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

Desenvolvimento de estação de monitoramento para registro de temperatura, umidade e tensão de alimentação de detectores HPGe – Germânio Hiper-Puro.

GLEISER RODRIGUES DE MELO

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

Orientador:
Prof. Dr. Frederico Antônio Genezini

São Paulo
2019

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

**Desenvolvimento de estação de monitoramento para registro de temperatura,
umidade e tensão de alimentação de detectores HPGe – Germânio Hiper-Puro.**

Versão Corrigida

GLEISER RODRIGUES DE MELO

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

**Orientador:
Prof. Dr. Frederico Antônio Genezini**

**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:

MELO, G. R. d. . ***Desenvolvimento de estação de monitoramento para registro de temperatura, umidade e tensão de alimentação de detectores HPGe – Germânio Hiper-Puro.*** 2019. 80 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)

Melo, Gleiser Rodrigues de
Desenvolvimento de estação de monitoramento para registro
de temperatura, umidade e tensão de alimentação de detectores
HPGe – Germânio Hiper-Puro. / Gleiser Rodrigues de Melo;
orientador Frederico Antonio Genezini. -- São Paulo, 2019.
80 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia Nuclear (Aplicações) -- Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2019.

1. Análise por ativação neutrônica. 2. Detector Germânio
Hiperpuro. 3. arduino. 4. monitoramento ambiental. I.
Genezini, Frederico Antonio, orient. II. Título.

Aos meus Familiares e Amigos

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Rondônia por fazer com que a parceria IFRO/IPEN acontecesse, e assim proporcionar aos seus servidores esta oportunidade ímpar.

Aos meus pais Jairo Herculano e Walmília Wanderley, por todos os valores que me ensinaram, e principalmente por sempre acreditarem em mim e me mostrarem que eu posso alcançar todo objetivo que eu determinar.

Ao meu filho Valentin, que somente pela sua existência, já me tornou uma pessoa melhor, e me mostrou o que é a força do AMOR.

Ao meu colega de trabalho Roberto Simplício Guimarães por ter me encorajado a participar desse programa de mestrado, e as inúmeras ajudas com o Arduino e confecção dos circuitos impressos.

Ao também colega de trabalho Ewerton Luiz Costadelle, pois sem suas inúmeras ajudas eu não teria entendido tão facilmente muitos conceitos de eletrônica, alguns nem pertinentes a este trabalho, mas que entre um café e outro sempre fez questão de explicar tudo com detalhes.

Ao Dr. Frederico Antônio Genezini pela considerações e apontamentos valiosíssimos para a o direcionamento e melhoria deste trabalho.

Ao Dr. Guilherme Soares Zahn também por incontáveis sugestões e dicas neste trabalho e durante a coleta de dados e no seminário de área.

Ao Dr. Edson Gonçalves Moraes por ter me auxiliado com a coleta de dados, pois sem a sua disponibilidade de operar o sistema, para que os registros fossem realizados, não haveriam dados de qualidade para serem analisados.

RESUMO

MELO, G. R. de. **Desenvolvimento de estação de monitoramento para registro de temperatura, umidade e tensão de alimentação de detectores HPGe – Germânio Hiper-Puro..** 2019. 80 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

Um sistema baseado em micro controladores e sensores de baixo custo para o monitoramento ambiental dos laboratórios onde os detectores de HPGe são utilizados foi desenvolvido, visando a automatização da tarefa de controle das condições necessárias para garantir a qualidade das medidas, que tem sido realizado há muitos anos de forma manual, nem sempre com a frequência necessária. A proposta deste trabalho foi desenvolver uma estação de monitoramento, juntamente com seu software controlador, baseada em um micro controlador Arduino UNO equipada com quatro sensores termohigrômicos para monitorar diferentes partes do ambiente a qual o detector de Germânio hiper-puro está instalado, um sensor de tensão para monitorar sua tensão de alimentação, além de um termopar para monitorar o interior do dewar. Um software baseado na linguagem C-Sharp, e um banco de dados MySQL dedicado, foi desenvolvido com interface amigável e permitindo exportar os resultados obtidos na forma de relatórios. O sistema foi testado em um detector Canberra modelo GC2018, onde os quatro termohigrômetros foram posicionados em diferentes locais, permitindo monitorar as condições com intervalos determinados de no mínimo um minuto. Para garantir a confiabilidade das medidas os sensores foram calibrados por meio de medidas em ambientes com condições variadas e monitorado por aparelho termohigrômetro com certificado de calibração. Foi verificado que apenas um sensor dentro e outro fora da blindagem são necessários. O termopar se mostrou adequado para monitorar a refrigeração do detector e o sensor de tensão não se mostrou adequado. As medidas de umidade e temperatura foram feitas junto com medidas de resolução dos detectores e não foi possível observar correlação entre os resultados, indicando que o detector é pouco sensível às variações observadas. O sistema pode ser replicado se desejado, com os aprimoramentos sugeridos neste estudo, resultando em uma estação de baixo custo e eficiente, inclusive no próprio LAN para outros equipamentos.

Palavras chave: Monitoramento, Arduino, Detector de Germânio, Controle de Qualidade

ABSTRACT

MELO, G. R. de. **Development of monitoring station to record temperature, humidity and supply voltage of HPGe - Hyper-Pure Germanium detectors.** 2019. 80 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

A low-cost microcontrollers and sensors system has been developed to monitoring environmental conditions of laboratories where HPGe detectors are used, aimed at automating the control task of the necessary conditions to guarantee the quality of the measures, that have been carried out for many years manually not always with the necessary frequency. The purpose of this work was to develop a monitoring station, together with its controller software, based on an Arduino UNO microcontroller equipped with four thermohygromic sensors to monitor different parts of the environment to which the hyper-pure germanium detector is installed. voltage sensor to monitor its supply voltage, plus a thermocouple to monitor the interior of the dewar. A software based on the C-Sharp language, and a dedicated MySQL database, was developed with friendly interface and allowing to export the results obtained in the form of reports. The system was tested in a Canberra detector model GC2018, where the four thermohygrometers were positioned in different places, allowing to monitor the conditions with determined intervals of at least one minute. To ensure the reliability of the measurements the sensors were calibrated by means of measurements in environments with varying conditions and monitored by device thermohygrometer with a calibration certificate. It has been verified that only one sensor inside and one outside the shield is required. The thermocouple proved to be adequate to monitor the detector cooling and the voltage sensor was not adequate. The measurements of humidity and temperature were made together with measures of resolution of the detector and it was not possible to observe a correlation between the results, indicating that the detector is little sensitive to the observed variations. The system can be replicated if desired, with the improvements suggested in this study, resulting in a low cost and efficient station, including in the LAN itself for other equipment.

Keywords: Monitoring, Arduino, Germanium Detector, Quality Control

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sequência de eventos de uma típica reação de captura, ou (n, γ)	17
Figura 2 (a) Níveis de energias atômicos são linhas discretas, (b) Nos sólidos, os estados de energias permitidos se apresentam em bandas.	20
Figura 3 - Eficiência do sistema em função da temperatura da sala.....	23
Figura 4 Correlações entre a posição do pico e a temperatura da sala.....	23
Figura 5 Formação da ISO 17025	26
Figura 6 - Blindagem de chumbo com revestimento de placas de cobre	30
Figura 7 Layout da placa e pinos do Arduino Uno.	32
Figura 8 Sensor DHT22 - Temperatura e Umidade..	33
Figura 9 - Linearidade DHT22 a 25°C	33
Figura 10 - Estrutura do sensor de umidade do DHT22	34
Figura 11- Esquema da disposição dos sensores de DHT22.	35
Figura 12 - Termopar tipo K usado na estação.....	36
Figura 13 - Esquema do banho de gelo para anular a temperatura na junção de referência.....	37
Figura 14 - Módulo compensador de junção fria MAX31855K	38
Figura 15 - Sensor de tensão AC modelo P8.....	39
Figura 16 - Módulo RTC DS1307	41
Figura 17 - Diagrama de fluxo da comunicação estação/software.....	42
Figura 18 - Componentes conectados à protoboard.....	43
Figura 19 - Esquema do circuito (PCB) a ser impresso.....	44
Figura 20 - Etapas da montagem (conexão das partes) da estação.....	45
Figura 21 - Ciclo de iterações na implementação dos sensores ao Arduino.	46
Figura 22 - IDE Arduino com códigos de configuração do sensor DHT 22.....	47
Figura 23 - Códigos de comunicação entre Estação/Software.....	48
Figura 24 - Fluxograma de comunicação da estação.	49
Figura 25 – Trecho do código C# que realiza a comunicação com a estação.	51
Figura 26 - Leituras sensor tensão após testes com implementação de média para redução de ruídos	53
Figura 27 - Umidade e temperatura no laboratório de 16/03 a 23/03	54
Figura 28 - Registros sensores 2 e 3 para o período de 16/03 a 23/03.....	55
Figura 29 - Registros do sensor 1 (pré amplificador) nos dias entre 16/03 a 23/03 ..	56
Figura 30 - Reta de ajuste para o sensor 1.	58

Figura 31 - Reta de ajuste para o sensor 2.....	58
Figura 32 - Reta de ajuste para o sensor 3.....	59
Figura 33 - Reta de ajuste para o sensor 4.....	59
Figura 34 - Temperatura e umidade no laboratório nos dias 5 a 9/4/2019	60
Figura 35 - Temperaturas e umidades registradas pelo sensor 2 de 5 a 9/4/2019 ...	61
Figura 36 - Temperaturas e umidades registradas no sensor 3 de 5 a 9/4/2019	62
Figura 37 - Temperaturas e umidades registradas no sensor 1 de 5 a 9/4/2019	62
Figura 38 – Resolução do detector em função da temperatura do sensor 1.....	63
Figura 39 – Resolução do detector em função da umidade do sensor 1	64
Figura 40 - Resolução do detector em função da temperatura do sensor 1 durante a madrugada	65
Figura 41 - Resolução do detector em função da umidade do sensor 4 durante a madrugada	65
Figura 42 – Relatório gerado em formato PDF	67
Figura 43 – Relatório gerado em formato CSV	68
Figura 44 - Tela principal do SIMD HPGe	71
Figura 45 - Tela de configuração dos intervalos de registros.....	73
Figura 46 - Tela do SIMD-HPGe para gerar relatórios	74
Figura 47 - Gráfico plotado para obter inclinação da reta de ajuste para sensor 4 ...	75
Figura 48 - Certificado de calibração nº 2717/19 Maxi Track	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição aproximada para o Cromel e Alumel.	36
Tabela 2 - Custo aproximado dos componentes da estação de monitoramento do detector HPGe.....	43
Tabela 3 – Dados da estação meteorológica da CETESB bairro Pinheiros	55
Tabela 4 - Leituras no processo de calibração dos novos sensores.....	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVOS	14
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	15
2.1	ANÁLISE POR ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA	16
2.1.1	Princípios básicos	17
2.2	DETECTORES DE RADIAÇÃO GAMA – GERMÂNIO HIPERPURO.....	18
2.2.1	Pré-Amplificador	21
2.2.2	Dewar	22
2.3	SISTEMA DE GESTÃO DE QUALIDADE.....	24
2.3.1	Sistema de qualidade nos laboratórios analíticos.....	24
2.4	A NORMA ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005.....	25
2.4.1	Requisitos técnicos	26
3	MÉTODOS EXPERIMENTAIS	30
3.1	O SISTEMA DE ESPECTROMETRIA GAMA NO LAN	30
3.2	MICROCONTROLADOR ARDUINO.....	31
3.3	SENSORES E MÓDULOS	32
3.3.1	Sensor DHT22 – temperatura e umidade	33
3.3.2	Termopar tipo k – temperaturas criogênicas.....	35
3.3.3	Módulo max31855k – compensador de junção fria	37
3.3.4	Sensor tensão ac – monitoramento da tensão de alimentação do sistema de espectrometria 39	
3.3.5	Módulo rtc ds1307 – data e hora.....	40
3.4	A ESTAÇÃO DE MONITORAMENTO – INTEGRAÇÃO DOS COMPONENTES	41
3.4.1	Confecção do circuito impresso.....	44
3.5	IMPLEMENTAÇÃO – INTEGRANDO A ESTAÇÃO AO SOFTWARE CONTROLADOR ...	45
3.5.1	programação da estação	45
3.5.2	programação do software controlador da estação	50
3.5.3	A base de dados	51
4	TESTES E SEUS RESULTADOS	52
4.1	SENSOR DE TENSÃO.....	52
4.2	SENSOR DHT22	54
4.3	TERMOPAR	65

4.4	O SISTEMA DE MONITORAMENTO	66
5	CONCLUSÕES	69
6	APÊNDICE A - CONFIGURAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE DO SIMD-HPGE .	71
7	APÊNDICE B - GERAÇÃO DE REALTÓRIOS	73
8	APÊNDICE c - MÉTODO DE VERIFICAÇÃO DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES	74
9	APÊNDICE D – CERTIFICADO TERMOHIGRÔMETRO	77
11	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

Quando se fala em técnicas analíticas nucleares, refere-se, com frequência, às técnicas que proveem a determinação qualitativa ou quantitativa de um elemento baseado nas características e propriedades do núcleo atômico. Dentre os diversos métodos analíticos existentes na área nuclear (IAEA, 2004), alguns usam espectrometria gama de alta resolução, técnica que surgiu como excelente alternativa de análise de radionuclídeos por proporcionar diversas informações em uma só análise, além de ser rápida e não destrutiva (JÚNIOR et al., 2009). Ela consiste na identificação e determinação da natureza de radionuclídeos contidos em uma amostra, além de calcular os parâmetros da emissão radioativa a partir do registro e análise do seu espectro de emissão. Tal espectro é único para cada nuclídeo e, para obtê-lo, utiliza-se um detector conectado a um sistema eletrônico de aquisição de dados (MOREIRA, 2005).

A espectrometria gama de alta resolução e a Análise por Ativação Neutrônica (NAA – *Neutron Activation Analysis*) estão diretamente relacionadas, pois a NAA se baseia na interação do nêutron com um determinado material e posterior aferição da radioatividade induzida por meio de espectrometria gama. A aplicação desta metodologia exige algumas condições, dentre elas a que o sistema de espectrometria gama seja altamente estável. Parte desta estabilidade está associada ao sistema de detecção dos fótons e outra parte associada à eletrônica de processamento dos sinais que, com o aumento do uso de processadores digitais de sinal que digitalizam o pulso de saída do pré-amplificador, ganhou muito em estabilidade.

A detecção dos sinais em espectroscopia de alta resolução é feita pelo detector, sistema com um meio onde a radiação depositará sua energia, frequentemente um cristal de material semicondutor e com um dispositivo de pré-amplificação dos sinais onde a carga induzida pela radiação no cristal será integrada e amplificada. O detector mais usado nesse tipo de medição, é o do tipo HPGe (germânio hiperpuro), que mesmo com algumas limitações como a eficiência geralmente menor do que a do detector NaI(Tl) (iodeto de sódio ativado com tálio) e por necessitarem estar em instalações com controle de temperatura e umidade, ainda assim, possuem a capacidade de determinar a energia da radiação gama com alta resolução (FERREIRA, 2012) e é bastante estável, pois em seu funcionamento normal sua

tensão de polarização não apresenta flutuações e deve ser mantido a temperatura de 77 K para evitar correntes geradas por efeitos térmicos (STRATTON, 2011).

O pré-amplificador, para evitar alta capacitância, é montado o mais próximo possível do detector. Uma parte, mais próxima ao detector, está em vácuo e à baixa temperatura, no entanto, parte dele fica fora e está sujeita a oscilações de ganho devido às variações de temperatura e umidade. Nas proximidades da parte do pré-amplificador que não está em vácuo em geral fica uma válvula de escape de N₂, o que provoca bruscas alterações de temperatura durante a recarga de N₂ e intensa condensação de água na região.

A influência de variáveis ambientais, como umidade e temperatura já foram consideradas por Sutton em seu estudo sobre variáveis ambientais, na obtenção de dados usando detectores HPGe em medidas de espectrometria gama *in-situ* (SUTTON, 1999). Também foi observado por Mei-Wo et al., que tais variações podem afetar a resolução de detectores, afetando a estabilidade dos componentes eletrônicos. Se o laboratório permanecer à altas temperaturas por longo período, a evaporação do nitrogênio líquido dentro do *dewar* irá ocorrer mais rapidamente, eventualmente comprometendo a eficiência do sistema de detecção (MEI-WO; AHMAD; MANSOR, 2009).

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver um sistema para a monitoração do ambiente do detector HPGe de alta resolução, visando agregar mais uma ferramenta que garanta a rastreabilidade e padronização dos procedimentos de medição de espectroscopia gama de alta resolução nos laboratórios de análises do Laboratório de Ativação Neutrônica (LAN) do IPEN-CNEN/SP.

Especificamente, objetiva-se:

- Criar uma estação de monitoramento com quatro sensores de temperatura e umidade, e um de tensão, ligado à alimentação do sistema de detecção. Um quinto sensor do tipo Termopar dentro do *dewar* fará o registro apenas da temperatura visando monitorar o nível das reservas de N₂Liq

- Desenvolver um software de comunicação com a estação;
- Registrar as variáveis de temperatura, umidade e tensão de alimentação durante a espectrometria gama, e durante o período em que o detector não estiver em uso;
- Garantir a geração de relatórios das leituras desta estação, para que seja viável realizar correlações com os dados de controle da resolução dos detectores, com os dados obtidos do sistema de espectrometria durante as medidas de NAA e com os registros de controle de temperatura e umidade do laboratório.

O sistema será interconectado ao mesmo computador que é responsável pela coleta das aquisições do detector, que fará a interpretação dos dados lidos por meio da porta serial e então a armazenagem desses em um banco de dados.

Sabe-se que a realização da monitoração informatizada de temperatura e umidade já é realidade em alguns laboratórios, inclusive no ambiente em que se encontra o sistema de espectrometria gama (GLAVIČ-CINDRO; KORUN; VODENIK, 2005) no entanto sistemas comerciais de monitoramento de temperatura e umidade ambiente tendem a ser caros e não flexíveis à adaptação específica. Portanto, a proposta da adoção de componentes de baixo custo também vem somar como motivação para o desenvolvimento de tal sistema.

Este trabalho foi estruturado de maneira que, no capítulo 2, é apresentado a fundamentação teórica acerca dos princípios da análise por ativação neutrônica e os detectores de germânio hiperpuro. Ainda neste capítulo, há uma sessão para tratar sobre alguns conceitos de sistema de gestão de qualidade, e a importância de sua implantação em laboratórios analíticos, bem como tópicos da norma ISO 17025/2005 que lida com aspectos técnicos nos laboratórios que seguem um sistema de qualidade. Em seguida, o capítulo 3 trás os métodos experimentais, com a descrição dos materiais e métodos utilizados para alcançar os objetivos aqui propostos. Por último, nos capítulos 4 e 5 são apresentados os resultados e conclusões respectivamente.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 ANÁLISE POR ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA

Desenvolvida pela primeira vez em 1936 por G. Hevesy e H. Levi, criando sua própria fonte de nêutrons, após pulverizar berílio em uma argamassa de ágata e misturando com ^{222}Rn . Com um detector de radiação do tipo câmara de ionização, logo perceberam que o elemento disprósio (Dy) na amostra de terras raras tornou-se altamente radioativo após a exposição à fonte de nêutrons. Assim, eles mostraram que era possível determinar a presença do disprósio, mesmo que em poucas quantidades, como sendo impureza nestas amostras por meio desta radiação induzida (GREENBERG; BODE; DE NADAI FERNANDES, 2011; HAMIDATOU; SLAMENE; AKHAL; ZOURANE, 2013). O nome do método de análise de radioativação, ou simplesmente análise de ativação foi sugerido em 1949 por Boyd (GREENBERG; BODE; DE NADAI FERNANDES, 2011)

A Análise por Ativação Neutrônica foi ganhando espaço e aplicabilidade pois na década de 1940 estavam sendo desenvolvidos reatores nucleares. Nos anos 1950 o estado da arte do método era a aplicação de técnicas radioquímicas utilizando detectores de cintilação de baixa resolução como NaI (TI) e, posteriormente nos anos 1960, vieram os detectores de semicondutores (Ge, Si, etc) e o uso de analisadores multicanais – MCA e nos anos 1970 o uso dos computadores e softwares relevantes. A tecnologia nuclear continuou avançando para ser uma importante ferramenta analítica na determinação de elementos a nível de traço (HAMIDATOU; SLAMENE; AKHAL; ZOURANE, 2013).

Sinteticamente pode-se dizer que a Análise por Ativação Neutrônica – NAA é um método que se baseia na indução e posterior medição de decaimento radioativo da atividade para identificar radionuclídeos a partir de elementos naturalmente estáveis. Tal processo se dá pelo bombardeamento com nêutrons no material a ser analisado, comumente chamado de amostra, resultando em reações nucleares que são características de cada elemento (PETRONI, 2015). O bombardeamento geralmente é realizado com fluxo de nêutrons de 10^{12} - 10^{14} nêutrons cm^2/s , em reatores nucleares experimentais que operam na região de potência térmica máxima de 100 kW - 30 MW, que são as fontes de nêutrons mais eficientes para análise de alta sensibilidade por ativação induzida por nêutrons epitérmicos e térmicos.

2.1.1 Princípios básicos

A ativação acontece com a reação nuclear mais comum usada na NAA, a reação (n,γ) . Os nêutrons provenientes do reator interagem com o núcleo dos núclídeos (por captura) dos elementos presentes na amostra, tornando-se assim, radionuclídeos. Em outras palavras, o núcleo atingido pelos nêutrons se tornam núcleos compostos em estados excitados. Tal excitação é devido à ligação entre o núcleo e o nêutron. Quase que instantaneamente o núcleo busca uma configuração mais estável, emitindo radiação até voltar à estabilidade (GREENBERG et al., 2011; HAMIDATOU et al., 2013). A Figura 2 mostra esta sequência de eventos após a colisão do nêutron com o núcleo. O tipo de partícula e/ou radiação emitida pelo núcleo depende da energia dos nêutrons de bombardeio e do núcleo que foi atingido, na maioria dos casos o núcleo formado irá decair emitindo raios gama (ROCHA JÚNIOR, 2006).

Figura 1 - Sequência de eventos de uma típica reação de captura, ou (n,γ)

FONTE: (HAMIDATOU; SLAMENE; AKHAL; ZOURANEN, 2013) – Traduzida.

Em função do momento das mensurações dos raios gama a NAA é subdividida em dois tipos, são eles: PGNAA – *Prompt Gamma Neutron Activation Analysis*, tal nomenclatura se dá porque as medidas são realizadas ao mesmo tempo em que acontece a irradiação, isto devido a emissão de raios gamas prontos ocorrer na ordem de milissegundos logo após a reação (n,γ) como visto na Figura 2. Em contrapartida,

a DGNAA – *Deleyad Gamma Nêutron Activation Analysis* não precisa de mensuração durante a irradiação, pois os raios gamas (*Deleyad* – Retardados) são emitidos durante um período tempo bem maior, tempo este, que varia de acordo com a meia vida do radionuclídeo gerado (HAMIDATOU; SLAMENE; AKHAL; ZOURANEN, 2013).

A técnica de ativação com nêutrons também pode ser dividida segundo a manipulação da amostra, em RNAA (Radioanalytical Neutron Activation Analysis) onde separações radioquímicas são necessárias antes do processo de medição e INAA (Instrumental Neutron Activation Analysis) onde apenas a instrumentação de medida é usada. Ainda nesta última modalidade, o método comparativo é usado, onde medidas com a amostras e com padrões são feitas. Para (HAMIDATOU; SLAMENE; AKHAL; ZOURANEN, 2013) a técnica de INAA comparativa consiste em um conjunto de procedimentos divididos em 4 passos, que vão desde a preparação da amostra (passo 1) até a medida e a avaliação dos espectros gama obtidos pelo sistema de espectrometria (passo 4). O passo 3 é responsável pela medição da radioatividade induzida, resultando em espectro de energia da amostra e do padrão. É nesta etapa que entram os detectores de radiação, um material absorvedor no qual, pelo menos parte da energia de radiação é convertida em resultados detectáveis (GREENBERG; BODE; NADAI FERNANDES, 2011). Um detector de radiação tem a função de produzir um sinal para cada radiação que entra nele (TSOULFANIDIS; LANDSBERGER, 2011). Os detectores de semicondutores Si e Ge são mais usados atualmente devido sua resolução em energia ser superior a dos detectores de cintilação (GREENBERG; BODE; NADAI FERNANDES, 2011). Um detector semicondutor, sua eletrônica associada e um analisador multicanal é de que consiste basicamente um sistema de espectrometria gama (HAMIDATOU; SLAMENE; AKHAL; ZOURANEN, 2013).

2.2 DETECTORES DE RADIAÇÃO GAMA – GERMÂNIO HIPERPURO

Como mencionado em seção anterior, há diversos tipos de detectores de radiação, diferindo uns dos outros pelo material com o qual a radiação irá interagir, na maioria dos detectores o sinal de saída é um pulso de tensão. É possível elencar os requisitos que o sistema detector deve ter para ser considerado ideal, salientando que

nenhum detector atende 100% dos requisitos (TSOULFANIDIS; LANDSBERGER, 2011). Os requisitos são:

1. Para cada partícula que entra no detector deveria ser gerado um pulso de saída maior que o ruído eletrônico (essa característica determina a resolução do detector);
2. A duração do pulso deve ser curta (medida de tempo morto do detector), partículas que entram uma após a outra devem gerar pulsos separados no decorrer do tempo;
3. Se a energia de uma partícula for medida, a altura do pulso deve ser bem conhecida para posteriormente se estabelecer uma relação entre seu valor e a energia da partícula. Para isso, as dimensões geométricas do detector devem ser tal qual a partícula possa depositar toda sua energia, ou uma fração conhecida desta;
4. O detector deve gerar o mesmo pulso (mesma altura) no caso de duas ou mais partículas depositarem a mesma energia, essa característica determina a resolução do detector. Uma boa resolução é muito importante se o campo de radiação consiste de partículas com energias diferentes e o objetivo das medidas seja identificar e separar as contribuições dos fótons com estas energias.

Nos laboratórios de ativação neutrônica (LAN) do Centro do Reator de Pesquisas (CRPq) do IPEN-CNEN/SP basicamente são utilizados detectores de germânio, para medida de radiação gama. O motivo que leva os detectores HPGe serem os mais utilizados na NAA é a alta resolução e uma eficiência relativa com valores em torno de 20% a 60%. Como descrito no requisito 4, a resolução está relacionada à capacidade em medir e distinguir os diferentes picos em um menor espaço possível no espectro de raios gama. Um ponto a ser destacado é que nas medições de energia o importante é a resolução em energia do sistema de medição (detector – pré-amplificador – amplificador), e não apenas a resolução do detector (TSOULFANIDIS; LANDSBERGER, 2011). Sendo assim, a ordem com que são apresentadas as partes principais (pertinentes a este trabalho) de um sistema de detecção segue praticamente uma abordagem de dentro para fora, mas antes disto, se faz necessário falar primeiro sobre a característica dos semicondutores que leva ao uso deste material para os compor.

Os materiais sólidos são divididos em três tipos de acordo com sua condutividade elétrica: isolantes, condutores e semicondutores. Quando um pedaço de um material é exposto a um campo elétrico, se uma corrente irá passar por ele ou não, irá depender do tipo do material. É um isolante se a corrente é igual a zero em qualquer temperatura (exceto quando a tensão for tão alta que ocorre descarga elétrica); se a corrente fluir ele é um condutor. No caso de a corrente ser igual a zero a baixas temperaturas, e este valor for maior a altas temperaturas, ele é considerado um semiconductor. Essa condutividade quer dizer movimento de elétrons, que dependendo do tipo de material transitam em bandas com características diferentes. As bandas nada mais são que os estados energéticos possíveis dos elétrons dentro de um sólido, que são agrupadas de maneira que as bandas permitidas são separadas por bandas proibidas. Quando uma banda de energias mais profundas está totalmente preenchida com elétrons, diz-se que esta é uma banda de valência, inerte térmica e eletricamente. A banda que é preenchida parcialmente é chamada de banda de condução.

A Figura 2 mostra que em um átomo livre os elétrons são permitidos apenas em níveis discretos de energia (2.a). Já nos sólidos (2.b) os estados de energias se apresentam em bandas, podendo haver apenas elétrons nas bandas 1, 3 e 5. Nas bandas 2 e 4 eles são proibidos (*Forbidden*).

Figura 2 (a) Níveis de energias atômicos são linhas discretas, (b) Nos sólidos, os estados de energias permitidos se apresentam em bandas.

FONTE: (TSOULFANIDIS; LANDSBERGER, 2011)

Nos semicondutores, a banda de valência é cheia e a banda de condução vazia, mas a lacuna de energia entre estas bandas é muito pequena, na ordem de

1eV. A temperaturas muito baixas, a condutividade é zero e sua banda de energia é parecida com a de um isolante. À medida que a temperatura aumenta, os elétrons ganham energia suficiente para migrar para a banda de condução, aparecendo neste momento a condutividade, à temperatura ambiente a energia térmica do próprio material já é suficiente para gerar essa migração (TSOULFANIDIS; LANDSBERGER, 2011a).

Os detectores HPGe podem ser de vários tamanhos e configurações de formato (WALLBRINK, 2003), o mais comum é o de formato coaxial (HAMIDATOU; SLAMENE; AKHAL; ZOURANEN, 2013), a maneira como a tensão é aplicada e como a carga resultante dos raios gama é coletada depende desta configuração. Quando (WALLBRINK, 2003) menciona configurações, ele se refere à posição e espessura dos contatos do detector, e destaca também que para cada intervalo de energia a ser mensurado há uma configuração mais adequada.

Quando a radiação passa por um material semicondutor com estrutura de bandas provoca a criação de um grande número de pares elétrons-buracos em seu trajeto (TAUHATA et al., 2013), por tal característica, no cristal de germânio ao ser submetido a um campo elétrico, os pares de elétrons-buraco se movimentam na direção dos coletores de carga, gerando um pulso proporcional à radiação depositada. O valor da energia de ionização ε (quantidade de energia gasta pela radiação para formar o par de elétron-buraco) em semicondutores é em torno de 3 eV enquanto em um detector típico a gás é em torno de 30 eV, isso significa que mais pares são criados, garantindo duas vantagens aos semicondutores: a resolução, pois diminui a flutuação estatística e a influência do ruído eletrônico, neste caso há uma melhor relação sinal-ruído (TAUHATA et al., 2013).

2.2.1 Pré-Amplificador

Sendo o primeiro elemento da cadeia de processamento de sinais, ele é colocado o mais próximo possível do detector visando-se a melhoria da relação sinal-ruído (TAUHATA et al., 2013). O propósito principal é garantir o acoplamento otimizado entre a saída do detector e o resto do sistema de contagem. O sinal advindo do detector é muito fraco e antes de ele ser gravado ele precisa ser amplificado em 100 vezes ou até 1000 vezes, para que então consiga ser transmitido até o amplificador, que é o próximo instrumento do sistema de contagem (TSOULFANIDIS;

LANDSBERGER, 2011). Tauhata et al. Menciona que o pré-amplificador realiza o casamento de impedâncias do detector com a do amplificador, para que o sinal possa prosseguir por distancias maiores sem sofrer distorções (TAUHATA et al., 2013).

2.2.2 Dewar

Mesmo necessitando serem mantidos sob temperatura baixa e controlada, devido ao efeito térmico nos semicondutores de pequena largura de banda proibida, o detector HPGe foi tomando o espaço dos feitos com germânio dopado com lítio Ge(Li) , pois a vantagem do primeiro é que mesmo não estando em uso ele pode ser mantido a temperatura ambiente, sem danificar a estrutura do material, uma vez que isso não é possível no Ge(Li) , pois há migração do lítio no material (TAUHATA et al., 2013). Desta forma, um dos modos de manter o detector refrigerado é com N_2 líquido, onde a parte responsável por garantir que a câmara em vácuo que acomoda o cristal de germânio esteja resfriada é chamado de *dewar* – (vaso com paredes duplas isoladas a vácuo), os principais modelos geralmente comportam aproximadamente 30 litros de N_2 .

No manual do usuário dos detectores é informado que o intervalo de temperatura ambiente para os detectores resfriados a nitrogênio líquido está entre 5 °C e 40 °C. No caso da umidade, o limite é de 95% sem condensação, com observação para os modelos que possuem janelas de Berílio ou polímero, que não podem haver condensações, ocasionando danos a elas.

Em estudos anteriores, parâmetros como a centroide de um fotopico, a largura à meia-altura do pulso (Full Width at Half Maximum – *FWHM*), e eficiência foram observados e contrapostos à temperatura ambiente do laboratório. No caso da centroide do fotopico, observou-se que aparentemente sob temperaturas ambientes iguais ou superiores a 29° C, os picos tendem a se deslocar para um valor mais baixo (MEI-WO, AHMAD e MANSOR, 2007). Neste caso, como os picos são usados para identificar os radionuclídeos, pois corresponde à sua energia, induziria os pesquisadores ao erro ou até mesmo softwares programados para identificar fotopicos com valores pré-estabelecidos.

Outro ponto observado (Mei-Wo, 2007) foi o efeito que a temperatura pode vir a trazer na eficiência do sistema, principalmente se o detector for deixado por muito tempo em uma sala com temperaturas elevadas, pois isso aceleraria o processo de

evaporação do nitrogênio líquido do *Dewar* e eventualmente isto pode afetar a eficiência do sistema. A Figura 3 apresenta a contraposição da temperatura com a eficiência.

2.3 SISTEMA DE GESTÃO DE QUALIDADE

Se um laboratório almeja que seus produtos e serviços sejam confiáveis e de qualidade assegurada, é necessário implantar e manter um sistema de gestão da qualidade destes serviços. Não somente visando a acreditação por parte dos órgãos responsáveis, um Sistema de Gestão de Qualidade – SGQ irá promover a cultura interna com o foco sempre na qualidade, melhoria contínua e no atendimento as necessidades específicas dos clientes (ROSA et al., 2013).

Implantar um SGQ pode demandar mudanças de rotinas sob a ótica de normas, documentos técnicos e protocolos de recomendações, e quando se fala em laboratórios de ensaios e calibração a norma usada como referência é a ABNT ISO/IEC 17025 pois nela são abordados pontos para a implantação de um sistema de qualidade e um processo de gestão da qualidade aliado que garanta a sustentabilidade dos procedimentos analíticos, além de ser a de maior reconhecimento atualmente (PETRONI, 2015; ROSA et al., 2013).

(PETRONI, 2015) destaca que a implantação do SGQ não trata diretamente da questão da garantia do resultado obtido nas medições, mas sim de metodologia aplicada ao planejamento das atividades desenvolvidas por uma organização, incluindo mão de obra, recursos humanos, equipamentos e procedimentos, visando o reconhecimento da excelência de como são realizadas todas as atividades. A adoção de normas como a ISO 9000 já é considerada uma prática comum e de grande relevância para a indústria e empresas de prestação de serviço. No mesmo sentido está crescendo as exigências de normas que certifiquem os serviços de laboratórios de calibração e ensaio, de acordo com padrões internacionais, pois são exigências das normas da família ISO 9000 (MÜLLER; DINIZ, 2007). Ou seja, se uma empresa que atende aos requisitos da ISO 9000, e dentre estes, se exige que o laboratório que faça a calibração e/ou ensaios de seu produto, que também esteja de acordo com normas internacionais que assegurem a qualidade dos seus serviços, fica claro que aquela empresa tem um produto que passou por testes de qualidade feitos por um laboratório, que também segue normas que assegurem a qualidade do seu serviço.

2.3.1 Sistema de qualidade nos laboratórios analíticos

Os processos de análise em laboratórios devem seguir um conjunto de atividades planejadas e sistematizadas garantindo a qualidade e rastreabilidade metrológica dos procedimentos. Tais atividades são de caráter pré-analíticos, analíticos e pós analíticos. A implementação de um sistema de qualidade aos laboratórios analíticos, baseados nas normas “ABNT NBR ISO/IEC 17025: Requisitos Gerais para a Competência de Laboratórios de Ensaio e Calibração”, assegura a confiabilidade dos serviços prestados (ROSA et al., 2013). Além disso, tal norma foi desenvolvida “para garantir que os laboratórios que trabalham de acordo com ela, operem conforme as normas ISO 9000 no que diz respeito ao sistema de qualidade, além de garantir que o laboratório detém competências que asseguram a produção de dados e resultados tecnicamente válidos” (MÜLLER; DINIZ, 2007). Isso quer dizer que um laboratório que atende a tal norma, está operando um sistema de gestão de qualidade segundo os princípios da ISO 9000 e que cobre a competência técnica requerida que não é coberta na ISO 9001. Vale frisar que a ISO/IEC/EN 17025 não é utilizada como base única para conseguir a certificação do laboratório, uma vez que esta norma não cobre conformidade com requisitos regulamentadores e de segurança de operação.

Na publicação “*Training Course Series Nº 24 - Quality System. Implementation for Nuclear Analytical Techniques*” (IAEA, 2004) também são mencionados os esforços que os organismos internacionais, como a Associação das Comunidades Analíticas (AOAC International), a EURACHEM, a União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), a União Européia (UE) e a Organização Internacional de Normalização (ISO) fizeram no sentido de estabelecer diretrizes para um sistema de qualidade geral a ser aplicado em laboratórios analíticos para rastrear e documentar os resultados de forma que a compatibilidade entre laboratórios possa ser obtida, ou seja, um sistema de controle de qualidade (QC) e garantia de qualidade (QA).

Particularmente, na medida de espectrometria de alta resolução, o controle das condições ambientais nos laboratórios é de extrema importância pois tais condições afetam diretamente o sistema de aquisição e, portanto, a qualidade dos resultados produzidos.

2.4 A NORMA ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005.

Esta norma foi estruturada com base em normas que se preocupam com competências técnicas dos laboratórios, neste caso a EN 45001, e os requisitos para sistemas de gestão de qualidade, a família ISO 9000 (ABNT, 2005). A figura 5 ilustra essa fusão.

Figura 5 Formação da ISO 17025

FONTE: (MÜLLER; DINIZ, 2007)

Os objetivos dessa norma são especificar os requisitos gerais para a competência em realizar ensaios e/ou calibrações, incluindo amostragens. Independente do número de pessoas, esta norma se aplica a todos os laboratórios e organizações, sejam de primeira parte (onde o fornecedor realiza ensaio em seu próprio produto), segunda parte (o cliente realiza os ensaios no produto do fornecedor) e terceira parte (Laboratório que realiza o ensaio não tem interesse no produto em questão). Esta norma não tem como objetivo ser usada como base para garantir a certificação de laboratórios. Quando um laboratório não realiza uma ou mais das atividades cobertas pela norma, os requisitos referentes a estas seções não são aplicáveis. Ao atenderem os requisitos desta norma, os laboratórios operarão um sistema de gestão de qualidade para as suas atividades de ensaio e calibração, que também atende os princípios da ABNT NBR ISO 9000.

2.4.1 Requisitos técnicos

A ABNT NBR ISO/IEC 17025:2015 traz algumas diretrizes para uma administração eficiente e eficaz do laboratório, seguindo os padrões de qualidade da ISO 9000. Além dos requisitos técnicos, ela abrange os critérios da direção que se dividem em organizacionais, sistema de gestão, controle de documentos, subcontratação de ensaios e calibrações, aquisição de serviços e suprimentos,

atendimento ao cliente, reclamações, controle de registros dentre outros. Porém, como esses critérios estão ligados diretamente com as questões administrativas, aqui serão explorados somente alguns pontos dos requisitos técnicos, por estarem relacionados ao escopo deste trabalho.

São diversos fatores que determinam a correção e a confiabilidade dos ensaios e/ou calibrações realizadas pelo laboratório, esses fatores contam com a contribuição de fatores humanos, acomodações e condições ambientais, métodos de ensaios e calibração e validação de métodos, equipamentos, rastreabilidade da medição, amostragem, manuseio de itens de calibração e ensaio. Os fatores de acomodações e condições ambientais, métodos de ensaio e calibração e validação de métodos, equipamentos e rastreabilidade são os que mais estão relacionados aos objetivos deste trabalho, e sob os quais esses objetivos se propõem a atuar. Tal abordagem pontual visa a objetividade, não sendo, portanto, menos importantes os fatores que aqui não foram mencionados.

2.4.1.1 Acomodações e condições ambientais.

A norma ABNT ISO 17025, informa sobre as condições das instalações do laboratório para ensaio e/ou calibração, incluindo pontos como as fontes de energia, iluminação e condições ambientais, e como devem ser propícios a realização correta dos ensaios e/ou calibrações. Tais condições devem ser favoráveis o suficiente para não invalidarem os resultados. Os requisitos técnicos para as acomodações e as condições ambientais que possam afetar resultados devem estar documentados. Além disso, o laboratório deve monitorar, controlar e registrar as condições ambientais conforme requerido pelas especificações, métodos e procedimentos pertinentes, quando possam influenciar a qualidade dos resultados. Caso as condições ambientais comprometam os resultados, os ensaios e/ou calibrações devem ser interrompidos. Especial atenção deve ser dada a fatores como, esterilidade biológica, distúrbios eletromagnéticos, umidade, alimentação elétrica, temperatura dentre outros, conforme apropriado para as atividades em questão.

2.4.1.2 Métodos de ensaio e calibração e validação de métodos.

É o tópico da ISO 17025 que foca nos métodos e procedimentos apropriados que um laboratório deve adotar para seus ensaios e/ou calibrações, e que deve haver instruções sobre o uso e a operação de todos os equipamentos pertinentes, onde a falta de tais instruções possa comprometer os resultados. Tais instruções devem estar prontamente disponíveis para o pessoal.

Na prática, o laboratório deve realizar confirmação de sua condição de operar métodos normalizados. Se, por ventura, o método normalizado mudar, a rotina de confirmação deve ser repetida. A validação de métodos é a confirmação por exame e fornecimento de evidência objetiva de que os requisitos para um determinado uso são atendidos, sendo conveniente que a técnica usada para a determinação do desempenho de um método seja uma ou a combinação destas: calibração com uso de padrões de referência ou materiais de referência; comparações com resultados obtidos por outros métodos; comparações Inter laboratoriais; avaliação sistemática dos fatores que influenciam o resultado; avaliação da incerteza dos resultados com base no conhecimento científico dos princípios teóricos do método e na experiência prática (ABNT, 2005).

2.4.1.3 Equipamentos

O laboratório deve possuir todos os equipamentos para amostragens, medição e ensaio requeridos para o desempenho correto dos ensaios e calibrações, sendo capazes de atingir a exatidão requerida e devem atender às especificações pertinentes aos ensaios ou calibrações em questão. Antes de serem utilizados, os equipamentos devem ser verificados e devidamente calibrados, e assim serem operados apenas por pessoas autorizadas. As instruções devem estar sempre atualizadas e disponíveis, seja para uso ou para manutenção. O equipamento que foi submetido à sobrecarga ou foi manuseado incorretamente deve ser retirado de serviço, pois pode produzir resultados suspeitos, mostrando assim estar com defeitos ou fora dos limites especificados. O laboratório deve examinar o efeito deste defeito ou desvio dos limites especificados e deve colocar em prática o procedimento para “controle de trabalho não-conforme”, explanado em seção específica na norma. Todo equipamento de ensaio e calibração, incluindo tanto hardware como software, deve

ser protegido contra ajustes que invalidariam os resultados dos ensaios e/ou calibrações (ABNT, 2005).

2.4.1.4 Rastreabilidade de medição

O Vocabulário Internacional de Metrologia – VIM define rastreabilidade metrológica como sendo a propriedade de um resultado de medição pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência por meio de uma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, onde cada uma delas contribui para a incerteza de medição (INMETRO, 2012). Nos laboratórios de calibração, o programa de calibração do equipamento deve ser projetado e operado de forma que assegure que as calibrações e medições feitas pelo laboratório sejam rastreáveis ao Sistema Internacional de Unidades – SI, uma vez que todo equipamento utilizado em ensaios ou calibrações, até os equipamentos para medições auxiliares, devem ser calibrados antes de entrar em serviço (ABNT, 2005). É considerada evidência suficiente da rastreabilidade dos dados de calibração, o certificado de calibração de um laboratório acreditado, segundo a norma ISO 17025, que contenha o logotipo de um organismo de acreditação (MÜLLER; DINIZ, 2007).

Para laboratórios de ensaio, os requisitos para laboratórios de calibração citados acima se aplicam a equipamentos de medição e ensaio utilizados para medição, a não ser que tenha sido estabelecido que a contribuição associada à calibração tenha pouca interferência na incerteza total do resultado do ensaio. Nesta situação, o laboratório deve assegurar que o equipamento usado pode fornecer a incerteza de medição necessária.

3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo destina-se a descrever o laboratório alvo da pesquisa, o sistema de aquisição de espectrometria gama, bem como sua disposição e acomodação no laboratório. Também são descritos os componentes eletrônicos que foram utilizados e quais serão suas funções em relação ao sistema desenvolvido. Por fim, como foi feita a conexão/integração de todos os componentes no circuito eletrônico, e a maneira como o *software* e o *hardware* se comunicam desde o envio da solicitação dos dados à estação até seu armazenamento na base de dados.

3.1 O SISTEMA DE ESPECTROMETRIA GAMA NO LAN

A estação foi instalada para monitorar o detector HPGe de modelo GC2018 da Canberra, cuja eficiência nominal é de 20% e resolução de 1.8 KeV para o fotopico de 1332 KeV do ^{60}Co , este por sua vez é interligado ao analisador digital de pulsos DSA-1000. O software que controla o sistema de aquisição utilizado neste detector é o Genie 2000 versão 3.1, da própria fabricante Canberra. Dos 12 detectores do tipo HPGe do parque de detectores do LAN, 5 utilizam o Genie 2000.

Figura 6 - Blindagem de chumbo com revestimento de placas de cobre

FONTE: (SECCO, 2016)

Dentro da nomenclatura interna do laboratório, o detector alvo do estudo possui o nome de Canberra 6, e está acomodado dentro de uma blindagem feita de blocos de chumbo e placas de cobre em seu interior, de tal forma que todo detector e o *dewar* fica dentro desta blindagem para reduzir a radiação de fundo durante as medidas.

3.2 MICROCONTROLADOR ARDUINO

Na Itália, em 2005, o professor Massimo Banzi, com uma ideia de tornar mais acessível e mais fácil para seus alunos de design utilizarem tecnologia em seus projetos, buscou uma forma de criar um microcontrolador que atendesse esses requisitos para que pudessem adquirir a um baixo custo e utilizassem sem a necessidade de um profundo conhecimento na área de eletrônica e programação (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM, 2013). Assim nasceu o Arduino, uma plataforma de hardware e software com uma proposta inovadora, pois sua essência está na simplificação do hardware, promovendo a externalização dos pinos *Input/Output* - entrada e saída do microcontrolador de 8 bits Atmel AVR com 16MHz de *clock* de velocidade, e arquitetura RISC – *Reduced Instruction Set Computer*.

A placa Arduino se apresenta em vários modelos, cada um com configurações, disponibilidade de mais ou menos pinos de entrada e saída, a depender do propósito do projeto. O modelo utilizado no projeto foi o Arduino UNO, equipado com um microcontrolador ATmega328 com memória flash de 32KB e um ATmega8U2 já programado para fazer a conversão da comunicação *Universal Serial Bus* – USB para a comunicação serial. Como descrito por Evans *et.al.* é a melhor aposta para uma placa para projetos básicos e intermediários com alimentação autochaveada e uma tensão integrada de 3,3V. Na Figura 7 é mostrado o *layout* desta placa.

Figura 7 Layout da placa e pinos do Arduino Uno.

FONTE: (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM, 2013)

O modo como o Arduino estende suas funcionalidades é por meio de bibliotecas, como por exemplo escrever um texto em uma tela LCD, fazer a conversão do sinal recebido de um sensor e mostrá-lo de maneira compreensível no projeto a que se destina, etc... Toda vez que é necessário usar sensores, módulos, motores de passo, *Shields* e outros, há no Arduino três tipos de bibliotecas: bibliotecas essenciais, construída dentro da própria IDE - *Integrated Development Environment*, bibliotecas padrão e de terceiros. A forma como a biblioteca essencial esconde a complexidade foi o que tornou fácil a programação de microcontroladores no Arduino (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM, 2013).

3.3 SENSORES E MÓDULOS

Os sensores e módulos, como são chamados os circuitos com uma finalidade pré-definida, utilizados na prototipação e confecção da estação de monitoramento são descritos um a um para que finalmente, em sua totalidade, seja compreendido como tal estação foi construída e como atuarão na busca da obtenção dos objetivos deste trabalho.

3.3.1 Sensor DHT22 – temperatura e umidade

O Arduino possui grande compatibilidade e conectividade com os mais diversos sensores e módulos de outros fabricantes. Para monitoramento de temperatura e umidade relativa, há disponível várias opções. No entanto, optou-se usar o DHT22 da Aosong Electronics Co.,Ltd, por já ser um sensor integrado de temperatura e umidade, como pode ser observado na Figura 8. Ele é alimentado de 3,3 V – 5,5 V DC e possui capacidade de operação no intervalo de 0 a 99,9% de umidade relativa, com acurácia de $\pm 2\%$ a 25 °C (Figura 9), e de -40 °C a 80 °C. Os resultados podem ser apresentados com uma casa decimal, ou seja, a precisão de 0,1% de umidade relativa e 0,1 °C. O tempo de resposta à sensibilidade da temperatura é de aproximadamente 2 segundos (AOSONG, s.d.)

Figura 8 Sensor DHT22 - Temperatura e Umidade..

FONTE: <https://lastminuteengineers.com/dht11-dht22-arduino-tutorial>

Figura 9 – Acurácia da umidade relativa e temperatura no DHT22

FONTE: (AOSONG, s.d.)

O sensor de umidade é capacitivo, composto por dois eletrodos divididos por uma camada com um substrato que retém a umidade, quanto maior a umidade, menor é a resistência entre os eletrodos, por sua vez quanto menor a umidade, maior será a resistência. Na Figura 10 é exibido um esquema de como é este sensor.

Figura 10 - Estrutura do sensor de umidade do DHT22

FONTE: <https://lastminuteengineers.com/dht11-dht22-arduino-tutorial>

Foram distribuídos 4 sensores DHT22 em 4 locais diferentes, a saber: um nas proximidades do pré-amplificador (Sensor 1); um próximo à válvula de escape de N₂ (Sensor 2); outro dentro da câmara de blindagem (Sensor 3) e, por fim, mais um na sala onde se encontra o detector (Sensor 4). Na Figura 11 a distribuição destes sensores é indicada por meio de um esquema.

Figura 11- Esquema da disposição dos sensores de DHT22.

FONTE: Germanium Detectors – Users Manual. Canberra (2003).

NOTA: Adicionado elementos gráficos representativos dos sensores

3.3.2 Termopar tipo k – temperaturas criogênicas

Apesar do nome deste tópico referir-se a temperaturas abaixo de $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$, um termopar não é utilizado apenas com este propósito. Tendo em seu princípio de funcionamento o *seebeck effect*, um termopar é um dispositivo que consiste de dois termoelementos distintos em forma de fios unidos em uma de suas pontas, chamada de extremidade de junção - *junction end* ou junção de medição, que deve ser exposta a um ambiente cuja temperatura deseja-se medir. As outras pontas, *tail end* ou junção de referência, devem estar em temperatura diferente, como por exemplo temperatura ambiente. Por causa da diferença de temperatura entre as pontas, uma diferença de tensão pode ser medida entre os dois fios (SCERVINI'S, 2009).

Os termopares possuem diversas configurações que atendem diversas aplicações e, neste trabalho, a principal das características que foi observada na escolha do tipo de termopar é o tipo de liga em que constitui cada termoelemento. O tipo K foi introduzido no início século XX pela Hoskins Manufacturing, onde o termoelemento positivo é o Cromel e o negativo o Alumel cujas composições são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição aproximada para o Cromel e Alumel.

Elementos	Cromel (%)	Alumel (%)
Ni	90	95
Cr	10	-
Mn	-	3
Al	-	2

FONTE: (SCERVINI'S, 2009)

O termopar do tipo K (Figura 12) possui sensibilidade de medição na faixa de temperatura entre $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $1372\text{ }^{\circ}\text{C}$, com resolução de $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este modelo é vastamente utilizado no setor industrial devido seu baixo custo, boa resolução e boa resistência à oxidação e um *seebeck coefficient* relativamente alto de $41\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, medida da magnitude de uma tensão termoelétrica induzida em resposta a uma diferença de temperatura através desse material. Estes valores estão tabulados pela *National Institute of Standard of Technology*, no ITS-90 *Thermocouple database*¹ onde para cada tipo de termopar e a cada faixa de temperatura há valores definidos. Por exemplo, de acordo com a base de dados, a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ um termopar tipo K irá produzir $12,2\text{ mV}$ (SHTARGOT; MIRZA, 2011).

Figura 12 - Termopar tipo K usado na estação

FONTE: Elaborada pelo autor

¹ <https://srdata.nist.gov/its90/menu/menu.html>

O termopar utilizado é em formato de sonda (encapsulada) e foi acomodado de forma que sua ponta de medição ficasse aproximadamente na metade da altura do *dewar* (Figura 11), deixando apenas seus conectores para o lado de fora, de maneira que não causasse evaporação do N_2 .

3.3.3 Módulo max31855k – compensador de junção fria

Anular a tensão termoelétrica nas junções de referência, para calcular a temperatura na junção de medição, é um procedimento conhecido como compensação de junção fria, que tem por finalidade eliminar ou compensar as novas junções criadas. Esta técnica pode ser alcançada de algumas formas, por exemplo o banho de gelo, ilustrado na Figura 13, que por sua natureza as junções dos termopares não geram tensão termoelétrica à 0°C ; outra forma é o constante monitoramento das junções de referência por meio de diodos, termistores ou RTD – *Resistance Temperature Detectors*, e então o cálculo da tensão termoelétrica das junções de referência; ou ainda, o controle e fixação de temperatura conhecida nas junções de referência.

Figura 13 - Esquema do banho de gelo para anular a temperatura na junção de referência

FONTE: (CAPGO, 2013)

No entanto, manter estas extremidades ao ponto de gelo não é uma prática viável, sendo assim, as junções de referência são continuamente monitoradas. Essas junções de extremidades são assim consideradas pois, em algum momento, elas se

conectam a um bloco terminal que transita das ligas do termopar para o cobre, geralmente usado em circuitos impressos, que por sua vez são tratadas como uma única junção devido à lei dos metais intermediários. Neste momento, quando a temperatura da junção de referência é conhecida, a temperatura absoluta da junção de medição pode ser calculada.

De acordo com o *datasheet* do módulo MAX31855K₂ (Figura 14), antes de converter a tensão termoelétrica em um valor de temperatura equivalente, é necessário compensar a diferença entre a junção fria à temperatura ambiente e o 0 °C virtual de referência, sendo assim, este módulo realiza uma linearização das voltagens de saída do termopar, tomando como base a sensibilidade de 41,276 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ dos termopares do tipo K, por meio da equação:

$$T_{\text{OUT}} = (41,276 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}) \times (T_{\text{R}}^{\circ}\text{C} - T_{\text{AMB}}^{\circ}\text{C}) \quad (1)$$

onde T_{out} é a tensão de saída do termopar em μV , T_{R} é a temperatura da junção de medida, e T_{AMB} é a temperatura ambiente do dispositivo.

A acurácia garantida pelo fabricante é de aproximadamente 2° C quando medindo temperaturas entre -200 °C a 700 °C. A resolução de 14 bits garante que os últimos 4 bits sejam destinados a mostrar as temperaturas com precisão de 0,25 °C.

Figura 14 - Módulo compensador de junção fria MAX31855K

FONTE: <https://forum.arduino.cc/index.php?topic=553820.0>

3.3.4 Sensor tensão ac – monitoramento da tensão de alimentação do sistema de espectrometria

Composto basicamente de um divisor de tensão com 2 resistores de 220 K Ω e 10 K Ω , e protegido com um optoacoplador modelo 4n25 que realiza a função de isolar a rede AC – Corrente Alternada do sinal DC – Corrente Contínua do microcontrolador, onde em seu interior há um LED infravermelho e um receptor, que só conecta a rede AC com o restante do circuito quando aceso.

Este sensor foi conectado paralelamente à rede AC, como uma tomada de extensão, assim como representado no esquema da Figura 15.

Figura 15 - Esquema de ligação do sensor de tensão AC modelo P8

FONTE: Elaborada pelo autor

A forma de medir a tensão AC que entra no sensor com base na tensão DC gerada nos pinos de saída do sensor é feita com base na fórmula para divisores de tensão:

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

onde a tensão de saída V_{out} será sempre menor que a tensão de entrada V_{in} , devido a razão entre os resistores ser sempre menor que 1, independentemente dos valores para R1 e R2. Desta forma, este módulo sensor de tensão realiza a redução da tensão de entrada e gera uma tensão de saída de 0 a 5 V, que por sua vez é convertida em um valor inteiro de 0 a 1023 bits, que é a resolução do Conversor Analógico-Digital ADC do Arduino. Logo, para cada 4,9 mV obtidos na saída do sensor corresponde a 1bit.

O método usado para saber a tensão de entrada no sensor baseou-se em realizar várias leituras do pino analógico ao qual o sensor foi conectado, obter uma média, e então multiplicar por 5 (Volts) e dividir por 1024 (bits), assim, ao invés de saber em quantos bits o Arduino está convertendo, sabe-se qual a tensão que o sensor está gerando em seus pinos de saída. Resultando na formula abaixo, programada no arduino para realizar o calculo final da tensão.

$$valorFinal = ((mediaTotal*5)/1024)*57 \quad (3)$$

onde mediaTotal é a média de leituras do pino analógico, e com o auxílio de um multímetro, verificou-se a tensão da tomada a qual o sistema detector está sendo alimentado, e também a tensão gerada nos pinos, assim, foi calculado que o sensor estava reduzindo a tensão de entrada em 57 vezes.

3.3.5 Módulo RTC ds1307 – data e hora

Este módulo opera a um baixo consumo de energia e a sua função é atuar como calendário/relógio, fornecendo segundos, minutos, horas, dia, mês e ano. Representa a hora tanto no formado 24h como 12h, consegue distinguir os meses de 30 e 31 dias, e também ano bissexto. Seu sistema embarcado permite detectar ausência de tensão e automaticamente mudar para a alimentação por bateria, sem comprometer o seu correto funcionamento.

Este modulo tem sua acurácia garantida por um cristal de 32.768 kHz. Porém, ruídos de sinais externos podem afetar tal acurácia, fazendo com que o relógio tenha

um ‘*tic*’ mais rápido ou mais lento. A *application note 58*³ traz todas as informações sobre as principais fontes de ruídos que podem afetar a acurácia deste módulo, especificamente do cristal, bem como qual procedimento para sanar alguns destes problemas. Este documento menciona que a temperatura ideal de funcionamento é de 25 °C.

Figura 16 - Módulo RTC DS1307

FONTE: www.usinainfo.com.br

3.4 A ESTAÇÃO DE MONITORAMENTO – INTEGRAÇÃO DOS COMPONENTES

A integração de todos os sensores e módulos ao Arduino resultou em uma estação multi-parâmetros com conexão serial via porta USB, cujo princípio de funcionamento é atuar de maneira passiva ao atendimento de requisições. Desta forma, foi criado um protocolo simplificado para comunicação entre a estação e o software, basicamente pelo envio de caracteres reservados para cada tipo de função que a estação deve executar. O fluxo da comunicação está representado na Figura 17, onde pode ser observado que a estação só realiza a leitura e envio dos dados quando solicitada, no entanto, a programação do software realiza a requisição a cada segundo para que a tela esteja sempre atualizada. Apenas nos intervalos de tempo configurados no software é que os dados dos sensores são enviados para a base de dados.

³ http://db.zmitac.aei.polsl.pl/Electronics_Firm_Docs/DALLAS/app58.pdf

Figura 17 - Diagrama de fluxo da comunicação estação/software

Fonte: Elaborada pelo autor

Como o objetivo é possibilitar que sejam feitas leituras em tempos pré-definidos pelo pesquisador, e que estas sejam armazenadas com as informações: se o detector está em uso (realizando aquisições), se está ocioso, ou enquanto está sendo abastecido com N₂, uma vez que esse procedimento gera muita umidade e até condensação na região do pré-amplificador, foram adicionado botões físicos que minimizam o manuseio da aplicação para o iniciar e finalizar estas rotinas, identificadas pelas formas que representam operações manuais na Figura 17.

Na Figura 18 é mostrada a estação em fase de prototipagem, para que após testes, fosse confeccionado o circuito impresso e acomodação de todos os componentes em um estojo. Deste ponto em diante, quando mencionar-se o termo estação de monitoramento, ou simplesmente estação, trata-se de todo o conjunto mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Componentes conectados à *protoboard*

Respectivamente: (A) Arduino, (B) Sensores temperatura, (C) Módulo RTC, (D) Módulo leitor termopar, (E) Sensor Tensão. (Y, Z) Botões
Fonte: Elaborada pelo autor

Na Tabela 2 são exibidos os custos aproximados em 27/02/2018, para cada elemento essencial usado na estação, desconsiderando componentes eletrônicos diversos. Destaca-se que o custo total do projeto pode variar de acordo com a cotação do dólar, ainda assim, o valor continua com a característica principal de possuir custo reduzido.

Tabela 2 - Custo aproximado dos componentes da estação de monitoramento do detector HPGe

Componente	Preço
Arduino UNO R3	R\$ 45,00
Sensor DHT22 – AM2302 (4 unidades)	R\$ 160,00
Sensor Tensão AC P8 127/220V	R\$ 20,00
Termopar tipo K -100 a 1025 °C	R\$ 50,00
Módulo RTC DS1307	R\$ 20,00
Módulo compensador junção fria Termopar MAX31855K	R\$ 70,00
TOTAL	R\$ 365,00

Fonte: Elaborada pelo autor

3.4.1 Confeção do circuito impresso

Com auxílio do software de Design Assistido por Computador CAD (*Computer Aided Design*) *fritzing*, foi possível replicar o protótipo físico, já realizando todas as conexões com foco na placa de circuito impresso (*Printed Circuit Board – PCB*), pensando nas trilhas condutivas e a posição de cada componente no circuito final. O software tem disponível alguns componentes com as mesmas características dos reais, o que facilita o processo de montagem. Na Figura 19 é exibida a prototipagem das PCBs após a seleção dos componentes e suas respectivas conectividades. A placa da esquerda é a que encaixa nos pinos do Arduino, e os fios do termopar, a da direita é a placa que ficam todos os conectores dos sensores de temperatura e de tensão, bem como os botões físicos.

Figura 19 - Esquema do circuito (PCB) a ser impresso.

NOTA: Esquerda placa principal para encaixar sobre o Arduino. Direita placa com botões e conectores dos sensores

FONTE: Elaborada pelo autor

Após a confecção das placas, foram soldados os sensores, módulos e componentes eletrônicos em seus respectivos locais na PCB, e após isso elas foram acopladas sobre a placa Arduino e então acomodou-se o conjunto em uma caixa, conforme exibido na Figura 20.

Figura 20 - Etapas da montagem (conexão das partes) da estação.

(A) Circuito confeccionado ao lado o Arduino (Abaixo o encaixe das duas placas);
(B) Placa superior com botões e conectores dos sensores DHT e a estação montada

Fonte: Elaborada pelo autor

3.5 IMPLEMENTAÇÃO – INTEGRANDO A ESTAÇÃO AO SOFTWARE CONTROLADOR

Além da etapa de projeto de hardware, foi necessário realizar a implementação da parte lógica, tanto do software que foi gravado no microcontrolador, quanto do software que servirá de interface entre o pesquisador e a estação.

Nesta sessão são tratados os pontos mais relevantes para realizar a implementação nas IDE's Arduino e *Microsoft Visual Studio*.

3.5.1 Programação da estação

Antes de iniciar a programação da interface gráfica (software controlador) foi necessário programar o microcontrolador na sua própria IDE. Como dito por (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM, 2013) o Arduino por si só é apenas uma placa com alguns componentes eletrônicos. Portanto, somente com o mínimo de funcionalidade da estação foi possível testar se as funções do software estavam atendendo aos seus propósitos. No entanto, não foi uma atividade realizada em apenas uma etapa. Como

há vários sensores e módulos conectados à estação, optou-se por realizar a implementação iterativa, onde há a divisão em subetapas. Sendo assim, a cada sensor e módulo adicionado, eram realizados testes de suas funções e então eram feitas as correções necessárias na programação, e assim eram executados novos testes.

A cada iteração exitosa do cliço de implementação de um componente, adicionava-se outro sensor e/ou módulo para testá-los juntos e observar o comportamento. A Figura 21 exibe uma iteração para a codificação dos sensores de temperatura DHT 22 e logo após o módulo RTC DS1307, por exemplo.

Figura 21 - Ciclo de iterações na implementação dos sensores ao Arduino.

Fonte: Elaborada pelo autor

O resultado de todas as iterações de implementação da Figura 23 resultou em um programa que ao receber uma requisição do software controlador, envia a seguinte cadeia de dados, segundo a segundo, pela porta serial do Arduino:

TEMP1 | UMID1 | TEMP2 | UMID2 | TEMP3 | UMID3 | TEMP4 | UMID4 | HORA | DATA | TEMP_TERMOPAR | TENSÃO

Onde TEMP1 e UMID1 representam a temperatura e umidade obtidas no sensor 1 e assim por diante, até o sensor 4. Em seguida vem os campos hora, data, tensão de alimentação e de temperatura do termopar, respectivamente.

O Arduino é programado utilizando a linguagem C++, na Figura 22 contem o trecho de código que inclui a biblioteca responsável pela identificação e o correto funcionamento dos sensores de temperatura, bem como a que pinos do microcontrolador estarão conectados tais sensores. Na IDE do Arduino há três partes básicas que compreendem os códigos que serão salvos nos microcontroladores da família Arduino, são elas: os códigos que importam as bibliotecas e configuram-se as variáveis e constates, em seguida a parte do *setup*, que basicamente são os códigos que serão executados sempre, toda vez que o microcontrolador for iniciado, como por exemplo, as definições de quais pinos serão de entrada – *input* ou saída - *output*. E a parte do *loop*, que executa continuamente em ciclos.

Figura 22 - IDE Arduino com códigos de configuração do sensor DHT 22

```

Leit_comProtVariosSensores §

/* ##### VARIÁVEIS, CONSTANTES E DEFINIÇÕES DE PINOS DO DHT ##### */

#include <DHT.h> // inclusão da biblioteca do sensor DHT22
#define DHTPIN 4
#define DHTPIN2 5
#define DHTPIN3 6
#define DHTPIN4 7
#define DHTTYPE DHT22 // especificação do tipo de DHT

float temperatura1 = 0.0; // variável que irá receber valores de temperatura do sensor 1
byte umidade1 = 0; // variável que irá receber valores de umidade do sensor 1

float temperatura2 = 0.0;
byte umidade2 = 0;

float temperatura3 = 0.0;
byte umidade3 = 0;

float temperatura4 = 0.0;
byte umidade4 = 0;

DHT dht1(DHTPIN, DHTTYPE); // sensor 1 no pino 4, tipo DHT 22
DHT dht2(DHTPIN2, DHTTYPE); // sensor 2 no pino 5, tipo DHT 22
DHT dht3(DHTPIN3, DHTTYPE); // sensor 3 no pino 6, tipo DHT 22
DHT dht4(DHTPIN4, DHTTYPE); // sensor 4 no pino 7, tipo DHT 22

/* ##### VARIÁVEIS, CONSTANTES E DEFINIÇÕES DE PINOS DO DHT ##### */

```

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 25 é possível observar os comandos criados como protocolo de comunicação entre a estação e o software controlador. São estes comandos que regem o processo de requisições e respostas entre o software/hardware, ou seja, entre o software central e a estação permitindo assim, que seja possível realizar várias

leituras em tempos configurados no software, e não se limitando apenas ao tempo de *delay* (*atraso*) do código no Arduino, o que não daria flexibilidade para ser alterado pelo usuário da interface gráfica.

Figura 23 - Códigos de comunicação entre Estação/Software

```
// #### CÓDIGOS DE COMUNICAÇÃO #### //

const char COD_LEITURA = 'l'; /* caractere recebido pela serial
                                que solicita leitura dos sensores */

const char COD_PERGUNTA = 'p'; /* caractere que "pergunta" a qual
                                arduino a conexão foi feita */

const char COD_RESPOSTA = 'v'; /* caractere de resposta "chave"
                                ao código de pergunta */

const char COD_INTE_AQ = 'I'; /* caractere enviado pela serial quando
                                "botão aquisição" é pressionado */

const char COD_PARA_AQ = 'S'; /* caractere enviado pela serial quando
                                "botão aquisição" é pressionado novamente */

const char COD_INTE_ABS = 'A'; /* caractere enviado pela serial quando
                                "botão abastecimento" é pressionado */

const char COD_PARA_ABS = 'Q'; /* caractere enviado pela serial quando
                                "botão Abastecimento" é pressionado novamente */

const char COD_FIM = '\n'; /*comando de quebra de linha para as leituras.*/

// #### CÓDIGOS DE COMUNICAÇÃO #### //
```

Fonte: Elaborada pelo autor

A criação do protocolo acima foi a maneira encontrada para que houvesse um padrão nas mensagens que trafegariam pela comunicação serial, bem como para simplificar no processo de programação tanto no Arduino quanto no *Visual Studio*, pois seria necessário que o software controlador ficasse sempre monitorando a porta serial de forma assíncrona com as outras rotinas.

O fluxograma (Figura 24) representa o comportamento da estação com base nos comandos de comunicação.

Figura 24 - Fluxograma de comunicação da estação.

Fonte: Elaborada pelo autor

O comando “V” enviado pela serial em resposta ao comando “V” foi adotado simplesmente para garantir que o software só irá se conectar com a estação, evitando assim, a conexão com um sistema movimentador de amostras, de outro estudo, que também se encontra em desenvolvimento para o mesmo detector Canberra 6. Dessa forma, a letra ‘V’ é uma palavra passe que o software irá verificar se é igual à palavra passe que foi programado para aceitar como verdadeiro e estabelecer a conexão.

A estrutura de decisão que se apresenta como sendo a primeira no fluxograma da Figura 24, foi baseada de acordo com a disposição de dois pinos, 2 e 3 no caso do Arduino nano, que são programáveis para receber interrupções. Desta forma, não importa qual atividade ele esteja fazendo, se uma interrupção for lançada, ele para o que está fazendo para atender a interrupção. Diante do cenário de comunicação passiva por parte da estação, esta foi a maneira encontrada para que os botões físicos

pudessem informar ao software que algo deve ser feito, ou seja, este é o único momento em que a estação assume papel ativo na comunicação.

3.5.2 Programação do software controlador da estação

Para programar o software controlador da estação utilizou-se da linguagem C# (C Sharp) e o ambiente de desenvolvimento *Microsoft Visual Studio*, por se tratar de um software que executará em um computador que é operado sob plataforma *Windows*.

O Sistema de Monitoramento de Detector HPGe, nomeado de SIMD-HPGe, funciona basicamente sob apresentação em uma tela com interface intuitiva e amigável. O propósito do SIMD-HPGe é permitir que o pesquisador faça registros sobre as condições de funcionamento do detector ao qual ele está realizando análises de suas amostras, não somente enquanto o seu trabalho está em processo de aquisição, mas também nos momentos em que este detector está ocioso, criando uma espécie de diário do detector. Tais registros irão compor uma base de dados para que possam ser emitidos relatórios diários de como esteve o ambiente a qual o detector está instalado, filtrados por exemplo, por um dia específico, se estava realizando aquisições e qual pesquisador estava utilizando aquele detector.

Há três modos em que o software registra os dados, são eles: o modo *Stand-by*, que é a forma como o software registra as leituras enquanto o detector não está em operação; o modo aquisição, que faz os registros enquanto o detector está realizando aquisições, e o modo abastecimento, que apenas deve ser ativado, por meio do botão físico na estação, quando houver necessidade de abastecer o *dewar* durante aquisições em andamento, já que o intuito é saber se o excesso de umidade e mudança de temperatura gerados nessas ocasiões interferem de alguma forma sob as leituras do detector. A Figura 25 apresenta um trecho do código em C# que é responsável por enviar a letra 'L' para a estação, que por sua vez envia de volta os dados dos sensores. Além de verificar se pela porta serial foi recebido algum outro comando, como os comandos enviados ao pressionar os botões da estação, para entrar ou sair dos modos de aquisição ou abastecimento.

Figura 25 – Trecho do código C# que realiza a comunicação com a estação.

```

private void SendRequest() => this.arduino.WriteLine("L");

private void GetContentResult(object sender, SerialDataReceivedEventArgs e)
{
    this.Notify(this.arduino.ReadLine());
}

public void Notify(string information)
{
    information = information.Replace("\r", String.Empty);

    switch (information)
    {
        case "I":
            this.observers.ForEach(o => o.EntrarAquisicao());
            break;
        case "S":
            this.observers.ForEach(o => o.SairAquisicao());
            break;
        case "A":
            this.observers.ForEach(o => o.EntrarAbastecimento());
            break;
        case "Q":
            this.observers.ForEach(o => o.SairAbastecimento());
            break;
        case "V":
            break;
        case "O":
            break;
        case "J":
            break;
        default:
            this.observers.ForEach(o => o.OnInformationUpdated(information));
            break;
    }
}

```

Fonte: Elaborada pelo autor

3.5.3 A base de dados

Todos os dados obtidos durante o funcionamento do SIMD-HPGe são armazenados em uma base de dados MySQL *community edition*, versão 5.5.39 sob licença GPL – General Public License, podendo ser utilizada para estudos ou uso particular, não sendo permitido uso comercial. O tamanho máximo das tabelas para essa versão é de no máximo 2TB – Terabytes, o que garante vários registros ao longo do tempo.

4 TESTES E SEUS RESULTADOS

Os resultados estão estruturados de maneira que, primeiramente serão mostrados como os sensores se comportaram isoladamente, depois o sistema como um todo, ou seja, o conjunto hardware e software.

4.1 SENSOR DE TENSÃO

Uma vez instalado na mesma rede elétrica do detector, foram feitas as primeiras coletas de dados, e então percebeu-se que para o sensor escolhido o método de cálculo da tensão não se mostrou adequado. Porém, não houve tempo hábil para suspender as coletas e realizar as intervenções necessárias para sanar tal inadequação.

Somente após o período de coleta de dados é que foi possível verificar que o comportamento do sensor não é totalmente linear, além disso, não foi levado em consideração os ruídos provenientes do sensor, ruídos estes que o Arduino tenta interpretar como sendo valores em bits. Sendo assim, o cálculo aplicado só estava levando em consideração a multiplicação do valor lido pelo sensor por um fator, obtido ao realizar a medição da tensão AC de entrada do sensor e comparada sua proporção em relação a tensão DC calculada na programação do Arduino.

Em bancada, e com auxílio de uma fonte de Tensão regulável, foram realizadas diversas medidas que resultaram no gráfico da Figura 26, onde é possível verificar que o comportamento do sensor tende a ser linear entre os valores de 90V a 190V. Sendo assim, optou-se por gerar uma função de ajuste para as leituras do sensor baseadas no ajuste linear, e não pelo ajuste polinomial, por exigir menos processamento do Arduino.

Figura 26 - Leituras sensor tensão após testes com implementação de média para redução de ruídos

FONTE: Elaborada pelo Autor

Vale observar que a relação do gráfico está em bits por VAC, ou seja, ao aplicar a função de ajuste não é preciso calcular esses valores em Volts DC e depois multiplicar por um fator, apenas programar a seguinte função de ajuste para obter a tensão de entrada.

$$tensao = 43.268 + 0.155 * media$$

Onde *media* é o valor obtido das leituras do pino a qual o sensor está conectado ao Arduino e *tensao* é o valor final da tensão a ser enviado pela estação. Para a media foi usada técnica de média móvel, bastante utilizada para redução de ruídos via programação.

Com a redução de ruídos e a função de ajuste programada na estação, observou-se que a taxa de erro das leituras foram de no máximo 3V. Sendo assim, para intervalo de tensão de 90V a 190V e para o simples registro da tensão no dado momento programado pelo software, o sensor se mostrou aceitável. pode atender tal necessidade.

4.2 SENSOR DHT22

Uma vez acomodados todos sensores, foram realizadas coletas durante o período de 16/03/2019 a 23/03/2019. Nos gráficos das Figuras seguintes são apresentados os registros desse período. Primeiramente, o conjunto de registros do sensor 4 (Figura 27), posteriormente uma correlação dos sensores 2 e 3 (Figura 28), por último os registros do sensor 1 (Figura 29).

Figura 27 - Umidade e temperatura no laboratório de 16/03 a 23/03

Fonte: Elaborada pelo autor

Para obter um parâmetro ambiental externo foi verificado dados de estações meteorológicas próximas ao laboratório, no entanto, a estação da CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, localizada dentro do IPEN na cidade Universitária da USP provavelmente está desativada, uma vez que não há dados disponíveis em sua página na internet⁴, no entanto foi tomado como parâmetro os dados de outra estação mais próxima, no bairro Pinheiros. De acordo os dados desta estação, selecionados e agrupados na Tabela 3, é possível observar (Figura 27) que

⁴ <https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/html-ar/dados-horarios.html>

a temperatura e umidade no laboratório acompanharam as variações externas, no entanto, o sistema de controle de umidade do laboratório cumpre seu papel mantendo os níveis dentro dos padrões especificados.

Tabela 3 – Dados da estação metereológica da CETESB bairro Pinheiros

Hora	Data	Temperatura (°C)	Umidade (%)
08:00	16/03/2019	22.1	87
08:00	17/03/2019	22.8	83
16:00	18/03/2019	31.6	49
16:00	19/03/2019	32.6	45
12:00	20/03/2019	26.3	62
12:00	21/03/2019	19.6	84
20:00	22/03/2019	20.0	76
20:00	23/03/2019	21.1	81

FONTE: CETESB

Figura 28 - Registros sensores 2 e 3 para o período de 16/03 a 23/03

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 29 - Registros do sensor 1 (pré amplificador) nos dias entre 16/03 a 23/03

Fonte: Elaborada pelo autor

Com o auxílio de um termo higrômetro calibrado para servir de referência, foi realizado um processo de verificação da calibração, que consistiu em realizar três medições ao final de períodos de 06 horas. As medições foram realizadas em recipiente fechado de maneira a simular ambientes distintos, sendo uma medida com pote com sílica, uma com pote com água e outra apenas no recipiente vazio. Este processo foi realizado primeiramente nos sensores já instalados, onde constatou-se diferenças significativas de valores lidos para os valores de referência.

A observação de alguns fatos e dados corroboraram a iniciativa de verificar a calibração destes sensores e também adquirir novos sensores, são eles:

- A observação dos dados dos sensores 2 e 3 (Figura 28) apresentarem valores de umidade e temperatura muito discrepantes, mesmo estando a uma distância de pouco mais de 40 cm um do outro.
- O sensor 1 (Figura 29) ainda que sob grandes variações de temperaturas, a umidade quase não oscilou durante todos os dias do período.
- Ao verificar os registros do dia 25/03, percebeu-se que o sensor 3 estava lendo constantemente umidades de apenas 1%. O que de acordo com buscas em

fóruns específicos, pode ser um erro no sensor, seja por saturação ou dano mesmo.

Com exceção do sensor 4, que se optou por realizar posteriormente um processo de calibração com mais leituras em mais variações de ambientes (processo descrito no apêndice) com o intuito de obter um cálculo de ajuste mais preciso que o processo realizado anteriormente, pois apesar de ter apresentado valores quase idênticos aos dos valores de referência durante a calibração, ao ser instalado no sistema, os valores foram bem distintos. Acredita-se que durante a calibração, a posição do sensor 4 dentro do recipiente ficou muito próximo ao termo higrômetro em relação aos demais, o que favoreceu para leituras tão próximas ao valor de referência.

Em posse dos novos sensores, o primeiro passo foi realizar o processo de verificação da calibração, que resultou nos dados da Tabela 5, e foram usados para calcular o ajuste de cada sensor. Esse ajuste foi implementado no micro controlador da estação por meio da programação das funções na IDE do Arduino.

Tabela 4 - Leituras no processo de calibração dos novos sensores

Ambiente	Umidade Relativa em %			
	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Termo Higrômetro Calibrado
Com Sílica	40	39	41	38
Vazio	77	79	79	70
Com Água	93	93	95	89

Fonte: Elaborada pelo autor

Um ponto que merece observação é o fato de que tanto nos sensores adquiridos no início do projeto quanto nos novos sensores, os valores de umidade se mostraram acima dos valores de referência quando o valor de referência está em torno de 90%, o que confirma que a linearidade deste sensor é perdida, para valores abaixo de 20% e acima de 90% de umidade relativa (AOSONG, s.d.).

As retas de ajuste, cujas equações foram usadas para programar a estação, estão plotadas nos gráficos das Figuras 30, 31, 32, e 33 a seguir:

Figura 30 – Reta de ajuste para o sensor 1.

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 31 – Reta de ajuste para o sensor 2.

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 32 – Reta de ajuste para o sensor 3.

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 33 – Reta de ajuste para o sensor 4

Fonte: Elaborada pelo autor

Com a estação devidamente programada para realizar os ajustes das leituras de umidade em cada sensor, com base nas equações de cada gráfico acima, foi dado início a coleta de dados de maneira contínua. A Figura 34 apresenta os registros do sensor 4 para o período de 5/4/2019 a 9/4/2019 após 4 dias da instalação dos novos sensores. Os picos de umidade apresentados são explicados, se contrapostos aos

dados ambientais da estação meteorológica de Pinheiros (CETESB). No dia 6/4 às 18:00 a umidade relativa estava em 92% e temperatura de 22,2 °C, para o dia 7/4 às 02:00 a umidade chegou a 94% com temperatura de 22,3 °C, no dia 9/4 por volta das 03:00 a umidade e temperatura registraram respectivamente 96% e 19,2 °C, valores estes que se repetiram às 6:00.

Figura 34 – Temperatura e umidade no laboratório nos dias 5 a 9/4/2019

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 35 – Temperaturas e umidades registradas pelo sensor 2 de 5 a 9/4/2019

Fonte: Elaborada pelo autor

Vale observar (Figura 35) que por volta das 08 horas e 20 minutos do dia 9/4/2019 o pico de umidade em torno de 97% e a queda da temperatura para aproximadamente 10 °C, para o sensor 2, já para o sensor 3 (Figura 36) o valor registrado foi de 81% e a temperatura foi 19,3 °C. Essas alterações se deram em virtude do abastecimento de N₂ que se iniciou as 08 horas e 10 minutos e durou aproximadamente 8 minutos. Neste processo gera muito vapor, principalmente quando o *dewar* atinge a capacidade máxima e vaza uma quantia pela válvula de escape.

Figura 36 – Temperaturas e umidades registradas no sensor 3 de 5 a 9/4/2019

Fonte: Elaborada pelo autor

O abastecimento também causou oscilação na temperatura e umidade dentro da região do pré amplificador, porém foram sutis, por não estar diretamente exposto ao vapor e condensação de vapor como o sensor 2 está (Figura37).

Figura 37 – Temperaturas e umidades registradas no sensor 1 de 5 a 9/4/2019

Fonte: Elaborada pelo autor

Outro ponto que este trabalho se propôs a observar foi se essas variações decorrentes das mudanças climáticas externas e até das interferências as quais o laboratório está exposto durante o dia, influenciam na resolução do detector.

Para realizar esta verificação registrou-se, minuto a minuto a largura do pulso a meia altura (FWHM) ou seja, a resolução, utilizando um programa que coleta em lote, os dados do detector. As medidas foram realizadas em dias e horários distintos, inclusive durante uma recarga de N₂, todas usando uma fonte padrão de ⁶⁰CO a qual o detector apresenta resolução de 1,8 KeV.

As Figuras a seguir apresentam os dados da resolução juntamente com a umidade e/ou temperatura. O que pode se constatar é que a resolução não sofre alterações significativas de acordo com as variações seja de temperatura do laboratório, ou umidade na região do pré-amplificador, por exemplo. Na verdade, essas oscilações nos níveis registrados parecem não influenciar em nada a resolução do detector, pois os valores da resolução estiveram sempre dentro dos limites aceitáveis durante os períodos registrados.

Figura 38 – Resolução do detector em função da temperatura do sensor 1.

Fonte: Elaborada pelo autor

Os registros da Figura 37 são de um período do dia 16/04/2019, onde a partir das 14:30 foi dado início a uma recarga de N₂, o que justifica a queda de temperatura em pouco mais de um grau, no entanto, a resolução não sofreu alterações significativas, estando sempre em torno de 1,8 KeV. O mesmo vale para a umidade (Figura 39).

Figura 39 – Resolução do detector em função da umidade do sensor 1

Fonte: Elaborada pelo autor

Mais medidas foram realizadas durante um período cobrindo o horário da madrugada, quando a umidade tende a subir, mas o comportamento da resolução permaneceu semelhante, pois mesmo havendo vários registros acima dos 1,8 KeV, não são valores que possam ser entendidos como perda de resolução Figura 40.

Figura 40 – Resolução do detector em função da temperatura do sensor 1 durante a madrugada

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 41 – Resolução do detector em função da umidade do sensor 4 durante a madrugada

Fonte: Elaborada pelo autor

4.3 TERMOPAR

O termopar inserido no interior do *dewar* foi posicionado de tal maneira que sua extremidade sempre fique na metade da altura do dedo frio, desta forma, essa monitoração tem a função de eliminar outras variáveis além da temperatura e umidade nesse período de testes, no entanto, não foram feitos testes em *dewar* com níveis de N₂ abaixo da ponta de medição do termopar, com intuito de verificar se com níveis extremamente baixos de N₂ há alterações na resolução do detector, e assim, adicionar em versões futuras do sistema, uma funcionalidade que alerte o usuário caso o nível do nitrogênio líquido se torne crítico, colocando o em risco o bom funcionamento do detector.

Para redução de ruídos de tensão de alimentação o fabricante recomenda a aplicação de um capacitor de 0,1mF entre os pinos de VCC – Tensão Corrente Contínua e o pino GND – *Graduated Neutral Density filter*, Filtro Graduado de Densidade Neutra. Tal procedimento foi feito como uma intervenção analógica para melhorar a qualidade das leituras do termopar. O que também poderia ter sido aplicado de maneira adicional à intervenção analógica, seria a intervenção digital com o uso de média móvel para redução de ruídos para este sensor, uma vez que foi perceptível que vários registros tiveram diferença de cerca de 7 °C do valor de referência de 196,15 °C, ou seja 77 K, no entanto, a média geral das leituras ficou em de 195 °C.

4.4 O SISTEMA DE MONITORAMENTO

O software do SIMD-HPGe funcionou como esperado, realizando os registros nos tempos definidos, com as informações de qual pesquisador está usando o detector, se o detector está em aquisição, sendo abastecido ou em *stand by*. No entanto, a implementação de como o software realiza a troca dos modos de funcionamento, não atendeu a pontualidade desejada, pois ao clicar no botão para “iniciar aquisição”, a contagem do tempo deveria ser recomeçada imediatamente, o que não ocorreu. Para ilustrar essa limitação pode ser usado um exemplo onde, se um registro em modo *stand by* irá ser gravado dentro de 10 minutos, e neste instante foi acionado o modo aquisição, o primeiro registro do modo aquisição terá um atraso de 10 minutos equivalentes ao modo anterior. Esta limitação se torna mais significativa no caso de os valores definidos para cada modo serem altos, pois o primeiro registro

do novo modo de operação a qual o detector se encontra, não representará o real momento registrado na base de dados.

O acionamento da estação pelos botões apresentou problemas na comunicação, pois se no exato momento em que uma informação estava sendo preparada para ser enviada pela porta serial, e quando o botão era pressionado, o comando específico do botão era enviado junto com os dados dos sensores, o que causava erro ao exibir os dados na tela do software, e este por sua vez não detectava que houve a requisição de iniciar/parar a aquisição.

A emissão de relatórios tende a ser útil nas rotinas do LAN uma vez que o SIMD-HPGe pode gera-los em formato PDF (*Portable Document Format*), Figura 42 e CSV (*Comma Separated Value*) Figura 43, no caso deste ultimo, se torna vantajoso em caso de necessidade de manipulação em editores de planilhas eletrônicas. Os relatórios podem ser gerados de maneira a permitir que o usuário filtre os resultados por modo de operação, data, hora e qual pesquisador estava utilizando o detector (no caso deste ter realizado seu cadastro no software).

A base de dados se mostrou enxuta, quanto ao espaço de armazenamento ocupado. Até o ultimo relatório gerado em 29/04/2019, a tabela cujos valores de leituras são armazenados constava aproximadamente 4500 registros, e ocupando cerca de 490 KB – *Kilobytes*.

Figura 42 – Relatório gerado em formado PDF

ID	Temp1	Temp2	Temp3	Temp4	Umid1	Umid2	Umid3	Umid4	DEWAR	Tensao	Data	Hora	Pesquisador	Modo
38	18.40	18.80	NAN	22.00	90	80	0	73	-2367.54	143.79	15/3/2019	11:53:50	Gleiser	Stand by
39	18.40	18.30	NAN	22.10	90	84	0	76	-194.86	144.10	15/3/2019	12:08:52	Gleiser	Stand by
40	18.30	18.30	NAN	22.10	90	86	0	76	-196.14	144.00	15/3/2019	12:23:52	Gleiser	Stand by
41	18.30	18.30	NAN	22.10	90	87	0	76	-194.86	144.08	15/3/2019	12:38:53	Gleiser	Stand by
42	18.30	18.30	NAN	22.20	90	87	0	76	-196.79	143.89	15/3/2019	12:53:51	Gleiser	Stand by
170	18.50	18.50	21.30	22.40	90	88	64	77	-197.44	108.39	15/3/2019	16:02:21	Gleiser	Stand by
171	18.50	18.50	21.30	22.30	90	86	63	76	-197.43	109.05	15/3/2019	16:17:23	Gleiser	Stand by
172	18.50	18.50	21.30	22.30	90	86	63	77	-195.50	108.98	15/3/2019	16:32:23	Gleiser	Stand by
173	18.50	18.50	21.30	22.30	90	85	62	77	-196.78	108.74	15/3/2019	16:47:23	Gleiser	Stand by
174	18.50	18.50	21.30	22.30	90	85	62	77	-197.44	108.86	15/3/2019	17:02:23	Gleiser	Stand by
175	18.50	18.50	21.30	22.30	90	85	62	77	-196.13	108.99	15/3/2019	17:17:23	Gleiser	Stand by

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 43 – Relatório gerado em formato CSV

	A	B	C	D	E	F	G
1	Temp1,Temp2,Temp3,Temp4,Umid1,Umid2,Umid3,Umid4,DEWAR,Tensao,Data,Hora,Pesquisador,Modo,						
2	21.50,21.30,21.30,21.70,95,99,1,94,-205.23,141.63,26/3/2019 00:00:00,23:51:28,Pesquisador,Stand by,						
3	21.50,21.30,21.40,21.70,95,99,1,94,-202.59,141.42,26/3/2019 00:00:00,23:36:28,Pesquisador,Stand by,						
4	21.50,21.30,21.40,21.70,95,99,1,94,-201.94,141.40,26/3/2019 00:00:00,23:21:28,Pesquisador,Stand by,						
5	21.50,21.30,21.40,21.70,95,99,1,94,-205.91,141.58,26/3/2019 00:00:00,23:06:28,Pesquisador,Stand by,						
6	21.60,21.30,21.40,21.70,95,99,1,94,-203.91,141.59,26/3/2019 00:00:00,22:51:27,Pesquisador,Stand by,						
7	21.60,21.30,21.40,21.80,96,99,1,95,-204.57,141.66,26/3/2019 00:00:00,22:36:27,Pesquisador,Stand by,						
8	21.50,21.30,21.40,21.70,96,99,1,95,-203.91,141.31,26/3/2019 00:00:00,22:21:27,Pesquisador,Stand by,						
9	21.60,21.40,21.40,21.80,96,99,1,95,-202.60,141.43,26/3/2019 00:00:00,22:06:27,Pesquisador,Stand by,						
10	21.60,21.40,21.40,21.80,96,99,1,95,-201.95,141.64,26/3/2019 00:00:00,21:51:27,Pesquisador,Stand by,						
11	21.60,21.40,21.50,21.80,96,99,1,95,-201.30,141.50,26/3/2019 00:00:00,21:36:27,Pesquisador,Stand by,						
12	21.60,21.40,21.50,21.80,96,99,1,95,-204.58,141.37,26/3/2019 00:00:00,21:21:27,Pesquisador,Stand by,						
13	21.60,21.40,21.50,21.80,96,99,1,95,-202.61,141.01,26/3/2019 00:00:00,21:06:27,Pesquisador,Stand by,						
14	21.70,21.40,21.50,21.80,96,99,1,95,-205.24,141.35,26/3/2019 00:00:00,20:51:27,Pesquisador,Stand by,						
15	21.60,21.40,21.50,21.80,96,99,1,95,-203.25,141.50,26/3/2019 00:00:00,20:36:26,Pesquisador,Stand by,						
16	21.70,21.40,21.50,21.90,97,99,1,95,-201.95,141.43,26/3/2019 00:00:00,20:21:26,Pesquisador,Stand by,						
17	21.60,21.40,21.60,21.80,97,99,1,95,-203.91,141.16,26/3/2019 00:00:00,20:06:26,Pesquisador,Stand by,						

Fonte: Elaborada pelo autor

5 CONCLUSÕES

A proposta deste trabalho foi desenvolver um sistema de monitoramento composto por uma estação ligada a sensores de temperatura, umidade e tensão, conectada a um software desenvolvido com intuito de controlar a estação e formar uma base de dados com os registros automáticos das condições ambientais às quais o detector Canberra 6 se encontra.

Assim, quanto à disposição dos sensores DHT22 pode-se afirmar que a utilização do sensor 2 nas proximidades da válvula de escape do N₂ é desnecessária, uma vez que o sensor 3 já está em um local que representa de modo semelhante o microambiente ao qual o detector está exposto. Acomodar o sensor 2 em outro ponto do laboratório pode ser útil para obter uma média da temperatura da sala.

A acomodação do sensor 1 próximo ao pré-amplificador aparentemente não provocou interferência na resolução do detector, tampouco foi possível observar que os valores de umidade e temperatura obtidos também causassem perda na resolução. Porém, neste estudo as variações de temperatura e umidade no laboratório não foram suficientemente significativas a ponto de causar variações de temperatura maiores 2 °C, nesta região. Para aprimoramento desse estudo é interessante realizar testes onde a temperatura do laboratório possa ir além dos 25 °C, por exemplo. Mesmo com tais estudos, a exposição contínua e prolongada do sensor DHT22 a altas umidades provocam a rápida saturação da superfície, o que torna inviável o uso deste na região do pré amplificador.

Como não há normas que exijam uma periodicidade, mas sim a recomendação para a calibração de equipamentos e medidores, é interessante para todos os sensores DHT22 realizar o processo de verificação da calibração, a partir de medidas conjuntas com um sensor calibrado, a cada 12 meses, de modo a garantir maior confiabilidade dos dados lidos.

O uso do termopar foi considerado satisfatório, pois mesmo sem uma programação de filtro digital, não houve variações acima de 5% do valor de referência na temperatura dentro do *dewar*. Para aplicação deste sensor como forma de monitoramento do nível de N₂ é necessário realizar testes com níveis onde a ponta de medição do termopar já não toque mais o N₂, para que assim, seja verificada a

possibilidade de implementar no software um alerta para o caso de níveis extremamente baixos serem detectados.

Para estudos mais precisos da relação entre a tensão de alimentação do detector e a resolução do mesmo, se faz necessário uso de componentes eletrônicos mais sensíveis, e uma programação mais direcionada a registros do estado atual da rede elétrica em tempo real, o sensor utilizado não atenderia tal especificidade, uma vez que o ideal seria registrar todos os surtos de tensão. Para tal, a estação deverá disparar registros na base de dados a todo instante que tal surto for detectado, o que mudaria a abordagem do modo de operação da estação, de passiva em relação ao software, para ativa como foi implementado neste trabalho.

Com base nos resultados obtidos com a implantação da estação, e testes realizados com o software, foi possível verificar que o uso do sistema é viável, e pode ser utilizado como ferramenta auxiliar no sistema gestão de qualidade do laboratório.

6 APÊNDICE A - CONFIGURAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE DO SIMD-HPGE

A interface do SIMD-HPGe está organizada em duas seções, na parte superior estão as leituras atuais, mostrando em tempo real os valores de cada um dos sensores (destaque A na Figura 44). Na parte inferior, os intervalos dos registros para os períodos de análises, bastando o usuário selecionar qual opção de medidas melhor se encaixa ao tempo contagens que ele deixará sua amostra no detector (Figura 43 destaque B).

Figura 44 - Tela principal do SIMD HPGe

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 43 (destaque C) é possível observar um campo chamado “hora fim”, esta é uma opção para evitar que o pesquisador tenha que lembrar de parar os registros toda vez que as aquisições da amostra no detector terminam. Uma vez que

ele sabe quanto tempo a amostra vai ficar no detector, basta digitar a hora que encerrará aquela aquisição, e então clicar em “iniciar aquisição”. Ao atingir o tempo estabelecido o software automaticamente volta a realizar as leituras no modo *Stand-by*.

Sempre que necessário cadastrar novos pesquisadores, amostras e detectores basta clicar no botão “+”, ao lado das referidas caixas de textos, digitar as informações e clicar em “salvar” (destaque C na Figura 43). Caso alguma destas informações tenha sido salva anteriormente, basta clicar na seta para baixo (nas respectivas caixas de texto) e escolher.

Como o objetivo do sistema é registrar as condições ambientais as quais o detector se encontra, e que cabe a equipe usuária do detector determinar os valores para os intervalos que os registros irão ser armazenados na base de dados. É importante defini-los previamente nas configurações (*menu* configurações da tela principal do SIMD-HPGe). Irá abri uma janela como a representada na Figura 46 onde pode ser observado que há vários intervalos possíveis a serem configurados.

Este processo de definir os intervalos dos registros ambientais não necessita ser realizado todas as vezes que o sistema é utilizado, apenas se o pesquisador quiser ter outros intervalos, que não os já definidos anteriormente. Sabendo disso, uma vez definidos os períodos de aquisições que as amostras demandarão, a exemplo dos valores exibidos na Figura 46, temos os seguintes intervalos de atuação da estação:

- “Até 20 minutos” – Para amostras com tempos de meia-vida curtos, em que as análises durem em média 20 minutos, o valor informado no campo será o tempo que ocorrerá cada registro dos dados da estação.
- “Até 1 hora” – Este é o intervalo de registros para amostras que necessitem de um tempo maior de aquisição (mais de 20 minutos e menos que 1 hora). Por padrão, este também é o tempo do modo *Stand-by*.

Consequentemente, os intervalos seguintes são para amostras que irão demandar longos períodos de medições. Vale observar que os intervalos são medidos em minutos (Figura 45).

⁵ Esta opção é para futuras versões, onde o há uma base de dados central para todos os detectores que usam o SIMD-HPGe.

Para salvar as alterações é só clicar no botão 'salvar', ou se quiser configurar os intervalos para os tempos padrão do software, basta clicar no botão 'default'.

Figura 45 - Tela de configuração dos intervalos de registros

Configurações de Tempo

CONFIGURAR TEMPO

Até 20 minutos:	Intervalo de tempo definido (minutos):	<input type="text" value="2"/>
Até 1 hora:*	Intervalo de tempo definido (minutos):	<input type="text" value="5"/>
Até 3 horas:	Intervalo de tempo definido (minutos):	<input type="text" value="15"/>
Até 6 horas:	Intervalo de tempo definido (minutos):	<input type="text" value="30"/>
10 horas ou mais:	Intervalo de tempo definido (minutos):	<input type="text" value="60"/>

*** Tempo configurado para StandBy**

Fonte: Elaborada pelo autor

7 APÊNDICE B - GERAÇÃO DE REALTÓRIOS

Os relatórios são gerados basicamente em função do modo de funcionamento do software, ou seja, modo aquisição, *stand by*, ou abastecimento. Ao abrir a janela de relatórios (*menu* relatórios na tela principal do SIMD-HPGe) é possível perceber que o modo *stand by* já está selecionado, a data de início e data de fim serão as datas atuais, e a hora de início e hora fim serão 00:00:00 até 23:59:59.

Para filtrar os relatórios de acordo com as informações que deseja é preciso ir mudando esses parâmetros, e até procurar pelo nome do pesquisador que estava usando o detector.

Na Figura 46 está um exemplo de um relatório, consultado e mostrado em tela, com os seguintes filtros: modo Stand by, de 00:00:00 até as 23:59:59, ou seja, durante todo o dia no intervalo de 18/03/2019 a 22/04/2019.

Então escolhe-se qual o formato do arquivo que quer gerar o relatório e clica no respectivo botão. O diretório que o SIMD-HPGe salva os relatórios é C:/Leituras/ o nome do arquivo é sempre a data e a hora em que foi gerado o arquivo.

Figura 46 - Tela do SIMD-HPGe para gerar relatórios

RELATÓRIO DE LEITURAS

Modo de Leitura:
☒ StandBy
☐ Aquisição
☐ Abastecimento

Data Leitura:
 De: 2019-03-18
 Até: 2019-04-22

Hora Leitura:
 De: 00:00:00 até: 23:59:59

Pesquisador:

	Temp1	Temp2	Temp3	Temp4	Umid1	Umid2	Umid3	Umid4	DEWAR	Tensao	Data	Hora	Pesquisador
▶	17.90	17.80	20.60	21.50	90	82	60	75	-195.46	105.84	18/03/2019 00:00:00	00:02:48	Gleiser
	17.80	17.80	20.60	21.40	90	82	60	75	-198.70	105.48	18/03/2019 00:00:00	00:17:48	Gleiser
	17.90	17.80	20.60	21.50	90	82	60	76	-197.39	105.65	18/03/2019 00:00:00	00:32:48	Gleiser
	17.80	17.80	20.60	21.50	90	82	61	75	-195.46	105.81	18/03/2019 00:00:00	00:47:48	Gleiser
	17.80	17.80	20.60	21.40	90	82	61	75	-198.04	105.73	18/03/2019 00:00:00	01:02:48	Gleiser
	17.80	17.80	20.60	21.40	90	82	60	75	-198.04	105.76	18/03/2019 00:00:00	01:17:48	Gleiser
	17.80	17.80	20.60	21.40	90	82	60	74	-194.82	105.89	18/03/2019 00:00:00	01:32:48	Gleiser
	17.80	17.80	20.60	21.40	90	82	60	75	-196.74	105.50	18/03/2019 00:00:00	01:47:49	Gleiser
	17.80	17.80	20.60	21.40	90	82	60	75	-197.38	105.75	18/03/2019 00:00:00	02:02:49	Gleiser
	17.80	17.80	20.60	21.40	90	81	60	75	-196.73	105.72	18/03/2019 00:00:00	02:17:49	Gleiser

Fonte: Elaborada pelo autor

8 APÊNDICE c - MÉTODO DE VERIFICAÇÃO DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

A segunda verificação da calibração realizada no sensor 4 foi uma forma de verificar se com um método mais estruturado e adicionando mais variáveis, gerariam mais pontos para traçar a reta de ajuste com mais. Para isso, foram feitas dois grupos de medidas, um em temperatura ambiente (não controlada), outro no laboratório, onde há o sistema de climatização. As medidas foram realizadas dentro de um recipiente onde ficou o sensor 4 e o termohigrômetro calibrado.

Para cada grupo foram feitas 8 medidas com 5 horas de duração, onde sempre na metade do tempo era feito a leitura do sensor 4 e do termohigrômetro, e a última ao final das 5 horas. As medidas visavam simular ambientes com diferentes humidades, foram elas:

- Saco com Sílica (semi-aberto).

- Sílica espalhada no fundo do recipiente.
- Somente o sensor e o termohigrômetro.
- Com papel toalha úmido no fundo do recipiente

Uma vez coletados todos os 16 registros (8 medidas em 2 temperaturas externas), foi plotado o gráfico considerando a incerteza de 1,4% do termohigrômetro e de 2% do sensor, então obteve-se a inclinação da reta igual a 0,91346 (Figura 47).

Figura 47 - Gráfico plotado para obter inclinação da reta de ajuste para sensor 4

Fonte: Elaborada pelo autor

Rebatendo a incerteza do eixo x para o y, ajustando e considerando a relação:

$$\sigma_y^n = \sqrt{(\sigma_y)^2 + (a \cdot \sigma_x)^2}$$

Onde a=0,914

Recalculando a incerteza do y (agora com a incerteza do x adicionada), tem-se o gráfico já exibido na Figura 33 do texto, cuja equação de ajuste ficou

$$umidade4 = 4,7676 + 0,914 \cdot umidade4$$

Onde a variável *umidade4* é o valor lido pelo sensor 4, que então é multiplicado pela inclinação da reta e adicionado ao coeficiente linear, por último esse valor é novamente atribuído à variável *umidade4*, que por sua vez é então enviada pela porta serial para o software. Este procedimento deve ser repetido para todos os sensores utilizados, pois garante uma função de ajuste com taxas de erros menores.

9 APÊNDICE D – CERTIFICADO TERMOHIGRÔMETRO

Figura 48 - Certificado de calibração nº 2717/19 Maxi Track

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO
Nº 2718/19

PV Nº 969687

SOLICITANTE: Frederico Genezini CPF: 091.236.668-03

<p>1- Instrumento Termo-Higrômetro Digital</p> <p>Fabricante MAXITRACK</p> <p>Modelo 7666.02.0.00</p> <p>Série Não Consta</p>	<p>TAG / Identificação 18-6488</p> <p>Faixa de Medição Interna 0 a 50 °C / 15 a 95 % UR</p> <p>Faixa de Medição Externa -50 a 70 °C</p> <p>Resolução 0,1 °C / 1% UR</p>
---	---

2- **Método de Calibração:**
O instrumento foi calibrado por método comparativo com padrões relacionado no item 5. Os valores de indicação foram referenciados no instrumento e a tendência foi obtida através da diferença entre as leituras do instrumento em teste e os valores lidos no Padrão. Baseado em nossa Instrução de Calibração: Termo-higrômetro REV.00 de 20/05/2014.

3- **Temperatura durante a calibração:** 21,0 ± 3 °C

4- **Local da Calibração:** Tecnolab Serviços Ltda
Rua Doutor Miranda de Azevedo, 793 - Pompéia - São Paulo - SP - CEP. 05027-000

5- **Padrões Utilizados**

- Multicalibrador Cappa XP, nosso nº TEC-048, certificado 6244/18 de 27/6/2018 calibrado por Ecil (RBC nº 026), válido até 6/2021.
- Termohigrômetro Digital, nosso nº TEC-086, certificado LV-03314-02959-18-R0 de 9/2/2018 calibrado por Visomes (RBC nº 127), válido até 2/2020.
- Termoresistência Tipo PT-100, nosso nº TEC-087, certificado 2839/18 de 6/4/2018 calibrado por Ecil (RBC nº 026), válido até 4/2020.

6- **Resultados da Calibração**

6.1- **Temperatura Sensor Interno**

Indicação (°C)	Encontrado (°C)	Tendência (°C)
20,0	19,7	0,3

6.2- **Temperatura Sensor Externo**

Indicação (°C)	Encontrado (°C)	Tendência (°C)
20,0	19,83	0,17

6.3 **Umidade Sensor Interno**

Indicação (% UR)	Encontrado (% UR)	Tendência (% UR)
50	52,7	-2,7

* Os valores expressos correspondem à média de três medições.

7- **Incerteza de Medição:**

Temperatura Interna / Externa	U = 0,3 °C	U = 0,2 °C
Umidade Interna	U = 2,8 % UR	

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k= 2,00, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02

Data da Calibração: 6/2/2019
Data de Emissão: 6/2/2019

 Hélio Hiroshi Okano
 Técnico Responsável

Notas:

- 1- Este certificado está de acordo com os termos do "Vocabulário Internacional de Metrologia" (VIM), em sua última revisão.
- 2- Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lótes.
- 3- A reprodução total ou parcial deste certificado depende exclusivamente da aprovação por escrito da TECNOLAB.
- 4- Técnico Executante: Hélio Hiroshi Okano
- 5- Planilha: Termo-Higrômetro REV.00 de 20/05/2014

MaxiTrack – Loggers de Temperatura e Umidade
 Av Sta Catarina, 1521 – Cjto 211 – Vila Mascote – São Paulo – SP – 04378-300
 Telefones: 11 5562 0337 e-mail: info@maxitrack.com.br

1 de 1

11 REFERÊNCIAS

ABNT, A. B. D. N. TÉCNICAS. **ISO/IEC 17025: Requisitos Gerais para a Competência de Laboratórios de Ensaio e Calibração**. 2 ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2005. 31 p.

CAPGO. **Capgo - Thermocouple Theory**. *CAPGO Thermocouples*. 2013. Disponível em: <<http://www.capgo.com/Resources/Temperature/Thermocouple/Thermocouple.html>>. Acesso em: 20/jun./18.

EVANS, M.; NOBLE, J.; HOCHENBAUM, J. **Arduino em Ação**. 1 ed. Greenwich, CT: Novatec, 2013. 424 p.

FERREIRA, M. D. C. **Estudo da eficiência de um detector HPGe por métodos semiempíricos e experimental**. 2012.

GLAVIČ-CINDRO, D.; KORUN, M.; VODENIK, B. **Monitoring working conditions in a gamma-ray spectrometry counting room**. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, [s.l.], v. 264, no 1, p. 175–182, 2005. ISSN: 0236-5731, 1588-2780, DOI: 10.1007/s10967-005-0691-z.

GREENBERG, R. R.; BODE, P.; DE NADAI FERNANDES, E. A. **Neutron activation analysis: A primary method of measurement**. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, [s.l.], v. 66, no 3–4, p. 193–241, 2011. ISSN: 05848547, DOI: 10.1016/j.sab.2010.12.011.

HAMIDATOU, L.; SLAMENE, H.; AKHAL, T.; ZOURANE, B. **Concepts, Instrumentation and Techniques of Neutron Activation Analysis**. In: KHARFI, F. (Org.). *Imaging and Radioanalytical Techniques in Interdisciplinary Research - Fundamentals and Cutting Edge Applications*. [s.l.]: InTech, 2013. ISBN: 978-953-51-1033-0, DOI: 10.5772/53686.

IAEA. **Quality System Implementation for Nuclear Analytical Techniques**. [s.l.], 2004.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados**. 1a Edição Luso Brasileira ed. Duque de Caxias, Rio de Janeiro: [s.n.], 2012. 94 p. ISBN: 978-85-86920-09-7.

JÚNIOR, J. A. S. et al. **Estudo comparativo entre os detectores HPGe e NaI(Tl) na determinação de ²³⁸U, ²³²Th e ⁴⁰K em amostras de solo**. [s.l.], v. 5, no 4, p. 16, 2009.

MEI-WO, Y.; AHMAD, Z.; MANSOR, I. **A study of factors affecting the quality of measurements in gamma spectrometry counting systems.** [s.l.], 2009.

MOREIRA, D. S. **PADRONIZAÇÃO DOS RADIONUCLÍDEOS MULTI-EMISSORES GAMA ^{60}Co E ^{67}Ga E DETERMINAÇÃO DE SUAS INTENSIDADES GAMA POR DECAIMENTO.** - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, 2005.

MÜLLER, G.; DINIZ, A. C. G. C. **ENTENDENDO A NORMA ABNT ISO/IEC 17025:2005.** [s.l.], 2007.

PETRONI, R. **Validação dos métodos de análise por ativação do Laboratório de Análise por Ativação Neutrônica do IPEN - CNEN/SP visando à produção de materiais de referência certificados.** text - Universidade de São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-18062015-143835/>>. Acesso em: 11/abr./18.

ROSA, M. M. L. et al. Validação do ensaio de medias por espectrometria gama de radionuclídeos em matrizes de alimentos. **IX Latin American IRPA Regional Congress on Radiation Protection and Safety - IRPA**, n. IX, p. 15–19, 2013.

ROCHA JÚNIOR, E. R. V. **Comportamento de terras raras e outros elementos-traço em soleiras e derrames da região norte-nordeste da Província Magmática do Paraná.** *São Paulo*, [s.l.], p. 99, 2006.

SECCO, M. **Desenvolvimento de dispositivo movimentador automatizado de amostras com vista à aplicação em medidas de radioisótopos que possuem curto tempo de meia-vida.** 2016. INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, São Paulo - SP, 2016.

SCERVINI'S, M. **Thermocouples Operating Principles.** *THERMOELECTRIC MATERIALS FOR THERMOCOUPLES.* 2009. Disponível em: <<https://www.msm.cam.ac.uk/utc/thermocouple/pages/ThermocouplesOperatingPrinciples.html>>. Acesso em: 19/jun./18.

SHTARGOT, J.; MIRZA, S. **Modern Thermocouples and a High-Resolution Delta-Sigma ADC Enable High-Precision Temperature Measurement - Reference Schematic** - Maxim. 2011. Disponível em: <<https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5032>>. Acesso em: 20/jun./18.

STRATTON, G. **Comparison of a High Purity Germanium Gamma Ray Spectrometer and a Multidimensional NaI(Tl) Scintillation Gamma Ray**

Spectrometer. [s.l.], 2011.

SUTTON, C. **Effect of environmental variables upon in-situ gamma spectrometry data.** [s.l.]: [s.n.], 1999. Disponível em: <<http://www.osti.gov/servlets/purl/353355-Io6XYO/webviewable/>>. Acesso em: 11/abr./18. DOI: 10.2172/353355.

TAUHATA, L. et al. **RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA:** [s.l.], no 9a, p. 373, 2013.

TSOULFANIDIS, N.; LANDSBERGER, S. **Measurement and Detection of Radiation.** 3a ed. [s.l.]: [s.n.], 2011a. 510 p. ISBN: 9781420091885.

_____. **Measurement and Detection of Radiation.** 3a ed. [s.l.]: CRC press, 2011b. 510 p. ISBN: 978-1-4200-9188-5.

WALLBRINK, P. **Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides.** [s.l.], no November 2014, 2003. ISBN: 1-4020-1041-9, DOI: 10.1007/0-306-48054-9.

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.