



INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Mestrado Profissional em Tecnologia das Radiações em Ciências da Saúde

**Desenvolvimento de um sistema de filtração adicional semi-automatizado
para a implantação de novas qualidades de feixe de raios-X utilizados em
radiodiagnóstico**

JOSÉ NERES DE ALMEIDA JUNIOR

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de Mestre
Profissional em Tecnologia das Radiações
em Ciências da Saúde na Área de
Concentração
Processos de Radiação na Saúde**

**Orientador:
Prof. Dr. ORLANDO RODRIGUES JUNIOR**

**São Paulo
2022**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Mestrado Profissional em Tecnologia das Radiações em Ciências da Saúde

**Desenvolvimento de um sistema de filtração adicional semi-automatizado
para a implantação de novas qualidades de feixe de raios-X utilizados em
radiodiagnóstico**

JOSÉ NERES DE ALMEIDA JUNIOR

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de Mestre
Profissional em Tecnologia das Radiações
em Ciências da Saúde na Área de
Concentração
Processos de Radiação na Saúde**

**Orientador:
Prof. Dr. ORLANDO RODRIGUES JUNIOR**

**São Paulo
2022**

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

Como citar:

ALMEIDA JUNIOR, J. N. **Desenvolvimento de um sistema de filtração adicional semi-automatizado para a implantação de novas qualidades de feixe de raios-X utilizados em radiodiagnóstico**. 2022. 64 p. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia das Radiações em Ciências da Saúde), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/>> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

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

Almeida Junior, José Neres de
Desenvolvimento de um sistema de filtração adicional semi-automatizado para a implantação de novas qualidades de feixe de raios-X utilizados em radiodiagnóstico / José Neres de Almeida Junior; orientador Orlando Rodrigues Junior. -- São Paulo, 2022.

64 f.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia das Radiações em Ciências da Saúde (Processos de Radiação na Saúde) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2022.

1. metrologia. 2. dosimetria. 3. automação. 4. raio-X. 5. prototipagem. I. Rodrigues Junior, Orlando, orient. II. Título.

Autor: José Neres de Almeida Junior

Título: Desenvolvimento de um sistema de filtração adicional semi-automatizado para a implantação de novas qualidades de feixe de raios-X utilizados em radiodiagnóstico.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Tecnologia das Radiações em Ciências da Saúde - Processos de Radiação na Saúde da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Data 06/05/2022

Banca Examinadora

Prof.Dr. Orlando Rodrigues Junior (Orientador)

Instituição: IPEN

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Ricardo Andrade Terini

Instituição: IF-USP

Julgamento: Aprovado

Profa. Dra. Maria da Penha Albuquerque Potiens

Instituição: IPEN

Julgamento: Aprovado

Profa. Dra. Carla Daruich de Souza (suplente)

Instituição: IPEN

Prof. Dr. Elias Roma Neto (suplente)

Instituição: Senac

*"I planned each charted course
Each careful step along the byway
And more, much more than this
I did it my way"*

(Frank Sinatra – My Way)

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus por me inspirar, capacitar, me dar força e resistência, mesmo em momentos de dificuldades desse período de incertezas. E apesar dos contratempos estamos aqui e vencemos.

Agradeço de maneira inestimável ao meu orientador, Dr. Orlando Rodrigues Junior pela orientação, pelas observações, apontamentos e também pelas cobranças e por sempre ter apoiado, e também pela paciência de sempre.

À Dra. Maria da Penha Albuquerque Potiens, pelas conversas, orientações e conselhos sobre questões práticas do laboratório de calibração de instrumentos.

À minha mãe Cristiane e ao meu pai José agradeço pela vida, pelo carinho e amor que sempre deram e ensinaram a retribuir, além da educação que sempre me demonstraram não só a ter, mas também a praticar. Espero sempre poder retribuir e ser um filho que possam se orgulhar.

À minha irmã Gabriele por sempre estar disposta a ouvir e sempre demonstrou cumplicidade em momentos de tensão e das incertezas vividas nesse período, em que nem sabíamos do dia de amanhã se, literalmente, estaríamos vivos.

Em um momento como esse, não posso deixar de fazer menção e agradecer a todos os profissionais da saúde que contribuíram, direta ou indiretamente para a diminuição dos casos de Covid-19, e que contrariando posicionamentos e ideologias continuaram firmes, permitindo que a pesquisa acadêmica e a ciência demonstrassem seu valor pelo trabalho. A Ciência liberta.

Assim como um dia, ainda criança, a Ciência me fez brilhar os olhos para que quisesse seguir o caminho da pesquisa, em que mantenho até hoje essa vontade. Obrigado à Ciência, sempre.

Também obrigado aos que, infelizmente, se foram e que lutaram para que pudéssemos estar onde estamos, vacinados, resistindo e seguros, aqui representado na figura no meu tio Antônio Carlos Carvalho, vítima da Covid-19 e de tantos outros familiares, meus e de tantos outros que vieram a ser intubados e não resistiram. Vocês sempre serão lembrados e não se foram em vão. Esse trabalho também é para vocês.

Obrigado também ao amigo Paulo Victor pelas conversas e insights sobre a configuração da impressora 3d e pelos ensinamentos de como calibrar, desentupir, nivelar, trabalhar com ela. E também pelas observações no texto final, além das conversas sobre filmes e música.

Agradeço a todos os amigos feitos no IPEN da turma 01 do mestrado profissional, principalmente, à Fernanda, ao Oswaldo e à Priscila pelas conversas, risadas, piadas e ajuda que sempre tivemos uns dos outros.

Obrigado Andréia e Sabrina, da secretaria do mestrado profissional elas ajudas e conversas e até aos desabafos sobre tudo, sempre guardarei vocês no coração.

Ao Ipen e ao Centro de Metrologia das Radiações pela oportunidade na realização deste projeto e pelas instalações disponibilizadas.

À CNEN pelo aporte financeiro, com bolsa de mestrado, por parte do projeto.

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO ADICIONAL SEMI-AUTOMATIZADO PARA A IMPLANTAÇÃO DE NOVAS QUALIDADES DE FEIXE DE RAIOS-X UTILIZADOS EM RADIODIAGNÓSTICO

José Neres De Almeida Junior

RESUMO

Com o avanço das tecnologias de Imagiologia que utilizam radiação ionizante, novos equipamentos foram agregados à rotina médica. Esses equipamentos trazem novos desafios na sua utilização, em especial na calibração dos sistemas para garantir a correta entrega de radiação para diagnóstico ou terapia.

O Laboratório de Calibração de Instrumentos do IPEN (LCI-IPEN/CNEN) é composto por um conjunto de laboratórios para a calibração de diversos equipamentos medidores de radiação, para uso em radioproteção, radiodiagnóstico e radioterapia. Os sistemas contam com um razoável grau de automatização, boa parte desenvolvida no próprio IPEN por meio de projetos acadêmicos. Um desses arranjos conta com uma roda de filtros que atende as diversas qualidades estabelecidas nas normas NBR IEC 61267. O sistema semi-automatizado do LCI, de controle e otimização da roda de posicionamento de filtros, por meio do uso do *software* LabVIEW® e de programas a ele associados, coleta os respectivos fatores ambientais (temperatura e pressão) e físicos (a determinação do filtro adicional), para cálculo dos fatores de calibração, com as devidas incertezas, para cada filtro escolhido conforme a qualidade do feixe de raios X. Para se incorporar novas tecnologias, se torna necessário o desenvolvimento de um sistema que permita maior versatilidade na seleção de mais filtros, para se ter a possibilidade de calibrar diferentes qualidades de feixes atenuados, com o intuito de se poder utilizar uma maior gama de rotinas envolvendo outros equipamentos médicos.

No presente trabalho, foi desenvolvido um sistema adicional de porta-filtros com entradas, para encaixe dos filtros correspondentes às qualidades dos feixes escolhidos no programa de seleção de filtros, tendo como objetivo ampliar a capacidade da roda de filtros. Para o desenvolvimento desse projeto, foi utilizada a prototipação rápida com impressão 3D pela técnica FFF (*fused filament fabrication*) e a partir dos desenhos e modelos finalizados do protótipo, foi desenvolvido um sistema para a identificação de filtros utilizando um microprocessador Arduino.

O sistema permite a identificação se existe um filtro adicional em tempo real na sala de controle e pode ser adaptado a uma variedade de arranjos de irradiação. Foram feitos testes e comissionamento do sistema de identificação dos filtros, em ambiente simulando o *software* da rotina da roda de filtros, com resultado satisfatório, com a roda de filtro selecionando o arquivo gerado do filtro. Com a estrutura de reconhecimento dos filtros estabelecida e os sistemas físicos e de comunicação inseridos, o projeto está em testes para estabelecimento da atenuação com filtros de Ag (prata) e Cu (cobre), com posterior utilização para caracterização de qualidades de feixes de radiação atenuados (RQAs), com adequação do sistema de filtro para diversos usos.

DEVELOPMENT OF AN ADDITIONAL SEMI-AUTOMATIZED FILTRATION SYSTEM FOR THE IMPLEMENTATION OF NEW X-RAY BEAM QUALITIES USED IN DIAGNOSTIC RADIOLOGY

José Neres De Almeida Junior

ABSTRACT

With the advancement of Imaging technologies that use ionizing radiation, new equipment has been added to the medical routine. This equipment brings new challenges in their use, especially in the calibration of systems to ensure the correct delivery of radiation for diagnostic or therapy.

The IPEN Calibration Laboratory (LCI-IPEN/CNEN) is composed of a set of laboratories for the calibration of various radiation measuring equipment, for use in radioprotection, diagnostic radiology and radiotherapy. The systems have a reasonable degree of automation, much of which was developed at IPEN itself through academic projects. One of these arrangements has a filter wheel that selects the various qualities established in the NBR IEC 61267 standards. LCI's semi-automatized system, of control and optimization of the filter positioning wheel, through the use of LabVIEW® software and associated programs, collects the respective environmental (temperature and pressure) and physical factors (the determination of the additional filter), to calculate the calibration factors, with the appropriate uncertainties, for each filter chosen according to the quality of the X-ray beam. To incorporate new technologies, it is necessary to develop a system that allows greater versatility in the selection of more filters, in order to have the possibility of calibrating different qualities of attenuated beams, in order to be able to use a wider range of routines involving other medical equipment.

In the present work, an additional filter holder system with inputs was developed, for fitting the filters corresponding to the qualities of the beams chosen in the filter selection program, with the objective of expanding the capacity of the filter wheel. For the development of this project, it was used for fast prototyping with 3D printing using the FFF (*fused filament fabrication*) technique, and from the finished drawings and models of the prototype, a system was developed for the identification of filters using an Arduino microprocessor.

The system allows identification of an additional filter in real time in the control room and can be adapted to a variety of irradiation arrangements. Tests and commissioning of the filter identification system were carried out, in an environment simulating the filter wheel routine software, with satisfactory results, with the filter wheel selecting the generated filter file. With the filter recognition structure established and the physical and communication systems in place, the project is undergoing tests to establish the attenuation with Ag (silver) and Cu (copper) filters, with subsequent use to characterize the qualities of radiation beams attenuated (RQAs), with adaptation of the filter system for different uses.

SUMÁRIO

Agradecimentos	vi
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
SUMÁRIO	x
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xiii
1. Introdução	14
2. Objetivos	16
2.1. Objetivos específicos:	16
3. Fundamentação Teórica	17
3.1. Produção de Raios-X	17
3.2. Aplicações dos sistemas de raios-X	19
3.3. Caracterização de Feixes Padrão de Raios-X (ABNT NBR IEC 61267)	21
3.4. Sistemas de Calibração e Controle de Qualidade de Equipamentos de Radiodiagnóstico	24
3.4.1. Monitor de Radiação	24
3.4.2. Calibração de Instrumentos	25
3.5. Filtração Adicional - importância e uso	26
3.5.1. Tipos de filtros	26
3.5.2. Mamografia e Tomossíntese	28
3.6. Automação do Sistema de Calibração	29
3.7. Prototipagem 3D	32
3.8. Sistema de controle baseado em softwares livres: Arduino e Processing	33
4. Desenvolvimento do Projeto	35
4.1. Roda de Filtros: Porta-Filtros e Prototipagem 3D	37
4.2.1. Porta-Filtros e comunicação com o circuito (Arduino e Processing)	39
4.2. Lógica da Programação do Arduino e Processing	40
5. Resultados	43
5.1. Fase de modelagem das peças usando OpenSCad	43
5.2. Configuração dos ajustes das peças usando IdeaMaker®	44
5.3. Prototipagem das Peças	45
5.4. Sistema de acionamento e Sensores	46
5.5. Gaveta para acomodação de dois filtros	48
5.6. Programação Arduino e Processing	49
5.6.1. Estado inicial do sistema:	50
5.6.1.1. Rotina Setup(): Definições das variáveis dos pinos como entrada	51
5.6.1.2. Rotina Loop()	52
5.6.1.2.1. Sub-rotina <i>detecta_sistema()</i>	53

5.6.2. Processing e comunicação com software <i>BenchControl</i>®	54
6. Considerações finais	59
6.1. Publicações	59
6.2. Atividades Futuras	59
Referências	61
APÊNDICES	66
APÊNDICE A - Programações Completas – Arduino	66
APÊNDICE B - Programações da IDE do Processing	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama esquemático de um tubo de raios-X atual, com ânodo fixo.....	17
Figura 2 - Espectro de raios-X contínuo típico do tubo, operando a três diferentes picos de tensão com a mesma corrente.....	18
Figura 3 - Espectro mostrando raios-X característicos de $K\alpha$ e $K\beta$, além dos raios-X contínuos. Raios-X característicos estão presentes apenas quando a tensão operacional do tubo é alta o suficiente para dar aos elétrons incidentes energia suficiente para ejetar um elétron K dos átomos alvo.....	19
Figura 4 - Diagrama Esquemático, com representação dos sistema de calibração (dimensões em mm, dimensão A dependendo do tubo de raios X).....	30
Figura 5 - Esquema da planta baixa do sistema atual da sala de raios-X, do LCI.....	36
Figura 6 - Esquema do sistema completo, incluindo indicação da estrutura para geração do arquivo utilizado junto à rotina da roda de filtros existente.....	36
Figura 7 - Imagem da impressora Raise3D Pro2® (a) que foi utilizada para impressão do suporte e dos conjuntos de gavetas com encaixes específicos para cada combinação de filtro (b), imprimindo um dos modelos.....	38
Figura 8 - Imagem do circuito dos sensores acionados pelas aletas fazendo contato.....	40
Figura 9 - Lógica da rotina utilizada para a implementação Arduino e Processing, gerando o arquivo .txt usado para a programação da roda de filtro.....	41
Figura 10 - Imagens do arquivo em OpenSCad, tanto do suporte (a), quanto do porta-filtros (b), referentes aos modelos, ambos desenhados utilizando o programa OpenSCad e gravados o arquivo .stl para impressão na Raise3D®, utilizando o software IdeaMaker®.....	43
Figura 11 - (a) Imagem da Roda de filtro com o equipamento de Raios-X, colocado anteriormente à roda; (b) em detalhe, local da colocação do sistema suporte-porta-filtro, a ser inserido junto à saída da roda de filtro (apontado com a seta vermelha) antes do colimador e anteparo da câmara de ionização.....	46
Figura 12 - exemplo de um dos conjuntos com suporte em U e com uma das 16 combinações de gavetas com filtro (para esse caso, Al, a gaveta com os quatro encaixes). Aqui, o encaixe inferior da gaveta fecha o contato do sensor chave fim de curso (demonstrado pelo LED vermelho ligado), repassando a informação à programação no Arduino que os 4 sensores foram acionados (o que significa, aqui, que se trata do filtro Al).....	47
Figura 13 - (a) Peça projetada, do bastidor para colocação do segundo filtro, com os encaixes ovalados para encaixe no filtro de referência para a situação do filtro duplo, já com as peças de anteparo para fixação do alvo (projetado no programa Fusion360®) (b) Conjunto impresso com ajustes de 15% de preenchimento, na impressora Raise3D®.....	48
Figura 14 - (a) Peças da proteção à placa microcontroladora Arduino - Suporte superior e base (projetadas no programa Fusion360®), para fixação na sala do laboratório de raios-X. (b) Conjunto impresso com ajustes de 15% de preenchimento, na impressora Raise3D®.....	49
Figura 15 - Diagrama de Blocos da Programação do Arduino e do Processing.....	49
Figura 16 - Diagrama da hierarquia dos blocos de sub-rotinas do Arduino.....	50
Figura 17 - Descrição das variáveis e atribuições referentes à pinagens. Atribuição de funções que serão ativadas ao longo da programação.....	50
Figura 18 - Definição dos estados dos pinos, variável booleana e configurações de taxa de transferência, em bits por segundo.....	51
Figura 19 - Início da função principal, loop(), em que são definidos os comandos principais a serem executados para registro das leituras e coleta dos dados.....	52
Figura 20 - A função detecta_sistema() é parte da função loop() e nela se executam os comandos para que se defina o recebimento na porta serial de qual filtro se está presente.....	53
Figura 21 - Diagrama da hierarquia dos blocos de rotinas do Processing.....	54
Figura 22 - Programação principal para registro da informação disponível na serial remetendo ao arquivo dados.txt, criado pela rotina do ambiente de desenvolvimento Processing, a cada colocação de filtro. ..	55
Figura 23 - Rotina para criação do arquivo de registro dos filtros colocados, por dia e hora (Arquivo DataLoggin_Arduino).....	56
Figura 24 - (a) tela do software BenchControl® com os filtros selecionados, de acordo com respectiva qualidade do feixe a que se destina.....	57
Figura 25 - (a) exemplo de tela da descrição dos filtros conforme selecionado na roda de filtros pelo BenchControl®, considerando os filtros que já estão na roda de filtros e (b) o arquivo dados.txt gerado pela IDE do software Processing, a partir da informação da saída serial do software Arduino, para registro do filtro adicional selecionado.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre as qualidades dos feixes padrão de radiação, origem da radiação e aplicação.	20
Tabela 2 - Qualidades de feixes padrões atenuados (RQA), em função do PPV (em kV) e respectivos valores de CSR ₁ e filtrações adicionais a serem utilizadas junto com as filtrações determinadas para os feixes RQR.	23
Tabela 3 - Principais parâmetros para as impressões dos protótipos, em PLA, utilizando o ideaMaker®.	44
Tabela 4 - Organização dos cabos, cores, pinos com os sensores acionados.	47
Tabela 5 - Referência dos sensores acionados e qual gaveta se destina.	54

1. Introdução

Em 1998, a portaria 453 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária, ANVISA (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998), estabeleceu critérios e diretrizes para a utilização de sistemas de raios-X em clínicas médicas e hospitais (CORREA, 2010), mas, sem apresentar procedimentos operacionais de como conduzir a calibração dos instrumentos usados na realização do controle de qualidade desses sistemas. Todavia, a portaria 453 é um marco no estabelecimento de critérios objetivos para o controle de qualidade e segurança no uso das Tecnologias das Radiações na área da Saúde no Brasil.

Em 2019, a resolução RDC330 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2019), e posteriormente em 2021, a instrução normativa IN 90 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2021), estabelecem os requisitos sanitários para a organização e o funcionamento de serviços de radiologia diagnóstica ou intervencionista e regulamentam o controle das exposições médicas, ocupacionais e do público decorrentes do uso de tecnologias radiológicas diagnósticas ou intervencionistas (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2019). Em 2022, a resolução RDC 611 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2022), consolidou a RDC 330 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2019), revogando-a, sem alteração de mérito. Com relação à IN 90 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2021), que dispõe também sobre requisitos sanitários para a garantia da qualidade e da segurança em sistemas de radiografia médica convencional, fluoroscopia, esta instrução normativa passa a ser incorporada ao texto da RDC 611 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2022).

O art. 30 da RDC 611 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2022) determina que os instrumentos utilizados na avaliação dos equipamentos e das instalações devem estar calibrados em laboratórios credenciados pelos órgãos competentes, rastreáveis até a rede nacional oficial ou internacional de metrologia, conforme a periodicidade recomendada pelos fabricantes. A atividade de calibração dos medidores, que é efetuada fora dos serviços, e o controle de qualidade dos equipamentos utilizados em Radiodiagnóstico, passaram a fazer parte da rotina dos serviços de Saúde, com cada vez mais a necessidade das calibrações frequentes dos equipamentos se tornando obrigatória.

Assim, com essa necessidade de calibrações frequente e cada vez mais implementação de controle de qualidade, com o passar dos anos e com o avanço das Tecnologias das Radiações, novos equipamentos e técnicas foram surgindo, impactando diretamente nos processos de calibração de medidores de radiação utilizados nos ambientes.

O Laboratório de Calibração de Instrumentos (LCI) do Centro de Metrologia das Radiações do IPEN é um laboratório que pesquisa, desenvolve e implanta técnicas e protocolos para a calibração de medidores de radiação, prestando serviços de calibração de instrumentos para todo o Brasil. Com o advento dos novos equipamentos de diagnóstico por raios-X, como os equipamentos de tomografia computadorizada de feixes cônicos, para uso em Odontologia (CBTC) e de tomossíntese mamária em 3D, novos protocolos de controle de qualidade precisam ser desenvolvidos e implantados no LCI.

Dentro deste cenário, a proposta deste trabalho é o desenvolvimento e produção de um sistema para ampliação da capacidade do Sistema de raios-X, permitindo implantação de novas qualidades de feixe de radiação, de modo que para se atingir tais parâmetros, aqui se tem por objetivo o acoplamento do sistema porta-filtros a fim de que novas qualidades de radiação possam ser devidamente calibradas, com precisão e utilizando diferentes filtros, de forma a selecionar pelo sistema com comunicação remota à sala de irradiação.

2. Objetivos

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema semi-automatizado para a inclusão de filtros adicionais em um sistema de calibração por feixe de raios-X, adaptável para diversos arranjos de sistemas de irradiação.

2.1. Objetivos específicos:

- Impressão em 3D dos protótipos do sistema porta-filtro, com adequações na prototipagem;
- Desenvolvimento de uma rotina de comunicação entre o microcontrolador Arduino e os sensores do sistema porta-filtro;
- Desenvolvimento de um programa para comunicação entre o sistema de identificação dos filtros no ambiente da interface de desenvolvimento do *software* Arduino com a rotina de execução do *software* Processing;
- Desenvolvimento de um programa para comunicação entre o sistema de controle de seleção dos filtros na roda de filtros com o *software* Processing, com desenvolvimento de testes de comissionamento da programação para identificação dos arquivos gerados e adequação ao arquivo da rotina da roda de filtro.

3. Fundamentação Teórica

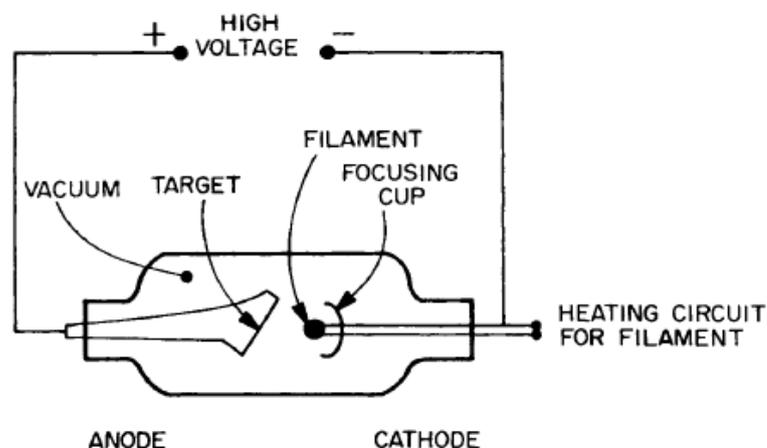
3.1. Produção de Raios-X

Raios-X são produzidos quando um feixe de elétrons atinge um alvo. Os elétrons perdem a maior parte de sua energia em colisões com elétrons do átomo no alvo, causando a ionização e excitação dos átomos (TURNER, 2007). Além disso, o feixe pode ser fortemente desviado na vizinhança do núcleo atômico, perdendo, assim, energia, irradiando fótons de raios-X. Núcleos pesados são muito mais eficientes do que núcleos leves na produção da radiação porque os desvios são maiores. Um único elétron pode emitir um fóton de raios-X com qualquer energia limitada pela sua própria energia cinética.

Como resultado, um feixe monoenergético de elétrons produz um espectro contínuo de raios-X com energias de fótons até o valor da energia do feixe. Os raios-X contínuos também são chamados de *bremsstrahlung*, ou "radiação de frenagem" (TURNER, 2007).

Um diagrama esquemático, mostrando os elementos básicos de um tubo de raios-X, é mostrado em Fig. 1. O tubo tem um catodo e anodo selados dentro sob alto vácuo. O catodo contém um filamento de tungstênio (W) aquecido, que emite elétrons (TURNER, 2007), no denominado efeito termiônico (CORREA, 2010). Esses elétrons então são acelerados por uma diferença de potencial entre o anodo e o catodo.

Figura 1 - Diagrama esquemático de um tubo de raios-X atual, com ânodo fixo.



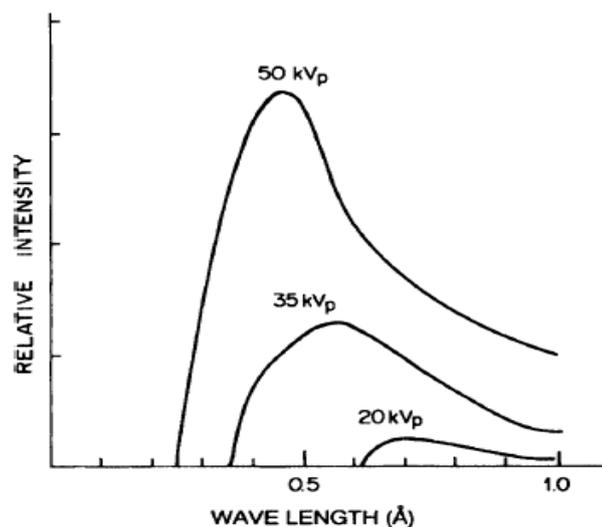
Fonte: TURNER, 2007.

Quando o tubo é acionado, o filamento aquecido libera os elétrons, que são acelerados em direção ao ânodo em um campo elétrico intenso, produzido por uma grande diferença potencial (alta tensão) entre o cátodo e o ânodo. O copo focalizador concentra os elétrons em um ponto focal no ânodo. O ânodo é formado por um metal com alto ponto de fusão. Os materiais comumente usados são de Tungstênio, de Molibdênio e de Ródio (principalmente quando se tratam de mamógrafos), devido à elevada temperatura que o anodo pode atingir (COSTA, 2013). No anodo, os elétrons são abruptamente freados, emitindo raios X contínuos em todas as direções.

Aproximadamente, menos de 1% da energia dos elétrons é convertida em raios X que emergem através de uma janela no tubo (TURNER, 2007). Os outros 99% da energia, perdida em colisões eletrônicas, são convertidos em calor, que deve ser removido do ânodo. Os ânodos podem ser resfriados por óleo circulante ou água. Ânodos rotativos também são usados em tubos de raios X para manter a temperatura mais baixa, e também evitar desgaste do material do alvo do ânodo.

A Figura 2 mostra espectros típicos de raios X contínuos gerados a partir de um tubo operado em diferentes tensões com a mesma corrente. A eficiência da produção de raios X de freamento aumenta rapidamente quando a energia dos elétrons é elevada. Portanto, a intensidade dos raios X aumenta consideravelmente com a tensão do tubo, mesmo em constante corrente.

Figura 2 - Espectro de raios-X contínuo típico do tubo, operando a três diferentes picos de tensão com a mesma corrente.

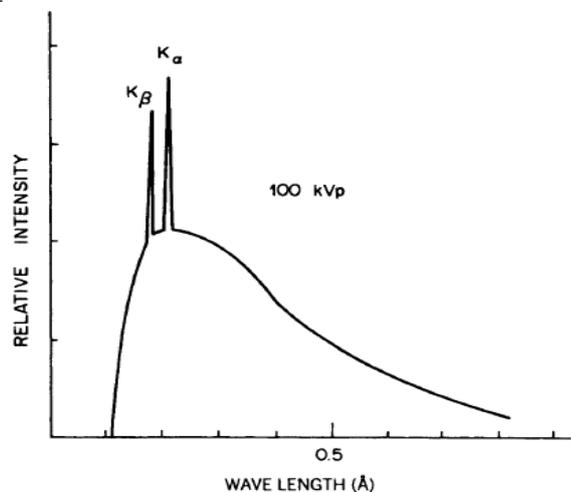


Fonte: TURNER, 2007.

As energias de raios-X são comumente referidas em termos de suas tensões de pico em quilovolts, denotadas por kVp. Se a tensão do tubo for suficiente, os elétrons que atingem o alvo podem ejetar elétrons dos átomos do alvo - a energia de ligação da borda K é $E_K = 69,525 \text{ keV}$ para tungstênio.

Raios-X discretos, ou característicos, também são produzidos. Estes são emitidos quando elétrons das camadas mais externas preenchem as vagas internas. As energias dos fótons são características do elemento do qual o alvo é feito.

Figura 3 - Espectro mostrando raios-X característicos de $K\alpha$ e $K\beta$, além dos raios-X contínuos. Raios-X característicos estão presentes apenas quando a tensão operacional do tubo é alta o suficiente para dar aos elétrons incidentes energia suficiente para ejetar um elétron K dos átomos alvo.



Fonte: TURNER, 2007.

Raios-X característicos se situam sobrepostos no espectro contínuo, como ilustrado para o caso do tungstênio, na Fig. 3. Eles são denominados $K\alpha$ e $K\beta$, e quando a vaga da camada K é preenchida por um elétron da camada L, M. Além disso, quando as vagas da camada L são preenchidas, os raios-X característicos $L\alpha$ e $L\beta$ são emitidos. Estes têm baixa energia e geralmente são absorvidos na carcaça do tubo.

3.2. Aplicações dos sistemas de raios-X

Os sistemas de raios-X para aplicação em radiodiagnóstico podem ser classificados quanto à energia do feixe ou quanto ao uso que se faz dessa radiação.

Traçando um panorama de operação, os equipamentos de raios-X, usados em radiodiagnóstico, funcionam tipicamente entre 22kV e 150kV e entre 0,4mA e 1200mA (CORREA, 2010). Aqui a corrente indica o fluxo de elétrons que emergem do catodo e, portanto, representam o quanto de raios-X serão produzidos quando da colisão no ponto focal do anodo.

Normalmente, as tensões mais baixas (<35kV) são utilizadas em equipamentos de mamografia, dado que nessa região, a radiação ao interagir com o tecido mamário, de diferentes densidades, permite um contraste melhor na imagem com consequente visualização dos detalhes sendo feito de forma melhor. As tensões intermediárias (40kV a 150kV) são utilizadas para radiografia convencional; e entre 100kV e 150kV, para tomografia computadorizada (TILLY, 2010).

A classificação de feixes padrões, em níveis de tensão, bem como de filtração adicional, não depende só do kVp, estando relacionada com a qualidade da radiação analisada, que serve de padronização para caracterização dos feixes de raios-X. As qualidades de feixes padronizados, definidas na norma IEC 61267 (2005), estão apresentadas na Tabela 1 (ALMEIDA JUNIOR, 2010).

Tabela 1 - Relação entre as qualidades dos feixes padrão de radiação, origem da radiação e aplicação.

Qualidade de radiação	Origem da radiação	Material Atenuador	Aplicação
RQR	Feixe direto	-----	Radiografia geral, fluoroscopia, aplicações odontológicas
RQA	Feixe atenuado	Alumínio	Medições após o paciente e o intensificador de imagem
RQT	Feixe atenuado	Cobre	Aplicações em TC (tomografia computadorizada)
RQR-M	Feixe direto	-----	Aplicações em mamografia
RQA-M	Feixe atenuado	Alumínio	Medições após o paciente e o intensificador de imagem

Fonte: ALMEIDA JUNIOR, 2010.

3.3. Caracterização de Feixes Padrão de Raios-X (ABNT NBR IEC 61267)

Nas aplicações em radiodiagnóstico, os feixes são descritos em termos da sua capacidade em penetrar os diferentes tecidos do corpo humano. Os sistemas de detecção devem ser capazes de distinguir os diversos tipos de tecido, com interesse especial na penetração do feixe de raios-X no paciente, visando à formação de imagens em um detector, portanto, descrevendo os feixes em termos de sua capacidade para penetrar algum material de composição conhecida. A caracterização mais completa dos feixes de raios-X é dada por sua distribuição espectral.

Como a espectrometria de raios-X requer cálculos de incerteza e também tempo para se obter os espectros, é geralmente empregada uma descrição de qualidades da radiação em termos da tensão do tubo de raios-X, e da primeira e segunda camadas semi-redutoras (CSR1 e CSR2). A primeira camada semi-redutora, CSR1 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2005), é a espessura, em mmAl, necessária para atenuar a intensidade do feixe em 50% do seu valor inicial; já, a segunda camada semi-redutora, CSR2 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2005), será a espessura acrescentada à CSR1, em mmAl, necessária para reduzir a intensidade do feixe a 25% do valor inicial.

Opcionalmente, a qualidade do feixe é expressa pela CSR1 e pelo coeficiente de homogeneidade h (razão entre os CSR1 e CSR2), para cada valor de kVp ou de PPV (*Practical Peak Voltage*, ou Potencial de Pico Prático).

O subcomitê 62C da International Electrotechnical Commission especificou as características requeridas para o desempenho dos instrumentos usados para medições não-invasivas da tensão do tubo, em aplicações de radiodiagnóstico (IEC 61676, 2002). Foi assim que, nesta publicação, adotou-se a grandeza conhecida como “practical peak voltage” (Tensão de Pico Prática, PPV – em inglês).

O PPV permite a caracterização completa de um ciclo de exposição por um valor único de tensão do tubo (TERINI *et al*, 2009). O PPV foi introduzido ao uso prático pela mesma norma referida, como uma grandeza elétrica univocamente definida e mais fortemente relacionada ao contraste de imagem do que outros parâmetros mais frequentemente utilizados na calibração, manutenção e controle de qualidade de equipamentos de raios X, como o kVpmédio (potencial de pico médio:

média dos máximos de todos os ciclos de tensão, durante a exposição) ou o kVp absoluto (potencial de pico absoluto: o máximo valor de tensão durante a exposição).

Por definição (KRAMER et al., 1998), o PPV é derivado da tensão equivalente em contraste (CEV – *contrast equivalent voltage*, em inglês), a qual relaciona a tensão gerada por um equipamento de potencial constante com o contraste de kerma produzido com ele. Então, para certo valor de tensão, a radiação gerada por um tubo de raios X, para uma forma de onda arbitrária, produzirá o mesmo contraste de kerma que certa qualidade de radiação gerada pelo equipamento de potencial constante.

Atualmente, o PPV é recomendado, além da IEC, por organismos internacionais, tais como a International Atomic Energy Agency (IAEA, sigla em inglês para a Agência Internacional de Energia Atômica), no documento TRS 457 (IAEA, 2007), como padrão de tensão aplicada aos tubos de radiodiagnóstico, na caracterização dos feixes de raios X usados na calibração de medidores de dose e de medidores não-invasivos da tensão aplicada a tais tubos. A International Commission on Radiation Units and Measurements, no seu Report 74 (ICRU, 2005), incluiu o PPV ao conceituar as grandezas e unidades envolvidas com a dosimetria dos sistemas que utilizam os raios X para obter imagens médicas.

Na prática dos programas de controle de qualidade realizados em hospitais e clínicas, os testes devem ser simples e rápidos. Nestes casos, os medidores de kVp mais adequados são os medidores não-invasivos, em que as medições da tensão aplicada ao tubo de raios X são realizadas indiretamente, no feixe de radiação produzido. Atualmente, alguns instrumentos comerciais deste tipo já são capazes de medir o PPV (ALMEIDA JUNIOR, 2010), utilizando para cada qualidade de feixe de radiação padronizada.

A utilização de qualidades de feixe padronizados da radiação permite a intercomparação entre resultados de diferentes laboratórios, a análise da reprodutibilidade e uma maior confiabilidade nos resultados das calibrações. A norma IEC 61267 (2005) define também os limites de tolerância do CSR1 e do coeficiente de homogeneidade h , que devem ser 0,1 mmAl e 0,03 mmAl, respectivamente.

Tabela 2 - Qualidades de feixes padrões atenuados (RQA), em função do PPV (em kV) e respectivos valores de CSR₁ e filtrações adicionais a serem utilizadas junto com as filtrações determinadas para os feixes RQR.

Qualidade de radiação	Tensão (em PPV) (kV)	1º. CSR (mm Al)	Filtração Adicional ⁽¹⁾ (mm)
RQA 2	40	2,2	4
RQA 3	50	3,8	10
RQA 4	60	5,4	16
RQA 5	70	6,8	21
RQA 6	80	8,2	26
RQA 7	90	9,2	30
RQA 8	100	10,1	34
RQA 9	120	11,6	40
RQA 10	150	13,3	45

(1) As incertezas de medição destas filtrações devem ser menores ou iguais a 0,1 mmAl.

Fonte: IEC 61267, 2005.

Cabe notar que, durante as medições com feixes RQA, atenuados, utilizam-se as filtrações adicionais implementadas nos feixes RQR, adicionadas a filtrações tão próximas quanto possível às descritas na 4a coluna, da tabela 2, atendendo a norma IEC 61267 (2005). A preocupação, no caso dos feixes RQA, é que esta qualidade de radiação simule a atenuação da radiação causada pelo paciente, quando da passagem da radiação. Assim, a filtração adicional deve ser tão bem aferida, quanto possível, com incerteza associada à medição menor ou igual a 0,1 mm.

Ainda, a IEC 61267 (2005) emprega o PPV também para determinação da tensão do tubo de raios-X, possibilitando alta equivalência das condições de radiação, pensando na execução de diferentes sistemas radiológicos. Assim, se fixando a tensão e determinando a condição necessária de filtração para se atingir o valor de CSR requerido, garantem-se valores de RQR, mais padronizados, considerando as incertezas (FRANCISCATTO, 2009).

Por esta norma também, se garante a padronização não somente das qualidades de feixe direto (RQR), mas também para os feixes atenuados (RQA's), tanto para as aplicações em radiografia convencional quanto em mamografia, ou seja, RQR-M, para feixes diretos, e RQA-M, para feixes atenuados. Nos casos, são empregados filtros de alumínio, com as medidas procurando simular a atenuação da radiação causada pelo paciente.

3.4. Sistemas de Calibração e Controle de Qualidade de Equipamentos de Radiodiagnóstico

De acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM, 2012), calibração é definida como a operação que estabelece (sob condições especificadas, numa primeira etapa) uma relação entre valores e incertezas de medição, ambos fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando à obtenção dum resultado de medição a partir de uma indicação.

Dessa forma, os detectores devem obedecer a certos requisitos para serem padronizados para o uso em Proteção Radiológica e nos Serviços de Metrologia das Radiações Ionizantes (POTIENS, 2010). Assim, além de possuir as características citadas no item anterior (capítulo 3.3), devem satisfazer a requisitos normativos, para os monitores de radiação, conforme atualização da instrução normativa IN90 e da resolução RDC611 (BRASIL, 2022), que determinam que os instrumentos utilizados na avaliação dos equipamentos e das instalações devem estar calibrados em laboratórios credenciados pelos órgãos competentes, rastreáveis até a rede nacional oficial ou internacional de metrologia.

3.4.1. Monitor de Radiação

O monitor de radiação, por sua vez, é um detector construído e adaptado para radiações e finalidades específicas e deve apresentar as seguintes propriedades (TAHUATA, et al, 2014), regidas pelas normas ABNT NBR IEC 61674 (2016), ABNT NBR IEC 60731 (2019) e ABNT NBR - ISO 4037-1 (2020): limite de detecção adequado; precisão e exatidão; reprodutibilidade e repetitividade; linearidade; estabilidade a curto e em longo prazo; baixa dependência de energia, de direção e rotação, de fatores ambientais (como pressão e temperatura, conforme o detector utilizado), e da taxa de kerma. Sistemas de calibração com arranjos experimentais padronizados para calibrar aparelhos usados em radioproteção, radiodiagnóstico e radioterapia utilizam como grandezas de referências a dose absorvida na água, kerma no ar e dose equivalente, variando a grandeza de referência e/ou as distâncias conforme a técnica, o método de calibração.

3.4.2. Calibração de Instrumentos

A calibração de instrumentos, além da definição do VIM (INMETRO, 2012), pode também ser definida como um conjunto de operações que estabelece, sob condições específicas, a relação entre os valores indicados ou representados por uma medida materializada, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões (INMETRO, 2012).

Ou seja, a calibração de medidores de radiação, portanto, visa garantir funcionamento devido, adequado para o uso pretendido, mediante condições padrões, e também ajustar o instrumento, se possível, melhorando a precisão nas medidas. Para tanto, existem dois métodos utilizados na calibração de medidores de radiação, o da substituição (com uso do padrão a cada medição) e o de uso de campos de radiação com propriedades bem conhecidas (POTIENS, 2010).

O primeiro método, da substituição, é mais utilizado para sistemas que utilizam raios-X. Como o tubo de raios-X é um equipamento elétrico, flutuações periódicas na rede de alimentação (ripple), devido ao processo de retificação, um pico de energia na rede elétrica pode ocasionar um aumento na produção de radiação, causando variação na intensidade do feixe a ser calibrado. Por conta disso, a câmara de ionização monitora é posicionada no feixe, sendo realizadas medições. Também é importante citar que são utilizadas câmaras de ionização padrão que devem ter rastreabilidade metrológica. Em seguida, retira-se a câmara de ionização e se coloca o aparelho a ser calibrado, com as cargas sendo coletadas. Logo após, a câmara de referência, é posicionada no feixe e uma nova medição é realizada (COSTA, 2013).

Depois de realizadas todas as correções para todos os fatores (temperatura, pressão, umidade, fatores de recombinação de pares de carga, fator de correção do volume sensível da câmara, etc.), gera-se um coeficiente de calibração, com fatores para cada qualidade de feixe, que deve ser utilizado na câmara de ionização calibrada sempre que essa for utilizada para realizar medições (CORREA, 2010), e já considerando também todas as incertezas das medições, conforme as correções dos fatores empregados. Este coeficiente é obtido dividindo-se o valor de referência pela leitura realizada pelo equipamento, aplicando as correções necessárias, com sua unidade dependendo das unidades dos valores utilizados (COSTA, 2013).

O segundo método de calibração (campos de radiação com propriedades bem conhecidas) é mais empregado em sistemas que utilizam fontes radioativas (COSTA, 2013). O decaimento das fontes é um processo bem conhecido sendo que após a fonte ser colocada no local adequado onde as calibrações serão feitas, é realizada uma varredura no campo, determinando a taxa de dose a diferentes distâncias (CORREA, 2013). Com essas características do campo conhecidas, sabendo também que ele não sofrerá variações em função de temperaturas, pressão atmosféricas, entre outros fatores, a câmara pode simplesmente ser posicionada no feixe, com as medições sendo realizadas (CORREA, 2010), podendo esse processo ser repetido em intervalos diferentes do equipamento.

Ao final da calibração, é emitido um certificado com os coeficientes de calibração do equipamento, já considerando todos os fatores de correção e as incertezas expandidas, considerando o grau de confiabilidade, rastreado ao sistema internacional de metrologia (BIPM).

3.5. Filtração Adicional - importância e uso

3.5.1. Tipos de filtros

As qualidades dos feixes de radiação padronizadas (IEC 61267, 2005), apresentam características próximas às utilizadas clinicamente, e são definidos como: qualidade de radiação direta (RQR, aplicado em radiografia geral, fluoroscopia e aplicações odontológicas) e qualidade de radiação atenuada (RQA, com filtro de Alumínio, que simulam a atenuação do paciente e do intensificador de imagens e RQT, com filtro de Cobre, para aplicações em tomografia computadorizada). A utilização desses feixes padronizados permite a comparação entre resultados de diferentes laboratórios, a análise da reprodutibilidade e uma maior confiabilidade nos resultados das calibrações.

Durante as medições com feixes RQA utiliza-se as filtrações adicionais implementadas nos feixes RQR, tão próximas quanto possível às descritas na norma IEC 61267 (2005), com a colocação de novos filtros. A preocupação, no caso dos feixes RQA, é que esta qualidade de radiação simulam a atenuação da radiação causada pelo paciente, quando da passagem da radiação.

A filtração adicional deve ser tão bem aferida quanto possível, com incertezas associadas às medições de espessura do filtro menores ou iguais a 0,1 mm. Também atendendo aos objetivos de calibração de equipamentos, conforme especificado pela IAEA, no TRS 457 (IAEA, 2007) e posteriormente (IAEA, 2015), um conjunto de filtros (Al, Cu, Sn) é utilizado para modificar o espectro de fótons do feixe de radiação, considerando a geometria de feixe estreito, com vistas às características das qualidades do feixe de radiação. Tais filtros metálicos terão pelo menos uma pureza certificada de 99,99% (IEC 61267, 2005).

O filtro barra as linhas K do ânodo do tubo de Raios-X (VAN GRIECKEN, 2001), para que o kV seja suficientemente alto, acima da borda de absorção K do material do ânodo, gerando intensa emissão dessa linha característica. O filtro tem o seu benefício no fato de que um elemento tem um coeficiente de baixa absorção de massa para suas próprias linhas características, como estes estão imediatamente abaixo do salto de absorção de borda.

Assim, de forma geral, um filtro atenua os fótons primários provenientes do feixe de raios-X, atuando, portanto, como um absorvedor de raios-X e sendo colocado entre o tubo de raios-X e a amostra para modificar o espectro primário, de saída do tubo de raios-X, em que a amostra será exposta (VAN GRIECKEN, 2001). Para realização de procedimentos definidos pela IEC 61267 (2005), é necessária a utilização de filtros de várias espessuras com objetivo de caracterizar os feixes de cada equipamento de raios-X (FRANCISCATTO, 2009). Assim, se implanta novos filtros, atendendo às necessidades do LCI, seguindo as definições da IEC 61267 (2005), atendendo às necessidades, também, de implantação de filtros adicionais especificados na norma ABNT NBR ISO-4037 (2015).

E, ainda, em casos específicos, um aumento da filtração seria desejável por eliminar os fótons de baixa energia. A recomendação é que a espessura da filtração total de um equipamento de radiologia diagnóstica seja de pelo menos 2,5 mm de alumínio equivalente (COSTA, et al. 2009). Watanabe (COSTA, et al. 2009), observa que com filtração adicional produzida por 0,08 mm de cobre obtêm-se imagens radiográficas com dose de radiação 14% menor, com a mesma qualidade dos filmes que receberam radiação filtrada com 2,00 mm de alumínio.

Por outro lado, em termos de filtração para mamografia, o uso de filtros com Z elevado, como, por exemplo, o filtro de Ag permite obtenção de melhores imagens, de mamas densas (HEACOX, 2008), e menor dose, já que barra fótons de menor energia, adequando ao uso para RQA-M, por exemplo, ao se substituir filtro de molibdênio. Isso ocorre, principalmente, no início do espectro, faixa principal deste tipo de exame, muito pela diferença de densidade do tecido mamário a ser observado na imagem.

3.5.2. Mamografia e Tomossíntese

Um dos exames que possibilita a visualização de nódulos e neoplasias de forma mais precisa é a Tomossíntese Mamária (TM) (PEPPARD, *et al*, 2015; BERNARDI, *et al*, 2016). A TM é uma variação da mamografia digital (MD), em que o equipamento gera imagens tridimensionais (3D) da mama quando elas são comprimidas no exame (AGUILAR *et al*, 2018).

No interior da mama, os objetos se projetam em diferentes lugares e ângulos e com o auxílio do computador, a imagem da mama completa é reconstruída em fatias de 1mm de espessura, o que permite detalhar o diagnóstico e obter uma imagem 3D. Assim, se consegue eliminar a superposição dos tecidos, havendo melhor definição das bordas das lesões (o que define melhor o aspecto benigno ou maligno do tipo de tumor mamário), possibilitando obter melhor detecção de lesões sutis, bem como diminuindo o número de biópsias (AGUILAR *et al*, 2018). Devido a compressão da mama, durante o deslocamento em arco do tubo de raios-X, objetos que estejam em diferentes alturas dentro da mama vão ser projetados em lugares diferentes nas imagens obtidas nos diferentes ângulos.

Comparativamente, (PEPPARD, *et al* 2015; CHOI, *et al*, 2019), com mais estudos com os mamógrafos digitais por tomossíntese mamária, se conseguiu melhor adequação, também, para menor dose glandular média e menor dose absorvida no tecido mamário de forma a se também conseguir melhor visualização nos planos visualizados e reconstruídos, se comparados aos mamógrafos digitais de campo total (FFDM - *Full-Field Digital Mammography*), e também permitindo melhor visualização de tumores não calcificados no tecido mamário (PEPPARD, *et al*, 2015).

Para tanto, a escolha do filtro em equipamentos de tomossíntese também é um dos fatores a serem considerados para diminuição da dose, além de visar a simplificação do sistema (SHRESTHA, *et al*, 2017). Por exemplo, até então, em 2010 (NOGUEIRA, 2010), em um dos protótipos, possuía ânodo de tungstênio (W) e filtros de ródio (Rh), prata (Ag) e alumínio (Al), de forma que esses diferentes filtros eram utilizados na obtenção de imagens a 2D e 3D produzindo espectros de raios-X ideais conforme a espessura e composição da mama, objetivando minimizar a exposição do paciente a fótons indesejáveis, principalmente de baixa energia, de modo a se adequar ao princípio ALARA (do inglês “*As Low As Reasonably Achievable*”), o qual define que a exposição de radiação ao paciente deve ser tão baixa quanto razoavelmente possível.

Nos anos posteriores, com evolução de novas tecnologias, técnicas e estudos, (SHRESTHA, *et al*, 2017), estes autores indicam que existe potencial de substituir os atuais filtros em mamografia com Al, para quase dobrar a fluência incidente no tecido mamário, diminuindo a exposição para mais do que 60% e a dose glandular média para aproximadamente 20% menor, mantendo a mesma qualidade de imagem. Ainda, como observado em (SHRESTHA *et al*, 2017) e em (HEACOX, 2008), além do Al o uso de filtros de Ag em tomossíntese também se mostra efetivo e seguro.

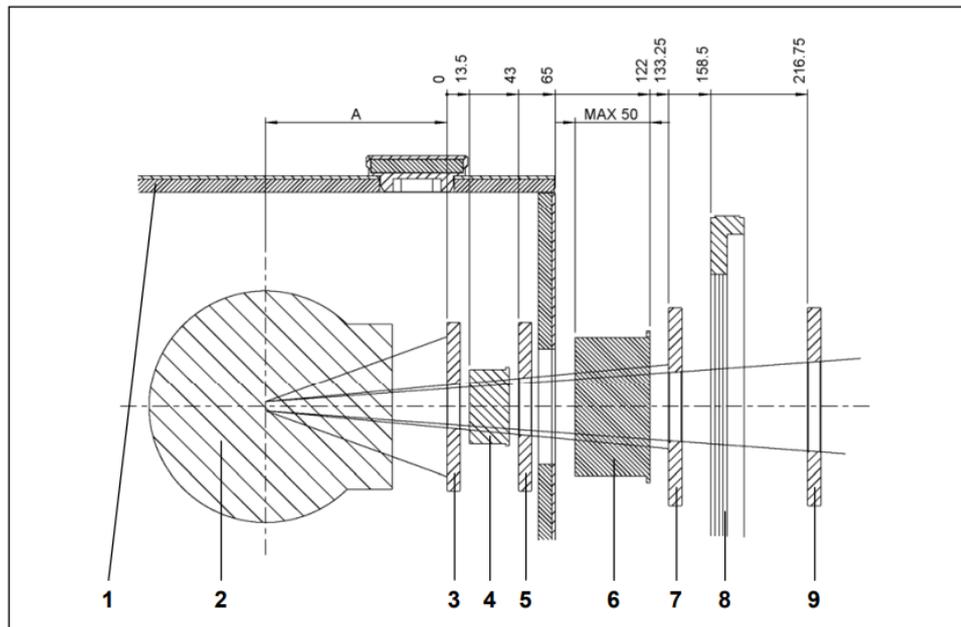
Sendo assim, a possibilidade de uso de filtros de Ag se torna necessário, de modo que se aplique um sistema que permita a caracterização dos feixes. E isso é o que se pretende realizar nesse prosseguimento: por tal interesse em possibilitar maior variabilidade nas calibrações, o LCI busca adaptar e atualizar os arranjos para poder calibrar os medidores nas diversas situações de uso em rotina.

3.6. Automação do Sistema de Calibração

Os requisitos normativos para os sistemas de qualidade (IEC 17025, 2017) estabelecem que sejam adequadamente estimadas incertezas associadas aos ensaios de calibração (INMETRO – ISO GUM, 2008). Assim, se busca melhor avaliação possível de dose ao invés de superestima-la, em prol da segurança; também (BETTI, 2007), agregam-se contribuições provenientes de modelos matemáticos com distribuição finita, utilizando modelos teóricos para cálculo de incertezas, apoiando-se em experimentos de simulação com método Monte Carlo (STEMPNIAK, *et al*, 2005).

Além das simulações, outra forma de se facilitar a ampliação de medições consecutivas, sem penalizar o tempo de execução dos procedimentos, é através da automação do sistema. Por um lado, hoje, o sistema de calibração do LCI conta como programas, a citar *LABVIEW®* e o programa da roda de filtro *BenchControl®* (Fig. 4), da empresa alemã *PTW®* (2008), que facilitam a estruturação e visualização da escolha do filtro utilizado junto à filtração adicional. Uma roda de filtros automatizada se trata de um sistema de posicionamento e seleção de filtros, feitos automaticamente através da seleção da qualidade de feixe selecionada pelo operador. Ainda assim, na estrutura do sistema atual do laboratório, se carece de um sistema que seja possível implementar maior quantidade de filtros ou mesmo que se tenha maior segurança na colocação do filtro a ser utilizado como filtração adicional.

Figura 4 - Diagrama Esquemático, com representação dos sistemas de calibração (dimensões em mm, dimensão A dependendo do tubo de raios X).



Fonte: *PTW*, 2008.

Na Fig. 4, os índices indicam: (1) Envoltório (8 mm PbSb4 + 2 mm Al), (2) no equipamento industrial de radiação X, marca Agfa NDT Pantak Seifert GmbH modelo ISOVOLT HS com tubo gerador modelo 160 M2/0.4-3.0 (gerador de raios X industrial monopolar de potencial constante), (3) Diafragma 1 (8 mm PbSb4), (4) Obturador do

equipamento de raios-X (24 mm, PbSb₄), (5) Diafragma 2 (8 mm PbSb₄) – sendo os diafragmas utilizados para ajuste do campo de referência), (6) Filtro, na roda de filtros PTW® (2008), (7) Diafragma 3 (8 mm PbSb₄). As calibrações e irradiações são realizadas em função da câmara de ionização de transmissão – monitora (8), marca PTW modelo 34014 acopladas ao eletrômetro Keithley, modelo 6517A (SILVA JUNIOR, 2011) e ao (9) Diafragma 4 (8 mm PbSb₄).

As rotinas desenvolvidas para a roda de filtros automatizada PTW® (2008), são empregadas com o programa da roda de filtros, o BenchControl®, e são implementadas para as qualidades de radioproteção (BESSA, 2007) (N-60, N-80, N-100 e N-150), de mamografia (CORREA, 2010) (RQR-M2, RQR-M4 e RQA-M2, RQA-M4), de radiodiagnóstico convencional, diretas e atenuadas (BESSA, 2007) (RQR-3, RQR-5, RQR-8, RQR-10 e RQA-3, RQA-5, RQA-8 e RQA-10) e de tomografia computadorizada (DIAS, 2010) (RQT-8, RQT-9 e RQT-10).

Em cada uma dessas rotinas, são utilizados para as calibrações, além das câmaras monitoras: o sistema de dosimetria de referência Radcal, com 3 câmaras de ionização (RADCAL, 2016), modelos RC6M (câmara de ionização de placas paralelas, não-selada, empregada para baixas energias, de 10 a 40keV); RC3CT (câmara de ionização cilíndrica, não-selada, tipo lápis, empregada especificamente para tomografia computadorizada) e RC6 (câmara de ionização cilíndrica, não-selada, empregada para propósitos de radiodiagnóstico) e a câmara de referência da PTW modelo W32002 acopladas ao eletrômetro Keithley, modelo 65 (SILVA JUNIOR, 2011); também, um barômetro digital de precisão da marca Druck modelo DPI 142 e uma unidade leitora de temperatura marca Hart Scientific modelo 1529-R Chub E-4 (SILVA JUNIOR, 2011), empregadas para os fatores de correção de pressão e temperatura, respectivamente.

Na roda de filtros (Fig. 4), além dos filtros especificados na norma ISO-4037 (2015), há a possibilidade de se colocar filtros de outros materiais especialmente de números atômicos elevados, como exemplo dos filtros de prata (Ag), cobre (Cu) e mesmo de Alumínio (Al), que são utilizados nesse projeto, no sistema do porta-filtro para filtração adicional, como teste para o sistema automatizado de escolha de filtro.

3.7. Prototipagem 3D

O uso da prototipagem 3D permite a criação de acessórios e blocos no próprio local da realização da automação, diminuindo custos e horas de trabalho e reduzindo horas de fabricação e de criação; permite a criação de soluções adequadas e adaptadas a cada projeto pensando nas necessidades locais (MACDONALD, *et al*, 2014), com maior variabilidade e otimização no desenvolvimento do projeto.

A prototipagem emprega a técnica de impressão FFF (fabricação de filamento fundido), em que a impressora movimenta um cabeçote aquecido que vai depositando camadas de filamento fundido de PLA (ácido polilático), de 1,75mm, formando objetos complexos, em camadas sucessivas.

Para então ter a impressão das peças, anteriormente, desenha-se o modelo utilizando um software CAD (como o OpenSCad), no qual o modelador ou projetista se torna capaz de desenvolver um modelo 3D virtual do produto, auxiliando inclusive no processo da impressão 3D. Após, se exporta em formato específico .STL, que pode ser lido por softwares (como o *IdeaMaker*®) que convertem o modelo .STL para a impressora num arquivo de coordenadas (.GCODE), em que se instrui a ordem de posição e demais parâmetros para a impressão, como preenchimento, altura do cabeçote de impressão e possibilidade de colocação de suportes, de modo a otimizar o tempo de impressão e precisão da peça.

A impressora, então, movimenta o cabeçote aquecido que deposita camadas de filamento fino, especialmente produzido para esse fim, formando objetos complexos em 3D. Essa impressora parte do aquecimento de filamentos de material plástico como o PLA (Ácido Polilático, feito de material orgânico) e o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno, com origem no petróleo), ambos termoplásticos, até chegar num estado semissólido e a posterior saída através do bico extrusor. Essa extrusão forma camadas a partir da movimentação da impressora nos eixos X, Y e Z, a qual reconstrói o desenho criado previamente no software de modelagem computacional, em programas do tipo CAD (3D FILA, 2020).

A prototipagem em 3D, no presente trabalho tem como objetivo ampliar a capacidade da roda de filtros com a inclusão de um sistema de gavetas feitas na impressora Raise3D® (RAISE 3D, 2020), para receber um novo filtro que poderá ser utilizado sozinho ou como uma capacidade de filtração adicional do feixe.

3.8. Sistema de controle baseado em softwares livres: Arduino e Processing

Também foi necessária a criação de um sistema de comunicação automatizado para se definir qual dos filtros é colocado no sistema porta-filtros criado. Para tanto, se escolheu uma linguagem livre para a programação do sistema de controle do estado do sistema, o qual retorna a informação de qual porta filtro está na gaveta, incluindo se não há filtro colocado.

Com a IDE (em inglês, *Integrated Development Environment*, ou seja, o ambiente de desenvolvimento integrado, em que se programa), criada no software Arduino, se configura o sistema de reconhecimento dos filtros acionados com base nas referências descritas no programa modelado.

Por sua vez essas informações são disponibilizadas na saída do programa, utilizando uma das portas da comunicação serial, sendo coletada pela rotina da interface do ambiente de desenvolvimento no Processing, que apresenta uma linguagem de programação própria, com ambiente da IDE específica para a execução do seu código. A IDE do software Processing apresenta versões disponíveis para Windows, Linux e Mac OS X (REAS E FRY, 2007). O programa Processing se baseia em sua programação em um dialeto de uma linguagem de programação Java; a sintaxe da linguagem é quase idêntica, mas o Processing adiciona recursos personalizados relacionados com gráficos e interação (REAS E FRY, 2007).

A linguagem segue alguns princípios para seu funcionamento. São necessários dois métodos: o *void setup()*, utilizado na execução do script, e o *void draw()*, semelhante ao *void loop()* da linguagem híbrida C#/C++ do software Arduino, e que será responsável pela repetição do código. Assim, compreender a lógica da rotina do Processing pode facilitar a compreensão de outras linguagens de programação, como Java, Android, Arduino, C e C++.

Por sua possibilidade de comunicação com o programa Arduino, a linguagem permite a entrada e a saída de dados. Para a entrada de dados, o Processing

disponibiliza 22 funções e nove variáveis do sistema (REAS e FRY, 2007), divididas em cinco categorias: mouse, teclado, arquivos, web e data e hora. A entrada de dados na linguagem pode fazer a leitura de bytes utilizando o software Arduino, através da comunicação serial ou por outras portas acopladas à programação.

Para a saída de dados, como nas funções de entrada, o software Processing pode trabalhar com instruções de baixo nível. A saída de dados é dividida em três categorias: área de texto, imagem e arquivos. Assim, com base na entrada coletada, se pode criar, na IDE do software Processing, uma rotina para geração de programa que transmite um arquivo de coleta dos dados da porta da comunicação serial, como se faz nesse projeto.

4. Desenvolvimento do Projeto

Neste projeto se objetiva tanto adequar a utilização das rotinas às atuais necessidades do laboratório, quanto aperfeiçoar o uso das mesmas e simplificar o entendimento correto destas, aumentando a usabilidade, facilitando o processo de calibração, continuando trabalhos anteriormente realizados nas instalações do LCI (BETTI, 2007; RODRIGUES, 2013).

Para tanto é necessário se ter a possibilidade de medições consecutivas ampliadas, sem penalizar o tempo de execução dos procedimentos. Estas condições são garantidas através da automação do sistema.

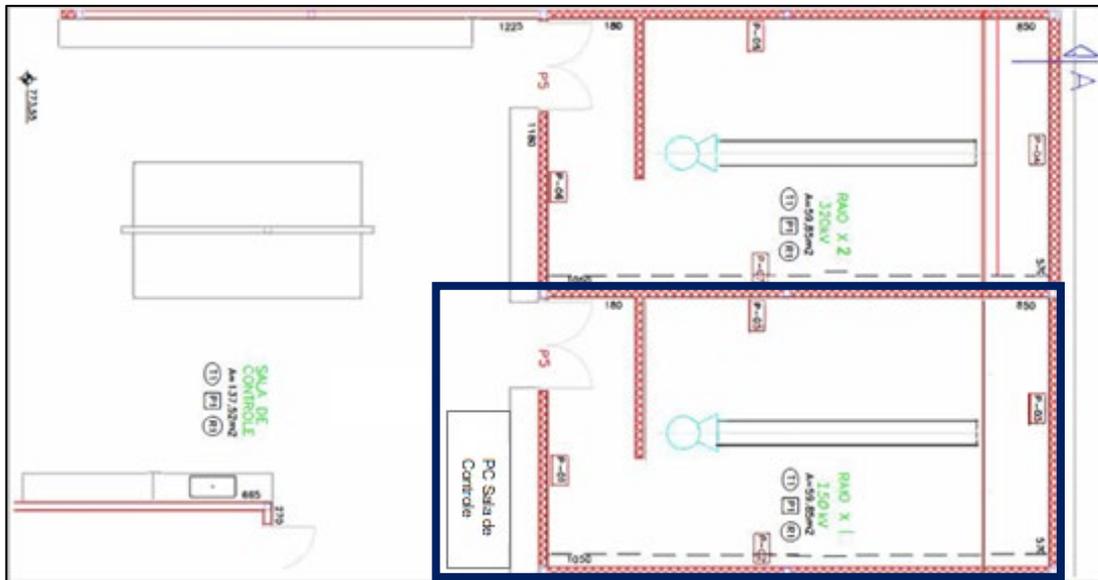
Por um lado, hoje, o sistema de calibração do LCI conta com programas, como LABVIEW® e o programa da roda de filtro, *BenchControl*® (PTW®), que facilitam a estruturação e visualização da escolha do filtro utilizado junto à filtração adicional.

Ainda assim, na estrutura do sistema atual do laboratório, se carece de um sistema que seja possível implantar maior quantidade de filtros ou mesmo que se tenha maior segurança na colocação do filtro a ser utilizado como filtração adicional. Isso devido ao pouco espaço entre a saída da roda de filtro e o suporte da câmara monitora. Sendo assim, se torna necessário um sistema de colocação de filtros para caracterização das qualidades de feixes de raios-X, ajustado ao espaço disponível, e com possibilidade de reconhecimento pelo sistema de seleção atual de filtros da roda de filtros.

Assim, com base nesse propósito de se poder dar versatilidade ao sistema atual de calibração, foi desenvolvido o protótipo do porta-filtros, na impressora 3D, imprimindo cada parte do modelo elaborado na mesma, otimizando os procedimentos.

Na figura 5, é apresentado uma planta baixa do sistema atual, constando sistema do equipamento de Raios-X, com a roda de filtro; na figura 6, também, o sistema porta-filtro, na parte inferior, tanto quanto do *Processing* (descrito no capítulo 3.9, anteriormente), para geração dos arquivos de registro e de determinação do filtro a partir dos dados coletados da comunicação serial.

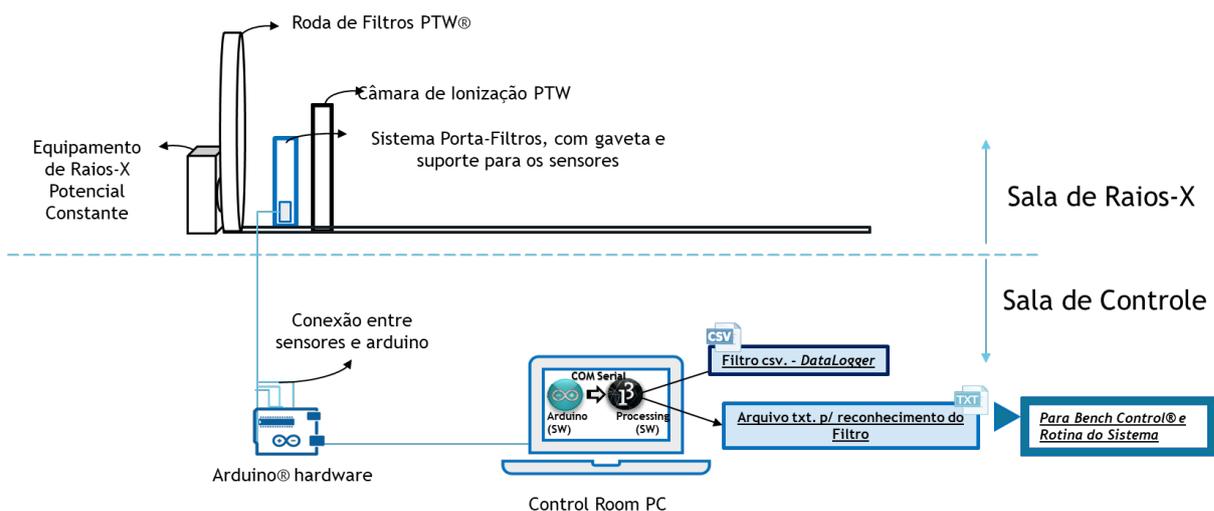
Figura 5 - Vista parcial da planta baixa do laboratório. No detalhe em azul, sala de raios-X do LCI, onde a roda de filtros da PTW está instalada.



Fonte: LCI - IPEN, 2009.

Na figura 6, o sistema porta-filtro conta com comunicação dos sensores nele colocados, à placa microcontroladora *Arduino*, a fim de controlar a informação de qual dos possíveis filtros foi de fato colocado no sistema e desta forma, se comunicar, por meio do *software Processing*, ao *software* da roda de filtro, o que permite maior variabilidade na calibração.

Figura 6 - Esquema do sistema completo, incluindo indicação da estrutura para geração do arquivo utilizado junto à rotina da roda de filtros existente.



Fonte: Autor, 2021.

Ainda, na figura 6, está esquematizada a abordagem de configuração do arquivo texto (.txt), de reconhecimento do filtro para adequação à rotina da programação da roda de filtro.

Além da disposição do porta-filtro e suporte, também foi pensada a colocação dos sensores junto ao suporte e do circuito associado, bem como a passagem dos cabos UTP, estendendo o cabo na distância de 10m, existente entre o local de colocação do circuito e sensores até a sala de controle.

4.1. Roda de Filtros: Porta-Filtros e Prototipagem 3D

Para a análise da estrutura da roda de filtros, foi estudada também a disposição no sistema de calibração, analisando os requisitos para elaboração do porta-filtro. O sistema de porta-filtros e gavetas foi impresso na impressora Raise3D®.

A prototipagem dos modelos foi feita em diversos ciclos, com ajustes nos desenhos e nos parâmetros de impressão, com objetivo de otimizar o resultado final e diminuir a possibilidade de deformação, de forma a manter a parametrização.

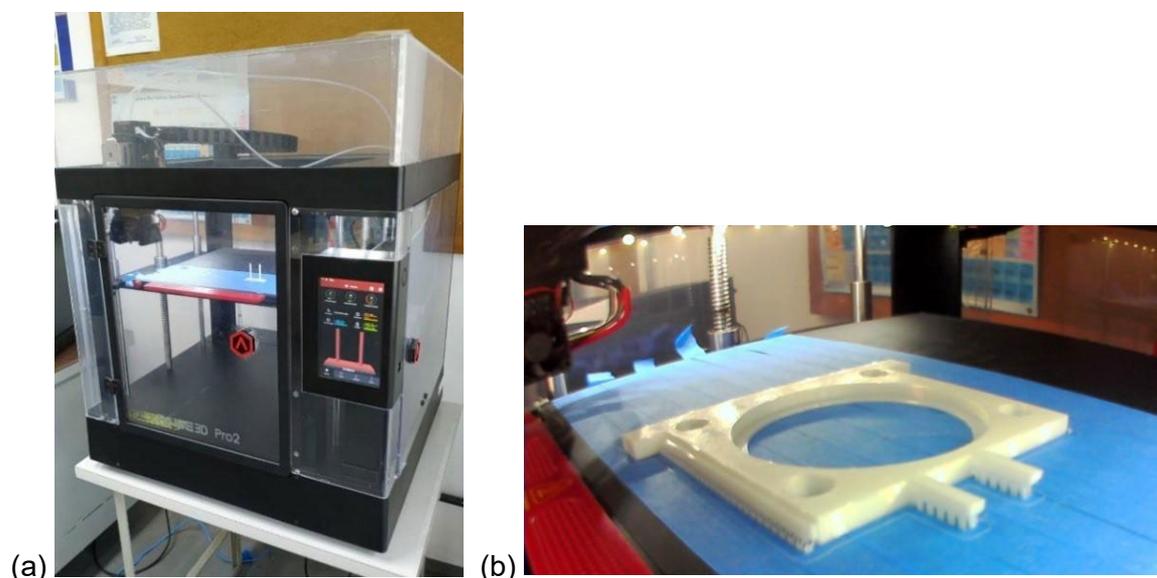
O desenvolvimento do modelo do sistema porta-filtros se adequa a seleção de filtro com a devida adaptação das rotinas do LabVIEW® para comunicação com o programa de seleção da qualidade do feixe de radiação, o *BenchControl*®. Logo, o sistema porta-filtro é composto por uma gaveta, onde os filtros são colocados, e um suporte, fixado no sistema de radiação, com sensores colocados em encaixes.

Neste sistema, cada gaveta ao ser encaixada no suporte aciona uma combinação específica de sensores, permitindo a identificação do filtro pela rotina da roda de filtro. Tal porta-filtros, desenvolvido em software Fusion360 (Autodesk®), e impresso em 3D, para disponibilizar os sensores, a fim de se comunicar com os demais sistemas sobre a colocação de um filtro e não de outro.

Dessa forma, o processo de calibração, com a filtragem adicional a ser colocada no protótipo porta-filtros é otimizado, se visualizando possíveis falhas do protótipo criado, com rápida correção caso seja necessária a adequação do produto físico criado na impressora 3D (MACDONALD, *et al*, 2014), com possível adequação para encaixe do sensor a ser utilizado (SCHNEIDERREIT, *et al*, 2017).

Para que o sistema porta-filtro fosse desenvolvido, foi necessária a elaboração de seu *design* no programa OpenSCad, para então ser impresso na impressora 3D. Para o atual projeto, o Centro de Metrologia das Radiações (CMR), conta com uma impressora 3D de grandes volumes, *Raise3D PRO2* (Raise3D®) (2020). Nesta impressora 3D são utilizados polímeros termoplásticos, como PLA (Ácido Polilático) e ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), passíveis de serem fundidos a temperaturas entre 195 e 220°C e entre 220 e 240°C, respectivamente, sendo depositados pela impressora 3D. Também, permite a impressão de objetos com até 30x30x30 cm de volume utilizando até dois materiais simultaneamente, utilizando a técnica de Fabricação com Filamento Fundido (FFF), empregada na impressão do protótipo, é mostrada na Figura 7.

Figura 7 - Imagem da impressora Raise3D Pro2® (a) que foi utilizada para impressão do suporte e dos conjuntos de gavetas com encaixes específicos para cada combinação de filtro (b), imprimindo um dos modelos.



Fonte: Autor, 2020.

A prototipagem dos modelos de gaveta e do suporte foi feita se empregando a criação de um desenho com configuração de preenchimento e de estrutura sólidas que diminuam a possibilidade de deformação, bem como que permita a colocação do filtro em um sistema de gaveta específico para o filtro, se adequando ao encaixe, acoplado aos sensores específicos e programação associada, para escolha dentre combinações existentes.

O desenho do conjunto suporte e gaveta foi projetado para que, ao entrar a gaveta no suporte, ela tenha encaixe adequado tanto na parte lateral, quanto as aletas inferiores ao entrar no espaço inferior do suporte fecham o contato com os sensores respectivos, para que ao se ter o acionamento de uma sequência com determinada combinação dos sensores, se pode detectar a informação de qual filtro foi colocado.

4.2.1. Porta-Filtros e comunicação com o circuito (Arduino e Processing)

O circuito para adequação do sistema porta-filtro na roda de filtro foi elaborado com a devida comunicação ao sistema, via rotina criada na interface de ambiente de desenvolvimento (IDE) do Arduino, com comunicação à rotina do ambiente de desenvolvimento do software *Processing*, de código aberto.

Devido às restrições de acesso ao laboratório, por reorganizações de cronograma interno, não foi possível o desenvolvimento do projeto diretamente no sistema de aquisição de dados do *Labview*®. Ou seja, como o *Labview*® é um software licenciado, não era possível a instalação externa ao laboratório. Assim, foi utilizado o ambiente do *Processing* para geração de arquivos .txt, os quais são utilizados junto à rotina da roda de filtro, sendo possíveis de serem lidos pelo programa *BenchControl*®. Os testes realizados foram:

- I. **Teste de fixação dos sensores:** nos espaços dos encaixes do suporte.
- II. **Teste da colocação do filtro:** para saber se a informação de alteração do valor inicial da chave fim de curso está sendo captada e transmitida ao Arduino.
- III. **Teste da comunicação do sistema:** verificando se as informações estão certas, direto com as informações coletadas da porta serial (COM)
- IV. **Teste da comunicação entre a saída serial:** e programa *Processing*, com confirmação dos arquivos gerados - se foram corretos e com as informações de acordo com a programação.
- V. **Teste de permanência do sinal:** testado se o sinal permanecia a longa distância considerando uma estimativa de tamanho de cabo, para simular a distância entre o local em que porta-filtro se localiza e a sala de controle, para considerar se o sinal permanecia.

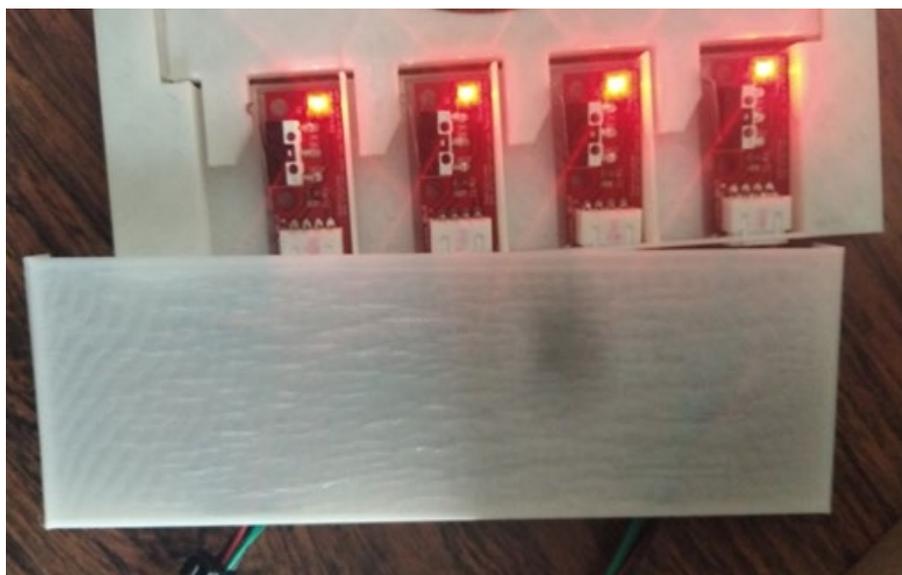
- VI. **Teste de comissionamento** da programação para identificação dos arquivos gerados no Processing e adequação ao arquivo da rotina da roda de filtro da *BenchControl*®, realizados em ambiente remoto.

Este teste final dependia de atualização dos sistemas na sala de operação, porém foi conduzido teste de comissionamento em PC do IPEN para verificação da comunicação entre programações (Arduino, Processing e rotina da *BenchControl*®) e se estabelecendo qual o filtro colocado.

4.2. Lógica da Programação do Arduino e Processing

Com os testes implementados, se chegou à versão final do sistema, conforme apresentado na figura 8, em que se evidencia os sensores acionados pelo contato com as aletas da gaveta, e também mostrado na figura 9, em que mostra a lógica da rotina utilizada para implementação dos *softwares* Arduino e Processing

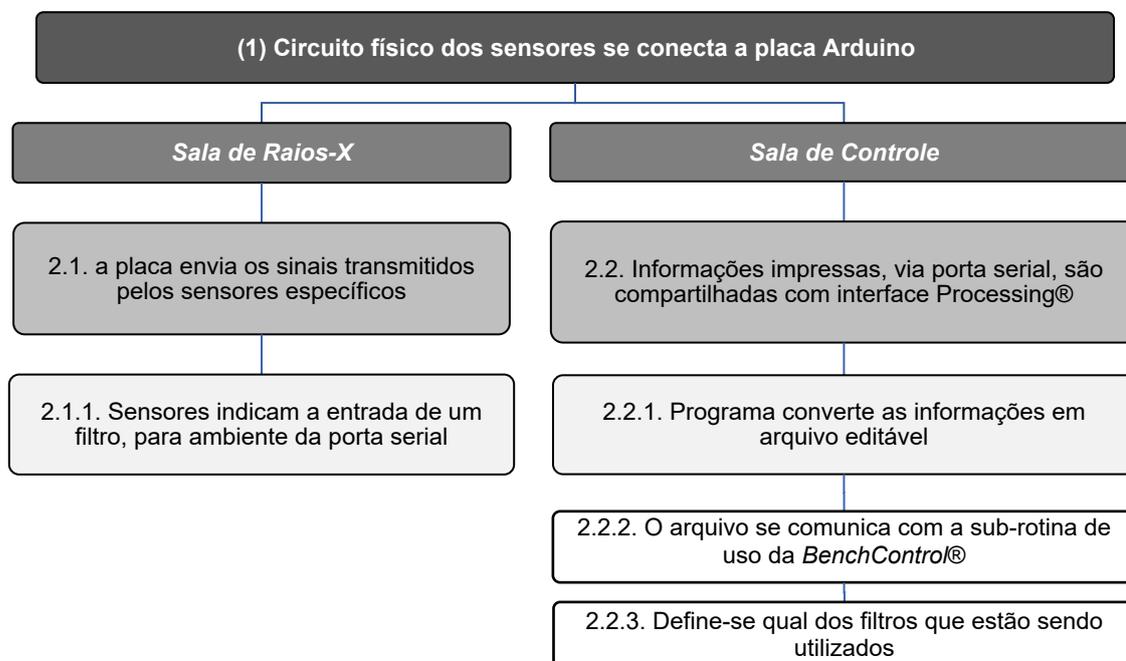
Figura 8 - Imagem do circuito dos sensores acionados pelas aletas fazendo contato.



Fonte: Autor, 2021.

Assim o circuito físico dos sensores, mostrados na Figura 8, se conecta à placa Arduino (na sala de raios-X), que recebe as informações dos estados do sensor se acionado (LOW) – que acende os LEDs do sensor, ou não (HIGH).

Figura 9 - Lógica da rotina utilizada para a implementação Arduino e Processing, gerando o arquivo .txt usado para a programação da roda de filtro.



Fonte: Autor, 2021.

Assim, como descrito na Fig. 9, se envia os sinais transmitidos pelos sensores específicos (2.1), que vão indicar a entrada de um filtro, para ambiente da porta serial (2.1.1). Estes sensores são chaves fim de curso, com dimensões 39,6mm x 16,3mm x 7,4mm, com 11mm de comprimento de haste, inseridas num módulo com resistores e terminais, de forma a acionar um LED vermelho quando do contato estabelecido. Nesta etapa (2.1.1), conforme cada combinação definida, se sabe qual sensor se encontra presente no sistema.

Na sala de controle, esta informação é enviada à porta Serial (COM), e cada informação é compartilhada com a interface no programa Processing® (2.2). Também, a informação de se o sistema está ligado, de forma a converter essas informações em arquivo editável (2.2.1). Ao final, se cria um arquivo .txt de registro do sistema e de definição de qual filtro se encontra.

Este arquivo criado é acionado quando a sub-rotina de uso da *BenchControl*® (2.2.2) da roda de filtro coleta a informação de qual filtro se encontra sendo utilizado para a calibração do determinado RQR ou RQA (2.2.3). O arquivo editável é adaptado às configurações do arquivo da rotina do programa da roda de filtros, se adequando à utilização pelo técnico no local, com essa lógica resumida na figura 9.

Assim, a rotina da roda de filtro seleciona qual a rotina de qualidade de radiação a ser utilizada e a informação de qual filtro se refere. Ainda, o Processing registra a data, hora e informação de qual filtro se encontra colocado (rotina *DataLogger*), para fins de controle dos filtros utilizados.

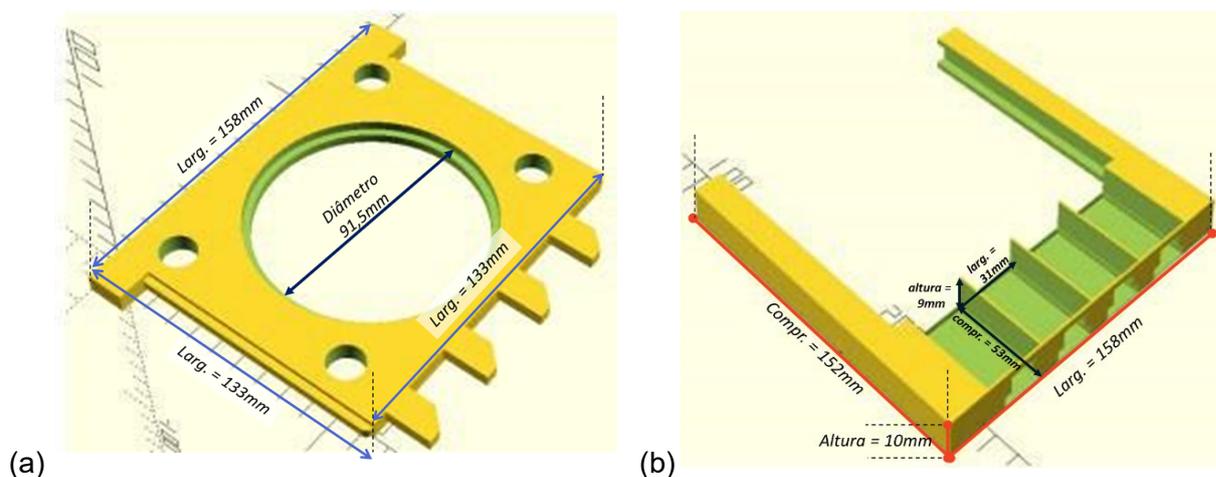
5. Resultados

5.1. Fase de modelagem das peças usando OpenSCad

Para a modelagem das peças que foram impressas, foi utilizado o programa OpenSCad, de código aberto, para confecção tanto do suporte para encaixe da gaveta quanto da confecção da própria gaveta de cada filtro, com as 16 combinações possíveis, uma para cada filtro.

Estabelecidas as condições da prototipagem, e desenho das peças, o suporte foi projetado para acomodar a estrutura de cada gaveta. Suas dimensões são 152 mm (comprimento) x 158 mm (largura) x 10 mm (altura), sendo que na parte inferior constam 4 (quatro) espaços para colocação de cada um dos sensores chave fim de curso; estes espaços apresentam as seguintes dimensões: 53 mm (comprimento) x 31 mm (largura) x 9 mm (altura). Ainda, este suporte conta com aberturas inferiores para o encaixe correto da reentrância inferior da gaveta, conforme mostra a figura 10.

Figura 10 - Imagens do arquivo em OpenSCad, tanto do suporte (a), quanto do porta-filtros (b), referentes aos modelos, ambos desenhados utilizando o programa OpenSCad e gravados o arquivo .stl para impressão na Raise3D®, utilizando o software IdeaMaker®.



Fonte: Autor, 2022.

No suporte (Figura 10a), é inserida a gaveta que possui encaixe adequado tanto lateralmente quanto na parte inferior, estabelecendo contato com as chaves fim de curso, na respectiva combinação que seja referente ao filtro estipulado. Além do suporte, na figura 10b, está o desenho (no OpenSCad), da gaveta para o filtro de Al.

O orifício central para colocação do filtro tem diâmetro de 91,5 mm, já considerando reentrância para acomodação do filtro, para evitar quedas. O encaixe lateral da peça, que se insere na parte lateral do suporte, tem as seguintes dimensões: 99 mm de comprimento x 4 mm de largura x 4 mm de altura.

5.2. Configuração dos ajustes das peças usando IdeaMaker®

Para definição dos parâmetros de impressão, foi utilizado o software *IdeaMaker®*, o qual possibilita a definição dos valores dos parâmetros principais e escolha do material para prototipagem 3D.

Assim, a partir do desenho criado no OpenSCad, se exporta em formato *.stl*, o qual é possível de ser lido pelo software *IdeaMaker®*, e neste programa, são controlados os parâmetros e ajustes (colocação ou não de suporte, para garantir precisão à impressão de partes pequenas da peça, e que estejam mais distantes da referência da mesa). Para tanto, estes parâmetros são selecionados de forma a se ter uma peça impressa em PLA que seja o mais fiel à proposta apresentada, para encaixe junto aos sensores. Portanto, os principais parâmetros para a impressão dos protótipos estão colocados na tabela 3.

Tabela 3 - Principais parâmetros para as impressões dos protótipos, em PLA, utilizando o *ideaMaker®*.

Parâmetros	Valores
Nível de preenchimento (<i>infill density</i>)	10 a 100%, dependendo da peça
Altura de camada (<i>layer heigh</i>)	0,150 mm
Sobreposição de camada (<i>shell overlap</i>)	50%
Largura de extrusão (<i>extrusion width</i>)	0,40 mm
Velocidade de retração (<i>retraction speed</i>)	60 mm/s
Velocidade de preenchimento (<i>infill speed</i>)	60 mm/s
Temperatura da mesa	60 °C
Temperatura do bico extrusor	205 °C

Fonte: Autor, 2021.

Cabe ressaltar que os valores dos parâmetros descritos na tabela 3 são adequados para a configuração de calibração da mesa da impressora *Raise3D PRO2* (*Raise3D®*), do CMR, para devida impressão com precisão nos modelos desenhados conforme as necessidades do modelo criado, considerando dimensões da peça, ajustados ao uso para configuração no software *IdeaMaker®*.

Essas configurações foram ajustadas para impressão sem *skirt* (sem “saia”, o contorno envolvendo a peça), sendo feita assim, de maneira a evitar formação de rebarba ao início da impressão, visando a diminuição tanto de problemas de precisão na primeira camada, quanto do tempo dos testes realizados. Esta opção foi adequada para a impressão com PLA, incluindo também a prévia calibração nos eixos da mesa, melhorando a precisão da impressão.

5.3. Prototipagem das Peças

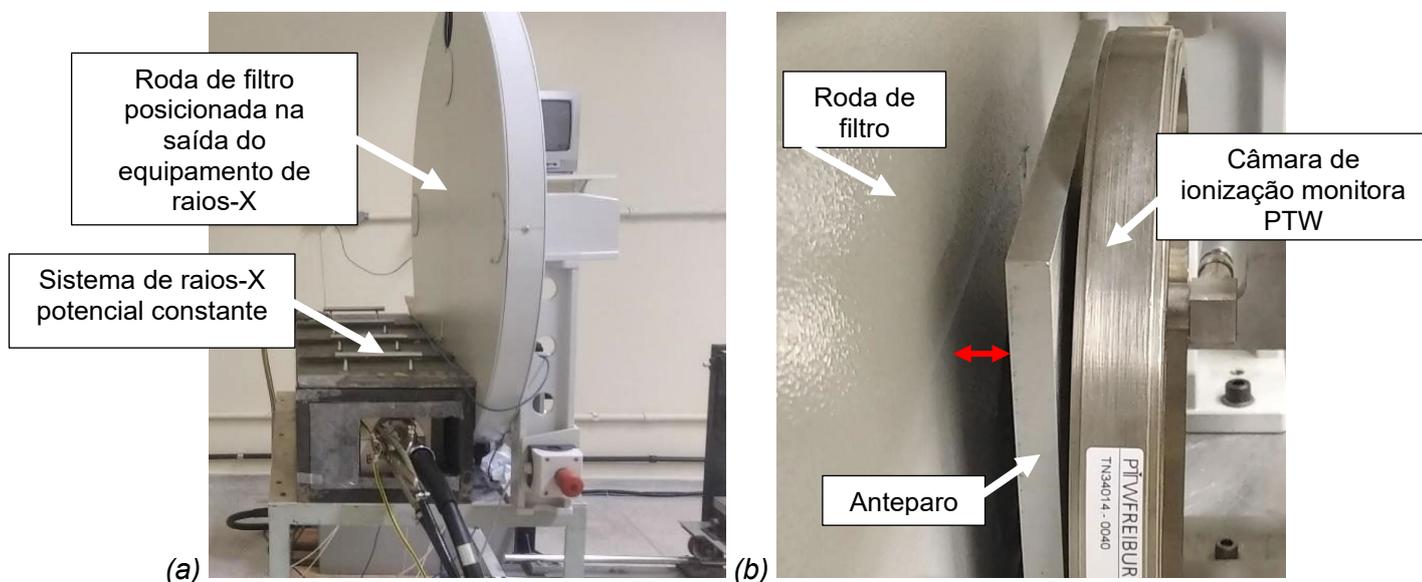
Considerando os ajustes realizados utilizando o programa *IdeaMaker*®, definido na tabela 3, anteriormente colocada, e com base nos modelos desenhados no programa *OpenSCad*, cada modelo de gaveta e suporte, que definem o conjunto porta-filtro, pôde então ser impresso. Para tanto, cada um dos modelos do conjunto foi impresso utilizando filamento de PLA (ácido polilático), diâmetro 1,75 mm, temperatura de impressão 190 – 220 °C, cor transparente, marca UP3D.

O protótipo foi elaborado em uma série de ciclos de prototipagem para aprimoramento do projeto inicial, pensando nos requisitos existentes da roda de filtro, tanto da saída da roda de filtro, quanto do espaço disponível e forma de colocação do conjunto suporte e gavetas, se estabelecendo uma dimensão adequada para colocação no espaço existente, como visto na figura 11.

Além disso, durante os ciclos de prototipagem foram testados vários exemplos de modelos de gaveta para diferentes formas de acionamento dos sensores para posterior leitura dos dados, até que se chegou a forma atual, elaborada para acionamento dos sensores, através de uma aleta que toca a chave do sensor. Desta forma, a gaveta, através do encaixe de sua aleta, aciona o conjunto de sensores, se identificando qual filtro que foi colocado.

O conjunto do sistema de porta-filtro é colocado junto à saída da roda de filtro (Figura 11a) e anteriormente à câmara de referência (Figura 11b). O modelo foi desenvolvido em duas partes: suporte da gaveta e gaveta do filtro; este, com aletas na parte inferior, situadas em posições diferentes conforme os filtros a serem utilizados (uma gaveta para cada filtro, conforme suas espessuras).

Figura 11 - (a) Imagem da Roda de filtro com o equipamento de Raios-X, colocado anteriormente à roda; (b) em detalhe, local da colocação do sistema suporte-porta-filtro, a ser inserido junto à saída da roda de filtro (apontado com a seta vermelha) antes do colimador e anteparo da câmara de ionização.



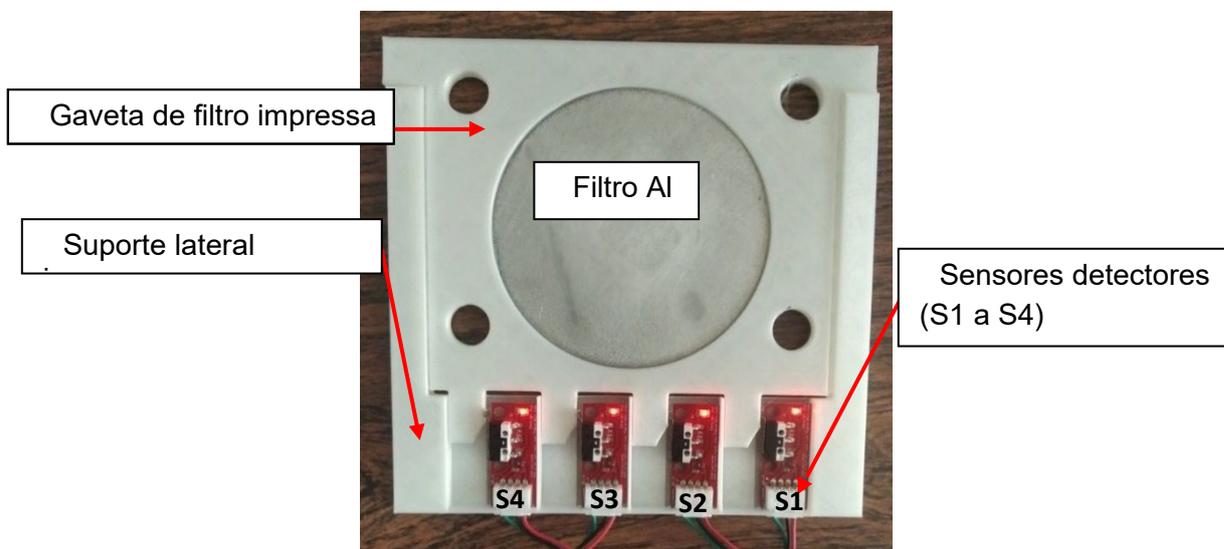
Fonte: Autor, 2020.

5.4. Sistema de acionamento e Sensores

Do ponto de vista da programação, para o padrão adotado, considerou-se o sensor S1 da direita para esquerda e assim sucessivamente (Figura 9), para que cada sensor acionado sirva para indicar qual filtro foi colocado, seguindo lógica binária (se o sensor é acionado, na programação é indicado como estado LOW, 0; se não acionado, o sensor é indicado como HIGH, 1).

Como exemplo, no caso da Figura 9, com as 4 (quatro) aletas inferiores acionando os sensores, significa que é o filtro de alumínio, conforme adotado na referência colocada na programação do Arduino. A orientação dos sensores que foi estipulada se situa do sensor 1 (S1) ao 4 (S4), da direita para a esquerda. A face voltada para trás dos sensores será a face que estará virada para a roda de filtro.

Figura 12 - exemplo de um dos conjuntos com suporte em U e com uma das 16 combinações de gavetas com filtro (para esse caso, AI, a gaveta com os quatro encaixes). Aqui, o encaixe inferior da gaveta fecha o contato do sensor chave fim de curso (demonstrado pelo LED vermelho ligado), repassando a informação à programação no Arduino que os 4 sensores foram acionados (o que significa, aqui, que se trata do filtro AI).



Fonte: Autor, 2021.

Cabe ressaltar que, como colocado no capítulo anterior de Desenvolvimento, de acordo com os testes de continuidade com o cabo UTP, o cabo se mostrou seguro, mantendo sinal durante o percurso, indicando o envio correto dos sinais..

Conforme indicado na figura 12, está a posição de cada sensor que se conectam ao Arduino por meio dos pinos 24, 26, 28 e 30, conforme Tabela 3.

Tabela 4 - Organização dos cabos, cores, pinos com os sensores acionados.

Pino Arduino	Cor correspondente do cabo	Sensor acionado
24	Verde	Sensor 1 (primeiro da direita para esquerda)
26	Azul	Sensor 2 (segundo da direita para esquerda)
28	Amarelo	Sensor 3 (segundo da esquerda para direita)
30	Laranja	Sensor 4 (primeiro da esquerda para direita)

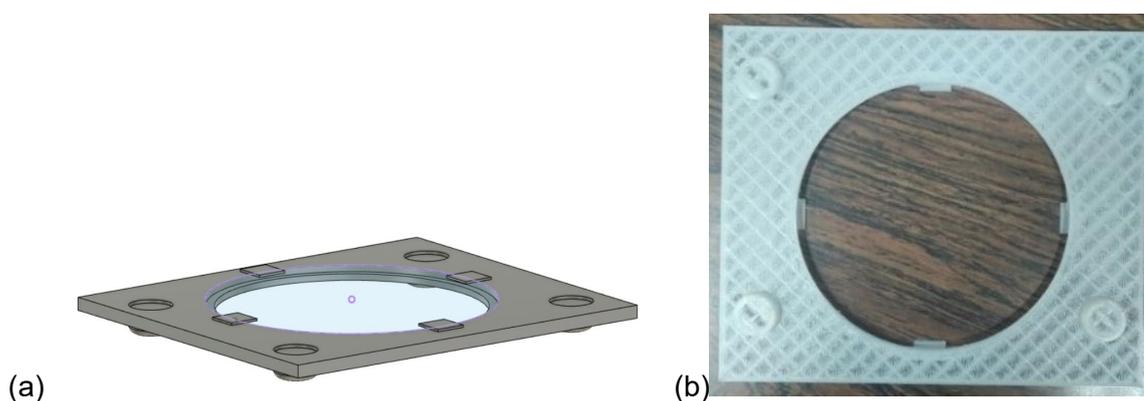
Fonte: Autor, 2021.

O conjunto suporte-gaveta é colocado de forma que fique acoplado à saída da roda de filtros, como foi mostrado na disposição da figura 11b, com a ajuda de um bloco que foi impresso também em PLA na impressora 3D, para ter o ajuste de altura.

5.5. Gaveta para acomodação de dois filtros

Atendendo às necessidades requisitadas pelo LCI para caracterização de feixes que necessitam da composição de dois filtros, foi criado um sistema para colocação de mais de um filtro (Figura 13), de modo a também não extrapolar o espaço vigente.

Figura 13 - (a) Peça projetada, do bastidor para colocação do segundo filtro, com os encaixes ovalados para encaixe no filtro de referência para a situação do filtro duplo, já com as peças de anteparo para fixação do alvo (projetado no programa Fusion360®) (b) Conjunto impresso com ajustes de 15% de preenchimento, na impressora Raise3D®.

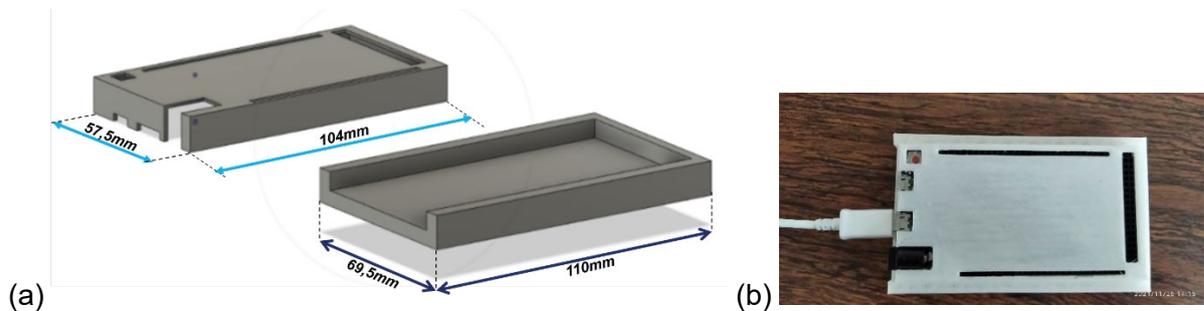


Fonte: Autor, 2021.

Para tanto foi pensada a possibilidade da criação de um bastidor para colocação do segundo filtro requisitado e na gaveta principal o outro filtro. Para tanto, a gaveta que será utilizada, para fins de referência será a que aciona os sensores 2 e 3 (conforme Figura 12), de modo que na programação do sistema, esta gaveta que aciona os sensores centrais seja característica de uso do sistema de dois filtros, a serem definidos.

Além do sistema de bastidores e gaveta para colocação de dois filtros (o filtro duplo), criamos uma estrutura para proteção dos componentes acessórios, especificamente para fixação e proteção da placa microcontroladora *Arduino*, conforme figura 14.

Figura 14 - (a) Peças da proteção à placa microcontroladora Arduino - Suporte superior e base (projetadas no programa Fusion360®), para fixação na sala do laboratório de raios-X. (b) Conjunto impresso com ajustes de 15% de preenchimento, na impressora Raise3D®.



Fonte: Autor, 2021.

5.6. Programação Arduino e Processing

Para melhor entendimento da lógica de cada programação, segue abaixo, um diagrama em blocos das rotinas implementadas tanto para Arduino, para gerar os valores de acionamento dos sensores na saída serial, quanto para o Processing, para ler os dados da saída serial e gerar o arquivo *.txt*, este que será utilizado pela rotina do programa *BenchControl*® da roda de filtro.

Na Fig. 15, o programa *Processing* coleta cada dado inserido na porta COM Serial do *Arduino*, na qual são dispostas as informações dos filtros acionados conforme a combinação dos sensores acionados pela gaveta. Dessa mesma forma a informação coletada pelo *Processing* e disponibilizada no arquivo *dados.txt*, o qual se comunica com a rotina da roda de filtro *BenchControl*®.

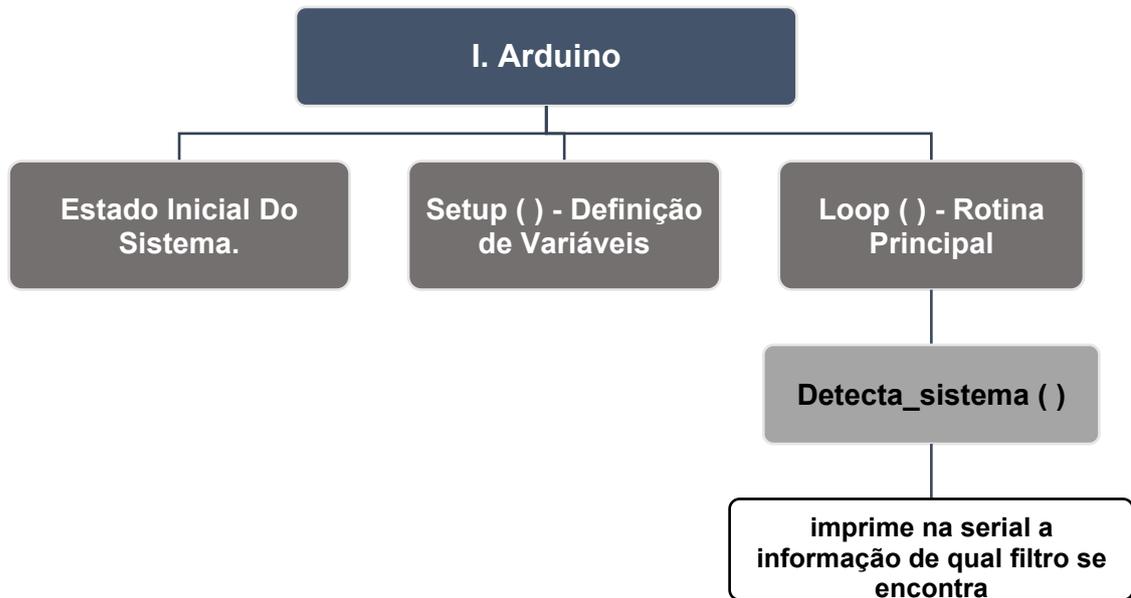
Figura 15 - Diagrama de Blocos da Programação do Arduino e do Processing.



Fonte: Autor, 2022.

Analogamente, na figura 16 é apresentado o diagrama da hierarquia dos blocos de sub-rotinas do Arduino.

Figura 16 - Diagrama da hierarquia dos blocos de sub-rotinas do Arduino.



Fonte: Autor, 2022.

5.6.1. Estado inicial do sistema:

Assim, como mostra a Figura 17, se definindo a ordem dos pinos, também se relaciona o pino que recebe os comandos do botão pela primeira vez acionado que será o interruptor do sistema para que se possa começar a coleta dos dados.

Figura 17 - Descrição das variáveis e atribuições referentes à pinagens. Atribuição de funções que serão ativadas ao longo da programação.

```

int limit1 = 24; //verde - sensor_1
int limit2 = 26; //azul - sensor_2
int limit3 = 28; //amarelo - sensor_3
int limit4 = 30; //laranja - sensor_4
const int buttonPin = 7;
int buttonState;
int lastButtonState = LOW;
boolean ReceberColetaDados;
  
```

Fonte: Autor, 2022.

Este pino receberá os comandos de ligado ou desligado do botão, respectivamente, quando acionado ou desligado. Esta comunicação será feita acionando o comando *buttonPin*, que inicialmente será definido como uma constante de entrada, que deve receber os comandos de estado por meio da função criada *buttonState*. Em ambos os casos, todos serão pinos de entrada (INPUT) já que a ideia é que essa programação leia os dados dos sensores.

5.6.1.1. Rotina Setup(): Definições das variáveis dos pinos como entrada

Para que estes pinos dos sensores possam ser interpretados como acionados, na programação, é definido de início como sendo pinos de entrada (INPUT) e o pino do botão como INPUT_PULLUP, conforme indica a Figura 18.

Figura 18 - Definição dos estados dos pinos, variável booleana e configurações de taxa de transferência, em bits por segundo.

```
void setup() {  
  pinMode(limit1, INPUT);  
  pinMode(limit2, INPUT);  
  pinMode(limit3, INPUT);  
  pinMode(limit4, INPUT);  
  pinMode(buttonPin, INPUT_PULLUP);  
  Serial.begin(9600);  
  ReceberColetaDados = false;  
}
```

Fonte: Autor, 2022.

Os pinos dos sensores recebem a informação do sensor acionado (HIGH) ou não acionado (LOW). No caso do pino *buttonPin*, esta função recebe o comando INPUT_PULLUP, para que, ao ser acionado uma vez, aciona um resistor de 20kΩ, para que se mantenha o sinal como HIGH, por padrão, permitindo que ao acionar o botão o sistema continue mantendo a coleta dos sinais conforme os sensores sejam acionados pelas aletas respectivas de cada gaveta

Ainda, na inicialização, a variável booleana *ReceberColetaDados* definida no início junto às variáveis, aqui no *setup()* é colocada como falsa, para que ao entrar no *loop* principal passe a ser verdadeira e se receba os comandos dos sensores.

5.6.1.2. Rotina Loop()

Na função *loop()*, indicada na Figura 19, se checa o estado do sistema a cada instante e aqui definimos que na serial disponível será lida as informações que estiverem ali. Caso o botão seja acionado uma vez, executa o comando *buttonState*, o qual lê as informações do pino do botão (*buttonPin*), o que aciona a função *detecta_sistema()*, esta que irá ler os sinais dos sensores e definir qual filtro se encontra presente.

Figura 19 - Início da função principal, *loop()*, em que são definidos os comandos principais a serem executados para registro das leituras e coleta dos dados.

```
void loop() {
  Serial.read();
  Serial.available();
  buttonState = digitalRead(buttonPin);
  detecta_sistema();
  delay(200);
  if (lastButtonState == LOW && buttonState == HIGH) {
    ReceberColetaDados = false;
    delay(200);
  }
  lastButtonState = buttonState;
}
```

Fonte: Autor, 2022.

Ainda na função *loop()*, temos que com o pino acionado, caso tenha sido acionado anteriormente (*lastButtonState() == LOW*) e novamente (*buttonState() == HIGH*), será interpretado como a função *ReceberColetaDados* como falsa e assim, não se lê qual sensor se encontra presente. Isso evita que seja registrado algum filtro caso tenha se acionado o sistema por engano.

Em caso contrário, ou seja, em que *lastButtonState = buttonState*, o sistema entra no modo *detecta_sistema()*, com a função *ReceberColetaDados* sendo verdadeira e assim se lendo os dados dos sensores.

5.6.1.2.1. Sub-rotina *detecta_sistema()*

Na sub-rotina *detecta_sistema()*, da Figura 20, se tem o momento de detecção dos filtros. Aqui, se define que a variável booleana *ReceberColetaDados* passa a ser verdadeira e que para até 10 iterações, ou seja, n de 0 a 10, se escreverá qual o filtro que está acionado pela sequência dos sensores estipulada no decorrer da programação.

Figura 20 - A função *detecta_sistema()* é parte da função *loop()* e nela se executam os comandos para que se defina o recebimento na porta serial de qual filtro se está presente.

```
void detecta_sistema() {
  int n;
  ReceberColetaDados = true;
  for (n = 0; n < 10; n++){
    if ((digitalRead(limit1) == 0) && (digitalRead(limit2) == 1) && (digitalRead(limit3) == 1) && (digitalRead(limit4) == 1)) {
      Serial.print(" 1 = Ag sample");
      Serial.println("\n");
      delay (200);
    }
    if ((digitalRead(limit1) == 1) && ((digitalRead(limit2) == 0)) && ((digitalRead(limit3) == 1)) && ((digitalRead(limit4) == 1))) {
      Serial.print(" 2 = Cu 0.2 sample");
      Serial.println("\n");
      delay (100);
    }
    if ((digitalRead(limit1) == 1) && ((digitalRead(limit2) == 1)) && ((digitalRead(limit3) == 0)) && ((digitalRead(limit4) == 1))) {
      Serial.print(" 3 = additional filter 3 ");
      Serial.println("\n");
      delay(100);
    }
    if ((digitalRead(limit1) == 1) && ((digitalRead(limit2) == 1)) && ((digitalRead(limit3) == 1)) && ((digitalRead(limit4) == 0))) {
      Serial.print(" 4 = additional filter 4 ");
      Serial.println("\n");
      delay(100);
    }
    if ((digitalRead(limit1) == 0) && (digitalRead(limit2) == 1) && (digitalRead(limit3) == 1) && (digitalRead(limit4) == 0)) {
      Serial.print(" 5 = additional filter 5 ");
      Serial.println("\n");
      delay (100);
    }
    if ((digitalRead(limit1) == 1) && (digitalRead(limit2) == 0) && (digitalRead(limit3) == 0) && (digitalRead(limit4) == 1)) {
      Serial.print(" 6 = filtro duplo - com bastidor ");
      Serial.println("\n");
      delay (100);
    }
    if ((digitalRead(limit1) == 0) && (digitalRead(limit2) == 0) && (digitalRead(limit3) == 0) && (digitalRead(limit4) == 0)) {
      Serial.print(" 7 = Al 2.0 sample ");
      Serial.println("\n");
      delay (100);
    }
    if ((digitalRead(limit1) == 1) && (digitalRead(limit2) == 1) && (digitalRead(limit3) == 1) && (digitalRead(limit4) == 1)) {
      Serial.print(" none ");
      Serial.println("\n");
      delay (100);
    }
  }
}
```

Fonte: Autor, 2022.

Considera-se para esse sistema, o sensor acionado pela aleta da gaveta significa que o pino deste sensor se encontra em estado LOW (0) e os demais, em HIGH (1), já que inicialmente se definiram os pinos como INPUT, com sequência referenciada na tabela 5.

Tabela 5 - Referência dos sensores acionados e qual gaveta se destina.

Filtro	Sensores acionados				Resultado
	S1	S2	S3	S4	
Filtro 1 – Prata (Ag)	0	1	1	1	Sensor 1 acionado
Filtro 2 – Cobre (Cu - 0,2mm espessura)	1	0	1	1	Sensor 2 acionado
Filtro 3 – Teste 3	1	1	0	1	Sensor 3 acionado
Filtro 4 – Teste 4	1	1	1	0	Sensor 4 acionado
Filtro 5 – Teste 5	0	1	1	0	Sensores 1 e 4 acionados
Filtro Duplo – Gaveta mais bastidor	1	0	0	1	Sensores 2, 3 acionados
Filtro 6 – Alumínio (Al - 0,9mm espessura)	0	0	0	0	Todos acionados
Nenhum Sensor	1	1	1	1	Nenhum acionado

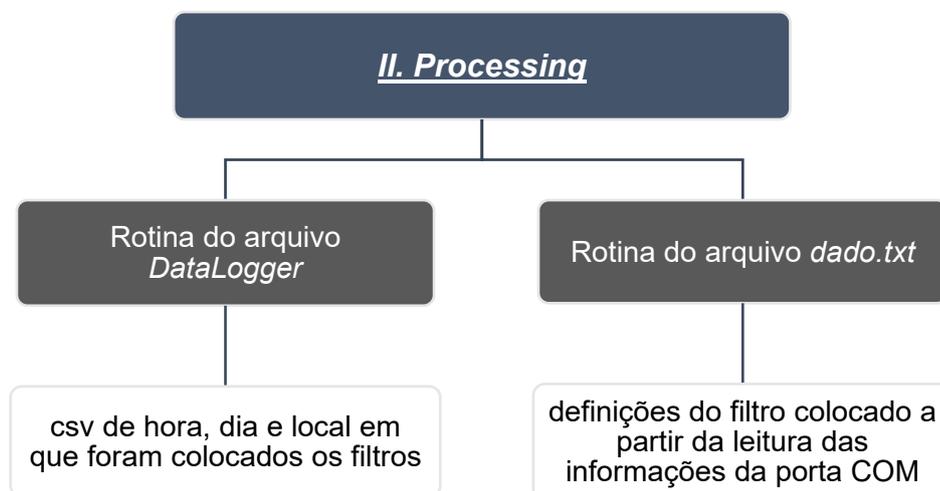
Fonte: Autor, 2022.

Com a programação do Arduino detectando a presença do filtro na gaveta respectiva, a informação deste filtro é impressa na saída serial, através do comando `Serial.print(" ")`, com a informação do sensor respectivo que foi detectado.

5.6.2. Processing e comunicação com software **BenchControl®**

Semelhante ao que foi descrito anteriormente, a lógica da rotina no Processing segue esse padrão, na Figura 21, para que sejam criadas as rotinas necessárias:

Figura 21 - Diagrama da hierarquia dos blocos de rotinas do Processing.



Fonte: Autor, 2022.

Então, são desenvolvidas programações, conforme mostra a Figura 22.

Figura 22 - Programação principal para registro da informação disponível na serial remetendo ao arquivo *dados.txt*, criado pela rotina do ambiente de desenvolvimento Processing, a cada colocação de filtro.

```

import processing.serial.*;
Serial COMPort; // Create object from Serial class

String[] lines = new String[0];

void setup()
{
  frameRate(5);
  String portName = Serial.list()[0];
  COMPort = new Serial(this, portName, 9600);
}

void draw()
{
  if (COMPort.available() > 0) { // If data is available,
    String read = COMPort.readString(); // read and store it to string read
    read = "" + read;
    // print('L');
    println(read);
    lines = append(lines, read); // append new read to string lines
  } else {
    saveStrings("dados.txt", lines); // save string to file
  }
}

```

Fonte: Autor, 2022.

Com a informação disponível na monitora serial, Figura 22, associada a respectiva porta serial (COM), o software Processing, através da biblioteca `processing.serial`, a IDE do software executa os comandos para que receba a informação da serial específica em que se insere a informação do filtro. Assim, as linhas de informação do filtro são transferidas a um arquivo ("*dado.txt*"), já nas definições conforme o arquivo que pode ser lido pelo software *BenchControl*®, da roda de filtros. Dessa forma, o arquivo *dados.txt* se comunica com a rotina da programação do software *BechControl*®.

A rotina de programação *BenchControl*® não permite que sejam alterados os parâmetros em tempo real, o que faz com que a cada mudança de filtro nas gavetas, o sistema precisa ser reiniciado. Essa consideração se encontra associada à rotina do Processing, que faz a leitura da porta COM criando o arquivo editável, e após retirada do filtro, fecha a conexão, religando após colocação de uma outra gaveta (com filtro diferente) no suporte.

Ao mesmo tempo em que se estabelece a comunicação do arquivo *dados.txt*, outra programação roda no processing, a *DataLogging_Arduino*, que é responsável por computar informações de hora, minuto, dia, mês e ano, com o respectivo filtro que foi utilizado, indicado na Figura 23.

Figura 23 - Rotina para criação do arquivo de registro dos filtros colocados, por dia e hora (Arquivo DataLoggin_Arduino).

```

DataLogging_Arduino
import processing.serial.*;
Serial mySerial;
Table table;
String filename;

import processing.serial.*;

//String[] lines = new String[0];

void setup()
{
  frameRate(5);
  mySerial = new Serial(this, "COM4", 9600);

  table = new Table();
  table.addColumn("Data");
  table.addColumn("Time");
  table.addColumn("Date");

}

void draw() {
  int d = day();
  int m = month();
  int y = year();
  int h = hour();
  int min = minute();
  int s = second();

  if(mySerial.available() > 0){ // If data is available,
    String value = mySerial.readString(); // read and store it to string read
    // String read = "value : " + read;
    //print('L');
    // println(read);
    // lines = append(lines, read);// append new read to string lines
    if(value != null){
      TableRow newRow = table.addRow();
      //place the new row and value under the "Data" and "Time" column
      newRow.setString("Data", value);
      newRow.setString("Time", str(h) + ":" + str(min) + ":" + str(s));
      //place the new row and date under the "Date" column
      newRow.setString("Date", str(d) + "/" + str(m) + "/" + str(y));
    }
  } else {

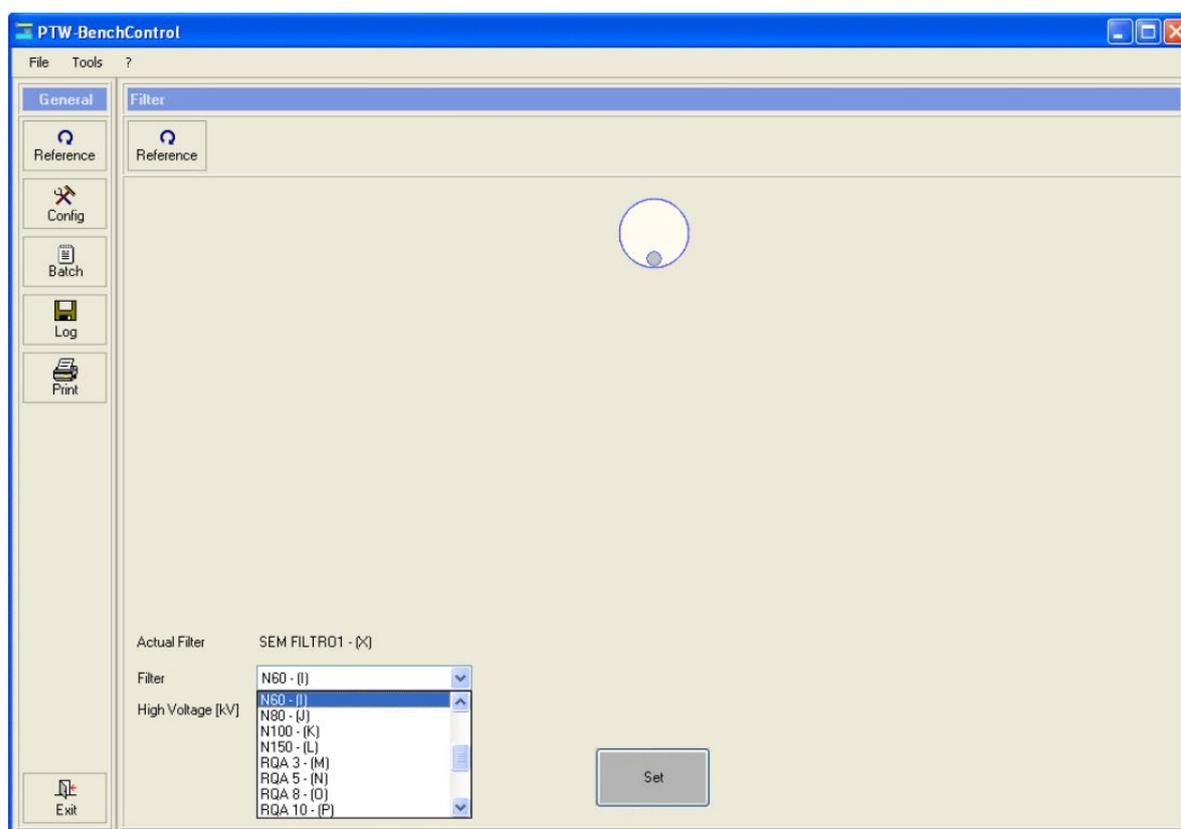
void keyPressed(){
  //variables used for the filename timestamp
  int d = day();
  int m = month();
  int h = hour();
  int min = minute();
  int s = second();
  //variable as string under the data folder set as (mm-dd--hh-min-s.csv)
  filename = "data/" + str(m) + "-" + str(d) + "--" + str(h) + "-" + str(min) + "-" + str(s) + "table.csv";
  saveTable(table, "data/table.csv");
  // saveStrings("dados.txt", lines);//save string to file
  exit();
}

```

Fonte: Autor, 2022.

A rotina *DataLoggin* grava um arquivo *.csv* em que são lançadas as informações separadas por tabelas referentes à data e ao horário em que o filtro foi inserido. Assim, a partir da função *keyPressed()*, ao se acionar qualquer tecla do computador, o sistema receberá a informação do filtro que foi colocado e registrará data e horário em que o filtro foi utilizado, de forma a garantir maior segurança do uso do sistema. Na Fig. 24, tela do *BenchControl*® registrando qual a qualidade de radiação selecionada indicando a presença do filtro para a referida caracterização.

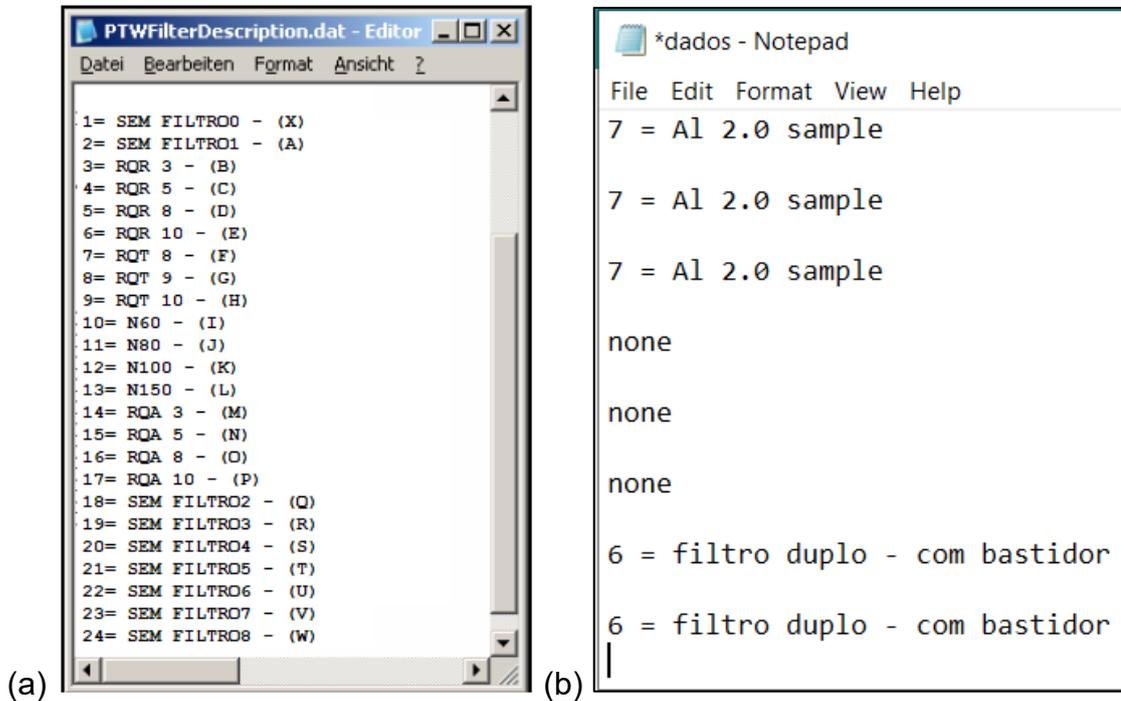
Figura 24 - Tela do software *BenchControl*® com os filtros selecionados, de acordo com respectiva qualidade do feixe a que se destina.



Fonte: LCI – IPEN, 2021.

Dessa forma, os arquivos com extensão *.csv* são salvos no computador do laboratório e o arquivo *.txt* é interpretado pela rotina da *BenchControl*®, a qual mostra o filtro que se encontra (Figura 25) e a qual qualidade de feixe que se destina.

Figura 25 - (a) exemplo de tela da descrição dos filtros conforme selecionado na roda de filtros pelo BenchControl®, considerando os filtros que já estão na roda de filtros e (b) o arquivo dados.txt gerado pela IDE do software Processing, a partir da informação da saída serial do software Arduino, para registro do filtro adicional selecionado.



Fonte: (a) LCI – IPEN, 2021; (b) Autor, 2022.

6. Considerações finais

Neste projeto, foi desenvolvido um protótipo funcional multiuso de um sistema consistindo de um suporte e conjunto de gavetas impressos para a colocação de filtros adicionais. O protótipo foi impresso utilizando filamento PLA (ácido polilático), através da impressora FFF 3D da Raise3D®, com parâmetros de impressão ajustados para fins de precisão e para evitar deformação, e para manter resistência ao se encaixar com o suporte, mantendo contato com as chaves respectivas dos sensores.

Além disso, utilizando um microcontrolador, baseado em Arduino, foi desenvolvida a programação contendo em sua estrutura a leitura dos sinais de baixo e alto nível, enviadas pelos sensores, o que permite a verificação do status da gaveta e integração de informações com o sistema de controle de laboratório. Portanto, o sistema permite o reconhecimento do filtro inserido na gaveta a partir de sensores ligados ao suporte.

Os modelos elaborados de cada gaveta do sistema são adaptáveis para diversos arranjos disponíveis no Laboratório de Raios-X do LCI, considerando tanto o uso quanto à disponibilidade do sistema e eventuais mudanças, ou necessidades de novas peças conforme o sistema em que o conjunto será empregado.

6.1. Publicações

Com os resultados coletados, foi possível a publicação de um trabalho no INAC 2021 (International Nuclear Atlantic Conference), ocorrido entre 29 de novembro e 2 de dezembro (ALMEIDA JUNIOR, 2021), com as discussões e implementações do modelo desenvolvido e a possibilidade de sua implementação nas dependências do LCI, com posterior aceite da publicação no periódico *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, em 26 de abril de 2022. Também foi apresentado o pôster do trabalho no III Workshop IPEN-CNEN, ocorrido em 8 de dezembro de 2021.

6.2. Atividades Futuras

Como o sistema permite adaptação a diferentes arranjos de sistemas de Raios-X, e com as possíveis alterações e sugestões dos técnicos, estas melhorias poderão ser inseridas para adequação no uso rotineiro de outros sistemas do LCI.

O objetivo é que possa ser utilizada esta estrutura e configuração para a caracterização de qualidade do feixe atenuado, com os filtros a serem aplicados no sistema desenvolvido. Dentre essas necessidades, se encontram a implantação da qualidade do feixe para o filtro de Ag. Este filtro pode ser uma qualidade de interesse na calibração de medidores de radiação utilizados em equipamentos de tomossíntese mamária (SHRESTHA et al, 2017) e como filtração adicional.

Referências

3D FILA, “**Conheça as Etapas da Impressão 3D FDM ou FFF**”, Fev/2020. Disponível eletronicamente no sítio: <https://3dfila.com.br/conheca-as-etapas-da-impressao-3d-fdm-ou-fff/>, acessado em 28/fev./2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR IEC 60731:2019, “**Equipamentos eletromédicos - dosímetros com câmaras de ionização para uso em RADIOTERAPIA**”, 1ª edição, Ago/2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR IEC 61674:2016, “**Equipamento eletromédico - Dosímetros com câmaras de ionização e/ou detectores semicondutores como os utilizados no diagnóstico por imagem de raios X**”, 1ª edição, Jul/2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR ISO 4037-1, “**Proteção radiológica — Radiação X e gama de referência para calibração de dosímetros e medidores de taxa de dose, e para determinação de suas respostas em função da energia dos fótons - Parte 1: Características das radiações e métodos de produção**”, 2ª edição, Mai/2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017, “**Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração**”, 3ª edição, Dez/2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT/INMETRO; “**Avaliação de dados de medição — Guia para a expressão de incerteza de medição**” (ISO-GUM); JCGM100:2008, Rio de Janeiro, Set/2008.

AGUILAR, V.L., et al, “**BREAST TOMOSYNTHESIS: A BETTER MAMMOGRAPHY - Tomossíntese mamária: uma mamografia melhor**” Review Article: Mastology, 2018;28(1):51-66, February, 13, 2018, DOI: <https://doi.org/10.29289/Z2594539420180000254> acessado em 10/dez/2021

ALMEIDA JUNIOR, J.N. **Estudo De Uma Metodologia Para A Calibração De Medidores Do Produto Kerma-Área Em Laboratórios De Radiodiagnóstico**, 2010. Monografia apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Bacharel no Curso de Física Médica – Pontifícia Universidade Católica (PUC-SP), São Paulo. Orientador: Ricardo Andrade Terini.

ALMEIDA JUNIOR, J.N., POTIENS, M.P.A., RODRIGUES, Jr., O., “**Development Of An Additional Filtration System By 3d Printing For The Implementation Of New Xray Beam Qualities Used In Diagnostic Radiology**”, presented in the 2021 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2021: November, 29 to December, 2, 2021 – ABEN, Brasil, 2021.

ALMEIDA JUNIOR, J.N., POTIENS, M.P.A., RODRIGUES, Jr., O., **“Development Of An Additional Filtration System By 3d Printing For The Implementation Of New Xray Beam Qualities Used In Diagnostic Radiology”**, Brazilian Journal of Radiation Sciences, Brasil, publicação aceita em Abril de 2022.

BERNARDI, D., et al., **“Breast cancer screening with tomosynthesis (3D mammography) with acquired or synthetic 2D mammography compared with 2D mammography alone (STORM- 2): a population-based prospective study”**, Lancet Oncol 2016; 17: 1105–13, Published Online, S1470-2045(16)30101-22016, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/>, June 23, 2016, acessado em 10/dez/2021

BESSA, A.C.M., **Intercomparação de câmaras de ionização em feixes padrões de raios X, níveis radioterapia, radiodiagnóstico e radioproteção**. Orientador: Linda Viola Ehlin Caldas. 2006. f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energeticas e Nucleares - IPEN/CNEN-SP, São Paulo. DOI: 10.11606/D.85.2007.tde-30052007-152251. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/11489>. Acesso em: 12 de junho de 2022.

BETTI, F. **Desenvolvimento e implantação de um Programa de Controle e Aquisição de Dados na Calibração de Instrumentos em Radiodiagnóstico**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. Orientador (a): Maria da Penha Albuquerque Potiens.

CHOI, Y., et al, **“Quantitative analysis of radiation dosage and image quality between digital breast tomosynthesis (DBT) with two-dimensional synthetic mammography and full-field digital mammography (FFDM)”**, Clinical Imaging - Breast Imaging: Volume 55, P. 12-17, Published: January 17, 2019, DOI: 10.1016/j.clinimag.2019.01.014, acessado em 10/dez/2021

CORRÊA, E. L. **Metodologia De Controle De Qualidade E Implantação De Campos Padrões De Radiação X, Nível Mamografia, Seguindo A Norma IEC 61267**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares, São Paulo. Orientador (a): Maria da Penha Albuquerque Potiens.

COSTA M.M.B, NOVA J.L.L, CANEVARO L.V., **“Efeito da filtração adicional nas doses de radiação e na qualidade das imagens nos exames videofluoroscópicos.”** Radiol Bras. 2009;42(6):379–387. Disponível em meio eletrônico, em: <https://www.scielo.br/pdf/rb/v42n6/v42n6a12.pdf>, acessado em 04/jan/2021.

COSTA, N. A., **Desenvolvimento De Uma Metodologia De Calibração E Testes De Medidores Do Produto Kerma-Área**, 2013. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. Orientador (a): Maria da Penha Albuquerque Potiens.

DIAS, D.M., **Estabelecimento de um novo método de calibração de câmaras de ionização tipo lápis para dosimetria em feixes de tomografia computadorizada**. 2010.

Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. doi:10.11606/D.85.2010.tde-01062011-122808. Disponível em:

<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-01062011-122808/publico/2010DiasEstabelecimento.pdf>. Acesso em: 12 de junho de 2022.

FRANCISCATTO, P.C.; **Caracterização das Qualidades de Radiação X seguindo as recomendações da norma IEC 61267 no Laboratório de Calibração do IPEN**; Dissertação de Mestrado Acadêmico na área de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear, Orientadora: Maria da Penha Albuquerque Potiens, IPEN-USP, 2009.

HEACOX, K. **Radiation Dose and Digital Mammography**. In Healthcare in Europe.com. Alemanha, 2008 - Disponível em meio eletrônico, em: <https://healthcare-in-europe.com/en/news/radiation-dose-digital-mammography.html>, acessado em 04/jan/2021.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **“Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos e Fundamentos Gerais de Termos Associados”**, Rio de Janeiro: INMETRO, 2012. (VIM, 2012)

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, **“Medical Diagnostic X-rays Equipment – Radiation Conditions for Use in the Determination of Characteristics”**, IEC 61267. IEC, Geneva. 2005.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, **“Medical Electrical Equipment - Dosimetric Instruments Used For Non-Invasive Measurement Of X-Ray Tube Voltage In Diagnostic Radiology”**, IEC 61676. IEC, Geneva. 2002.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), **“Dosimetry In Diagnostic Radiology: An International Code Of Practice”**, TECHNICAL REPORTS SERIES (TRS) No. 457, Sep/2007.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), **“X-ray calibration system for SSDs”**. IAEA Specification Revision. UKR6011-1. Dec/2015, Rev.03 (P.Toroi).

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS & MEASUREMENTS, **“Patient Dosimetry for X Rays used in Medical Imaging (Report 74)”**, ICRU – REP. 74, Jan/2005.

KRAMER, H.M., SELBACH, H.J., ILES, W.J. (1998), **“The Practical Peak Voltage of Diagnostic X-Ray Generators”**, Br. J. Radiol. 71, p. 200-209.

MACDONALD, E., SALAS, R., ESPALIN, D., PEREZ, M., AGUILERA, E., MUSE, D., WICKER, R. B., **“3D Printing for the Rapid Prototyping of Structural Electronics”**, in IEEE Access, Vol. 2, pp. 234-242, doi: 10.1109/ACCESS.2014.2311810, Abr/2014.

MINISTÉRIO DA SAÚDE, **“Radiodiagnóstico Médico – Segurança e Desempenho de Equipamentos”**, Agência Nacional de Vigilância Sanitária, p. 54-55, Brasília, BRASIL, 2005.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA).

INSTRUÇÃO NORMATIVA - IN Nº 90, DE 27 DE MAIO DE 2021, **Dispõe sobre requisitos sanitários para a garantia da qualidade e da segurança em sistemas de radiografia médica convencional, e dá outras providências**. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, BRASIL, 2021.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 330, de 20 de dezembro de 2019, **Estabelece os requisitos sanitários para a organização e o funcionamento de serviços de radiologia diagnóstica ou intervencionista e regulamenta o controle das exposições médicas, ocupacionais e do público decorrentes do uso de tecnologias radiológicas diagnósticas ou intervencionistas**. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, BRASIL, 2019.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 611, de 9 de março de 2022. **Estabelece os requisitos sanitários para a organização e o funcionamento de serviços de radiologia diagnóstica ou intervencionista e regulamenta o controle das exposições médicas, ocupacionais e do público decorrentes do uso de tecnologias radiológicas diagnósticas ou intervencionistas**. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, BRASIL, 2022.

MINISTÉRIO DA SAÚDE, PORTARIA/MS/SVS Nº 453, DE 1º DE JUNHO DE 1998, **Aprova o Regulamento Técnico que estabelece as diretrizes básicas de proteção radiológica em radiodiagnóstico médico e odontológico, dispõe sobre o uso dos Raios X diagnósticos em todo território nacional e dá outras providências**. SECRETARIA DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (MS/SVS), Portaria nº 453, Brasília, BRASIL, 1998.

NOGUEIRA, ML. **“Nova Técnica de Imagem no Diagnóstico da Patologia Mamária - Tomossíntese Mamária”**. ESTSP – Politécnico do Porto. Porto – Portugal, 2010.

PEPPARD, H. et al., **“Digital breast tomosynthesis in the diagnostic setting: indications and clinical applications”**. Radiographics, vol. 35 p. 975–90.2015, Jul-Aug. 2015 doi: <https://doi.org/10.1148/rq.2015140204>, acessado em 10/dez/2021.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE WERKSTÄTTEN (PTW), **“Instructions for Use BenchControl - S160003”**, Version 1.0 or higher, Freiburg – GER, Ago/2008

POTIENS, M.P.A., **“Calibração De Instrumentos Medidores De Radiação”**. In Semana de Minicursos em Física Médica, Departamento De Física (UFS/CCET), Mar/2010.

RADCAL Co. Reference Class Chambers - Technical Specification, USA. 2016. Disponível em <http://radcal.com/rdclwp/wp-content/uploads/2016/11/radcal-reference-class-chambers-spec-sheet.pdf>. Acesso em 11 de junho de 2022.

RAISE3D, **“Especificações técnicas da impressora 3D”**, USA. 2019. Disponível no em: <https://s1.raise3d.com/2020/01/Raise3D-Pro2-Technical-Specifications-01.pdf>. Acesso em 01 de março de 2020.

REAS, C. and FRY, B., "**Processing: a programming handbook for visual designers and artists**", ISBN 978-0-262-18262-1, The MIT Press - Cambridge, Massachusetts, 2007

RODRIGUES, Y.S, **Otimização de um sistema de controle e aquisição de dados para calibração de medidores de radiação X com utilização de ferramentas computacionais**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. Orientador (a): Maria da Penha Albuquerque Potiens.

SCHNEIDERREIT, D., KRAUSA, L., MEIERC, J.C., FRIEDRICH, O., GILBERT, D.F., "**Step-by-step guide to building an inexpensive 3D printed motorized positioning stage for automated high-content screening microscopy**", Biosensors and Bioelectronics, ed. 92, 472–481, Europa - Jan/2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bios.2016.10.078>.

SHRESTHA, S. et al "**Towards standardization of x-ray beam filters in digital mammography and digital breast tomosynthesis: Monte Carlo simulations and analytical modelling**", Institute of Physics and Engineering in Medicine Physics in Medicine & Biology, Volume 62, Number 5, Phys. Med. Biol. 62 1969, February 2017, disponível em <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6560/aa58c8>, acessado em 10/dez/2021.

SILVA JUNIOR, I.A., RAMOS, M.A.G., POTIENS, M.P.A., VIVOLO, V., **Adequação e ajuste dos elementos eletromecânicos de um gerador de radiação X para automação do sistema de filtração adicional**, RADIO 2011, Anais. Recife, 2011. Disponível em <http://repositorio.ipen.br/bitstream/handle/123456789/12353/17458.pdf?sequence=1>. Acesso em 10 de junho de 2022.

STEMPNIAK, C.R.; DE PAULA, L.C.; LANDGRAF, W.R. – "**Reduzindo a incerteza de medição com ajuda de software**"- ENQUALAB 2005 – São Paulo, 2005.

TAHUATA, L., SALATI, I. P. A., DIPRINZIO, R., DIPRINZIO, A. R. "**Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos. Instituto de Radioproteção e Dosimetria**" – CNEN, RJ. 10ª revisão, Abril/2014.

TERINI, R.A., POTIENS, M.P.A., HERDADE, S.B., PEREIRA, M.A.G., PIRES, J.S.J., VIDEIRA, H.S. (2009). "**A medição da grandeza Practical Peak Voltage na prática radiológica**". Radiol Bras., 42(6):389–394, Nov/Dez, 2009. Disponível em <https://www.scielo.br/j/rb/a/zZfbz37f9mgDj5rnhgylL6z/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em 05 de maio de 2022.

TILLY JR., J. G. "**Física Radiológica**", 1ª edição. Ed. Guanabara Koogan Ltda., RJ. 2010.

TURNER, J. E. "**Atoms, Radiation, and Radiation Protection**", 3rd Edition, ISBN:9783527616978, DOI:10.1002/9783527616978, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. 2007.

VAN GRIEKEN, R.E., MARKOWICZ, A.A. (ed.); "**Handbook of X-Ray Spectrometry**", Second Edition Revised and Expanded, 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Programações Completas – Arduino

A seguir, programação completa utilizada para seleção dos filtros, da IDE do Arduino.

```

1. int limit1 = 24; //verde - sensor_1
2. int limit2 = 26; //azul - sensor_2
3. int limit3 = 28; //amarelo - sensor_3
4. int limit4 = 30; //laranja - sensor_4
5. const int buttonPin = 7;
6. int buttonState;
7. int lastButtonState = LOW;
8. boolean ReceberColetaDados;

9. void setup() {
10. pinMode(limit1, INPUT);
11. pinMode(limit2, INPUT);
12. pinMode(limit3, INPUT);
13. pinMode(limit4, INPUT);
14. pinMode(buttonPin, INPUT_PULLUP);
15. Serial.begin(9600);
16. ReceberColetaDados = false;

17. }

18. void loop() {
19. Serial.read();
20. Serial.available();
21. buttonState = digitalRead(buttonPin);
22. detecta_sistema();
23. delay(200);
24. if (lastButtonState == LOW && buttonState == HIGH) {
25. ReceberColetaDados = false;
26. delay(200);
27. }
28. lastButtonState = buttonState;

29. }

30. void detecta_sistema() {
31. int n;
32. ReceberColetaDados = true;
33. for (n = 0; n < 10; n++){
34. if ((digitalRead(limit1) == 0) && (digitalRead(limit2) == 1) && (digitalRead(limit3) == 1) &&
    (digitalRead(limit4) == 1)) {
35. Serial.print(" 1 = Ag sample");
36. Serial.println("\n");
37. delay (200);
38. }
39. if ((digitalRead(limit1) == 1) && ((digitalRead(limit2) == 0)) && ((digitalRead(limit3) == 1)) &&
    ((digitalRead(limit4) == 1))) {
40. Serial.print(" 2 = Cu 0.2 sample");
41. Serial.println("\n");
42. delay (100);

```

```
43. }
44. if ((digitalRead(limit1) == 1) && ((digitalRead(limit2) == 1)) && ((digitalRead(limit3) == 0)) &&
    ((digitalRead(limit4) == 1))) {
45. Serial.print(" 3 = additional filter 3 ");
46. Serial.println("\n");
47. delay(100);
48. }
49. if ((digitalRead(limit1) == 1) && ((digitalRead(limit2) == 1)) && ((digitalRead(limit3) == 1)) &&
    ((digitalRead(limit4) == 0))) {
50. Serial.print(" 4 = additional filter 4 ");
51. Serial.println("\n");
52. delay(100);
53. }
54. if ((digitalRead(limit1) == 0) && (digitalRead(limit2) == 1) && (digitalRead(limit3) == 1) &&
    (digitalRead(limit4) == 0)) {
55. Serial.print(" 5 = additional filter 5 ");
56. Serial.println("\n");
57. delay (100);
58. }
59. if ((digitalRead(limit1) == 1) && (digitalRead(limit2) == 0) && (digitalRead(limit3) == 0) &&
    (digitalRead(limit4) == 1)) {
60. Serial.print(" 6 = filtro duplo - com bastidor ");
61. Serial.println("\n");
62. delay (100);
63. }
64. if ((digitalRead(limit1) == 0) && (digitalRead(limit2) == 0) && (digitalRead(limit3) == 0) &&
    (digitalRead(limit4) == 0)) {
65. Serial.print(" 7 = AI 2.0 sample ");
66. Serial.println("\n");
67. delay (100);
68. }
69. if ((digitalRead(limit1) == 1) && (digitalRead(limit2) == 1) && (digitalRead(limit3) == 1) &&
    (digitalRead(limit4) == 1)) {
70. Serial.print(" none ");
71. Serial.println("\n");
72. delay (100);
73. }
74. }
75. }
```

APÊNDICE B - Programações da IDE do Processing

A seguir as programações completas utilizadas para registro de hora, local e dia, na programação *DataLogger*, do Processing.

```

1. import processing.serial.*;
2. Serial mySerial;
3. Table table;
4. String filename;

5. import processing.serial.*;

6. void setup()
7. {
8.   frameRate(5);
9.   mySerial = new Serial(this, "COM4", 9600);

10. table = new Table();
11. table.addColumn("Data");
12. table.addColumn("Time");
13. table.addColumn("Date");

14. }

15. void draw() {
16.   int d = day();
17.   int m = month();
18.   int y = year();
19.   int h = hour();
20.   int min = minute();
21.   int s = second();

22. if(mySerial.available() > 0){ // If data is available,
23.   String value = mySerial.readString(); // read and store it to string read
24.   if(value != null){
25.     TableRow newRow = table.addRow();
26.     //place the new row and value under the "Data" and "Time" column
27.     newRow.setString("Data", value);
28.     newRow.setString("Time", str(h) + ":" + str(min) + ":" + str(s)); //place the new row and date
        under the "Date" column
29.     newRow.setString("Date", str(d) + "/" + str(m) + "/" + str(y));
30.   }
31. } else {
32. }
33. }

34. void keyPressed(){ //variables used for the filename timestamp
35.   int d = day();
36.   int m = month();
37.   int h = hour();
38.   int min = minute();
39.   int s = second(); //variable as string under the data folder set as (mm-dd--hh-min-s.csv)
40.   filename = "data/" + str(m) + "-" + str(d) + "--" + str(h) + "-" + str(min) + "-" + str(s) + "table.csv";
41.   saveTable(table, "data/table.csv"); // saveStrings("dados.txt", lines); //save string to file
42.   exit();
43. }

```

Programação do Processing (*Serial_to_txt_Processing*) para coleta dos dados da serial e criação do arquivo *dados.txt*.

```
1. import processing.serial.*;
2. Serial COMPort; // Create object from Serial class

3. String[] lines = new String[0];

4. void setup()
5. {
6.   frameRate(5);
7.   String portName = Serial.list()[0];
8.   COMPort = new Serial(this, portName, 9600);
9. }

10. void draw()
11. {
12.   if (COMPort.available() > 0) { // If data is available,
13.     String read = COMPort.readString(); // read and store it to string read
14.     read = "value : " + read;
15.     println(read);
16.     lines = append(lines, read); // append new read to string lines
17.   } else {
18.     saveStrings("dados.txt", lines); // save string to file
19.   }
20. }
```

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone (11) 2810-1570 ou (11) 2810-1572
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://mprofissional.ipen.br>

O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Governo do Estado de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) do Governo Federal.