



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE MATEMÁTICA, ESTATÍSTICA E COMPUTAÇÃO CIENTÍFICA  
DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA APLICADA



Paulo Toshio Kitayama

## **Análise de Dados do teste de ColdBox do experimento ProtoDUNE**

Campinas  
05/12/2022

Paulo Toshio Kitayama

## **Análise de Dados do teste de ColdBox do experimento ProtoDUNE\***

Monografia apresentada ao Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para obtenção de créditos na disciplina Projeto de Extensão Supervisionado, sob a orientação do(a) Prof. Ana Amélia Bergamini Machado.

---

\*Este trabalho foi financiado pela FAPESP, projeto 2021/09670-5.

## Resumo

Este projeto de IC se insere no contexto da física experimental de partículas, voltado principalmente na área de física de neutrinos e detetores. O objetivo deste projeto é o aprendizado e utilização do software (LArSOFT) de análise para os dados coletados do X-ARAPUCA.

## **Abstract**

This IC project is part of the context of experimental particle physics, mainly focused on the field of neutrino and detector physics. The objective of this project is to learn and use analysis software (LArSOFT) for data collected from X-ARAPUCA.

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Liquid Argon Time Projection Chamber</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>DUNE</b>	<b>9</b>
3.1	ProtoDUNE . . . . .	10
<b>4</b>	<b>ARAPUCA e X-ARAPUCA</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>Root</b>	<b>11</b>
<b>6</b>	<b>LARSOFT</b>	<b>12</b>

# 1 Introdução

O projeto desenvolvido foi voltado à análise de dados coletados pela colaboração DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) Abi et al. [2018b] Abi et al. [2018a], que está construindo o maior experimento de cintilação de argônio líquido Segreto [2015] Acciari et al. [2009] da história, com o objetivo de estudar a oscilação de neutrinos através de uma longa baseline visando descobrir propriedades como a hierarquia de massa e a violação da simetria carga-paridade. Para que esse experimento possa ser construído, há uma enorme organização colaborativa de diversos países que realiza diversos testes para garantir uma maior eficiência na obtenção dos dados e uma melhor qualidade desses dados. Para realizar diversos testes com antecedência, o ProtoDUNE Abi et al. [2017], um protótipo em tamanho menor do DUNE é feito, e entre os testes realizados nele, o trabalho realizado estuda o Cold Box Test. O projeto proposto, com o objetivo de realizar análise de dados voltada para a física de partículas, foi cumprido através da utilização dos dados do teste de Cold Box da X-ARAPUCA Segreto et al. [2018a] para verificar o contagem de Dark Count observada, assim permitindo a testagem da eficiência do sistema de fotodeteção.

Realizações do período O cronograma do projeto foi dividido em 4 etapas de forma a concluir a realização:

Atividades	1 Trimestre	2 Trimestre	3 Trimestre	4 Trimestre
1	■	■		
2			■	■
3				■
4				■

Figura 1:

Dessa forma, os primeiros seis meses do projeto foram voltados ao estudo aprofundado das ferramentas de software que são mais comumente utilizados para a análise de dados nos experimentos de física de partículas da área de neutrinos, em específico que utilizam a tecnologia de LArTPC (Câmara de Projeção Temporal de Argônio Líquido) Majumdar and Mavrokoridis [2021]. Entre estas ferramentas, o foco foi nas lin-

guagens C++ e Python, e nos softwares Root e LArSoft, que serão aprofundados na seção 4.

Após isso, houve o período focado à análise de dados simulados, feito especificamente com LArSoft. A terceira etapa consistiu na análise de dados reais. Os dados analisados foram advindos tanto de testes de filtros dicróicos quanto dos testes de Cold Box do ProtoDUNE.

Por fim, houve o período de participação em eventos científicos e redação do relatório final.

Experimentos de detecção de neutrinos Neutrinos são partículas elementares neutras classificadas como léptons, ou seja, só interagem fracamente com a matéria, possuem spin  $1/2$ , e possuem massa muito pequena em relação a outras partículas elementares, e possuem três sabores, neutrino tau, neutrino muônico e neutrino eletrônico. Eles apresentam uma área extremamente próspera para a física de partículas pois desde a descoberta do fenômeno de oscilação de sabor dos neutrinos, que implica que neutrinos possuem massa, diversos questionamentos físicos possuem possíveis respostas nas propriedades destas partículas. Por exemplo, ainda não se sabe o valor da massa de nenhum sabor de neutrino, e há a possibilidade de, dependendo da assimetria de carga-paridade encontrada em neutrinos, que eles sejam a explicação para a composição do universo por matéria e não anti-matéria. No entanto, as interações de neutrinos com a matéria são muito raras, o que torna a detecção destas partículas extremamente difícil. Por isso, colaborações internacionais de experimentos de neutrinos constantemente criam tecnologias que aumentam a probabilidade dessas interações de forma a obter os dados necessários. Uma dessas tecnologias, é a Câmara de Projeção Temporal de Argônio Líquido - LArTPC (Liquid Argon Time Projection Chamber), a principal tecnologia utilizada pelo DUNE, futuro experimento de detecção de neutrinos que será capaz de obter dados suficientes para um estudo aprofundado das propriedades desconhecidas dos neutrinos [Abi et al. [2021]].

## 2 Liquid Argon Time Projection Chamber

A Câmara de Projeção Temporal de Argônio Líquido (LArTPC) [Majumdar and Mavrokoridis [2021]] [Acciarri et al. [2017]] utiliza das cargas geradas por interações de

partículas com o Argônio Líquido para gerar imagens precisas da trajetória das partículas. Esse tipo de detector é ilustrado na imagem abaixo.

[Imagem]

Um LArTPC é constituído por três principais estruturas: um cátodo, uma Field Cage (Gaiola de Campo) e um APA (Anode Plane Assembly ou Montagem de Plano Anódico). Uma voltagem negativa é introduzida no cátodo, formando uma superfície equipotencial. Um campo uniforme é aplicado entre o cátodo e os Planos Anódicos por meio de uma série de anéis de campo conectados por uma série de divisores de tensão que começa no cátodo e termina no plano anódico.

O APA está voltado para o cátodo, e pode ser dividido em 3 planos paralelos de fios em direções diferentes, sendo dois planos de indução (chamados de plano "U" e plano "V"), a  $\pm 60^\circ$  em relação à vertical e um plano de coleção (chamado de plano "Y"), composto por fios orientados verticalmente. Os planos anódicos são a ferramenta utilizada para detectar a ionização criada por diferentes cargas atravessando o volume de Argônio Líquido na gaiola de campo.

O sistema de detecção de luz dos experimentos de Argônio Líquido dependem da emissão de luz de cintilação pelo Argônio. Esta emissão ocorre quando partículas incidentes no detector interagem com o Argônio na gaiola de campo com energia alta o suficiente para extrair um núcleon do núcleo do átomo. Caso o núcleon seja um próton, ele causará outras ionizações enquanto percorre a sua trajetória. Os elétrons gerados nesta ionização depositam energia enquanto seguem suas subseqüentes trajetórias. Esta energia depositada são os fótons de cintilação. Para que a luz de cintilação seja detectada, há a estrutura da X-ARAPUCA Segreto and Machado [2016]Segreto et al. [2018a] que absorve os fótons e gera fotoelétrons que formam o sinal eletrônico recebido. Há também a geração de fótons por radiação Cerenkov, caso alguma partícula esteja viajando a velocidade maior que a velocidade da luz no meio. Portanto, é claro que a detecção com eficiência dos fótons gerados, bem como a análise dos sinais e a reconstrução dos eventos que geraram esses fótons são muito importantes na realização do experimento Acciari et al. [2009].

Desta forma, o DUNE utiliza dos fenômenos de cintilação e ionização gerados por eventos que ocorrem quando o feixe de neutrinos incide em Argônio Líquido aliado à tecnologia de geração de imagens pela Câmara de Projeção Temporal de Argônio Líquido



e à detecção dos fótons de cintilação para reconstruir e determinar propriedades de neutrinos. A detecção de fótons permite a determinação do tempo absoluto do evento, e dessa forma, a localização espacial no interior do experimento.

### 3 DUNE

O DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) será o maior experimento de detecção de neutrinos e o maior experimento de argônio líquido da história, criado com o objetivo de responder questões em aberto sobre partículas elementares. Entre essas questões, está o entendimento da violação de simetria CP (Carga-Paridade) no setor leptônico, a busca por decaimentos de prótons em diversos modos de decaimento, a detecção de neutrinos de supernova e a determinação da hierarquia de massa dos sabores de neutrinos [Abi et al. [2018b], Abi et al. [2018a]].

Para isso, a estrutura física do DUNE consiste em um feixe de neutrinos controlado pelo PIP-II, que utiliza de um feixe primário de prótons de 80 GeV a uma potência de até 1.2 MW, para gerar neutrinos muônicos, que por sua vez oscilam de acordo com a distância percorrida, um detector próximo (Near Detector), localizado no Fermilab e um detector distante (Far Detector), localizado a 1.5km no subsolo, no Sanford Underground Research Facility. O detector distante possuirá 40 mil toneladas de Argônio Líquido.

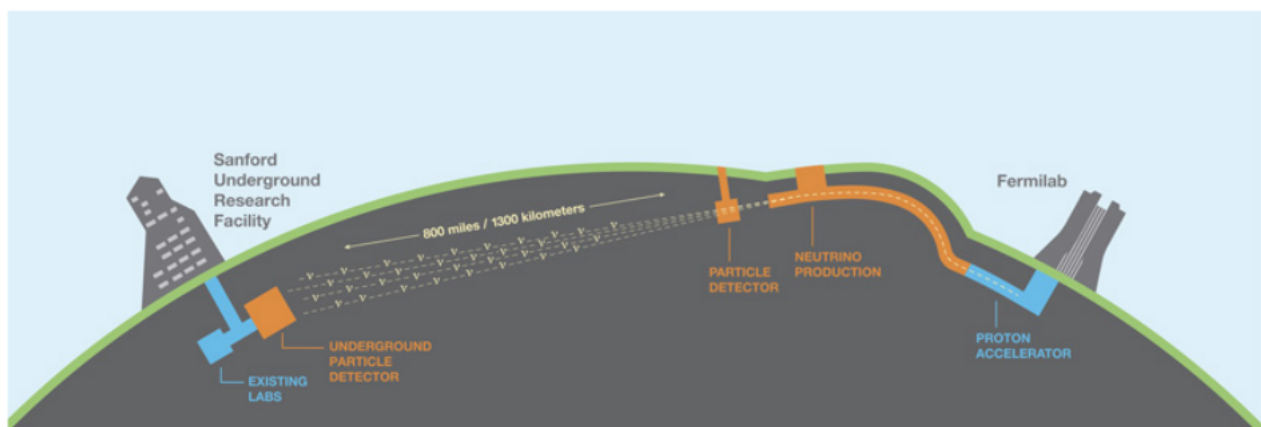


Figura 2: Visão esquemática do feixe do DUNE

### 3.1 ProtoDUNE

O ProtoDUNE é um protótipo do DUNE construído no CERN que visa auxiliar na construção do DUNE. O ProtoDUNE tem como objetivos prototipar os processos de produção e instalação para o design do detector, validar o design da perspectiva de performance do detector, acumular grandes quantidades de dados de feixes-teste para entender e calibrar a resposta do detector e demonstrar a estabilidade operacional a longo prazo do detector para diminuir riscos [Abi et al. [2017]Abud et al. [2022]Abi et al. [2020]].

O protoDUNE tem 4 toneladas de Argônio Líquido e todo o sistema de LArTPC que o DUNE terá, além do sistema de fotodeteção.

## 4 ARAPUCA e X-ARAPUCA

Para as necessidades e restrições do DUNE, os professores doutores Ettore Segreto e Ana Amélia Bergamini Machado idealizaram um novo tipo de detector de fótons, que utiliza de filtros dicróicos e deslocadores de comprimento de onda para absorver os fótons ultra-violetas e reemití-los no espectro visível, prendendo-os em uma estrutura com fotomultiplicadores de silício, chamada ARAPUCA [Segreto and Machado [2016]].

Uma ARAPUCA consiste de uma caixa com superfícies internas de alta refletividade e com uma das faces constituída por um filtro dicróico coberto por dois deslocadores de comprimento de onda diferentes, um de cada lado. O filtro externo converte os fótons de 127 nm produzidos pela cintilação do argônio líquido em fótons com comprimento de onda abaixo do corte abaixo do qual o filtro dicróico é transparente, enquanto o filtro interno altera o comprimento de onda para um acima do corte a partir do qual o filtro dicróico é refletivo. O resultado é que os fótons são presos na caixa e podem ser detectados pelos fotomultiplicadores com alta eficiência [Segreto [2015]Segreto et al. [2019]Segreto et al. [2018b]].

A X-ARAPUCA é uma junção de uma ARAPUCA e uma light guide. Em uma X-ARAPUCA o deslocador de comprimento de onda interno é substituído por uma placa que possui o deslocamento de comprimento de onda imbutido. Os foto-sensores são opticamente casados a um ou mais lados da placa [Segreto et al. [2018a]].

Uma informação importante sobre os fotomultiplicadores de Silício utiliza-

dos na ARAPUCA é que eles possuem uma contagem de fótons mesmo sem a presença de fótons, e ela é amplificada a altas temperaturas. O entendimento da frequência da ocorrência de eventos de Dark Count (Dark Count Rate) é uma medida importante para o entendimento da eficiência da ARAPUCA para o experimento Sun and Maricic [2016] Eckert and Schultz-Coulon.

Ferramentas de Software - Root e LArSoft A física experimental de partículas necessita de ferramentas computacionais que permitam realizar simulações e análises de quantidades enormes de dados, além de realizar processamento dos dados em tempo real. Para tal, foram desenvolvidos diversos softwares voltados especificamente para auxiliar na análise de dados e nas simulações de experimentos de física de partículas.

Entre esses, o Root é um dos mais amplamente utilizados. O Root é um framework de análise de dados que utiliza principalmente a linguagem C para realizar processos como visualização de dados, integração numérica e ajuste estatístico de dados.

Além disso, há uma grande gama de softwares voltados para experimentos individuais. No caso do DUNE, o LArSoft foi criado com o intuito de desenvolver ferramentas de análise de dados para experimentos de Argônio Líquido.

Ambos softwares foram estudados e utilizados durante o desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

## 5 Root

Root, o framework desenvolvido pelo CERN para analisar dados de física de partículas em enormes quantidades, foi utilizado desde o início deste projeto. O primeiro passo foi a instalação e o estudo dos comandos básicos que o Root consegue realizar. Para isso, o tutorial disponível em foi seguido.

Após finalizar a instalação e estudos, foi realizado o primeiro projeto em root - a obtenção do ângulo sólido de uma fonte de partículas alfa esférica em um detector retangular, estudo necessário para o entendimento da eficiência do detector baseado na equação de Tsoulfandis.

Para realizar tal estudo em root, foram utilizadas bibliotecas comuns do C++ (cmath, para funções matemáticas e fstream para controle de arquivos) e foram gerados

gráficos a partir das funções do Root.

Após isso, foram realizados alguns outros projetos em root, como a visualização comparada de dados de diferentes filtros dicróicos, com diferentes ângulos de incidência de luz. Este estudo teve como objetivo orientar a decisão do filtro dicróico mais eficiente para utilização na fabricação das X-ARAPUCA.

Por fim, a análise dos dados do Teste de Cold Box do ProtoDUNE 2 foi realizada parcialmente utilizando o root, visto que foram necessárias algumas ferramentas numéricas, como integração numérica e buscar picos, além de ajuste de múltiplas gaussianas. O processo de análise dos dados do teste de Cold Box do segundo run do ProtoDUNE será descrito na seção 5.

## 6 LARSOFT

Como mencionado, o LArSoft é um software criado pelo Fermilab com o objetivo de analisar dados e simular eventos relacionados especificamente a experimentos de física de partículas em Argônio Líquido que usam a tecnologia de LArTPC (Câmara de Projeção Temporal de Argônio Líquido). Em particular aqueles que são desenvolvidos pelo Fermilab, por compartilharem muitas semelhanças, aproveitam de simulações e análises realizadas por experimentos anteriores.

Em Setembro de 2022, foi realizado o UK-Latin America School in DUNE Physics and LArSoft, evento organizado por universidades do Reino Unido e pela organização do DUNE para a capacitação de alunos de graduação, mestrado e doutorado da América Latina em LArSoft. Neste evento, foram realizados tutoriais para usos específicos de LArSoft.

No início do curso, foi instruído o uso do sistema computacional do Fermilab e do CERN, que permite acesso a grandes quantidades de memória remotamente, assim apresentando capacidade de comportar simulações e análises de grandes quantidades de dados.

Em seguida, houveram tutoriais de simulação, que consiste em 6 passos, dos quais 5 foram estudados e performados durante a palestra. O primeiro passo é a geometria, ou seja, modelar aspectos físicos como a estrutura da câmara de projeção temporal e as

posições dos detectores ópticos e detectores auxiliares. O próximo passo é o gerador de eventos, ou seja a criação de fontes de partículas (que variam entre neutrinos de supernova, raios cósmicos, partículas especificadas como múons, etc.), passo este que pode estar discordante com a realidade, dado que nem todas as propriedades dos neutrinos são conhecidas.

O terceiro passo consiste na simulação da física dos detectores, que inclui interações das partículas geradas com os detectores (TPC ou detectores auxiliares), deposições de energia, elétrons de ionização e fótons de cintilação. O quarto passo é a simulação da leitura dos detectores, que transforma os eventos gerados em resposta digitalizada que estes gerariam do detector. Por fim, a resposta digitalizada é convolucionada com o formato de dados obtido pelo detector e acrescida do ruído eletrônico, gerando os dados mais similares possíveis aos do detector real. Para praticar as simulações, foram gerados 10 eventos com 1 múon e 1 próton com posições e momentos especificados.

Então, foi realizado um curso de técnicas de Deep Learning, no qual foi apresentado o conceito de redes neurais artificiais e, através de um tutorial de redes neurais convolucionais, foi explicado um modelo simplificado de como obter quais interações ocorreram durante os processos identificados no LArTPC.

O terceiro assunto estudado foi a reconstrução de eventos utilizando Pandora, um framework que utiliza diversos algoritmos para converter dados brutos (imagens dos diferentes planos anódicos) em quantidades analisáveis. Este processo consiste, a baixo nível, na remoção de ruídos e processamento de sinais, na transformação de imagens em colisões bidimensionais esparsas e, em alto nível, na combinação das imagens dos diferentes planos, identificação de partículas (tipo de neutrino, tipo de interação) e identificação da energia do neutrino.

Por fim, foram estudados analisadores, que permitem obter informações físicas das reconstruções realizadas, como o histograma do comprimento de caminhos que partículas percorreram antes de serem aniquiladas e gráficos de deposição de energia que permitem identificar as partículas.

Análise de Dados do Teste de Cold Box Para garantir a melhor performance possível do DUNE, a segunda execução do seu protótipo está em andamento: o Proto-DUNE Run 2. Esse experimento, apesar de não coletar os dados finais necessários para

os resultados físicos desejados do DUNE (como hierarquia de massas e violação de CP), será muito útil para a montagem e testes de aquisição de dados no DUNE.

O Teste de Cold Box, mencionado anteriormente, é um teste realizado no ProtoDUNE a partir da inserção em uma caixa com Nitrogênio Líquido dos equipamentos eletrônicos que serão utilizados no ProtoDUNE, de forma a testar o quanto as baixas temperaturas afetam na eletrônica. Entre estes testes, o sistema de fotodeteção deve ser testado para a obtenção do Dark Count Rate. Com este objetivo, foi feita uma análise dos dados obtidos no teste de cold box por um procedimento dividido em algumas etapas: Carregamento dos dados, Filtragem dos dados, Obtenção do histograma de cargas, Obtenção do Dark Count Rate.

A primeira etapa é o carregamento dos dados, que foram dados no formato .csv e na seguinte formatação:

1	CPgReferenceCurveAttributes:SourceType:Source:
2	Resolution:2e-09:
3	RecordLength:2500:
4	HWRecordLength:2500:
5	TriggerOffset:0:
6	RescaleCenterTime:-6.1e-07:
7	DecimationMode:Sample:
8	TraceArithmetics:Off:
9	TraceType:Normal:
10	BaseUnit:V:
11	BaseUnitRelative:Off:
12	Impedance:50:
13	XStart:-2.26e-06:
14	XStop:2.74e-06:
15	SignalRecordLength:2500:
16	HardwareXStart:-2.26e-06:
17	HardwareXStop:2.74e-06:
18	SignalHardwareRecordLength:2500:
19	AdjustedResolutionBW:0:
20	NoiseBandwidth:0:
21	InterleavedTraceCount:1:
22	ValueType:Completely finite and defined:
23	NotQuantisationLevels:64768:
24	DecimationFactor:10:
25	TQA Done:Off:
26	ISO_TRG:336:
27	SC_POST:-147506464:
28	SC_TRG:-147506955:

Figura 3: Informações sobre os dados

1	-0.24853158606875
2	0.01144417
3	0.01143259
4	0.011415606
5	0.011387815
6	0.011347672
7	0.011297492
8	0.011239594
9	0.011171659
10	0.011087513
11	0.010991015
12	0.010883708
13	0.010767911
14	0.010635128
15	0.010493855
16	0.010353354
17	0.010220572
18	0.010095511
19	0.0099804848
20	0.0098754941
21	0.0097797681
22	0.0096902177
23	0.0095991232
24	0.0095026251
25	0.0093999505
26	0.0092965048
27	0.0091938302
28	0.0090965601

Figura 4: Dados

O carregamento dos dados utilizou o a função `pandas.read_csv()` da biblioteca pandas, como mostrado abaixo.

É importante notar que as formas de onda obtidas a partir desses dados possuem, em cerca de 1500 (de 2500 totais por forma de onda) contagens, o pico gerado pelo trigger do osciloscópio, portanto o foco da análise foi nos dados anteriores a este, que nos permitem verificar a frequência de Dark Count.

A segunda etapa foi a de filtragem dos dados. O objetivo desta etapa é reduzir os ruídos do sinal detectado, de forma a trabalhar somente com os dados relevantes.

```

file = "readout3_ch1.Wfn.csv"
print( 'Reading file: ', file, "\n")

dataFile = pd.read_csv(file, sep = ',', header= None)
dataFile.columns = ["data"]

print(dataFile.head())
print(dataFile.tail(), "\n")

#####

#Set up
print("Acquisition information \n")
n_sample = 500 #ns
record_length = 2500
events = int(len(dataFile)/record_length)

```

Figura 5: Carregamento dos Dados

Esta filtragem foi feita pelo método de média móvel. A média móvel é um método de filtragem que busca estabilizar os dados aproximando o valor em um ponto da média dos pontos próximos a ele. Além disso, conforme os dados são carregados, é possível calcular a baseline (a linha 0 de potencial do sinal recebido).

```

# baseline analyses
def func_baseline(x):
    x = np.array(x)
    count = 0
    while count < 10:
        base = np.sqrt(np.mean(x**2))
        var = 2* np.std(x)
        y = []
        for i in range(len(x)):
            if abs(x[i] - base) <= var:
                y.append(x[i])
        x = np.array(y)
        count += 1
    return base

# creating a moving average function
def moving_average(a,n):
    ret = np.cumsum(a, dtype=float)
    ret[n:] = ret[n:] - ret[:-n]
    d=a[0:n-1]
    a=np.concatenate((d, ret[n-1:]/n), axis=None)
    return a

```

Figura 6: Média Móvel

A terceira etapa consiste na integração dos dados para a obtenção do histograma de carga. Isso se baseia no princípio que a integração do sinal recebido pelo SiPM é proporcional à carga total de fotoelétrons recebidos. A partir disso, podemos realizar o processo de obtenção dos picos. Os picos obtidos a partir da função *scipy.signal.find\_peaks* são comparados de forma a achar o um pico que realmente represente um Dark Count.

```

while n_events <= events:
    signal = []
    signal_baseline = []

    for j in range(i+i2+time_a, i+i2+time_b):
        signal.append(dataFile["data"][j])

    for j in range(i+1, i+2500):
        signal_baseline.append(dataFile["data"][j])

    baseline = func_baseline(signal_baseline)

    i2 += 1
    i += record_length
    n = record_length

    signal_1stfilter = moving_average(signal,100)
    real = np.isreal(signal_1stfilter)
    signal_1stfilter = signal_1stfilter[real]

    peaks, _ = find_peaks(signal_1stfilter, height = baseline+0.003)

```

Figura 7: Aplicação do Filtro de Média Móvel aos dados

Por fim, a quarta etapa é a obtenção do Dark Count Rate. Como os dados estudados não tinham fonte externa de luz, assumimos que todos os sinais encontrados eram Dark Count. Desta forma, o Dark Count Rate pode ser obtido dividindo o número de eventos nos quais houve um sinal detectado pelo findpeaks pelo número total de eventos e dividindo pela duração total da detecção do sinal. Esta análise também permite obter a carga de um fotoelétron..

Resultados e Discussão Os resultados obtidos a partir da análise realizada foram, em resumo, os gráficos feitos em root da refletividade dos filtros dicróicos por comprimento de onda em diferentes angulações e os resultados do Dark Count Rate do teste de Cold Box.

Estes resultados podem ser vistos abaixo:

A partir dos gráficos, é possível concluir que o melhor filtro a ser usado é o OP200 450, visto que a luz de cintilação do Argônio Líquido está na faixa de comprimento de onda de 128 nm Segreto and Machado [2016], e queremos refletividade baixa para este comprimento de onda, mas alta para o comprimento de onda após a passagem pelo deslocador de comprimento de onda. Além disso, o filtro se mostrou mais eficiente em diferentes ângulos de incidência, provando que ele é mais benéfico para utilização no experimento final.

Além disso, a obtenção do Dark Count Rate é extremamente útil pois é uma



```

peaks, _ = find_peaks(signal_1stfilter, height = baseline+0.003)
# looking for the real peak of the event
if len(peaks) >= 1:
    p = 0
    position = 0
    for j in range(len(peaks)):
        if signal_1stfilter[peaks[j]] > p:
            p = signal_1stfilter[peaks[j]]
            position = peaks[j]
    if position < 600:
        charge = 0
        k = 0
        while k < len(signal_1stfilter):
            charge = charge + (signal_1stfilter[k]-baseline)*n_sample
            k+=1
        charge_list.append(float(charge))
        signal_all_filtered.append(signal)

```

Figura 8: Integral do Sinal e Encontro dos picos

medida da frequência mínima com a qual luz de cintilação deve ser liberada no experimento final (ou seja, indicador da potência do feixe de neutrinos incidente). Isso nos mostra que a baixas temperaturas o Dark Count Rate não é suficiente para atrapalhar a aquisição de dados do experimento, mostrando que a X-ARAPUCA é um sistema de fotodeteção eficiente nos aspectos estudados.

Agradecimentos Agradeço aos meus orientadores Professora Doutora Ana Amélia Machado e Professor Doutor Ettore Segreto que compartilharam conhecimento e guiaram durante a execução do projeto, além de me introduzirem no laboratório de Léptons à carreira em física de partículas. Agradeço também aos pós-graduandos Renan de Aguiar, Patrícia Duarte de Almeida e Gabriel Botogoske, que me auxiliaram com a obtenção dos dados mencionados e com as ferramentas matemáticas e computacionais utilizadas para a análise. Além disso, agradeço à minha família e colegas de graduação que foram necessários para a minha trajetória. Por fim, agradeço à FAPESP por financiar este projeto que proporcionou diversos aprendizados e uma experiência acadêmica.

Participação em eventos científicos Durante a duração do projeto, houve a participação em 2 principais eventos: A escola UK-Latin America School in DUNE Physics and LArSoft, realizada na Universidade de Lancaster, financiada pelo governo britânico, que teve como objetivo formar alunos de graduação, mestrado e doutorado da América Latina no software mais utilizado para os experimentos de Argônio Líquido do Fermilab,

```

popt,ier=leastsq( lambda params:
                  gauss(X, params[0], params[1], params[2]) -y,
                  np.r_[ ( 0.5, mean(charge_list), stdev(charge_list)),
                        ]
                )

mu = popt[1]
sigma = popt[2]

axs = np.arange(X[0], X[len(X)-1], 1)
f = gauss(axs,popt[0], popt[1], popt[2])
ax.plot(axs,f,color='red',lw=1,label='Fit')

count = 0
for i in range(len(charge_list)):
    if charge_list[i] >= mu-sigma or charge_list[i] <= mu+sigma:
        count += 1

textstr = '\n'.join((
    r'\mu=%.2f$' % (mu, ),
    r'\sigma=%.2f$' % (sigma, ),
    r'D.C. Rate [Hz]= %.2f' % (1/(count/events *(time_b-time_a)*n_sample*10**(-9)))
))

props = dict(boxstyle='round', facecolor='blue', alpha=0.4)
ax.text(0.05, 0.95, textstr, transform=ax.transAxes, fontsize=12,
        verticalalignment='top', bbox=props)

plt.xlabel('Charge [V x ns]')
plt.ylabel('Events (AU)')

```

Figura 9: Cálculo do Dark Count Rate

e o DUNE Collaboration Meeting de Setembro de 2022, evento voltado para pesquisadores do DUNE visando apresentar atualizações e discutir próximos passos em todas as diferentes áreas do experimento.

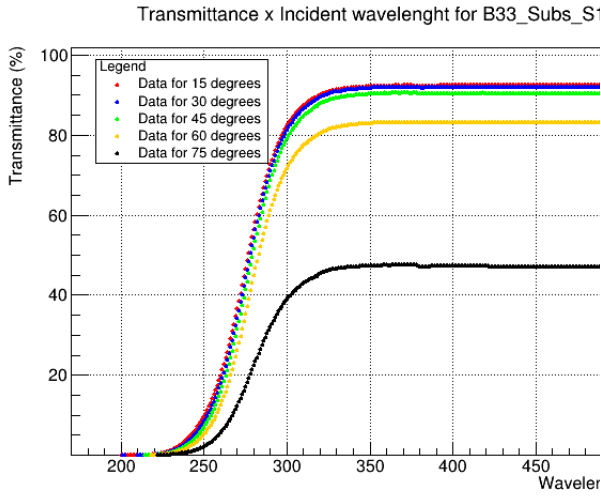


Figura 10:

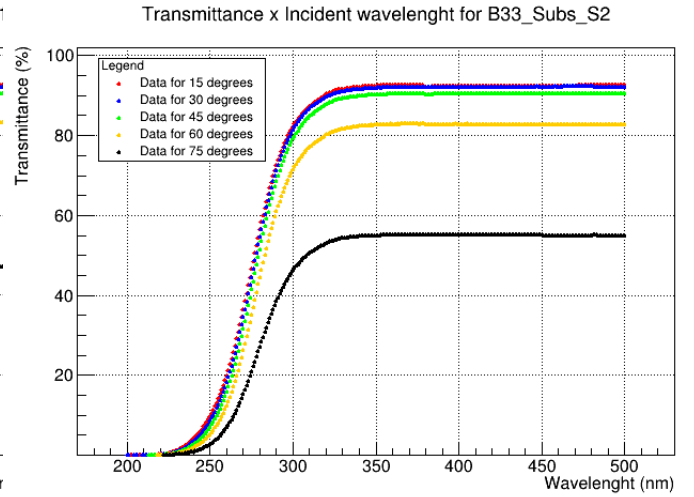


Figura 11:

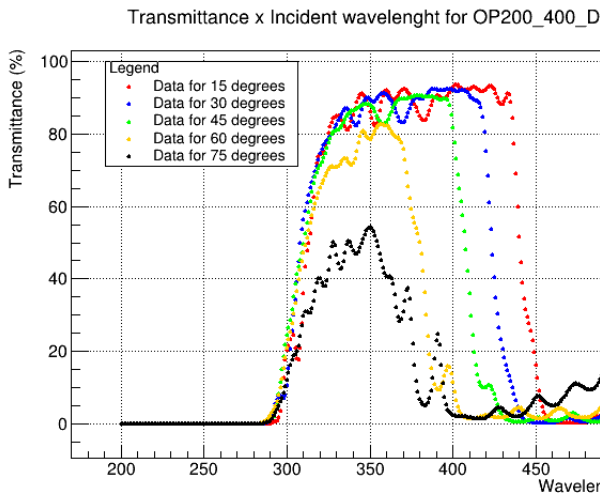


Figura 12:

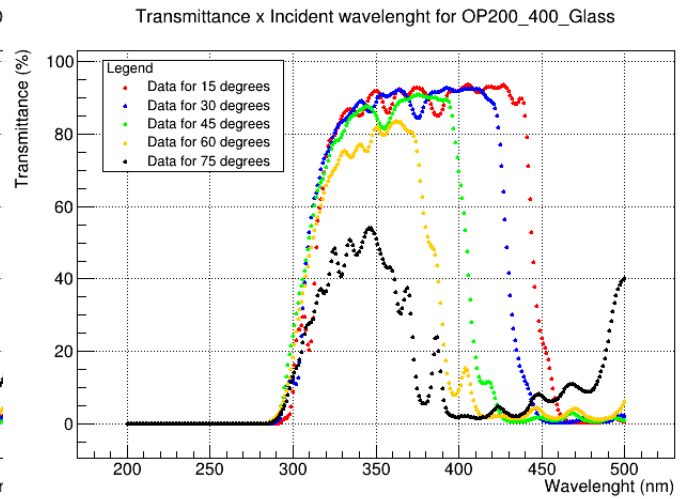


Figura 13:

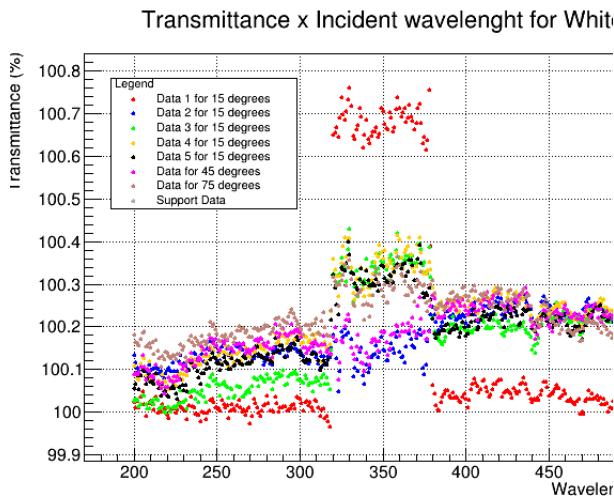


Figura 14:

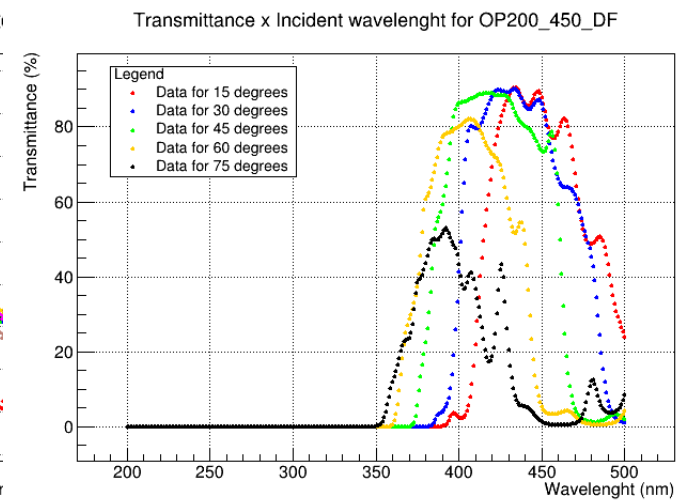


Figura 15:

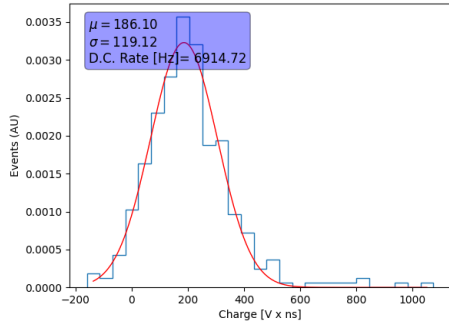


Figura 16:

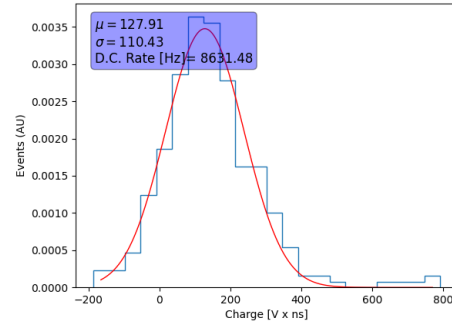


Figura 17:

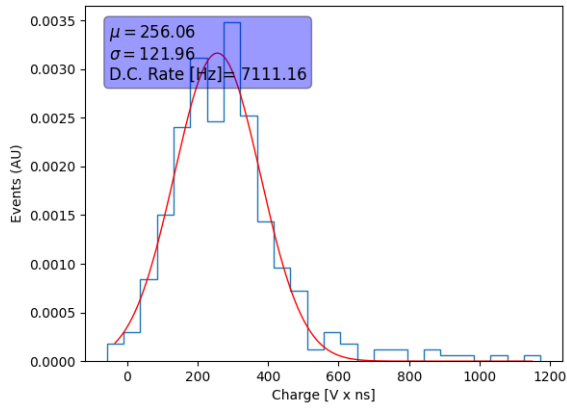


Figura 18:

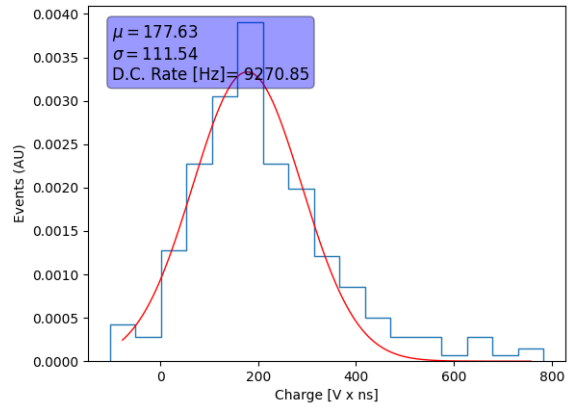


Figura 19:

## Referências

- B Abi, R Acciarri, M A Acero, and M Adamowski. The Single-Phase ProtoDUNE Technical Design Report. 2017. doi: 1706.07081.
- B Abi, R Acciarri, M A Acero, and M Adamowski. The DUNE Far Detector Interim Design Report, Volume 3: Dual-Phase Module. 2018a. doi: 1807.10340.
- B Abi, R Acciarri, M A Acero, and M Adamowski. The DUNE Far Detector Interim Design Report Volume 1: Physics, Technology and Strategies. 2018b. doi: 1807.10334.
- B Abi, A Abed Abud, and R Acciarri. First results on ProtoDUNE-SP liquid argon time projection chamber performance from a beam test at the CERN Neutrino Platform. *Journal of Instrumentation*, 15, 2020. doi: 10.1088/1748-0221/15/12/P12004.
- B Abi, R Acciari, M Antonello, and B Baibussinov. Prospects for Beyond the Standard Model Physics Searches at the Deep Underground Neutrino Experiment. *The European Physical Journal C volume*, 81, 2021. doi: 10.1140/epjc/s10052-021-09007-w.
- A Abed Abud, B Abi, R Acciarri, C Adams, and R An. Design, construction and operation of the ProtoDUNE-SP Liquid Argon TPC. *Journal of Instrumentation*, 17, 2022. doi: 110.1088/1748-0221/17/01/P01005.
- R Acciari, M Antonello, and B Baibussinov. Effects of Nitrogen and Oxygen contamination in liquid Argon. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, 197(1), 2009. doi: 10.1016/j.nuclphysbps.2009.10.037.
- R Acciarri, C Adams, and R An. Design and construction of the MicroBooNE detector. *Journal of Instrumentation*, 12, 2017. doi: 10.1088/1748-0221/12/02/P02017.
- Patrick Eckert and Hans-Christian Schultz-Coulon. Characterisation studies of silicon photomultipliers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, pages 217–226. doi: 10.1016/j.nima.2010.03.169.

- Krishanu Majumdar and Konstantinos Mavrokoridis. Review of Liquid Argon Detector Technologies in the Neutrino Sector. *Applied Sciences*, 6, 2021. doi: 10.3390/app11062455.
- Ettore Segreto. Evidence of delayed light emission of tetraphenyl-butadiene excited by liquid-argon scintillation light. *Physical Review*, 91, 2015. doi: 10.1103/PhysRevC.91.035503.
- Ettore Segreto and Ana Machado. Arapuca a new device for liquid argon scintillation light detection. *Journal of Instrumentation*, 11, 2016. doi: 10.1088/1748-0221/11/02/C02004.
- Ettore Segreto, Ana Machado, Dom Warner, Andreson Fauth, B Gelli, R. Máximo, A. Pissolatti, L. Paulucci, and F. Marinho. The X-ARAPUCA: An improvement of the ARAPUCA device. *Journal of Instrumentation*, 13, 2018a. doi: 10.1088/1748-0221/13/04/C04026.
- Ettore Segreto, Ana Amelia Machado, and Laura Paulucci. Liquid argon test of the ARAPUCA device. *Journal of Instrumentation*, 13, 2018b. doi: 10.1088/1748-0221/13/08/P08021.
- Ettore Segreto, Ana Amelia Machado, A Fauth, R R Ramos, G de SOuza, H V de Souza, V L Pimental, M C Queiroga Bazetto, and M A Ayala-Torres. First liquid argon test of the X-ARAPUCA. *Journal of Instrumentation*, 15, 2019. doi: 10.1088/1748-0221/15/05/C05045.
- Y Sun and J Maricic. SiPMs characterization and selection for the DUNE far detector photon detection system. *Journal of Instrumentation*, 11, 2016. doi: 10.1088/1748-0221/11/01/C01078.