



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO SERTÃO
PERNAMBUCANO – CAMPUS SALGUEIRO
COORDENAÇÃO DO CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA
LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA**

GABRIEL GOMES SILVA

**RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA NO TUBO DE RAIOS CATÓDICOS: UMA
INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO FOTOELÉTRICO**

SALGUEIRO

2023

GABRIEL GOMES SILVA

**RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA NO TUBO DE RAIOS CATÓDICOS: UMA
INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO FOTOELÉTRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do curso de Licenciatura em
Física do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano,
Campus Salgueiro, como requisito parcial à
obtenção do título de Graduado em
Licenciatura em Física.

Orientador (a): Prof. Ms. Samuel dos Santos
Feitosa.

Coorientador (a): Prof. Dr. Marcelo Souza da
Silva.

SALGUEIRO

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S111 SILVA, Gabriel Gomes.

Radiação Eletromagnética No Tubo De Raios Catódicos : Uma Investigação Experimental Do Efeito Fotoelétrico / Gabriel Gomes SILVA. - Salgueiro, 2024.
60 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) -Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Salgueiro, 2024.
Orientação: Prof. Msc. Samuel dos Santos Feitosa.
Coorientação: Dr. Marcelo Souza da Silva.

1. Física Moderna. 2. Efeito Fotoelétrico. 3. Tubo de Raios Catódicos. 4. Experimento. 5. Radiação Eletromagnética. I. Título.

CDD 539

GABRIEL GOMES SILVA

**RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA NO TUBO DE RAIOS CATÓDICOS: UMA
INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO FOTOELÉTRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do curso de Licenciatura em Física do
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Sertão Pernambucano, Campus Salgueiro, como
requisito parcial à obtenção do título de Graduado em
Licenciatura em Física.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ms. Samuel dos Santos Feitosa - Orientador
IF Sertão PE – Campus Salgueiro

Prof. Dr. Marcelo Souza da Silva - Coorientador
IF Sertão PE – Campus Salgueiro

Prof. Ms. Getúlio Eduardo Rodrigues de Paiva - Membro Interno
IF Sertão PE – Campus Salgueiro

Prof. Ms. Cícera Raquel de Melo Viana - Membro Externo

SALGUEIRO

2023

“Dedico este trabalho a minha família e aos meus amigos, colegas de graduação e a todos que me apoiaram durante minha trajetória acadêmica.”

“Em especial em homenagem aos meus queridos pais José Amaro da Silva e Laurita Gomes Sena, que sempre estiveram ao meu lado e me apoiaram em tudo.”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha profunda gratidão a Deus, pelas bênçãos recebidas, pela saúde, proteção e força que me fizeram chegar ao fim de mais uma etapa em minha trajetória acadêmica.

Em segundo lugar, agradeço à minha família e aos meus irmãos em Cristo Jesus da IMEBB, onde congregar. Suas orações e encorajamento foram fundamentais em minha caminhada, para não desanimar e sempre persistir. Agradeço aos meus amigos mais próximos, Luiz João, Germano Gabriel, Gelson Manuel, Jonatas André e Gleissiano Santos, que sempre me apoiaram e motivaram.

Meus agradecimentos se estendem aos meus colegas de graduação, em especial a Davi Augusto Gonçalves Ribeiro, Gabriela Gislaine Rodrigues de Araújo e João Lucas Ribeiro. Juntos, vivenciamos momentos especiais durante nossa trajetória acadêmica, repletos de risadas, brincadeiras, discussões e madrugadas de estudo. Essas experiências enriqueceram não apenas nosso conhecimento acadêmico, mas também nossa vida pessoal.

Ao meu orientador, o Professor Samuel dos Santos Feitosa, expresso minha sincera gratidão pela amizade, esforço e dedicação na orientação. Suas ideias e sugestões foram muito relevantes na elaboração do trabalho. Quero também agradecer ao meu coorientador, cuja contribuição foi fundamental em todas as etapas da pesquisa. Suas orientações, sugestões e ensinamentos foram cruciais para o meu crescimento acadêmico na experiência em laboratório de física e sobretudo, pela amizade construída e pelo valioso direcionamento durante a minha formação.

Minha gratidão se estende a toda a comunidade do IF Sertão PE-Campus Salgueiro, que contribuiu de forma direta e indireta para o meu desenvolvimento pessoal e profissional. Em especial, a todos os professores que fizeram parte da minha trajetória durante a graduação.

Por fim, gostaria de expressar minha gratidão aos professores que compuseram a banca examinadora. Suas sugestões e considerações foram de grande importância e valor, e seu tempo dedicado a este momento é muito apreciado.

“Você deve ser orgulhoso de sua criatividade. Não há um maior prazer do que o de perceber um novo fato científico.”

Marie Curie

“Eu tentei 99 vezes e falhei, mas na centésima tentativa eu consegui, nunca desista de seus objetivos mesmo que esses pareçam impossíveis, a próxima tentativa pode ser a vitoriosa.”

Albert Einstein

RESUMO

O efeito fotoelétrico desempenha um papel primordial na evolução da Física moderna, revelando-se como o elemento central para desvendar a dinâmica da interação entre radiação eletromagnética e a matéria. Este trabalho tem como objetivo, investigar o efeito fotoelétrico a partir de um tubo de raios catódicos (TRC). O experimento envolveu a adaptação do TRC e a realização de experimentos para analisar como a incidência da luz sobre os seus eletrodos afeta o comportamento dos raios catódicos. Através das adaptações realizamos uma série de testes. Na primeira adaptação, foi utilizado um sensor de pressão absoluta (SPA) para analisar o comportamento da corrente elétrica em função da despressurização do tubo sob a incidência de luz UV e Luz Azul, na segunda, foi utilizado um sensor de pressão diferencial (SPD) que tinha como objetivo determinar o mesmo parâmetro do SPA. Na terceira adaptação, foi utilizado um amperímetro para medir a variação da corrente elétrica em função do tempo ao longo da pressurização do tubo sob a incidência da luz UV e luz Azul. Além disso, foi confeccionado um eletroscópio de folhas de alumínio para verificação do efeito fotoelétrico de maneira alternativa. Nossas experiências revelaram a presença da luz UV e Azul provocaram alterações distintas e claras na corrente elétrica do TRC. Essa descoberta concorda com a teoria do efeito fotoelétrico que postula que ao incidir luz sobre um material com frequência adequada é possível liberar elétrons de sua superfície. Esta pesquisa evidencia a teoria que tem um relevante significado no palco da mecânica quântica. A investigação desse fenômeno utilizando o TRC tem implicações significativas na Física experimental para o entendimento sobre o assunto e ressalta a importância do avanço tecnológico envolvendo os tubos de raios catódicos.

Palavras-Chave: *Efeito Fotoelétrico, Tubo de Raios Catódicos, Experimento, Radiação Eletromagnética, Física Moderna.*

ABSTRACT

The photoelectric effect plays a key role in the evolution of modern Physics, proving to be the central element in unraveling the dynamics of the interaction between electromagnetic radiation and matter. This work aims to investigate the photoelectric effect from a cathode ray tube (CRT). The experiment involved adapting the TRC and carrying out experiments to analyze how the incidence of light on its electrodes affects the behavior of cathode rays. Through the adaptations we carried out a series of tests. In the first adaptation, an absolute pressure sensor (SPA) was used to analyze the behavior of the electric current depending on the depressurization of the tube under the incidence of UV light and Blue Light, in the second, a differential pressure sensor (SPD) was used which aimed to determine the same parameter as the SPA. In the third adaptation, an ammeter was used to measure the variation in electrical current as a function of time throughout the pressurization of the tube under the incidence of UV light and blue light. Furthermore, an aluminum foil electroscope was made to check the photoelectric effect in an alternative way. Our experiments revealed the presence of UV and Blue light caused distinct and clear changes in the electrical current of the TRC. This discovery agrees with the theory of the photoelectric effect, which postulates that when light shines on a material at an appropriate frequency, it is possible to release electrons from its surface. This research highlights the theory that has a relevant meaning on the stage of quantum mechanics. The investigation of this phenomenon using the CRT has significant implications in experimental Physics for understanding the subject and highlights the importance of technological advances involving cathode ray tubes.

Keywords: *Photoelectric Effect, Cathode Ray Tube, Experiment, Electromagnetic Radiation, Modern Physics.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Materiais Utilizados	29
Figura 2 - Diagrama do TRC	30
Figura 3 - Deflexão magnética dos raios catódicos na presença do campo magnético produzido por um ímã de neodímio	31
Figura 4 - Sensor de Pressão Absoluta	34
Figura 5 - Diagrama do TRC adaptado com o sensor de pressão absoluta.....	34
Figura 6 - Interface LAB200	35
Figura 7 - Interface inicial do software da CidepeLabV5.....	35
Figura 8 - Interface de Habilitação de Sensores	36
Figura 9 - Interface de Configuração e Informações de Equipamentos.....	36
Figura 10 - Interface do Indicador do Sensor Pressão Absoluta.....	37
Figura 11 - Sensor de Pressão Diferencial.....	39
Figura 12 - Diagrama do TRC adaptado com o sensor de pressão diferencial	40
Figura 13 - Interface de Habilitação de Sensores	40
Figura 14 - Interface de Configuração e Informações de Equipamentos.....	41
Figura 15 - Interface do Indicador do Sensor Pressão Diferencial	41
Figura 16 - Multímetro utilizado na função amperímetro.....	43
Figura 17 - Diagrama do TRC adaptado com amperímetro.....	43
Figura 18 - Eletroscópio de folhas de alumínio	46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Corrente elétrica relativa em função do tempo com e sem a incidência da luz UV	48
Gráfico 2 - Corrente elétrica relativa em função do tempo com e sem a incidência da luz UV	49
Gráfico 3 - Corrente elétrica relativa em função do tempo com e sem a incidência da luz Azul	49
Gráfico 4 - Análise comparativa das medidas 1 e 2 da corrente elétrica em função do tempo sem a incidência da luz, registradas em dias diferentes nos gráficos 2 e 3.....	50
Gráfico 5 - Corrente elétrica em função do tempo com e sem a incidência da luz UV	51
Gráfico 6 - Corrente elétrica em função do tempo com e sem a incidência da luz Azul.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TRC	Tubo de Raios Catódicos
SPA	Sensor de Pressão Absoluta
SPD	Sensor de Pressão Diferencial
UV	Ultravioleta
CIDEPE	Centro Industrial de Equipamentos de Ensino e Pesquisa
PA	Pascal
KPA	Quilopascal
MmH2O	Milímetro de Coluna de Água

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	UMA BREVE DESCRIÇÃO SOBRE A TEORIA ONDULATÓRIA DA LUZ	16
2.2	A NATUREZA ELETROMAGNÉTICA	18
2.3	BREVE HISTÓRICO SOBRE A DESCOBERTA DOS RAIOS CATÓDICOS	19
2.4	O EFEITO FOTOELÉTRICO	22
3	METODOLOGIA.....	27
4	MATERIAIS	28
4.1	MONTAGEM DO TRC	29
4.2	DESIGNER E FUNCIONAMENTO.....	30
4.3	HIPÓTESES, PARÂMETROS E RESULTADOS ESPERADOS	33
4.4	FASE DE TESTES	34
4.4.1	TESTE 1 – SENSOR DE PRESSÃO ABSOLUTA.....	34
4.4.2	TESTE 2 – SENSOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL	39
4.4.3	TESTE 3 – AMPERIMETRO (LUZ UV).....	43
4.4.4	TESTE 4 – AMPERIMETRO (LUZ AZUL)	45
4.4.5	TESTE 5 – ELETROSCÓPIO DE FOLHAS DE ALUMÍNIO.....	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
6.1	CONCLUSÕES	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
	APÊNDICE A.....	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Desde tempos remotos, a humanidade se fascina e se questiona sobre a luminosidade que vem do céu. O que é a luz? Do que ela é feita? Como ela afeta o nosso mundo e o nosso corpo? Essas e outras perguntas motivaram a investigação de sua natureza e do seu comportamento, que passou de um fenômeno corriqueiro em nossas vidas a uma ciência rigorosa e complexa. Ao longo dos séculos, o estudo da luz evoluiu de simples observações e conjecturas para teorias sólidas e fundamentais que hoje explicam muitos dos fenômenos físicos que ocorrem no universo.

A história da ciência sugere que as primeiras tentativas de explicar a luz surgiram na Grécia antiga, com filósofos como Empédocles, Leucipo, Euclides entre outros (MARTINS, 2022). Até o início do século XVII, a compreensão humana sobre a luz tanto ao nível da sua natureza como ao nível da explicação de fenômenos ópticos, progrediu de maneira gradual e lenta. Com o avanço tecnológico e o desenvolvimento de instrumentos modernos, surgiram, no final do século XVII, as primeiras concepções características sobre a natureza da luz (RIBEIRO, et al., 2016). Uma das teorias formuladas, que por sinal é a base fundamental de estudo neste trabalho, sugere que a luz é constituída de pequenas partículas conhecidas como (*corpúsculos de luz*), que posteriormente foram denominadas de “*fótons*”. Apesar dessa hipótese ter sido devidamente estruturada e comprovada no início do século XX, ela foi inicialmente proposta pelo físico Inglês Isaac Newton no século XVII, essa conjectura desafiou uma outra linha de pensamento que surgiu na mesma época, proposta pelo físico holandês Christian Huygens, que afirmava que a luz se comportava como uma onda, essa intuição clássica como era referida, veio a ser comprovada experimentalmente no século XIX pelos físicos Thomas Young e Heinrich Hertz (ROSA, 2012).

Por séculos, a intuição clássica explicou diversos fenômenos físicos relacionados a sua propagação, mas se mostrou incompleta anos mais tarde pelo fato de não ter explicação para o fenômeno de emissão e absorção da luz. A explicação concisa para correção das falhas da teoria clássica veio surgir no início do século XX por meio do físico alemão Albert Einstein em seu trabalho sobre o efeito fotoelétrico. Einstein propôs uma explicação pautada na teoria corpuscular e sua relação de interação com a matéria a partir desse comportamento discreto. Essa explicação contribuiu com o início de uma nova era na Física, tornando-se a base

fundamental na compreensão do mundo das partículas subatômicas, a chamada mecânica quântica (HECHT, 2017).

Este trabalho apresenta resultados de uma atividade experimental, no qual investiga-se evidências da interação da radiação com a matéria. E para tal fim, foi utilizado um dispositivo desenvolvido pelo físico alemão Heinrich Geissler (1814-1879) descrito como “tubo de Geissler” comumente conhecido como “tubo de raios catódicos” (TRC). Esse dispositivo consiste em um tubo de vidro transparente fechado, que dispõe de dois eletrodos metálicos em suas extremidades internas: o cátodo (C-) e ânodo (A+). Esses eletrodos, ao serem submetidos a uma diferença de potencial em uma região de baixa pressão interna de gás rarefeito, produzem um fenômeno luminoso conhecido como raios catódicos.

A explicação que esclarece o surgimento desses raios, é a liberação de elétrons pelo processo de emissão termiônica, que ocorre quando o cátodo eletrodo negativo do TRC devido à alta voltagem começa a esquentar e ao atingir uma determinada temperatura num ambiente de vácuo apropriado, a energia térmica produzida fornece aos elétrons a energia necessária para superar o que chamamos de barreira de potencial, assim, ao superar essa barreira de energia os elétrons conseguem escapar da superfície do material, e são acelerados pelo campo elétrico em direção ao ânodo.

O estudo apresentado neste trabalho foi conduzido no laboratório de física do IF Sertão PE - Campus Salgueiro. A principal motivação para investigar este fenômeno quântico surgiu de questões problemas levantados nas aulas de Física experimental IV ministradas pelo professor Marcelo Souza da Silva, coorientador deste trabalho, na qual foram abordados o efeito fotoelétrico e a formação dos raios catódicos. Durante a explicação, surgiu a ideia de realizar um teste para investigar o fenômeno. A ideia baseava-se na hipótese de que a incidência de luz (radiação eletromagnética) sobre determinadas superfícies metálicas, a depender da frequência da luz incidente, seria capaz de fornecer a energia necessária para os elétrons romperem a ligação que os prendem à superfície do material sendo liberados. Então, para investigar esse fenômeno experimental foi utilizado o TRC.

O teste consistiu em incidir um feixe de luz qualquer sobre os eletrodos do TRC, entretanto, sabia-se que, de acordo com a teoria do efeito fotoelétrico, que a ejeção de elétrons depende da frequência e não da intensidade do feixe luminoso. Porém, como não havia uma fonte de luz adequada no laboratório, foi realizado o teste com uma luz qualquer, ao qual inicialmente iluminou o eletrodo negativo (cátodo), e em seguida o eletrodo positivo (ânodo).

Entretanto, ao fazê-lo, não se verificou qualquer influência na corrente elétrica e nem visualmente na formação dos raios catódicos.

Mediante estes resultados, os testes foram momentaneamente interrompidos. Até que ao tomar conhecimento deles, decidimos seguir com a investigação. Para isto, refletimos sobre as diversas formas de adaptar o TRC para realizar novas medidas, estudando variáveis físicas que permitissem conduzir uma investigação capaz de levar a evidências de que a radiação eletromagnética tinha influência no comportamento dos raios catódicos. Desse modo, foram realizados alguns testes para constatar e evidenciar esse fenômeno.

A fim de atingir esses objetivos, o trabalho foi dividido em três partes. Na primeira parte, é apresentado a fundamentação teórica, que expõe um resumo de como se deu a construção das primeiras hipóteses sobre a natureza da luz até a explicação da teoria do efeito fotoelétrico, destacando algumas das inconsistências que levaram a necessidade da construção de uma outra teoria, e as barreiras que tiveram que ser rompidas para aceitação de tais descrições perante a comunidade científica. Nessa primeira parte é apresentado também um breve histórico das primeiras observações dos raios catódicos e a evolução desse dispositivo experimental utilizado no estudo deste trabalho, bem como, a sua contribuição nas demais descobertas científicas. Na segunda parte, é apresentado como o experimento foi realizado, desde sua montagem, as hipóteses levantadas, os testes experimentais, até as adaptações realizadas no TRC, em seguida é realizada uma comparação dos resultados esperados com os resultados obtidos mediante as análises realizadas na seção de resultados e discussões e na terceira e última etapa, são apresentadas as considerações finais, onde todas as conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento da formulação e dos resultados são recapturadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A construção da abordagem histórica descrita a seguir, apresenta algumas das principais observações que filósofos, físicos, matemáticos, astrônomos, cientistas e demais estudiosos realizaram ao longo dos séculos XVII, XVIII e XIX que auxiliaram na elucidação da hipótese do efeito fotoelétrico no final século XX, com a finalidade de compreender seu relevante significado.

2.1 UMA BREVE DESCRIÇÃO SOBRE A TEORIA ONDULATÓRIA DA LUZ

No final do século XVII, a grande massa dos cientistas acreditava na ideia de que a luz era constituída por um feixe de minúsculas partículas (chamadas de corpúsculos) que eram

emitidas por fontes de luz. Mas somente em torno de 1665, vieram a surgir as primeiras evidências das propriedades ondulatórias da luz (YOUNG; FREEDMAN, 2009).

Uma das primeiras pessoas a entender e apresentar uma teoria ondulatória para a luz foi o físico e astrônomo holandês Christian Huygens, em 1678. Embora muito menos completa que a teoria eletromagnética de James Clerk Maxwell, formulada mais tarde, a teoria de Huygens era matematicamente mais simples, tal qual permanece útil até hoje (HALLIDAY, 2009).

O trabalho apresentado por Huygens em 1678 na Academia Real de Ciências em Paris, e publicado em 1690, intitulado o “Tratado da Luz” descreve o “*princípio de Huygens*”, que desempenha um papel primordial, explicando a propagação das ondas. Huygens destaca em seu trabalho, que em cada ponto do espaço a luz excita ondas elementares, essas excitações funcionam então como fontes secundárias, e assim se propaga a luz, caracterizada na época como um modelo ondulatório (NUSSENZVEIG, 1998). Contudo, essas ondas não estavam relacionadas a nenhuma noção de movimento periódico, embora tenha sido considerada umas das primeiras descrições do comportamento ondulatório luz, como onda eletromagnética

Ribeiro destaca que,

“Se notarmos bem essa descrição de Huygens não se caracteriza uma verdadeira teoria ondulatória, pois Huygens destaca que a luz era uma perturbação mecânica que se propagava através de forças de contato entre corpúsculos. Em sua obra, como não poderia deixar de ser, não aparece qualquer referência à ideia de ação à distância, de campo eletromagnético e outros conceitos mais recentes, desenvolvidos nos séculos que lhe seguiram” (RIBEIRO et. al. 2016).

Outro físico que estava a estudar o assunto, dando contribuições nesse campo, foi o inglês Isaac Newton (1643-1727) que apresentava uma linha de raciocínio que caminhava em contrapartida a teoria descrita por Huygens. Em seu trabalho intitulado “*Opticks*” publicado em (1704), Newton descreve que a luz apresenta um caráter corpuscular formado por minúsculas partículas que se propaga em altas velocidades de forma retilínea, entretanto, ele acreditava que essa hipótese não se encaixava com a teoria ondulatória. Com suas observações, Newton explicou muitos fenômenos, e devido ao peso de suas opiniões e ser um cientista de enorme influência, sua teoria foi a mais aceita durante cem anos (RIBEIRO et. al. 2016). Essas duas correntes de pensamento provocaram intensas desavenças entre os cientistas da época (YOUNG; FREEDMAN, 2009).

Em 1802, início século XIX, o físico Thomas Young (1773–1829) formulou o princípio da interferência e da difração, mostrando com uma série de experiências engenhosas,

baseado nos estudos experimentais de Grimaldi, que a luz se comporta claramente como uma onda, e juntamente com as pesquisas de Augustin Fresnel (1788-1827) sobre os padrões de difração e propagação retilínea da luz em meios homogêneos e isotrópicos, lideraram a defesa de uma nova teoria ondulatória, que passou a ser aceita por praticamente todos os estudiosos em torno de 1830, um século após a morte de Newton” (OLIVEIRA, et al., 2019).

“Anos mais tarde, mediante a demonstração experimental de Dominique François Arago (1786-1853), Thomas Young confirmou sua hipótese e chegou à conclusão de que a luz era uma onda transversal, tendo em vista, que até essa descoberta, os estudiosos da área consideravam que “todas as ondas eram assumidas como sendo longitudinais, tais como as ondas sonoras” (BARTHEM, 2005, p. 35).

O sucesso da teoria ondulatória defendida por Huygens se sobressaía a da teoria corpuscular de Newton, contudo, a decisão final veio após os avanços tecnológicos que permitiram Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868), em 1850, determinar a velocidade da luz, provando que a mesma se movia mais lentamente na água do que no ar, contrapondo a descrição de Newton da teoria corpuscular (RIBEIRO et. al. 2016). Nas palavras de Edmund Whittaker (1873-1956), a partir desse ponto “à teoria ondulatória da luz foi estabelecida de modo tão forte que a hipótese corpuscular não era mais capaz de recrutar qualquer novo adepto entre os jovens” (CARUSO, 2020).

2.2 A NATUREZA ELETROMAGNÉTICA

O século XIX ainda foi marcado por grandes surpresas no estudo da natureza da luz, todavia, o que mais chama a atenção é o fato das novas descobertas surgirem a partir de outra área, até então independente e sem nenhuma conexão com a luz. O eletromagnetismo apresenta contexto histórico tão rico quanto o da óptica, a eletricidade e o magnetismo, até então, tratava-se de áreas bem definidas separadamente, até que, em 1820, o físico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851) passou a investigar como uma agulha magnética era influenciada pela corrente elétrica que passava em um fio. A partir dessa época, mediante os estudos do físico escocês James Clerk Maxwell, a eletricidade e o magnetismo passaram a ser reconhecidos como fenômenos de uma mesma origem. Isso se deu por intermédio de quatro equações fundamentais estabelecidas por ele [Maxwell], criando o que hoje chamamos de eletromagnetismo. (BARTHEM, 2005; MANGILI, 2012).

Muitos pesquisadores se dedicaram ao estudo dos fenômenos eletromagnéticos, dentre os eles, se destaca o físico britânico Michael Faraday (1791-1867) que em 1831, na Inglaterra, verificou o conceito de indução eletromagnética, permitindo o entendimento da interação entre campos elétricos e campos magnéticos. Desse modo, Faraday concluiu que esses

campos podem ser relacionados, de forma que o campo elétrico, ao variar, produz um campo magnético, assim como, um campo magnético, ao variar, produz um campo elétrico, confirmando a unificação eletromagnetismo (SALVETTI, 2008).

Conforme destaca Barthem (2005, p. 36),

“Em 1845, Faraday observou um segundo fenômeno intrigante, no qual, o campo magnético podia rotacionar a polarização de ondas luminosas, ao passarem por uma região magnetizada. Este fato o conduziu a dedução de que a luz poderia ser interpretada como sendo uma radiação eletromagnética, porém, ele não foi capaz de quantificar tal associação”

“A generalização dos fenômenos luminosos, elétricos e magnéticos foram arranjadas por James Clerk Maxwell (1831-1879) em sua teoria eletromagnética, no qual, trabalhou entre 1856 e 1864” (CARUSO, 2020, p. 5). “Maxwell identificou a partir das suas equações, que a luz podia ser descrita como uma perturbação eletromagnética na forma de ondas se propagando, por meio de um campo eletromagnético de acordo com as leis do eletromagnetismo” (BARTHEM, 2005, p. 36). Vinte anos depois de Maxwell estabelecer sua teoria, Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) realizou em seu laboratório a primeira observação experimental de ondas eletromagnéticas fora do espectro de luz visível atestando a validade das equações de Maxwell (SILVA, 2007).

As experiências de Hertz, mais tarde foram confirmadas por Joseph Lodge (1851-1940), e por Augusto Righi (1850-1920) que demonstraram a relação entre as ondas hertzianas e a luz. Curiosamente, ao trabalhar com a geração de faíscas entre eletrodos, de forma a observar as ondas eletromagnéticas previstas por Maxwell, Hertz estava descobrindo um fenômeno que viria ser o início de um segundo tempo da teoria corpuscular da luz, sendo essa observação uma das primeiras evidências experimentais da quantização da luz da história (NUSSENZVEIG, 1998).

2.3 BREVE HISTÓRICO SOBRE A DESCOBERTA DOS RAIOS CATÓDICOS

“Temos nos raios catódicos matéria em um novo estado, um estado no qual a subdivisão da matéria é levada muito além do que no estado gasoso ordinário: um estado no qual toda a matéria – isto é, matéria derivada de diferentes fontes, como hidrogênio, oxigênio etc. É uma e do mesmo tipo: essa matéria é a substância da qual todos os elementos químicos são feitos” (OGURI, 2006, p. 242).

Joseph John Thomson

Os primeiros relatos da descoberta dos raios catódicos surgiram no século XIX, mediante o estudo da natureza da eletricidade e as propriedades elétricas condutivas em tubos contendo gases rarefeitos. No entanto, Faraday em 1838, já utilizava descargas elétricas em

gases submetidos a baixas pressões. Por meio dos seus experimentos surgiram as primeiras indagações da existência de componentes carregados na matéria (FERNANDES, et. al., 2018). Entretanto, a pesquisa alcançou maior desenvolvimento vinte anos mais tarde, quando o físico e inventor alemão Johann Heinrich Geissler (1814-1879) desenvolveu um experimento, que utilizava um tubo de vidro selado contendo um gás a baixa pressão, e dois eletrodos metálicos em suas extremidades, esse aparato experimental ficou conhecido como tubo de Geissler, em homenagem ao seu inventor (PIERES, 2011).

Entre as primeiras pesquisas e estudos dos raios catódicos, podemos destacar a observação do matemático e físico alemão Julius Plücker (1801-1868), que no ano de 1858, ao trabalhar com descargas elétricas em tubos construídos por Geissler, relatou que durante a extração de ar, em uma sala escura, foi detectado pela primeira vez em certo grau de rarefação do gás, uma luminosidade no interior do tubo (OGURI, 2006), e ao realizar alguns testes utilizando imãs, Plücker notou que ao aproximá-los desse feixe, o mesmo era defletido dentro do tubo, verificando pela primeira vez a influência do campo magnético sobre essas descargas elétricas (JUNIOR, 2015).

Outra observação importante é a do físico alemão Johann Wilhelm Hittorf (1824 - 1914), ex-aluno de Plücker, que em 1869 conseguiu realizar experiências com gases rarefeitos ainda maiores (devido ao aperfeiçoamento das bombas de mercúrio), Hittorf observou os raios catódicos distribuídos não apenas numa parte do tubo, mas em todo o seu interior, e ao realizar mais alguns testes confirmou a observação de Plücker, ao notar a presença de sombra projetada de um objeto posicionado em frente ao cátodo (PIERES, 2011).

Dois anos depois da descoberta de Hittorf, em 1871, o engenheiro inglês Cromwell Fleetwood Varley (1828-1883) ratificou que os raios catódicos eram desviados por campos magnéticos como se fosse um feixe de partículas com carga elétrica negativa, apesar de não provar isso, sua hipótese não estava num todo incorreta. Vale ressaltar que o nome “raios catódicos” (*kathodenstrahlen*) termo usado para descrever esses feixes de partículas que se moviam de um eletrodo a outro em tubos de gases rarefeitos só foi introduzida por Eugene Goldstein em 1876 (OGURI, 2006).

Chegando em 1879, o químico e físico inglês William Crookes (1832-1919) aprimorou o experimento do tubo de Geissler, produzindo por meio de uma bomba de vácuo mais potente pressões muito menores, que ficaram conhecidas como “*ampolas de Crookes*”. Ele percebeu que conforme iria removendo os gases de dentro do tubo, surgiam raios luminosos

no vidro próximo ao ânodo que ficavam cada vez mais intensos, e a região próxima ao cátodo ficava cada vez mais escura. Seus resultados experimentais o levaram a acreditar que esses raios poderiam ser partículas, os quais, inclusive, as chamou de matéria radiante (PIERES, 2011).

No mesmo ano, o inventor norte-americano Thomas Edison (1847-1931) desenvolveu a primeira lâmpada elétrica, equipada com filamento de carbono incandescente no vácuo, que utilizava corrente contínua proveniente de um dínamo. Apesar do êxito alcançado, essa invenção apresentava uma considerável desvantagem, pois a lâmpada escurecia com o uso, de maneira até então inexplicável. Diante dessa falha, foi em 1883, que Edison iniciou uma investigação para compreender a causa, observando que, em certas condições de vácuo e voltagens específicas, surgia um peculiar clarão azulado entre os dois fios que constituíam o filamento da lâmpada. Estes fios fluíam em direções opostas, seguindo o sentido convencional da corrente elétrica, ou seja, do cátodo (terminal negativo) para o ânodo (terminal positivo). Contudo, a explicação para esse fenômeno, posteriormente denominado "Efeito Termiônico," só surgiu mais tarde (BASSALO, 1992).

No ano de 1883, após tentativas não muito bem-sucedidas no estudo da deflexão de raios catódicos por campos elétricos, Heinrich Hertz, demonstrou em 1891, que os raios catódicos possuíam a capacidade de atravessar lâminas metálicas delgadas, mantendo sua propagação na mesma direção incidente. Esse resultado, direcionou a discussão sobre a natureza dos raios catódicos mais para a interpretação ondulatória de Hertz, uma vez que apresentava desafios para a hipótese de que esses raios eram constituídos por partículas eletricamente carregadas (OGURI, 2006).

Os estudos sobre os raios catódicos que foram surgindo invocavam características semelhantes que inflamavam ainda mais a discussão sobre a natureza da luz, ora enquanto onda, ora enquanto partícula. Entretanto, mesmo com tantos relatos e observações, somente no fim do século XIX e no início do século XX, surgiram as primeiras explicações condizentes para o aparecimento desses fenômenos luminosos que mudaram o rumo da física (PASACHOFF, 2018).

2.4 O EFEITO FOTOELÉTRICO

Até o ano de 1900, a física clássica era capaz de explicar uma ampla gama de fenômenos físicos observáveis. Isso abrangia desde o movimento de objetos macroscópicos, regido pelas leis de Newton, até as características da eletricidade e do magnetismo, descritas pelas equações de Maxwell, bem como os princípios básicos da óptica geométrica. Entretanto,

na segunda metade do século XIX, a Física clássica encontrou desafios significativos e falhou ao tentar explicar dados observacionais relacionados a alguns fenômenos, tais como a emissão e absorção de radiação eletromagnética em corpos aquecidos, como previsto pela lei de Stefan-Boltzmann e a lei do deslocamento de Wien, o fenômeno de difração de elétrons, os modelos atômicos clássicos e o efeito fotoelétrico (ALMEIDA, 2018).

Em 1887, o físico alemão Heinrich Hertz (1857-1894) ao realizar um minucioso estudo sobre o fenômeno da radiação eletromagnética, publicou um artigo intitulado “*On an Effect of Ultraviolet Light upon the Electric Discharge*” (Sobre um efeito de Luz Ultravioleta na descarga elétrica) confirmando pela primeira vez a existência de ondas eletromagnéticas e a teoria de Maxwell sobre a propagação da luz. O dispositivo experimental utilizado por Hertz consistia em duas esferas metálicas, cada uma conectada de uma haste ligada a uma bobina de Ruhmkorff, assim, ao submeter a uma diferença de potencial com circuito elétrico oscilante, revelou que surgia faíscas entre as esferas metálicas (CARUSO; BASSALO, 2013).

Entretanto, ao realizar mais alguns testes nesse experimento, Hertz notou que quando havia uma incidência de radiação ultravioleta em uma superfície de (bronze polido) na esfera ligada ao terminal negativo da fonte, a faísca realmente se tornava maior. Esse aumento na descarga elétrica era uma indicação de que a emissão de partículas eletrizadas era estimulada pela influência da radiação incidente. Hoje designamos essas partículas eletrizadas de elétrons (YOUNG; FREEDMAN, 2009).

A descoberta de Hertz por si só não era revolucionária, tendo em vista, que já se tinha conhecimento da existência de um fenômeno semelhante sobre o conceito da barreira de potencial, descrita anteriormente por Thomas Edison, em seu trabalho sobre a emissão termiônica de 1883, que descrevia que a energia necessária para superar essa barreira de potencial era fornecida pelo aquecimento do material até uma temperatura elevada, liberando elétrons de modo análogo ao que acontece na ebulição de um líquido. A quantidade *mínima* de energia necessária que elétron precisa absorver para se libertar de uma dada superfície é chamada de **função trabalho**, designada pela letra grega “ ϕ ” (YOUNG; FREEDMAN, 2009). Entretanto, Hertz não visualizou o mesmo fenômeno que o Edison, já que as superfícies que ele utilizava não estavam na temperatura necessária para que houvesse esse tipo de emissão.

Embora Hertz tenha observado experimentalmente o fenômeno do efeito fotoelétrico e tenha fornecido contribuições para seu estudo, ele não deteve suas atenções em tentar explicá-lo, até porque sua investigação estava voltada em comprovar experimentalmente

as equações de Maxwell. Nesse sentido, é inconveniente atribuir a ele essa descoberta, já que ele registrou somente sua observação (EBERHARDT et. al. 2017).

Nas palavras do próprio Hertz (1893), ele afirma:

“Assim que eu soube que estava lidando com um efeito da luz ultravioleta, eu coloquei de lado essa investigação, para então dirigir minha atenção para a questão principal mais uma vez. Entretanto, como certa familiaridade com o fenômeno é requerida na investigação das oscilações, eu publiquei um comunicado relatando esse fato” (SOARES, p.21 apud. HERTZ, 1893, p.4)

Em 1888, retomando a pesquisa de Hertz, o físico alemão Wilhelm Hallwachs (1859-1922), seu assistente de trabalho em um laboratório na Alemanha, estudava sobre o fenômeno da emissão e da captação de ondas eletromagnéticas e a teoria de Maxwell, Hallwachs trabalhava em uma experiência que consistia em conectar um eletroscópio de folhas de ouro a uma placa de Zinco (Zn) polido circular por meio de um arame, fixada sobre uma base isolante. Ao carregar o eletroscópio negativamente, ele observou que a placa perdia sua carga muito lentamente. Entretanto, se a placa fosse exposta a luz ultravioleta a perda de carga ocorria rapidamente, já se a placa fosse carregada positivamente e fosse exposta a luz ultravioleta não ocorria a perda rápida de cargas. Entretanto, apesar de ter contribuído com essa experiência para a compreensão do fenômeno, Hallwachs não pôde fornecer alguma explicação teórica para o que estava ocorrendo. (BARTHEM, 2005).

Finalmente, em 1897, o físico britânico J. J. Thompson (1856-1940), em suas experiências com raios catódicos visando testar as propriedades das partículas, utilizou duas placas metálicas, e as colocou ao redor do raio catódico. Como resultado, ele observou que o feixe catódico se desviava da placa carregada negativamente e partia em direção a placa carregada positivamente, o que indicava que a sua composição era negativa, ou seja, formada por elétrons. “Foi a partir desse momento, que as cargas elétricas emitidas nos raios catódicos passaram a ser identificadas como uma corrente de elétrons” (MANTOVANI, 2015, p.30).

Em 1899, o físico alemão Philipp Lenard (1862 -1947) fez um profundo estudo experimental investigando a fotoeletricidade e revelou uma série de características intrigantes e contraditórias ao que seria esperado pela Física clássica (NUSSENZVEIG, 1998). As experiências de Lenard consistiam em iluminar um fotocátodo com luz monocromática, liberando elétrons, e a corrente resultante I era anulada ajustando-se um potencial retardador até um valor de corte V (OGURI, 2006). “Lenard submeteu essas partículas a um campo magnético e descobriu que apresentavam uma razão carga-massa semelhante à dos raios

catódicos estudados por Thompson: em outras palavras as partículas emitidas eram elétrons” (TIPLER; LLEWELLYN, 2009, p. 88).

Em meados de 1902, ao conduzir experimentos utilizando matérias de diferentes comprimentos de onda, Lenard forneceu importantes resultados que contribuíram para a base do efeito fotoelétrico. Ao discutir sobre a hipótese do gatilho que foi considerada uma das mais significativas contribuições para a elucidação do fenômeno até meados de 1910 (BARROS; SOARES, 2016).

Como resume Wheaton (1983, p. 74-75),

[...] Lenard descobriu o fato surpreendente de que a velocidade máxima com que os elétrons são ejetados pela luz ultravioleta é totalmente independente da intensidade da luz. Esse resultado o convenceu de que não poderia haver transformação da energia luminosa em energia cinética eletrônica. Em vez disso, ele propôs que os elétrons em um átomo já possuem sua velocidade fotoelétrica, ou o equivalente de energia potencial, em virtude de sua pertença ao sistema atômico. A luz apenas desencadeia a liberação de elétrons selecionados; não lhes acrescenta energia. Até 1911, essa hipótese desencadeante formou a base de quase todos os físicos que entenderam o efeito fotoelétrico. (apud NIAZ et al., 2010, p. 907)

A explicação compatível para as observações experimentais de Lenard, surgiu num trabalho publicado na famosa revista alemã “*Annalen der Physik*” em 1905, intitulado “*Über Einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*” (Um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz), escrito pelo jovem físico alemão Albert Einstein (1879-1955) que colocou em questão a intuição clássica propondo uma nova hipótese, e citou o efeito fotoelétrico como uma aplicação que poderia testar qual teoria estava correta (SOARES, 2016).

O físico alemão Max Planck (1858-1947), até então, acreditava que a energia eletromagnética, uma vez irradiada, se espalhava pelo espaço da mesma forma que ondas de água se espalham em seu entorno. Então, baseado numa extensão muito mais audaciosa dessas ideias de Planck sobre quantização da energia utilizadas no problema do corpo negro, Einstein descreveu que ao invés estar distribuída uniformemente no espaço no qual se propaga, a radiação eletromagnética é quantizada em pequenos “pacotes” discretos energia, que mais tarde vieram a ser chamados de “*fótons*” (EISBERG; RESNICK, 1979). Segundo Planck, a energia da radiação eletromagnética é expressa pelo produto de sua frequência (ν) pela constante de quantização (h) representada pelo valor de $(6,6260693 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})$, ou seja:

$$E = h\nu \quad (1)$$

A equação (1) é conhecida como Equação de Planck. Para ele [Planck], a energia da matéria deveria estar sob a forma de pacotes, mas fora dela, onde aparecia sob a forma de radiação, continuaria submetida às leis contínuas estabelecidas por Maxwell. Entretanto, Einstein demonstrou que as duas ideias não eram compatíveis, e que a relação seria estabelecida se a própria radiação fosse formada por pacotes de energia, posteriormente denominada “*fótons*” pelo químico americano Gilbert Newton Lewis (1875-1946) em 1926 (BARTHEM, 2005).

Portanto, Einstein estabeleceu que o efeito fotoelétrico ocorre quando um “*fóton*” ou (quantum de luz) dada por $(h\nu)$, incide sobre uma superfície com determinada frequência. Ao colidir com um elétron, a partícula de luz cede parte de sua energia ao elétron que a utiliza para superar a atração das cargas positivas, rompendo essa energia de ligação que o mantém preso ao material, essa energia é a chamada função trabalho que pode ser representado por (W_0) (CARUSO; BASSALO, 2013).

Assim, pelo princípio da conservação da energia, os elétrons são liberados da superfície dispondo de uma energia cinética (E_c) proporcional a energia absorvida subtraída da função trabalho. Desse modo, para determinar essa energia cinética, a equação de Planck é expressa como:

$$E_c = h\nu - W_0 \quad (2)$$

Essa é a equação deduzida por Einstein para o efeito fotoelétrico. Se a energia do fóton incidente for menor que a função trabalho do material, os elétrons não serão ejetados da superfície, ou seja, o efeito fotoelétrico não ocorre devido à baixa frequência da luz incidente, independente de quão forte seja a intensidade dessa luz, ainda assim, o resultado não mudará (MANTOVANI, 2015). Essa equação corrobora com o fato de que se aumentarmos a intensidade da luz, aumentamos também o número de fótons incidentes e o número de elétrons emitidos, e conseqüentemente a corrente elétrica, entretanto, a energia cinética máxima que os elétrons podem adquirir não é alterada (OGURI, 2006).

O potencial de corte V necessário para deter o fluxo de elétrons, é determinado pela condição de que a energia potencial eV deve ser igual a energia cinética máxima dos elétrons ejetados, ou seja:

$$eV = h\nu - W_0 \quad (3)$$

Assim, se $E = eV$, a corrente elétrica se anula, onde “e” é carga do elétron e V o potencial de corte. Apesar da interpretação de Einstein parecer tão evidente hoje em dia, a princípio a ideia não foi totalmente aceita. O físico norte-americano Robert A. Millikan (1868-1963) conhecido por determinar experimentalmente o valor da carga elementar, em 1910, foi um dos físicos que, inicialmente não acreditou na explicação de Einstein, e passou os dez anos seguintes após a explicação fotoelétrica, fazendo uma série de experiências com o objetivo de demonstrar que a predição de Einstein estava incorreta (PIERES, 2011).

O resultado foi que nas palavras de R. Millikan, “[...] contra todas as minhas expectativas, vi-me obrigado em 1915 a afirmar sua completa verificação experimental, embora nada tivesse de razoável, uma vez que parecia violar tudo que conhecíamos sobre interferência da luz”. (NUSSENZVEIG, 1998, p.252).

Vale ressaltar que todos os esforços de Millikan produziram resultados satisfatórios, tanto que pelo método utilizado por ele, em 1914, conseguiu determinar de maneira precisa e acurada a constante universal de Planck, obtendo o valor experimental para $h = 6,57 \times 10^{-34} J \cdot s$, com uma incerteza de 0,5%. Sua tentativa de estabelecer de forma matemática a relação entre o elétron ejetado, a energia incidente e a frequência tiveram grande importância, resultando na comprovação experimental das equações de Einstein, mas não da sua teoria como vale destacar (SOARES, 2016). Os experimentos realizados por Millikan tiveram grande importância no aperfeiçoamento do estudo, e por suas contribuições recebeu o prêmio Nobel de Física em 1923. (BARTHEM, 2005).

Sobretudo, mesmo a teoria de Einstein parecendo loucura para muitos estudiosos da época, já não restavam dúvidas sobre a sua validação. A explicação concisa para as falhas da teoria clássica, rendeu ao físico alemão o prêmio Nobel de Física em 1921, ganhando relevância perante a comunidade científica por suas contribuições à Física Teórica, em destaque por seu trabalho sobre o efeito fotoelétrico (NUSSENZVEIG, 1998, p.254).

3 METODOLOGIA

A investigação experimental descrita neste trabalho foi conduzida no laboratório de Física do IF Sertão PE - Campus Salgueiro. Afim de atingir os objetivos desta investigação, foram seguidos alguns procedimentos, que foram divididos em quatro etapas, conforme descrito a seguir:

1ª ETAPA
• O primeiro passo envolveu a compreensão do funcionamento do TRC, com o objetivo de adaptá-lo para medição de variáveis físicas. Para este fim, realizou-se uma análise detalhada, utilizando recursos didáticos como livros, artigos, revistas e manuais do Centro Industrial de Equipamentos de Ensino e Pesquisa (CIDEPE), a fim de entender minuciosamente a estrutura do equipamento experimental. • O TRC ou Tudo de Geissler utilizado nesse trabalho trata-se de um conjunto de equipamento da CIDEPE Modelo EQ162E, que constitui de um tubo de vidro fechado e isolado de quartzo transparente que dispõe de duas placas metálicas em suas extremidades que são eletrodos condutores, o cátodo (C-) e o ânodo (A+), este equipamento vem acompanhado de uma bomba de vácuo e uma fonte de alta tensão não variável de 4kV.
2ª ETAPA
• Foram estabelecidos com base na teoria do efeito fotoelétrico, as hipóteses, parâmetros e os resultados esperados, visando investiga-lo por meio das adaptações no TRC.
3ª ETAPA
• As adaptações no TRC foram executadas, sendo que cada modificação foi seguida por um teste realizado em dias distintos: • TESTE 1: Inicialmente, um sensor de pressão absoluta (SPA) foi integrado ao TRC com o objetivo de implementar um controle de pressão durante o processo de despressurização ao longo do tempo. A partir dessa adaptação, procurou-se estabelecer uma correlação entre a variação da corrente elétrica e a incidência de luz ultravioleta (UV) nos eletrodos de descarga. • TESTE 2: Inclusão de um sensor de pressão diferencial (SPD) para registrar qualquer variação na corrente elétrica quando a luz UV e Azul incidia nos eletrodos de descarga mediante o processo de despressurização do TRC ao longo do tempo.

- **TESTE 3:** Adaptação de um amperímetro para medir eventuais variações na corrente elétrica na incidência da luz UV nos eletrodos de descarga ao longo do tempo enquanto o TRC era pressurizado.
- **TESTE 4:** Utilização de um amperímetro para medir possíveis variações na corrente elétrica na incidência de luz Azul nos eletrodos de descarga ao longo do tempo enquanto o TRC era pressurizado.
- **TESTE 5:** Produção e inclusão de um eletroscópio com folhas de alumínio para investigar o fenômeno do efeito fotoelétrico de uma maneira diferente, iluminando-o com lâmpadas UV e Azul e, assim, analisando seu comportamento

4ª ETAPA

- Nessa fase foi realizada a análise e discussão dos resultados, comparando as hipóteses e os resultados esperados com os resultados obtidos após a realização do experimento.

4 MATERIAIS

- Tubo de Geissler ou Tubo de Raios Catódicos (TRC)
- Fonte de Alta Tensão (4 kV)
- Bomba de Vácuo
- Luz Ultravioleta (UV)
- Luz Azul
- Amperímetro
- Sensor de Pressão Absoluta (SPA)
- Sensor de Pressão Diferencial (SPD)
- Software para aquisição de dados e interface (LAB200)
- Notebook com o programa da (CidepeLabV5)
- Eletroscópio de folhas de alumínio
- Canudo
- Papel toalha

Figura 1 - Materiais Utilizados



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

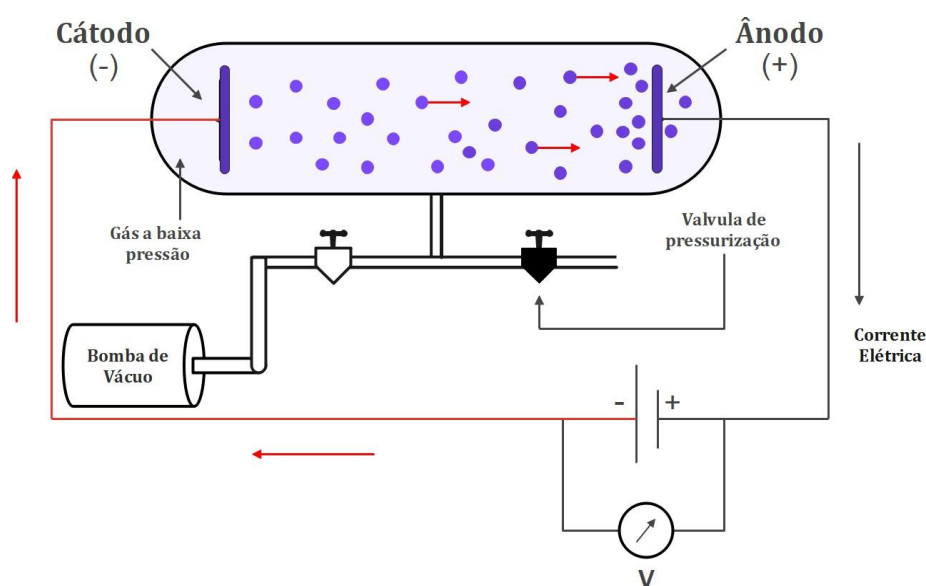
4.1 MONTAGEM DO TRC

- A. Conectou-se a fonte de tensão de 4 kV não variável ao TRC utilizando dois cabos banana-banana, o primeiro cabo saía do terminal (+) da fonte e era conectado no ânodo (A+) eletrodo positivo do tubo, e o segundo cabo saía o terminal (-) da fonte e era conectado no cátodo (C-) eletrodo negativo do tubo;
- B. Conectou-se a mangueira da bomba de vácuo no TRC no local que permeia a passagem de ar ao tubo;
- C. Foi aberta a válvula de entrada e fechada a válvula de saída do TRC;
- D. Acionou-se a bomba de vácuo, para retirada da coluna de ar do interior tubo;
- E. Acionou-se o disparador da fonte de tensão submetendo uma diferença de potencial (DDP) de 4 kV entre os eletrodos.
- F. Mediante a realização desses passos observasse a formação dos raios catódicos.

4.2 DESIGNER E FUNCIONAMENTO

O Tubo de Raios Catódicos (TRC) é dispositivo composto de um tubo de vidro fechado e isolado de quartzo transparente que dispõe de duas placas metálicas em suas extremidades que são eletrodos condutores, o cátodo (C-) e o ânodo (A+), esse tubo pode ser evacuado com auxílio de uma bomba de vácuo capaz de retirar grande parte da coluna de ar de dentro do tubo, produzindo um região de pressão mínima de até 0,3Pa, o gás inerte de mercúrio (Hg) contido no tubo diminui a pressão interna do tubo, então com uma fonte de tensão não variável de 4 kV que dispõe de um disparador, é possível estabelecer uma diferença de potencial entre os eletrodos. Ao fazê-la, observa-se a formação de feixes de elétrons que são orientados pelo campo elétrico produzido pelos elétrons que se movem dentro do tudo, fluindo do eletrodo negativo em direção ao eletrodo positivo em alta velocidade. O diagrama da figura 2 apresenta o seu funcionamento:

Figura 2 - Diagrama do TRC



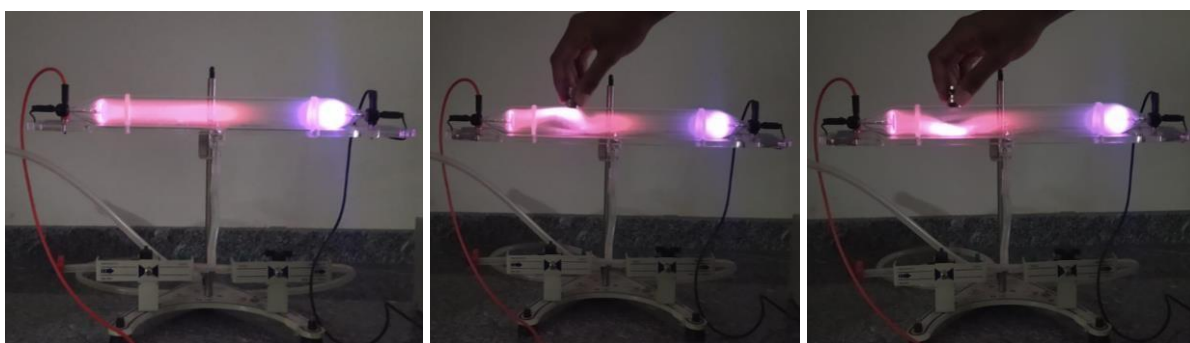
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Por meio desse experimento, observa-se que no instante em que se submete a diferença de potencial entre os eletrodos, os elétrons são acelerados quase que instantaneamente do eletrodo metálico emissor (C-) e se chocam no eletrodo receptor (A+), essa reação, resulta num feixe luminoso que apresenta uma coloração específica, que depende diretamente do tipo do gás confinado dentro do tubo, bem como do material que reveste a superfície do eletrodo. Durante a colisão, os átomos e moléculas presentes no gás absorvem a alta energia dos elétrons

excitados mudando o seu estado orbital, em seguida, os fotoelétrons liberam essa alta energia absorvida na forma de luz ao retornarem ao seu estado fundamental. Essa energia liberada é denominada raios catódicos, um efeito luminoso que passa a ser visível ao olho humano. Nesse tubo é utilizado geralmente o gás de mercúrio (Hg) por ser uma substância altamente ionizante possibilitando uma absorção rápida da energia que flui dentro do tubo pelo feixe de elétrons.

Ao aproximar um ímã do feixe de raios catódicos, podemos observar um dos fenômenos que levou a caracterização da natureza desses raios, a deflexão magnética. Ao deslocar um ímã ao longo da extensão do tubo, o feixe catódico pode ser tanto atraído, como repellido, dependendo da orientação do campo magnético produzido pelo ímã, conforme ilustrado na abaixo:

Figura 3 - Deflexão magnética dos raios catódicos na presença do campo magnético produzido por um ímã de neodímio



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Quando o polo norte do ímã é aproximado dos raios catódicos, estes são atraídos para essa região. Por outro lado, quando o polo sul é trazido perto, os raios catódicos são repelidos. Esse curioso fenômeno foi inicialmente investigado pelos físicos Julius Plücker, Johann Wilhelm Hittorf e William Crookes, que desempenharam papéis fundamentais no estudo desses raios e suas interações com campos no século XIX (PIERES, 2011).

Até o final do século XIX, havia um entendimento emergente de que a deflexão magnética sofrida pelos raios catódicos ao se aproximar um ímã era diferente dependendo da polaridade do ímã em relação à carga dos raios catódicos. Quando se aproximavam elementos de mesma polaridade magnética, havia uma deflexão no sentido contrário, devido à força magnética repulsiva. Por outro lado, ao se aproximar elementos de polaridades opostas, ocorria uma deflexão a favor, devido à força magnética atrativa (THOMSON, 1897).

Com base nessa compreensão, os cientistas começaram investigar a natureza dos raios catódicos, considerando a possibilidade de que fossem compostos por partículas. Essa hipótese levou à utilização da expressão da força de Lorentz para analisar a trajetória desses raios em campos magnéticos, representada por:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (4)$$

Onde, $\vec{F}$ é a força magnética resultante que surge devida a presença de campo magnético $\vec{B}$ produzido por um elemento carregado, e essa força que atua sobre a partícula q se desloca com uma dada velocidade $\vec{v}$. Essa força é responsável por alterar a trajetória da partícula, sendo influenciada pela sua carga e pela velocidade com que se move (YOUNG; FREEDMAN, 2009).

Em 1879, William Crookes realizou um experimento utilizando eletrodos para aplicar diferenças de potencial e gerar um campo elétrico dentro de tubos de gases rarefeitos. Crookes observou que o feixe luminoso que atravessava o tubo a partir do cátodo se propagava em linha reta, na ausência de ações externas (OGURI, 2006). Graças a uma série de experimentos, Crookes concluiu que os raios catódicos eram entidades carregadas, constituindo o quarto estado da matéria - atualmente esse termo é usado quando nos referimos ao plasma, obtido ao produzir uma descarga elétrica em um gás rarefeito (FERNANDES, 2018).

Anos mais tarde, J.J. Thomson, utilizando bombas de vácuo mais potentes, reproduziu o experimento de Crookes e confirmou a deflexão dos raios catódicos ao atravessarem as placas metálicas que produziam campo elétrico (PIERES, 2011). Com essas observações, ele confirmou no século XIX que os raios eram constituídos de partículas de natureza negativa, às quais chamou de elétrons, Thompson apresentou seus resultados num artigo científico publicado em 1897 (TIPLER; LLEWELLYN, 2009).

Essa descoberta revolucionou o entendimento da estrutura da matéria, contrapondo a ideia predominante na época, de que os átomos eram as menores unidades indivisíveis. Thomson estabeleceu uma relação entre a carga elétrica e a massa dos elétrons, o que revolucionou o rumo da física no estudo das partículas subatômicas. Essa descoberta teve ramificações significativas para muitos campos na física, como o estudo posterior da partícula positiva, o próton, a descoberta do valor da carga do elétron, e anos mais tarde, a compreensão do efeito fotoelétrico (FERNANDES, 2018).

4.3 HIPÓTESES, PARÂMETROS E RESULTADOS ESPERADOS

Com base na teoria do efeito fotoelétrico e na compreensão do funcionamento do TRC, alguns instrumentos de medida foram integrados ao circuito. O propósito dessas adaptações no sistema consistiu em investigar possíveis variações nos raios catódicos quando sujeitos à incidência de radiação sobre o tubo, a fim de quantificar algumas variáveis físicas durante o experimento. A abordagem se fundamentou na teoria do efeito fotoelétrico, segundo a qual, ao direcionar um feixe de luz de frequência específica para uma superfície contendo elétrons livres, os fótons dessa radiação transmitem sua energia para os elétrons presentes no material. Se essa energia for suficientemente alta para superar a força de ligação entre o elétron e a superfície, ou seja, ultrapassar a função trabalho do material, os elétrons são liberados com energia cinética diretamente proporcional à energia fornecida pelos fótons.

Apesar de parecer uma tarefa simples à primeira vista, a pesquisa enfrentou muitos desafios devido às limitações dos materiais disponíveis no laboratório. O estudo foi conduzido com apenas duas lâmpadas, cujos os valores nominais dos comprimentos de onda estavam próximos um do outro: uma lâmpada na faixa de frequência do Azul, com comprimento de onda entre 440-485nm com pico em 465nm, e outra na faixa de frequência do ultravioleta (UV), com comprimento de onda entre 350-400nm com pico em 365nm. No entanto, a validação desses valores nominais não pôde ser confirmada devido à ausência de dispositivos para realizar uma aferição precisa.

Mesmo sem essa confirmação, a pesquisa foi realizada compreendendo que, se o real comprimento de onda das lâmpadas carregasse uma energia cujo valor da função trabalho do material que reveste o eletrodo fosse menor, teoricamente não haveria problema na detecção da ejeção dos elétrons. No entanto, se o comprimento de onda carregasse uma energia cuja a função trabalho do material fosse maior, isso poderia comprometer a observação do fenômeno, uma vez que os elétrons não seriam ejetados da superfície do material.

Com base nessas hipóteses e parâmetros, a investigação foi dividida em quatro testes principais, enfatizando o estudo e análise dos dados para os testes que apresentassem resultados significativos, e mais um teste adicional para complementar o estudo. Os quatro primeiros testes seguiram o mesmo princípio: iluminar os eletrodos do TRC com as lâmpadas UV e Azul e medir variáveis físicas por meio dos instrumentos apropriados.

4.4 FASE DE TESTES

4.4.1 TESTE 1 – USO DO SENSOR DE PRESSÃO ABSOLUTA (SPA)

No primeiro dia, o TRC foi adaptado com o SPA (Figura 3), equipamento da CIDPEPE modelo CLO12B que realiza medidas de pressão no intervalo de medida entre 20 a 250 kPa:

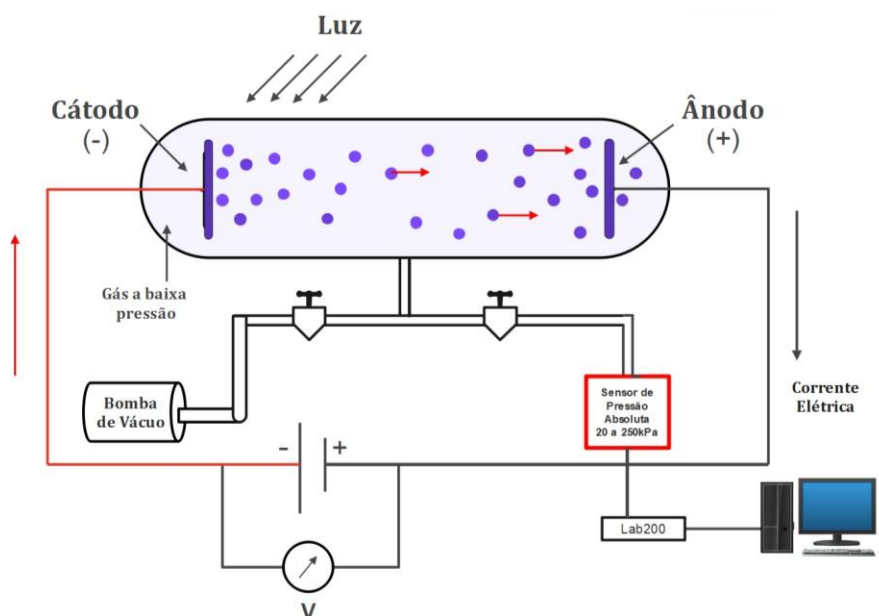
Figura 4 - Sensor de Pressão Absoluta



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

O sensor foi conectado ao circuito por meio da saída da válvula de pressurização do tubo, o esquema da figura 5, indica em vermelho o local onde o sensor foi posicionado:

Figura 5 - Diagrama do TRC adaptado com o sensor de pressão absoluta



Fonte: elaborado pelo autor, 2023

Ao realizar conexão do sensor ao circuito do TRC, foi conectado um cabo do sensor a interface LAB200 modelo EQO1OJ, que tem a função de transferir em tempo real as informações dos sensores para um software específico no computador:

Figura 6 - Interface LAB200

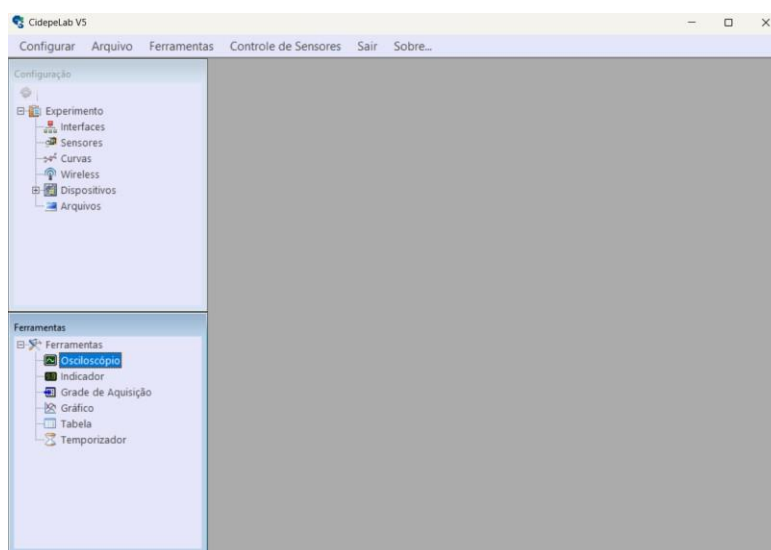


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

No computador é utilizado o software de aquisição da CidepeLabV5, onde virtualmente é realizada a sua conexão em tempo real. Para realização da conexão do SPA ao software, foram realizados os seguintes passos:

(1) Abrir o programa CidepeLab V5;

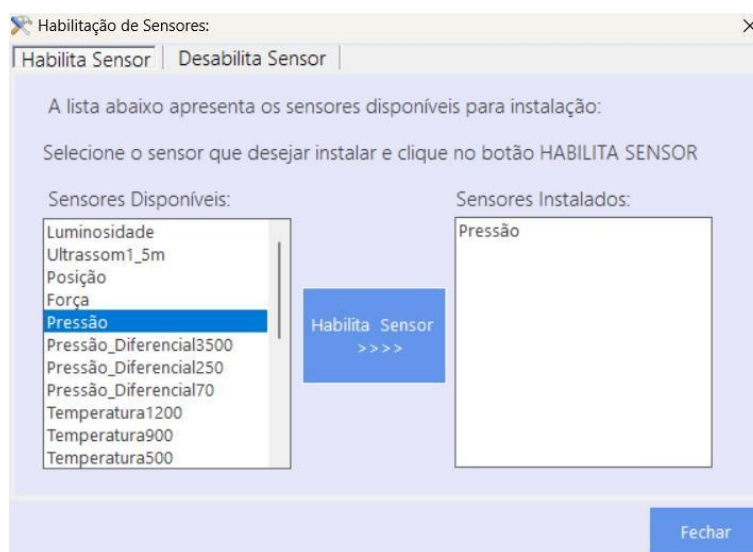
Figura 7 - Interface inicial do software da CidepeLabV5



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

(2) Selecionar - Controle de Sensores/Pressão/Habilitar Sensor;

Figura 8 - Interface de Habilitação de Sensores

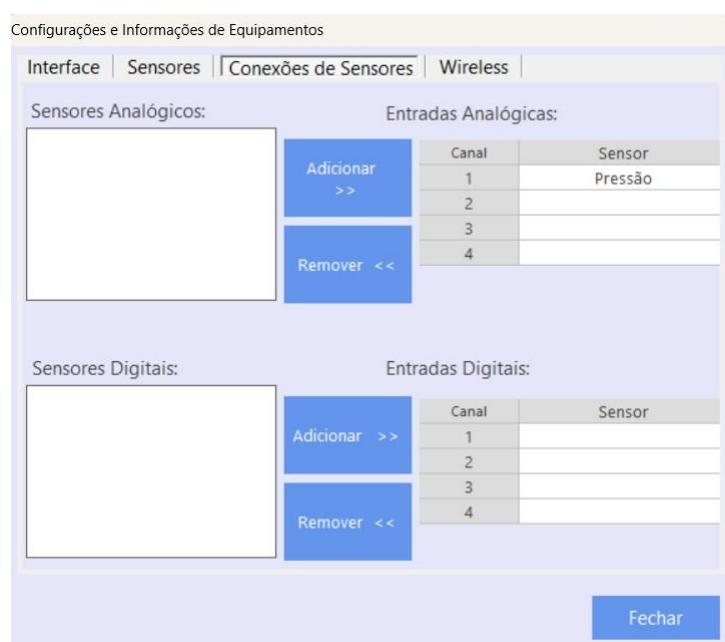


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

(3) Selecionar - Configurar/Equipamento;

(4) Selecionar - Sensor de Pressão/Canal 1/Adicionar;

Figura 9 - Interface de Configuração e Informações de Equipamentos

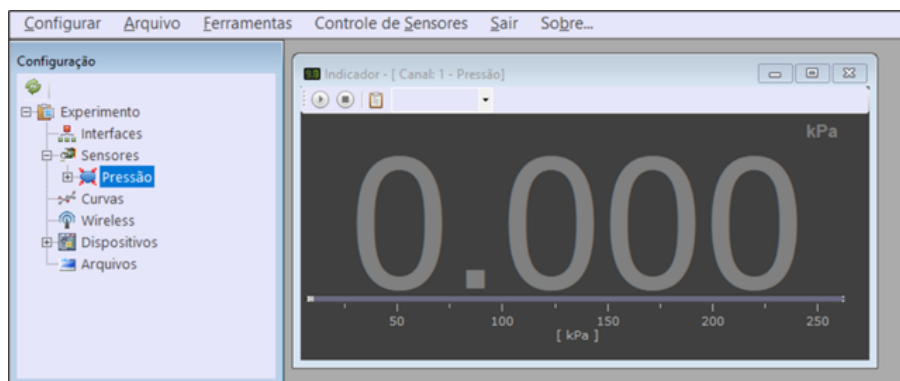


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

(5) Selecionar - Ferramentas/Indicador;

(6) Selecionar - Configuração/Experimento/Sensores/Arraste o sensor de Pressão para dentro do indicador;

Figura 10 - Interface do Indicador do Sensor Pressão Absoluta



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

(7) Para mais detalhes sobre como se deve realizar a conexão de sensores, recomenda-se acessar o Manual do Usuário através do endereço eletrônico abaixo: (<https://www.cidepe.com.br/index.php/br/downloadsoftware?versao=5b6df282490d9.pdf>.)

TESTE SEM A LUZ - ESTIMATIVA

Depois de realizar a conexão do sensor juntamente com a montagem do equipamento como detalhado no tópico 5.1, foi realizado um teste inicial para verificar o funcionamento do TRC. Para isso, foi acionada a bomba de vácuo para retirar parte da coluna de ar dentro do tubo, diminuindo assim a pressão interna do sistema e produzindo uma região de vácuo. Utilizando o disparador da fonte de tensão, foram realizados alguns disparos entre os eletrodos e verificou-se que os raios catódicos estavam se formando normalmente, com a pressão interna estimada no valor máximo de 0,3Pa, que é o valor nominal da menor região de pressão que a bomba de vácuo é capaz de produzir. Acompanhando a despressurização do tubo pelo indicador do software no computador, não foi indicado qualquer alteração na formação do feixe de raios catódicos para todas as regiões de pressão dentro do intervalo que o sensor consegue aferir.

LUZ NO ELETRODO POSITIVO – ÂNODO (+)

Na segunda configuração, a luz de frequência UV foi posicionada em frente a placa receptora do eletrodo positivo (A+), em seguida, em intervalos de tempo não programados, por meio do disparador da fonte de tensão foi realizado descargas elétricas consecutivas,

verificando o comportamento do feixe catódico para diferentes regiões de pressão. Como resultado desta configuração, em nenhum instante verificou-se que a luz UV incidente, influenciou na formação dos raios em todas as regiões de pressão no intervalo apresentado pelo sensor.

LUZ NO ELETRODO NEGATIVO – CÁTODO (-)

Na terceira configuração, a luz UV foi posicionada em frente a placa emissora do eletrodo negativo (C-) e o mesmo procedimento foi executado. À medida que as partículas de ar eram retiradas pela bomba de vácuo, o arco elétrico formado dentro do tubo se intensificava já que a pressão interna do sistema ficava menor. Ao olhar para o indicador do software no momento inicial, o sensor apresentou o valor de aproximadamente 92 kPa que é o valor da pressão atmosférica, e esse valor foi diminuindo à medida que região de vácuo aumentava no tubo como é esperado. Não obstante, em uma região específica, em meio a sequência de disparos com a fonte de tensão, um fenômeno diferente foi observado, o feixe de raio catódico para uma determinada região foi interrompido, e no disparo posterior o raio catódico voltou a se formar, entretanto, o indicador do software já havia estabilizado em um valor limite do sensor de pressão de 12 kPa, antes da ocorrência desse fenômeno, visto isso, foi levantado a hipótese de que essa região estava localizada bem abaixo de 12 kPa, já que pelo valor nominal a bomba produz uma região de pressão de até 0,3Pa, um valor bem distante, levando em conta a escala de kPa a Pa.

Vale ressaltar que o sensor pressão absoluta que estava sendo utilizado não estava devidamente calibrado e o valor da medida da pressão atmosférica que o mesmo estava indicando era de 92 kPa que corresponde a 100 kPa que seria o valor nominal, e o menor valor medido e indicado pelo sensor era de 12 kPa que corresponde a 20 kPa a ser indicado se estivesse calibrado, entretanto, considerando a escala, o intervalo de medida era o mesmo, desse modo, a interpretação dos dados indicados não foi comprometida por esse detalhe.

Sendo assim, a fim de averiguar se esse fenômeno era corriqueiro, levando em consideração o valor limite do sensor, a bomba de vácuo foi desligada, e foi realizado o processo inverso, à medida que o ar retornava para dentro do tubo, foi realizado disparos com a fonte de tensão entre os eletrodos em intervalos de tempo bem curtos, e como esperado, o fenômeno também acontecia. No entanto, mesmo observando a interrupção da corrente nesse processo inverso de pressurização do tubo, não foi revelado pelo indicador o valor da região que ocorria

o fenômeno, já que antes mesmo do sensor começar a indicar algum valor adentrando em seu intervalo, ele acontecia, desse modo, era seguro afirmar que essa região se localizava muito abaixo do que era possível aferir utilizando esse sensor. Então, percebeu-se que o instrumento seria insuficiente para relacionar a pressão interna do tubo durante a formação dos raios catódicos.

4.4.1 TESTE 2 - USO DO SENSOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL

No segundo dia foi adaptado ao circuito do TRC um SPD equipamento da CIDEPE modelo CLO12C como indicado na figura 11, que realiza medidas no intervalo de 0 a 250mmH₂O (Milímetro de coluna de Água), com o fim verificar alguma variação na corrente elétrica na incidência da luz UV em função da despressurização do tubo ao longo do tempo, bem como, identificar a região de pressão para qual ocorre esse efeito na corrente elétrica, levando em consideração, que esse sensor é capaz de aferir uma escala de medida menor que a do sensor de pressão absoluta.

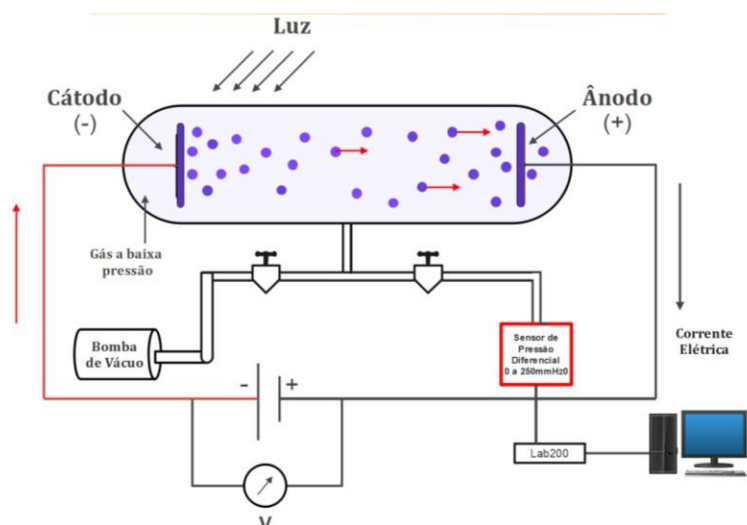
Figura 11 - Sensor de Pressão Diferencial



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

O processo de acoplamento do sensor ao TRC foi idêntico ao procedimento realizado para o SPA descrito na figura 5, sendo adaptado ao sistema na saída da válvula de pressurização do tubo, como mostra a figura 12.

Figura 12 - Diagrama do TRC adaptado com o sensor de pressão diferencial

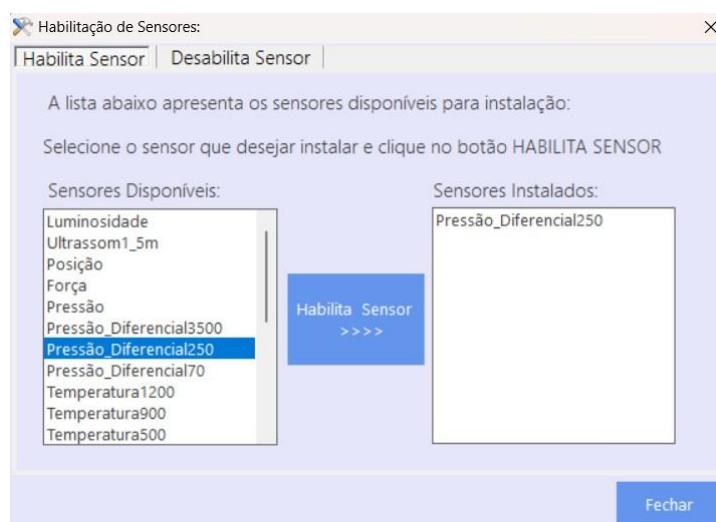


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Para realização da conexão do SPD no software da CidepeLabV5, seguiram-se os mesmos passos realizados na conexão SPA, diferindo somente na etapa de controle de sensores. Segue abaixo os passos na interface do software com a mudança para a escolha do sensor de referência:

(2) Selecionar - Controle de Sensores/Pressão Diferencial 250/Habilitar Sensor;

Figura 13 - Interface de Habilitação de Sensores

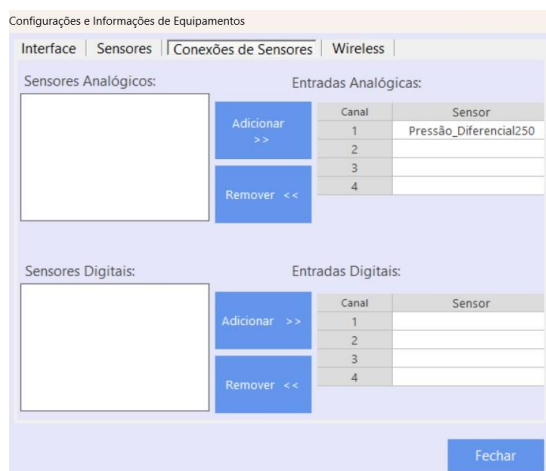


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

(3) Selecionar - Configurar/Equipamento;

(4) Selecionar - Sensor de Pressão/Canal 1/Adicionar;

Figura 14 - Interface de Configuração e Informações de Equipamentos

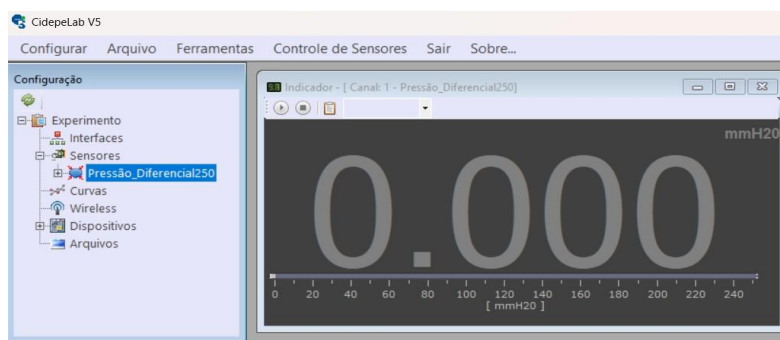


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

(5) Selecionar - Ferramentas/Indicador;

(6) Selecionar - Configuração/Experimento/Sensores/Arraste o sensor de Pressão para dentro do indicador;

Figura 15 - Interface do Indicador do Sensor Pressão Diferencial



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

Ao realizar a conexão do SPD e a montagem do equipamento. O segundo teste foi iniciado.

TESTE SEM A LUZ - ESTIMATIVA

Mediante essa troca dos sensores, foi realizado novamente o teste de funcionamento na ausência da luz nos eletrodos. Inicialmente a bomba de vácuo foi acionada para retirada constante da coluna de ar do TRC. realizando disparos com a fonte de tensão produzindo uma diferença de potencial entre os eletrodos, e verificou-se que o fenômeno dos raios catódicos

ocorria normalmente. Ao acompanhar a despressurização do tubo pelo indicador do software no computador, não foi indicado qualquer alteração na formação do feixe de raios catódicos para todas as regiões de pressão dentro do intervalo que o sensor consegue aferir.

LUZ NO ELETRODO NEGATIVO – CÁTODO (-)

Após a verificação inicial de funcionamento, para a segunda configuração utilizando SPD, foi realizado o teste na incidência da luz UV sobre o eletrodo negativo (C-). A bomba de vácuo foi acionada, e com a diminuição da pressão interna do tubo, o sensor diferencial estabilizou em seu valor limite de 250mmH₂O, valor este que corresponde a aproximadamente 2,5 kPa, um valor de pressão bem abaixo se comparado ao valor mínimo de 20 kPa medido pelo sensor de pressão absoluta, que ainda assim é grande se comparada a pressão interna produzida pela bomba de 0,3Pa. Mediante essa configuração na presença da luz UV sobre o (C-), como já era esperado, para uma certa região o feixe de raios catódicos foi interrompido. Entretanto, mesmo o sensor diferencial sendo mais preciso e dispondo de um intervalo de medida menor que o sensor anterior, ainda assim não foi capaz de determinar o valor da pressão interna dentro do tubo para o qual o fenômeno ocorria.

LUZ NO ELETRODO POSITIVO – ÂNODO (+)

Na terceira configuração, foi realizado um teste na incidência da luz UV sobre o eletrodo positivo (A+), e verificou-se o mesmo fenômeno, porém com menor intensidade. A região de pressão para a qual o fenômeno ocorria mais uma vez não foi identificada, pois, assim como no sensor de pressão absoluta, essa região se encontrava fora do intervalo de medida em que o SPD conseguia aferir.

Chegou-se à conclusão que para determinar com precisão a região de pressão que ocorria o fenômeno, era necessário utilizar um sensor de pressão capaz de aferir valores abaixo do que a bomba de vácuo produzia dentro do tubo. Como não havia outros sensores disponíveis, para dar seguimento à investigação, foi realizada outra adaptação para aferir a ocorrência do efeito fotoelétrico por meio dos parâmetros da corrente elétrica em função da pressurização do tubo ao longo do tempo. No entanto, os testes com os sensores foram relevantes no estudo, pois por meio deles, identificou-se a influência da radiação na formação dos raios catódicos.

Os testes com a luz Azul não foram apresentados nas adaptações do circuito do TRC com os respectivos sensores de pressão, tendo em vista que pela teoria do efeito

fotoelétrico, para esse espectro de luz que apresenta um comprimento de onda maior que o da radiação UV, os mesmos resultados seriam observados, mas com menor reação. Por esta razão, foi utilizado somente a luz UV nesses testes devidos o seu maior efeito por apresentar um menor comprimento de onda dentre as lâmpadas utilizadas.

4.4.3 TESTE 3 – USO DE UM MULTIMETRO (LUZ UV)

No terceiro dia em busca de métodos que possibilitassem a investigação da incidência da radiação eletromagnética no TRC, resolvemos adaptar ao circuito um amperímetro a fim de medir como parâmetro de estudo alguma variação da corrente elétrica em função do tempo ao longo da pressurização. A figura 16, mostra amperímetro utilizado na adaptação:

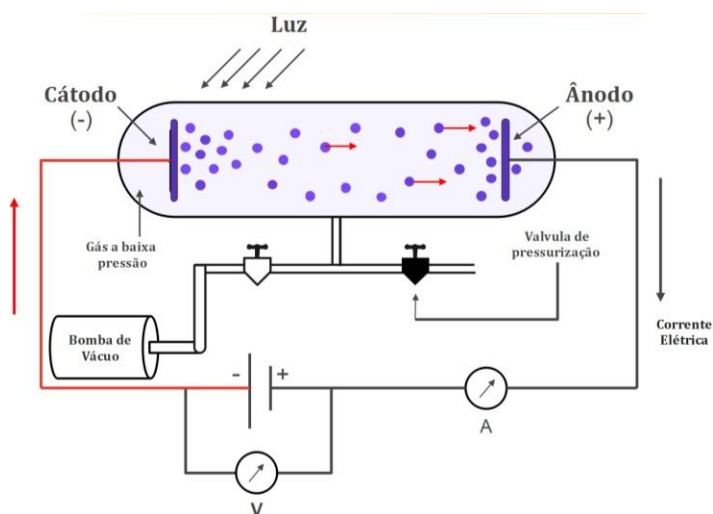
Figura 16 - Multímetro utilizado na função amperímetro para aferir a corrente elétrica do TRC



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

O diagrama da figura 17, apresenta o circuito do TRC com o amperímetro conectado.

Figura 17 - Diagrama do TRC adaptado com amperímetro



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

Com o amperímetro ligado em série ao circuito do TRC, a primeira verificação nessa configuração foi realizada sem a incidência da luz UV, assim, inicialmente a válvula da saída de pressurização foi parcialmente fechada e a bomba de vácuo foi acionada para retirada da coluna de ar dentro do tubo. Em seguida, ao desligar a bomba, a fonte de tensão foi ligada e o disparador da fonte foi utilizada para estabelecer a diferença de potencial entre os eletrodos, assim, no intervalo entre cada disparo o valor da corrente elétrica indicado pelo amperímetro era anotado.

Na segunda verificação para esta configuração, a luz UV foi posicionada sobre o (C-) e o procedimento anterior foi realizado. Em seguida, a luz UV foi posicionada sobre o (A+) e o procedimento também foi repetido. Os dados obtidos nessa primeira coleta podem ser observados na tabela no Apêndice A deste trabalho. No entanto, analisando as primeiras medidas com e sem a incidência da luz UV, foram observadas divergências em alguns pontos, bem como uma queda inesperada na corrente elétrica sem a incidência da luz UV o que era bastante estranho.

Levando em consideração esses fatores, foram estabelecidas três condições para melhor contabilização dos dados e obter resultados mais precisos. A primeira condição foi utilizar um cronômetro e estabelecer um valor fixo para o tempo de despressurização do TRC. A segunda foi controlar o disparador da fonte realizando disparos com a fonte de tensão em intervalos bem curtos e fixos de tempo. A terceira condição foi definir a quantidade mínima de medidas para as diferentes configurações em que as lâmpadas eram posicionadas. Essas condições foram estabelecidas para um melhor controle e precisão nos dados obtidos.

Depois de estabelecer as condições, iniciou-se a coleta de dados. A primeira verificação nesta configuração foi realizada sem a incidência de luz. Com o equipamento devidamente ajustado, a bomba de vácuo foi acionada juntamente com um cronômetro. Passados 4 minutos era possível observar que os raios catódicos com o máximo de intensidade, e nisso especular que a bomba de vácuo produziu uma região de pressão mínima de 0,3Pa. Então, a válvula de entrada foi fechada e a bomba de vácuo desligada iniciando o processo de pressurização. Rapidamente em seguida, a fonte de tensão foi ligada, e ao realizar o primeiro disparo e anotar o primeiro valor da corrente elétrica indicada pelo amperímetro, o cronômetro foi novamente iniciado e passado 10 segundos, o segundo disparo foi realizado e a partir daí seguiu-se a coleta dos demais valores, estabelecendo o valor de 10s o intervalo como o valor padrão de tempo entre as medidas. Ao final, registrou-se um total de 25 medidas, e fixou-se

essa quantidade de medidas como sendo, a mínima no momento das coletas a fim de estabelecer um padrão e um melhor controle dos dados.

Na segunda coleta de dados nesta configuração, a luz UV foi posicionada sobre o (A+) eletrodo positivo do TRC, e foi realizado o mesmo procedimento realizado na coleta de dados sem a presença de luz seguindo as condições iniciais pré-definidas, e foi registrado um total de 39 medidas.

Na terceira coleta de dados, a luz UV foi posicionada sobre o Cátodo (C-) eletrodo negativo do TRC, e foi realizado o mesmo procedimento, e para essa terceira configuração foi registrado um total de 39 medidas. A análise dos dados e o resultado desse teste estão dispostos na seção de resultados e discussões.

4.4.4 TESTE 4 – USO DE UM MULTIMETRO (LUZ AZUL)

No quarto dia, prosseguindo com a adaptação do TRC, utilizando o amperímetro, empregou-se desta vez, uma fonte de luz azul para registrar os dados da corrente elétrica ao longo do tempo de pressurização. Conforma as condições experimentais estabelecidas para a coleta de dados no teste anterior, designado como teste número 3.

A primeira medida de corrente elétrica foi realizada sem a incidência da luz. Mesmo já tendo os valores para essa configuração obtidos no teste N°3, levamos em consideração o fato de serem dados coletados em dias diferentes, assim, foi realizada outra medida para esta configuração. Dessa forma, foi possível realizar uma análise comparativa do comportamento dos dados coletados em dias diferentes, para verificar a sua precisão. Para esta primeira configuração, foi registrado um total de 25 medidas.

Na segunda coleta de dados, a luz Azul foi posicionada sobre o eletrodo positivo do TRC (A+) e o procedimento padrão de coleta de dados foi seguido respeitando as condições pré-definidas. Para esta configuração, foi registrada um total de 32 medidas.

Na terceira coleta de dados, a luz Azul foi posicionada sobre o eletrodo negativo do TRC (C-) e o mesmo procedimento foi realizado, respeitando as condições pré-definidas, assim, para esta configuração foi registrado um total de 32 medidas.

Os testes 3 e 4, nos quais um amperímetro foi integrado ao circuito do TRC, geraram resultados significativos, proporcionando uma base sólida para a realização de uma

análise mais aprofundada. A discussão desses dados é abordada com mais detalhes no tópico 6 deste trabalho. O teste 5 que segue abaixo, têm o objetivo de complementar o estudo do efeito fotoelétrico, utilizando um eletroscópio e as lâmpadas utilizadas nos testes anteriores.

4.4.5 TESTE 5 – ELETROSCÓPIO DE FOLHAS DE ALUMÍNIO

No quinto dia, um eletroscópio de folhas de alumínio foi construído na perspectiva de complementar a investigação de maneira diferente, incidindo as lâmpadas UV e Azul sobre a superfície desse experimento de baixo custo, construído com uma garrafa pet, fio de cobre, e papel alumínio. A figura 18 exibe o eletroscópio utilizado.

Figura 18 - Eletroscópio de folhas de alumínio



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

O experimento consistiu em incidir a radiação emitida pelas luzes UV e Azul sobre a superfície do eletroscópio de três formas diferentes: incidindo sobre o eletroscópio neutro, onde apresenta a mesma quantidade de elétrons e prótons., carregado negativamente com excesso de elétrons, e carregado positivamente com a falta de elétrons. O resultado deste teste é apresentado na seção de resultados e discussões.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos dados obtidos durante a realização das adaptações do TRC, os testes de números 3 e 4 produziram resultados surpreendentes. A partir desses resultados, foram construídos gráficos que representam as relações investigadas.

Entretanto, antes disso, é importante destacar que na execução dos testes números 1 e 2 utilizando o SPA e o SPD, esperava-se obter como resultado uma relação linear entre a corrente elétrica em função da despressurização do TRC, aferindo quantitativamente o seu valor à medida que a pressão interna do sistema diminuía. Deste modo, seria realizado uma análise comparativa da corrente elétrica com e sem a incidência da radiação eletromagnética produzida pela lâmpada UV. Entretanto, devido às limitações apresentadas pelos sensores em aferir intervalos de pressão abaixo do valor que era produzido pela bomba de vácuo, não foi possível obter dados para direcionar um estudo nesta adaptação tendo por base esses parâmetros.

Contudo, esses testes iniciais contribuíram significativamente para o avanço da pesquisa, porquanto mediante sua realização, observou-se uma possível influência da radiação incidente sobre o TRC, sendo esta detectada ao conduzir descargas elétricas sequenciais dentro do tubo à medida em que era gradualmente despressurizado ou pressurizado. A diferença de potencial produzida pela descarga elétrica da fonte era realizada em intervalos de tempo bem curtos, já a incidência da luz UV era realizada de forma alternada, ou seja, uma descarga era efetuada com a luz ligada, seguida por outra descarga com a luz desligada.

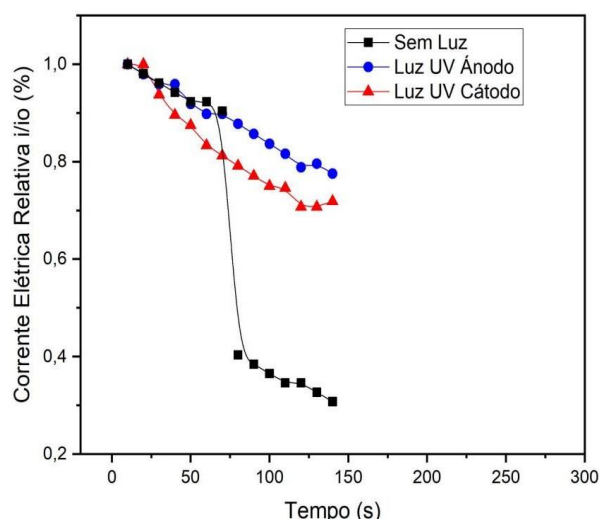
Ao realizar esse procedimento em qualquer um dos eletrodos, foi identificado a existência de uma região de pressão específica dentro do tubo, que no momento que a luz UV estava ligada, a corrente elétrica parava de fluir, e quando a luz UV era desligada, a corrente elétrica retomava sua circulação. Embora o valor preciso dessa região de pressão não tenha sido determinado devido às limitações do sensor, é possível sugerir respostas para essa questão: ao incidir luz sobre os eletrodos do TRC, o feixe de elétrons era interrompido devido ao processo de ionização do gás que ocorre nessa região de pressão. As partículas livres liberadas nesse processo interferiam diretamente na passagem dos elétrons ejetados do eletrodo, absorvendo sua energia e desacelerando-os. Consequentemente, dissipando essa energia de mudança de estado, os elétrons eram impedidos de retornar ao seu estado fundamental de menor energia, interrompendo assim a emissão de luz. Isso acontecia porque não havia elétrons suficientemente excitados para liberar a alta energia fornecida pela fonte de tensão na forma de luz. Visto que, quando a bomba de vácuo atingia a região de pressão específica onde o fenômeno estava ocorrendo, os sensores já haviam alcançado seu valor limite e não eram capazes de registrar pressões ainda mais baixas.

Então, a fim de continuar investigando o fenômeno, a adaptação do TRC utilizando sensores foi encerrada e iniciou-se a execução do teste 3 utilizando um amperímetro conectado

em série ao circuito do TRC (figura 16). Por meio desta adaptação, buscava-se perceber alguma alteração na corrente elétrica com a incidência da luz UV em comparação sem a incidência de luz UV ao longo do tempo enquanto o TRC era pressurizado.

Levando em consideração o que descreve a teoria, ao incidir radiação mais especificamente sobre o eletrodo negativo (C-) era esperado observar um aumento parcial na corrente elétrica, tendo em vista, que o número de elétrons ejetados dentro do tubo aumentaria de forma proporcional a energia fornecida pela radiação incidente. Então o teste 3, consistiu em aferir os valores da corrente elétrica indicados pelo amperímetro ao estabelecer a descarga elétrica dentro do tubo, com e sem a incidência de luz sobre o (A+) e sobre o (C-) ao longo do tempo, enquanto o TRC era pressurizado, e assim compará-los. Com os dados obtidos nessa primeira verificação, o gráfico 1 abaixo foi construído.

Gráfico 1 - Corrente elétrica relativa em função do tempo com e sem a incidência da luz UV



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

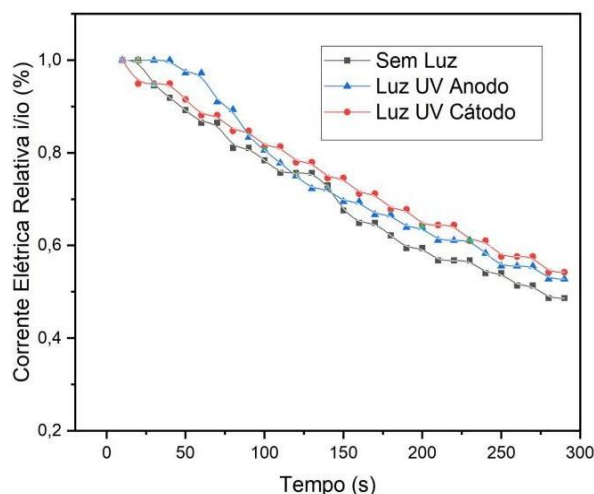
Ao analisar as linhas de tendência no gráfico 1, referentes às medidas realizadas, foi observado uma descontinuidade na curva representando um tipo de degrau na corrente elétrica quando a luz não estava incidindo, o que foi inesperado dado o bom isolamento do sistema. Em resposta a essa observação, foram levantadas as seguintes hipóteses:

A primeira hipótese envolveu a falhas no multímetro, o que poderia afetar as medições no momento do registro, representando um erro considerável. A segunda hipótese considerou variações inesperadas na rede de fornecimento de energia elétrica do laboratório, especialmente porque o experimento foi realizado no período noturno, e a energia do laboratório é gerada a partir de painéis solares, o que pode resultar em interrupções na distribuição. A

terceira hipótese sugeriu a possibilidade de ionização do gás dentro do tubo, o que interferiria diretamente no fluxo de elétrons. Contudo, depois de levantar essas hipóteses, não se seguiu buscando a causa exata desse ocorrido. Apesar de o Gráfico 1 não apresentar resultados consistentes, ele desempenhou um papel importante ao demonstrar a melhoria na confiabilidade das medições nas configurações subsequentes.

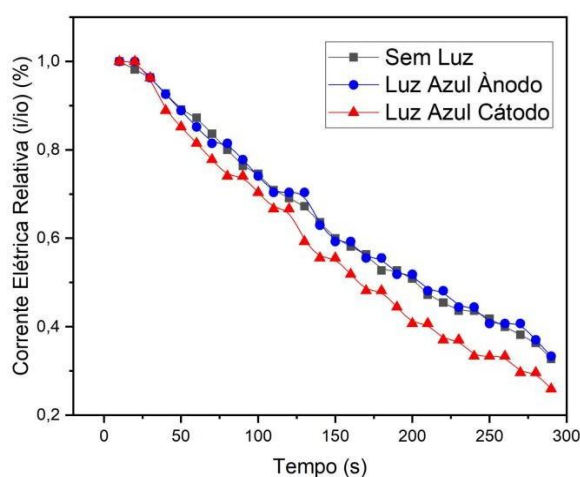
Portanto, uma segunda rodada de medições foi conduzida com o objetivo de obter dados mais precisos, seguindo as condições definidas no tópico do teste N°3. Nesse sentido, o experimento anterior com a luz UV foi repetido, e foi iniciado um teste inserindo também a luz azul. No total essas medidas foram repetidas três vezes para cada configuração. Os dados coletados são exibidos nos gráficos 2 e 3, representados abaixo.

Gráfico 2 - Corrente elétrica relativa em função do tempo com e sem a incidência da luz UV



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

Gráfico 3 - Corrente elétrica relativa em função do tempo com e sem a incidência da luz Azul



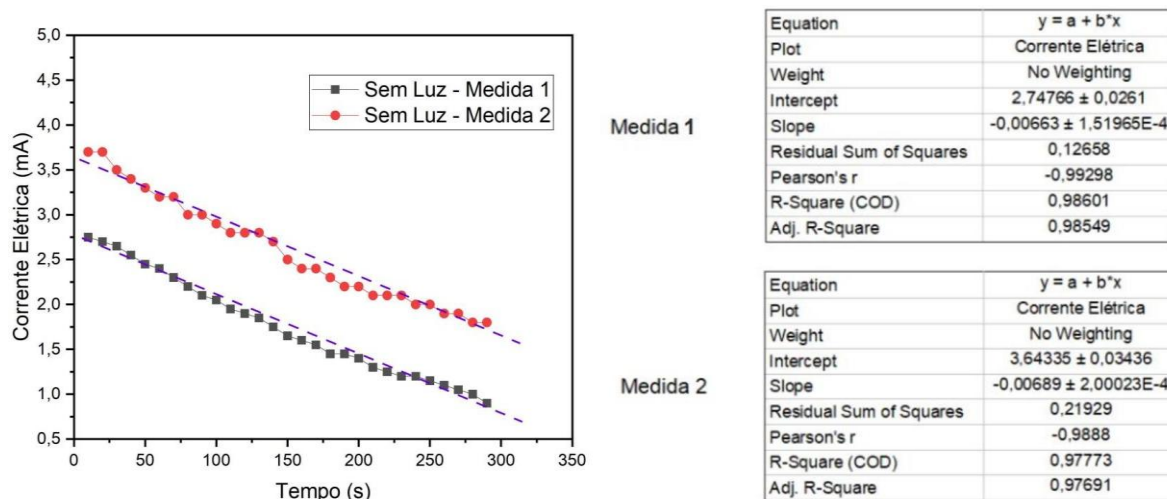
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

Ao examinar os gráficos 2 e 3, não foi notada uma diminuição súbita na corrente elétrica, como aquela registrada no gráfico 1 na ausência de luz. No entanto, ao observar o comportamento da corrente elétrica na presença da luz UV sobre o Ânodo (+) nos estágios iniciais, a corrente permanece por alguns instantes em comparação com as outras linhas de tendência para aquela faixa de pressão, mas logo diminui rapidamente.

Isso sugere a possibilidade de que os dados coletados para a elaboração do primeiro gráfico tenham sofrido interferências de algumas das hipóteses levantadas anteriormente. No entanto, os resultados obtidos na segunda rodada de medições, que serviram de base para os Gráficos 2 e 3 subsequentes, seguindo as condições estabelecidas no Teste N°3, demonstraram maior precisão.

Devido ao evento da diminuição da corrente elétrica na ausência de luz, conforme apresentado no Gráfico 1, realizou-se uma última análise para avaliar a confiabilidade das medições antes de conduzir o teste principal. Sendo assim, foram realizadas duas medições em dias diferentes para a corrente elétrica na ausência de luz. Os dados obtidos nessas medições estão presentes no Gráfico 4 abaixo:

Gráfico 4 - Análise comparativa das medidas 1 e 2 da corrente elétrica em função do tempo sem a incidência da luz, registradas em dias diferentes nos gráficos 2 e 3



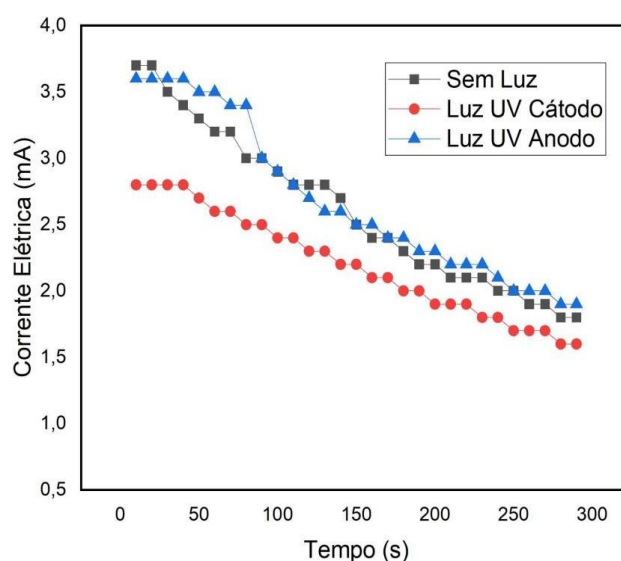
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

Foi realizado um ajuste linear nas medições da corrente na ausência da incidência de luz ao longo do tempo. Ao examinar o ajuste realizado, expresso pela equação da reta, observa-se que o valor de R^2 (R-Square) se aproxima muito de 1, e os coeficientes angulares das retas são idênticos considerando as incertezas: a reta 1 com um declive de $(-0,0066 \pm$

0,0001) e a reta 2 com um declive de $(-0,0068 \pm 0,0002)$. Com uma precisão dos resultados da ordem de 10^{-4} , considera-se essas medições idênticas. O erro percentual é de aproximadamente 0,03%, o que confere confiabilidade nas medidas obtidas em dias diferentes.

Após a conclusão dos testes de validação, procedeu-se com a coleta de dados destinada ao estudo da corrente elétrica em função do tempo, tanto com a incidência da luz UV quanto sem ela nos eletrodos. Essa coleta seguiu as condições iniciais estabelecidas no Teste N°3.

Gráfico 5 - Corrente elétrica em função do tempo com e sem a incidência da luz UV



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

Ao examinar o Gráfico 5, considerando inicialmente a linha que representa a variação da corrente elétrica na ausência de luz UV, observa-se uma diminuição progressiva no valor da corrente elétrica ao longo do tempo, o que é esperado. Isso ocorre à medida que o tubo é pressurizado e as partículas de ar retornam para o seu interior através da válvula de pressurização, resultando no aumento da resistência à passagem da corrente em função do tempo.

Ao analisar o perfil da curva que descreve a corrente elétrica sob a incidência de radiação UV, sob o eletrodo positivo (A+) ao longo do tempo, não se evidenciam diferenças significativas nos valores da corrente em comparação com o comportamento da linha que representa a corrente elétrica na ausência de radiação UV. Embora se observe um leve aumento inicial, esse efeito não se mantém, e os valores subsequentes não se distinguem dos da corrente sem luz.

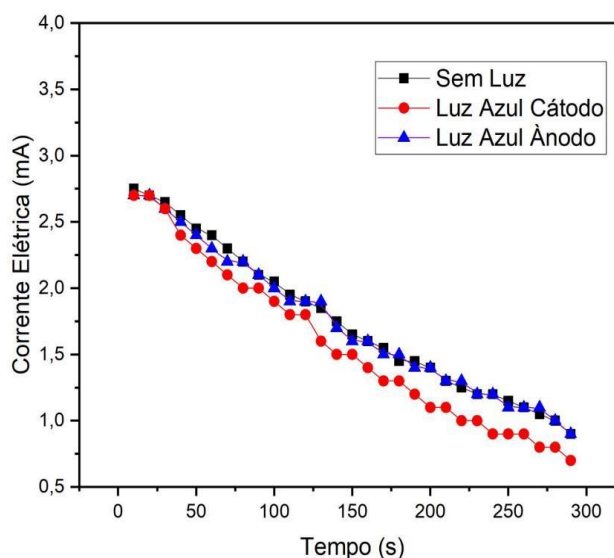
Por outro lado, quando se observa o perfil da curva que representa os valores da corrente elétrica sob a incidência de radiação UV no eletrodo negativo (C-), nota-se que a corrente parte de valores iniciais menores e também diminui, seguindo o mesmo padrão da corrente na ausência de luz e na presença da luz no (A+). No entanto, com uma menor taxa de variação temporal, a corrente elétrica na presença de luz UV sofre uma diminuição. É relevante ressaltar que a fonte de tensão não é variável, o que nos leva a concluir que essa variação da corrente foi proveniente da radiação UV.

Esse resultado é inesperado, uma vez que, que pela teoria do efeito fotoelétrico ao incidir a radiação UV sobre o eletrodo negativo (C-), esperava-se observar um aumento na corrente elétrica, já que mais elétrons seriam acelerados da superfície do eletrodo emissor ao eletrodo coletor. Entretanto, o que se observa é uma diminuição na corrente elétrica. Nossa interpretação diante deste resultado, sugere que a incidência da radiação eletromagnética emitida pela luz UV está interferindo no processo normal de ionização do gás, ou seja, alterando as suas propriedades elétricas e, conseqüentemente a energia de ionização dos átomos, isso faz com que menos íons positivos sejam formados no interior do tubo, ocasionando uma diminuição na condutividade elétrica do meio.

Contudo, não podemos desconsiderar outros fatores externos que poderiam produzir este mesmo efeito, como por exemplo: a radiação poderia aumentar a temperatura na superfície do eletrodo do cátodo, influenciando na emissão de elétrons ou alterar as propriedades elétricas do eletrodo; a radiação poderia causar mudanças na composição do gás, afetando a capacidade de condução; o campo eletromagnético da radiação, poderia influenciar o movimento de elétrons no tubo, outras condições como a variação inesperada da pressão interna ou presença de impurezas dentro do tubo também poderiam diminuir a condutividade elétrica dentro no tubo. São diversos os parâmetros a serem considerados; contudo, não se pode negar a influência da luz UV sobre o comportamento dos raios catódicos.

O teste N°4, conduzido no dia seguinte, foi empregado a mesma configuração do TRC, porém a luz UV foi substituída pela luz Azul. Em seguida, os mesmos procedimentos foram repetidos seguindo as condições estabelecidas no teste N°3. Com base nos dados obtidos relativos à corrente elétrica em função do tempo, enquanto o TRC é pressurizado, o Gráfico 5 foi construído:

Gráfico 6 - Corrente elétrica em função do tempo com e sem a incidência da luz Azul



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Ao analisar o gráfico 6 e comparar visualmente as linhas de tendência com as do gráfico 5 observamos que os valores da corrente elétrica não coincidem com os obtidos no teste anterior realizado com luz UV. Ressaltando novamente o fato de que a fonte de tensão elétrica é constante e mantém sempre o valor de 4.000V, a ligeira diminuição do valor inicial da corrente, pode ser atribuído à influência da luz, como também ao desgaste do eletrodo, tendo em vista o número significativo de vezes que o equipamento foi utilizado.

Levando em consideração esses detalhes, ao examinar o comportamento das linhas de tendência da corrente elétrica com e sem a incidência de luz Azul, nota-se que quando há incidência da radiação azul sobre o eletrodo negativo (C-) ocorre uma diminuição. Já para a incidência de luz sobre o eletrodo positivo (A+) em comparação com a linha de tendência da corrente sem a incidência de luz azul, não se observam diferenças significativas. A sua diminuição ocorre de forma gradual à medida que o número de partículas no tubo aumenta, produzindo menor interferência no processo de ionização do gás no tubo, reduzindo as colisões na sua superfície do eletrodo coletor, diminuindo a corrente elétrica.

Em suma, fica claramente evidenciada a influência das lâmpadas de radiação UV e Azul sobre os raios catódicos produzidos no TRC. A análise dos gráficos 5 e 6 confirma que a radiação UV exerce uma influência mais significativa, enquanto a luz Azul possui uma influência menos marcante nas superfícies dos eletrodos do TRC. Essa diferença se deve ao menor comprimento de onda da luz UV em comparação com a luz Azul, o que resulta em uma

maior quantidade de energia transmitida pelos fótons da radiação UV que apresenta um menor comprimento de onda. Dessa maneira, ocorre uma maior influência no comportamento dos raios catódicos na interação com os fótons da radiação ultravioleta que carregam consigo mais energia. Contudo, em ambos os casos, as observações corroboram para o entendimento do fenômeno do efeito fotoelétrico.

Na execução do teste 5, como resultado da primeira configuração, ao expor o eletroscópio neutro a luz UV, onde as folhas de alumínio estão inicialmente em contato devido à mesma quantidade de cargas positivas e negativas, não foi observada nenhuma mudança.

Na segunda configuração, o eletroscópio foi carregado negativamente por meio do processo de eletrização por contato. Inicialmente, um canudo foi atritado a um papel toalha. Em seguida, ao acumular carga suficiente, foi colocado em contato com a esfera do eletroscópio, transferindo as cargas acumuladas para ele. Realizando esse procedimento inicial as folhas de alumínio se afastam uma da outra, indicando que o eletroscópio adquiriu cargas de mesmo sinal, eletrizado negativamente. Desse modo, quando a luz UV iluminou o eletroscópio carregado com excesso de elétrons, não ocorreu efeito algum. Este resultado indica que a (radiação eletromagnética) luz utilizada apresenta uma frequência menor que a frequência de corte do material que reveste a superfície do eletroscópio que é o alumínio, ou seja, a luz UV utilizada não dispõe da energia mínima necessária para realizar a fotoemissão da superfície de alumínio. Devido a isso, o eletroscópio continuou eletricamente carregado.

Na terceira configuração, o eletroscópio foi eletrizado positivamente por meio do processo de indução eletrostática, que consiste em aproximar o canudo eletrizado por atrito sem encostar na esfera atraindo as cargas de sinal oposto, e repelindo as cargas de mesmo sinal encostando o dedo na esfera, desse modo, o eletroscópio é carregado positivamente. Ao realizar esse procedimento, as folhas de alumínio se separaram uma da outra indicando que o eletroscópio adquiriu cargas de mesmo sinal. Assim, quando a lâmpada de luz UV iluminou o eletroscópio com excesso de cargas positivas, como esperado, nada aconteceu e as folhas permaneceram separadas, pelo simples fato de não dispor de elétrons livres a serem ejetados.

Ao realizar o teste com a luz Azul que apresenta um comprimento de onda maior que a luz UV, e os mesmos resultados foram observados para as três configurações, indicando que a energia dos fótons provenientes das radiações utilizadas dispunha de uma energia menor que energia mínima para arrancar os elétrons da superfície do alumínio. Ou seja, entende-se com isso que se a superfície do eletroscópio fosse revestida de outro tipo de material que

apresentasse uma função trabalho menor que energia dessa radiação incidente, seria possível observar o efeito fotoelétrico.

De acordo com o experimento, podemos concluir que para que uma radiação eletromagnética arranque elétrons de uma determinada superfície, ela deve apresentar uma frequência que carregue consigo uma quantidade de energia que deve ser maior que energia de ligação que prende o elétron ao material. Cada material dispõe de função trabalho diferente. Assim, se a superfície do eletroscópio utilizado fosse constituída de outro material que apresentasse uma função trabalho menor que a energia radiação da luz Azul e UV pela teoria os resultados obtidos seriam diferentes.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

O estudo experimental realizado neste trabalho direcionou de maneira clara e consistente uma investigação de evidências da ocorrência do efeito fotoelétrico no TRC. Ao analisar os dados experimentais, foi evidenciado a influência da radiação eletromagnética proveniente das lâmpadas de frequência UV e Azul na formação dos raios catódicos. A análise gráfica do comportamento da corrente elétrica em função do tempo confirmou que a radiação provoca uma diminuição na corrente elétrica formada no TRC. Ou seja, reduz a quantidade de elétrons que passam do eletrodo emissor (C-) e alcançam o eletrodo coletor (A+), ao intervir no processo de ionização do gás, provocando tal resultado.

Durante os testes realizados no TRC na adaptação com sensores observamos outra previsão da teoria do efeito fotoelétrico: o potencial de frenagem, em que a emissão dos elétrons no TRC é completamente interrompida. Verificamos que ao incidir a luz para uma determinada região de pressão no TRC a corrente elétrica cessava totalmente e quando parava de incidir a corrente voltava a circular. Além disso, esse fenômeno ocorria sem atraso, no instante em que a luz incidia a corrente elétrica era influenciada.

Também foi observado, em conformidade com as previsões teóricas, que a luz ultravioleta (UV), por possuir um comprimento de onda menor em comparação com a luz Azul, exerce uma influência mais significativa na variação da corrente elétrica dentro do TRC. Isso respalda a conclusão de que, quanto menor for o comprimento de onda da radiação incidente, maior será a energia transmitida pelos fótons. Esse resultado também nos permite reafirmar o fato de que a intensidade da luz incidente não tem impacto no processo de liberação de elétrons.

Ou seja, a influência da frequência da luz na manifestação do efeito fotoelétrico, não depende de sua intensidade.

Contudo, é importante reconhecer que o nosso experimento possui limitações, tais como a precisão limitada dos equipamentos e a possibilidade de fontes de erro. Estudos subsequentes que busquem melhorar a precisão das medições e investigar outros parâmetros, como a influência da temperatura, na ocorrência desse fenômeno, são necessários.

Em última análise, este estudo contribui para o avanço da compreensão do assunto, oferecendo evidências experimentais que corroboram as teorias estabelecidas. Essa pesquisa reforça a importância e a relevância desse fenômeno na física moderna. Espera-se que este trabalho sirva como ponto de partida para futuras investigações, que possam explorar aspectos mais detalhados do efeito fotoelétrico, ampliando assim nosso conhecimento sobre a natureza da luz e sua interação com a matéria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALMEIDA, A. P. de.; **Tópicos de Física Quântica no Ensino Médio Utilizando Simulações Computacionais**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Araguaína - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) Profissional Nacional em Ensino de Física, p.21. 2018.
- [2] BARTHEM, Ricardo.; **A luz: Temas atuais de FÍSICA**. Sociedade Brasileira de Física. 1ª ed. rev. - São Paulo, 2005.
- [3] BASSALO, J. M. F.; CARUSO, Francisco.; **Einstein**. História 4 – Físicos – Bibliografia I. Editora livraria de física, São Paulo, 2013.
- [4] BASSALO, J. M. F.; **A Crônica da Física do Estado Sólido: I. Do tubo de Geissler às válvulas a Vácuo**. *Revista Brasileira Do Ensino De Física* vol.15. Departamento de Física, UFBP. 13. nov.1993.
- [5] CARUSO, F.; **O Universo da Luz**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 42, e20200250. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, 2020.
- [6] EBERHARDT, D.; FILHO, J. B. R. da.; LAHM, R. A.; BAITELLI, P. B.; **Experimentação no ensino de Física Moderna: efeito fotoelétrico com lâmpada néon e LEDs**. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 34, n. 3, p. 928- 950, dez. 2017.
- [7] EISBERG, R.; RESNICK, R.; **FÍSICA QUÂNTICA: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. 9ª ed., Rio de Janeiro: Editora Campus, 1994.
- [8] FERNANDES, J. M.; PATROCINIO, F. S.; REIS, F. I.; **“O químico e físico inglês Willian Crookes (1832-1919) e os raios catódicos: Uma adaptação tátil do tubo para o ensino de modelos atômicos para aprendizes cegos”** *História da Ciência e Ensino*. Volume 17, 2018.
- [9] HALLIDAY, D; RESNICK, R; WALKER, J. **Fundamentos de Física**, Volume 4: **Óptica e Física Moderna**, 8º ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- [10] HECHT, Eugene. *Optics*. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2017.
- [11] JUNIOR, D. H. C.; **O conceito de descoberta científica: os raios de Roentgen como estudo de caso**. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo – PUC, 2015.

- [12] MARTINS, R. B.; **A descoberta do Raio-X: O Primeiro Comunicado de Roentgen.** *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Vol. 20. Departamento de Raios Cósmicos e Cronologia, UNICAMP. 4. dez. 1998.
- [13] MARTINS, Roberto de Andrade. “*Ensaio sobre História e Filosofia das Ciências II*”. Extrema: Quamcumque Editum, p.153, 2022.
- [14] MANGILI, A. I. **Heinrich Rudolph Hertz e a “descoberta” do efeito fotoelétrico: Um exemplo dos cuidados que devemos ter ao utilizar a história da ciência na sala de aula.** *História da Ciência e Ensino – Construindo Interfaces*, Vol. 6, 2012. Acesso em: 29 out. 2023, <https://revistas.pucsp.br/index.php/hcensino/article/view/11717/9438>.
- [15] NÍAZ, M.; KLASSEN, S.; MC MILLAN, B.; METZ, B. **Reconstruction of the history of the photoelectric effect and its implications for general physics textbooks**, *Science Education*, 94, 903-931, 2010.
- [16] NUSSENZVEIG, H. M. **Ótica; Relatividade; Física Quântica. Curso de Física Básica.** 4ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.
- [17] OGURI, F. C. V.; **FÍSICA MODERNA: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos/** 2ª ed. - Rio de Janeiro: Elsevier, USP, 2006.
- [18] OLIVEIRA, R. A. de.; MARTINS, A. F. P.; SILVA, A. P. B. da.; **Thomas Young e a teoria ondulatória da luz no início do século XIX: aspectos conceituais e epistemológicos.** vol. 41, nº 2, e20180141, 2019.
- [19] PIERES, A.; DA DALT, S.; **Raios Catódicos.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 1ª ed. Evangraf, rev. - Porto Alegre, 2011.
- [20] PASACHOFF, J.M.; PASACHOFF, N. **A Century of Light.** *Physics Today*, v. 71, n. 3, p. 42-49, 2018.
- [21] RIBEIRO, A. R.; COELHO, L.; BERTOLAMI, O.; & ANDRÉ, R.; **Luz: História, Natureza e Aplicações.** Vol. 39 – N. 1/2. Departamento de física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade de Porto, 2016.
- [22] ROSA, C. A. P. de.: **História da ciência: a ciência moderna.** V. II, 2ª ed. Brasília: FUNAG, 2012.

- [23] SALVETTI, A. R.; **A História da Luz**. Editora livraria da Física. 2ª ed. rev. - São Paulo, 2008.
- [24] SANTOS, C. A. et al. **Da revolução científica à revolução tecnológica**. Porto Alegre: Instituto de Física – UFRGS, 1998.
- [25] SEARS, F.; YOUNG, H. D.; ZEMANSKY, M.W. Física III: **Ótica e Física Moderna**. 12ª ed., São Paulo: PEARSON, v.3. 2009.
- [26] SILVA, F. W.O. da.; **A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 29, n. 1, p. 149-159, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – BH, 2007.
- [27] SOARES, J. M. S.; **Análise da história do efeito fotoelétrico em livros didáticos de física para graduação**. UEPB, Campina Grande, 2016.
- [28] TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física moderna**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.
- [29] THOMSON, J.J. **Deflection of Cathode Rays by a Magnetic Field**. *Philosophical Magazine*, Vol. 44, No. 269, 1897.

APÊNDICE A

Tabela 1 - Dados obtidos na primeira coleta

Corrente Elétrica sem a luz UV (mA) - Medida 1	Corrente Elétrica sem a luz UV (mA) - Medida 2	Corrente Elétrica com a luz UV no Ânodo (mA)	Corrente Elétrica com a luz UV no Cátodo (mA)	Tempo (s)	Tensão (V)	Intervalo de Tempo (s) entre as medidas
5,3	5,2	5	5,1	10	4000	10
4,9	5,2	4,9	5	20		
4,7	5,2	4,9	4,9	30		
4,5	5,2	4,9	4,8	40		
4,3	5,1	4,8	4,8	50		
4,2	5	4,7	4,5	60		
4	4,9	4,7	4,3	70		
3,8	4,8	4,5	4,2	80		
3,7	4,8	4,4	4	90		
3,6	4,7	4,4	3,9	100		
3,4	2,1	4,3	3,8	110		
	2	4,2	3,7	120		
	1,9	4,1	3,6	130		
	1,8	4	3,8	140		
	1,8	2,9	3,7	150		
	1,7	3,9	3,6	160		
	1,6	3,8	3,5	170		

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023