

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Astronomia

David Fernando Freitas da Silva Cavalcante

**Detecção indireta de matéria escura:
simulações com Geant4**

São Paulo

2021

David Fernando Freitas da Silva Cavalcante

Detecção indireta de matéria escura: simulações com Geant4

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Astronomia.

Vertente: Pesquisa Básica.

Orientador(es): Prof. Dr. Nelson Carlin Filho (IF/USP); Prof.^(a) Dr.^(a) Vera Jatenco Silva Pereira (IAG/USP).

São Paulo

2021

Agradecimentos

À minha família;

À orientadora Vera Jatenco Silva Pereira e ao orientador Nelson Carlin Filho;

Aos pesquisadores Bruno Basso Manzato, Luis Eduardo Funo de Moura Franca, Renan Felix e Ricardo Pitta;

À Professora Jane Gregorio-Hetem;

Ao meu colaborador, Vicente Viater Figueira;

À FAPESP, pelo apoio financeiro, sob o projeto nº: 2020/03007-0.

Resumo

Este trabalho foi feito com o objetivo de realizar simulações computacionais de um experimento baseado em Kopylov et al. (2018), que visa a possível detecção de *Dark Photons* (Fótons Escuros) como partículas que mediam interações do *Hidden Sector* (Setor Escuro) com o Setor Visível, descrito pelo Modelo Padrão da Física de Partículas: isto corresponderia a simular uma detecção indireta de matéria escura. Concretizando esta tarefa, seria possível testar o modelo teórico dos *Dark Photons* como partícula fundamental da matéria escura não-bariônica, o qual propõe que estes fótons tenham massa e possam interagir com as partículas do setor visível causando o efeito axio-elétrico (Derevianko et al., 2010) que gera um sinal detectável de um *single electron* (elétron único).

Para tanto foi utilizado o *software* Geant4, produzido em linguagem C++ pelo *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* (CERN), pois este é especializado em simulações envolvendo física de partículas e detectores, e se mostrou uma boa alternativa para realizar previsões de resultados experimentais reais. Foram programados toda a geometria e materiais do detector, o qual possui simetria cilíndrica, 3 catodos (uma superfície de alumínio e dois conjuntos de fios de níquel-cromo), um anodo (fio de tungstênio banhado a ouro), preenchido por gás P10 (90% neônio e 10% metano) e permeado por um campo elétrico, com a intenção de explorar a ionização do gás e o efeito axio-elétrico em metais para geração de *single electrons*. Foram também testadas as propriedades físicas implementadas nas simulações por meio da lista física *Livermore* do Geant4, especializada em simulações com fótons de baixa energia, além da testagem da calibração do detector utilizando-se a distribuição de Polya para relacionar as energias dos *single electrons* com as intensidades de seus pulsos.

Abstract

This work was carried out with the objective of performing computational simulations of an experiment based on Kopylov et al. (2018), which aims at the possible detection of Dark Photons as a particle that mediates Dark Sector interactions with the Visible Sector, described by the Standard Model of Particle Physics, which corresponds to simulate indirect detection of dark matter. By carrying out this task, it would be possible to test the theoretical model of Dark Photons as a fundamental particle of non-baryonic dark matter, which proposes that these photons have mass and can interact with particles in the visible sector causing the axio-electric effect (Derevianko et al., 2010), which generates a detectable single electron signal.

Therefore, the software Geant4, produced by CERN and in C++ language, was used, as it is specialized in simulations involving particle physics and detectors, and it consists in a good alternative to reproduce experimental results. The detector has cylindrical symmetry, 3 cathodes (one aluminum surface and two sets of nickel-chromium wires), one anode (gold plated wire), the internal volume filled with P10 gas (90% neon and 10% methane) and permeated by an electric field. Its geometry and materials were programmed on its totality, with the intention of exploring the gas ionization and the electrical axio-electric effect in metals for the generation of single electrons. The physical properties implemented in the simulations were tested through the physics list *Livermore* of Geant4, the most adequate to simulations with low energy photons, in addition to testing the detector calibration using the Polya distribution to relate the energies of the single electrons with the intensities of their pulses.

Lista de Figuras

2.1	Esquema da parte frontal do detector.	21
2.2	Esquema da parte lateral do detector.	21
2.3	Esboço do esquema geral do detector.	21
2.4	Esquema geral do detector e suas componentes (Kopylov et al., 2018).	22
2.5	Esquema da seção transversão do detector	23
2.6	Coefficiente de atenuação linear do chumbo.	26
2.7	Espectro de radiação de fundo.	27
4.1	Seções de choque em simulação com <i>NaI</i>	36
4.2	Seções de choque experimentais com <i>NaI</i>	37
4.3	Descontinuidade nas seções de choque para o efeito fotoelétrico.	37
4.4	Volumes da simulação de calibração.	38
4.5	Interface gráfica do Geant4 com as componentes do detector programadas.	38
4.6	Funcionamento do campo elétrico radial.	39
4.7	Simulação do “Efeito de cascata” na interface gráfica do Geant4 (seção transversal).	40
4.8	Simulação do “Efeito de cascata” na interface gráfica do Geant4 (visão diagonal).	40
4.9	Saída da simulação do “Efeito de cascata”.	40
4.10	Anulação dos elétrons na fronteira entre dois campos elétricos.	41
4.11	Saída da simulação com a anulação dos elétrons na fronteira entre dois campos elétricos.	41
4.12	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 2000 V$	43
4.13	Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 2000 V$	43

4.14	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 5000 V$.	43
4.15	Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 5000 V$. . .	44
4.16	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 9000 V$.	44
4.17	Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 9000 V$. . .	44
4.18	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 6000 V$ (dois ajustes).	46
4.19	Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 6000 V$. . .	46
4.20	Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 6000 V$ (dois ajustes).	47
4.21	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 4 torr$.	47
4.22	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 5 torr$.	48
4.23	Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $P = 4 torr$. . .	48
4.24	Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $P = 5 torr$. . .	48
4.25	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 4 torr$ (dois ajustes).	50
4.26	Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $P = 4 torr$ (dois ajustes).	50
4.27	Histograma 2D $P \times E$	51
4.28	Histograma 2D $k \times E$	52
A.1	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 1500 V$.	59
A.2	Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 1500 V$. . .	60
A.3	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 1500 V$ (dois ajustes).	60
A.4	Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 1500 V$ (dois ajustes).	60
A.5	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 2000 V$ (dois ajustes).	61
A.6	Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 2000 V$ (dois ajustes).	61
A.7	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 2500 V$.	61
A.8	Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 2500 V$. . .	62

A.9	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 2500 V$ (dois ajustes).	62
A.10	Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 2500 V$ (dois ajustes).	62
A.11	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 3000 V$.	63
A.12	Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 3000 V$. . .	63
A.13	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 3000 V$ (dois ajustes).	63
A.14	Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 3000 V$ (dois ajustes).	64
A.15	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 4000 V$.	64
A.16	Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 4000 V$. . .	64
A.17	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 4000 V$ (dois ajustes).	65
A.18	Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 4000 V$ (dois ajustes).	65
A.19	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 5000 V$ (dois ajustes).	65
A.20	Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 5000 V$ (dois ajustes).	66
A.21	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 6000 V$.	66
A.22	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 7000 V$.	66
A.23	Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 7000 V$. . .	67
A.24	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 7000 V$ (dois ajustes).	67
A.25	Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 7000 V$ (dois ajustes).	67
A.26	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 8000 V$.	68
A.27	Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 8000 V$. . .	68
A.28	Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 8000 V$ (dois ajustes).	68

A.29 Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 8000 V$ (dois ajustes).	69
A.30 Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 9000 V$.	69
A.31 Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 9000 V$ (dois ajustes).	69
A.32 Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 10000 V$.	70
A.33 Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 10000 V$. . .	70
A.34 Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 10000 V$ (dois ajustes).	70
A.35 Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 10000 V$ (dois ajustes).	71
A.36 Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 11000 V$.	71
A.37 Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 11000 V$. . .	71
A.38 Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 11000 V$ (dois ajustes).	72
A.39 Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 11000 V$ (dois ajustes).	72
A.40 Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 12500 V$.	72
A.41 Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 12500 V$. . .	73
A.42 Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 12500 V$ (dois ajustes).	73
A.43 Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $k = 12500 V$ (dois ajustes).	73
A.44 Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 2 torr$.	74
A.45 Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $P = 2 torr$. . .	74
A.46 Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 2 torr$ (dois ajustes).	74
A.47 Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $P = 2 torr$ (dois ajustes).	75
A.48 Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 3 torr$.	75
A.49 Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $P = 3 torr$. . .	75

A.50 Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 3 \text{ torr}$ (dois ajustes).	76
A.51 Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $P = 3 \text{ torr}$ (dois ajustes).	76
A.52 Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 5 \text{ torr}$ (dois ajustes).	76
A.53 Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $P = 5 \text{ torr}$ (dois ajustes).	77
A.54 Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 6 \text{ torr}$.	77
A.55 Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $P = 6 \text{ torr}$. . .	77
A.56 Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 6 \text{ torr}$ (dois ajustes).	78
A.57 Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $P = 6 \text{ torr}$ (dois ajustes).	78
A.58 Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 9 \text{ torr}$.	78
A.59 Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $P = 9 \text{ torr}$. . .	79
A.60 Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 9 \text{ torr}$ (dois ajustes).	79
A.61 Saída do programa de ajuste dos dados de calibração para $P = 9 \text{ torr}$ (dois ajustes).	79

Sumário

1. Introdução	17
2. Descrição preliminar dos conceitos envolvidos	19
2.1 Projeto experimental do detector	19
2.1.1 Estrutura do detector	20
2.1.2 Separação de eventos provenientes de um elétron	23
2.1.3 Calibração do detector com raios UV	24
2.1.4 Blindagem do detector	25
3. Métodos para realização das simulações	29
3.1 Construção do detector	30
3.2 Campo elétrico e sensibilidade do anodo	32
3.3 Propriedades físicas da simulação	33
4. Resultados e discussões	35
4.1 Teste de consistência da <i>physics list</i>	35
4.2 Detector: componentes e campo elétrico	37
4.3 Calibração do detector com radiação	41
4.3.1 Análise dos dados variando k	42
4.3.2 Análise dos dados variando a pressão	47
4.3.3 Pressão e k em função da energia	51
5. Conclusões	53
Referências	55

<i>Apêndice</i>	57
A. <i>Espectros de calibração e ajustes</i>	59
A.1 <i>Espectros ajustados variando k</i>	59
A.2 <i>Espectros ajustados variando P</i>	73

Introdução

No início do século XX, o astrônomo suíço Fritz Zwicky mediu a massa de alguns aglomerados de galáxias através da observação das dispersões de velocidades destas em seus respectivos *clusters* e, feito isso, observou que essa massa é muito maior que a massa luminosa das galáxias somada à do gás quente que permeia os aglomerados (Zwicky, 1933), além do fato de que a dispersão de velocidades das galáxias do aglomerado de Coma é elevada demais para ser explicada somente pela presença de matéria luminosa. Essas observações levaram à descoberta de um elemento fundamental para o estudo do Universo atualmente, um tipo de matéria massiva que não pode ser detectada em nenhuma região do espectro eletromagnético: a matéria escura (*Dark Matter - DM*).

Na década de 1970, medidas de curvas de rotação de galáxias individuais também forneceram evidências da existência de matéria não-luminosa, como consta em Rubin & Ford (1970) e Rubin et al. (1980). Muitos outros resultados, entre os quais supernovas distantes e a radiação cósmica de fundo detectada em micro-ondas, estudados em Clowe et al. (2006) e Komatsu et al. (2011), por exemplo, têm confirmado a presença deste tipo de matéria no Universo, em grande parte indicando que esta não é composta por bárions ou outras partículas conhecidas atualmente.

Em suma, é notável que estes métodos de detecção da *DM* são indiretos e realizados explorando-se a interação gravitacional que, como conhecido, esta é capaz de realizar. Porém, até o momento não foi feita nenhuma detecção direta de *DM* e tampouco há conhecimento concreto de outros tipos de interação da matéria escura além da gravitacional, fato que é evidenciado pelo Modelo Padrão (*Standard Model - SM*), o qual descreve as partículas elementares e suas interações matematicamente e fora muito bem sucedido em inúmeros testes experimentais. Apesar de tal sucesso, o *SM* possui algumas deficiências,

bem como a não inclusão da massa dos neutrinos e não apresentar bons candidatos a partícula fundamental de matéria escura.

Dessa forma, aos poucos foram surgindo modelos que estendem o SM e vários deles sugerem partículas candidatas a componente fundamental da DM . Um dos candidatos mais prováveis são as denominadas *Weakly Interacting Massive Particles* (WIMPs), pois seriam naturalmente produzidas na abundância correta no Cosmos e espera-se que sejam observadas por meio de sua interação fraca com o setor visível (Bertone et al., 2005). Outro candidato consistente seriam as partículas (bósons de gauge massivos) denominadas *Dark Photon - DP* que podem se propagar em um acoplamento cinético com fótons do setor visível e se converter espontaneamente em um deles para interagir com o mesmo setor (Kopylov et al., 2016). É neste contexto que se insere este Trabalho de Graduação, no qual será descrito um método alternativo de se realizar previsões sobre modelos teóricos de DP para detecção direta de matéria escura: a realização de simulações de possíveis detecções de DP utilizando-se do *software* Geant4, produzido pelo *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* (CERN) e especializado para simular detectores e processos físicos, especialmente no que tange à física de partículas e a interação destas com a matéria.

Vale citar que, a princípio, o objetivo deste trabalho era construir um detector a gás que seria utilizado para coletar dados de partículas incidentes em sua superfície (explorando efeito axio-elétrico) e no gás, o qual seria ionizado, e analisar os dados para verificar uma possível detecção de DP através da contagem de *single electrons* (elétrons únicos) emitidos a partir da incidência de (supostos) DP massivos, como em Kopylov et al. (2018), utilizando técnicas de seleção de eventos. Porém, devido à pandemia de COVID-19, as atividades presenciais (e portanto as experimentais), foram suspensas e não foi possível iniciar a construção efetiva do detector, o que tornou mais viável para a continuação deste projeto realizar simulações de interação entre as partículas e o detector, utilizando-se do *software* já mencionado, para assim obter algumas previsões sobre os possíveis resultados experimentais quando forem realizados, além de nos guiar pelas análises dos resultados e indicar o que é esperado deles.

Descrição preliminar dos conceitos envolvidos

O trabalho experimental de detecção dos DP seria feito com a construção e testes de um detector a gás, como mencionado no Capítulo 1 (Introdução), o qual segue o artigo de Kopylov et al. (2018) como modelo-base. No mesmo Capítulo, há uma breve descrição dos tipos de fenômenos explorados na incidência de partículas no detector (efeito axio-elétrico e ionização) e como espera-se detectar os DP , porém, vale expor alguns dos principais conceitos envolvidos na realização deste experimento para sua melhor compreensão, tanto se tratando de simulações, como será descrito neste trabalho, quanto tratando-se do experimento em si.

2.1 Projeto experimental do detector

Inicialmente, foram estudados dois modelos de detectores a gás para detecção de DP , um que possui três catodos de fios e outro que possui apenas dois deste tipo. Os estudos sobre o primeiro foram feitos principalmente a partir do trabalho de Kopylov et al. (2016) e os estudos sobre o segundo foram feitos a partir do do trabalho de Kopylov et al. (2018). Destes estudos, concluiu-se que o modelo de detector mais viável é o que segue de Kopylov et al. (2018) (dois catodos de fios), dado que exige menos recursos para ser realizado e deve proporcionar resultados também razoáveis para uma boa análise. Contudo, o artigo de Kopylov et al. (2016) foi utilizado para consulta de métodos e conceitos mais aprofundados, como o método de calibração com raios ultravioleta (UV) e como utilizar o parâmetro β (parâmetro de qualidade da *baseline* do pré-amplificador do sinal, como descrito na referência).

Para que o aparelho funcione como descrito no Capítulo 1, é preciso que este apresente

uma baixa emissão termiônica. Esta emissão em um metal é descrita pela equação de Richardson (Equação 2.1), a qual depende da função trabalho w , da temperatura T em Kelvin e é expressa da seguinte forma:

$$R_{therm} = aT^2 \cdot \exp - \frac{w}{kT}, \quad (2.1)$$

na qual R_{therm} é o “ruído termiônico”, k é a constante de Boltzmann e $a \approx 1.20173 \times 10^6 \text{ Am}^{-2}\text{K}^{-2}$ é a constante de Richardson. Dessa forma, para que a taxa de emissão termiônica não seja tão relevante no experimento, nosso equipamento deve ter eletrodos de metal com alta função trabalho (cerca de 4 - 5 eV). Para tanto, o detector deverá ter um gás com alto ganho, baixa taxa de “ruído termiônico” e grande superfície.

2.1.1 Estrutura do detector

Este detector deve possuir dois catodos de níquel-cromo (dois conjuntos de fios de níquel-cromo de diâmetro de 60 μm , distribuídos em um formato anelar a diferentes distâncias do eixo do detector e soldados em dois discos de lucite, de modo a formar uma estrutura cilíndrica, com espaçamento de 4.5 mm entre cada fio), um catodo de alumínio (uma casca cilíndrica de alumínio que será submetida a altas tensões), um anodo (fio de tungstênio recoberto de ouro com diâmetro de 25 μm que liga o centro dos discos) e anéis de focalização (anéis de cobre).

Essa estrutura deveria, de acordo com Kopylov et al. (2018), ser preenchida com o gás P10 (90% argônio e 10% metano, o que proporciona alto ganho) a priori, mas um artigo mais atual (Kopylov et al., 2021) indica o uso de neônio (Ne) em vez de argônio devido à maior amplificação do gás em campos menos intensos. Os catodos devem ser submetidos a uma diferença de potencial. Isto deve ser feito (no caso do experimento real) por meio de canais de gás, e conectores SHV (*Safe High Voltage*) para entrada de tensão, acoplados em um tubo de inox que envolve toda a estrutura dos três catodos e que, por sua vez, é blindado com blocos de chumbo. A pressão interna que o gás deve exercer dentro do detector está estimada para ser utilizada entre 1 e 3 atm.

Os dois catodos de fios de níquel-cromo estão esquematizados nas Figuras 2.1, 2.2 e 2.3, as quais foram produzidas com o *software* Gmsh. Esses catodos deveriam ser soldados em anéis de cobre e fixados em suas extremidades por dois discos de acrílico (lucite), os quais seriam fixados por 3 barras de politetrafluoretileno (PTFE ou TEFLON). Nestes mesmos

discos, seriam encaixados dois anéis de cobre (anéis de focalização), um em cada disco. A estrutura descrita está esquematizada na Figura 2.4.

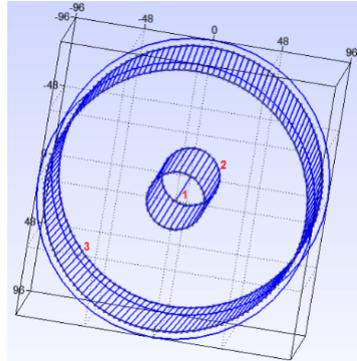


Figura 2.1: Parte frontal da estrutura com os dois catodos de fios e o anodo (dimensões em *mm*).
1- anodo; 2- catodo interno; 3- catodo externo.

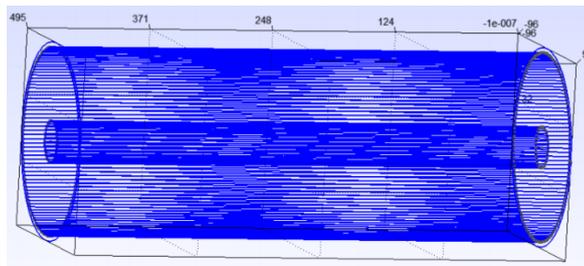


Figura 2.2: Parte lateral da estrutura com os dois catodos de fios e o anodo (dimensões em *mm*).

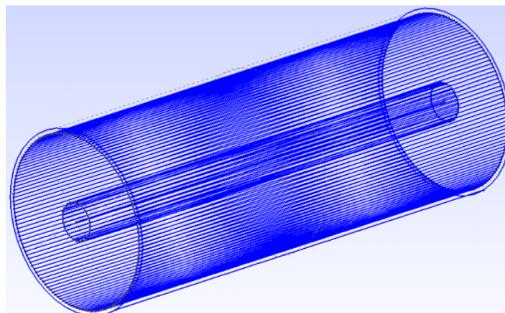


Figura 2.3: Esquema geral da estrutura dos catodos de níquel-cromo.

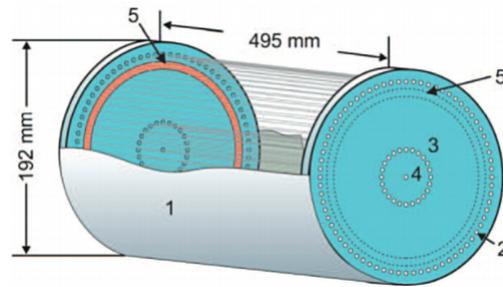


Figura 2.4: Geometria completa do detector e descrição das componentes.

1- catodo de alumínio, 2- catodo externo, 3- catodo interno, 4- anodo, 5- anéis de focalização. Figura retirada de Kopylov et al. (2018).

Os anéis de focalização sob mesma tensão do segundo catodo têm a função de diminuir os efeitos de borda nas extremidades do contador, desviando a trajetória dos elétrons à deriva nessas regiões para o centro (anodo) e evitando assim que elétrons emitidos pelos catodos sejam absorvidos pela superfície dessas extremidades. As barras que fixam os dois discos de acrílico são de TEFLON (material isolante) para evitar que haja um efeito significativo na detecção de *single electrons*, causado por outro campo elétrico induzido nas barras.

Esta estrutura com os dois catodos de fios mais os discos de acrílico e anéis acoplados será envolvida pelo terceiro catodo: o tubo de alumínio. Este deve ser envolvido em uma folha de TEFLON, a fim de evitar eventuais faíscas para o tubo de inox, devido à alta tensão aplicada. Além disso, é imposta uma margem de 3 mm entre a folha de TEFLON e a superfície interna do tubo de inox para garantir que não haverá problemas com a alta tensão. Esta tensão será aplicada para seleção de eventos e para calibração do equipamento utilizando radiação UV.

Neste volume dentro do tubo de inox fica contido o gás anteriormente descrito. No mesmo tubo são inseridas uma entrada e uma saída de gás com válvula para regular a pressão interna, um manômetro, um conector SHV em cada catodo para neles aplicar tensão e um conector BNC no ânodo para captação dos sinais. O manômetro é acoplado no canal conectado à entrada de gás em uma das tampas e os conectores são vedados para manter a pressão interna e evitar vazamento de gás. A Figura 2.5 esquematiza a seção transversal do detector com seus componentes e respectivas dimensões. Vale ressaltar que, como este trabalho lidará com simulações computacionais, a esquematização dos conectores anteriormente descritos se torna desnecessária, assim como as barras de TEFLON, já que

não há necessidade de fixar as extremidades do detector.

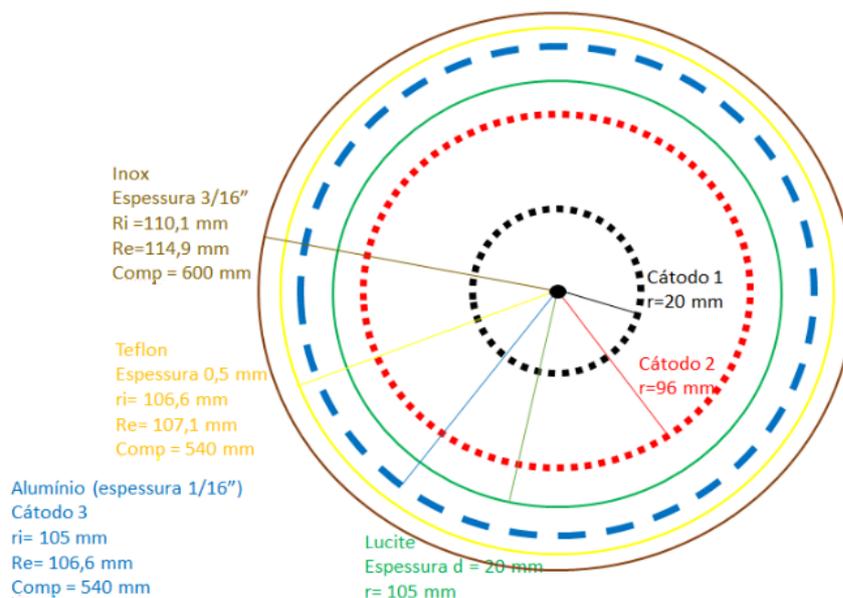


Figura 2.5: Esquema de uma seção transversal do detector completo. R_i, r_i - Raio interno, R_e - Raio externo.

O alumínio foi escolhido para compor o catodo mais externo porque sua eficiência quântica, segundo Cairns & Samson (1966), é maior que a de outros materiais, como cobre, por exemplo. Para seleção ideal do potencial no primeiro e no segundo catodos, a taxa de contagem deve ser medida quando o detector for irradiado com uma lâmpada ultravioleta (UV) através de um visor com vidro de quartzo, em duas configurações diferentes, como também está explicado na Seção 2.1.3.

2.1.2 Separação de eventos provenientes de um elétron

O princípio da detecção de *Dark Photons* se dá por meio do efeito axio-elétrico, como explicado em Derevianko et al. (2010), na superfície do tubo de alumínio: cada *DP* incidente nesta superfície deve ejetar um elétron desta, o qual deverá ser transportado até o anodo aplicando-se tensões diferentes nos catodos a fim de criar um campo elétrico que possa realizar esta tarefa. Próximo ao fio central, o *single electron* é multiplicado (principalmente devido à ionização do gás ao ser acelerado pelo intenso campo elétrico ali presente) em vários outros elétrons, os quais produzem um “efeito de cascata” e assim geram um sinal. Vale mencionar que, no caso real, este sinal seria amplificado em um Pré-Amplificador Sensível a Cargas (CSP) e, em um *digitizer*, seria fornecida a forma do pulso gerado: CSP

é um dispositivo eletrônico que pode integrar um sinal de corrente e gerar um sinal de tensão com uma amplitude proporcional à carga de entrada, já um *digitizer* é basicamente um equipamento que recebe uma informação analógica (sinais de tensão, neste caso) e a armazena digitalmente.

As duas configurações em que se pretende coletar os dados serão utilizadas na seleção de eventos. Ambas as configurações consistem na aplicação de altas tensões aos catodos. Sejam U_1 , U_2 e U_3 os potenciais nos catodos de alumínio, no mais externo de fios e do mais interno (também de fios), respectivamente. Na primeira configuração (1), temos $|U_1| > |U_2| > |U_3|$ ($U_1 < U_2 < U_3$) e, na segunda (2), temos $|U_2| > |U_1| > |U_3|$ ($U_2 < U_1 < U_3$): note que, nas duas configurações, mantém-se U_1 e U_3 fixos, variando apenas U_2 em cada configuração. O potencial U_2 na configuração (1) aplicado ao segundo catodo permite que os elétrons emitidos pelo catodo externo sejam desviados livremente para o contador central, enquanto que o potencial U_2 na configuração (2) é um potencial de retardo, ou seja, ele impede que os elétrons à deriva cheguem ao contador central. Com a geometria do detector como apresentada e nessas configurações de tensão, buscamos obter um ganho do gás da ordem de 10^5 .

Para subtrair os sinais de fundo das emissões de *single electrons*, deve-se calcular a diferença $\Delta R = R_1 - R_2$ das taxas de contagem nas configurações 1 e 2, que têm quase as mesmas geometrias. Supomos que a contribuição para a taxa R_1 é de elétrons únicos emitidos pelo catodo externo mais elétrons emitidos pelos fios dos internos e, também por elétrons ejetados na incidência de partículas que atravessam as trajetórias curtas das extremidades do contador (efeito final). Então a taxa R_2 é devida apenas aos elétrons emitidos pelos fios dos catodos e ao efeito final, conforme descrito em Kopylov et al. (2018).

2.1.3 Calibração do detector com raios UV

O detector deve ser calibrado com radiação UV passando por uma janela de quartzo. Os *single electrons* são emitidos da superfície do tubo de alumínio devido à incidência desta radiação. A eficiência da detecção de um fóton UV é determinada pelo produto $\eta = \epsilon \cdot \eta_0$, no qual η_0 é a eficiência quântica do metal do qual o catodo é feito e ϵ é o fator de sobrevivência de um único elétron emitido pelo cátodo para atingir o contador central, onde é detectado. Em Cairns & Samson (1966) é obtido o fator η_0 , enquanto que

ϵ pode ser calculado usando dados sobre a absorção de elétrons por vários materiais, como descrito em Rolandi et al. (2008). Dado que a eficiência de detecção varia de acordo com o tipo de material e da radiação incidente, no caso do detector a ser simulado teria de ser calculada a partir de uma nova calibração (idealmente utilizando radiação UV).

De acordo com o mesmo artigo, nas condições sob as quais esse experimento será realizado, materiais com impurezas eletromagnéticas não afetam praticamente o fator de sobrevivência. Assim, a perda de elétrons durante o transporte do contador catódico para o contador central pode ser praticamente negligenciada.

A taxa de ruídos inerentes à geometria do detector deve ser medida na calibração com a janela de quartzo fechada e subtraída da taxa medida com essa janela aberta. O espectro dos pulsos de *single electrons* em detectores a gás são usualmente descritos pela distribuição de Polya (Equação 2.2), na qual A é a amplitude do pulso, \bar{A} é a amplitude média e θ é um parâmetro que depende das características de contagem do detector. Portanto, para calcular a taxa de contagem escura (taxa de contagem de *single electrons* sem incidência de radiação), bastaria realizar uma integração sobre as amplitudes dos pulsos.

$$P(A) = C \left(\frac{A}{\bar{A}} \right)^\theta \exp \left(- (1 + \theta) \cdot \frac{A}{\bar{A}} \right). \quad (2.2)$$

Com uma diferença de potencial ΔU maior entre os catodos, a taxa de contagem cai porque alguns dos elétrons emitidos da superfície do catodo externo entram no segundo catodo. Em ΔU mais baixo, alguns dos elétrons emitidos são espalhados de volta para o catodo externo.

2.1.4 Blindagem do detector

A princípio, a blindagem do detector contra sinais de fundo deveria ser eficiente para baixas energias, pois os pulsos detectados de *single electrons* são fornecidos na ordem de alguns keV . O material que concluiu-se ser mais viável utilizar para isto são blocos de chumbo, dada sua alta densidade e impenetrabilidade para partículas mais energéticas, além de maior estabilidade radioativa em relação a alguns outros elementos com maior número atômico.

Para saber qual espessura da parede destes blocos de chumbo atenuaria razoavelmente estes sinais de fundo, foi utilizada a equação de atenuação de um feixe de partículas (Equação 2.3), escolhendo uma taxa de absorção $1 - I/I_0 = 90\%$ e uma espessura $x = 2 \text{ cm}$

de parede:

$$I(x) = I_0 \cdot \exp(-\mu x), \quad (2.3)$$

onde I é a intensidade da radiação que emerge do material, I_0 é a intensidade da radiação incidente (portanto I/I_0 é a taxa de transmissão) e μ é o coeficiente de atenuação linear total (está relacionado à probabilidade de os fótons serem absorvidos no material). Foram escolhidos os valores de x e I/I_0 dados acima para que, partir da curva de μ em função da energia dos fótons incidentes (em MeV) para o chumbo (Figura 2.6) e de dados destas grandezas retirados de NIST (2001), seja possível encontrar a energia máxima atenuada pela parede de chumbo conforme especificado, uma vez calculado μ .

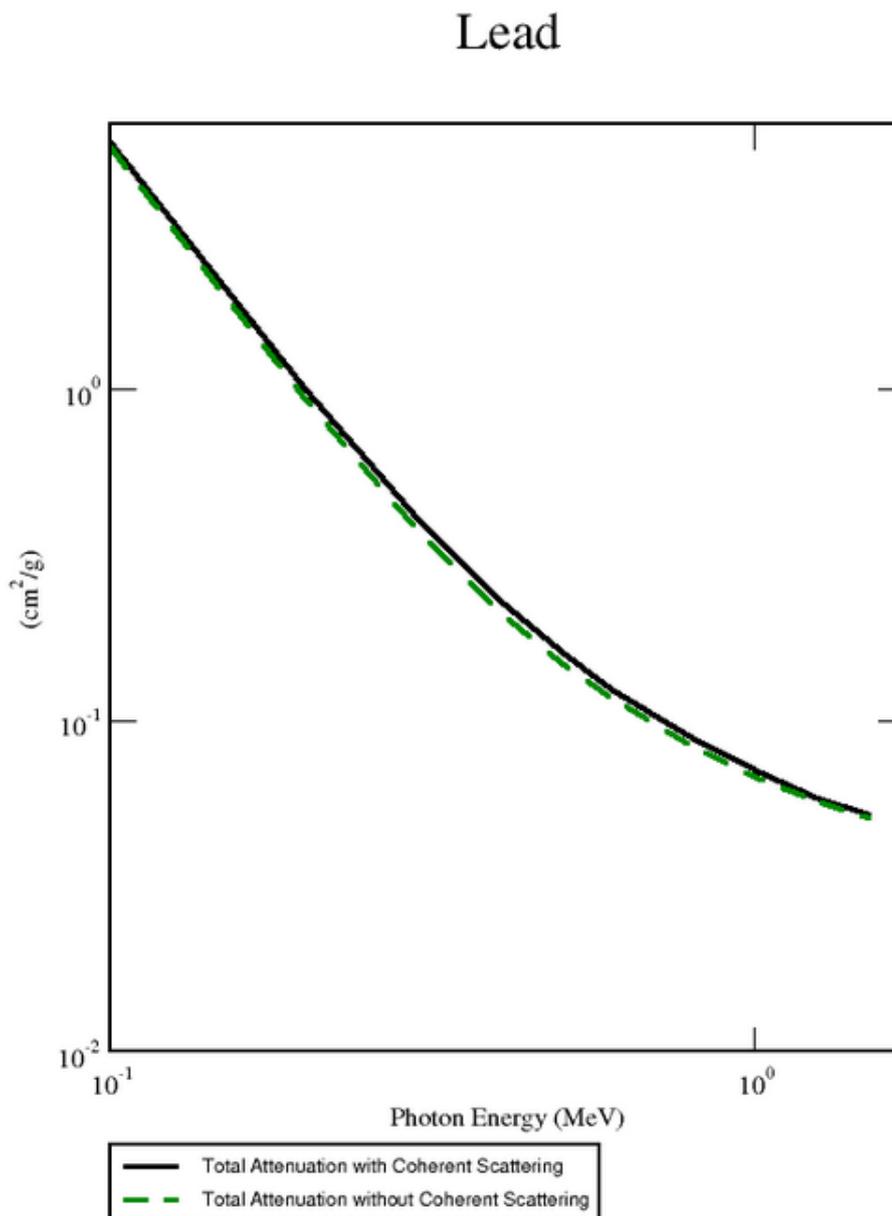


Figura 2.6: Curva do coeficiente de atenuação linear total do chumbo, com e sem espalhamento coerente. Figura retirada de (NIST, 2001)

Utilizando-se estes dados na Equação 2.3, obtemos $\mu \approx 1.1513 \text{ cm}^{-1}$. Logo, por inspeção da Figura 2.6 e a partir dos dados de NIST (2001), temos que a energia atenuada de um fator 10 por uma parede de 2 cm de chumbo é $E \approx 0.75 \text{ MeV} = 750 \text{ keV}$. Analisando o espectro da radiação γ de fundo da Figura 2.7, podemos concluir que a blindagem com chumbo a 2 cm de espessura atenua razoavelmente as radiações γ de fundo em baixas energias (picos dos pulsos em regiões menores que 750 keV), que poderiam interferir nas medidas.

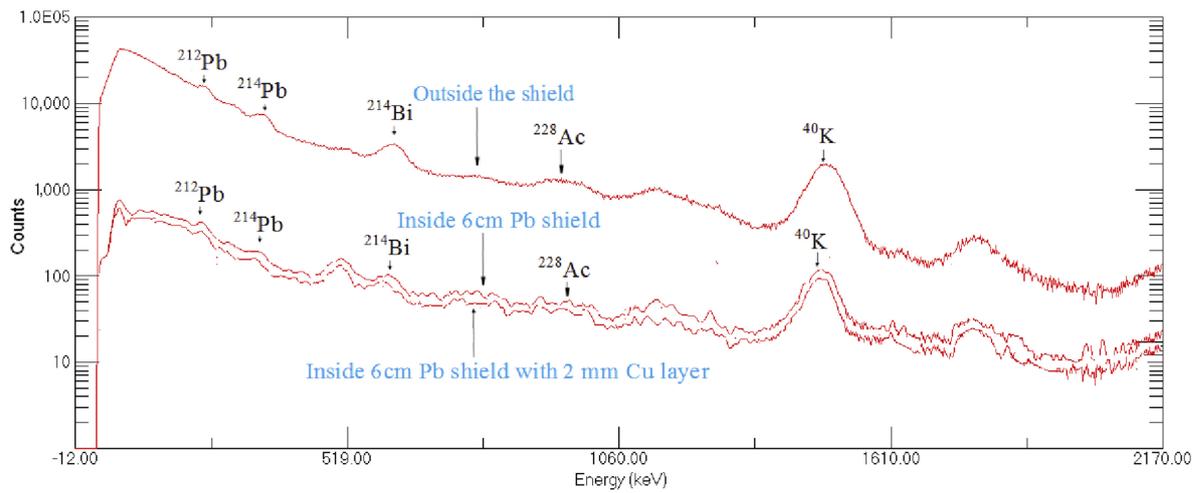


Figura 2.7: Representação de espectros de radiação γ de fundo sem blindagem e contendo blindagens com 6 cm de espessura de chumbo (escala logarítmica). Figura retirada de Ramadhan & Abdullah (2018).

Métodos para realização das simulações

Como mencionado no Capítulo 1, a inviabilidade da realização prática deste experimento, devido às condições sanitárias impostas pela pandemia, suscitou a necessidade de uma alternativa que possibilitasse a previsão dos resultados experimentais, sem utilizar o detector necessariamente.

Nesta conjuntura é que se insere o objetivo deste projeto: utilizando-se dos modelos teórico-experimentais apresentados na Seção 2.1 e do *software* Geant4, objetiva-se simular o processo de utilização do detector com a incidência de partículas neste, tanto para calibração como para a coleta de dados na tentativa de detectar sinais de *DP*, com foco na calibração, dada a complexidade em simular uma partícula totalmente teórica. Um exemplo de simulação com calibração do detector seria simular a incidência de raios UV na superfície do detector, extrair o espectro dos pulsos de *single electrons* a partir desta incidência e checar se ele é compatível com a distribuição de Polya (Equação 2.2), como consta na Seção 4.3. O propósito final seria a coleta de dados da incidência de partículas com características de *DP* em um detector com os mesmos aspectos daquele apresentado na Seção 2.1.1, obtendo-se as taxas de contagem de *single electrons* nas duas configurações de potenciais nos catodos, como apresentado na Seção 2.1.2, e assim possibilitar a testagem dos modelos propostos de *DP* e prever os resultados experimentais.

O primeiro passo para o desenvolvimento deste trabalho foi a instalação do Geant4 para um sistema operacional Linux (em particular, o Ubuntu), o qual foi utilizado para produzir as simulações necessárias. Esta tarefa foi realizada seguindo-se um breve manual de instalação do *software*, o qual pode ser encontrado em Geant4 (2020).

3.1 Construção do detector

Para escrever o código que define o detector, suas propriedades e outros elementos da simulação, é necessário descrevê-lo utilizando as classes e métodos aplicáveis na linguagem C++, pois é esta a linguagem reconhecida pelo Geant4. Para tanto, pode-se construir sua própria classe concreta a partir da classe abstrata de base `G4VUserDetectorConstruction`. Deve-se também implementar o método `Construct()`, modularizando-o de acordo com cada componente do detector ou sub-detector, o que inclui: definir os tipos de materiais que serão utilizados, definir as formas ou sólidos necessários para descrever a geometria do detector, construir e posicionar seus volumes (físico e lógico, como será descrito adiante), definir quais desses volumes serão sensíveis à detecção, determinar se há campos magnéticos ou elétricos no meio e suas propriedades e definir atributos visuais do detector. Os códigos destas simulações foram escritos com base em exemplos de outros para simulações simples que são fornecidos na instalação do próprio Geant4, localizados em um diretório nomeado *Basic Examples*.

Para começar, foram criados os volumes físicos e lógicos a serem utilizados, incluindo o do “mundo” e do detector, determinando a forma e as dimensões dos sólidos que o comporão. O volume físico contém argumentos referentes ao posicionamento, geometria e dimensões do objeto. Já definir um volume lógico (*Logical-volume*) equivale a atribuir o material e suas propriedades à geometria previamente construída e torná-lo sensível à detecção das partículas e eventos desejados, alertando também ao usuário caso este volume se sobreponha ao volume de outro sólido que venha a ser incluído na simulação.

O volume “mundo” é o maior volume da simulação, dentro do qual os outros volumes (incluindo o do detector) são inseridos e dentro do qual os dados da simulação são gerados. O material escolhido para o volume físico do mundo (`world`) foi o vácuo, com sua geometria definida como um cubo de dimensões 1.8 m, de modo que este possa conter o detector e ainda sobre espaço para um volume de ar que também possa contê-lo.

Criado o “mundo” da simulação, definimos os próximos sólidos que compõem o detector. Inicia-se com um volume cúbico de ar para implementar possíveis efeitos da atmosfera terrestre nos resultados. O material “ar” neste caso também é definido através da classe `G4NistManager`, que define os materiais através da tabela de propriedades de materiais do *National Institute of Standards and Technology* (NIST). O volume de ar foi definido com

geometria cúbica de dimensões 1 m e posicionado dentro do volume lógico do **world**.

Em seguida, foram definidos os catodos, começando pelo mais externo, que é uma superfície cilíndrica de raio interno 10.5 cm e raio externo 10.66 cm , com 60 cm de comprimento. O material deste catodo é alumínio. Ele também foi posicionado como contido no volume lógico do “**world**” e, por ter menores dimensões que o volume de ar, também está contido neste. Após a definição do catodo mais externo, foi feito praticamente o mesmo para os catodos mais internos, designando-os como cilindros, finos fios de níquel-cromo (*NiCr*), de raio 25 μm , com a diferença de que estes foram replicados de forma a se distribuírem circularmente em torno do eixo do detector. Vale ressaltar que cada um desses catodos mais externos possuem 60 fios, todos os catodos possuem o mesmo comprimento (60 cm) e espaçados segundo o esquema mostrado na Figura 2.5. Vale lembrar que o material *NiCr*, como definido na simulação, é composto de moléculas com 77% de níquel e 23% de cromo.

O próximo passo foi a definição e implementação do gás de tipo P10 (90% neônio e 10% metano), o qual preenche o interior do detector, para possibilitar a multiplicação dos *single electrons* via ionização do gás, gerando assim um sinal contínuo. Por fim, foi programada a criação do anodo como um fio de tungstênio banhado a ouro, de 25 μm de diâmetro e 60 cm de comprimento, posicionado ao longo do eixo do detector (material com propriedades dadas pelo NIST). Vale ressaltar que, no Trabalho de Graduação I (TGI), havia um problema de *overlap* entre o anodo e o volume de gás, porém isto foi resolvido tomando o próprio volume de gás como “volume mãe” (*mother volume*) do anodo, uma vez que se ambos fossem “volumes filha” (*daughter volume*) do mundo, de fato gerariam uma intersecção interna a um mesmo volume (**world**). Os resultados das definições do detector descritas nesta Seção estão mais detalhados na Seção 4.2.

Uma vez programada a geometria e materiais que serão utilizados nas simulações, é importante determinar as outras propriedades físicas desta, bem como partículas, suas energias e momentos, campos eletromagnéticos, entre outros atributos. Estes detalhes serão descritos nas próximas seções.

3.2 Campo elétrico e sensibilidade do anodo

Para que seja possível obter algum sinal contínuo nas simulações ou, em outras palavras, obter um ganho para os *single electrons* via ionização do gás, é necessário adicionar campos elétricos à simulação, aplicando-os entre cada um dos catodos e, por fim, entre o catodo mais interno e o anodo. Dessa forma, os *single electrons* gerados na incidência dos *DP* seriam acelerados pelo campo elétrico até adquirirem energia suficiente para ionizar os átomos do gás, gerando um efeito em cadeia, e esses elétrons seriam detectados no anodo.

A definição destes campos elétricos deve ser feita de acordo com os potenciais descritos nas duas configurações descritas na Seção 2.1.2. Porém, como o campo elétrico é programado independentemente dos potenciais no Geant4, foi preciso calcular a intensidade desses campos em função dos respectivos potenciais, e isto foi feito aproximando-se os campos como radiais, semelhante ao campo elétrico entre cascas cilíndricas coaxiais com carga. Primeiramente, utilizamos a Lei de Gauss (supondo vácuo) em uma superfície cilíndrica S de raio r e comprimento L entre dois catodos, englobando o catodo mais interno com carga positiva Q , sendo $-Q$ a carga no catodo externo, para calcular o vetor campo elétrico \vec{E} :

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{a} = \frac{Q}{\epsilon_0} \Rightarrow 2\pi ELr = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad \therefore \boxed{\vec{E} = -\frac{k}{r}\hat{r}}, \quad k = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 L}. \quad (3.1)$$

Vale ressaltar que neste caso, estamos considerando o campo radial apontando para o anodo (configuração 1), por isso o sinal negativo. Seja então U_1 o potencial no catodo mais externo, U_2 o potencial no catodo mais interno. Neste caso, pela definição da diferença de potencial elétrico, temos, utilizando a Equação 3.1:

$$U_2 - U_1 = \int_{R_2}^{R_1} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_{R_2}^{R_1} \frac{k}{r} (-\hat{r}) \cdot (-d\hat{r}) \Rightarrow k \ln \left(\frac{R_1}{R_2} \right) = U_2 - U_1 \quad \therefore \boxed{k = \frac{U_1 - U_2}{\ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)}}. \quad (3.2)$$

Calculado o campo elétrico em função de grandezas conhecidas, foi possível criar uma classe no Geant4 para defini-lo entre cada um dos catodos e do anodo, segundo suas respectivas posições r e de acordo com suas intensidades dadas pela variável k , que depende das posições dos catodos e dos potenciais, como demonstrado pela Equação 3.2. Dessa forma ficou definido o campo elétrico radial inversamente proporcional à distância ao anodo central.

Tendo programado, incluído e testado a classe do campo elétrico na simulação, foi produzida uma outra classe que seria responsável por determinar quais partículas devem ter suas propriedades registradas individualmente, qual propriedade destas se deseja obter e em que componente do detector as partículas devem incidir para serem registradas. Neste código, foi determinado que as partículas em questão devem ser elétrons, suas propriedades registradas devem ser a energia cinética e a componente onde ocorre o registro é o anodo (contador central). É imprescindível também incluir esta classe naquela onde as componentes do detector estão definidas e atribuir a variável do volume lógico do anodo a esta classe, para que seja reconhecido como a componente sensível à detecção dos elétrons da forma descrita.

Enfim, ao se realizar uma simulação completa incluindo esta classe, as energias dos elétrons que incidem sobre o anodo são escritas em um arquivo `.txt`, o qual é utilizado para a construção do espectro de calibração e para as futuras análises do experimento.

3.3 Propriedades físicas da simulação

Para realizar a calibração, a radiação que deve incidir sobre a janela de quartzo no experimento original é UV, segundo o método apresentado em Kopylov et al. (2018). Dado que esta radiação é considerada de baixa energia (varia entre cerca de $3.1 eV$ e $124.2 eV$) foi necessário utilizar (no código `main`) a *physics list* “QBBC_LIV”, da biblioteca `Livermore`, que lida melhor com simulações envolvendo fótons de baixa energia. Ainda assim, esta *physics list* não reproduz idealmente a radiação UV, pois só apresenta resultados confiáveis para energias a partir de $250 eV$ e, portanto, esta foi a energia dos fótons adotada para as simulações de calibração. Isto significa que não foi possível realizar simulações com radiação UV de fato, o que representa uma primeira limitação no método.

Na classe `G4DetectorConstruction`, onde foram programadas as componentes e geometrias do detector, são definidas a temperatura e pressão do gás, e densidade dos materiais. A temperatura escolhida foi de $T = 300K$. A densidade do gás e dos fios de *NiCr* (únicos materiais não definidos pelos dados do NIST) são, respectivamente, $d_{gas} = m_{mol}P/(RT) \approx 0.001 g/L$ e $d_{NiCr} = 8.4 g/cm^3$, onde $m_{mol} = 20.17 g/mol$ é a massa molar do *Ne*, $P = 1 torr$ é a pressão do gás (lembrando que $1 torr = 1/760 atm$) e $R = 62.3636 L \cdot torr/(K \cdot mol)$ é a constante dos gases ideais (consideramos este gás como

sendo ideal). Sobre a pressão, este valor mencionado foi atribuído a priori, mas teve de ser variado para analisar sua relação com a outras grandezas, tais como a quantidade de elétrons que chegam ao anodo, como será melhor detalhado mais adiante.

Já na classe `PrimaryGeneratorAction`, onde são definidas as condições iniciais da simulação, configura-se os tipos de partículas que serão lançadas no detector e suas propriedades, como energia e momento linear. O tipo da partícula definido para ser lançada a priori é “gamma”, o que na prática não significa que seja um fóton de radiação γ : este é apenas o nome dado para os fótons que interagem com a matéria pela classe `G4ParticleDefinition` -note que, como já mencionado, a energia dos fótons está inicializada em 250 eV , o que corresponde a uma energia característica de raios-X, enquanto que a energia da radiação γ é da ordem de 1 MeV . O versor momento linear destes fótons é inicializado como $(1, 0, 0)$ e a origem está em $(0, 0.05 \text{ m}, 0)$, com o eixo do cilindro ao longo do eixo z .

Para a simulação com o detector de geometria cilíndrica descrito na Seção 3.1, foi utilizada a mesma *physics list* e *seed* de números aleatórios (1234567) gerados para simular possíveis interações aleatórias das partículas com o material do detector (definida no código `main`). Entretanto, na classe `G4PrimaryGeneratorAction`, apesar do tipo e da energia das partículas serem definidos como os mesmos da calibração, a posição inicial e momento das partículas foram alterados, sendo estes inicializados dentro do detector (onde o *DP* deve interagir) e de forma a fazê-las incidir com um certo ângulo em relação à normal da superfície do detector, já que na realidade os fótons desacoplados do setor escuro podem incidir de qualquer direção acima da linha do horizonte. Vale lembrar que energia, origem, momento e outras propriedades dos fóton são parâmetros determináveis tanto na classe `G4PrimaryGeneratorAction` do Geant4 como em arquivos macro (`.mac`), como argumento na execução da simulação.

Resultados e discussões

Tendo exposto os conceitos que embasam este trabalho e a realização das atividades nele descritas, bem como os métodos utilizados para tanto, neste Capítulo serão apresentados e discutidos alguns resultados das aplicações destes métodos. Porém, é importante primeiro destacar que estes resultados são ainda parciais e não correspondem a todos aqueles previstos no Capítulo 2, dada a complexidade da implementação dos métodos propostos e do objetivo final deste trabalho em função do tempo hábil para sua realização. Entretanto, ainda com os fatores problemáticos mencionados, os resultados são de grande relevância para ampliar o conhecimento sobre os métodos, conhecer suas limitações e prever futuros resultados, como será descrito em seguida.

4.1 Teste de consistência da *physics list*

Antes de realizar simulações em que se busca resultados efetivos para a realização deste trabalho, vale testar a consistência dos modelos físicos utilizados, evitando assim a obtenção de dados incoerentes com as previsões teóricas. Por conseguinte, foram feitas algumas simulações lançando-se fótons de diversas energias em um sólido simples de geometria retangular, composto de iodeto de sódio (NaI) e, com os dados das simulações, foi feito um gráfico de contagens dos números (normalizadas pelo total de eventos) de efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares de partículas em função das energias dos fótons (Figura 4.1), a fim de testar a consistência da *physics list* (*Livermore*) utilizada quanto às seções de choque, já que esta grandeza é proporcional ao número de contagens de cada evento.

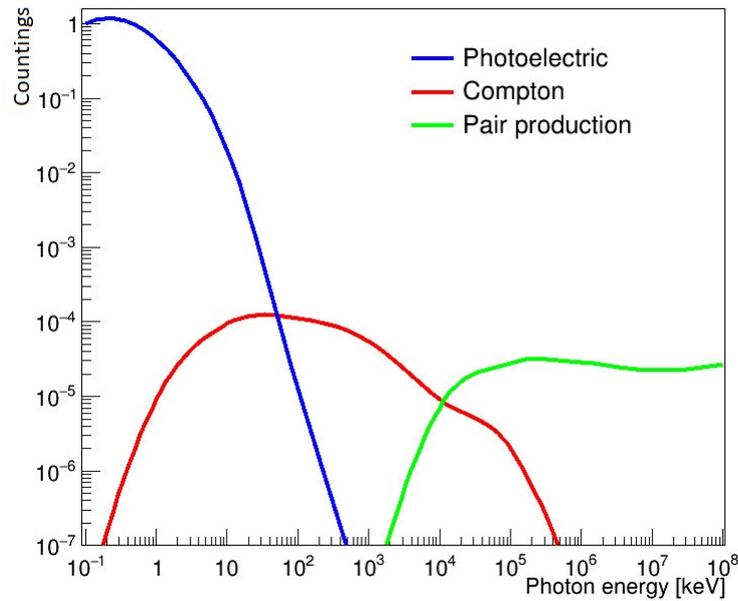


Figura 4.1: Simulações de seção de choque para o NaI .

O material NaI foi escolhido por ser um tipo de cristal com base de dados de seções de choque experimentais acessíveis para fins de comparação. A Figura 4.2 contém as curvas destas grandezas para cada um destes eventos e pode ser usada para comparar os resultados obtidos das simulações. Por inspeção, é possível notar que estas curvas têm um padrão bem parecido com aqueles da Figura 4.1. Em ambas, o efeito fotoelétrico e a produção de pares têm as seções de choque desprezíveis próximo à energia de 1 MeV , as de espalhamento Compton atingem o máximo entre 10 e 100 keV , para o efeito fotoelétrico temos um máximo entre 10 e 10^3 eV e a produção de pares apresenta um *plateau* após 100 MeV . A maior diferença entre as duas figuras se encontra nas discontinuidades da curva para o efeito fotoelétrico, as quais correspondem às energias de ligação dos elétrons de uma determinada camada eletrônica. Porém, como mostra a Figura 4.3, isto provavelmente é uma questão de escala do gráfico, pois a Figura 4.2 apresenta uma discontinuidade entre 30 e 50 keV , por exemplo, o que também é observado na curva da simulação ampliada neste intervalo (Figura 4.3). Vale ressaltar que a Figura 4.3 apresenta uma discontinuidade somente como exemplo de que todas as outras discontinuidades também podem ser (e são) reproduzidas pela simulação descrita nesta Seção.

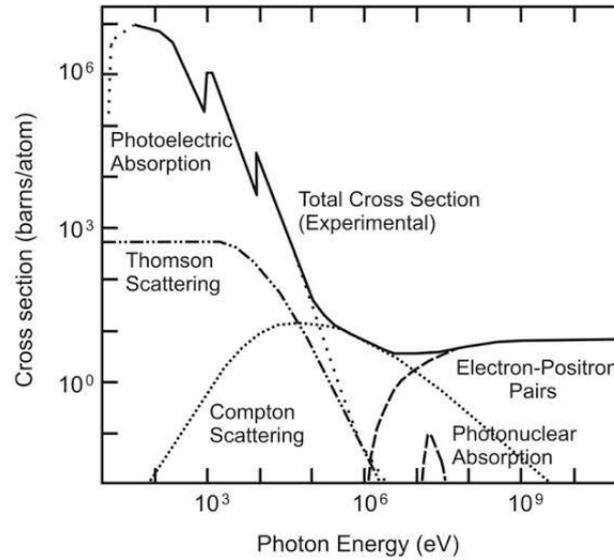


Figura 4.2: Seções de choque experimentais com *NaI*. Figura retirada de Hermanns (2013).

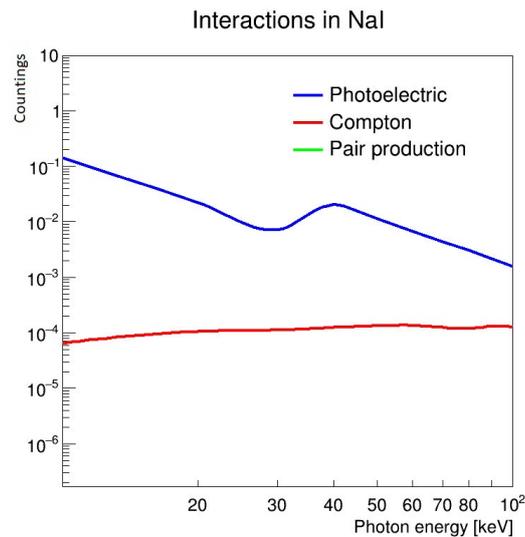


Figura 4.3: Simulação das seções de choque ampliadas mostrando a descontinuidade para o caso do efeito fotoelétrico.

4.2 Detector: componentes e campo elétrico

Apesar das dificuldades enfrentadas em se programar as componentes do detector no TGI, tal como os fios de *NiCr* ou o volume gasoso sem *overlap*, foi possível realizar esta tarefa, definindo toda a geometria e materiais do instrumento, os quais serão cruciais para futuras simulações que visam a detecção de *DP* em si. As definições relacionadas à geometria e composição do detector, feitas na Seção 3.1, estão ilustradas nas Figuras 4.4

e 4.5, com a interface gráfica do Geant4. Na Figura 4.4, o cubo branco é o `world` e o azul é o volume de ar no qual está contido o detector de forma cilíndrica. Este último está representado na Figura 4.5, com a exceção do gás e do mundo, os quais foram omitidos para evidenciar as outras componentes.

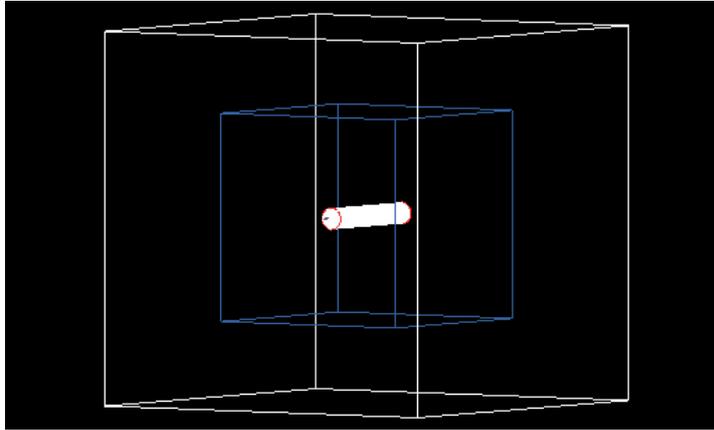


Figura 4.4: Volumes da simulação de calibração.

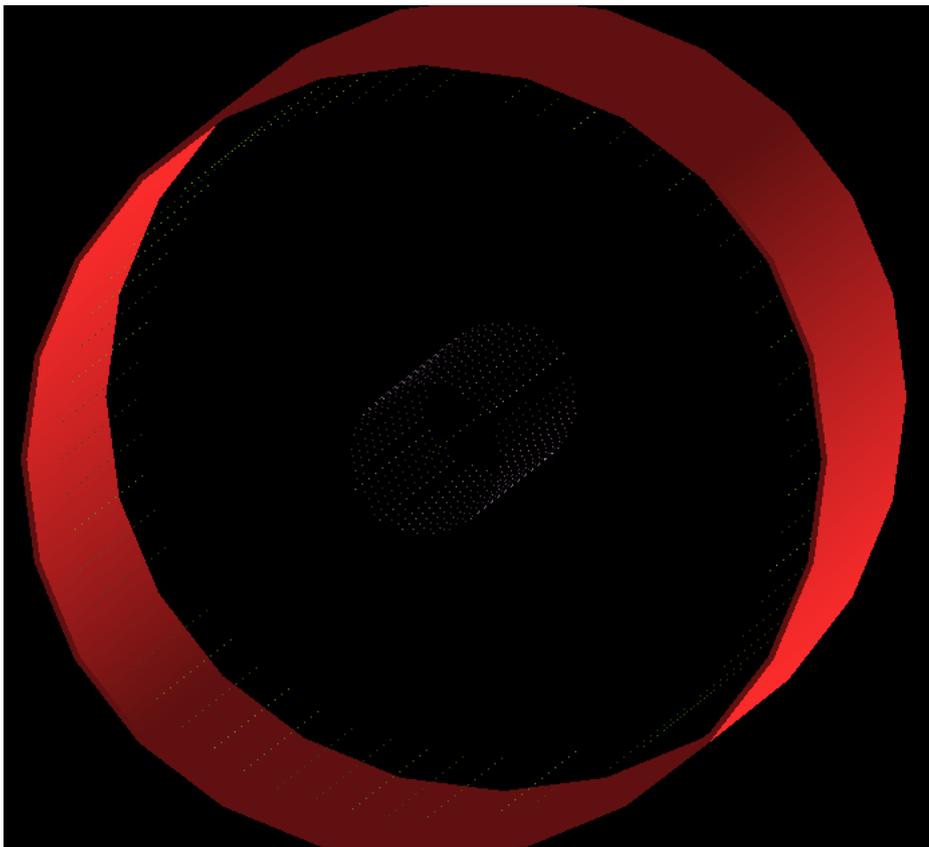


Figura 4.5: Interface gráfica do Geant4 com as componentes do detector programadas. Em vermelho está o catodo de alumínio. As linhas pontilhadas distribuídas circularmente em torno do eixo do detector são os catodos mais internos (ambos de fios de NiCr). A linha pontilhada sutil no eixo do detector representa o anodo.

Quanto ao campo elétrico programado como descrito na Seção 3.2, este mostrou-se funcional em simulações feitas para testá-lo. A Figura 4.6 ilustra o funcionamento do campo elétrico segundo suas características já apresentadas, por meio da trajetória (em vermelho) de um elétron lançado no interior do detector com velocidade nula, sendo induzido, portanto, pelo campo até o anodo central. O elétron presente nesta figura, porém, acaba perdendo toda sua energia em alguma interação com o gás, sem necessariamente atingir o anodo (interações são representadas como pontos amarelos na trajetória da partícula em questão).

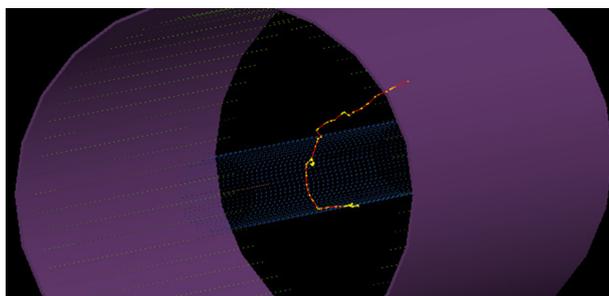


Figura 4.6: Trajetória de um elétron (em vermelho) no interior do detector, induzido pelo campo elétrico.

Uma vez testada a funcionalidade do campo, foram feitas algumas simulações para verificar se ocorre o “efeito de cascata” descrito na Seção 2.1.2 induzido pelo mesmo campo elétrico. Para tanto, foram lançados alguns fótons, nas mesmas condições apresentadas na Seção 3.3, em direção ao catodo de alumínio. O resultado, a priori, foi satisfatório, e foi constatado que os fótons são capazes de gerar efeito fotoelétrico na superfície do catodo e os fotoelétrons podem ionizar o gás com a energia cinética que ganham da indução pelo campo elétrico, conforme está expresso nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9. Nas duas primeiras, está representada a interface gráfica da simulação, evidenciando a trajetória dos fótons (em verde) e dos elétrons (em vermelho), de forma que é perceptível como mais elétrons são gerados a partir da interação de outros elétrons com o gás. Já na Figura 4.9, é mostrada a saída da simulação, indicando qual partícula está realizando a trajetória (“e-” corresponde a elétron) e qual interações elas geram: na parte superior, está demonstrado que os elétrons estão ionizando o gás (nome da interação é “Gás Ativo eIoni”) e na parte inferior está indicada a ocorrência de efeito fotoelétrico no catodo de alumínio (“Catodo Alumínio phot”).

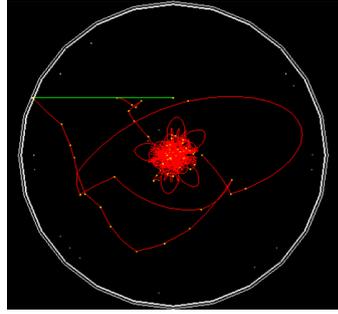


Figura 4.7: Vista frontal do detector na interface gráfica da simulação-teste do campo elétrico, evidenciando o “efeito de cascata”. Em verde está a trajetória dos fótons e em vermelho as trajetórias dos elétrons.

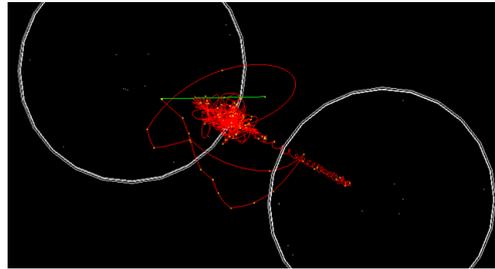


Figura 4.8: Outro ângulo do detector na interface gráfica da mesma simulação da Figura 4.7. Em verde está a trajetória dos fótons e em vermelho as trajetórias dos elétrons.

```
G4WT1 > *G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 2, Parent ID = 1
G4WT0 > 17 -10.3 37.5 222 0.00065 0 99.6 585 Gás Ativo eloni
G4WT1 > *****
G4WT0 > 3 97.1 40 -40 0 0.000119 3.01e-05 97.1 Cátodo Alumínio phot
G4WT1 > 3 97.1 40 -40 0 1.02e-05 0.000256 97.1 Cátodo Alumínio phot
```

Figura 4.9: Parte da saída da mesma simulação: fótons causam efeito fotoelétrico no catodo externo e elétrons ionizam o gás induzidos pelo campo elétrico.

Apesar do funcionamento aparentemente razoável da simulação quanto aos elementos necessários para a realização da calibração, notou-se que, para simulações com um número maior de fótons, eventualmente ocorre um fenômeno inesperado e razão até então desconhecida: nas proximidades do catodo de *NiCr* mais externo, região de fronteira entre dois campos elétricos de intensidades distintas, a maioria dos elétrons simplesmente perde toda sua energia e têm o fim de sua trajetória antes de chegar ao anodo. Isto é demonstrado nas Figuras 4.10 e 4.11. Nesta última, temos a saída da mesma simulação, com a coluna da esquerda sendo a energia cinética de um desses elétrons, a do meio é a variação da energia a cada interação e à direita temos o tipo de interação (“msc” é *multi scattering* - espalhamento múltiplo). Notemos que nestes passos, por exemplo, que são as últimas duas interações antes de o elétron se extinguir, temos uma variação de energia maior que a própria energia do elétron, o que indica um possível *bug*.

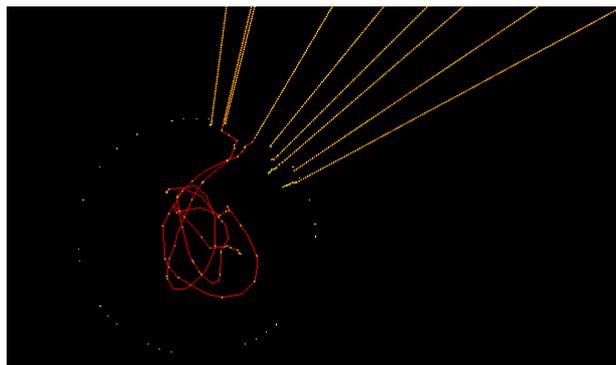


Figura 4.10: Interface gráfica de uma simulação, evidenciando a anulação dos elétrons na fronteira entre dois campos elétricos.

0.379	87.3	Gás Ativo msc
0.294	87.6	Gás Ativo msc

Figura 4.11: Saída da mesma simulação, evidenciando a energia cinética dos elétrons, a variação dessa energia a cada interação e o tipo de interação (primeira, segunda e terceira colunas, respectivamente).

Para resolver esta inconsistência, foi definido apenas um campo elétrico para todas as regiões no interior do detector, o que levou a um bom funcionamento da simulação e um número razoável de registros de elétrons que chegaram ao anodo central. Em outras palavras, a classe descrita na Seção 3.2 que torna o anodo sensível à detecção de elétrons (registrando suas energias), também funcionou normalmente.

4.3 Calibração do detector com radiação

Tendo construído toda a geometria e materiais do detector, bem como implementado e testado o campo elétrico e a sensibilidade do anodo à detecção de elétrons, iniciou-se algumas simulações com maior quantidade de fótons (especificamente 10^6) para se obter um possível espectro de calibração e analisá-lo, principalmente, verificando se é bem descrito pela distribuição de Polya, conforme explicado na Seção 2.1.3. As outras condições iniciais da simulação, como energia e momento linear dos fótons, foram definidas como descrito na Seção 3.3. Porém, verificou-se que, mesmo para baixas pressões do gás, os elétrons raramente chegavam ao anodo induzidos por campos elétricos cuja constante k fora definida segundo a Equação 3.2, utilizando-se os potenciais citados em Kopylov et al. (2018) para a configuração (1), como explicado na Seção 2.1.2. Para a maior diferença de potencial nesta configuração, teríamos $k \approx 465 \text{ V}$, portanto, foram tomados dados de simulações

separadamente variando este parâmetro, entre 1000 V e 12500 V . Além disso, para pressões da ordem de 1 $atm \approx 760 torr$, o gás se torna praticamente opaco aos fótons com 250 eV de energia, portanto, foram também tomados os mesmos dados, porém mantendo agora k fixo em 5000 V (intermediário entre 1000 V e 12500 V) e variando a pressão do gás entre $\sim 2 torr$ e $\sim 9 torr$.

4.3.1 Análise dos dados variando k

Dos dados obtidos variando-se o parâmetro k (com a pressão do gás fixa em 1 $torr$) a cada simulação, os que tiveram os parâmetros mais razoáveis para os ajustes aplicados aos seus devidos histogramas foram aqueles para $k = 2000 V$, $k = 5000 V$ e $k = 9000 V$, correspondendo respectivamente às Figuras 4.12, 4.14 e 4.16. Nessas três figuras, como já dito, foi feita a tentativa de se ajustar a distribuição de Polya (Equação 2.2) aos dados dos histogramas, os quais são contagem de elétrons incidentes no anodo para de cada uma de suas respectivas energias. Foi feito isto, portanto, utilizando a Equação 2.2 como uma distribuição de energias E ($P(A) \rightarrow P(E)$), já que a amplitude dos pulsos destes elétrons são proporcionais à sua energia e as contagens são proporcionais à intensidade dos pulsos (em unidades arbitrárias).

Dos ajustes, feitos por meio do *software* ROOT (também do CERN) foram fornecidos os parâmetros C , \bar{E} e θ que minimizam os χ^2 . Tais parâmetros estão todos indicados nas Figuras 4.13, 4.15 e 4.17, as quais ilustram a saída das simulações para $k = 2000 V$, $k = 5000 V$ e $k = 9000 V$, respectivamente, onde $p0 = C$, $p1 = \bar{E}$ e $p2 = \theta$. Nas mesmas Figuras, além das incertezas dos parâmetros, também consta o status de convergência do método utilizado para o ajuste, o número correspondente ao seu χ^2 (FCN) e o indicador de confiança do método de minimização do χ^2 (EDM - *Estimated Distance to Minimum*, o qual é proporcional à probabilidade de erro do método), entre outros dados que não serão utilizados nesta análise.

Nota-se nestas figuras que, apesar de o ajuste para $k = 5000 V$ apresentar um χ^2 de quase o dobro dos outros dois, este é o que tem o menor valor de FCN em relação ao número de dados do histograma e menor EDM absoluto, enquanto que para os outros dois casos, este valor está bem próximo aos máximos de contagens, porém ainda indicando um χ^2 menor que o número de dados de cada histograma. Este fato também reflete que o número de contagens de elétrons no anodo foi maior para $k = 5000 V$ do que para os outros

dois casos, o que sugere uma possível intensidade para o campo elétrico que maximiza este número de contagens. Outros histogramas com seus respectivos ajustes para outros valores de k encontram-se no Apêndice A.1.

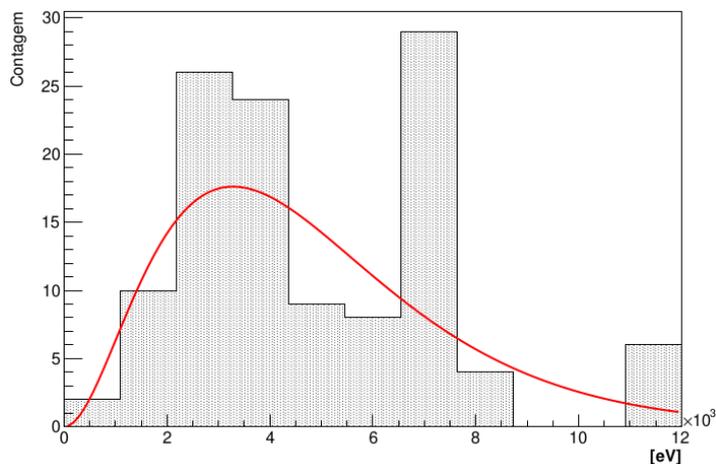


Figura 4.12: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 2000 V$. Em vermelho está a curva da distribuição de Polya ajustada.

```
FCN=29.4379 FROM MIGRAD STATUS=CONVERGED 981 CALLS 982 TOTAL
EDM=1.08274e-06 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX ACCURATE
EXT PARAMETER STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 p0 3.15230e+02 2.29499e+02 9.07004e-02 1.05554e-05
2 p1 4.86739e+03 6.47573e+02 1.02085e+00 -2.73680e-06
3 p2 2.06828e+00 5.65839e-01 2.41829e-04 -6.01965e-03
```

Figura 4.13: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 2000 V$.

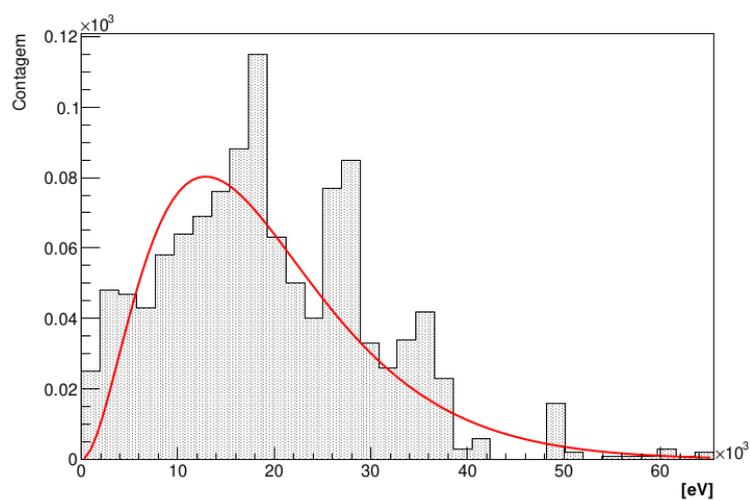


Figura 4.14: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 5000 V$. Em vermelho está a curva da distribuição de Polya ajustada.

```

FCN=180.817 FROM MIGRAD STATUS=CONVERGED 183 CALLS 184 TOTAL
EDM=7.23488e-08 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX UNCERTAINTY 4.1 per cent
EXT PARAMETER
NO. NAME VALUE ERROR STEP SIZE FIRST DERIVATIVE
1 p0 1.36901e+03 3.72346e+02 3.72449e-02 -1.12925e-06
2 p1 1.92451e+04 3.79048e+02 4.78851e-02 1.03149e-06
3 p2 2.02379e+00 2.35008e-01 -1.79973e-05 2.93119e-04

```

Figura 4.15: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 5000 V$.

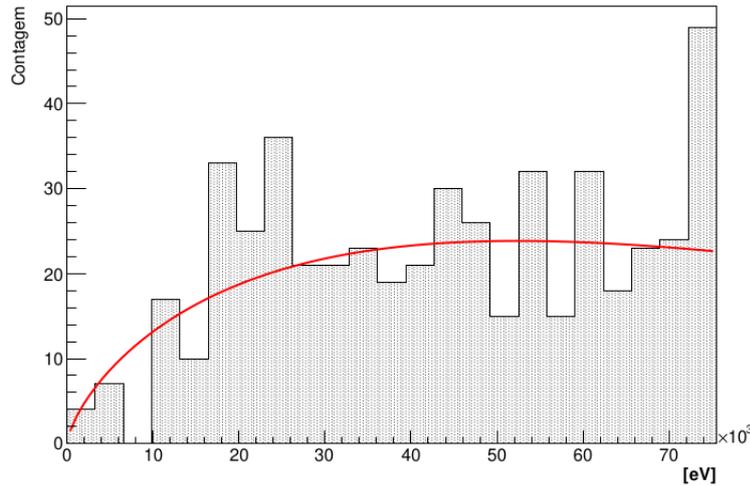


Figura 4.16: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 9000 V$. Em vermelho está a curva da distribuição de Polya ajustada.

```

FCN=52.8441 FROM MIGRAD STATUS=CONVERGED 664 CALLS 665 TOTAL
EDM=1.68156e-07 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX ACCURATE
EXT PARAMETER
NO. NAME VALUE ERROR STEP SIZE FIRST DERIVATIVE
1 p0 8.95972e+01 2.21152e+01 1.51591e-02 1.07495e-04
2 p1 1.26943e+05 5.01803e+04 2.00783e+01 -8.05226e-09
3 p2 7.01860e-01 1.80609e-01 1.02480e-04 -1.28195e-02

```

Figura 4.17: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 9000 V$.

Quanto aos parâmetros, temos que, primeiramente sobre o p_2 (θ), os ajustes para $k = 2000 V$ e $k = 9000 V$ fornecem valores compatíveis com o esperado conforme dito em Kopylov et al. (2018) ($\theta \approx 0.4$) dentro de um intervalo de 3σ , como é perceptível observando-se as Figuras 4.13 ($p_2 - 3\sigma \approx 2.068 - 3 \times 0.566 = 0.37 < 0.4$) e 4.17 ($p_2 - 3\sigma \approx 0.702 - 3 \times 0.18 = 0.162 < 0.4$), enquanto que para $k = 5000 V$, este parâmetro se mostra incompatível com o valor esperado, como mostrado na Figura 4.15 ($p_2 - 3\sigma \approx 2.024 - 3 \times 0.235 = 1.319 > 0.4$). Esta análise indica que, apesar de o ajuste para $k = 5000 V$ ser aparentemente o mais acurado dentre os três, ele não fornece um parâmetro de acordo com a teoria e, além disso, embora o valor de p_2 para $k = 9000 V$ seja o mais

próximo do esperado, sua incerteza é da mesma ordem de grandeza que o próprio valor de p_2 , tornando a estimativa menos precisa.

No que se refere à energia média dos espectros de calibração, conforme a análise detalhada a seguir, obtemos que apenas para $k = 9000 V$ temos p_1 compatível (em um intervalo de 3σ) com a amplitude média esperada segundo Kopylov et al. (2018), isto é, $\sim 9 mV$. Para $k = 2000 V$, temos $p_1 = 4.867 \times 10^3 eV$, energia para a qual tem-se cerca de 9 contagens de elétrons, ou seja, correspondendo a uma amplitude média de $4.867 \times 10^3 eV / (9 e) \approx 540.78 V$ (e é a carga fundamental), o que determina o mínimo do intervalo de valores compatíveis como $(4.867 \times 10^3 - 3\sigma) / 9 V \approx (4.867 \times 10^3 - 3 \cdot 6.48 \times 10^2) / 9 V \approx 324.78 V$. De forma análoga, foram calculados os outros valores mínimos aceitáveis de p_1 para os dados com $k = 5000 V$ e $k = 9000 V$, obtendo-se, respectivamente, $\sim 157.07 V$ e $-472 V$. Notando mais uma vez que o parâmetro analisado para $k = 9000 V$ é o mais compatível com o esperado dada sua grande incerteza, é possível que os erros dos parâmetros para este caso estejam superestimados. Sobre o parâmetro p_0 , não há valores esperados, já que este deve variar com o número de contagens e não é determinante para um bom ajuste da distribuição de Polya.

Para efeito de confirmação da eficácia de detecção pelos ajustes feitos, foram calculadas as taxas de contagem de *single electrons* destas três distribuições. Primeiramente, elas foram normalizadas entre $E = 0$ e $E = \infty$ (eV), com constante de normalização N , e então integradas nas respectivas regiões de energia com maior número de contagens (genericamente entre α e β), como feito em Kopylov et al. (2018), porém não em intervalos totalmente proporcionais dado que a forma das distribuições varia para cada caso. A taxa de contagem T na região entre α e β foi calculada, portanto, de acordo com a Equação 4.1:

$$T = \frac{1}{N} \int_{\alpha}^{\beta} P(E) dE. \quad (4.1)$$

Por integração numérica, foram obtidas as seguintes taxas: para $k = 2000 V$, $\alpha = 1 keV$ e $\beta = 9 keV$, tem-se $N = 104928$ e $T \approx 89.3\%$; para $k = 5000 V$, $\alpha = 4 keV$ e $\beta = 40 keV$, tem-se $N = 1.89732 \times 10^6$ e $T \approx 92.33\%$; para $k = 9000 V$, $\alpha = 10 keV$ e $\beta = 75 keV$, tem-se $N = 4.18188 \times 10^6$ e $T \approx 33.84\%$. As taxas de contagem para $k = 2000 V$ e $k = 5000 V$ foram, portanto, razoáveis, considerando que a eficiência de detecção foi obtida em cerca de 77% em Kopylov et al. (2018). Para o caso $k = 9000 V$ isto não ocorre, possivelmente devido ao intervalo de energias em que a integração foi feita ser inadequado.

Considerando estes fatos, existem fatores que tornam esta análise inconclusiva quanto à escolha de um ajuste a se utilizar para obter a taxa de contagem esperada para os DP , via integração sobre as energias. Entre estes fatores, estão a possibilidade de as incertezas dos parâmetros para $k = 9000 V$ estarem superestimadas e a aparente presença de dois máximos nos espectros, possibilitando que sejam melhor descritos por dois ajustes simultâneos em vez de um apenas. Em vista disto, foram ajustadas duas distribuições de Polya em cada conjunto de dados para observar se dois ajustes se comportam melhor que apenas um. O resultado deste teste foi que a maioria dos dados, incluindo estes três já mencionados (vide Apêndice A.1), fornece melhor ajuste com apenas uma curva de distribuição. Os dados em que dois ajustes se comportaram de forma razoável e melhor que com apenas um foram apenas aqueles para $k = 6000 V$ (espectro e ajuste representados na Figura 4.18), sendo que com um único ajuste, o valor de FCN é de 864.394 sem apresentar convergência (Figura 4.19), mas com dois, este valor foi obtido em 141.548 com convergência do método (Figura 4.20).

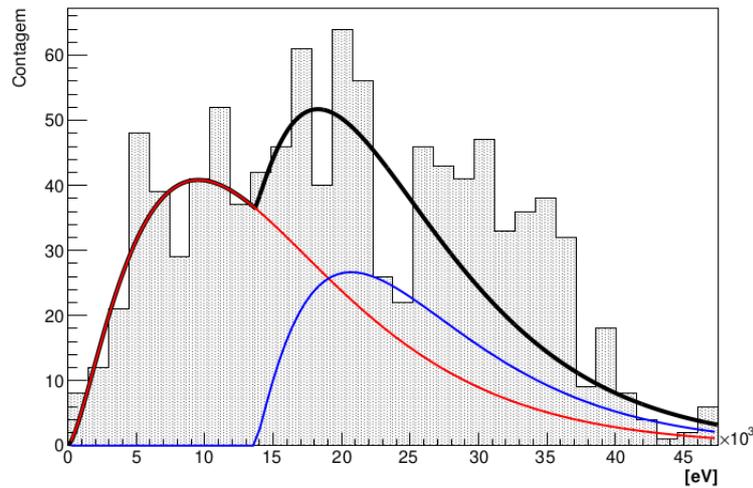


Figura 4.18: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 6000 V$, com duas distribuições de Polya ajustadas (em vermelho e em azul) e um ajuste global (em preto) como combinação destas.

```
Warning in <Fit>: Abnormal termination of minimization.
FCN=864.394 FROM MIGRAD STATUS=CALL LIMIT 1351 CALLS 1352 TOTAL
EDM=0.000640097 STRATEGY= 1 ERR MATRIX NOT POS-DEF
EXT PARAMETER APPROXIMATE STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 p0 5.24156e+03 5.15966e+03 7.45907e+01 -1.29075e-04
2 p1 3.05519e+00 3.21094e+00 -4.33246e-02 2.42135e-02
3 p2 -1.00019e+00 1.98590e-04 2.83625e-06 3.73377e+03
```

Figura 4.19: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 6000 V$ (com um ajuste).

```

FCN=141.548 FROM MIGRAD STATUS=CONVERGED 957 CALLS 958 TOTAL
EDM=9.13061e-07 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX UNCERTAINTY 2.7 per cent
EXT PARAMETER STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 p0 4.00486e+02 1.08427e+02 3.97931e-01 -6.10459e-05
2 p1 1.58259e+04 1.46413e+03 -4.36392e+00 9.94921e-07
3 p2 1.51522e+00 2.10995e-01 1.71519e-07** at limit **
4 p3 1.69827e+02 3.07655e+01 6.32353e-07 1.50131e-01
5 p4 1.31861e+04 9.26408e+02 -5.16719e-06 -4.71234e-01
6 p5 1.13436e+00 1.76551e-154 3.02735e-307 -8.67127e+00
7 p6 1.36751e+04 7.37898e+02 -2.23999e-06 7.85195e-01

```

Figura 4.20: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 6000 V$ (com dois ajustes). $p0$, $p1$ e $p2$ são os parâmetros C , \bar{E} e θ da curva vermelha, $p3$, $p4$ e $p5$ são os mesmos parâmetros porém da curva azul, enquanto que $p6$ é o deslocamento em energia entre as duas curvas.

Estes resultados, portanto, apontam que, para uma pressão baixa e fixa, os espectros de calibração tendem a ter um máximo melhor definido e característico para *single electrons*, especialmente para campos elétricos mais intensos.

4.3.2 Análise dos dados variando a pressão

Quanto aos dados obtidos das simulações feitas individualmente variando-se a pressão no gás, os que forneceram os ajustes mais razoáveis foram aqueles para as pressões P de 4 torr e 5 torr, cujos histogramas com ajustes estão representados nas Figuras 4.21 e 4.22. As saídas do programa que realiza o ajuste da distribuição de Polya estão ilustradas pelas Figuras 4.23 e 4.24, para 4 torr e 5 torr respectivamente.

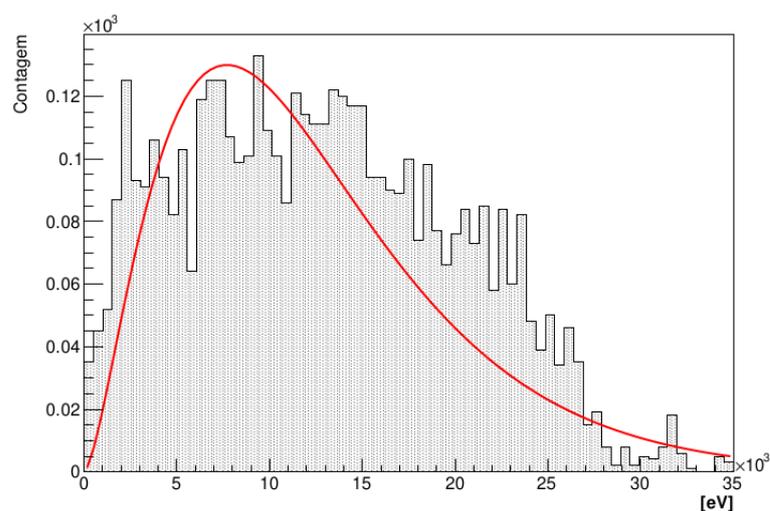


Figura 4.21: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 4 torr$. Em vermelho está a curva da distribuição de Polya ajustada.

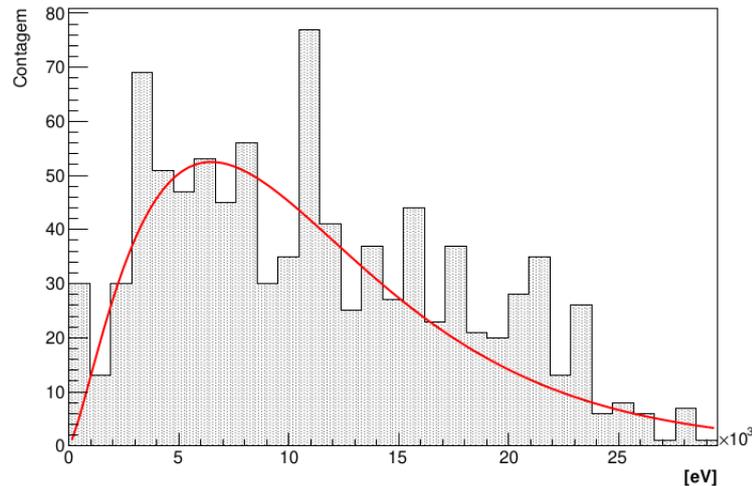


Figura 4.22: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 5$ torr. Em vermelho está a curva da distribuição de Polya ajustada.

```
FCN=733.563 FROM MIGRAD STATUS=CONVERGED 199 CALLS 200 TOTAL
EDM=4.24175e-07 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX ACCURATE
EXT PARAMETER STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 p0 1.42821e+03 1.65654e+02 2.97937e-01 -1.81699e-05
2 p1 1.24580e+04 1.31448e+02 1.34147e+00 4.10627e-06
3 p2 1.61833e+00 1.00327e-01 1.73559e-04 2.24402e-02
```

Figura 4.23: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $P = 4$ torr.

```
FCN=148.333 FROM MIGRAD STATUS=CONVERGED 154 CALLS 155 TOTAL
EDM=7.05705e-10 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX UNCERTAINTY 2.4 per cent
EXT PARAMETER STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 p0 4.38480e+02 7.14991e+01 1.14650e-01 -2.44476e-06
2 p1 1.12138e+04 2.76351e+02 2.59492e-01 -2.00097e-07
3 p2 1.37140e+00 1.30267e-01 2.28900e-04 1.35091e-03
```

Figura 4.24: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $P = 5$ torr.

Observando os valores de FCN de ambos os ajustes, percebe-se que este valor para $P = 4$ torr é quase 6 centenas maior do que para $P = 5$ torr, enquanto seu valor de EDM é da ordem de 10^3 vezes maior que para o segundo caso. No entanto, é notável que há uma quantidade razoavelmente maior de dados para $P = 4$ torr em relação àqueles para $P = 5$ torr. Em suma, este número não é suficiente para dizer qual ajuste é melhor, embora ambos tenham χ^2 menor que a quantidade de dados.

Analisando os parâmetros dos ajuste de forma análoga ao que foi feito na Seção 4.3.1, temos que, para $P = 4$ torr, o parâmetro $p2$ é incompatível com o valor de θ esperado em um intervalo de 3σ , pois $p2 - 3\sigma \approx 1.62 - 3 \cdot 0.10 = 1.32 > 0.4$. Para $P = 5$ torr, $p2$ também é incompatível com o esperado em um intervalo de 3σ , já que $p2 - 3\sigma \approx 1.37 - 3 \cdot$

$0.13 = 0.98 > 0.4$. Quanto à energia (ou amplitude) média, temos que, para $P = 4 \text{ torr}$, esta é incompatível com a amplitude média esperada, uma vez que $(p1 - 3 \cdot \sigma)eV/ne \approx (1.246 \times 10^4 - 3 \cdot 1.31 \times 10^2)/110 = 109.7 \text{ V} > 9 \text{ mV}$, onde n é o número de contagens de elétrons detectados com a energia média. Da mesma forma, para $P = 5 \text{ torr}$, este parâmetro é incompatível com o esperado, pois $(p1 - 3 \cdot \sigma)eV/ne \approx (1.12 \times 10^4 - 3 \cdot 2.76 \times 10^2)/42 = 246.9 \text{ V} > 9 \text{ mV}$. Estes resultados já indicam que quanto maior a pressão, mais incompatíveis são os parâmetros obtidos para a distribuição de Polya em relação aos esperados segundo Kopylov et al. (2018). Além disto é notável, observando os outros histogramas (vide Apêndice A.2), que o número de elétrons detectados no anodo diminui conforme a pressão aumenta.

Novamente para verificar quão razoável pode ser a eficiência de detecção dos *single electrons* dada pelos ajustes feitos (agora variando a pressão), foram calculadas as taxas de contagem dessas partículas no anodo para $P = 4 \text{ torr}$ e $P = 5 \text{ torr}$, de maneira análoga ao que foi feito na Seção 4.3.1. Utilizando a Equação 4.1, foram obtidas as seguintes taxas T : para $P = 4 \text{ torr}$, $\alpha = 4 \text{ keV}$ e $\beta = 30 \text{ keV}$, tem-se $N = 2.07519 \times 10^6$ e $T \approx 87.57\%$ e, para $P = 5 \text{ torr}$, no mesmo intervalo de energias, tem-se $N = 774813$ e $T \approx 84.7\%$. Estes resultados mostram como menos elétrons são detectados para maiores pressões, apesar da aparente razoabilidade das taxas de contagem calculadas, porém, como mencionado na Seção 4.3.1, não garantem que estas simulações realizarão boas previsões sobre o experimento original.

Na tentativa de entender melhor a relação das energias dos elétrons detectados com a pressão do gás e os parâmetros dos ajustes, foram feitos, assim como na Seção 4.3.1, ajustes de duas curvas simultâneas da distribuição de Polya em cada histograma de energias. Fazendo isto, não foi obtido nenhum espectro com um bom ajuste: os únicos dados realmente ajustados por duas curvas foram de mais baixas pressões e o método de ajuste não convergiu (vide Figuras 4.25 e 4.26, e Apêndice A.2), o que reforça a ideia de que os dados são melhor descritos por uma única distribuição em vez de duas simultaneamente, caracterizando-os de acordo com sua fonte (os *single electrons*).

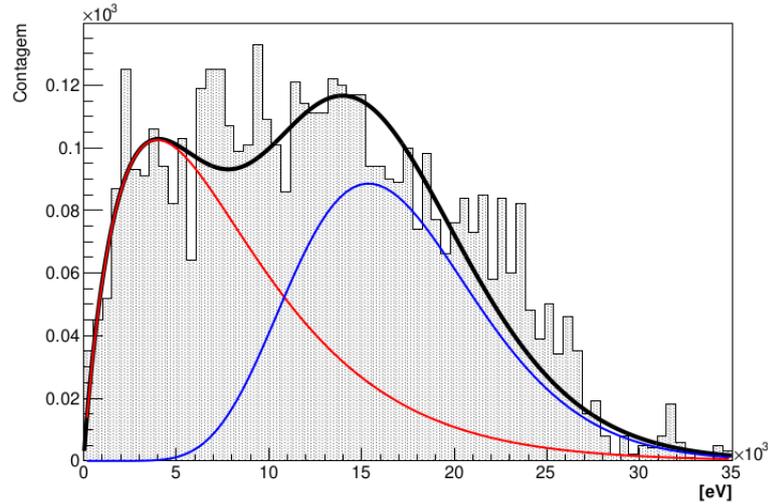


Figura 4.25: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 4$ torr, com duas distribuições de Polya ajustadas (em vermelho e em azul) e um ajuste global (em preto) como combinação destas.

```
Warning in <Fit>: Abnormal termination of minimization.
FCN=294.25 FROM MIGRAD STATUS=CALL LIMIT 1959 CALLS 1960 TOTAL
EDM=0.206005 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX UNCERTAINTY 7.1 per cent
EXT PARAMETER APPROXIMATE STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 p0 5.11659e+02 4.96083e+01 -1.22330e+00 -3.65727e-02
2 p1 8.23727e+03 4.31950e+02 3.67993e+01 -2.63611e-03
3 p2 9.28831e-01 6.96745e-02 -9.47324e-07** at limit **
4 p3 3.45934e+06 1.03756e+06 4.33353e-02 -1.85076e+01
5 p4 1.69476e+04 2.13446e+02 2.03811e-04 8.68951e+02
6 p5 9.62167e+00 3.56061e-01 6.89937e-02 1.30804e+01
7 p6 1.20383e+01 1.90095e+02 -2.91785e-03 5.79569e+01
```

Figura 4.26: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $P = 4$ torr (com dois ajustes). p_0 , p_1 e p_2 são os parâmetros C , \bar{E} e θ da curva vermelha, p_3 , p_4 e p_5 são os mesmos parâmetros porém da curva azul, enquanto que p_6 é o deslocamento em energia entre as duas curvas.

Dado que os resultados ainda não são completamente conclusivos sobre qual seria o melhor espectro para se obter a taxa de contagem de *single electrons*, não sendo possível obter dados suficientes nas mesmas condições descritas em Kopylov et al. (2018) (energia dos fótons compatível com a de radiação UV, pressão do gás entre 1 e 3 atm e campo elétrico com intensidade máxima dada por $k \approx 465$ V), foram feitos dois histograma 2D para analisar como P e k se relacionam com as energias dos elétrons detectados, para então determinar o quanto podemos variar k e P ainda sendo possível obter uma quantidade de dados suficiente para a análise, relacionando estas informações aos histogramas melhor avaliados.

4.3.3 Pressão e k em função da energia

Nas Figuras 4.27 e 4.28, estão representados os histogramas 2D da pressão em função da energia dos *single electrons* (E) e de k em função de E , respectivamente, fixando $P = 1 \text{ torr}$ no primeiro caso e $k = 5000 \text{ V}$ no segundo caso. Neles, é possível notar que as maiores taxas de contagem ocorrem entre 5 keV e 15 keV em ambos os casos, fornecendo da ordem de 10^3 a 10^5 dados nesse intervalo. Isto ocorre principalmente para $P \in [0, 2] \text{ torr}$ e $k \in [2000, 6000] \text{ V}$, o que sugere uma correlação entre estes parâmetros, a quantidade de *single electrons* detectados e suas energias para fótons de 250 eV incidindo no catodo externo: quanto maior a pressão, menor é a quantidade e energia desses elétrons detectados, enquanto que quanto maior a intensidade do campo, mais energéticos são os elétrons detectados, não obstante a quantidade de dados diminua para $k > 6000 \text{ V}$.

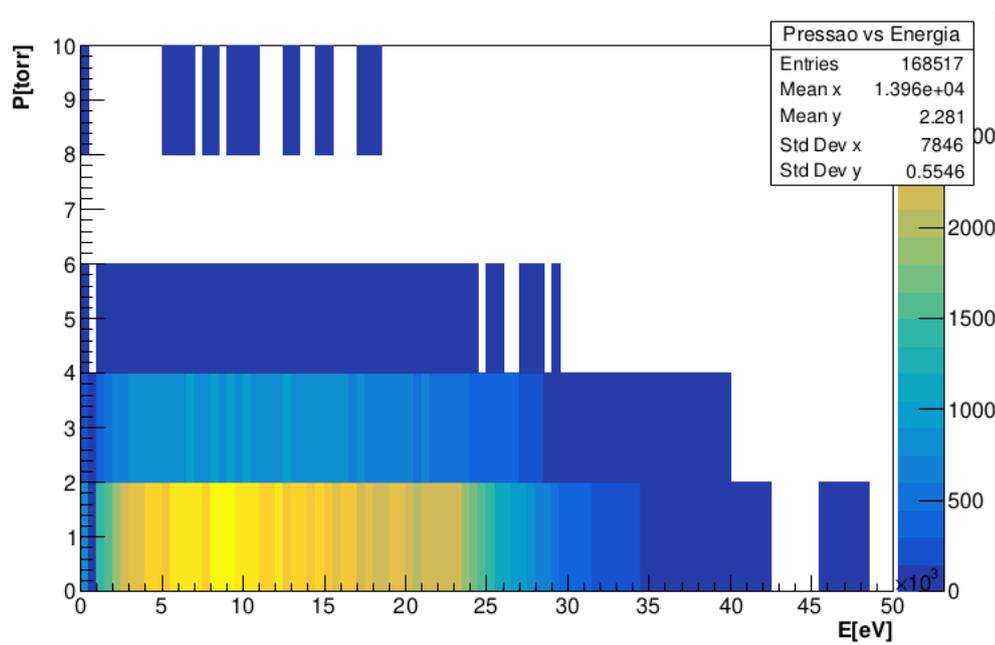


Figura 4.27: Histograma em duas dimensões das contagens de *single electrons* detectados, com eixo vertical sendo a pressão em *torr* e o horizontal sendo a energia em *eV*.

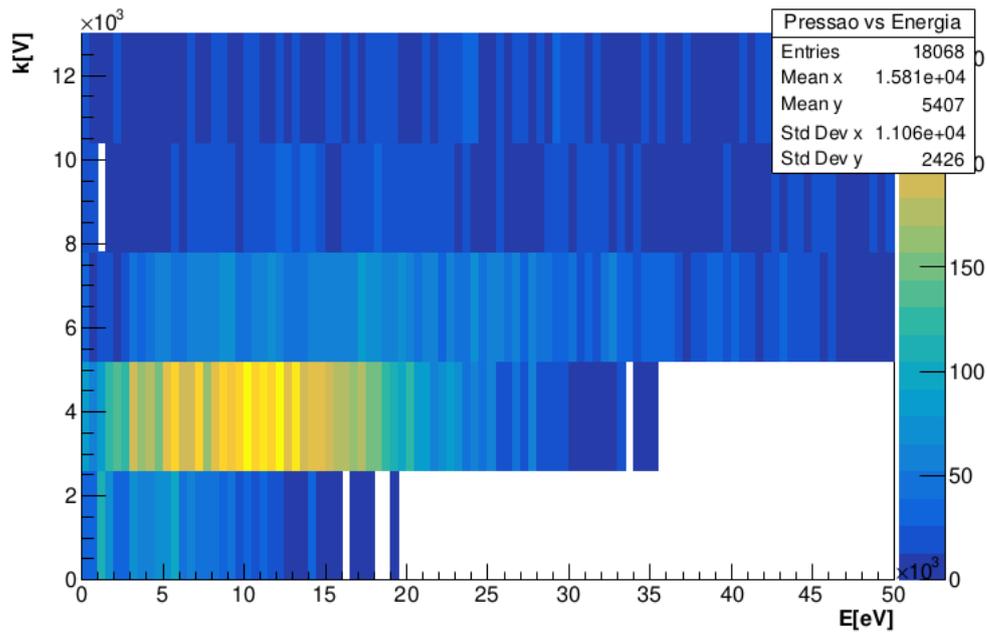


Figura 4.28: Histograma em duas dimensões das contagens de *single electrons* detectados, com eixo vertical sendo o parâmetro k em V e o horizontal sendo a energia em eV .

Estas Figuras também apontam para a hipótese de que o ajuste dos dados das simulações para $P = 1 \text{ torr}$ e $k = 9000 \text{ V}$ pode não ser tão adequado quanto parece pela compatibilidade de seus parâmetros com os esperados, dado que possui uma quantidade menor de dados devido à alta intensidade do campo elétrico e que as propriedades das simulações não estão completamente de acordo com o sugerido para o experimento descrito em Kopylov et al. (2018), constituindo um regime diferente deste. Nesse caso, o espectro obtido para $k = 2000 \text{ V}$ e $P = 1 \text{ torr}$, por exemplo, poderia ser um melhor candidato a fornecer um ajuste com parâmetros mais próximos aos que seriam obtidos experimentalmente nas mesmas condições em que a simulação foi realizada. O fato é que as simulações não puderam ser realizadas nas condições esperadas teoricamente devido a limitações do *software* Geant4, e portanto não forneceriam boas previsões para o experimento original, suscitando a necessidade de mais alternativas para realizar esta tarefa.

Conclusões

Não obstante os objetivos deste trabalho não terem sido completamente finalizados, pode-se concluir que as atividades produzidas forneceram uma base importante de resultados e métodos para o desenvolvimento de simulações com menos limitações e mais adequações ao modelo do experimento original. Foi possível, pois, construir a geometria e volumes do detector por completo, incluindo o gás e o campo elétrico, necessários à calibração do detector com incidência de radiação (não UV, neste caso) a despeito dos espectros obtidos para este fim não terem sido ideais para providenciar uma taxa de contagem de *single electrons* com alto nível de confiança.

Mesmo com tais limitações quanto à reprodutibilidade das condições reais do experimento, foi possível ajustar à distribuição de Polya (Equação 2.2) aos histogramas de energia dos elétrons detectados no anodo de forma razoável (Seção 4.3), o que faz o objetivo da calibração estar mais próximo de ser atingido. Isso tudo também foi possível graças a outro avanço, que foi a finalização da programação de todo o detector, com seus materiais e geometrias, além das propriedades físicas, incluindo o campo elétrico (Seção 3.1). Por fim, outro resultado positivo foi a conclusão de que o modelo de física de partículas utilizado se mostrou adequado para simulações envolvendo fótons de baixa energia, especialmente no que diz respeito a efeitos fotoelétricos, que é o efeito visado para o objetivo final do experimento, apesar das limitações apresentadas para fótons com energias abaixo de 250 eV.

Entretanto, constatou-se alguns resultados inesperados e que tornaram a utilização dos dados da calibração inviáveis. Entre eles destaca-se, o ocorrido na definição dos campos elétricos: ao definir campos elétricos de intensidades diferentes em três regiões do interior do detector, constatou-se um fenômeno imprevisível no qual alguns elétrons são simples-

mente anulados na fronteira entre dois campos elétricos, o que pode ter contribuído para a incompatibilidade de alguns parâmetros dos ajustes dos espectros de calibração com os valores esperados pela literatura (Kopylov et al., 2018). Além disto, há também a opacidade aparente do gás a pressões mais compatíveis com a do experimento original (1 - 3 atm), não permitindo que os fótons cheguem ao catodo externo e portanto impedindo a detecção de *single electrons*.

Em função destas pendências, portanto, tem-se como perspectiva futura suprimir as limitações descritas, começando por implementar as interações com o gás no interior do detector utilizando o *software* Garfield ++ (CERN), que possui melhor desempenho em simular detectores gasosos, resolvendo assim o problema da opacidade do gás. Com isto, é pretendido testar simulações com fótons de mais baixa energia, dado que o gás pode ser mais transparente a esses fótons ao diminuir sua opacidade, além de investigar o problema da fronteira entre campos elétricos, e assim obter espectros de calibração cujos ajustes possibilitem o cálculo da eficiência de detecção.

Como últimas perspectivas, caso a interação dos fótons de mais baixa energia com a matéria mostrem maior coerência física na utilização das *physics list* disponíveis no Geant4, objetiva-se a definição de uma geometria de blindagem para o detector, a fim de realizar simulações mais realistas com fótons de mais alta energia que representariam os raios cósmicos e outras radiações de fundo que poderiam vir a causar ruído no experimento real.

Referências Bibliográficas

- Bertone G., Hooper D., Silk J., 2005, Phys. Rep., 405, 279
- Cairns R. B., Samson J. A. R., 1966, Journal of the Optical Society of America (1917-1983), 56, 1568
- Clowe D., Bradač M., Gonzalez A. H., Markevitch M., Randall S. W., Jones C., Zaritsky D., 2006, ApJ, 648, L109
- Derevianko A., Dzuba V. A., Flambaum V. V., Pospelov M., 2010, Phys. Rev. D, 82, 065006
- Geant4 2020, Building and Installing from Source, <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/InstallationGuide/html/installguide.html>
- Hermanns C. F., 2013, PhD thesis, <http://dx.doi.org/10.17169/refubium-12745>
- Komatsu E., et al., 2011, ApJS, 192, 18
- Kopylov A. V., Orekhov I. V., Petukhov V. V., 2016, arXiv e-prints, p. arXiv:1603.08657
- Kopylov A., Orekhov I., Petukhov V., 2018, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 910, 164
- Kopylov A., Orekhov I., Petukhov V., 2021, arXiv e-prints, p. arXiv:2107.03647
- NIST 2001, Technical report, Total Atenuation in Pb as a Function of Energy. National Institute of Standards and Technology
- Ramadhan R. A., Abdullah K. M.-S., 2018, Nuclear Engineering and Technology, 50, 462

Rolandi L., Riegler W., Blum W., 2008, Particle Detection with Drift Chambers. Vol. 0, doi:10.1007/978-3-540-76684-1,

Rubin V. C., Ford W. K. J., 1970, ApJ, 159, 379

Rubin V. C., Ford W. K. J., Thonnard N., 1980, ApJ, 238, 471

Zwicky F., 1933, Helvetica Physica Acta, 6, 110

Apêndice

Apêndice A

Espectros de calibração e ajustes

Este apêndice contém os histogramas das energias dos *single electrons* detectados no anodo do detector em cada simulação, ajustados com uma ou duas curvas da distribuição de Polya (Equação 2.2), juntamente com as respectivas saídas do programa que realiza os ajustes por minimização de χ^2 (feito com ROOT), as quais expõem os parâmetros e erros de cada ajuste. Tais resultados estão apresentados em apêndice para ilustrar com mais detalhes as análises feitas na Seção 4.3.

A.1 Espectros ajustados variando k

As Figuras A.1 a A.43 apresentam os espectros de calibração e as respectivas saídas do programa que realiza os ajustes da distribuição de Polya. Tais histogramas foram feitos com os dados das simulações em que a pressão P do gás foi mantida no valor de 1 *torr*, variando-se a constante k do campo elétrico (definida na Seção 3.2) entre 1500 V e 12500 V.

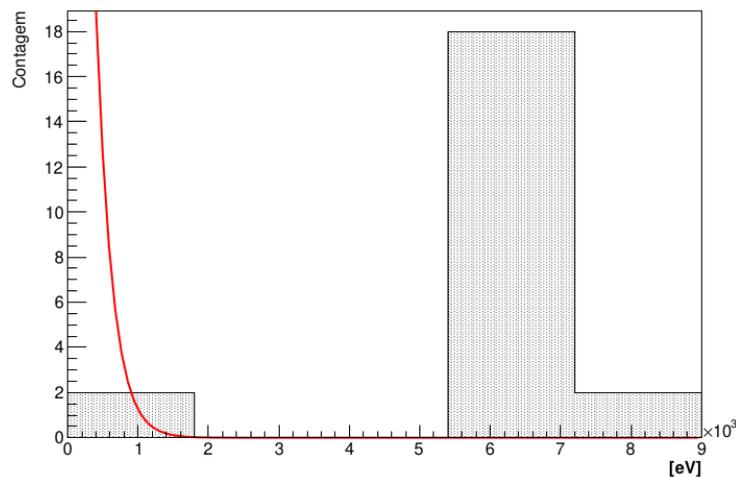


Figura A.1: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 1500$ V. Em vermelho está a curva da distribuição de Polya ajustada.

EXT. PARAMETER		VALUE	APPROXIMATE ERROR	STEP SIZE	FIRST DERIVATIVE
1	p0	1.26952e+02	1.28222e+03	4.00712e-02	-3.71729e-06
2	p1	2.68134e+02	6.52435e+02	2.00294e-02	-7.44274e-06
3	p2	3.70168e-01	4.24079e+00	1.47057e-04	1.01254e-03

Figura A.2: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 1500 V$.

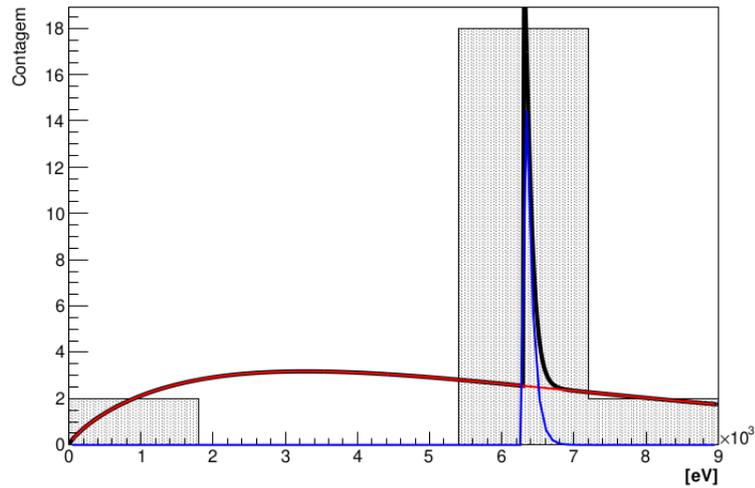


Figura A.3: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 1500 V$, com duas distribuições de Polya ajustadas (em vermelho e em azul) e um ajuste global (em preto) como combinação destas.

EXT. PARAMETER		VALUE	APPROXIMATE ERROR	STEP SIZE	FIRST DERIVATIVE
1	p0	1.37772e+01	4.69939e+01	6.43915e-04	9.45659e-05
2	p1	7.29776e+03	9.95205e+03	3.08517e-01	1.69169e-07
3	p2	8.15120e-01	1.87979e+00	3.74371e-07**	at limit **
4	p3	3.39814e+01	9.29038e+01	3.73628e-07	9.69332e-01
5	p4	9.44187e+01	6.61918e+03	4.76368e-07	-1.00722e-01
6	p5	2.66206e-01	1.04379e+00	1.00011e-05	-4.79682e-03
7	p6	6.29307e+03	1.44199e+02	7.25088e-08	-1.10601e+01

Figura A.4: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 1500 V$ (com dois ajustes).

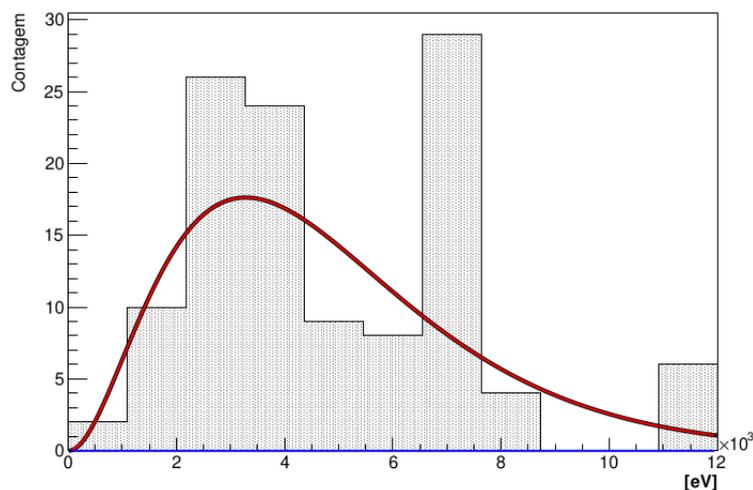


Figura A.5: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 2000 V$, com duas distribuições de Polya ajustadas (em vermelho e em azul) e um ajuste global (em preto) como combinação destas.

```

FCN=29.4379 FROM HESSE      STATUS=FAILED      9 CALLS      833 TOTAL
EDM=1.00182e-07    STRATEGY= 1  ERROR MATRIX UNCERTAINTY 100.0 per cent
EXT PARAMETER      APPROXIMATE      STEP      FIRST
NO.  NAME          VALUE          ERROR      SIZE      DERIVATIVE
 1  p0          3.15237e+02    3.34983e+01  9.01613e-02 -1.06641e-05
 2  p1          4.86755e+03    3.80246e+02  1.02228e+00 -1.35341e-06
 3  p2          2.06835e+00    8.97002e-02  7.48580e-07** at limit **
 4  p3          6.06846e+05    6.06832e+05 -0.00000e+00  0.00000e+00
 5  p4          5.00084e+06    7.46906e+06  1.93017e-02  0.00000e+00
 6  p5          4.00000e-02    1.41421e+00 -0.00000e+00  0.00000e+00
 7  p6          8.51245e+06    8.23982e+06 -3.24252e-03  0.00000e+00

```

Figura A.6: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 2000 V$ (com dois ajustes).

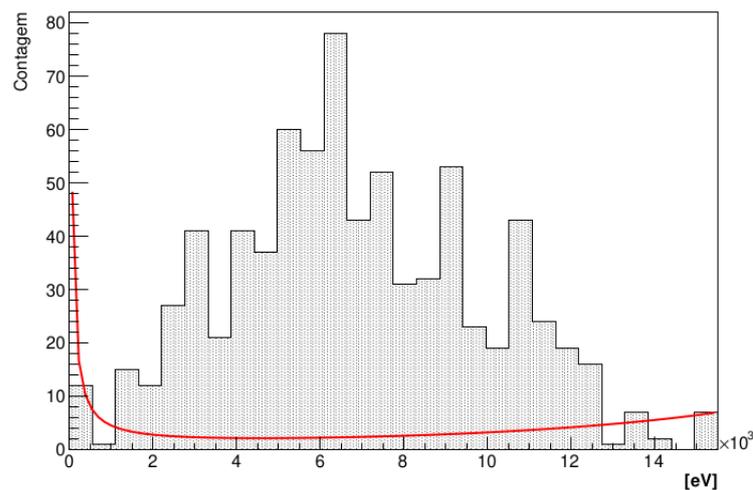


Figura A.7: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 2500 V$. Em vermelho está a curva da distribuição de Polya ajustada.

```
Warning in <Fit>: Abnormal termination of minimization.
FCN=670.224 FROM MIGRAD STATUS=CALL LIMIT 1346 CALLS 1347 TOTAL
EDM=0.000563384 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX UNCERTAINTY 10.1 per cent
EXT PARAMETER APPROXIMATE STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 p0 1.78960e+03 2.73396e+03 2.48212e+01 -1.30192e-04
2 p1 2.06042e+00 3.21344e+00 -2.14236e-02 3.13821e-01
3 p2 -1.00045e+00 7.10827e-04 5.25430e-06 1.88257e+03
```

Figura A.8: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 2500 V$.

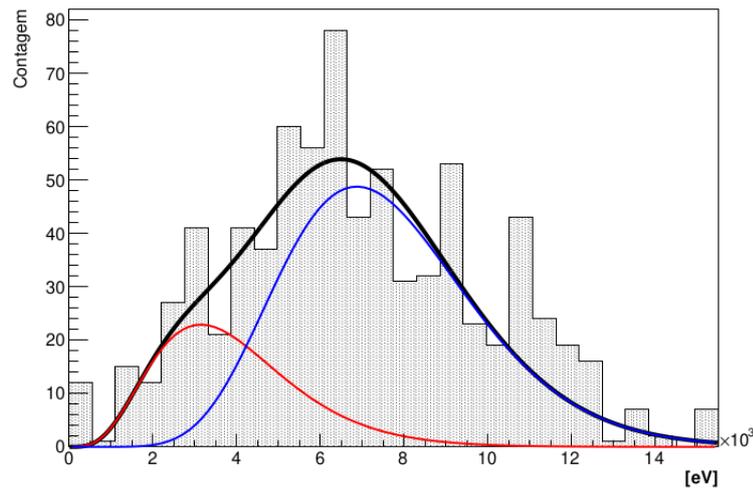


Figura A.9: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 2500 V$, com duas distribuições de Polya ajustadas (em vermelho e em azul) e um ajuste global (em preto) como combinação destas.

```
Warning in <Fit>: Abnormal termination of minimization.
FCN=112.511 FROM MIGRAD STATUS=CALL LIMIT 1972 CALLS 1973 TOTAL
EDM=0.284484 STRATEGY= 1 ERR MATRIX APPROXIMATE
EXT PARAMETER APPROXIMATE STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 p0 3.16589e+03 1.89074e+03 1.64126e+00 -2.69682e-04
2 p1 3.93039e+03 1.03937e+03 1.32509e+00 1.63427e-06
3 p2 4.03677e+00 6.86074e-01 7.48408e-07 2.90241e+01
4 p3 1.59385e+06 2.83203e+06 1.09210e-04 1.04016e+00
5 p4 7.60021e+03 4.13761e+02 2.14014e-06 8.62592e-01
6 p5 9.44527e+00 2.15510e+00 2.41666e-04 -1.69363e-02
7 p6 1.57616e-03 1.08768e+03 1.10389e-04** at limit **
```

Figura A.10: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 2500 V$ (com dois ajustes).

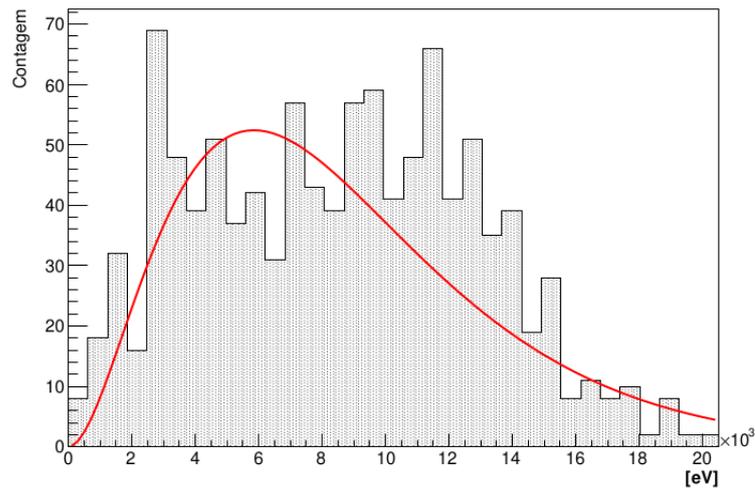


Figura A.11: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 3000 V$. Em vermelho está a curva da distribuição de Polya ajustada.

FCN=177.504 FROM MIGRAD		STATUS=CONVERGED		200 CALLS		201 TOTAL	
		EDM=1.21985e-06		STRATEGY= 1		ERROR MATRIX ACCURATE	
EXT NO.	PARAMETER NAME	VALUE	ERROR	STEP SIZE	FIRST DERIVATIVE		
1	p0	8.60397e+02	2.13021e+02	1.88107e-01	-2.98993e-05		
2	p1	8.79329e+03	1.79227e+02	1.02692e+00	4.09979e-06		
3	p2	1.98809e+00	2.14009e-01	1.87280e-04	2.59413e-02		

Figura A.12: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 3000 V$.

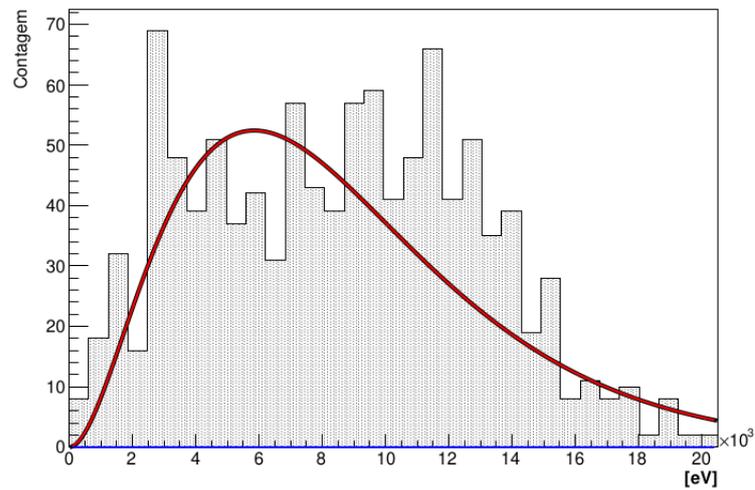


Figura A.13: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 3000 V$, com duas distribuições de Polya ajustadas (em vermelho e em azul) e um ajuste global (em preto) como combinação destas.

EXT PARAMETER		APPROXIMATE		STEP	FIRST
NO.	NAME	VALUE	ERROR	SIZE	DERIVATIVE
1	p0	8.60529e+02	2.88861e+01	1.87792e-01	-2.99774e-05
2	p1	8.79321e+03	1.57393e+02	1.02660e+00	-2.68420e-06
3	p2	1.98822e+00	2.86985e-02	7.48589e-07**	at limit **
4	p3	9.73586e+06	1.89070e+05	-0.00000e+00	0.00000e+00
5	p4	9.40955e+03	7.25760e+06	-0.00000e+00	0.00000e+00
6	p5	3.91046e+00	1.41421e+00	-0.00000e+00	0.00000e+00
7	p6	1.06460e+06	8.18411e+06	0.00000e+00	0.00000e+00

Figura A.14: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 3000 V$ (com dois ajustes).

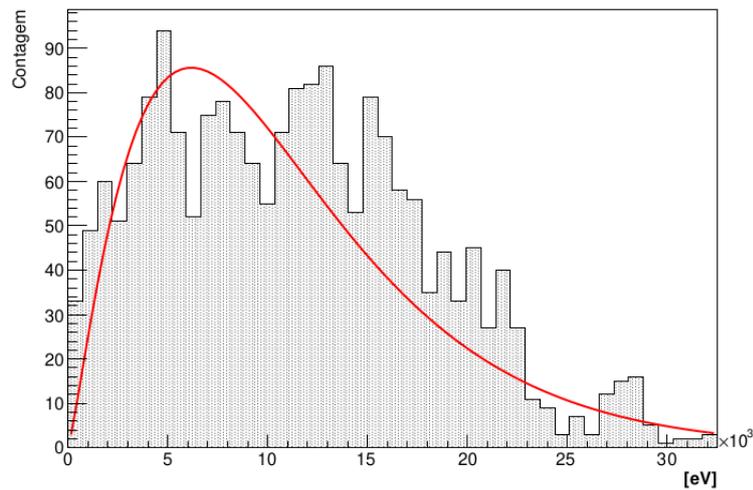


Figura A.15: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 4000 V$. Em vermelho está a curva da distribuição de Polya ajustada.

EXT PARAMETER		APPROXIMATE		STEP	FIRST
NO.	NAME	VALUE	ERROR	SIZE	DERIVATIVE
1	p0	6.32087e+02	8.88029e+01	1.20538e-01	-2.13567e-05
2	p1	1.10688e+04	1.82231e+02	1.16890e+00	1.90159e-06
3	p2	1.26237e+00	1.16368e-01	1.53684e-04	8.92150e-04

Figura A.16: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 4000 V$.

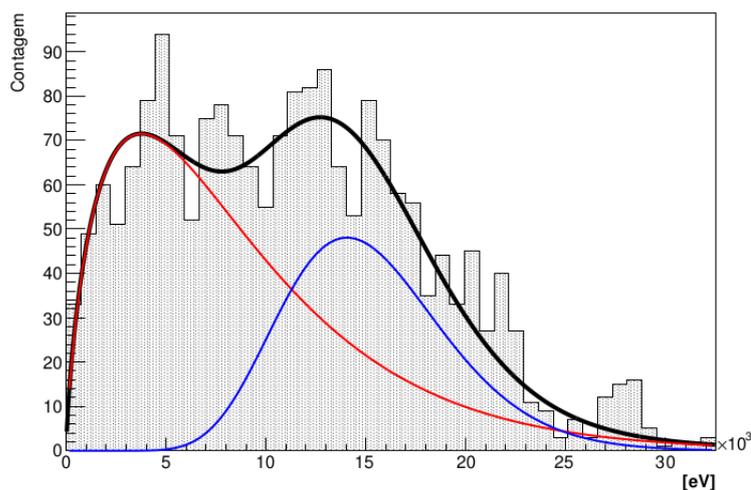


Figura A.17: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 4000 V$, com duas distribuições de Polya ajustadas (em vermelho e em azul) e um ajuste global (em preto) como combinação destas.

```
Warning in <Fit>: Abnormal termination of minimization.
FCN=107.715 FROM MIGRAD STATUS=CALL LIMIT 1957 CALLS 1958 TOTAL
EDM=0.0253356 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX UNCERTAINTY 6.1 per cent
EXT PARAMETER APPROXIMATE STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 p0 2.84855e+02 4.28617e+01 1.10245e-01 -1.14788e-02
2 p1 8.78324e+03 5.59378e+02 2.59957e+01 -6.51672e-04
3 p2 7.47263e-01 9.50317e-02 2.41928e-08** at limit **
4 p3 7.50019e+06 3.13580e+06 7.96211e-02 -2.62690e+00
5 p4 1.44774e+04 9.44630e+02 -3.23679e-06 -1.34297e+02
6 p5 1.10002e+01 5.14506e-01 5.27997e-02 4.29384e+00
7 p6 7.81987e+02 8.73779e+02 -3.82396e-07 -1.68033e+01
```

Figura A.18: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 4000 V$ (com dois ajustes).

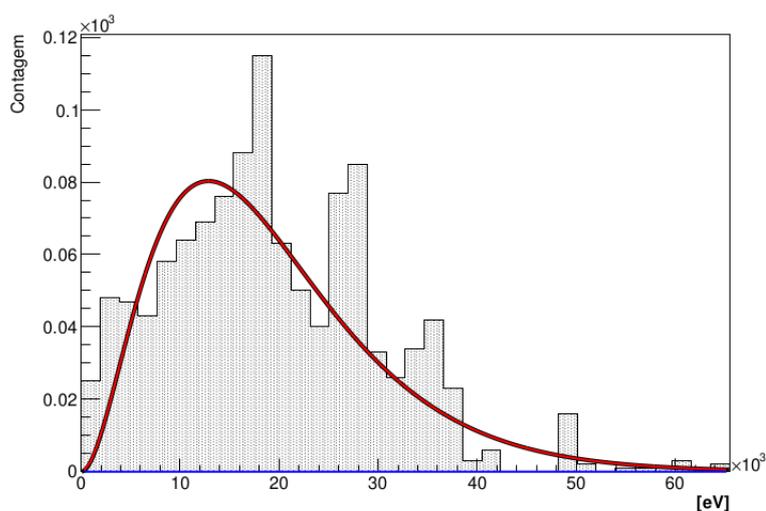


Figura A.19: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 5000 V$, com duas distribuições de Polya ajustadas (em vermelho e em azul) e um ajuste global (em preto) como combinação destas.

```

FCN=180.817 FROM MIGRAD STATUS=CONVERGED 397 CALLS 398 TOTAL
EDM=1.15188e-06 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX UNCERTAINTY 2.5 per cent
EXT PARAMETER
NO. NAME VALUE ERROR STEP FIRST
1 p0 1.36943e+03 3.72104e+02 0.00000e+00 -1.31178e-05
2 p1 1.92454e+04 3.67995e+02 -0.00000e+00 3.45693e-06
3 p2 2.02407e+00 2.35813e-01 0.00000e+00** at limit **
4 p3 9.23198e+04 5.73076e+04 -0.00000e+00 0.00000e+00
5 p4 3.17239e+06 1.69956e+06 -0.00000e+00 0.00000e+00
6 p5 1.43118e+02 4.39737e+01 0.00000e+00 0.00000e+00
7 p6 3.47125e+06 1.83525e+06 -0.00000e+00 0.00000e+00

```

Figura A.20: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 5000 V$ (com dois ajustes).

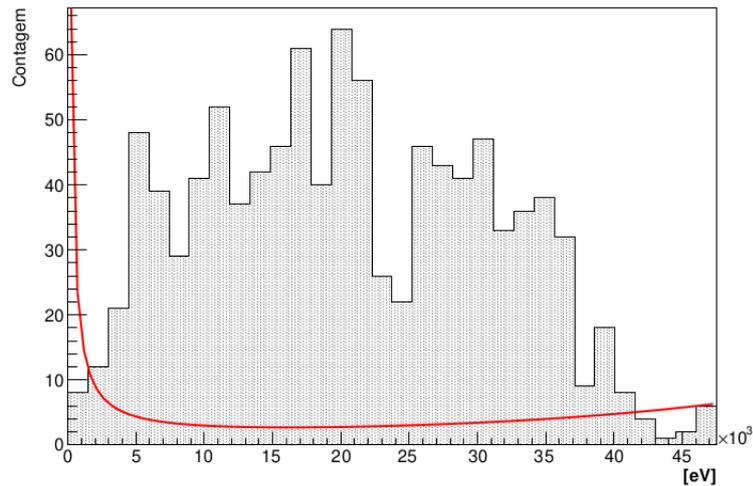


Figura A.21: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 6000 V$. Em vermelho está a curva da distribuição de Polya ajustada.

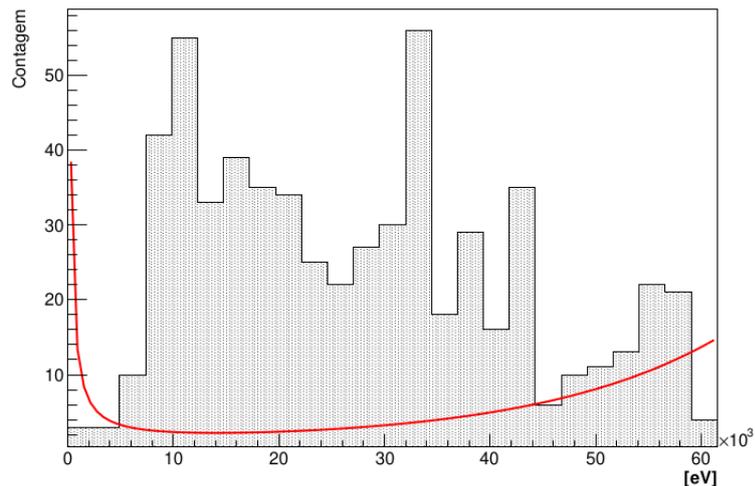


Figura A.22: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 7000 V$. Em vermelho está a curva da distribuição de Polya ajustada.

```

Warning in <Fit>: Abnormal termination of minimization.
FCN=464.199 FROM MIGRAD STATUS=CALL LIMIT 1347 CALLS 1348 TOTAL
EDM=0.00011474 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX UNCERTAINTY 1.8 per cent
EXT PARAMETER APPROXIMATE STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 p0 3.33637e+03 3.32845e+03 1.99271e+01 -2.70115e-04
2 p1 3.47054e+00 3.58992e+00 -2.05537e-02 3.92692e-01
3 p2 -1.00025e+00 2.54903e-04 1.48536e-06 8.96056e+03

```

Figura A.23: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 7000 V$.

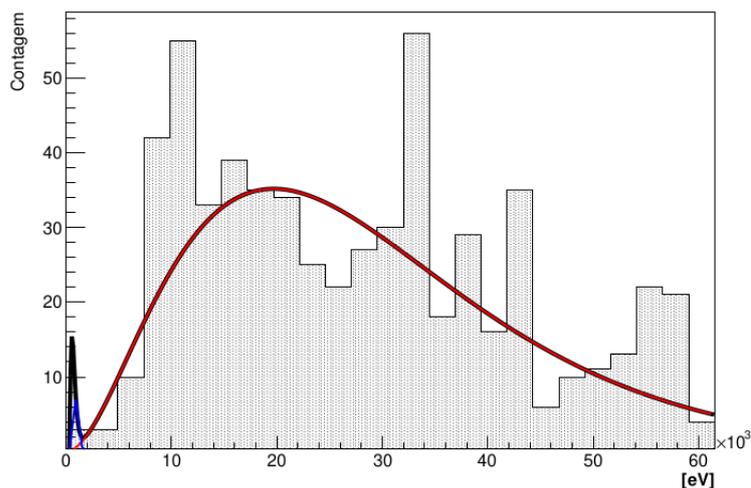


Figura A.24: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 7000 V$, com duas distribuições de Polya ajustadas (em vermelho e em azul) e um ajuste global (em preto) como combinação destas.

```

FCN=103.365 FROM MIGRAD STATUS=CONVERGED 1182 CALLS 1183 TOTAL
EDM=6.67533e-07 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX UNCERTAINTY 0.8 per cent
EXT PARAMETER APPROXIMATE STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 p0 5.81004e+02 1.40519e+02 1.19029e-02 4.03217e-07
2 p1 2.95557e+04 1.20847e+03 8.15870e-02 -1.85491e-07
3 p2 1.99417e+00 1.91636e-01 3.52209e-09** at limit **
4 p3 1.31638e+02 6.90252e+04 -8.30548e-05 2.24484e-01
5 p4 4.11756e+02 2.34032e+04 4.84454e-05 4.46927e-01
6 p5 1.39838e+00 4.06058e+00 2.02037e-03 1.04185e-03
7 p6 3.31878e+02 1.20472e+04 3.42617e-05 -1.94190e-01

```

Figura A.25: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 7000 V$ (com dois ajustes).

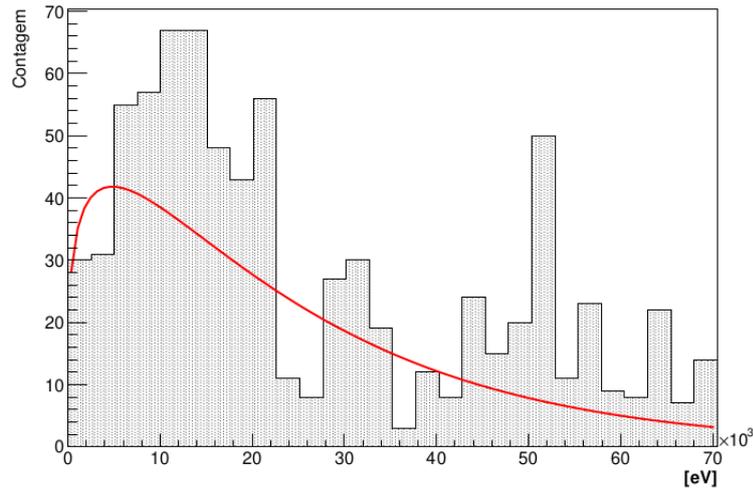


Figura A.26: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 8000 V$. Em vermelho está a curva da distribuição de Polya ajustada.

FCN=253.176 FROM MIGRAD		STATUS=CONVERGED		140 CALLS		141 TOTAL	
		EDM=6.47822e-08		STRATEGY= 1		ERROR MATRIX ACCURATE	
EXT NO.	PARAMETER NAME	VALUE	ERROR	STEP SIZE	FIRST DERIVATIVE		
1	p0	7.85036e+01	2.41891e+01	2.67912e-02	-6.24399e-06		
2	p1	2.50806e+04	3.62036e+03	8.10969e+00	-1.77891e-07		
3	p2	2.37527e-01	1.38949e-01	2.20916e-04	-4.54732e-03		

Figura A.27: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 8000 V$.

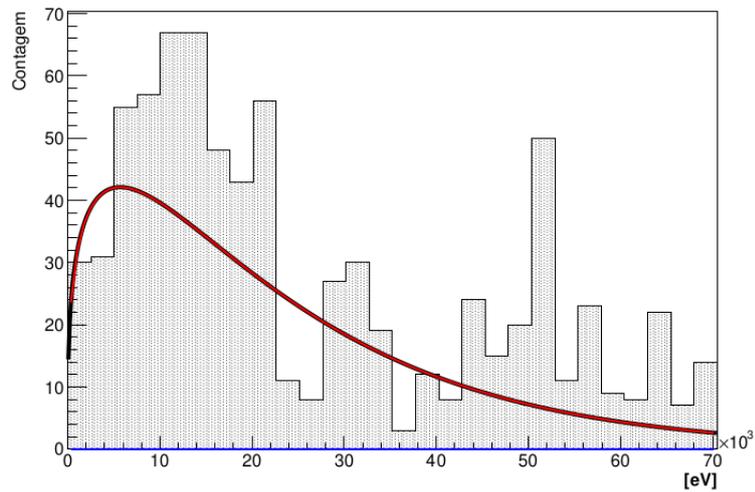


Figura A.28: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 8000 V$, com duas distribuições de Polya ajustadas (em vermelho e em azul) e um ajuste global (em preto) como combinação destas.

```
Warning in <Fit>: Abnormal termination of minimization.
FCN=253.543 FROM MIGRAD STATUS=FAILED 267 CALLS 268 TOTAL
EDM=5.50964e+305 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX UNCERTAINTY 32.5 per cent
EXT PARAMETER APPROXIMATE STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 p0 9.04687e+01 2.75541e+01 -0.00000e+00 -1.18584e-01
2 p1 2.37631e+04 2.86932e+03 0.00000e+00 -1.85416e-04
3 p2 3.14663e-01 6.14850e+06 -0.00000e+00** at limit **
4 p3 2.35862e+00 6.14720e+06 -0.00000e+00** at limit **
5 p4 1.06133e+01 6.14663e+06 -0.00000e+00 3.24647e-01
6 p5 2.91582e+00 1.00000e+00 0.00000e+00 -2.47396e+306
7 p6 7.32857e+02 7.85872e+06 -0.00000e+00 0.00000e+00
```

Figura A.29: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 8000 V$ (com dois ajustes).

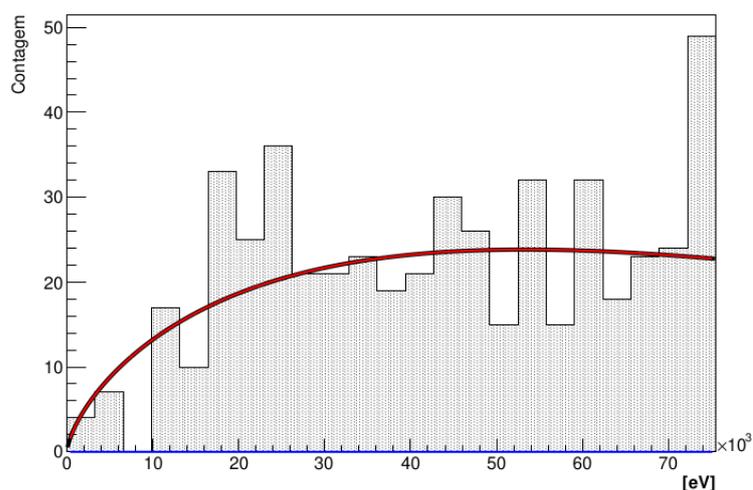


Figura A.30: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 9000 V$, com duas distribuições de Polya ajustadas (em vermelho e em azul) e um ajuste global (em preto) como combinação destas.

```
Warning in <Fit>: Abnormal termination of minimization.
FCN=52.8548 FROM MIGRAD STATUS=FAILED 686 CALLS 687 TOTAL
EDM=inf STRATEGY= 1 ERROR MATRIX UNCERTAINTY 100.0 per cent
EXT PARAMETER APPROXIMATE STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 p0 8.73567e+01 4.52719e+00 -nan -4.66692e-03
2 p1 1.31410e+05 3.52577e+04 -nan -2.86284e-07
3 p2 6.83384e-01 1.57116e+00 -nan** at limit **
4 p3 1.20000e+01 8.79570e+06 -nan 0.00000e+00
5 p4 1.06100e+01 8.79745e+06 -nan 3.23953e-01
6 p5 3.38475e+00 nan -nan -7.72585e+306
7 p6 5.85079e+02 9.53739e+06 -nan 0.00000e+00
```

Figura A.31: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 9000 V$ (com dois ajustes).

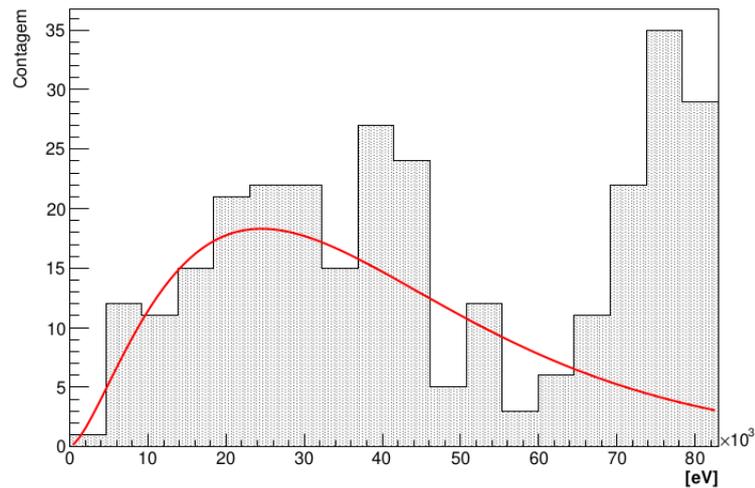


Figura A.32: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 10000 V$. Em vermelho está a curva da distribuição de Polya ajustada.

FCN=99.8127 FROM MIGRAD		STATUS=CONVERGED		848 CALLS	849 TOTAL
EDM=7.23917e-09		STRATEGY= 1		ERROR MATRIX ACCURATE	
EXT NO.	PARAMETER NAME	VALUE	ERROR	STEP SIZE	FIRST DERIVATIVE
1	p0	1.86845e+02	7.83091e+01	6.59610e-02	-6.96966e-06
2	p1	4.03396e+04	4.07348e+03	1.05013e+01	-1.35837e-08
3	p2	1.55103e+00	3.02680e-01	2.86954e-04	1.39808e-03

Figura A.33: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 10000 V$.

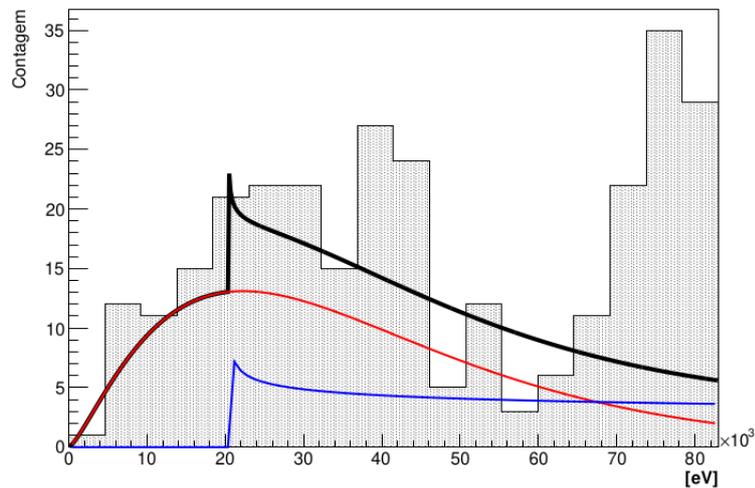


Figura A.34: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 10000 V$, com duas distribuições de Polya ajustadas (em vermelho e em azul) e um ajuste global (em preto) como combinação destas.

```

Warning in <Fit>: Abnormal termination of minimization.
FCN=94.1573 FROM MIGRAD STATUS=FAILED 1673 CALLS 1674 TOTAL
EDM=164.264 STRATEGY= 1 ERR MATRIX NOT POS-DEF
EXT PARAMETER APPROXIMATE STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 p0 1.05880e+02 7.08928e+01 5.10218e-02 1.09935e-04
2 p1 3.88197e+04 2.80425e+04 1.36149e+01 6.46787e-04
3 p2 1.34209e+00 5.59529e-01 7.48665e-07** at limit **
4 p3 1.67663e+00 3.03723e+00 7.48624e-07** at limit **
5 p4 9.99860e+06 9.89049e+06 7.20704e-02 -1.80047e-04
6 p5 -1.53150e-01 1.07890e-01 1.47389e-04 -4.46281e-02
7 p6 2.04105e+04 3.60966e+03 1.23158e-05 -2.29264e-01

```

Figura A.35: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 10000$ V (com dois ajustes).

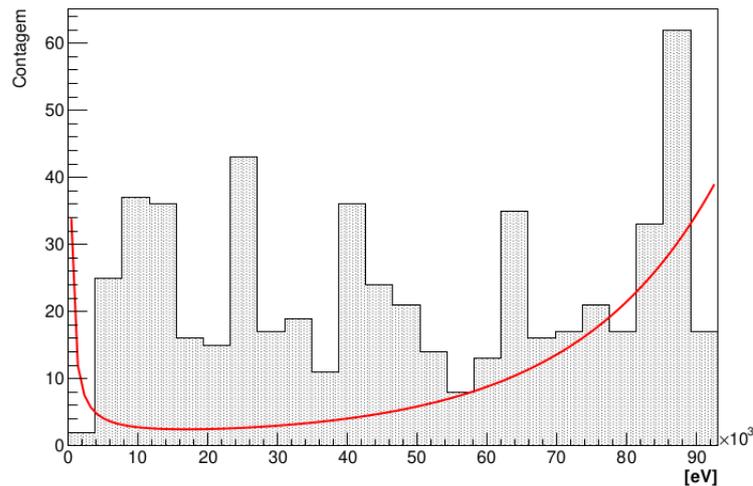


Figura A.36: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 11000$ V. Em vermelho está a curva da distribuição de Polya ajustada.

```

Warning in <Fit>: Abnormal termination of minimization.
FCN=314.228 FROM MIGRAD STATUS=CALL LIMIT 1345 CALLS 1346 TOTAL
EDM=0.00207608 STRATEGY= 1 ERR MATRIX NOT POS-DEF
EXT PARAMETER APPROXIMATE STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 p0 1.86077e+03 1.62955e+03 5.25183e+01 -6.68762e-04
2 p1 8.25172e+00 7.73271e+00 -2.58684e-01 2.64255e-01
3 p2 -1.00049e+00 4.54632e-04 1.50415e-05 6.84542e+03

```

Figura A.37: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 11000$ V.

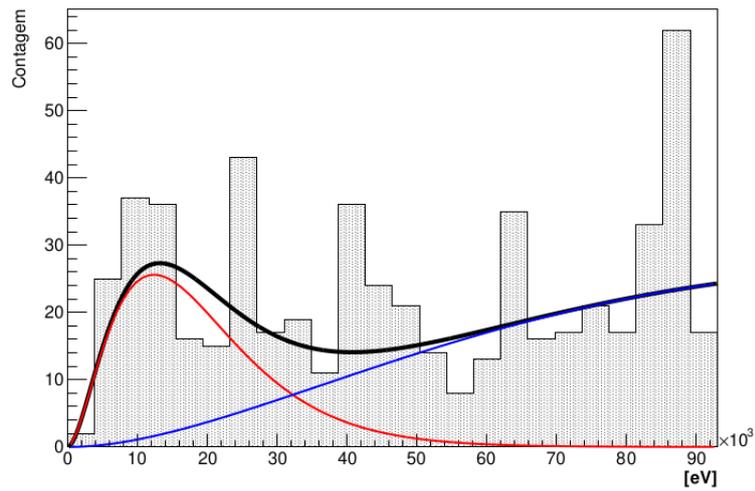


Figura A.38: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 11000 V$, com duas distribuições de Polya ajustadas (em vermelho e em azul) e um ajuste global (em preto) como combinação destas.

```
Warning in <Fit>: Abnormal termination of minimization.
FCN=104.88 FROM MIGRAD STATUS=CALL LIMIT 1950 CALLS 1951 TOTAL
EDM=0.157037 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX UNCERTAINTY 23.4 per cent
```

EXT NO.	PARAMETER NAME	VALUE	APPROXIMATE ERROR	STEP SIZE	FIRST DERIVATIVE
1	p0	3.58180e+02	1.35860e+02	4.20682e+01	-1.31078e-02
2	p1	1.90658e+04	4.44154e+03	-1.37752e+03	-6.31185e-05
3	p2	1.83905e+00	3.51680e-01	2.62510e-05**	at limit **
4	p3	3.99361e+02	2.12985e+02	-8.04185e-04	1.30005e+03
5	p4	1.99679e+05	1.29027e+05	2.24650e-02	4.86261e+01
6	p5	1.89574e+00	4.52702e-154	-4.13643e-305	-9.74787e+00
7	p6	3.98689e+02	6.90022e+03	7.34125e-03	1.06044e+00

Figura A.39: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 11000 V$ (com dois ajustes).

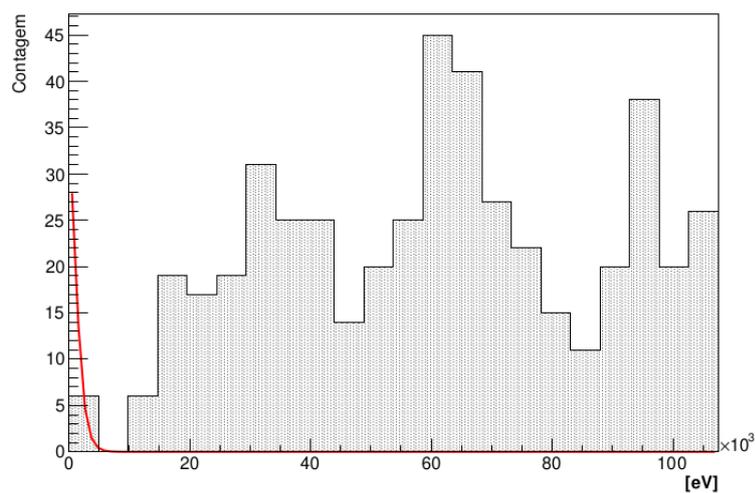


Figura A.40: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 12500 V$. Em vermelho está a curva da distribuição de Polya ajustada.

FCN=466 FROM HESSE		STATUS=NOT POSDEF		16 CALLS	80 TOTAL
EDM=1.02537e-05		STRATEGY= 1		ERR MATRIX NOT POS-DEF	
EXT	PARAMETER	APPROXIMATE	STEP	FIRST	
NO.	NAME	VALUE	ERROR	SIZE	DERIVATIVE
1	p0	8.65066e+01	5.23830e+02	7.43886e-02	6.26811e-06
2	p1	1.24588e+03	2.73176e+03	8.60855e-02	-4.16407e-07
3	p2	5.49413e-01	3.97503e+00	1.33356e-04	2.60499e-04

Figura A.41: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 12500 V$.

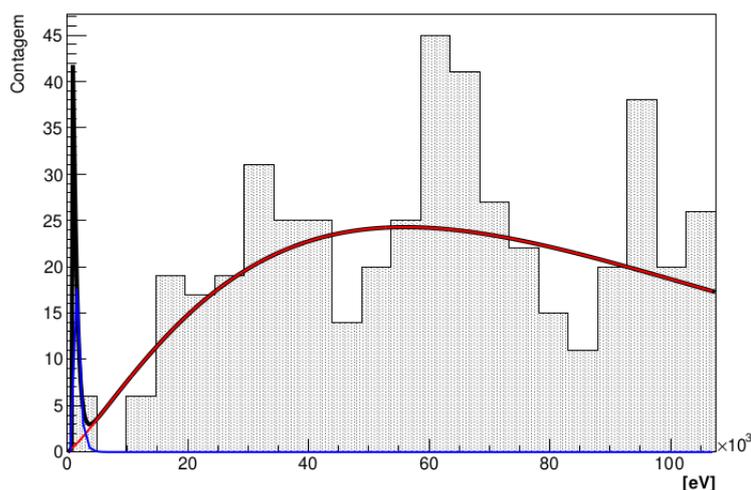


Figura A.42: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $k = 12500 V$, com duas distribuições de Polya ajustadas (em vermelho e em azul) e um ajuste global (em preto) como combinação destas.

FCN=57.7265 FROM HESSE		STATUS=NOT POSDEF		52 CALLS	570 TOTAL
EDM=5.86058e-07		STRATEGY= 1		ERR MATRIX NOT POS-DEF	
EXT	PARAMETER	APPROXIMATE	STEP	FIRST	
NO.	NAME	VALUE	ERROR	SIZE	DERIVATIVE
1	p0	1.82197e+02	5.75972e+01	6.74297e-03	-4.21476e-05
2	p1	9.98860e+04	1.42247e+04	3.58732e+00	1.65013e-08
3	p2	1.27702e+00	2.46849e-01	7.48673e-08**	at limit **
4	p3	8.00802e+01	1.07079e+03	1.15628e-06	-1.18430e-01
5	p4	6.72062e+02	1.53250e+03	1.17094e-06	1.16691e-01
6	p5	2.38555e-01	4.05837e+00	2.57892e-04	5.29753e-04
7	p6	7.61292e+02	5.70056e+03	5.51057e-07	-4.97415e-02

Figura A.43: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $k = 12500 V$ (com dois ajustes).

A.2 Espectros ajustados variando P

As Figuras A.44 a A.61 apresentam os espectros de calibração e as respectivas saídas do programa que realiza os ajustes da distribuição de Polya. Tais histogramas foram feitos com os dados das simulações em que a constante k do campo elétrico foi mantida no valor de $5000 V$, variando-se a pressão P do gás entre $2 torr$ e $9 torr$. Vale ressaltar que, como dito na Seção 4.3.2, é notável como o número de contagens diminui com o aumento da pressão do gás.

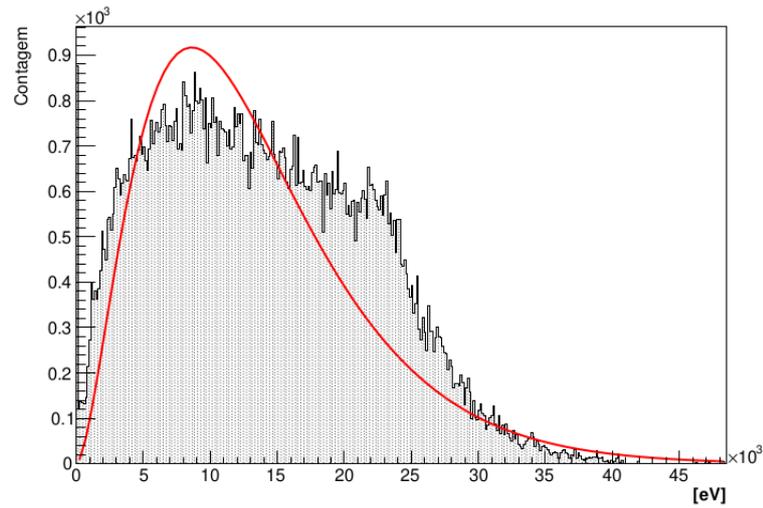


Figura A.44: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 2$ torr. Em vermelho está a curva da distribuição de Polya ajustada.

```

FCN=13729 FROM MIGRAD STATUS=CONVERGED 268 CALLS 269 TOTAL
EDM=1.71477e-08 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX ACCURATE
EXT PARAMETER
NO. NAME VALUE ERROR STEP FIRST
1 p0 1.20440e+04 2.03351e+02 2.03649e+00 -3.00452e-06
2 p1 1.34624e+04 2.58099e+01 1.05887e+00 -8.26189e-06
3 p2 1.78129e+00 1.49139e-02 1.39797e-04 4.23517e-02

```

Figura A.45: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $P = 2$ torr.

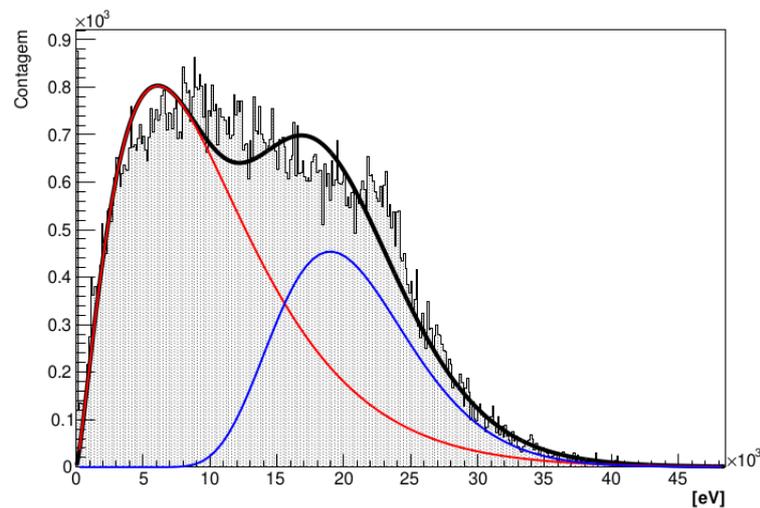


Figura A.46: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 2$ torr, com duas distribuições de Polya ajustadas (em vermelho e em azul) e um ajuste global (em preto) como combinação destas.

```

Warning in <Fit>: Abnormal termination of minimization.
FCN=3134.7 FROM MIGRAD STATUS=CALL LIMIT 1947 CALLS 1948 TOTAL
EDM=4.93687 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX UNCERTAINTY 3.2 per cent
EXT PARAMETER APPROXIMATE STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 p0 6.70584e+03 1.29310e+02 -7.98730e+01 2.06193e-02
2 p1 1.05405e+04 6.75137e+01 9.44229e+01 -9.63930e-02
3 p2 1.37109e+00 1.46654e-02 -3.85637e-06** at limit **
4 p3 3.25456e+06 1.92802e+05 7.23744e-02 -9.97783e+02
5 p4 1.58896e+04 1.34843e+02 -3.56089e-04 -6.08232e+04
6 p5 7.93598e+00 6.63497e-02 1.12499e-01 6.47823e+02
7 p6 4.87022e+03 1.59652e+02 5.75071e-04 -2.28285e+04

```

Figura A.47: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $P = 2$ torr (com dois ajustes).

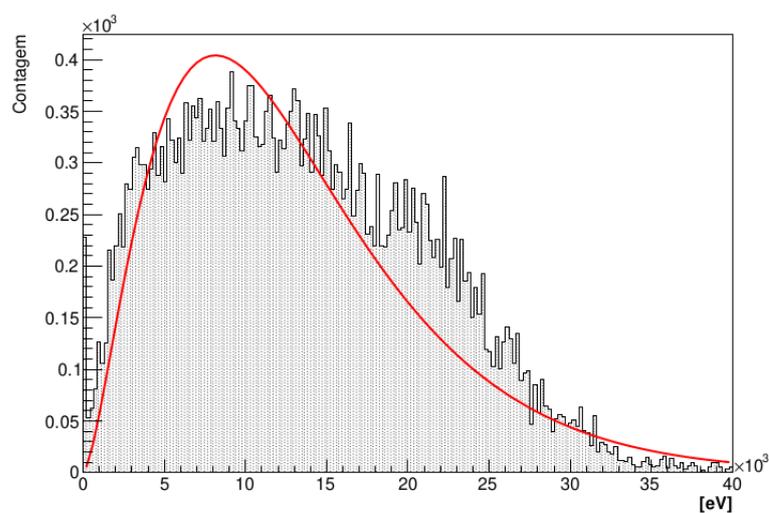


Figura A.48: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 3$ torr. Em vermelho está a curva da distribuição de Polya ajustada.

```

FCN=2964.24 FROM MIGRAD STATUS=CONVERGED 243 CALLS 244 TOTAL
EDM=1.36292e-09 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX ACCURATE
EXT PARAMETER APPROXIMATE STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 p0 4.39798e+03 1.37084e+02 6.58382e-01 -7.69220e-07
2 p1 1.32115e+04 4.67044e+01 1.00419e+00 -5.84355e-07
3 p2 1.60906e+00 2.66462e-02 1.23152e-04 6.01345e-03

```

Figura A.49: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $P = 3$ torr.

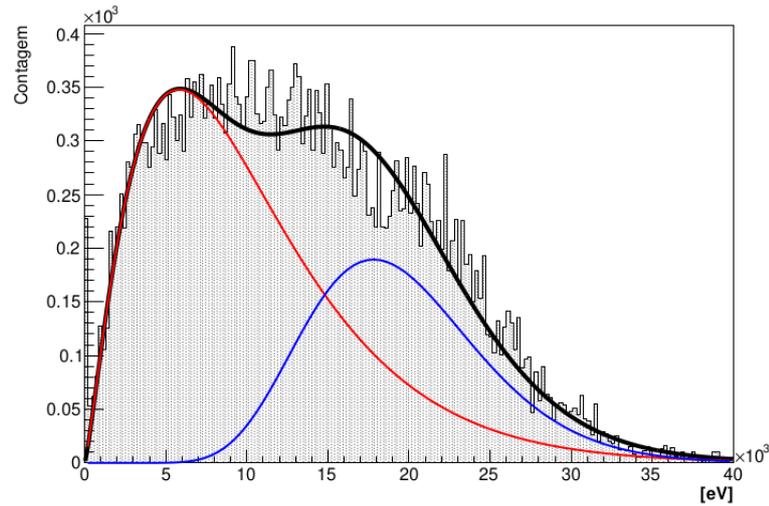


Figura A.50: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 3$ torr, com duas distribuições de Polya ajustadas (em vermelho e em azul) e um ajuste global (em preto) como combinação destas.

```
Warning in <Fit>: Abnormal termination of minimization.
FCN=976.488 FROM MIGRAD STATUS=CALL LIMIT 1956 CALLS 1957 TOTAL
EDM=0.000758109 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX UNCERTAINTY 6.4 per cent
```

EXT NO.	PARAMETER NAME	VALUE	APPROXIMATE ERROR	STEP SIZE	FIRST DERIVATIVE
1	p0	2.70201e+03	1.00294e+02	3.48449e-01	2.44738e-04
2	p1	1.02689e+04	1.65370e+02	4.04448e+00	-6.99786e-04
3	p2	1.30704e+00	2.85248e-02	-1.20204e-08**	at limit **
4	p3	7.26935e+06	2.51645e+06	1.93578e-02	-2.34393e+00
5	p4	1.78794e+04	1.07408e+02	6.43840e-06	-1.79312e+02
6	p5	9.60391e+00	3.91772e-01	1.28771e-02	3.62822e+00
7	p6	1.62501e+03	4.67432e+00	1.18175e-06	1.91390e+03

Figura A.51: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $P = 3$ torr (com dois ajustes).

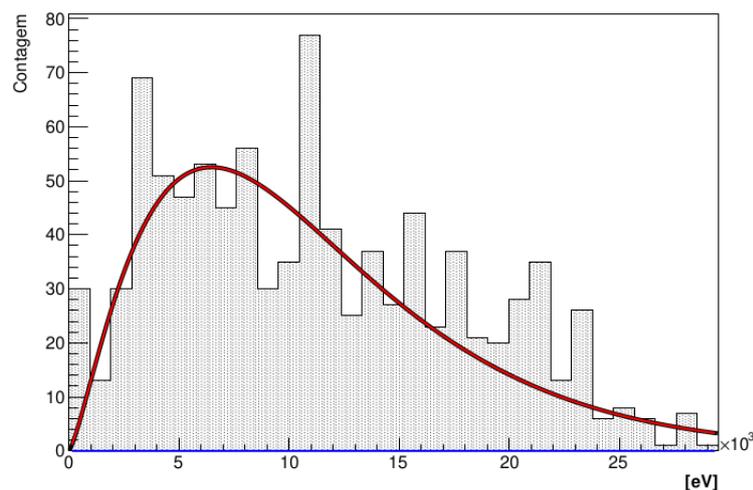


Figura A.52: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 5$ torr, com duas distribuições de Polya ajustadas (em vermelho e em azul) e um ajuste global (em preto) como combinação destas.

```

FCN=148.333 FROM MIGRAD STATUS=CONVERGED 336 CALLS 337 TOTAL
EDM=4.85687e-08 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX UNCERTAINTY 3.1 per cent
EXT PARAMETER STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 p0 4.38510e+02 7.13681e+01 2.80145e-01 -1.05715e-05
2 p1 1.12137e+04 2.74806e+02 -1.22143e+00 -1.09732e-06
3 p2 1.37146e+00 1.29912e-01 5.07416e-08** at limit **
4 p3 1.02816e+06 8.66122e+05 5.93156e-04 0.00000e+00
5 p4 4.97060e+05 2.26364e+05 -3.77731e-04 0.00000e+00
6 p5 1.41520e+02 3.47392e+01 1.17296e-01 0.00000e+00
7 p6 9.55021e+02 4.05303e+02 -8.68641e-06 0.00000e+00

```

Figura A.53: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $P = 5$ torr (com dois ajustes).

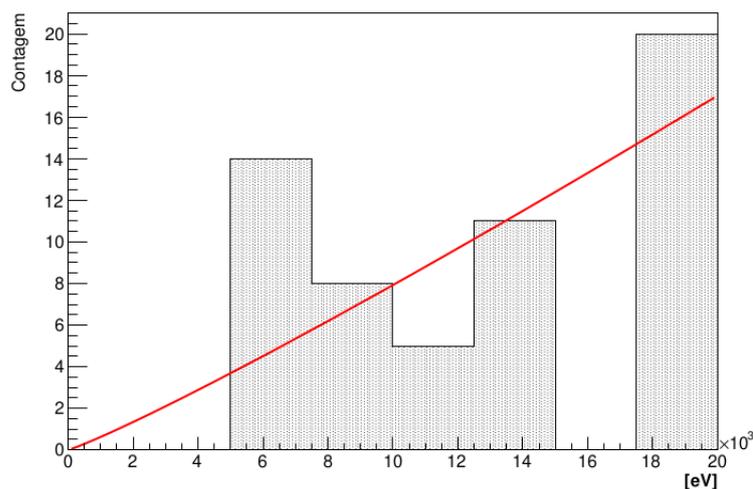


Figura A.54: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 6$ torr. Em vermelho está a curva da distribuição de Polya ajustada.

```

Warning in <Fit>: Abnormal termination of minimization.
FCN=10.427 FROM MIGRAD STATUS=CALL LIMIT 1354 CALLS 1355 TOTAL
EDM=0.000390755 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX UNCERTAINTY 26.5 per cent
EXT PARAMETER APPROXIMATE STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 p0 1.25461e+09 1.03236e+10 2.01065e+08 2.23042e-10
2 p1 2.67330e+11 2.19972e+12 4.28426e+10 -1.15563e-12
3 p2 1.10400e+00 5.88421e-02 -1.23425e-03 -3.81921e+00

```

Figura A.55: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $P = 6$ torr.

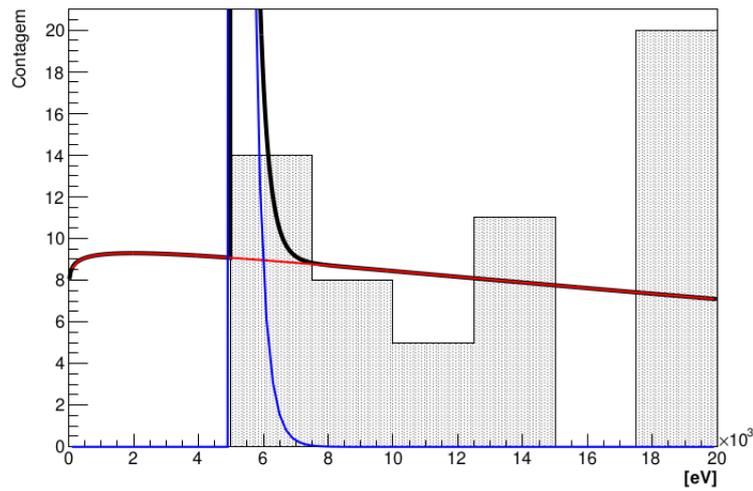


Figura A.56: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 6$ torr, com duas distribuições de Polya ajustadas (em vermelho e em azul) e um ajuste global (em preto) como combinação destas.

```
Warning in <Fit>: Abnormal termination of minimization.
FCN=11.3142 FROM MIGRAD STATUS=FAILED 892 CALLS 893 TOTAL
EDM=0.628395 STRATEGY= 1 ERR MATRIX NOT POS-DEF
```

EXT NO.	PARAMETER NAME	VALUE	APPROXIMATE ERROR	STEP SIZE	FIRST DERIVATIVE
1	p0	1.10141e+01	2.43933e+00	0.00000e+00	-3.12309e-01
2	p1	5.15992e+04	1.31647e+04	-0.00000e+00	-4.15379e-05
3	p2	3.98998e-02	6.17399e+06	-0.00000e+00**	at limit **
4	p3	1.14200e+03	6.21961e+06	-0.00000e+00	7.00035e+01
5	p4	7.42120e+01	6.16270e+06	0.00000e+00	-1.18068e+03
6	p5	-7.92704e-01	1.00000e+00	-0.00000e+00	1.05390e+01
7	p6	4.99393e+03	6.07842e+06	0.00000e+00	-5.72384e+02

Figura A.57: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $P = 6$ torr (com dois ajustes).

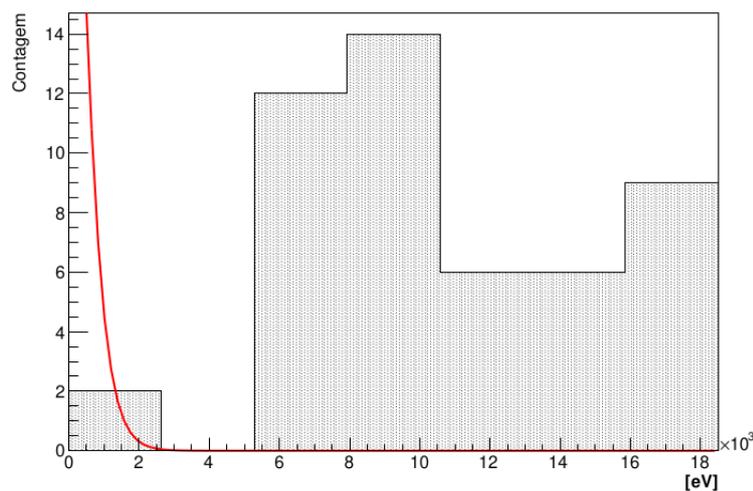


Figura A.58: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 9$ torr. Em vermelho está a curva da distribuição de Polya ajustada.

EXT		PARAMETER	VALUE	APPROXIMATE	STEP	ERR	MATRIX	NOT	POS-DEF
NO.	NAME			ERROR	SIZE	FIRST	DERIVATIVE		
1	p0	7.00964e+01	7.35793e+02	3.34900e-02	2.01046e-07				
2	p1	5.05933e+02	1.42610e+03	1.36559e-02	7.44045e-08				
3	p2	5.72015e-01	5.79297e+00	5.76762e-05	-1.67364e-05				

Figura A.59: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $P = 9$ torr.

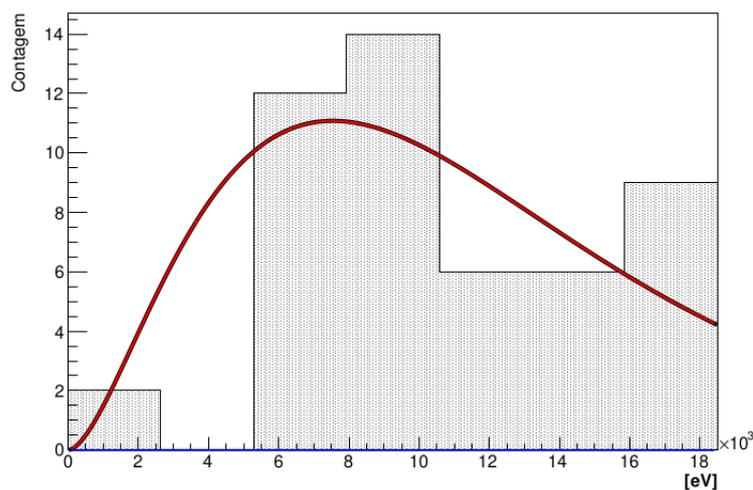


Figura A.60: Histograma de energias dos elétrons detectados no anodo para $P = 9$ torr, com duas distribuições de Polya ajustadas (em vermelho e em azul) e um ajuste global (em preto) como combinação destas.

EXT		PARAMETER	VALUE	APPROXIMATE	STEP	ERROR	MATRIX	UNCERTAINTY	100.0 per cent
NO.	NAME			ERROR	SIZE	FIRST	DERIVATIVE		
1	p0	1.39239e+02	2.08247e+01	2.33669e-02	-2.52620e-05				
2	p1	1.18672e+04	1.65486e+03	1.78976e+00	-6.22909e-07				
3	p2	1.74084e+00	1.28712e-01	7.48616e-07**	at limit **				
4	p3	5.66296e+05	5.65350e+05	-1.24750e-05	0.00000e+00				
5	p4	2.51653e+02	7.08526e+06	1.68012e-06	0.00000e+00				
6	p5	7.96566e-01	1.41421e+00	-3.38051e-04	0.00000e+00				
7	p6	2.85040e+05	7.81171e+06	1.77208e-04	0.00000e+00				

Figura A.61: Saída do programa que fornece os parâmetros e respectivas incertezas do ajuste do histograma para $P = 9$ torr (com dois ajustes).