radiação gama.

Nuclídeo / Fonte	Energia (keV)	Cálculo manual Maestro		Hypermet -PC		FEPE-WEB		$Dif_{3,1}, (\%)^6$	$Dif_{3,2}, (\%)^7$
		ε_{p_1}	$inc., (\%)$	ε_{p_2}	$inc., (\%)$	ε_{p_3}	$inc., (\%)$		
^{22}Na - IRD, 22S09	1274,54	1,96E-3	1,9	1,97E-3	1,9	1,97E-3	1,9	0,4	-0,1
^{57}Co – IPEN, 57068	122,06	1,38E-2	1,5	1,38E-2	1,5	1,38E-2	1,5	0,0	0,0
	136,47	1,33E-2	2,2	1,34E-2	2,3	1,33E-2	2,2	0,4	-0,5
^{60}Co - IRD, 26S09	1173,23	1,97E-3	0,8	2,07E-3	0,8	2,06E-3	0,8	4,6	-0,2
	1332,49	1,83E-3	0,8	1,85E-3	0,9	1,85E-3	0,8	1,0	0,2
^{133}Ba - AIEA, 104	276,40	7,66E-3	1,2	7,65E-3	1,2	7,66E-3	1,2	0,0	0,1
	302,85	7,00E-3	1,0	7,04E-3	1,0	6,81E-3	1,0	-2,8	-3,4
	356,01	6,06E-3	0,8	5,98E-3	1,9	6,06E-3	0,8	0,0	1,3
	383,85	5,49E-3	1,1	5,51E-3	2,5	5,79E-3	1,1	5,1	4,7
^{137}Cs - IRD, 66S08	661,66	3,37E-3	0,7	3,36E-3	0,8	3,37E-3	0,7	0,0	0,2
^{137}Cs - IRD, 86S08	661,66	3,36E-3	0,7	3,36E-3	0,7	3,36E-3	0,7	0,0	0,1
^{137}Cs - IPEN, 37044	661,66	3,27E-3	1,3	3,28E-3	1,3	3,27E-3	1,3	-0,1	-0,2
^{152}Eu - AIEA, 104	121,78	1,39E-2	1,1	1,40E-2	1,1	1,40E-2	1,1	0,6	0,3
	244,70	8,53E-3	1,2	8,69E-3	1,2	8,68E-3	1,2	1,7	-0,1
	344,28	6,42E-3	1,1	6,42E-3	1,1	6,43E-3	1,1	0,1	0,1
	411,12	5,10E-3	1,3	5,32E-3	1,4	5,30E-3	1,3	3,7	-0,4
	867,38	2,54E-3	1,3	2,63E-3	1,3	2,63E-3	1,4	3,4	-0,2
	964,08	2,43E-3	1,1	2,46E-3	1,1	2,45E-3	1,1	0,9	-0,1
	1085,84	2,11E-3	1,3	2,26E-3	1,3	2,26E-3	1,2	6,2	-0,1
	1112,08	2,12E-3	1,2	2,20E-3	1,2	2,22E-3	1,2	4,7	0,8
	1408,01	1,74E-3	1,1	1,75E-3	1,1	1,75E-3	1,1	0,4	0,0

Fonte: autor da dissertação.

⁶ $Dif_{3,1}$ é a diferença percentual entre os valores obtidos para ε_{p_3} e ε_{p_1} ;⁷ $Dif_{3,2}$ é a diferença percentual entre os valores obtidos para ε_{p_3} e ε_{p_2} .

Tabela 16 - Valores das incertezas relativas percentuais consideradas no cálculo da incerteza da eficiência de detecção (%)

Nuclídeo / Fonte	Energia (keV)	A_0	$T_{1/2}$	I_γ	N_p	D	C
		<i>inc.</i> , (%)	<i>inc.</i> , (%)	<i>inc.</i> , (%)	<i>inc.</i> , (%)	<i>inc.</i> , (%)	<i>inc.</i> , (%)
^{22}Na - IRD, 22S09	1274,54	1,8	0,03	0,13	0,7	0,08	2,3E-7
^{57}Co – IPEN, 57068	122,06	1,5	0,01	0,16	0,3	0,09	3,8E-6
	136,47	1,5	0,01	1,40	0,7	0,09	3,8E-6
^{60}Co - IRD, 26S09	1173,23	0,4	0,02	0,03	0,7	0,02	1,9E-8
	1332,49	0,4	0,02	0,001	0,7	0,02	1,9E-8
^{133}Ba - AIEA, 104	276,40	0,8	0,06	0,84	0,3	0,14	2,6E-7
	302,85	0,8	0,06	0,60	0,2	0,14	2,6E-7
	356,01	0,8	0,06	0,31	0,1	0,14	2,6E-7
	383,85	0,8	0,06	0,67	0,4	0,14	2,6E-7
^{137}Cs - IRD, 66S08	661,66	0,5	0,27	0,24	0,5	0,06	5,8E-8
^{137}Cs - IRD, 86S08	661,66	0,5	0,27	0,24	0,4	0,06	2,9E-8
^{137}Cs - IPEN, 37044	661,66	1,3	0,27	0,24	0,4	0,17	5,8E-8
^{152}Eu - AIEA, 104	121,78	1,0	0,12	0,46	0,1	0,23	5,5E-7
	244,70	1,0	0,12	0,53	0,3	0,23	5,5E-7
	344,28	1,0	0,12	0,45	0,1	0,23	5,5E-7
	411,12	1,0	0,12	0,45	0,6	0,23	5,5E-7
	867,38	1,0	0,12	0,54	0,8	0,23	5,5E-7
	964,08	1,0	0,12	0,41	0,2	0,23	5,5E-7
	1085,84	1,0	0,12	0,59	0,4	0,23	5,5E-7
	1112,08	1,0	0,12	0,45	0,4	0,23	5,5E-7
	1408,01	1,0	0,12	0,38	0,3	0,23	5,5E-7

Fonte: autor da dissertação.

Tabela 17 - Valores das áreas dos fotopicos (N_p) obtidas pelo software CAX/Genie2000 e utilizadas pelo FEPE-WEB para o cálculo da eficiência.

Nuclídeo / Fonte	Energia (keV)	N_p (cts)	$inc.$, (%)
^{22}Na - IRD, 22S09	1274,54	21546	0,7
^{57}Co – IPEN, 57068	122,06	122962	0,3
	136,47	14841	0,7
^{60}Co - IRD, 26S09	1173,23	23410	0,7
	1332,49	21071	0,7
^{133}Ba - AIEA, 104	276,40	75798	0,3
	302,85	173089	0,2
	356,01	521700	0,1
	383,85	71776	0,4
^{137}Cs - IRD, 66S08	661,66	35698	0,5
^{137}Cs - IRD, 86S08	661,66	69551	0,4
^{137}Cs - IPEN, 37044	661,66	67305	0,4
^{152}Eu - AIEA, 104	121,78	1324945	0,1
	244,70	218335	0,3
	344,28	569751	0,1
	411,12	39528	0,6
	867,38	37151	0,8
	964,08	118636	0,2
	1085,84	76155	0,4
	1112,08	99203	0,4
	1408,01	121715	0,3

Fonte: autor da dissertação

Para fins de comparação, a Tabela 18 apresenta o cálculo da eficiência de pico para o software FEPE-WEB e o cálculo manual utilizando os mesmos parâmetros de cálculo de área, obtidos pelo software CAX/Genie 2000.

Tabela 18 - Valores obtidos para a eficiência de pico em função da energia radiação gama.

Tabela 16 – Valores obtidos para a eficiência de pico em função da energia radiação gama.						
Nuclídeo / Fonte	Energia (keV)	Cálculo manual		FEPE-WEB		Dif _{2,1} , (%) ⁸
		Genie				
		ε_{p_1}	inc., (%)	ε_{p_2}	inc., (%)	
²² Na - IRD, 22S09	1274,54	1,97E-3	1,9	1,97E-3	1,9	-0,1
⁵⁷ Co – IPEN, 57068	122,06	1,38E-2	1,5	1,38E-2	1,5	0,1
	136,47	1,34E-2	2,3	1,33E-2	2,2	-0,4
⁶⁰ Co - IRD, 26S09	1173,23	2,06E-3	0,8	2,06E-3	0,8	-0,1
	1332,49	1,85E-3	0,8	1,85E-3	0,8	0,0
¹³³ Ba - AIEA, 104	276,40	7,67E-3	1,2	7,66E-3	1,2	-0,1
	302,85	7,03E-3	1,0	6,81E-3	1,0	-3,2
	356,01	6,06E-3	0,9	6,06E-3	0,8	-0,0
	383,85	5,10E-3	1,1	5,79E-3	1,1	13,5
¹³⁷ Cs - IRD, 66S08	661,66	3,37E-3	0,8	3,37E-3	0,7	-0,0
¹³⁷ Cs - IRD, 86S08	661,66	3,36E-3	0,7	3,36E-3	0,7	0,0
¹³⁷ Cs - IPEN, 37044	661,66	3,28E-3	1,3	3,27E-3	1,3	-0,2
¹⁵² Eu - AIEA, 104	121,78	1,40E-2	1,1	1,40E-2	1,1	0,0
	244,70	8,68E-3	1,2	8,68E-3	1,2	0,0
	344,28	6,43E-3	1,1	6,43E-3	1,1	-0,1
	411,12	5,34E-3	1,4	5,30E-3	1,3	-0,8
	867,38	2,61E-3	1,3	2,63E-3	1,4	0,5
	964,08	2,45E-3	1,2	2,45E-3	1,1	0,1
	1085,84	2,32E-3	1,3	2,26E-3	1,2	-2,9
	1112,08	2,20E-3	1,2	2,22E-3	1,2	0,8
	1408,01	1,75E-3	1,1	1,75E-3	1,1	0,0

Fonte: autor da dissertação.

⁸ $Dif_{2,1}$ é a diferença percentual entre os valores obtidos para ε_{p2} e ε_{p1} ;

7.3 Calibração de eficiência absoluta de pico obtida no software FEPE-WEB

A figura 23 representa o gráfico da curva de eficiência absoluta de pico em função da energia da radiação gama incidente no detector de HPGe obtida pelo software FEPE-WEB desenvolvido no presente trabalho.

Figura 23 - Curva de eficiência absoluta de pico em função da energia da radiação gama incidente no detector de HPGe obtida pelo software FEPE-WEB.

Fonte: autor da dissertação.

O ajuste da curva da eficiência foi efetuado pelo método dos mínimos quadrados e o grau do polinômio ajustado em escala log-log, de acordo com a equação (5), foi seis, comumente utilizado pela comunidade científica, e o valor mínimo obtido para o Qui-Quadrado reduzido foi de 0,997, indicando um ajuste aceitável. A equação de ajuste é dada a seguir:

$$\ln \varepsilon_p(E) = -4790,713037 + 4885,611618 \ln E - 2070,918925 (\ln E)^2 + 466,676830 (\ln E)^3 - 58,964180 (\ln E)^4 + 3,959792 (\ln E)^5 - 0,110405 (\ln E)^6$$

O sistema permite que a visualização do gráfico seja alterada para a escala linear. O grau de ajuste polinomial também pode ser selecionado numa escala de 01 (um) a 10 (dez).

As formas de visualização do gráfico são realizadas de forma rápida e simples.

7.4 Integração ao projeto e-Science

Integrando-se ao projeto e-Science, que visa a criação de uma infraestrutura com objetivo de organizar, classificar, selecionar, compartilhar e garantir acesso aos dados gerados, o FEPE-WEB, desenvolvido no presente trabalho, além de realizar os cálculos e gerenciar os dados armazenados, é capaz de emitir diversos relatórios, nos formatos PDF (*Portable Document Format*) e CSV (*Comma-separated values*).

Na figura 24 é mostrado o relatório dos espectros, suas eficiências e incertezas, em formato PDF, para um determinado subprojeto.

Figura 24 - Relatório de parte dos dados da eficiência em PDF

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES Autarquia associada à Universidade de São Paulo						
Dados da Eficiência do projeto "Defesa - 3"						
Início: 23/02/2017		Detector: Canberra 8		Posição: 3		Total: 21
Status: Em andamento		Autor: Thiago José Sampaio Kaiser		Colaboradores: Projeto sem colaboradores		
Fonte	Energia(keV)	Eficiência	Incerteza	Incerteza (%)	LN(Eg) (keV)	LN(Eff)
152Eu / 104	121,78	1.3993E-02	1.5768E-04	1,13	4,8022	-4,2692
57Co / 57068	122,06	1.3814E-02	2.1263E-04	1,54	4,8045	-4,2820
57Co / 57068	136,47	1.3309E-02	2.8884E-04	2,17	4,9161	-4,3193
152Eu / 104	244,70	8.6768E-03	1.0288E-04	1,19	5,5000	-4,7471
133Ba / 104	276,40	7.6605E-03	9.0209E-05	1,18	5,6218	-4,8717
133Ba / 104	302,85	6.8120E-03	6.8152E-05	1,00	5,7132	-4,9891
152Eu / 104	344,28	6.4291E-03	7.2097E-05	1,12	5,8415	-5,0469
133Ba / 104	356,01	6.0586E-03	5.0537E-05	0,83	5,8750	-5,1063
133Ba / 104	383,85	5.7854E-03	6.2572E-05	1,08	5,9502	-5,1524
152Eu / 104	411,12	5.2994E-03	6.6308E-05	1,25	6,0189	-5,2402
137Cs / 37044	661,66	3.2682E-03	4.3815E-05	1,34	6,4947	-5,7235
137Cs / 66S08	661,66	3.3659E-03	2.4780E-05	0,74	6,4947	-5,6941
137Cs / 86S08	661,66	3.3608E-03	2.2620E-05	0,67	6,4947	-5,6956
152Eu / 104	867,38	2.6271E-03	3.7477E-05	1,43	6,7655	-5,9419
152Eu / 104	964,08	2.4549E-03	2.7512E-05	1,12	6,8712	-6,0097
152Eu / 104	1085,74	2.2556E-03	2.7992E-05	1,24	6,9900	-6,0943
152Eu / 104	1112,08	2.2196E-03	2.6094E-05	1,18	7,0140	-6,1104
60Co / 26S09	1173,23	2.0609E-03	1.6453E-05	0,80	7,0675	-6,1846
22Na / 22S09	1274,54	1.9653E-03	3.7270E-05	1,90	7,1503	-6,2321

Fonte: autor da dissertação.

Outro relatório disponível no sistema é aquele referente aos dados dos espectros de um determinado subprojeto. O sistema permite, ao pesquisador, escolher a forma de ordenação dos dados para exibição desse relatório, conforme se observa na figura 25.

Figura 25 - Escolha da ordenação do relatório dos dados dos espectros

Fonte: autor da dissertação.

Na figura 26 é mostrado o relatório dos espectros, suas energias, tempo de aquisição e demais dados, em formato PDF, para um determinado subprojeto, ordenados pela Fonte.

Figura 26 - Relatório de parte dos dados dos espectros em PDF

Figura 16 - Relação de parte dos dados dos espectros em T.D.

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

Dados dos Espectros do projeto "Defesa - 3"

Início: 23/02/2017

Status: Em andamento

Detector: Canberra 8

Autor: Thiago José Sampaio Kaiser

Posição: 3

Colaboradores: Projeto sem colaboradores

Total: 21

Fonte	Certificado	Contagem	LT(s)	RT(s)	DT(%)	Energia(keV)	Canal	Área	Incerteza(%)	FHWM (%)
22Na	22S09	17/09/2018 às 07:35:22 A	1800,61	1807,75	0,39	1274,54	5104,89	21546	0,69	1,65
57Co	57068	17/09/2018 às 12:28:38 A	17501,05	17509,77	0,05	122,06	507,55	122962	0,29	0,86
57Co	57068	17/09/2018 às 12:28:38 A	17501,05	17509,77	0,05	136,47	565,03	14841	0,70	0,84
60Co	26S09	13/09/2018 às 15:49:38 A	600,00	604,37	0,72	1173,23	4698,92	23410	0,69	1,56
60Co	26S09	13/09/2018 às 15:49:38 A	600,00	604,37	0,72	1332,49	5334,11	21071	0,69	1,66
133Ba	104	17/09/2018 às 08:13:22 A	4400,71	4487,11	1,93	276,40	1123,14	75798	0,31	0,96
133Ba	104	17/09/2018 às 08:13:22 A	4400,71	4487,11	1,93	302,85	1228,65	173089	0,24	0,99
133Ba	104	17/09/2018 às 08:13:22 A	4400,71	4487,11	1,93	356,01	1440,69	521700	0,14	1,04
133Ba	104	17/09/2018 às 08:13:22 A	4400,71	4487,11	1,93	383,85	1551,74	71776	0,37	1,08
137Cs	37044	13/09/2018 às 12:09:02 A	600,00	604,69	0,78	661,66	2658,79	67305	0,39	1,26
137Cs	66S08	13/09/2018 às 11:50:51 A	600,00	602,62	0,43	661,66	2658,75	35698	0,53	1,28
137Cs	86S08	13/09/2018 às 12:24:09 A	300,00	304,99	1,64	661,66	2658,77	69551	0,38	1,26
152Eu	104	17/09/2018 às 09:36:24 A	5700,65	5887,31	3,17	121,78	506,50	1324945	0,09	0,88
152Eu	104	17/09/2018 às 09:36:24 A	5700,65	5887,31	3,17	244,70	996,69	218335	0,27	0,97
152Eu	104	17/09/2018 às 09:36:24 A	5700,65	5887,31	3,17	344,28	1393,88	569751	0,04	1,03

Fonte: autor da dissertação.

Com o intuito de possibilitar ao pesquisador utilizar os cálculos feitos pelo sistema em diversas outras aplicações, o sistema exporta os dados da eficiência, de cada subprojeto, no formato de arquivo CSV (Figura 27).

Figura 27 - Relatório dos dados da eficiência em CSV

#	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W		
1	id_created	at_update	at_user	empresa	descricao_area	area	incerteza	canal_data	contagem_hora	contagem_live	time_dead	time_real	time_energia	fhwm	subprojeto	fonte	medida	observacao	decay	time_fator	d_incerteza	fator_d	c_incerteza	fator_c	
2	548	2019-06-03 12:47:28	2019-06-03 12:47:28	1	EF0122S09C83A	21546,0	69,5104	89,2018-09-17 07:35:22	1800,61	0,394966	1181026	1900,1807	75,1274	53700,1	65,7	2A	3376	8162	2685	185,0	0,0852611	17302	28891,0	0,7567055	4424080000000000,0
3	549	2019-06-03 12:47:44	2019-06-03 12:47:44	1	EF0157068C83B	122962,0	29,507	55,2018-09-17 12:28:38	17501,05	0,049800	7683710	3610,17509	77,122	06065,0	86,7	22A	2420	01	9884	25926,0	0,0020879	7658	86895,0	0,0908216	742900699000000000,0
4	550	2019-06-03 12:47:44	2019-06-03 12:47:44	1	EF0157068C83B	14841,0	70,565	03,2018-09-17 12:28:38	17501,05	0,049800	7683710	3610,17509	77,136	47356,0	84,7	22A	2420	01	9884	25926,0	0,0020879	7658	86895,0	0,0908216	742900699000000000,0
5	551	2019-06-03 12:47:54	2019-06-03 12:47:54	1	EF0126S09C83A	23410,0	69,4698	92,2018-09-13 15:49:38	600,00	0,723066995	38362300,604	37,1173	22800,1	56,7	16A	3384	15946	759259,0	0,2956994	4169110,0	0,1849195	40947	3900000000000000,0		
6	552	2019-06-03 12:47:54	2019-06-03 12:47:54	1	EF0126S09C83A	21071,0	69,5334	11,2018-09-13 15:49:38	600,00	0,723066995	38362300,604	37,1332	49200,1	66,7	16A	3384	15946	759259,0	0,2956994	4169110,0	0,1849195	40947	3900000000000000,0		
7	553	2019-06-03 12:48:05	2019-06-03 12:48:05	1	EF011AE133BaC83A	173089,0	31,1123	14,2018-09-17 08:13:22	4400,71	1,925515532	6909000,4487	11,276	38890,0	96,7	5A	13772	84261	574070,0	0,083735091	300435,0	0,141195	3964	387380000000000000,0		
8	554	2019-06-03 12:48:05	2019-06-03 12:48:05	1	EF011AE133BaC83A	173089,0	31,1123	14,2018-09-17 08:13:22	4400,71	1,925515532	6909000,4487	11,302	85080,0	99,7	5A	13772	84261	574070,0	0,083735091	300435,0	0,141195	3964	387380000000000000,0		
9	555	2019-06-03 12:48:05	2019-06-03 12:48:05	1	EF011AE133BaC83A	521700,0	14,1440	69,2018-09-17 08:13:22	4400,71	1,925515532	6909000,4487	11,356	01290,1	04,7	5A	13772	84261	574070,0	0,083735091	300435,0	0,141195	3964	387380000000000000,0		
10	556	2019-06-03 12:48:05	2019-06-03 12:48:05	1	EF011AE133BaC83A	71776,0	37,1551	74,2018-09-17 08:13:22	4400,71	1,925515532	6909000,4487	11,383	84850,1	08,7	5A	13772	84261	574070,0	0,083735091	300435,0	0,141195	3964	387380000000000000,0		
11	557	2019-06-03 12:48:12	2019-06-03 12:48:12	1	EF0137044C83A	67305,0	39,2658	79,2018-09-13 12:09:02	600,00	0,7756040285	104850,604	69,661	65700,1	26,7	7A	9844	0062	7314815,0	0,537037590	100547,0	0,1655074	4041	227120000000000000,0		
12	558	2019-06-03 12:48:25	2019-06-03 12:48:25	1	EF0166S08C83A	35698,0	53,2658	75,2018-09-13 11:50:51	600,00	0,4347681	7895191,100	60,262	62,661	65700,1	28,7	14A	3372	9936	4583333,0	0,8081188	589	2457,0	0,0567101	18556408	7800000000000000,0
13	559	2019-06-03 12:48:33	2019-06-03 12:48:33	1	EF0186S08C83A	69551,0	38,2658	77,2018-09-13 12:24:09	300,00	1,63611921702	351000,304	99,661	65700,1	26,7	18A	3373	0167	7083333,0	0,8081407	056	5864,0	0,0567105	436501	0300000000000000,0	
14	560	2019-06-03 12:48:44	2019-06-03 12:48:44	1	EF011AE152EuC83A	1324945,0	09,506	50,2018-09-17 09:36:24	5700,65	3,1705481	7904953000,5887	31,121	78170,0	0,88	7,6A	13772	9002	7777780,0	0,1447152	561	26588,0	0,2287220	4917608	6000000000000000,0	
15	561	2019-06-03 12:48:44	2019-06-03 12:48:44	1	EF011AE152EuC83A	218335,0	27,996	69,2018-09-17 09:36:24	5700,65	3,1705481	7904953000,5887	31,244	69740,0	0,97	7,6A	13772	9002	7777780,0	0,1447152	561	26588,0	0,2287220	4917608	6000000000000000,0	
16	562	2019-06-03 12:48:44	2019-06-03 12:48:44	1	EF011AE152EuC83A	569751,0	04,1293	88,2018-09-17 09:36:24	5700,65	3,1705481	7904953000,5887	31,344	27850,1	03,7	6A	13772	9002	7777780,0	0,1447152	561	26588,0	0,2287220	4917608	6000000000000000,0	
17	563	2019-06-03 12:48:44	2019-06-03 12:48:44	1	EF011AE152EuC83A	39528,0	56,1660	47,2018-09-17 09:36:24	5700,65	3,1705481	7904953000,5887	31,411	11650,1	08,7	6A	13772	9002	7777780,0	0,1447152	561	26588,0	0,2287220	4917608	6000000000000000,0	
18	564	2019-06-03 12:48:44	2019-06-03 12:48:44	1	EF011AE152EuC83A	71151,0	83,3480	55,2018-09-17 09:36:24	5700,65	3,1705481	7904953000,5887	31,867	38000,1	43,7	6A	13772	9002	7777780,0	0,1447152	561	26588,0	0,2287220	4917608	6000000000000000,0	
19	565	2019-06-03 12:48:44	2019-06-03 12:48:44	1	EF011AE152EuC83A	118636,0	18,3866	25,2018-09-17 09:36:24	5700,65	3,1705481	7904953000,5887	31,964	07900,1	47,7	6A	13772	9002	7777780,0	0,1447152	561	26588,0	0,2287220	4917608	6000000000000000,0	
20	566	2019-06-03 12:48:44	2019-06-03 12:48:44	1	EF011AE152EuC83A	76155,0	37,4352	12,2018-09-17 09:36:24	5700,65	3,1705481	7904953000,5887	31,1085	73700,1	54,7	6A	13772	9002	7777780,0	0,1447152	561	26588,0	0,2287220	4917608	6000000000000000,0	
21	567	2019-06-03 12:48:44	2019-06-03 12:48:44	1	EF011AE152EuC83A	99203,0	36,4456	85,2018-09-17 09:36:24	5700,65	3,1705481	7904953000,5887	31,1112	07600,1	54,7	6A	13772	9002	7777780,0	0,1447152	561	26588,0	0,2287220	4917608	6000000000000000,0	
22	568	2019-06-03 12:48:44	2019-06-03 12:48:44	1	EF011AE152EuC83A	121715,0	29,5637	56,2018-09-17 09:36:24	5700,65	3,1705481	7904953000,5887	31,1408	01300,1	74,7	6A	13772	9002	7777780,0	0,1447152	561	26588,0	0,2287220	4917608	6000000000000000,0	
23																									
24																									
25																									
26																									
27																									
28																									
29																									
30																									
31																									
32																									
33																									
34																									
35																									
36																									
37																									
38																									
39																									
40																									
41																									
42																									
43																									
44																									
45																									
46																									
47																									
48																									
49																									
50																									
51																									
52																									
53																									
54																									
55																									
56																									
57																									
58																									
59																									
60																									
61																									
62																									
63																									
64																									
65																									
66																									
67																									
68																									

Fonte: autor da dissertação.

8 CONCLUSÕES

Um software web, FEPE-WEB, de código livre, para cálculo da eficiência em detectores do tipo HPGe do Laboratório de Análise por Ativação com Nêutrons (LAN) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) foi desenvolvido no presente trabalho.

A utilização do software visa evitar erro nos cálculos da eficiência, bem como proporcionar agilidade na realização desses cálculos e plotagem do gráfico. Cita-se, ainda, a padronização das informações em um ambiente intuitivo e amigável. A utilização do método k_0 de ativação requer uma caracterização precisa do sistema de detecção e dessa forma a eficiência de detecção no intervalo de energia de interesse e na geometria do arranjo experimental deve ser conhecida com precisão.

A validação dos resultados foi feita através da obtenção de vários espectros gama no LAN utilizando-se fontes radioativas padrão e calculando-se a eficiência absoluta de pico para o sistema de detecção. Os resultados foram comparados com aqueles dos procedimentos atualmente utilizados no LAN e com o software Hypermet-PC, comprovando, assim, a eficácia do sistema desenvolvido, atingindo o objetivo inicialmente proposto.

Os relatórios emitidos pelo software FEPE-WEB possibilitaram a integração do mesmo ao projeto *e-Science*, proporcionando agilidade, controle e integridade dos dados.

Como trabalhos futuros pretende-se aprimorar o software FEPE-WEB nos seguintes aspectos:

- possibilidade de leitura dos espectros em vários formatos como .DAT, .CNH, .PKL, e outros;
- geração de um gráfico de resíduos para o ajuste da eficiência;
- geração de um gráfico de controle para comparação de eficiências obtidas anteriormente para um mesmo sistema de detecção;
- correção para a atenuação-gama e auto-absorção;

- leitura do arquivo de entrada para correção para o efeito de soma-cascata;

O desenvolvimento do software FEPE-WEB foi o início para o projeto de desenvolvimento de um software específico para o método k_0 com as seguintes características: análise dos espectros gama, calibração em energia e resolução, transferência de eficiência, determinação dos parâmetros ligados à caracterização da espectro de nêutrons (alfa e f) na posição de irradiação do reator IEA-R1, fatores de correção (*self-shielding*, soma cascata) e cálculo da eficiência para fontes espessas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BACCHI, M. A.; FERNANDES, E. A. N.; DE OLIVEIRA, H. Brazilian experience on k_0 standardized neutron activation analysis. ***Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry***, v. 245, n. 1, p. 217-222, 2000.

BLAAUW, M. K_0 -IAEA. **IAEA**. Vienna, jan. 2014. Radioisotope Products and Radiation Technology Section. Disponível em: <<http://www-naweb.iaea.org/napc/iachem/K0-IAEA.html>>. Acesso em: 12 maio 2019

BORGES, L. E. **Python para desenvolvedores**. 2. ed. Rio de Janeiro: Edição do Autor, 2010.

BRAHA, M.; RUMBAUGH, J. **Modelagem e projetos base em objetos com UML**. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2006.

CARVALHO, P. R.; MUNITA, C. S.; NEVES, E. G.; ZIMPEL, C. A. Chemical characterization of ancient pottery from the south-west Amazonia using instrumental neutron activation analysis. ***Brazilian Journal Of Radiation Sciences***, v. 7, p. 1-14, 2019.

CODD, E. F. Relational Model of Data for Large Shared Data Banks. ***Association for Computing Machinery***, v. 13, n. 6, p. 377-387, 1970.

CRUZ, F. **Python: escreva seus primeiros programas**. São Paulo: Casa do Código, 2015.

DATE, C. J. **Introdução a sistemas de banco de dados**. 8.ed. Rio de Janeiro: Campus, 2004.

DE CORTE, F. **The k_0 -Standardization Method**: A Move to the Optimisation of Neutron Activation Analysis. Rijksuniversiteit Gent, Faculteit Van de Wetenschappen, 1986. 464p.

DE CORTE, F; SIMONITS, A. Recommended nuclear data for use in the k_0 standardization of neutron activation analysis. ***Atomic Data and Nuclear Data Tables***, v. 85, n. 1, p. 47-67, 2003.

FAVARO, D. I. T.; ROCHA, F. R.; ANGELINI, M.; HENRIQUES, H. R. A.; SOARES, J. S.; SILVA, P. S. C.; OLIVIERA, S. M. B. Metal and trace element assessments of bottom sediments from medium Tietê River basin, Sao Paulo State, Brazil: part II. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 316, n. 2, p. 805-818, 2018.

FAZEKAS, B.; MOLNÁRT, G.; BELGYA, T.; DABOLCZI, L.; SIMONITS, A. Introducing HYPERMET-PC for automatic analysis of complex gamma-ray spectra. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 215, n. 2, p. 271-277, 1997.

FOWLER, M. **UML essencial**: um breve guia para a linguagem-padrão de modelagem de objetos. 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

GILMORE, G.; HEMINGWAY, J. *Practical Gamma-ray Spectrometry*. 2 ed. John Wiley & Sons Ltd, 2008.

GUEDES, G. T. A. **UML 2**: Uma Abordagem Prática. 2. ed. São Paulo: Novatec, 2011.

GUEDES, G. T. A. **UML 2**: Uma Abordagem Prática. 3. ed. São Paulo: Novatec, 2018.

HYPERLABS SOFTWARE: New concepts in gamma spectroscopy. *HyperLabs Software*, Hungria, 2014. Disponível em: <<http://www.hlabsoft.com/>>. Acesso em: 12 maio 2019.

HYPERMET: Hypermet PC Software. *The Institute of Isotopes of the Hungarian Academy of Sciences*, Hungria, 2016. Disponível em: <http://www.iki.kfki.hu/nuclear/hypc/index_en.shtml>. Acesso em: 02 jun 2019.

K₀ DATABASE. Disponível em: <http://www.kayzero.com/k0naa/k0naaorg/Nuclear_Data_SC/Entries/2019/4/15_Update_of_k0-database_Ba-131_files/k0_database_2019_04_04.xls>. Acesso em: 28 maio 2019.

KNOLL, G. F. **Radiation Detection and Measurement**. 2nd Edition, John Wiley & Sons, (1989).

KIS, Z.; FAZEKAS, B.; ÖSTÖR, J.; RÉVAY, Z.; BELGYA, T.; MOLNÁR, G. L.; KOLTAY, L. Comparison of efficiency functions for Ge gamma-ray detectors in a wide energy range. ***Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment***, v. 418, n. 2-3, p. 374-386, 1998.

KORTH, H. F.; SILBERSCHATZ, A.; SUDARSHAN, S. **Sistemas de bancos de dados**. 5 ed., Rio de Janeiro: Campus. 2006.

KRANE, K. S. **Introductory Nuclear Physics**. 2 ed. John Wiley & Sons, Inc., 1987.

L'ANNUNZIATA, M. F. **Handbook of Radioactivity Analysis**. 2 ed. Elsevier Science, 2003.

LANGE, C. N.; CAMARGO, I. M. C.; FIGUEIREDO, A. M. G. M; CASTRO, L.; VASCONCELLOS, M. B. A.; TICIANELLI, R. B. A Brazilian coal fly ash as a potential source of rare earth elements. ***Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry***, v. 311, n. 2, p. 1235.-1241, 2017.

MARIANO, D. B.; FIGUEIREDO, A. M. G.; SEMMLER, R. Implementation of the k_0 -standardization method for analysis of geological samples at the Neutron Activation Analysis Laboratory, São Paulo, Brazil. ***Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry***, v. 299, n. 1, p. 725-731, 2014.

MARTIN, J. E. **Physics for Radiation Protection: A Handbook**. 2 ed. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2006.

MUKKIN, K.N. **Experimental nuclear physics**. Moscou: Mir, 1987.

NIST Standard Reference Database 121. ***The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty***. Disponível em:
<<https://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>>. Acesso em: 30 maio 2019.

NUCLEIDE. Recommended data. ***Laboratoire National Henri Becquerel*** França, 2017. Disponível em:
<http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata_by_date.htm>. Acesso em: 20 maio 2019.

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M. **Física das radiações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

PENDER, T. **UML: A Bíblia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

PRESSMAN, R. **Engenharia de software**. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

PUERTA, D. C.; FIGUEIREDO, A. M. G.; SEMMLER, R.; JAĆIMOVIĆ, R. k_0 -INAA of biological matrices at IPEN neutron activation analysis laboratory, São Paulo, using the k_0 _IAEA software. ***Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry***, v. 300, n. 2, p. 637-644, 2014.

ROB, P.; CORONEL, C. **Sistemas de Bancos de Dados: Projeto, implementação e administração**. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

SAIKI, M.; SOARES, M. A. B.; ADACHI, E. M. INAA of enamel and dentine samples of a group of children and adults: A comparative study. ***Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry***, v. 276, n. 1, p. 49-52, 2008.

SALES, T.N.S., BOSCH-SANTOS, B., SAIKI, M., BURIMOVA, A., PEREIRA, L.F.D., SAXENA, R.N., CARBONARI, A.W. Low temperature synthesis of pure and Fe-doped HfSiO_4 : Determination of Si and Fe fractions by neutron activation analysis, ***Radiation Physics and Chemistry***, v. 155, n. 1, p. 287-290, 2019

SATHLER, M. M.; SALLES, Paula M. B.; MENEZES, M. Â. B. C. Trace elements detection in whole food samples by neutron activation analysis, k_0 -method. ***Brazilian Journal Of Radiation Sciences***, v. 7, p. 1-13, 2019.

SEMMLER, R. ***Medidas das secções de choque de fotonêutrons do ^9Be , ^{13}C e ^{17}O com radiação Gama de captura de Nêutrons térmicos***. 2005. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. doi:10.11606/T.85.2006.tde-04062007-153322. Acesso em: 31 maio 2019.

SOMMERVILLE, I. **Engenharia de software**. 9 ed. São Paulo: Pearson, Prentice Hall, 2011.

SILVA, R. C. A.; SAIKI, M.; MOREIRA, E. G.; OLIVEIRA, P. T. M. S. The great egret (*Ardea alba*) as a bioindicator of trace element contamination in the São

Paulo Metropolitan Region, Brazil. ***Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry***, v. 315, n. 3, p. 447-458, 2018.

SIMA, O.; ARNALD, D.; DOVLETE, C. GESPECOR: A versatile tool in gamma-ray spectrometry. ***Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry***, v. 248, n. 2, p. 359-364, 2001.

TURNER, J. E. ***Atoms, Radiation, and Radiation Protection***, 3 ed. EUA: Wiley-VCH, 2007.

TURRA, C.; DE NADAI FERNANDES, E. A.; BACCHI, M. A. SARRIÉS, G. A.; LAI REYES, A. E. Uptake of rare earth elements by citrus plants from phosphate fertilizers, ***Springer International Publishing***, v. 437, n. 1-2, p. 291-299, 2019

VAN SLUIJS, R. Kayzero for Windows. **Kayzero**. Holanda, set. 2018. Kayzero. Disponível em: <<http://www.kayzero.com/>>. Acesso em: 12 maio 2019

XCOM: Photon Cross Sections Database. **NIST Standard Reference Database 8 (XGAM)**, Disponível em: <<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>>. Acesso em: 30 maio 2019.

ZAHN, G. S.; JUNQUEIRA, L. S.; GENEZINI, F. A. CAX and Xsel: a software bundle to aid in automating NAA spectrum analysis. ***Brazilian Journal Of Radiation Sciences***, v. 7, n. 2A. p. 1-7, 2019.

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.