



Universidade Federal de Juiz de Fora
Faculdade de Engenharia
Bacharelado em Engenharia Elétrica

Amaro da Silva Lopes Júnior

ESTUDO E APRIMORAMENTO DA FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO BASEADA
EM GEANT4 DO EXPERIMENTO NEUTRINOS ANGRA

Trabalho de Conclusão de Curso

Juiz de Fora
2019

Amaro da Silva Lopes Júnior

ESTUDO E APRIMORAMENTO DA FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO BASEADA
EM GEANT4 DO EXPERIMENTO NEUTRINOS ANGRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao programa de Bacharelado em Engenharia
Elétrica - Habilitação em Sistemas Eletrôni-
cos da Universidade Federal de Juiz de Fora,
como requisito parcial para obtenção do tí-
tulo de Bacharel em Engenharia Elétrica -
Habilitação em Sistemas Eletrônicos.

Orientadores: Prof. Rafael Antunes Nóbrega, D.Sc.
David de Melo Souza, M.Sc.

Juiz de Fora
2019

Costa, Rafael Mascarenhas

ESTUDO E APRIMORAMENTO DA FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO BASEADA EM GEANT4 DO EXPERIMENTO NEUTRINOS ANGRA/ Amaro da Silva Lopes Júnior. - 2018.

107 f. : il.

Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal de Juiz de Fora, 2018

1. Estimação de Densidade. 2. Discretização. 3. Estimação Não Paramétrica I. Título.

CDU 621.3.0

Amaro da Silva Lopes Júnior

ESTUDO E APRIMORAMENTO DA FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO BASEADA
EM GEANT4 DO EXPERIMENTO NEUTRINOS ANGRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao programa de Bacharelado em Engenharia
Elétrica - Habilitação em Sistemas Eletrônicos
da Universidade Federal de Juiz de Fora,
como requisito parcial para obtenção do tí-
tulo de Bacharel em Engenharia Elétrica -
Habilitação em Sistemas Eletrônicos.

Aprovada em 13 de Dezembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Rafael Antunes Nóbrega, D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF
Orientador

David de Melo Souza, M.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF
Coorientador

Terceiro examinador aleatório, D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF

Quarto examinador aleatório, M.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF

Aos meus pais, familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Obrigado Mariana por existir

RESUMO

Ultimamente, com o surgimento de grandes experimentos geradores de dados, há uma demanda crescente para otimizar os algoritmos responsáveis por interpretar esse volume de informações, de modo que ele use o mínimo de dados possível para realizar a operação desejada. Este trabalho permeia esse contexto, propondo alternativas em uma das escolhas mais elementares em algoritmos de estimação/classificação: a discretização de uma determinada variável. Este artigo propõe avaliar as características de diferentes métodos de discretização aplicados à estimação da função de densidade de probabilidade considerando o trade-off entre desempenho e simplicidade, bem como a suscetibilidade a outliers. Além disso, este trabalho analisa as vantagens e desvantagens de cada método e indica possíveis formas de ampliar o conhecimento sobre o assunto abordado.

Palavras-chave: Estimação de Densidade, Discretização, Estimação Não Paramétrica.

ABSTRACT

Lately, with the emergence of large data-generating experiments, there is a growing demand to optimize the algorithms responsible for interpreting this volume of information so that it uses as little data as possible to perform the desired operation. This work permeates this context, proposing alternatives in one of the most elementary choices in estimation/classification algorithms: discretization of a given variable. This paper proposes to evaluate the characteristics of different discretization methods applied to probability density function estimation considering the trade-off between performance and simplicity, as well as susceptibility to outliers. In addition, this work analyzes the advantages and disadvantages of each method and indicates possible ways to extend the knowledge about the addressed subject.

Keywords: Density Estimation, Discretization, Non-parametric Estimation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Detector posicionado ao lado do reator nuclear da usina Angra 2	17
Figura 2	Vista explodida do detector	18
Figura 3	Sinal com e sem pedestal	22
Figura 4	Sinal de uma PMT saturada versus sua estimativa de pico	23
Figura 5	Distribuição de picos com problema causado pela estimativa	24
Figura 6	Distribuição de picos após a resolução do problema de estimativa	24
Figura 7	Distribuição de picos após a resolução do problema do <i>fit</i>	25
Figura 8	Logo do Geant4	26
Figura 9	Detector visto pelo Geant4	27
Figura 10	Raios cósmicos gerados	28
Figura 11	Comparação dos dados reais por simulados	29
Figura 12	Comparação dos dados reais por simulados após a transformação de CDF	30
Figura 13	Qualidade da água 86% pior que a original	31

Figura 14 Qualidade da água 86% pior que a original 31

Figura 15 Radiação de Cherenkov: uma onda de choque eletromagnética formada pela passagem de partículas acima da velocidade da luz no meio 35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Modelos de física utilizados	27
Tabela 2	Eventos antes e depois de corrigir o bug do vácuo	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PMTs Tubos fotomultiplicadores (do inglês, *Photomultiplier tubes*)

p.e. Fotoelétrons

SiPMs fotomultiplicadores à base de silício (do inglês, *Silicon photomultipliers*)

PWR Reator de água pressurizada (do inglês, *pressurized water reactor*)

NDAQ *Neutrino Data Aquisition System*

Geant4 *GEometry ANd Tracking*

CERN Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear (em francês: *Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire*)

CDF Função distribuição acumulada (do inglês, *cumulative distribution function*)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Motivação	15
1.2 Desenvolvimento	16
1.3 Mapa dos capítulos	16
2 Experimento ν-Angra	17
2.1 Reator nuclear da usina Angra 2	18
2.2 O detector ν -Angra	18
2.2.1 Sistemas de <i>VETO</i>	19
2.2.2 Detector alvo	19
2.2.3 Tubos Fotomultiplicadores	19
2.3 Eletrônicas de <i>front-end</i> e aquisição	20
3 Dados Reais	21
3.1 Metodologia de análise dos dados do experimento	21
3.2 Debug dos dados reais	23
3.3 Dados da aquisição	25
4 Simulação	26
4.1 Geant4	26
4.1.1 Construção do detector e parâmetros do experimento	27
4.2 Geração das partículas	28
4.3 Simulação inicial	29
4.4 Correção de bugs	29

4.4.1	Correção das PMTs	29
4.4.2	Calibração da simulação	30
4.4.2.1	Transformação de CDF	30
4.4.2.2	Qualidade da água	30
5	Resultados	32
6	Conclusão	33
6.1	Próximos Passos	33
Referências		34
Apêndice A – A radiação de Cherenkov		35
Apêndice B – Qui-quadrado		36

1 INTRODUÇÃO

A salvaguarda de material nuclear

O experimento Neutrinos-Angra (ν -Angra) foi criado com o intuito de medir a atividade de reatores nucleares através de um detector de neutrinos do tipo Cherenkov pela relação entre potência térmica dissipada e taxa de eventos de neutrinos registrados pelo detector. Um dos principais objetivos do experimento é inferir a quantidade de combustível nuclear utilizado no processo de geração de energia de maneira indireta, não invasiva e totalmente independente do sistema de controle e monitoramento do reator. Ferramentas deste tipo são de interesse direto de organizações internacionais, como a IAEA e a ONU, pois podem contribuir experimentalmente em pautas relacionadas à salvaguarda de material nuclear e desarmamento nuclear. (Carr, Rachel, et al. "Neutrino physics for Korean diplomacy." Science 362.6415 (2018): 649-650)

O detector proposto pela colaboração ν -Angra se baseia em um detector de superfície e, por esta razão, espera-se um ruído de fundo muito grande gerado por partículas cósmicas. Devido à este ruído, simulações da interação do detector com partículas cósmicas são importantes para melhorar a análise do sistema de diferenciação entre um evento de antineutrinos (ν^-) advindo do consumo de material nuclear, e um evento de raios cósmicos, como múons (μ^-).

O escopo deste trabalho é calibrar os parâmetros da simulação aos de uma aquisição de dados reais possibilitando um trufo para eventos futuros.

1.1 MOTIVAÇÃO

Para o experimento ν -Angra, calibrar a simulação até que vá ao encontro dos dados reais é de essencial importância pois, com uma simulação que concorda com os dados aquisitados, pode-se ajustar o sistema real com maior eficiência, além de realizar análises e prever eventos como o espectro do elétron de Michel e de um evento de antineutrino sem a interferência da saturação da eletrônica e a complexidade da resposta do detector a um evento.

1.2 DESENVOLVIMENTO

Este trabalho tem o foco em estudar e aprimorar a simulação do experimento ν -Angra realizada no *Geant4*, levando em consideração a saturação dos Tubos fotomultiplicadores (do inglês, *Photomultiplier tubes*) (PMTs), da eletrônica de *front-end* e da eletrônica de aquisição, e a qualidade da água do detector tendo em vista a aquisição de dados ocorrida no período de maio a julho de 2017.

1.3 MAPA DOS CAPÍTULOS

Dada a apresentação do tema neste capítulo, o capítulo 2 apresenta o experimento ν -Angra, dissertando sobre a motivação do experimento, o reator nuclear da usina Angra 2, especificações de montagem do detector e a eletrônica de aquisição e *front-end*. O capítulo 3 apresenta uma análise dos dados de raios cósmicos aquisitados pelo detector enquanto posicionado ao lado do reator nuclear. O capítulo 4 apresenta a plataforma *Geant4* e os parâmetros utilizados pela simulação do experimento. O capítulo 5 mostra os resultados obtidos com a simulação e compara com os dados do experimento de fato. Por fim, o capítulo 6 conclui o trabalho e mostra previsões futuras para o ajuste da simulação do experimento ν -Angra.

2 EXPERIMENTO ν -ANGRA

O experimento ν -Angra tem como objetivo a criação de um detector de superfície capaz de detectar antineutrinos advindos da queima de combustível nuclear através da relação entre potência térmica dissipada e a taxa de eventos de antineutrinos registrados pelo detector, assim podendo ter conhecimento da potência de fato sendo dissipada pelo reator durante um período de tempo.

O detector utiliza da radiação de Cherenkov (apêndice A) na água para fazer a contagem de eventos. Afim de coletar os fótons gerados são utilizados 40 PMTs, do modelo Hamamatsu R5912.

Como o detector é de superfície, para melhorar a relação sinal ruído ele é posicionado a poucos metros do reator nuclear da usina Angra 2 em um contêiner-laboratório, como pode ser visto na Figura 1.



Figura 1: Detector posicionado ao lado do reator nuclear da usina Angra 2

2.1 REATOR NUCLEAR DA USINA ANGRA 2

O reator nuclear da usina Angra 2 é do tipo Reator de água pressurizada (do inglês, *pressurized water reactor*) (PWR), no qual o sistema de refrigeração é baseado em água bombeada em alta pressão no núcleo do reator, onde é aquecida pela fissão nuclear, que passa por um gerador de vapor e move turbinas, transformando energia térmica em energia elétrica. Alguns sub-processos da geração térmica nucléos gerados pela fissão nuclear, que através do decaimento beta, formam antineutrinos, que são espalhados em todas as direções.

2.2 O DETECTOR ν -ANGRA

O detector utilizado dispõe de três sistemas principais que podem ser vistos na Figura 2 e serão discutidos em suas sub-sessões, possui volume aproximado de 13 m^3 , sendo apenas $\frac{1}{10}$ do volume para o detector alvo e o resto dividido em *shielding* e o sistema de voto, ambos para proteger o detector de ruído de fundo como raios cósmicos ou nêutrons.

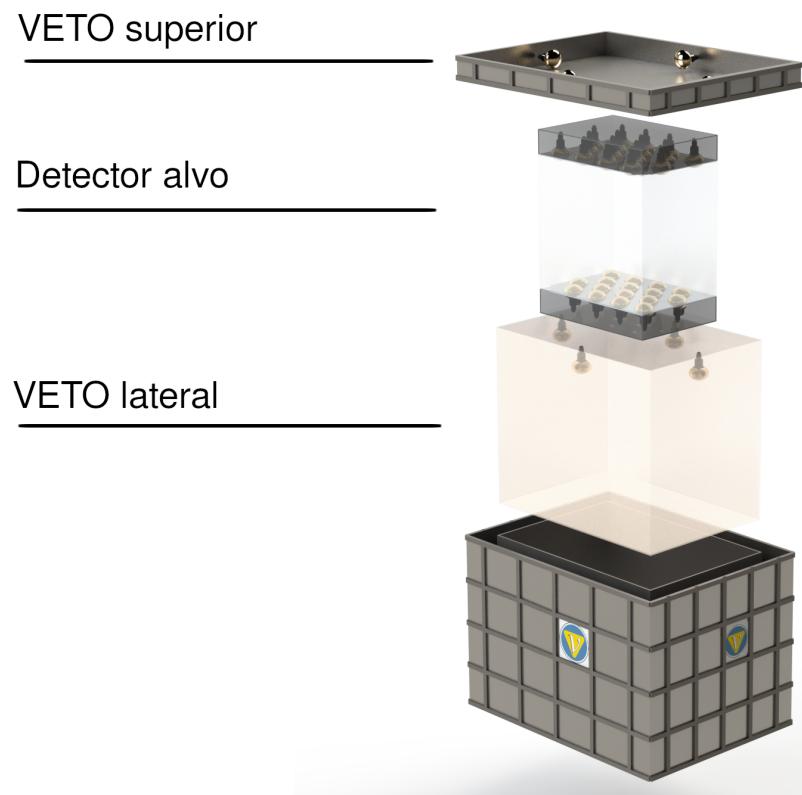


Figura 2: Vista explodida do detector

2.2.1 SISTEMAS DE VETO

Como o detector ν -Angra é um detector de superfície ele não está imune à radiação advinda do cosmos, se fazendo necessário uma camada de voto para detecção de ruídos de fundo afim de selecionar apenas os eventos de antineutrinos. Cada camada de *VETO* têm 4 PMTs, sendo as do *VETO* superior sendo posicionadas no ponto central de cada aresta, enquanto as do *VETO* lateral ficam na parte superior das faces laterais do detector, somando-se 8 PMTs. O voto lateral é revestido com uma fina camada de aço para bloquear principalmente nêutrons. http://lsd.cbpf.br/doc/dissertacoes/TeseDoutorado_DionRibeiro.2019_05_07.pdf

2.2.2 DETECTOR ALVO

Como eventos de antineutrinos são de baixa energia, para melhor leitura dos eventos, o alvo apresenta 16 PMTs na sua parte inferior e 16 na parte superior, ele é preenchido com água dopada com sal de gadolínio afim de aumentar o número de partículas livres que interagem com antineutrinos através do processo de decaimento beta-inverso. O detector alvo têm volume aproximado de 1 m³, e tem a carcaça feita de polipropileno.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (2.1)$$

Devido ao fato da água ser dopada com um sal de gadolínio, este tem como característica o aumento da turbidez, assim diminuindo o caminho médio livre dos fótons e piorando a qualidade da água para o transporte de fotoelétrons.

2.2.3 TUBOS FOTOMULTIPLICADORES

Como mencionado, o modelo definido para as 40 PMTs do detector é Hamamatsu R5912, elas foram calibradas individualmente para um ganho de $\approx 10^7$.

As PMTs têm como característica transformar Fotoelétrons (p.e.) em um sinal elétrico, têm características lineares até ≈ 100 p.e. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900218314281> e após há saturação e por consequente, perda de eficiência. São capazes de identificar *single photoelectrons* e têm um ruído de fundo (*dark current*) com frequência baixa, cerca de 4 a 8 kcps (*kilo counts per second*).

Como o detector é baseado em efeito Cherenkov na água, as PMTs foram o sensor escolhido para o experimento.

2.3 ELETRÔNICAS DE FRONT-END E AQUISIÇÃO

Para fazer a aquisição dos sinais das PMTs, o detector dispõe de circuitos eletrônicos para condicionamento dos sinais, chamado de *front-end*, e um sistema de aquisição dos dados, chamado de *Neutrino Data Aquisition System* (NDAQ). Cada PMT tem uma *front-end* conectada à saída de sinal que então estão ligadas em cada um dos oito canais de cada NDAQ, fazendo-se assim 40 placas de *front-end* e 5 NDAQs para a aquisição de todas as PMTs do detector.

Durante todo o tempo os sinais das PMTs são salvos em uma fila do tipo FIFO (do inglês, *first in first out*) nas NDAQs, quando um sinal é detectado o conteúdo das *fifos* é esvaziado, digitalizado pelas NDAQs e salvo em um arquivo para análise prévia.

3 DADOS REAIS

Durante o período de maio a julho de 2017 foram feitas aquisições de dados do detector para raios cósmicos, utilizando duas pás cintiladoras de dimensões 14x14x1 posicionadas acima do plano superior do detector como sistema de *trigger*. A primeira pá foi posicionada a 4.5 cm acima da superfície superior do detector enquanto a segunda pá foi posicionada a 47.5 cm da mesma superfície.

O sistema de *trigger* foi configurado para realizar a aquisição dos dados das PMTs caso ambas as pás cintiladoras tenham detectado um sinal, fazendo a aquisição dos dados salvos nos *buffers* das NDAQs, salvando as últimas 100 amostras digitalizadas. Foram selecionados no total 9999 eventos consecutivos registrados pelo detector para análise deste trabalho.

3.1 METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS DADOS DO EXPERIMENTO

Os dados do experimento são salvos em arquivos de texto com o valor analógico da saída de cada PMT convertido para um valor digital, valor tal será referido como *ADC counts* a partir deste ponto. Podemos estimar a quantidade de p.e. total por evento estimando a contagem de *ADC counts* no pico do mesmo, assim, a estratégia para a análise será estimar a quantidade de p.e. por PMT por evento, verificar a quantidade de p.e. por evento e por PMT.

Como no sistema existe uma tensão de *bias* negativa, conhecida como pedestal, precisamos removê-la antes de começar uma análise mais profunda dos dados, centralizando nossas amostras no valor nulo. O pedestal pode ser visto e comparado com uma amostra sem o mesmo na Figura 3.

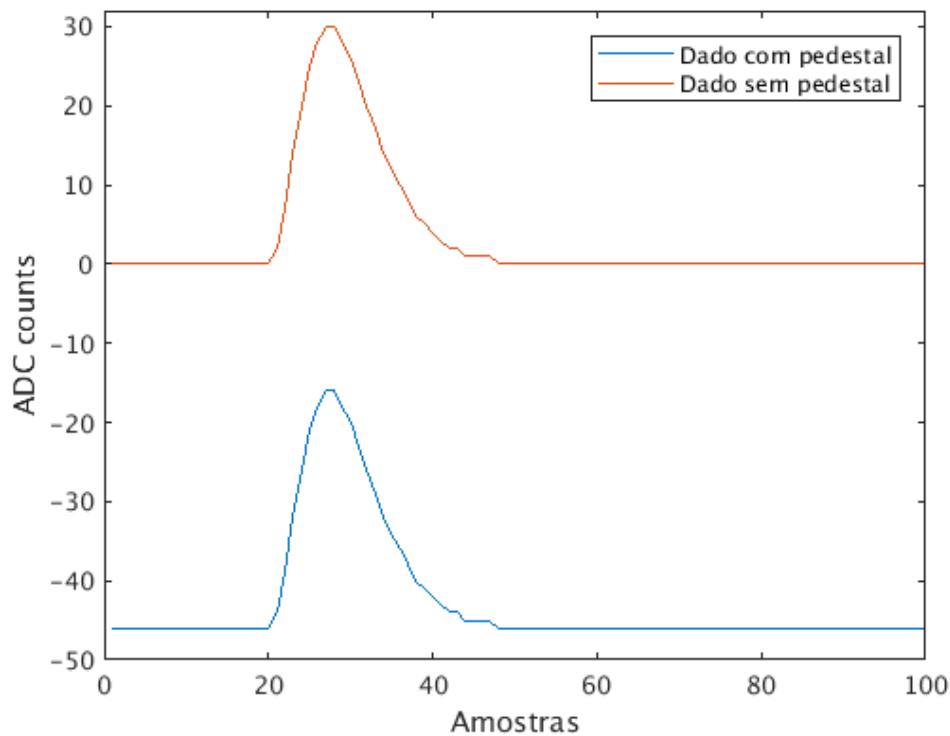


Figura 3: Sinal com e sem pedestal

Afim de definir o número de p.e. de cada PMT verificamos o valor máximo de cada PMT. Devido à saturação das PMTs e da eletrônica de *front-end*, os dados coletados com pico de energia acima do valor de saturação devem ser recuperados de alguma forma, foi utilizado um *fitting* com uma forma do sinal conhecida através de um processo iterativo, calculando o erro provável de uma área linear pelo teste do χ^2 (qui-quadrado, Apêndice B) e utilizando a forma final com menor erro, estimando assim, a forma do sinal não saturado. Um exemplo de sinal saturado e sua estimação está presente na Figura 4.

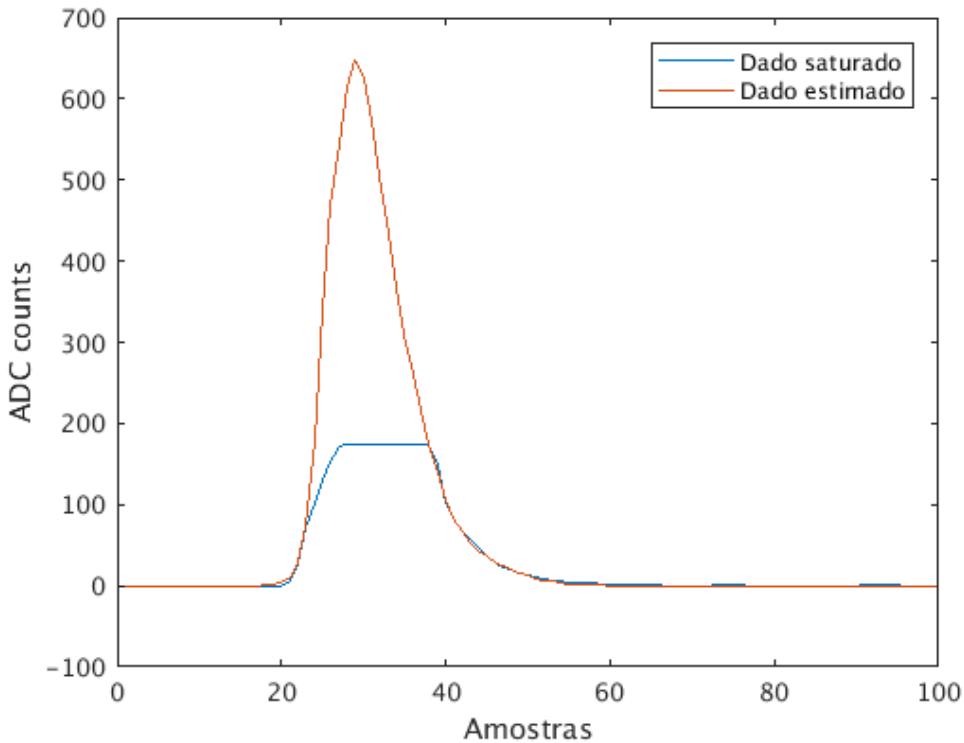


Figura 4: Sinal de uma PMT saturada versus sua estimação de pico

Para verificar as quantidades de p.e. por evento e por PMT, será feito um histograma para cada caso.

3.2 DEBUG DOS DADOS REAIS

Após o *fit* dos dados, foi encontrado um problema intrínseco ao método, como o *fit* era realizado a partir do ponto de saturação eventos naquele ponto foram, em sua maioria, removidos do sistema como pode ser visto no histograma da Figura 5.

Para resolver este problema precisamos modificar o modo de *fit* a ser realizado. Foi feito então o mesmo método anterior, porém a partir de um ponto em que as PMTs não estão em saturação, mantendo o valor próprio e estimando os valores além de do ponto não saturado, resolvendo o erro de estimação e gerando a Figura 6.

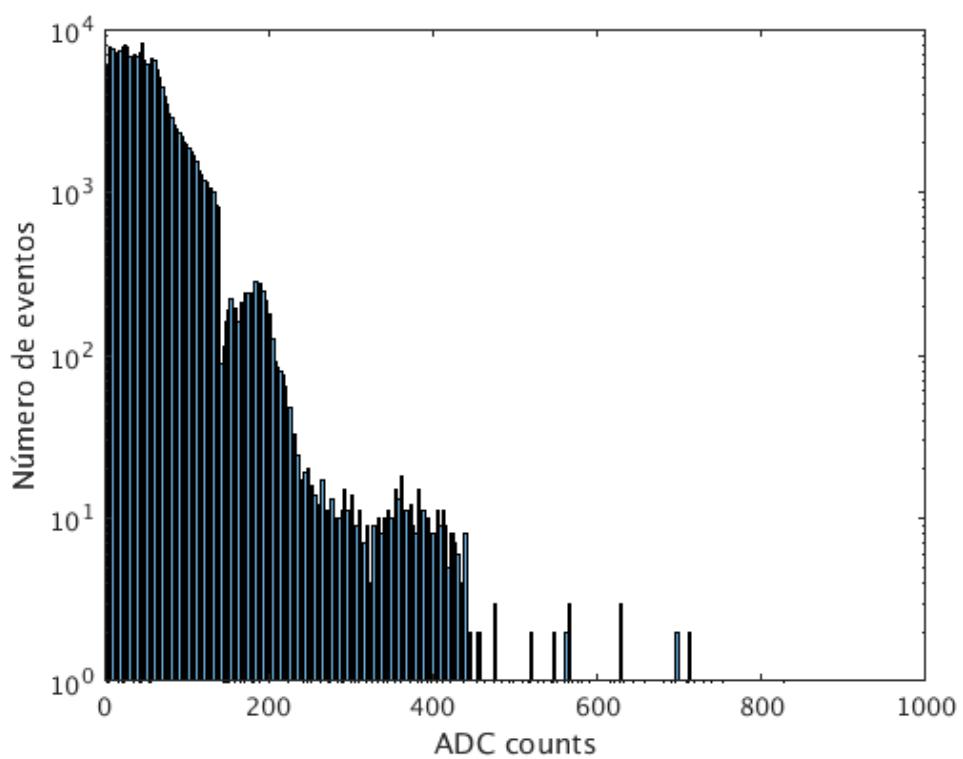


Figura 5: Distribuição de picos com problema causado pela estimação

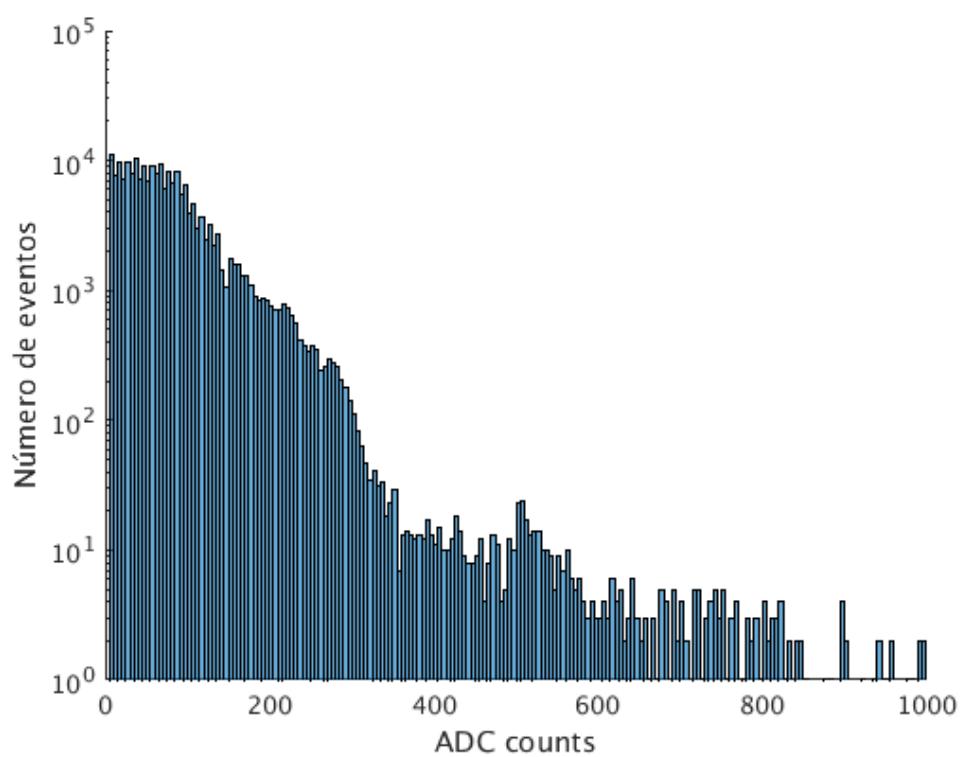


Figura 6: Distribuição de picos após a resolução do problema de estimação

3.3 DADOS DA AQUISIÇÃO

Após resolver os problemas de saturação e estimação dos sinais, temos os dados a serem comparados com a simulação, representados pelas Figuras 6 e 7.

A Figura 7 representa a quantidade de p.e. por evento, ou seja, a soma de todas as PMTs do detector central, e a Figura 6 representa a distribuição de p.e. para todas as PMTs individualmente.

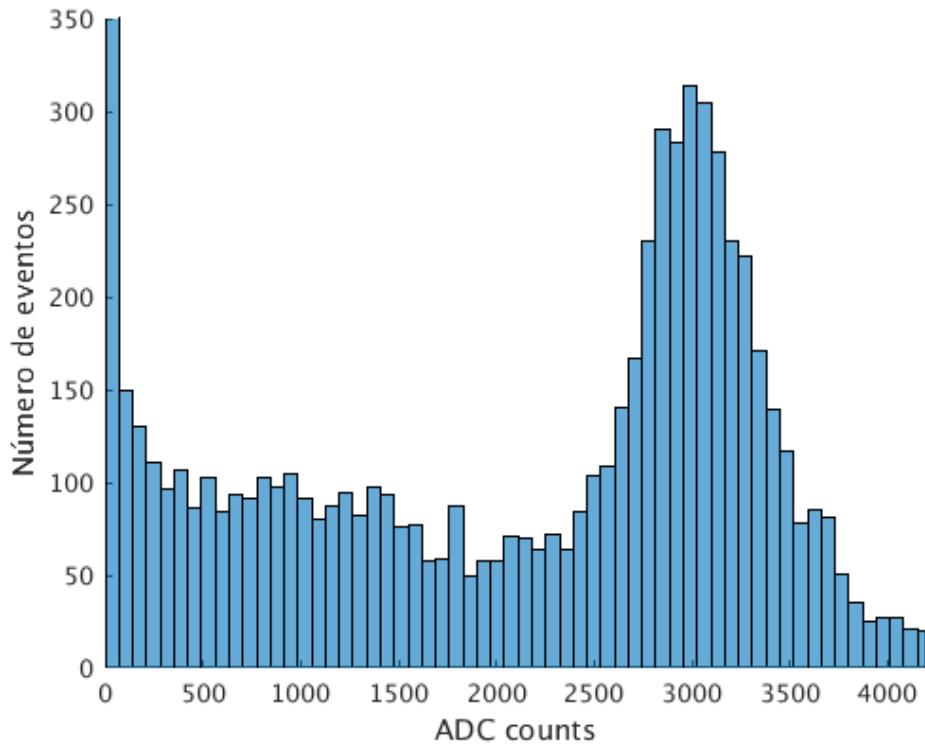


Figura 7: Distribuição de picos após a resolução do problema do *fit*

4 SIMULAÇÃO

Este capítulo será apresentada a plataforma *GEometry ANd Tracking* (Geant4), interface usada para simulação de eventos ocorridos no experimento ν -Angra, e as medidas e métodos de simulação realizados neste trabalho.

4.1 GEANT4

Geant4 é um software de código livre, extensível, utilizado para simular de forma acurada a passagem de partículas por matéria, todo o escopo de simulação está incluso nas ferramentas do simulador, como construção do detector, materiais, partículas de interesse.

Já incluso no cerne do simulador estão inclusos vários modelos físicos para lidar com as interações das partículas por todo uma extensão de níveis energéticos. Construído com uma linguagem orientada à objetos (C++), ele utiliza o método de Monte-Carlo para cálculos, utilizando de métodos estocásticos para resolver as interações determinísticas, do ponto de vista do simulador.



Figura 8: Logo do Geant4

Devido à sua extensibilidade e confiabilidade, o Geant4 foi escolhido como plataforma de simulação para o experimento.

Além de ser utilizado como simulador na física de altas energias, o Geant 4 também possui campo de aplicação em áreas como medicina, para simular tratamentos com radiação; a física nuclear; e as aplicações espaciais, para estudar as interações entre os raios cósmicos e os equipamentos utilizados por astronautas.

4.1.1 CONSTRUÇÃO DO DETECTOR E PARÂMETROS DO EXPERIMENTO

Valendo-se da plataforma *Geant4*, a Colaboração Neutrinos Angra criou um modelo do detector completo, porém este estava na configuração antiga do mesmo, conhecida como "copo de caipirinha", após atualizar o modelo, o obtivemos da forma atual, que pode ser visto na Figura 2. Este foi utilizado como modelo do detector.

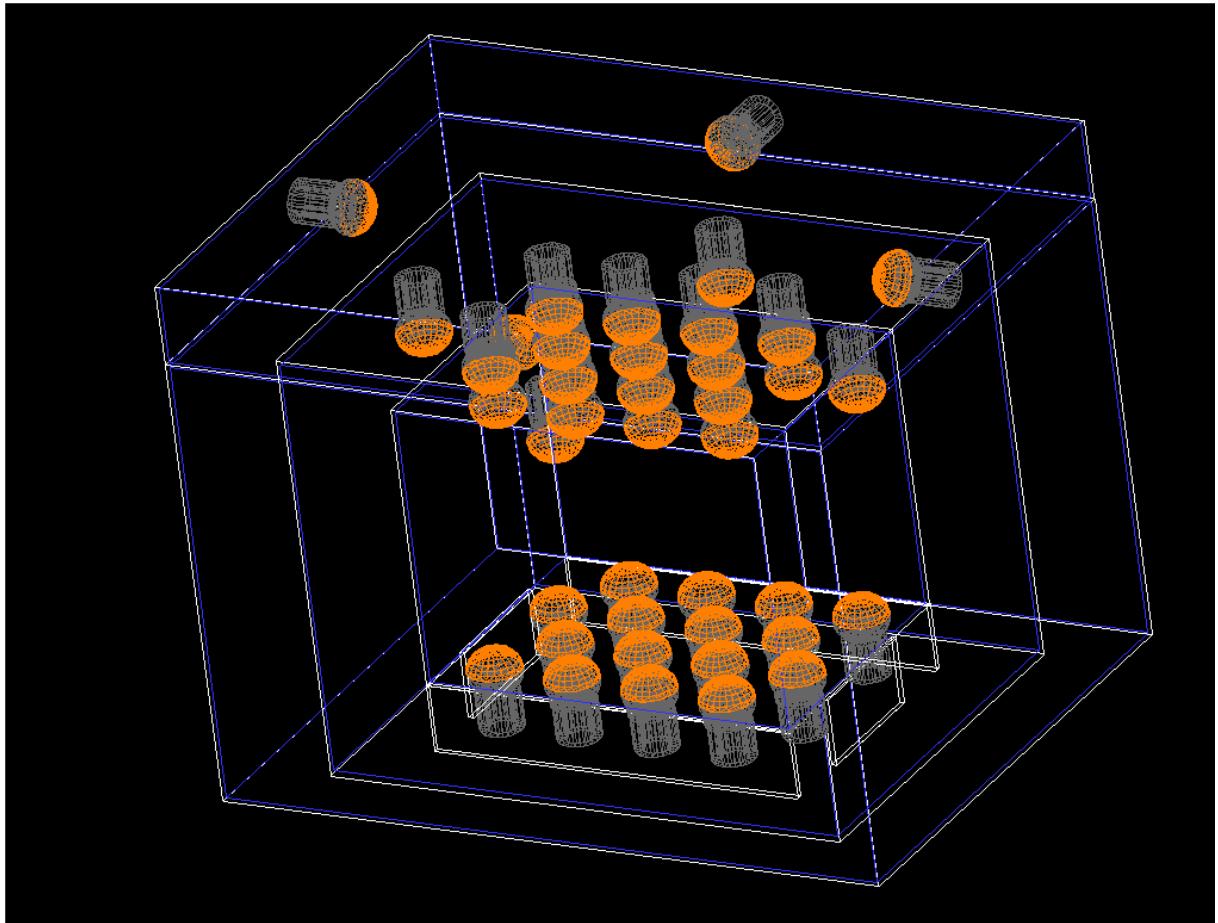


Figura 9: Detector visto pelo Geant4

A lista de física utilizada foi *QGSP_BIC_HP*, que contém os modelos:

Sigla	Nome do modelo	Nível de energia
QGS	Quark Gluon String model	>12 GeV
FTF	FRITIOF String model	9.5 - 25 GeV
BIC	Binary Cascade model	200 MeV - 9.9 GeV
HP	High Precision neutron model	<~20 MeV

Tabela 1: Modelos de física utilizados

Estes modelos foram escolhidas devido às interações reais que acontecem no mundo.

4.2 GERAÇÃO DAS PARTÍCULAS

As partículas de simulação foram geradas pela plataforma ROOT, da colaboração do Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear (em francês: *Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire*) (CERN), para realizar os cálculos. Para facilitar a simulação dos eventos, ao invés de implementar as pás no simulador, os raios cósmicos são gerados já passando por elas, garantindo o *trigger* do sistema para qualquer evento da lista.

Na geração das partículas foi utilizado um modelo aleatório de sorteio em histogramas com as distribuições das direções nos eixos x, y e z e a posição inicial no plano 3D, (https://github.com/ASLopesJR/NeutrinosAngra/blob/teste-angra/AngraGenerators/muons/muons_pad.cpp) depois foi calculado em que posição estará a partícula na altura dos dois pads e, se ela estiver dentro da área de ambos, salva a partícula. Os eventos salvos podem ser vistos na Figura 10.

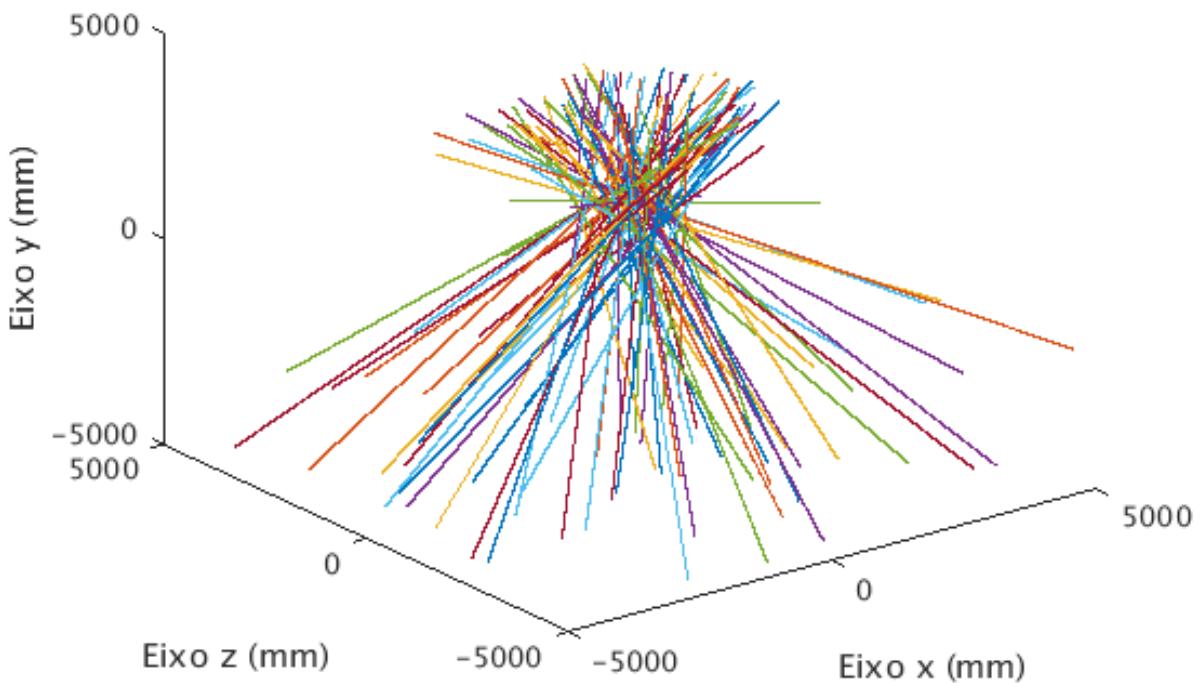


Figura 10: Raios cósmicos gerados

4.3 SIMULAÇÃO INICIAL

Assim, com o Geant4 configurado e as partículas geradas podemos executar a simulação e fazer a análise dos resultados. Foram feitas 20000 simulações com o banco de dados, comparando os resultados com os dados reais, tivemos as Figuras 11a e 11b.

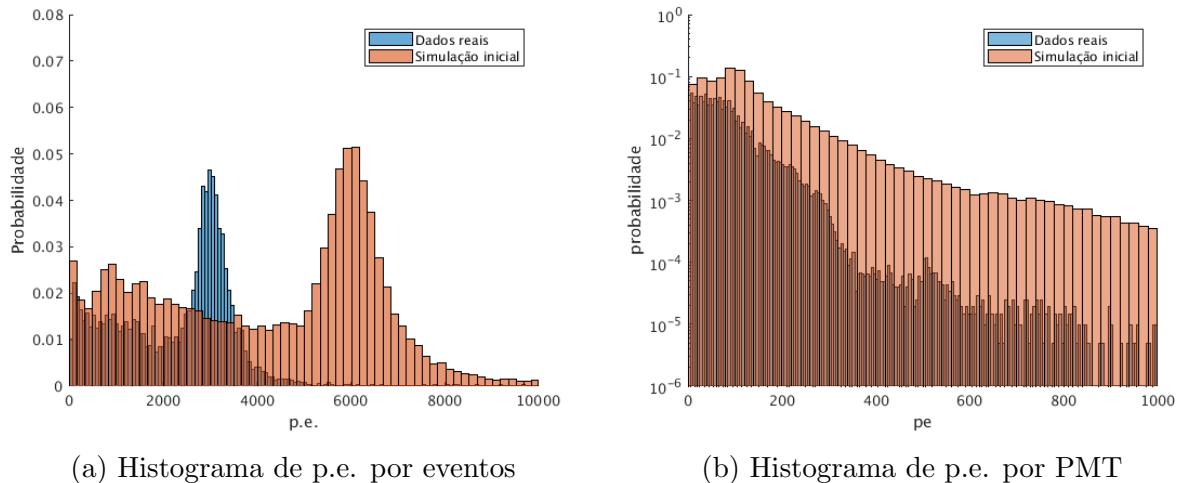


Figura 11: Comparaçāo dos dados reais por simulados

4.4 CORREÇÃO DE BUGS

Como pode ser percebido, há um erro crasso de calibração do sistema simulado, de forma geral os eventos apresentam muito mais energia do que no sistema real, então, muito mais fotoelétrons estão sendo capturados pelas PMTs. Algum método deve ser encontrado para calibrar a simulação.

4.4.1 CORREÇÃO DAS PMTS

O primeiro problema encontrado foi para mūons que passam por dentro de PMTs, que geram fótons dentro da mesma, porém no volume interior da PMT real há vácuo, então não deveria ocorrer a radiação de Cherenkov, dada a energia gerada dentro da PMT pode-se inferir que para a simulação havia água dentro delas. Então foi-se adicionado um volume com vácuo dentro da PMT para corrigir este problema

Antes da correção	929 eventos
Depois da correção	22 eventos

Tabela 2: Eventos antes e depois de corrigir o bug do vácuo

4.4.2 CALIBRAÇÃO DA SIMULAÇÃO

4.4.2.1 TRANSFORMAÇÃO DE CDF

Além da qualidade da água, a saturação da eletrônica de *front-end* e a não linearidade das PMTs, temos que implementar este sistema para a simulação. Foi feita então uma transformação de Função distribuição acumulada (do inglês, *cumulative distribution function*) (CDF) dos eventos simulados para os dados reais, utilizando de parâmetro o histograma de p.e. por PMT..

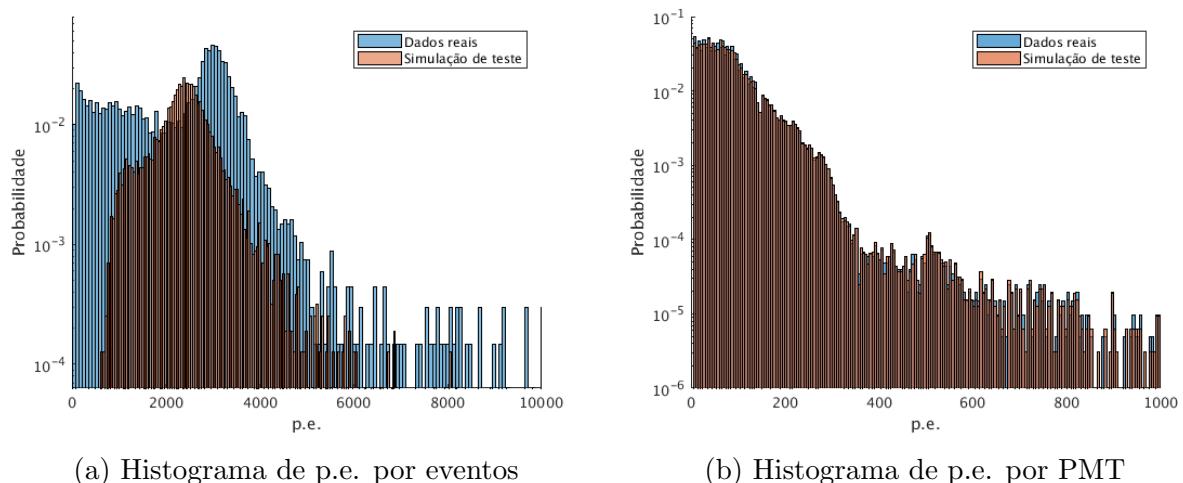


Figura 12: Comparaçāo dos dados reais por simulados apōs a transformaçāo de CDF

Como era de se esperar, a transformação de CDF resolveu o problema que o histograma de p.e. por PMT apresentava, porém o problema por eventos apenas se agravou. Precisa-se então de alterar outros parāmetros para a calibração final do simulador.

4.4.2.2 QUALIDADE DA ÁGUA

Como discutido no Capítulo 2 na Sessão 2.2, na água dopada com sal de gadolínio há uma diminuição no caminho médio livre e, na simulação, não há este sistema implementado sendo utilizado o caminho médio livre de uma água completamente pura. Então deve-se alterar a qualidade da água para que a distribuição de energia esteja correta.

Para tal, utilizaremos um modelo iterativo diminuindo o caminho médio livre do fóton na água até que os dados simulados representem os dados reais. As Figuras a seguir mostram alguns passos deste processo iterativo.

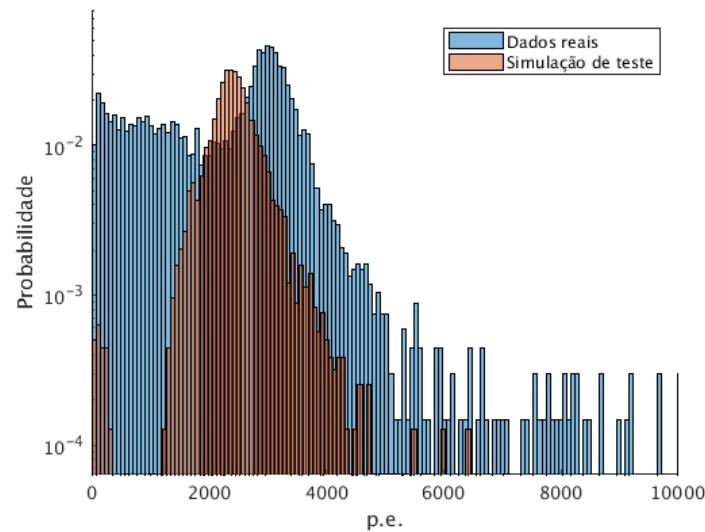


Figura 13: Qualidade da água 86% pior que a original

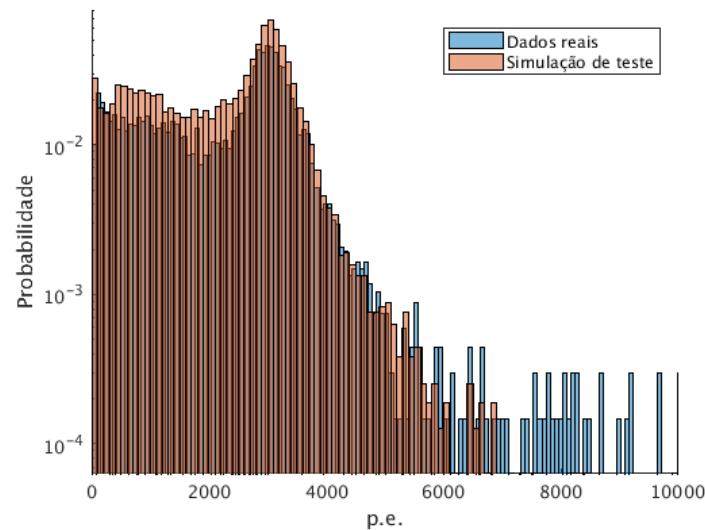


Figura 14: Qualidade da água 70% pior que a original

Assim, utilizaremos o valor para qualidade da água 70% menor que o valor da água pura..

5 RESULTADOS

6 CONCLUSÃO

6.1 PRÓXIMOS PASSOS

REFERÊNCIAS

APÊNDICE A - A RADIAÇÃO DE CHERENKOV

Techniques for nuclear and particle physics experiments, a how-to approach - W.R. Leo

A radiação de Cherenkov acontece quando partículas carregadas atravessando um meio têm velocidades maiores que a velocidade da luz naquele meio, ou seja:

$$v_{partcula} > \frac{c}{n} \quad (\text{A.1})$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo e n é o índice de refração do meio.

Nestes casos, uma onda de choque eletromagnética é enviada para o meio formando um cone com um ângulo definido

$$\cos \theta_C = \frac{1}{\beta n(\omega)} \quad (\text{A.2})$$

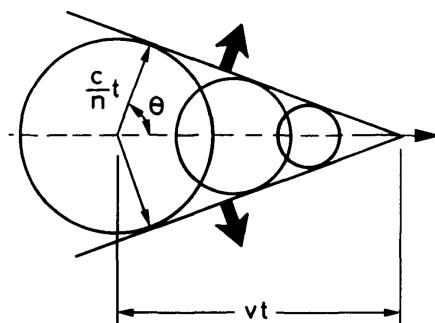


Figura 15: Radiação de Cherenkov: uma onda de choque eletromagnética formada pela passagem de partículas acima da velocidade da luz no meio

em respeito à trajetória da partícula. A radiação incide em forma de fótons, geralmente no espectro do ultra-violeta, detectáveis por materiais fotosensíveis como PMTs ou fotomultiplicadores à base de silício (do inglês, *Silicon photomultipliers*) (SiPMs).

APÊNDICE B - QUI-QUADRADO

Fundamento da teoria de erros - José Henrique Vuolo

Sendo $f(x)$ a função ajustada a um conjunto de n pontos experimentais (x_i, y_i) e o desvio padrão σ , a quantidade de χ^2 -estatístico é definida por

$$\chi^2 = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 \quad (\text{B.1})$$

O valor de χ^2 define então o erro estatístico do