



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

Prof. Luciano Manhaes de Andrade Filho, D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF

David Melo Souza, 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	15
Figura 2	Vista explodida do detector	16
Figura 3	Distribuição de picos com problema causado pelo fit	19
Figura 4	Distribuição de picos após a resolução do problema do <i>fit</i>	19
Figura 5	Detector visto pelo Geant4	21
Figura 6	Radiação de Cherenkov: uma onda de choque eletromagnética formada pela passagem de partículas acima da velocidade da luz no meio	25

LISTA DE TABELAS

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*

ADC do inglês, *Analog Digital Conversion*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Motivação	14
1.2 Desenvolvimento	14
1.3 Mapa dos capítulos	14
2 Experimento ν-Angra	15
2.1 Reator nuclear da usina Angra 2	16
2.2 O detector ν -Angra	16
2.2.1 Sistemas de <i>VETO</i>	17
2.2.2 Detector alvo	17
2.3 Eletrônicas de <i>front-end</i> e aquisição	17
3 Dados Reais	18
3.0.1 Metodologia de análise dos dados do experimento	18
3.0.2 Debug dos dados reais	18
4 Simulação	20
5 Resultados	22
6 Conclusão	23
6.1 Próximos Passos	23
Referências	24
Apêndice A – A radiação de Cherenkov	25

1 INTRODUÇÃO

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 aquistados, 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 à 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 de maio a julho de 2017.

1.3 MAPA DOS CAPÍTULOS

Dada a apresentação do tema neste capítulo, 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.

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.

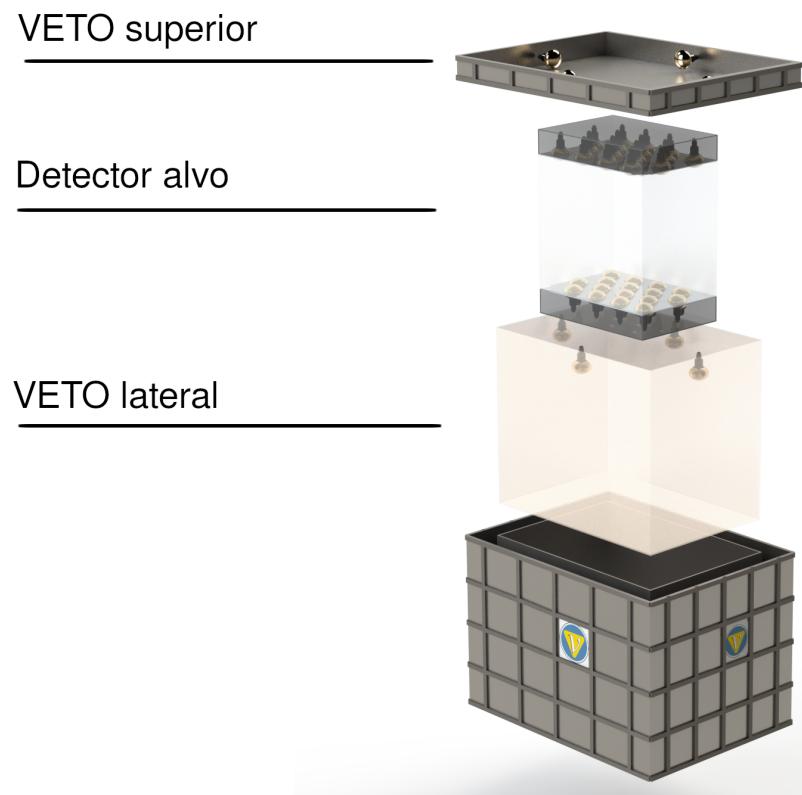


Figura 2: Vista explodida do detector

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 um cintilador dopado com 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.

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

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. 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.

Como as pás estão posicionadas para o céu, o sistema de *trigger* foi configurado com o acionamento das duas pás para garantir um evento de raio cósmico.

3.0.1 METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS DADOS DO EXPERIMENTO

Os dados do experimento são salvos em arquivos de texto com o valor analógico da saída das PMTs convertido para digital (do inglês, *Analog Digital Conversion* (ADC)) podemos estimar a quantidade de Fotoelétrons (p.e.) total de um evento estimando a contagem de ADCs no pico do evento,

3.0.2 DEBUG DOS DADOS REAIS

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.

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 na Figura 3, para resolver esste problema o *fit* foi realizado a partir de um ponto em que as PMTs não estão em saturação, gerando a Figura 4

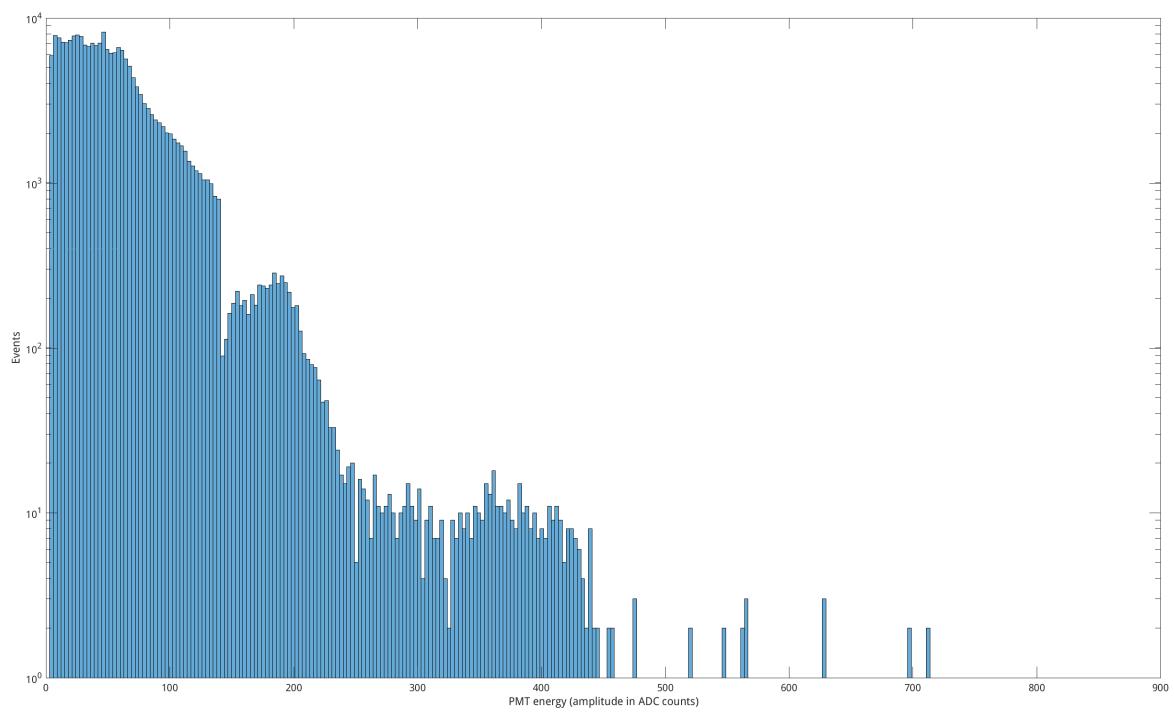


Figura 3: Distribuição de picos com problema causado pelo *fit*

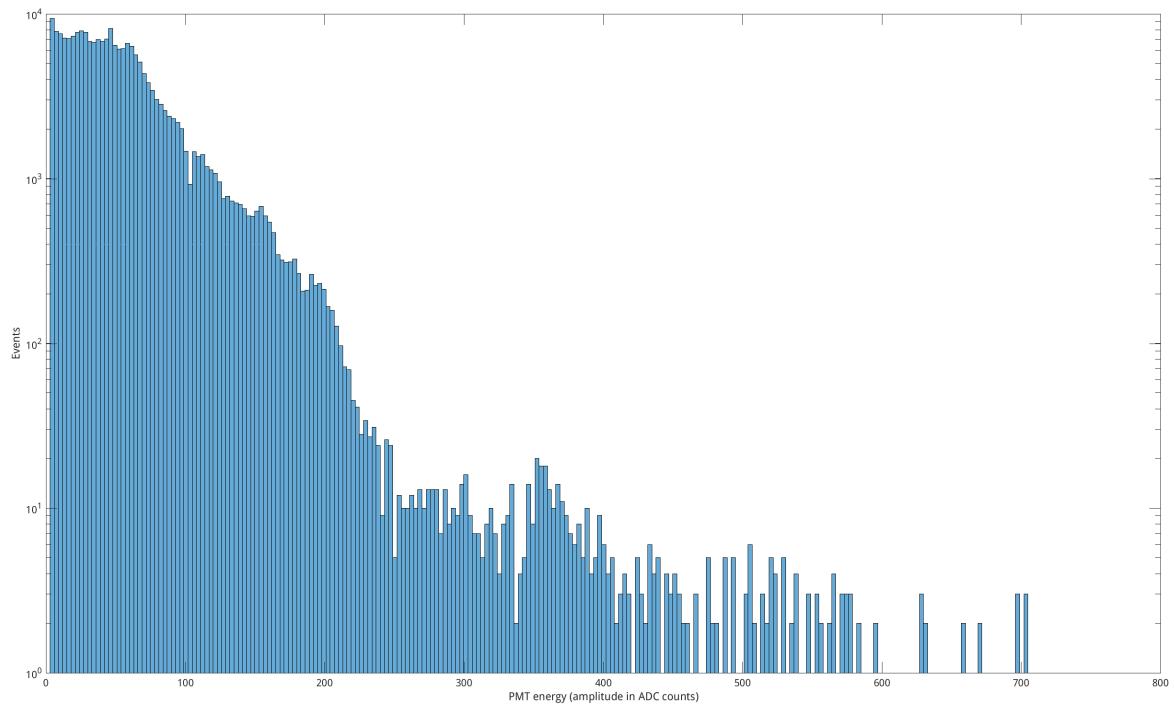


Figura 4: Distribuição de picos após a resolução do problema do *fit*

4 SIMULAÇÃO

Este capítulo será apresentada a plataforma Geant4, interface usada para simulação de eventos ocorridos no experimento ν -Angra com

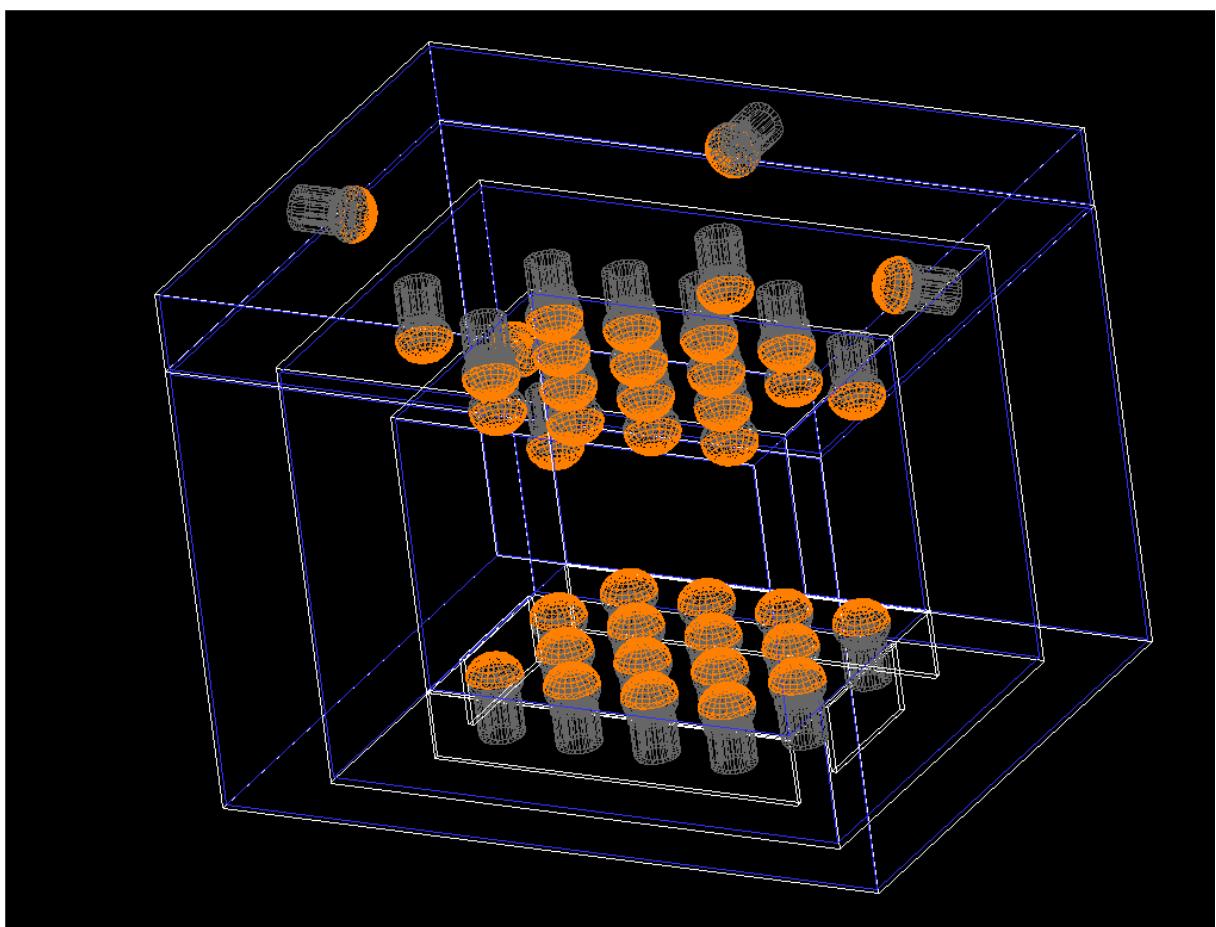


Figura 5: Detector visto pelo Geant4

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

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

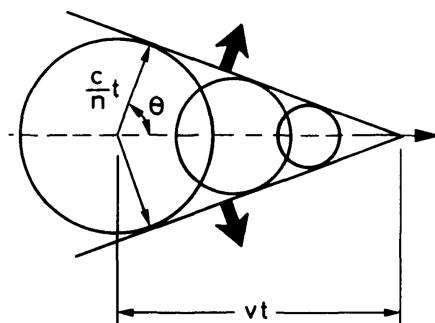


Figura 6: Radiação de Cherenkov: uma onda de choque eletromagnética formada pela passagem de partículas acima da velocidade da luz no meio

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