

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE FÍSICA
GRADUAÇÃO EM FÍSICA MÉDICA

IGOR PRATIS DE OLIVEIRA

ANÁLISE DA PRESENÇA DE RADIAÇÕES IONIZANTES EM MATERIAIS
DIÁRIOS UTILIZANDO CÂMARA DE NUVENS

UBERLÂNDIA

2026

IGOR PRATIS DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DA PRESENÇA DE RADIAÇÕES IONIZANTES EM MATERIAIS
DIÁRIOS UTILIZANDO CÂMARA DE NUENS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Física da
Universidade Federal de Uberlândia
como requisito parcial para a obtenção do
título de Bacharel em Física Médica.

Orientador: Prof. Dr. Lucio Pereira Neves
Coorientador: Dr. Válder José Coutinho
Júnior

UBERLÂNDIA

2026

IGOR PRATIS DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DA PRESENÇA DE RADIAÇÕES IONIZANTES EM MATERIAIS
DIÁRIOS UTILIZANDO CÂMARA DE NUENS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Física da
Universidade Federal de Uberlândia
como requisito parcial para a obtenção do
título de Bacharel em Física Médica.

Orientador: Prof. Dr. Lucio Pereira Neves
Coorientador: Dr. Válder José Coutinho
Júnior

UBERLÂNDIA

2026

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde, força e sabedoria para enfrentar os desafios e concluir mais esta etapa da minha vida.

À minha família, que é minha base e meu refúgio, pelo amor incondicional e pelo apoio constante, fundamentais para que eu pudesse trilhar este caminho.

À minha namorada, Ana Clara, pelo companheirismo, paciência e incentivo constantes, que tornaram esta jornada mais leve.

Aos amigos que conquistei ao longo da graduação, pela parceria nos estudos, pela troca de experiências e pelos momentos de descontração. Em especial aos amigos Luis Eduardo, Felipe Beraldo e Victor Ossick, pela ajuda direta e fundamental na construção da câmara e no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Lucio Pereira Neves, pela confiança, pelos ensinamentos valiosos, pela paciência na condução deste trabalho e por todo o incentivo à minha formação científica.

Ao meu coorientador, Dr. Válter José Coutinho Júnior, pela colaboração fundamental, pelas discussões enriquecedoras e pelo suporte técnico que contribuíram diretamente para a qualidade deste projeto.

À Prof. Dr. Ana Paula Perini, expresso minha gratidão pelo apoio financeiro essencial para a aquisição de componentes e construção da câmara de nuvens, viabilizado através do projeto FAPEMIG APQ-04215-22, intitulado "Implementação de práticas dosimétricas em serviços de radiodiagnóstico de Uberlândia e região".

Ao Laboratório de Instrumentação e Dosimetria (LInDa), pela infraestrutura disponibilizada e pelo ambiente colaborativo que permitiu o desenvolvimento prático desta pesquisa.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e ao Instituto de Física, pela excelência no ensino e pela formação proporcionada.

Ao Programa de Educação Tutorial (PET) Física Médica, pelo suporte financeiro através da bolsa concedida e pelo ambiente de aprendizado ímpar, que contribuiu imensamente para o meu crescimento acadêmico, profissional e pessoal.

Ao CNPq e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro essencial aos projetos que permitiram o desenvolvimento deste trabalho: FAPEMIG - APQ-02934-15, FAPEMIG - APQ03049-

15, CNPq-421603/2016-0, CNPq-420699/2016-3, CNPq-14520/2020-1, CNPq 312160/2023-2 e CNPq-312124/2021-0.

Este trabalho faz parte do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Instrumentação Nuclear e Aplicações na Indústria e Saúde (INCT.INAIS), projeto CNPq 406303/2022-3 e 424498/2025-1.

RESUMO

A câmara de nuvens é um detector de partículas que possibilita a visualização direta, a olho nu, dos traços deixados pela radiação ionizante. O objetivo deste trabalho foi a otimização de um protótipo de câmara de nuvens termelétrica já existente na literatura, visando aprimorar sua robustez, segurança e eficiência térmica, para sua posterior aplicação na análise qualitativa da radioatividade em materiais do cotidiano. Realizou-se uma análise visual de diversas fontes, como eletrodo de ^{232}Th , ponteiro de despertador antigo com ^{226}Ra , vidro de Urânio e ^{222}Rn . A câmara demonstrou alta capacidade de diferenciar as assinaturas visuais de partículas α (traços curtos e densos) e β (traços longos e erráticos), além da radiação de fundo. A análise permitiu a demonstração visual de conceitos físicos complexos, como o equilíbrio secular e decaimento radioativo. Sua otimização se mostrou eficaz para ensino e pesquisa na área de física nuclear.

Palavras-chave: Câmara de nuvens; Radiações ionizantes; Radioatividade; Física Médica.

ABSTRACT

The cloud chamber is a particle detector that enables the direct visualization, with the naked eye, of the tracks left by ionizing radiation. The objective of this work was the optimization of a thermoelectric cloud chamber prototype already described in the literature, aiming to improve its robustness, safety, and thermal efficiency, for its subsequent application in the qualitative analysis of radioactivity in everyday materials. A visual analysis was carried out on several sources, such as a ^{232}Th electrode, an old alarm clock hand containing ^{226}Ra , uranium glass, and ^{222}Rn . The chamber demonstrated a high capacity to distinguish the visual signatures of α particles (short and dense tracks) and β particles (long and erratic tracks), in addition to background radiation. The analysis allowed the visual demonstration of complex physical concepts, such as secular equilibrium and radioactive decay. Its optimization proved effective for teaching and research in the field of nuclear physics

Keywords: Cloud chamber; Ionizing radiation; Radioactivity; Medical Physics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Linha de estabilidade dos núclídeos. Cada cor representa a categoria de decaimento do núclídeo. A linha diagonal representa os núcleos quais $N = Z$, enquanto a linha em preto, central aos quadrados coloridos, representa os núclídeos estáveis (Galetti; Mizrahi, 2019).....	17
Figura 2 - Primeiro registro da trajetória de um pósitron. Carl Anderson descreveu que o comprimento do traço feito pela partícula era no mínimo dez vezes maior que o traço de um próton (Anderson, 1933).	18
Figura 3 - Esquema da câmara de nuvens (O autor, 2025).....	19
Figura 4 - Montagem final do protótipo otimizado da câmara de nuvens (O autor, 2025).	25
Figura 5 – Superfície da câmara de nuvens projetada e impressa em impressora 3D (O autor, 2025).....	26
Figura 6 – Módulos Peltier e dissipadores de calor acoplados à base impressa em 3D (O autor, 2025).....	27
Figura 7 - Esquema elétrico do protótipo otimizado, simulado na plataforma Tinkercad. Devido às limitações da biblioteca de componentes do software, alguns dispositivos foram representados por outros componentes (O autor, 2025).	29
Figura 8 – Materiais radioativos analisados no experimento. Sendo: (a) Tubo a vácuo com ponteiro de rádio e radônio; (b) Fonte de ^{241}Am do detector de fumaça; (c) Castanha-do-pará; (d) Vidro de urânio; (e) Amostra de areia monazítica; (f) Eletrodo de tungstênio com tório (O autor, 2025).	31
Figura 9 – Ponteiro de relógio com ^{226}Ra demonstrando fluorescência sob luz ultravioleta (UV) e selado em tubo a vácuo para coleta de Radônio (O autor, 2025).	32
Figura 10 - Arranjo experimental (setup) para aquisição de dados, demonstrando a câmara otimizada e o smartphone em tripé fixo (O autor, 2025).....	34
Figura 11 - Efeito do campo eletrostático na nitidez dos traços da fonte de ^{241}Am (O autor, 2025).....	36
Figura 12 - Composição de traços observados na medição da Radiação de Fundo (Background). (a) Traço longo com deflexão, consistente com elétron (Efeito Compton). (b, e) Traços longos e retilíneos, consistentes com múons de raios cósmicos. (c, d, f) Traços curtos e grossos, consistentes com partículas alfa do decaimento do radônio no ar (O autor, 2025).	37

Figura 13 - Padrão de emissão da fonte pontual de ^{241}Am (O autor, 2025).	38
Figura 14 - Emissão radioativa do ponteiro de despertador contendo ^{226}Ra . (O autor, 2025).	39
Figura 15 - Traços de decaimento do gás ^{222}Rn e seus descendentes (O autor, 2025).	39
Figura 16 - Traços de decaimento mistos (alfa e beta) observados da amostra de vidro de urânio (^{238}U) (O autor, 2025).	40
Figura 17 - Traços alfa observados na amostra de areia monazítica (O autor, 2025).	40
Figura 18 - Traços de decaimento mistos observados na amostra de castanha-do-pará. (a) Traço alfa curto e denso. (b) Traço beta longo e fino (O autor, 2025).	41
Figura 19 - Assinatura mista de decaimento do eletrodo de ^{232}Th . (a) Emissão de partículas alfa (traços densos e curtos). (b) Emissão de uma partícula beta (traço longo, fino e com deflexão) (O autor, 2025).	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Energia de ligação de alguns elementos (Sevier, 1979; Zhan; Ni-Chols; Dixon, 2003).....	16
Tabela 2 - Meia-vida de alguns radionuclídeos (Oliveira et al., 2006).	16

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
ATX	<i>Advanced Technology eXtended</i> (Padrão de fonte de alimentação)
AWS	<i>American Welding Society</i>
COB	<i>Chip on Board</i> (Tipo de LED)
CSDA	<i>Continuous Slowing-Down Approximation</i> (Aproximação de Desaceleração Contínua)
FPS	Quadros por segundo
GND	<i>Ground</i> (Terra / Referência de 0V no circuito)
ICRP	<i>International Commission on Radiological Protection</i> (Comissão Internacional de Proteção Radiológica)
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
LET	<i>Linear Energy Transfer</i> (Transferência Linear de Energia / Poder de Freamento Linear)
LInDa	Laboratório de Instrumentação e Dosimetria
MSV	Média quadrática da voltagem
mSv	Milisievert (unidade de dose de radiação)
NRC	<i>U.S. Nuclear Regulatory Commission</i> (Comissão Reguladora Nuclear dos EUA)
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (Placa de Circuito Impresso)
PLA	<i>Polylactic Acid</i> (Ácido Polilático - material de impressão 3D)
TEC	Termoelétrico (Módulo/Pastilha Termoelétrica)
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i> (Processo de soldagem)
μCi	Microcurie (unidade de atividade radioativa)
UHD	<i>Ultra-high Definition</i> (Ultra Alta Definição)
UNSCEAR	<i>United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation</i> (Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica)
USRC	<i>United States Radium Corporation</i>
UV	Ultravioleta
INFIS	Instituto de Física
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Física Das Radiações Ionizantes	15
2.2	Dcaimento Radioativo	16
2.3	CÂMARA DE NUVENS.....	18
2.3.1	Arranjo e funcionamento da câmara de nuvens	19
2.4	Sistema de Refrigeração Termoelétrico com Pastilhas Peltier	20
2.5	Materiais cotidianos radioativos	20
2.5.1	Radônio 222.....	21
2.5.2	Eletrodo com 2% de Tório.....	21
2.5.3	Vidro com Urânio	21
2.5.4	Detector de Fumaça	22
2.5.5	Areia de Guarapari.....	22
2.5.6	Castanha do Pará	23
2.5.7	Despertador Analógico Antigo com Rádio	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
3.1	Apresentação da Câmara de Nuvens	24
3.2	Otimizações do Protótipo.....	25
3.2.1	Estrutura e Gabinete	25
3.2.2	Otimização da Base Fria e Isolamento	26
3.2.3	Sistema de Refrigeração e Ventilação	27
3.2.4	Sistema Elétrico e de Controle	28
3.2.5	Otimização da Fonte de Vapor	29
3.3	Procedimentos experimentais	29

3.3.1	Validação do Protótipo Otimizado	29
3.3.2	Seleção e Preparação das Amostras.....	30
3.3.3	Preparação da Amostra de Radônio (^{222}Rn)	31
3.4	Protocolo de Medição e Aquisição de Dados	33
3.5	Análise de dados	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1	Desempenho e Validação do Protótipo Otimizado	35
4.1.1	Discussão do Desempenho	35
4.1.2	Análise da Otimização (Prós e Contras).....	35
4.1.3	Efeito do Campo Eletrostático de Limpeza	35
4.2	Análise Qualitativa dos Fenômenos	36
4.2.1	Radiação de Fundo (Background)	36
4.2.2	Análise da Fonte do Detector de Fumaça (^{241}Am)	38
4.2.3	Análise do Ponteiro de Despertador (^{226}Ra)	38
4.2.4	Análise do Gás ^{222}Rn	39
4.2.5	Análise do Vidro de Urânio.....	40
4.2.6	Análise da Areia Monazítica	40
4.2.7	Análise da Castanha-do-Pará.....	41
4.2.8	Análise do Eletrodo de Tório (EWTh-2).....	41
5	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1 INTRODUÇÃO

A câmara de nuvens é um equipamento que possibilita a visualização, a olho nu, dos traços de partículas subatômicas produzidas por radiações ionizantes em um meio. A câmara é constituída por um recipiente preenchido por vapor de álcool supersaturado, em tal ponto que, mesmo a passagem de partículas carregadas de baixa energia pelo meio fosse o suficiente para alterar o estado do vapor, condensando-o, de forma que nuvens se formassem em seu interior (Pinheiro, 2015; Laganá, 2011).

Por ter sido o primeiro detector capaz de mostrar os traços produzidos por partículas subatômicas, a câmara de nuvens teve grande importância no estudo da radiação e das partículas elementares, contemplando o Prêmio Nobel de Física ao físico Charles Wilson em 1927. Mesmo atualmente, com detectores sofisticados, a câmara de nuvens ainda é utilizada na investigação de raios cósmicos (Silva *et al.*, 2018).

Inicialmente, a câmara original construída por Wilson utilizava o princípio da expansão do vapor como método para atingir baixas temperaturas e consequentemente, o estado de supersaturação do vapor. Porém, este método conferia apenas alguns segundos de funcionamento da câmara. Atualmente, a câmara de nuvens é construída utilizando o princípio da convecção, com um recipiente frio na superfície inferior da câmara, possibilitando que o vapor atinja baixas temperaturas e que a câmara de nuvens opere de forma ininterrupta. Assim, o vapor entra em um estado supersaturado, tornando o caminho das partículas carregadas que atravessam o meio neste estado visível (Langsdorff Jr., 1939, 1950; Silva *et al.*, 2018).

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral aprimorar a câmara de nuvens desenvolvida no estudo de Andrade *et al.* (2024), tornando-a mais robusta e eficiente, o que possibilitará uma maior portabilidade para ambientes de ensino e pesquisa. Além disso, a câmara será empregada na realização de novos experimentos, visando enriquecer o aprendizado e a compreensão sobre fenômenos subatômicos em um contexto acessível.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Física Das Radiações Ionizantes

A física das radiações é a área da física que estuda a radiação e suas interações com a matéria, podendo estas ocorrer com o elétron de um átomo, com o núcleo ou com o átomo como um todo. A radiação é uma forma de energia em trânsito, que pode ser transmitida através do vácuo ou de meios materiais (Evans, 1955). Os mecanismos de interação da radiação com a matéria dependem de sua natureza, podendo ser divididos em radiação eletromagnética ou radiação corpuscular (Attix, 2010).

As radiações corpusculares são partículas atômicas ou subatômicas que transportam energia em razão de seu movimento, como partículas α , β^+ , β^- , μ , n^0 , entre outras. Essas partículas podem se originar do decaimento de materiais radioativos, como é o caso das partículas α e β , ou da interação de raios cósmicos com a matéria, como os μ (*múons*) (Evans, 1955).

Por outro lado, as radiações eletromagnéticas se propagam no vácuo na velocidade da luz ($c = 3 \cdot 10^8 m/s$), com frequência ν e comprimento de onda λ . Essas radiações são compostas por fótons de energia E_γ (Equação 1).

$$E_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

sendo h a constante de Planck ($h = 6,63 \cdot 10^{-34} J \cdot s = 4,13 \cdot 10^{-15} eV \cdot s$). Assim, a energia de um fóton é dada pela Equação 2.

$$E_\gamma = \frac{1,24 [keV \cdot nm]}{\lambda} \quad (2)$$

Para que a radiação seja ionizante, ela precisa ter energia o suficiente para desfazer a ligação de um elétron do átomo, determinada energia de ionização. Para isso, a energia do fóton ou da partícula deve ser igual ou superior à energia de ligação do elétron. A Tabela 1 lista os valores da energia de ligação das camadas K e L de alguns átomos.

Tabela 1 - Energia de ligação de alguns elementos (Sevier, 1979; Zhan; Ni-Chols; Dixon, 2003).

Z	Átomo	Símbolo	Energia de ligação das camadas (eV)		
			K	L ₁	L ₂
1	Hidrogênio	H	13,6		
		H ₂	13,6		
2	Hélio	He	24,59		
3	Lítio	Li	57,2	3,4	
4	Berílio	Be	115,6	9,32	
5	Boro	B	191	14,05	
6	Carbono	C	289,3	19,39	11,23

Dessa forma, um fóton de energia $E\gamma = 12,42$ eV (radiação ultravioleta) seria apenas capaz de ionizar elementos como lítio, berílio ou carbono. No entanto, devido à baixa penetrabilidade da radiação ultravioleta na matéria, ela não é comumente classificada como ionizante (Attix, 2010).

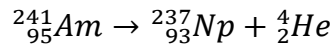
2.2 Decaimento Radioativo

Radioisótopos são núclídeos instáveis de determinados elementos que emitem radiação na forma de partículas α , β^- , β^+ ou fótons γ . Cada radionuclídeo possui um tempo característico de meia-vida, definido como o intervalo necessário para que metade da quantidade de uma amostra radioativa se desintegre espontaneamente.

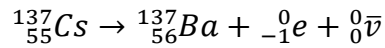
Tabela 2 - Meia-vida de alguns radionuclídeos (Oliveira *et al.*, 2006).

Z	Símbolo	Meia vida
1	³ H	4,5·10 ³ dias
2	¹¹ C	20,4 minutos
3	¹⁴ C	2,1·10 ⁶ dias
4	^{99m} Tc	6 horas
5	²³⁵ U	7,1·10 ⁸ anos
6	²⁴¹ Am	432,2 anos

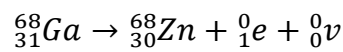
A Figura 1 apresenta os principais modos de decaimento radioativo em forma de carta de núclídeos. O decaimento α é típico de núcleos pesados e consiste na emissão de um núcleo de hélio (${}^4_2\text{He}$), como ilustrado no exemplo a seguir (Evans, 1955):



Núcleos com excesso de nêutrons tendem a decair por emissão de partículas β^- , processo que também envolve a emissão de um antineutrino (${}^0_0\bar{\nu}$):



Já núcleos com excesso de prótons em relação ao número de nêutrons podem decair por emissão de partículas beta β^+ , acompanhada da emissão de um neutrino (${}^0_0\nu$):



Outra possibilidade, no caso em que a diferença de massa entre o núcleo pai e o núcleo filho é inferior a 1,022 MeV, é o processo de captura eletrônica. Nele, o núcleo instável captura um elétron de uma de suas camadas internas e emite um neutrino, sem emitir uma partícula carregada (Evans, 1955).

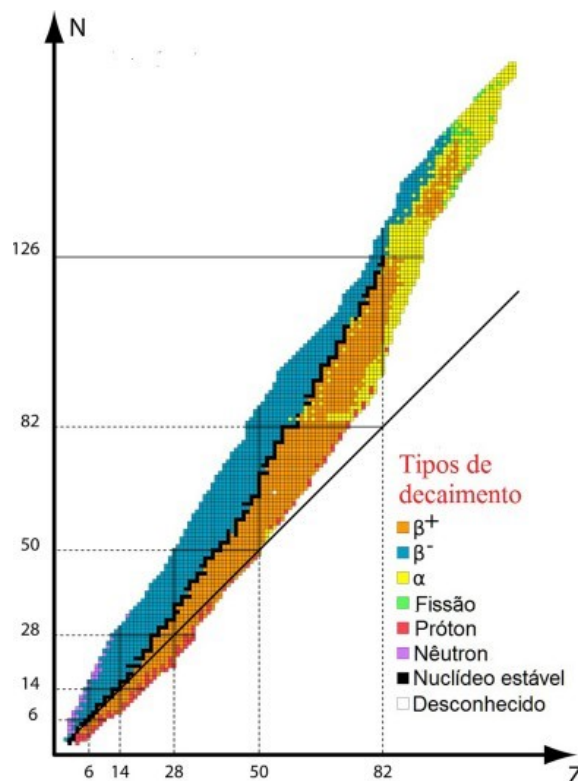
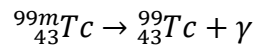


Figura 1 - Linha de estabilidade dos nuclídeos. Cada cor representa a categoria de decaimento do nuclídeo. A linha diagonal representa os núcleos quais $N = Z$, enquanto a linha em preto, central aos quadrados coloridos, representa os nuclídeos estáveis (Galetti; Mizrahi, 2019).

Além desses processos, existe ainda o decaimento γ , que ocorre quando o núcleo permanece em estado excitado mesmo após o decaimento α ou β . Nessa situação, o núcleo não se transforma em outro elemento, mas libera o excesso de energia emitindo um fóton gama:



2.3 CÂMARA DE NUVENS

A câmara de nuvens, ou também chamada de câmara de Wilson, é um detector de radiação criado pelo físico escocês Charles Thomson Rees Wilson em 1911, que recebeu o prêmio Nobel de Física, em 1927, pela criação. O equipamento é capaz de traçar a trajetória das partículas produzidas no decaimento de materiais radioativos, através da condensação do vapor d'água supersaturado, e é utilizado no estudo da física de partículas elementares e de raios cósmicos (Laganá, 2011). Foi com uma câmara de nuvens que o pósitron (β^+) foi descoberto, através do estudo de partículas elementares de Carl David Anderson, em 1932 (Pinheiro, 2015). O registro histórico dessa trajetória pode ser observado na Figura 2. Posteriormente, Carl Anderson também participou da descoberta dos múons (μ^-), utilizando também a câmara de nuvens (Eisberg; Resnick, 1979).

O equipamento funciona como uma câmara de ionização, utilizando um vapor supersaturado como volume sensível à radiação ionizante. Partículas carregadas ionizam o vapor supersaturado, que irá se condensar, formando nuvens visíveis seguindo o caminho destas partículas, conforme poder de penetração do tipo de radiação incidente (Pinheiro, 2015).

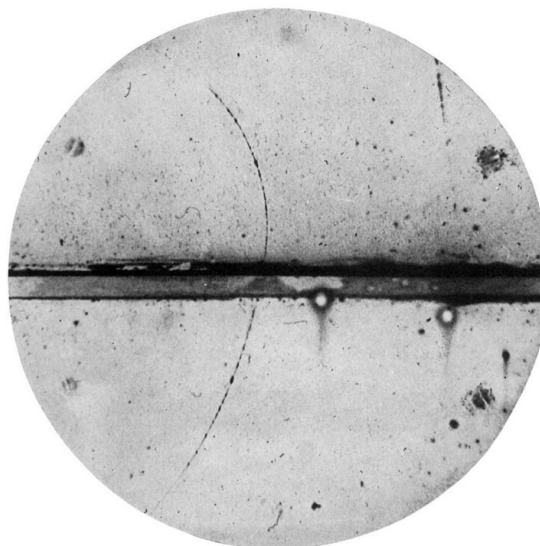


Figura 2 - Primeiro registro da trajetória de um pósitron. Carl Anderson descreveu que o comprimento do traço feito pela partícula era no mínimo dez vezes maior que o traço de um próton (Anderson, 1933).

2.3.1 Arranjo e funcionamento da câmara de nuvens

A câmara de nuvens originalmente construída por Wilson operava com base na expansão do vapor interno como método para supersaturação. Assim, os traços produzidos pela câmara eram visíveis apenas durante alguns segundos. Em seus trabalhos Langsdorf Jr. (1939, 1950) desenvolveu uma câmara de nuvens que funcionava por meio do ciclo de difusão do vapor utilizado, o que dava a capacidade à câmara de funcionar por horas.

O equipamento desenvolvido é constituído de um recipiente de vidro apoiado em uma superfície condutora de calor sobre um reservatório de temperatura abaixo de -50°C , geralmente utilizado o gelo seco, que pode ser substituído pelo nitrogênio líquido (Silva *et al.*, 2018) ou outro sistema de refrigeração. Na parte superior interna do recipiente, deve haver um material que absorva uma quantidade suficiente de álcool etílico (ou outro líquido, que será utilizado para formar o vapor supersaturado no interior da câmara), como uma folha de feltro (Pinheiro, 2015) ou um pedaço de papel (Laganá, 2013). Um esquema da câmara de nuvens é apresentado na Figura 3.

Quando em operação, o álcool (isopropílico/etílico) presente no papel absorvente à temperatura ambiente evapora, saturando o volume superior da câmara. Como a base do equipamento é mantida a uma temperatura muito baixa, cria-se um gradiente vertical de temperatura. Ao se difundir para o fundo, o vapor resfria-se rapidamente, atingindo um estado supersaturado próximo à superfície da placa condutora. Nessa região instável, o vapor está pronto para se condensar sobre qualquer partícula ou íon que atue como núcleo de condensação (Pinheiro, 2015).

A reação acima descrita irá acontecer enquanto houver álcool no topo da placa, dando sequência a um ciclo de convecção no interior da câmara de nuvens. A camada de vapor mais próxima da superfície condutora da câmara estará em um estado supersaturado, local este que dá início ao experimento.

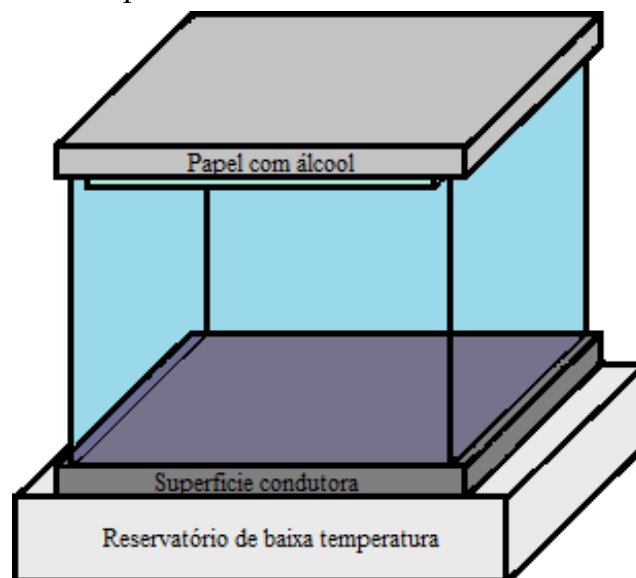


Figura 3 - Esquema da câmara de nuvens (O autor, 2025).

Quando uma partícula carregada, proveniente de um decaimento radioativo ou de raios cósmicos, por exemplo, atravessa o vapor supersaturado, ela ioniza as moléculas do gás ao longo de sua trajetória. Esses íons atuam como núcleos de condensação, atraindo as moléculas de vapor e formando gotículas visíveis que delineiam o caminho da partícula. A espessura do traço é proporcional ao poder de frenagem (perda de energia por unidade de comprimento, dE/dx), enquanto o comprimento da trilha corresponde ao alcance total da partícula no meio (Tauhata *et al.*, 2014; Pinheiro, 2015).

2.4 Sistema de Refrigeração Termoelétrico com Pastilhas Peltier

A baixa temperatura da base da câmara de nuvens é essencial para permitir a formação de uma região de vapor supersaturado, região em que as partículas ionizantes deixam seus rastros visíveis. Tradicionalmente, esse resfriamento é realizado com gelo seco ou nitrogênio líquido (Pinheiro, 2015). Contudo, esses métodos apresentam limitações, como alto custo, curta duração de uso e baixa portabilidade. Como alternativa, sistemas baseados no efeito Peltier têm se mostrado viáveis e eficientes, sobretudo em aplicações experimentais e didáticas (Andrade *et al.*, 2024).

O efeito Peltier é um fenômeno termoelétrico descoberto em 1834, caracterizado pela absorção ou liberação de calor em junções de materiais semicondutores distintos quando atravessadas por corrente elétrica contínua. Essa propriedade é explorada nas chamadas pastilhas termoelétricas, compostas por elementos semicondutores do tipo N e P interligados entre duas placas cerâmicas. Ao se aplicar uma diferença de potencial, uma das faces da pastilha resfria enquanto a outra aquece, sendo possível alcançar temperaturas negativas, desde que o calor do lado quente seja eficientemente dissipado (Fernandes *et al.*, 2010).

Em projetos recentes de câmaras de nuvens, como o descrito por Andrade *et al.* (2024), o uso de módulos Peltier tem permitido atingir temperaturas abaixo de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ de forma contínua e controlada, substituindo com sucesso métodos criogênicos tradicionais. Essa solução oferece vantagens como maior segurança, reutilização, baixo custo operacional e portabilidade, que são características desejáveis especialmente quando o experimento é voltado ao ensino e à divulgação científica.

2.5 Materiais cotidianos radioativos

A exposição humana à radiação ionizante de fontes naturais é um fenômeno contínuo e inevitável. Esta exposição origina-se de duas fontes principais: a radiação cósmica, vinda do espaço, e a radiação terrestre, proveniente de radionuclídeos presentes na crosta terrestre (Unsear, 2000).

Como resultado dessa exposição, os seres humanos recebem uma dose efetiva média de aproximadamente $2,4\text{ mSv}$ por ano. Esta dose é uma união de todas as fontes naturais, incluindo a radiação cósmica, a radiação gama terrestre e a radiação interna

por inalação (principalmente radônio) e ingestão de radionuclídeos presentes no solo, na água, nos alimentos e em certos produtos de consumo (Unscear, 2000).

Os materiais utilizados neste trabalho para fim de visualização do funcionamento da câmara foram selecionados por serem exemplos notáveis dessas contribuições de dose natural. Foram avaliados 7 (sete) materiais, disponíveis no cotidiano, para a análise da sua radioatividade com a câmara de nuvens, entre eles estão: radônio 222 (coletado de um ponteiro pintado com tinta a base de rádio), eletrodo com 2% de tório, vidro de urânio, detector de fumaça, areia de Guarapari, castanha do Pará, despertador analógico antigo pintado com tinta a base de rádio.

2.5.1 Radônio 222

O ^{222}Rn é um gás nobre radioativo, produto do decaimento do ^{226}Ra , e possui uma meia-vida de 3,8 dias (Unscear, 2000). Este gás é amplamente reconhecido como a principal fonte de exposição à radiação natural para a população e a segunda maior causa de câncer de pulmão, sendo superado apenas pelo tabagismo (Unscear, 2000).

O ^{222}Rn decai para ^{218}Po , emitindo uma partícula alfa, que, embora tenha um alcance muito curto em tecido biológico (da ordem de micrômetros), percorre cerca de 4,0 cm no ar (Luca et al., 2022), possuindo um alto poder de ionização (Unscear, 2000).

2.5.2 Eletrodo com 2% de Tório

No processo de soldagem TIG (do inglês, *Tungsten Inert Gas*), são utilizados diversos eletrodos de tungstênio, que são diferenciados industrialmente por códigos de cores em suas pontas. Entre os mais tradicionais está o eletrodo de “ponta vermelha”, com classificação AWS EWTh-2, que foi o item selecionado para análise neste trabalho (Twi, 2024).

A principal característica deste eletrodo é a sua composição: uma liga metálica de aproximadamente 98% de tungstênio e 2% de óxido de tório (ThO_2) (Mcdowell-Boyer, 1979). A adição de ThO_2 confere vantagens técnicas significativas ao processo de soldagem, como uma melhor ignição e estabilidade do arco elétrico, maior capacidade de corrente e uma vida útil superior à do tungstênio puro (Twi, 2024).

O ThO_2 utilizado é derivado do tório natural, cujo isótopo primordial é o ^{232}Th . Este isótopo possui uma meia-vida extremamente longa, de 14 bilhões de anos ($1,4 \cdot 10^{10}$ anos). O ^{232}Th é o primeiro isótopo de uma longa cadeia de decaimento, iniciando seu decaimento com a emissão de uma partícula α , transformando-se em ^{228}Ra (Unscear, 2000).

2.5.3 Vidro com Urânio

O vidro de urânio é um exemplo histórico de item de consumo que contém radionuclídeos naturais. Por muito tempo, desde os anos 1830, compostos de urânio (como óxidos) foram adicionados à mistura do vidro para conferir-lhe uma coloração

característica, tipicamente amarelada ou esverdeada (Kierzek; Kunicki-Goldfinger; Kasprzak, 2000).

A concentração de urânio nessas peças históricas geralmente variava de 0,1% a 2% em peso. Além disso, análises de vidros antigos, como os da Boêmia (República Tcheca), indicam que o potássio era um fundente comum, resultando também na presença do isótopo radioativo ^{40}K na composição do vidro (Kierzek; Kunicki-Goldfinger; Kasprzak, 2000).

O urânio utilizado nessas peças era o urânio natural, cujo principal isótopo é o ^{238}U . Este isótopo possui uma meia-vida de 4,47 bilhões de anos ($4,47 \cdot 10^9$ anos) e inicia sua longa cadeia de decaimento através da emissão de uma partícula α (Unsear, 2000).

2.5.4 Detector de Fumaça

Detecores de fumaça têm sido fundamentais para a segurança residencial desde que se tornaram disponíveis para uso doméstico nos anos 1960 (U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2021).

Para este trabalho, dá-se destaque ao modelo de câmara de ionização, que utiliza uma pequena fonte radioativa como componente principal. Este tipo de detector contém uma quantidade mínima de ^{241}Am , tipicamente 1 μCi . O ^{241}Am emite predominantemente partículas α e alguns fótons γ de baixa energia (U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 2021).

O princípio de funcionamento baseia-se na ionização do ar. As partículas α emitidas pela fonte de ^{241}Am ionizam as moléculas de ar dentro de uma câmara, criando íons positivos e elétrons livres. Uma pequena tensão elétrica aplicada entre dois eletrodos na câmara coleta esses íons, gerando uma corrente elétrica baixa e constante. Quando partículas de fumaça entram na câmara, elas se ligam aos íons e os neutralizam. Esta neutralização interrompe ou reduz a corrente constante, o que aciona o circuito eletrônico do alarme (U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 2021).

2.5.5 Areia de Guarapari

A radiação de fundo natural em certas regiões do Brasil é um tema de grande interesse científico, atraindo a atenção de pesquisadores. Um exemplo notável, e reconhecido internacionalmente, é a cidade de Guarapari, no litoral do Espírito Santo (Silva *et al.*, 2025).

Os altos níveis de radiação de fundo na região, especialmente em praias como a Praia da Areia Preta, deve-se à presença de areias monazíticas. A monazita é um mineral, formado pelo processo natural de intemperismo e erosão de rochas ígneas ou metamórficas. Sua relevância radiológica deve-se à sua composição, que concentra elementos radioativos primordiais, notavelmente o ^{232}Th e o ^{238}U , juntamente com seus produtos de decaimento (Silva *et al.*, 2025).

O ^{232}Th , com meia-vida de 14 bilhões de anos, e o ^{238}U , com meia-vida de 4,47 bilhões de anos, iniciam suas séries decaindo por emissão α (Unsear, 2000).

2.5.6 Castanha do Pará

Embora diversos alimentos contenham radionuclídeos de ocorrência natural (como o ^{40}K), a castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa*) é frequentemente destacada em estudos como um dos alimentos com a maior atividade específica de radionuclídeos da série do urânio e do tório.

Isso se deve à notável capacidade da castanheira de absorver certos elementos do solo. O sistema de raízes da árvore absorve o bário (um mineral essencial para a planta) e, por semelhança química, acaba absorvendo também grandes quantidades de rádio (Martins *et al.*, 2011).

Estudos científicos confirmam a presença de altas concentrações desses isótopos de rádio, notavelmente o ^{226}Ra e o ^{228}Ra (Martins *et al.*, 2011). Que decaem respectivamente por emissão α e β (Unsear, 2000).

2.5.7 Despertador Analógico Antigo com Rádio

No início do século XX, a descoberta da radioatividade gerou um fascínio que, aliado ao desconhecimento geral sobre seus perigos, levou ao surgimento de diversos produtos comerciais. Uma das aplicações de maior sucesso foi a tinta radioluminescente, usada para pintar mostradores e ponteiros de relógios para que brilhassem no escuro (Leal; Forato, 2021).

A tinta era uma mistura do isótopo ^{226}Ra com um material fosforescente, como o sulfeto de zinco. O mecanismo de brilho (radioluminescência) ocorria porque a radiação emitida pelo rádio bombardeava continuamente as partículas de zinco, fazendo-as brilhar (Leal; Forato, 2021). ^{226}Ra é um isótopo com meia-vida longa, de 1.600 anos, e decai para ^{222}Rn , emitindo partículas α (UNSCEAR, 2000).

Empresas como a *United States Radium Corporation* (USRC) contrataram jovens operárias, que ficaram conhecidas como “as garotas do rádio” (*Radium Girls*), para realizar a delicada pintura. Essas trabalhadoras eram instruídas a afinar os pincéis com os lábios, consequentemente, ingerindo a tinta de rádio. O desconhecimento dos perigos da contaminação interna levou ao adoecimento grave (como necrose da mandíbula e sarcomas) e à morte de muitas delas (Leal; Forato, 2021).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Apresentação da Câmara de Nuvens

A câmara de nuvens utilizada neste trabalho é uma otimização do protótipo desenvolvido por Andrade *et al.* (2024). O funcionamento e a construção baseiam-se no mesmo princípio do modelo de referência, porém com modificações pontuais que se mostraram necessárias e que serão detalhadas na seção seguinte.

A seguir, descreve-se o protótipo base (Andrade *et al.*, 2024) que serviu como ponto de partida.

O modelo original foi uma adaptação de um projeto de Simon (2011), utilizando uma estrutura de papelão e isopor. Essa escolha de materiais visou reduzir custos, facilitar a construção e, principalmente, conferir leveza ao equipamento, melhorando sua mobilidade para uso em aulas e eventos de divulgação.

O conjunto era composto por:

- **Câmara de Visualização:** um recipiente de vidro (aquário) com 3 mm de espessura e dimensões de $20 \times 12,5 \times 7,4 \text{ cm}^3$, vedado com silicone acético transparente. Este recipiente era encaixado em uma base de isopor.
- **Fonte de Vapor:** uma moldura interna de madeira com tiras de feltro, que, quando embebidas em álcool isopropílico, servem como fonte de vapor.
- **Sistema de Refrigeração:** o componente central era uma placa de cobre de 0,5 mm (base fria) refrigerada por três pares de módulos Termoelétricos (TEC). Cada par era uma montagem empilhada, com um TEC-12708 (80 W) refrigerando um TEC-12706 (60 W). Cada par de TECs era acoplado a um dissipador de calor de alto desempenho do tipo fan.
- **Fixação:** o conjunto de refrigeração era fixado com parafusos e porcas soldadas à placa de cobre, utilizando placas de PCB (*Printed Circuit Board*) como isolante para minimizar a transferência de calor indesejada dos parafusos para a placa fria.
- **Ventilação:** quatro ventiladores (*coolers*) eram posicionados na estrutura de papelão para garantir o fluxo de ar nos dissipadores, sendo dois para entrada de ar frio e dois para exaustão de ar quente.
- **Visualização e Contraste:** duas barras de LED COB (*Chip on Board*) laterais, montadas em perfis de alumínio, iluminavam a região sensível. Toda a base de isopor e a placa de cobre eram revestidas com película de vinil preta fosca para maximizar o contraste dos traços.
- **Alimentação e Controle:** o sistema era alimentado por uma fonte ATX

(Corsair CX600) e os componentes elétricos (LEDs, TECs e ventiladores) eram gerenciados por uma unidade de controle, que no protótipo original era separada da estrutura principal.

3.2 Otimizações do Protótipo

O projeto de otimização buscou aprimorar a robustez, portabilidade, segurança e eficiência do protótipo original. Para isso, componentes do modelo base foram reaproveitados, mas a estrutura física e o sistema de controle elétrico foram inteiramente reconfigurados.

3.2.1 Estrutura e Gabinete

Visando a robustez e a portabilidade, a estrutura original de papelão e isopor foi substituída por uma caixa em madeira compensada, um material leve e de alta resistência mecânica. O gabinete, com dimensões de 40,5 cm x 28,5 cm x 18 cm, foi projetado para abrigar todos os componentes em um único volume (fonte de alimentação, sistema de refrigeração e painel de controle), tornando o equipamento compacto.

A tampa superior da caixa foi usinada com duas aberturas principais: uma para o encaixe da base fria (descrita a seguir) e outra para a instalação do painel de controle.

A montagem final é apresentada na Figura 4.



Figura 4 - Montagem final do protótipo otimizado da câmara de nuvens (O autor, 2025).

3.2.2 Otimização da Base Fria e Isolamento

A superfície de acoplamento entre a câmara de vidro e os módulos Peltier, referida como “base fria”, foi um ponto focal da otimização. Um processo iterativo de design foi conduzido para selecionar o material ideal, buscando o equilíbrio entre isolamento térmico e resistência mecânica.

Foram testados quatro materiais:

- Isopor: apresentou excelente isolamento térmico, mas foi descartado por sua baixa resistência mecânica.
- Polietileno: demonstrou bom isolamento e ótima resistência mecânica, contudo, sua alta dureza dificultou a usinagem e moldagem precisas.
- Madeira: ofereceu a melhor combinação de resistência e isolamento, mas apresentou dificuldades de manuseio, corte e molde, além de adicionar peso significativo ao conjunto.
- Impressão 3D (Solução Adotada): a solução final foi projetar a peça no software de modelagem 3D Blender.

O projeto 3D consistiu em um retângulo com três aberturas quadradas centralizadas, dimensionadas com uma folga de 0,05 cm em relação às dimensões das pastilhas Peltier, garantindo um alinhamento perfeito. Foi incluído também um sulco de vedação no perímetro da peça para o encaixe preciso do aquário de vidro. A peça foi fabricada em impressão 3D com filamento PLA (ácido polilático) e 60% de densidade de preenchimento (*infill*), resultando em uma peça como mostrado na Figura 5, com as características ideais de resistência mecânica e isolamento térmico.

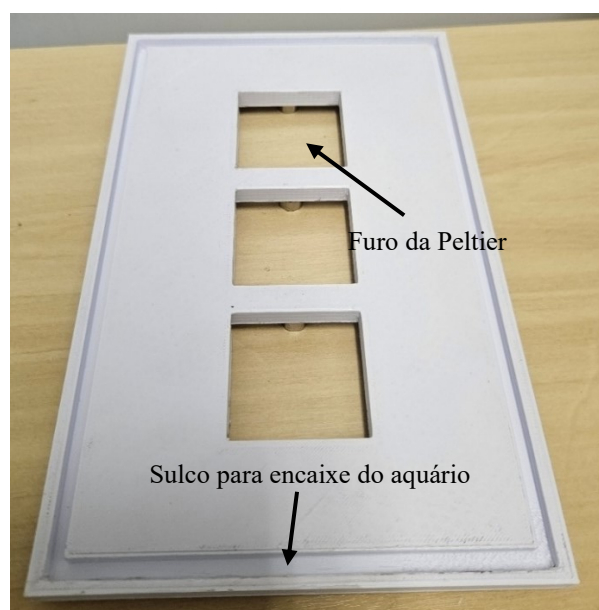


Figura 5 – Superfície da câmara de nuvens projetada e impressa em impressora 3D (O autor, 2025).

É importante notar que uma modificação crítica em relação ao protótipo original (Andrade *et al.*, 2024) foi a eliminação da placa de cobre, que anteriormente atuava como a superfície fria unificada.

Após a montagem da nova estrutura, testes preliminares com a placa de cobre indicaram que o sistema não conseguia atingir a temperatura operacional alvo (abaixo de -25°C). Múltiplas reconfigurações e testes foram realizados para otimizar a troca térmica, porém sem sucesso.

Diante disso, optou-se por um design de resfriamento direto. A nova superfície fria é composta diretamente pelas três áreas superiores dos módulos Peltier (TEC-12706). Como detalhado no projeto da base 3D, estas superfícies ficaram perfeitamente alinhadas e niveladas com a estrutura. Para finalizar, as três superfícies das pastilhas e a base foram revestidas com adesivo vinílico preto fosco como mostra a Figura 6, garantindo o contraste necessário para a visualização dos traços.

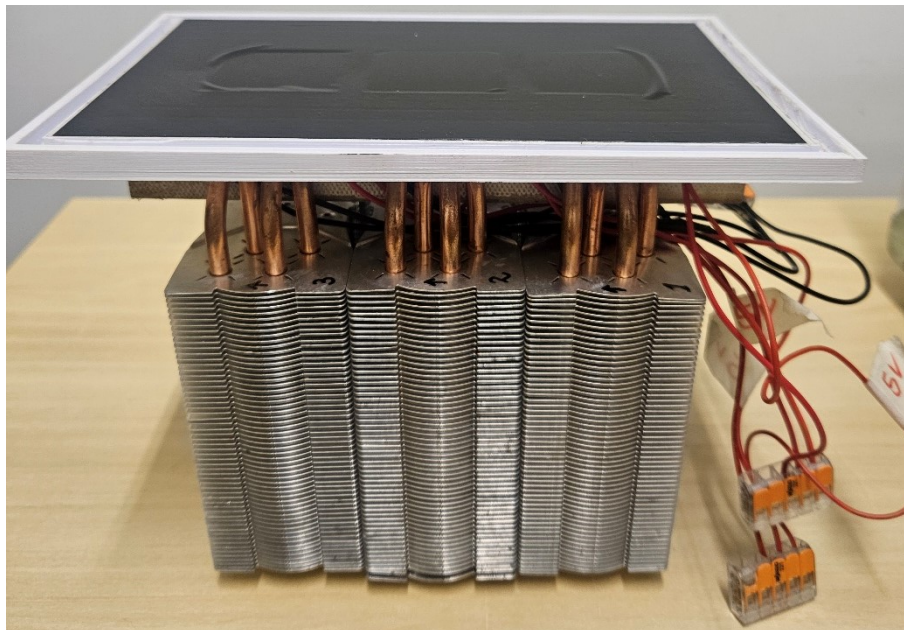


Figura 6 – Módulos Peltier e dissipadores de calor acoplados à base impressa em 3D (O autor, 2025).

3.2.3 Sistema de Refrigeração e Ventilação

Manteve-se a configuração de refrigeração em cascata do projeto anterior, visando uma temperatura de operação inferior a -25°C . Foram utilizados três conjuntos de refrigeração idênticos, posicionados em paralelo na base fria. Cada conjunto é composto por:

Um módulo TEC-12706 (60 W) alimentado em 5V, com o lado frio voltado para a câmara. Um módulo TEC-12708 (80 W) alimentado em 12V, posicionado abaixo para resfriar o lado quente do módulo de 60W. Um dissipador de calor de alto desempenho acoplado ao lado quente do módulo de 80W.

Para garantir a máxima eficiência na transferência de calor, todas as interfaces entre os componentes (TEC-12706/TEC-12708/Dissipador) foram firmemente unidas com pasta térmica. A pasta utilizada foi o modelo *Thermal Silver* da marca Implastec.

Com o novo gabinete, os quatro ventiladores (*coolers*) foram reposicionados para otimizar o fluxo de ar, mantendo o princípio de ventilação cruzada: dois ventiladores para admissão de ar frio em uma lateral e dois para exaustão de ar quente na lateral oposta.

3.2.4 Sistema Elétrico e de Controle

O sistema elétrico foi inteiramente reconfigurado visando a segurança operacional, especialmente considerando a alta corrente do sistema (estimada em 22 A).

- Fonte de Alimentação: foi reaproveitada a fonte ATX de 600W. Para gerenciar a alta corrente, os fios de saída foram unificados por tensão (4 fios para 12V, 4 para 5V e 6 para 0V/Terra). As saídas de 0V foram crimpadas em um único terminal ilhós e distribuída com conector Wago.
- Placa de Controle (PCB): uma placa de circuito impresso (PCB) em fenolite cobreada foi confeccionada manualmente. Os fios unificados de 5V e 12V foram soldados direto na placa, com uma saída de fios de 6mm direto para as Peltier. O circuito foi projetado para que a chave seletora principal do painel opere em baixa corrente, acionando apenas as bobinas de dois relés de potência modelo JQC-3F. Esses relés comutam a alta corrente (12V e 5V) para os módulos Peltier, evitando o superaquecimento e a falha das chaves do painel.
- Controles do Painel: duas chaves do tipo gangorra foram usadas para o acionamento independente dos ventiladores e das barras de LED (12V).
- Segurança (Intertravamento): foi implementado um intertravamento de segurança: a alimentação da chave seletora das Peltier foi seccionada em série com a chave dos ventiladores. Isso garante que os módulos Peltier só possam ser ligados se os ventiladores já estiverem acionados, protegendo os TECs contra superaquecimento e queima.
- Segurança (Desligamento de Emergência): um botão de emergência tipo "cogumelo" foi instalado no painel. Ao ser acionado, ele interrompe o contato entre os fios verde (PS_ON) e preto (GND) da fonte ATX, causando o desligamento imediato de todo o sistema.
- Monitoramento: o termômetro digital foi reaproveitado para medir a temperatura ambiente externa, permitindo o cálculo do diferencial de temperatura (ΔT) em relação à superfície fria da câmara.

Toda a lógica do sistema de controle, incluindo o intertravamento de segurança, é detalhada no diagrama elétrico da Figura 9.

e aproximando-a da câmara.

3.3.2 Seleção e Preparação das Amostras

Para a análise da radioatividade em materiais do cotidiano, foram selecionadas diversas amostras conhecidas por sua baixa atividade radioativa. A seleção buscou exemplificar fontes de radiação ionizante comumente encontradas em ambientes domésticos ou de fácil aquisição.

A triagem inicial e a confirmação da radioatividade de itens adquiridos em feiras de antiguidades (vidro de urânio e ponteiro do despertador) foram realizadas com o auxílio de uma lâmpada de luz ultravioleta (UV) e de um contador Geiger-Müller portátil, protótipo baseado na plataforma Arduino desenvolvido por Cruz (2024).

As amostras analisadas foram:

- **Eletrodo de Tungstênio (ponta vermelha):** eletrodo de "ponta vermelha", com classificação AWS EWTh-2 é um componente utilizado em soldagem TIG, cuja liga metálica contém aproximadamente 2% de Tório (^{232}Th).
- **Vidro de Urânio (*Uranium Glass*):** item decorativo de vidro adquirido em uma feira de antiguidades. A identificação foi confirmada pela sua fluorescência característica sob luz UV e pela medição de atividade acima do nível de fundo com o contador Geiger-Müller (CRUZ, 2024).
- **Ponteiro de Despertador com Rádio:** componente de um despertador antigo (marca Westclox, modelo Spur Style 1, c. 1938-1958), (também adquirido em uma feira de antiguidade). A tinta luminescente utilizada nos ponteiros e mostradores desta época continha Rádio-226 (^{226}Ra).
- **Areia Monazítica:** uma amostra de areia de Guarapari (ES), proveniente do acervo do Laboratório de Radiações Ionizantes do Instituto de Física - UFU, conhecida por sua concentração natural de Tório e Urânio.
- **Castanha-do-Pará:** amostra comercial adquirida em supermercado, conhecida pela sua capacidade de bioacumulação de Rádio.
- **Câmara de Ionização de Detector de Fumaça:** componente interno de um detector de fumaça ionizante comercial (adquirido em loja virtual), que contém uma fonte selada de Amerício-241 (^{241}Am).
- **Gás Radônio (Rn-222):** esta amostra não foi adquirida diretamente, mas sim coletada como um produto do decaimento de outra amostra, conforme descrito na seção a seguir.

Uma composição fotográfica de todas as amostras analisadas é apresentada na Figura 10.

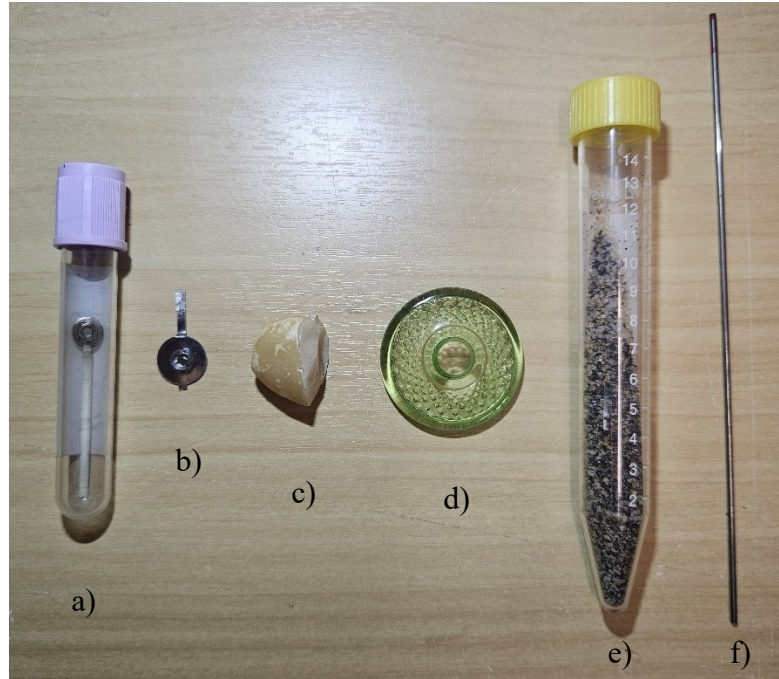


Figura 8 – Materiais radioativos analisados no experimento. Sendo: (a) Tubo a vácuo com ponteiro de rádio e radônio; (b) Fonte de ^{241}Am do detector de fumaça; (c) Castanha-do-pará; (d) Vidro de urânio; (e) Amostra de areia monazítica; (f) Eletrodo de tungstênio com tório (O autor, 2025).

3.3.3 Preparação da Amostra de Radônio (^{222}Rn)

Uma preparação metodológica específica foi necessária para isolar e utilizar o ^{222}Rn , um gás nobre radioativo gerado pelo decaimento do ^{226}Ra presente no ponteiro de relógio utilizado como fonte.

O procedimento adotado foi o seguinte:

Selamento da fonte: o ponteiro contendo ^{226}Ra foi inserido em um tubo de coleta de sangue a vácuo, garantindo um ambiente hermético adequado à emanância e ao acúmulo do ^{222}Rn .

Período de acúmulo: a amostra permaneceu em repouso por 22 dias, tempo estimado com base na lei de crescimento da atividade de um radionuclídeo em equilíbrio secular (Knoll, 2011; Krane, 1987).

A atividade do radônio ao longo do tempo segue:

$$A_{\text{Rn}} = A_{\text{Ra}}(1 - e^{-\lambda t})$$

onde λ é a constante de decaimento definida por:

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$$

sendo a meia-vida do ^{222}Rn igual a 3,823 dias, conforme tabelas da ICRP (ICRP, 2008).

Assim:

$$\lambda = \frac{0,693}{3,823} \approx 0,181 \text{ dia}^{-1}$$

A fração da atividade de equilíbrio atingida após um tempo t é dada por:

$$f(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

Substituindo $t = 22$ dias:

$$f(22) = 1 - e^{-0,181 \cdot 22} = 1 - e^{-3,982} \approx 0,981$$

Portanto, após aproximadamente 22 dias, a atividade de radônio acumulada atinge cerca de 98% da atividade de equilíbrio — valor considerado adequado para maximizar a concentração de ^{222}Rn sem atrasar excessivamente o preparo experimental (Knoll, 2011). O aparato para coleta e a identificação do ponteiro por fluorescência UV são mostrados na Figura 11.



Figura 9 – Ponteiro de relógio com ^{226}Ra demonstrando fluorescência sob luz ultravioleta (UV) e selado em tubo a vácuo para coleta de Radônio (O autor, 2025).

Extração da amostra: no momento do experimento, o gás acumulado foi coletado por meio de seringa com agulha, perfurando o septo do tubo sem comprometer o hermetismo. Em seguida, o radônio foi injetado diretamente na câmara de nuvens para observação das trilhas alfa resultantes do seu decaimento e de seus descendentes imediatos.

3.4 Protocolo de Medição e Aquisição de Dados

Todas as medições foram realizadas no Laboratório de Instrumentação e Dosimetria (LInDa) localizado no Instituto de Física da Universidade Federal de Uberlândia, sob condições de temperatura ambiente controlada em aproximadamente 24°C.

O protocolo experimental para a análise de cada amostra foi rigorosamente padronizado, seguindo as etapas abaixo:

1. **Preparação da Câmara:** inicialmente, a superfície fria e as paredes internas do aquário de vidro foram limpas. Em seguida, os feltros posicionados nas quinas superiores foram saturados com álcool isopropílico (99,8% de pureza).
2. **Posicionamento da Amostra:** a amostra de interesse (ou a medição de fundo, sem amostra) era posicionada no centro geométrico da superfície fria, garantindo consistência no volume sensível analisado.
3. **Sequência de Acionamento (*Start-up*):** para otimizar a formação do gradiente térmico e a rápida estabilização da nuvem, uma sequência de acionamento cronometrada foi utilizada:
 - **T=0s:** os ventiladores (coolers) do sistema de dissipação foram acionados para iniciar o fluxo de ar.
 - **T=30s:** os módulos Peltier (TECs) foram ligados, iniciando o resfriamento da superfície de observação.
 - **T=60s:** os LEDs de iluminação lateral foram ligados.
4. **Período de Estabilização:** após o acionamento dos LEDs, aguardou-se um período adicional de 30 segundos (total de 1 minuto e 30 segundos desde o início) para garantir que a temperatura da superfície estivesse totalmente estabilizada e a zona de supersaturação estivesse plenamente formada.
5. **Registro e Aquisição de Imagens:** após a estabilização, a filmagem da atividade da amostra era iniciada. As imagens foram capturadas utilizando um smartphone (Samsung Galaxy S23) montado em um tripé fixo. Para cada amostra, foi gravado um vídeo de 2 minutos, com resolução UHD (4K) a 60 quadros por segundo (fps). Os arquivos de vídeo foram armazenados para a posterior análise dos fenômenos visualizados. O arranjo experimental (*setup*) completo utilizado nas medições é visto na Figura 10.



Figura 10 - Arranjo experimental (*setup*) para aquisição de dados, demonstrando a câmera otimizada e o smartphone em tripé fixo (O autor, 2025).

3.5 Análise de dados

A análise dos dados de vídeo foi de natureza **qualitativa**, com o objetivo de documentar e caracterizar os fenômenos visuais observados para cada amostra.

O procedimento de análise foi o seguinte:

- Os arquivos de vídeo (UHD 60fps) foram transferidos para um computador para análise e pós-processamento.
- Cada vídeo de 2 minutos foi inspecionado em um software de reprodução de multimídia. Para permitir uma observação mais detalhada e a identificação de eventos de curta duração, a velocidade de reprodução foi reduzida para 0,5x.
- Durante a visualização, foram realizadas capturas de tela (*screenshots*) de quadros (*frames*) específicos.
- Os quadros selecionados foram aqueles que melhor exemplificavam os tipos de traços e interações de cada amostra. Estas imagens foram salvas e catalogadas para serem utilizadas na seção de Resultados e Discussão deste trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Desempenho e Validação do Protótipo Otimizado

O protocolo de validação (descrito na Seção 3.3.1) confirmou o sucesso da otimização do protótipo. A monitoração da temperatura da superfície fria, realizada com o multímetro (Minipa ET-2038), registou uma temperatura mínima estável de **-35°C**.

4.1.1 Discussão do Desempenho

Este valor é significativamente inferior à temperatura alvo de -25°C e demonstra a alta eficiência do novo sistema. A temperatura mais baixa resulta em um melhor gradiente térmico, o que aumenta a densidade e a estabilidade da região de vapor supersaturado.

Notou-se também uma rápida estabilização: os primeiros traços de radiação tornaram-se visíveis apenas 30 segundos após o acionamento dos módulos Peltier. A nova estrutura em madeira compensada conferiu a robustez e portabilidade desejadas, facilitando o manuseio e a operação.

4.1.2 Análise da Otimização (Prós e Contras)

A principal modificação de engenharia — a eliminação da placa de cobre e a adoção do resfriamento direto — apresentou pontos positivos e negativos.

Ponto Positivo: o ganho térmico foi significativo, permitindo atingir os -35°C, uma temperatura que não foi alcançada nos testes com a placa de cobre devido às perdas por condução térmica.

Ponto Negativo: após retirar a placa de cobre existente no projeto anterior, ocorreu a redução da área de observação. O volume sensível ficou limitado à área geométrica das três pastilhas Peltier, não sendo possível observar o trajeto completo de partículas que ultrapassavam essa periferia.

4.1.3 Efeito do Campo Eletrostático de Limpeza

O uso de um campo eletrostático externo (gerado pela régua atritada) mostrou-se uma técnica fundamental para a análise qualitativa, melhorando drasticamente a nitidez dos traços. Embora esta análise tenha sido realizada pelo autor, ressalta-se que a compreensão teórica completa de todas as nuances do fenômeno ainda não foi totalmente alcançada.

A Figura 13 demonstra o efeito em um comparativo de "antes" e "depois" para a fonte de ^{241}Am . Sem o campo (Figura 13, esquerda), a atividade da fonte é quase totalmente ofuscada por um "nevoeiro" de fundo. Após a aplicação do campo (Figura 13, direita), a intensa emissão de partículas alfa torna-se perfeitamente visível.

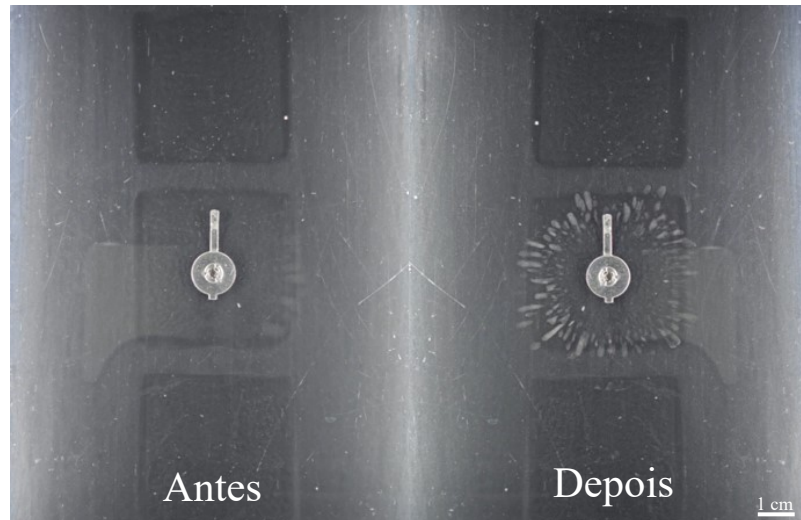


Figura 11 - Efeito do campo eletrostático na nitidez dos traços da fonte de ^{241}Am (O autor, 2025).

Este fenômeno é explicado pela limpeza de íons. A radiação de fundo cria constantemente íons "velhos" no ar, que poluem a câmara e causam condensação indesejada (o nevoeiro). O campo elétrico aplicado varre esses íons para fora da região sensível, "limpando" o fundo. Isso permite que o vapor supersaturado se condense apenas nos rastros "novos" criados pelas partículas da amostra, resultando em traços muito mais limpos e com maior contraste.

4.2 Análise Qualitativa dos Fenômenos

A análise qualitativa dos vídeos, conforme metodologia descrita na seção 3.5, permitiu a captura de imagens (screenshots) que caracterizam os diferentes fenômenos radioativos de cada amostra, conforme detalhado nas seções a seguir.

4.2.1 Radiação de Fundo (Background)

A medição da radiação de fundo (background) serve como linha de base (controle) para o experimento. Conforme esperado, a taxa de eventos observada foi baixa. No entanto, mesmo com uma contagem reduzida, foi possível identificar e caracterizar três tipos distintos de traços de partículas, apresentados na Figura 14.

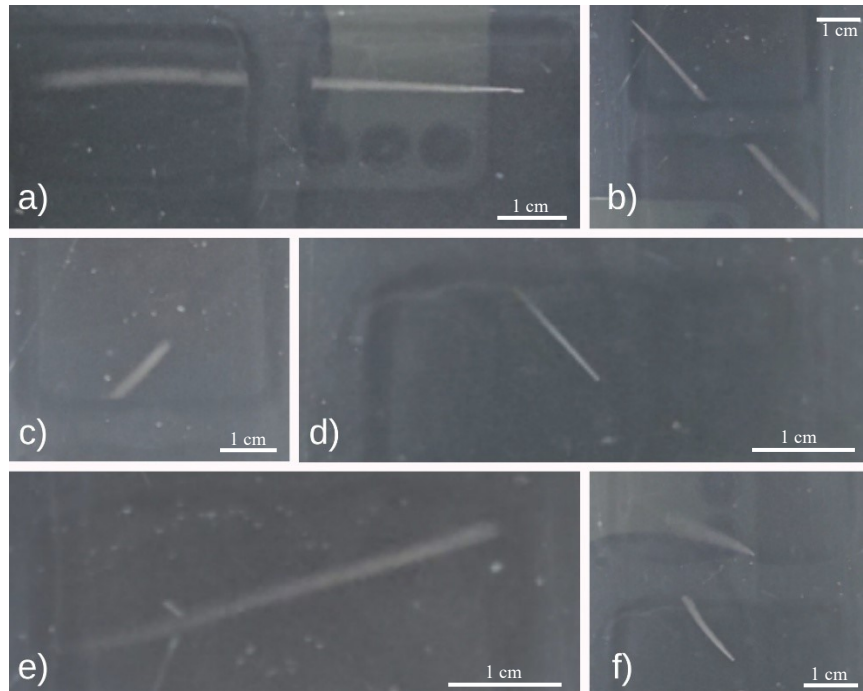


Figura 12 - Composição de traços observados na medição da Radiação de Fundo (Background). (a) Traço longo com deflexão, consistente com elétron (Efeito Compton). (b, e) Traços longos e retilíneos, consistentes com múons de raios cósmicos. (c, d, f) Traços curtos e grossos, consistentes com partículas alfa do decaimento do radônio no ar (O autor, 2025).

A análise da Figura 12 revela os seguintes eventos:

- **Traços de Múons (Raios Cósmicos):** os traços (b) e (e) são consistentes com a passagem de múons de alta energia. Estas partículas, originadas de raios cósmicos, atravessam o volume sensível em altíssima velocidade, deixando um rastro longo, fino e retilíneo. A imagem (b) ilustra uma limitação do protótipo: o traço é interrompido pela descontinuidade espacial de 1 cm entre os módulos Peltier, onde a superfície não está resfriada e, portanto, o vapor não está supersaturado.
- **Traços Alfa:** os traços (c), (d) e (f) são característicos de partículas alfa (α). Eles são curtos, retilíneos, mais grossos e densos. Este padrão é explicado pelo seu alto poder de freamento (LET); por serem partículas pesadas (núcleos de Hélio) e com carga +2, elas interagem fortemente com o meio, depositando sua energia em um alcance muito curto. Como estes traços "nascem" no meio do volume sensível, sua origem é atribuída ao decaimento do gás ^{222}Rn , que estava presente no ar do laboratório e ficou aprisionado na câmara. O Radônio emana naturalmente de materiais como solo e granito.
- **Traços de Elétrons (Efeito Compton):** o traço (a) é consistente com um elétron (partícula β). Ele possui uma trajetória longa (maior alcance que a alfa) e apresenta uma pequena deflexão ao final, indicando uma colisão com uma molécula de ar.

A origem mais provável para este elétron, que também "nasce" no meio da câmara, é o Efeito Compton . Um raio gama (γ) de fundo, invisível para a câmara, interage com um átomo no ar, transferindo energia e ejetando este elétron.

4.2.2 Análise da Fonte do Detector de Fumaça (^{241}Am)

A análise da fonte de ^{241}Am , extraída do detector de fumaça, é apresentada na Figura 15.

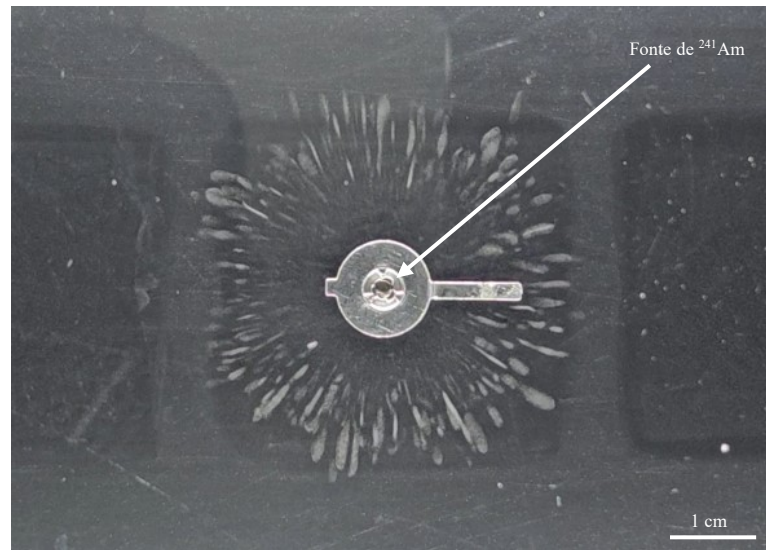


Figura 13 - Padrão de emissão da fonte pontual de ^{241}Am (O autor, 2025).

A Figura 13 demonstra de forma clara o comportamento de uma fonte pontual isotrópica, ou seja, que emite radiação em todas as direções a partir de um ponto central.

Os traços observados são visualmente 100% consistentes com o decaimento alfa (α). Eles exibem as características físicas esperadas para esta partícula, curta trajetória, traços mais grossos e caminho retilíneo.

Embora o ^{241}Am também emita raios gama de baixa energia, estes são invisíveis para a câmara (exceto por raras interações Compton, como visto na radiação de fundo). Portanto, os eventos dominantes e visualmente evidentes são os decaimentos alfa.

4.2.3 Análise do Ponteiro de Despertador (^{226}Ra)

A análise do ponteiro de despertador antigo, contendo ^{226}Ra , é apresentada na Figura 14.

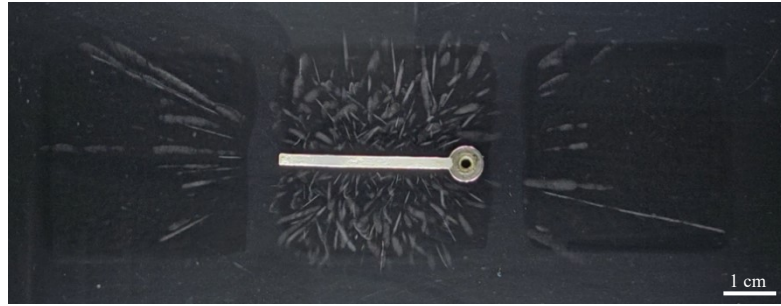


Figura 14 - Emissão radioativa do ponteiro de despertador contendo ^{226}Ra . (O autor, 2025).

A imagem demonstra uma emissão predominante de partículas alfa (α), caracterizadas pelos traços curtos, grossos e retilíneos que emanam do ponteiro. Este padrão é consistente com o decaimento do ^{226}Ra .

4.2.4 Análise do Gás ^{222}Rn

O experimento com o gás ^{222}Rn , preparado conforme a metodologia da Seção 3.3.3, validou visualmente a natureza gasosa da amostra.

Após a injeção do gás na câmara, os traços não se originaram de um ponto fixo na base, mas sim apareceram em locais aleatórios por todo o volume sensível, conforme demonstrado na Figura 15.



Figura 15 - Traços de decaimento do gás ^{222}Rn e seus descendentes (O autor, 2025).

Este padrão de "nascimento" de traços em pontos aleatórios do ar comprova que a fonte radioativa (o gás) se dispersou por todo o volume.

Deve-se considerar que, após 22 dias de acúmulo, o gás injetado continha não apenas o ^{222}Rn (emissor alfa), mas também seus descendentes de vida curta em equilíbrio, que incluem tanto emissores alfa (^{218}Po , ^{214}Po) quanto emissores beta (^{214}Pb , ^{214}Bi).

Portanto, ambos os tipos de decaimento estavam ocorrendo. No entanto, os traços visualmente dominantes, como os capturados na Figura 15, são os de partículas

alfa. A explicação reside na diferença de Poder de Freamento (LET) : partículas alfa (pesadas, carga +2) criam uma ionização muito densa, resultando em traços grossos e nítidos. Partículas beta (leves, carga -1) criam uma ionização tênue, e seus traços finos são ofuscados pelos traços alfa e pelo "nevoeiro" de fundo.

4.2.5 Análise do Vidro de Urânio

A amostra de vidro de urânio apresentou uma assinatura de decaimento mista. O resultado visual principal é apresentado na Figura 16.

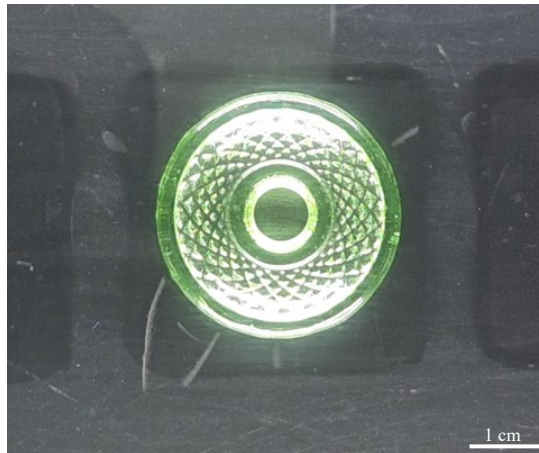


Figura 16 - Traços de decaimento mistos (alfa e beta) observados da amostra de vidro de urânio (^{238}U) (O autor, 2025).

Observam-se tanto traços alfa (curtos e grossos) quanto traços beta (longos e finos). Este resultado é esperado, pois o ^{238}U (emissor alfa) decai para o ^{234}Th , que é um forte emissor beta com meia-vida curta (24,1 dias).

A presença de ambos os tipos de traços confirma que o "pai" (^{238}U) e seus "filhos" (como o ^{234}Th) estão em equilíbrio secular dentro da matriz do vidro .

4.2.6 Análise da Areia Monazítica

A amostra de areia monazítica de Guarapari apresentou traços de partícula alfa como visto na Figura 17.

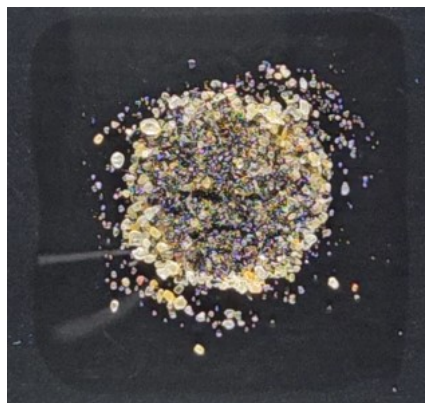


Figura 17 - Traços alfa observados na amostra de areia monazítica (O autor, 2025).

Esta observação é consistente com a composição geológica do material, que concentra radionuclídeos das cadeias do ^{232}Th e do ^{238}U . Como ambas as séries de decaimento são ricas em emissores alfa, a emissão dessas partículas era esperada.

4.2.7 Análise da Castanha-do-Pará

A amostra de castanha-do-pará também apresentou uma assinatura de decaimento mista, com evidências de traços alfa e beta, conforme demonstrado na Figura 18.

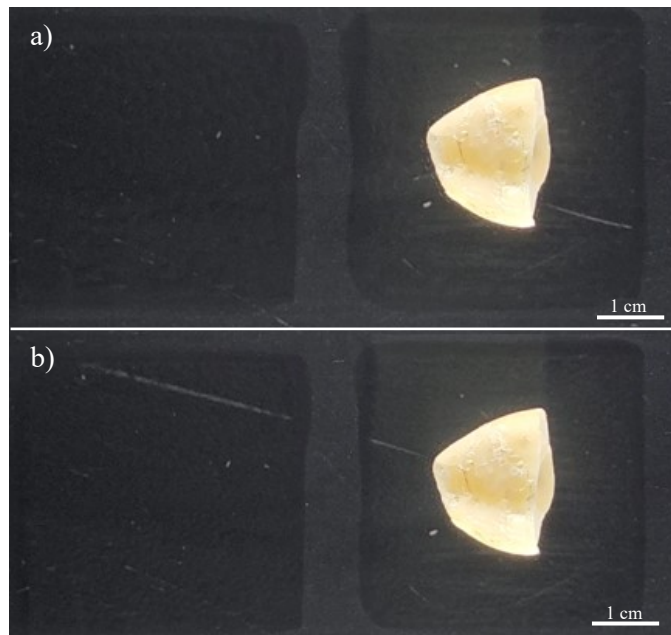


Figura 18 - Traços de decaimento mistos observados na amostra de castanha-do-pará. (a) Traço alfa curto e denso. (b) Traço beta longo e fino (O autor, 2025).

A presença de ambos os tipos de partículas estão em conformidade com a literatura, que aponta a capacidade da castanheira de bioacumular rádio. Especificamente, ela absorve tanto o ^{226}Ra (da série do ^{238}U), que é um emissor alfa (α), quanto o ^{228}Ra (da série do ^{232}Th), que é um emissor beta (β). A câmara foi capaz de detectar ambas as assinaturas, comprovando a presença de isótopos das duas principais séries radioativas naturais no alimento.

4.2.8 Análise do Eletrodo de Tório (EWTh-2)

O eletrodo de tungstênio torinado forneceu a demonstração mais clara do conceito de equilíbrio secular em uma cadeia de decaimento, como visto na Figura 19.

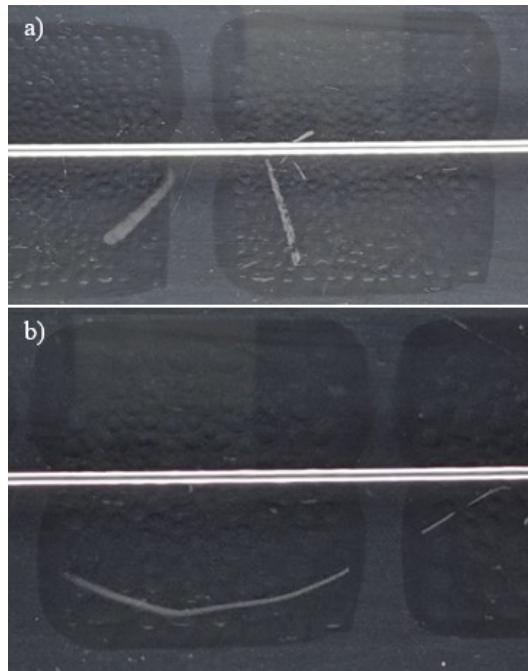


Figura 19 - Assinatura mista de decaimento do eletrodo de ^{232}Th . (a) Emissão de partículas alfa (traços densos e curtos). (b) Emissão de uma partícula beta (traço longo, fino e com deflexão) (O autor, 2025).

Embora o isótopo "pai" da cadeia, o ^{232}Th , seja um emissor puramente alfa, a Figura 19 (b) mostra claramente um traço beta (longo, fino e com desvio por colisão).

Isso se deve ao fato de que, dentro do eletrodo metálico sólido, o ^{232}Th está em equilíbrio secular com seus "filhos". O primeiro descendente, o ^{228}Ra , é um emissor beta. O próximo, ^{228}Ac , também decai por beta. A câmara foi, portanto, capaz de visualizar simultaneamente diferentes etapas da mesma cadeia de decaimento, provando a presença dos descendentes radioativos no material.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho obteve êxito em seus objetivos, oferecendo melhorias tanto estéticas quanto funcionais ao projeto inicial (Andrade *et al.*, 2024), apresentando boa otimização em sua operação, resistência e confiabilidade. Tais melhorias possibilitaram alcançar temperaturas inferiores à meta de -25°C e ao desempenho do projeto anterior. Além disso, possibilitou-se observar com clareza os fenômenos radioativos, empregando materiais comuns do cotidiano, até mesmo aqueles com baixíssima atividade, como a castanha-do-pará.

O atual projeto demonstrou alta capacidade qualitativa na observação dos fenômenos, possibilitando identificar diferentes tipos de partículas e suas assinaturas morfológicas como: traços de múons (longos e finos), partículas alfa (curtas e densas) e partículas beta (longas e erráticas). Além disso, a câmara de nuvens permaneceu estável em todos os testes feitos, até mesmo em longas apresentações sob diferentes condições de temperatura ambiente. Notavelmente, a câmara permitiu a demonstração visual de conceitos físicos complexos, como o equilíbrio secular nas amostras de Tório e Urânio, e os diferentes tipos de decaimento radioativo.

As análises feitas foram puramente qualitativas e as modificações diminuíram a área sensível do dispositivo. Como sugestão para futuros trabalhos, propõe-se reavaliar o uso de uma placa de metal, buscando um balanço entre a maior área sensível e a eficiência térmica. Sugere-se também implementar uma avaliação quantitativa dos vídeos, utilizando programa de análise de imagens, e o acoplamento de um sistema que gere um campo elétrico de forma eficaz e controlada.

Em suma, esse trabalho se mostrou de grande importância para o estudo e ensino em física, mostrando na prática conceitos importantes da física moderna. Com sua robustez e funcionalidade, o equipamento validou seu desempenho técnico, tornando-se uma ferramenta confiável para fins didáticos, tanto em salas de aula quanto em laboratórios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, Carl David. The positive electron. **Physical Review**, [S.l.], v. 42, n. 6, p. 491-494, 1933.
- ANDRADE, F. B. et al. A thermoelectric cloud chamber: I. Redesign and operation. **European Journal of Physics**, [S.l.], v. 45, n. 3, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ad230e>.
- ATTIX, Frank Herbert. **Introduction to radiological physics and radiation dosimetry**. Weinheim: Wiley-VCH, 2010.
- CRUZ, Felipe Beraldo da. **Construção de um Geiger-Müller a partir da plataforma Arduino**. 2024. 40 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Física Médica) – Instituto de Física, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.
- EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. **Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas**. Rio de Janeiro: Campus, 1979.
- EVANS, Robley D. **The atomic nucleus**. New York: McGraw-Hill, 1955.
- FERNANDES, J. D. F. S. et al. Refrigeração utilizando pastilhas de efeito Peltier. **Holos**, [S.l.], v. 2, p. 119-126, 2010.
- GALETTI, Diógenes; MIZRAHI, Salomon S. As linhas fronteiriças dos constituintes da matéria. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 41, n. 1, e20180208, 2019.
- ICRP – INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. ICRP Publication 107: Nuclear decay data for dosimetric calculations. **Annals of the ICRP**, v. 38, n. 3, 2008.
- KIERZEK, Joachim; KUNICKI-GOLDFINGER, Jerzy J.; KASPRZAK, Aleksandra J. Measurements of natural radioactivity in historical glasses. **Glastechnische Berichte - Glass Science and Technology**, v. 73, n. 7, 2000.

- KNOLL, Glenn F. **Radiation detection and measurement**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2011.
- KRANE, Kenneth S. **Introductory nuclear physics**. New York: John Wiley & Sons, 1987.
- LAGANÁ, Caio. Decaimentos nucleares em uma câmara de nuvens. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 35, n. 3, 2013.
- LAGANÁ, Caio. Estudo de raios cósmicos utilizando uma câmara de nuvens de baixo custo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 33, n. 3, 2011.
- LANGSDORF JUNIOR, Alexander Suss. A continuously sensitive cloud chamber. **Review of Scientific Instruments**, v. 21, n. 12, p. 917, 1950.
- LANGSDORF JUNIOR, Alexander Suss. A continuously sensitive diffusion cloud chamber. **Review of Scientific Instruments**, v. 10, n. 3, p. 91, 1939.
- LEAL, Karel; FORATO, Thais Cyrino de Mello. As garotas do rádio e sua busca por justiça e dignidade: possibilidades de abordagens históricas para o ensino de ciências. **Revista Brasileira de História da Ciência**, v. 14, n. 2, 2021. DOI: 10.53727/rbhc.v14i2.539.
- LUCA, Aurelian *et al.* Recent Progress in Radon Metrology at IFIN-HH, Romania. **Atmosphere**, v. 13, n. 3, 363, fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos13030363>. Acesso em: 09 fev. 2026.
- MARTINS, Maristela et al. Brazil nuts: determination of natural elements and aflatoxin. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 41, n. 1, p. 509-512, 2011.
- MCDOWELL-BOYER, L. M. **Estimated radiation doses from thorium and daughters contained in thoriated welding electrodes**. Oak Ridge: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1979. (Relatório NUREG/CR-1039, ORNL/NUREG/TM-344).

- OKUNO, Emico; YOSHIMURA, Elisabeth Mateus. **Física das radiações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- OLIVEIRA, Rita et al. Preparações radiofarmacêuticas e suas aplicações. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, São Paulo, v. 42, n. 2, p. 151-165, 2006.
- PINHEIRO, Lisiane Araujo. A câmara de nuvens: uma abordagem integrada entre a Física Clássica e a Física Moderna. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 32, n. 2, p. 517–528, 2015.
- SEVIER, Kenneth D. Atomic electron binding energies. **Atomic Data and Nuclear Data Tables**, v. 24, n. 4, p. 323-371, 1979.
- SILVA, J. A. S. et al. Análise do perfil radiométrico dinâmico da Praia da Areia Preta. In: ENCONTRO CIENTÍFICO DE FÍSICA APLICADA, 15., 2025, Vitória. **Anais [...]**. Vitória: [Editora], 2025. p. 1.
- SILVA, Lucas Maquedano da et al. CÂMARA DE NUVENS: uma proposta experimental didática. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 6., 2018, Ponta Grossa. **Anais [...]**. Ponta Grossa: UTFPR, 2018.
- SIMON, J. **Do it yourself guide part I: how to build a diffusion cloud chamber**. [S.l.]: Cloudylabs, 2011. Disponível em: <http://cloudylabs.fr/wp/wp-content/uploads/2013/12/DIY-Wilson.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2025.
- TAUHATA, L. et al. **Radioproteção e dosimetria: fundamentos**. 10. ed. Rio de Janeiro: CNEN, 2014.
- TWI. **FAQs: The use of thoriated tungsten electrodes**. [S.l.]: TWI Ltd, 2024. Disponível em: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-the-use-of-thoriated-tungsten-electrodes>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. Exposures from natural radiation sources. In: UNITED NATIONS.

Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. v. 1: Sources. New York: United Nations, 2000.

U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Backgrounder on Smoke Detectors.**
[S.l.]: U.S. NRC, 2021. Disponível em: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/smoke-detectors>. Acesso em: 11 nov. 2025.

ZHAN, Chang-Guo; NICHOLS, Jeffrey A.; DIXON, David A. Ionization potential, electron affinity, electronegativity, hardness, and electron excitation energy: molecular properties from density functional theory orbital energies. **The Journal of Physical Chemistry A**, v. 107, n. 20, p. 4184-4195, 2003.