

## [[Estudo de características do sistema de veto para múons cósmicos do experimento Neutrinos-Angra]]

Palavras-Chave: [[neutrinos de reatores nucleares]], [[múons cósmicos]], [[experimento Neutrinos-ANGRA]]

Autores/as:

Daniel Magpali Moura Estevão [UNICAMP]  
Prof. Dr. Ernesto Kemp (orientador/a) [Unicamp]

### INTRODUÇÃO:

Reatores nucleares têm sido essenciais no estudo experimental de neutrinos, dado que um dos produtos do decaimentos beta dos isótopos gerados das fissões de Urânio e Plutônio presentes no reator é o antineutrino eletrônico, tornando os reatores fontes abundantes dessas partículas subatômicas. Com isso, o Experimento de neutrinos Angra foi criado com o objetivo de desenvolver uma tecnologia confiável capaz de monitorar remotamente a potência de um reator nuclear e possivelmente a evolução espectral de neutrinos.

O Experimento de Neutrinos Angra consiste de um detector instalado nas proximidades da usina nuclear de Angra II formado por 3 volumes de água e eletrônicas associadas. O objetivo é observar os antineutrinos eletrônicos produzidos pelo reator. Essa detecção é possível devido ao decaimento beta-inverso dos antineutrinos no alvo de água do detector [2]. Os produtos finais (pósitron, nêutron) liberam fótons de radiação Cherenkov ao interagir com a água, que são posteriormente capturados por tubos fotomultiplicadores (PMTs) e transformados em sinais elétricos mensuráveis [2].

O volume físico do detector é composto pelo alvo, tanque central contendo água dopada com Gadolínio cercado por 32 PMTs, destinado à detecção de eventos de antineutrinos; e pelo sistema de Veto, constituído de duas partes: o Veto Superior que consiste de um volume de água cercado por 4PMTs localizado acima do alvo; e o Veto Lateral, que também é um volume de água cercando o o alvo e contendo uma PMT em cada face [1].

Esse arranjo está representado na figura ao lado.

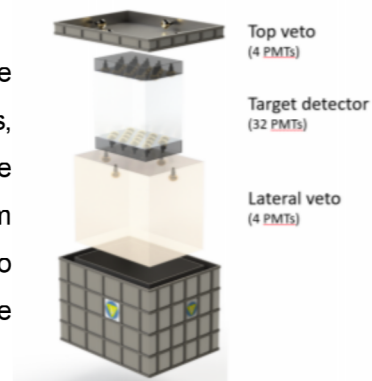


Figura 1: Esquema representativo do detector de Angra

Nesse estudo o interesse foi concentrado no sistema de Veto. Esse sistema é responsável por bloquear sinais que aparecem no detector devido a incidência de raios cósmicos em seu volume. Esses sinais são abundantes e não correspondem à eventos de antineutrinos, e portanto devem ser desconsiderados da análise. O sistema de Veto faz isso detectando a passagem de uma partícula cósmica em seu volume e a partir disso criando uma janela temporal de veto, onde nenhum sinal é adquirido, permitindo então que a partícula atravesse o alvo sem ser detectada pela eletrônica [4]. Em particular, as principais partículas cósmicas que atingem o detector são os múons.

No entanto, o sistema de Veto possui limitações, ou seja, não é 100% eficiente, e assim o objetivo do estudo é estimar a eficiência atual do sistema de Veto do detector de neutrinos-Angra em relação aos eventos de múons cósmicos, pois assim mesmo que uma pequena porcentagem dos eventos no alvo seja devido a eles, conhecendo-se a eficiência do Veto é possível identificar a quantidade de eventos devido a antineutrinos e a quantidade devido à múons que não foram bloqueados pelo Veto.

## **METODOLOGIA:**

A metodologia desse trabalho foi dividida em 2 partes principais, sendo elas: a realização de análise de dados do Experimento neutrinos-Angra; e utilização de simulações computadorizadas de eventos no detector utilizando o código Monte Carlo geant4 [5], para confrontar os resultados obtidos com a análise citada. A descrição da metodologia será iniciada com a simulação.

Para realizar as simulações no código Monte Carlo geant4 foi utilizado o código base escrito pela colaboração que já conta com a geometria, os materiais e os processos físicos envolvidos no detector. O interesse do estudo foi avaliar os eventos de múons provindos de raios cósmicos, então foi necessário simular esse cenário que corresponda à incidência de múons cósmicos no detector. Para isso, foi utilizado um código desenvolvido pela colaboração que utiliza do espectro de energias e da distribuição angular dos múons medidos ao nível do mar [3] para gerar eventos de múons a 4 metros acima do detector numa área de 25m<sup>2</sup> que possuam energia e direções compatíveis com o cenário real. Esses eventos gerados foram implementados ao código base pelo autor. A partir disso foram gerados 5000 eventos com essas configurações.

Em seguida, o arquivo de saída da simulação foi tratado utilizando um código escrito em python desenvolvido pelo autor, de modo a possibilitar a análise de dados dos resultados da simulação.

Para a realização da análise de dados foram inicialmente realizadas tomadas de dados do detector com configurações diversas do sistema de Veto Superior, sendo elas: sem o sistema de Veto operante, registrando todos os eventos; com apenas uma PMT gerando o sinal de Veto e com 2, 3 e 4 PMTs em coincidência necessárias para gerar o sinal de Veto, totalizando 5

configurações diferentes. Esses dados foram então tratados e analisados utilizando um código escrito em python desenvolvido pelo autor.

Utilizando esses dados foram plotados histogramas da carga depositada no alvo em unidades de foto-elétrons (p.e.) no detector em cada configuração de Veto citada, como seguem os exemplos abaixo

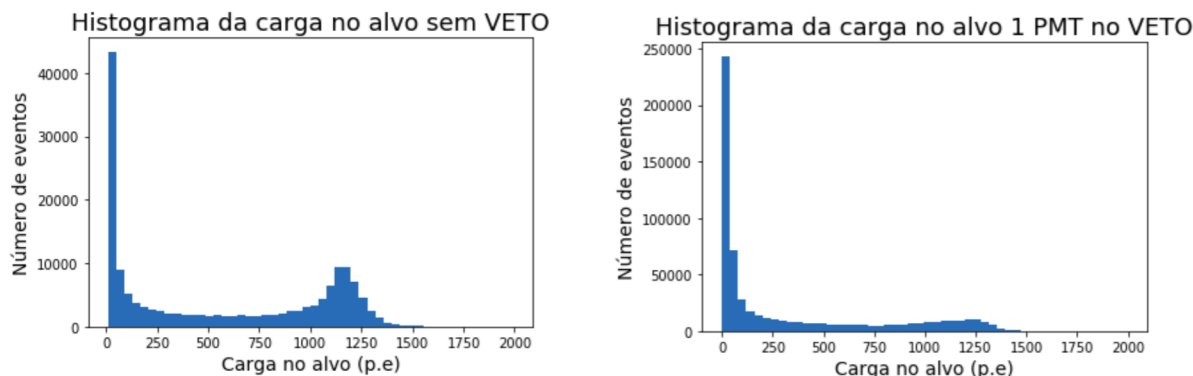


Figura 2: Histogramas da carga depositada no alvo do detector por evento em diferentes configurações de Veto

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Com os dados obtidos a partir da simulação foi realizado um histograma da distribuição de carga no alvo do detector devido apenas aos eventos de múons simulados. Assim, dos 5000 eventos simulados, 368 depositaram alguma energia detectável no alvo, e a sua distribuição de energia obtida é mostrada abaixo, considerando que as PMTs saturam acima de 25 foto-elétrons.

Ao lado desse plot é mostrado também a distribuição de carga no alvo dos dados experimentais sem veto subtraída da soma dos dados experimentais em todas as 4 configurações de Veto, normalizado pelo número de eventos. Essa análise visa mostrar a contribuição dos sinais vistos pelo detector quando o Veto está desligado em relação a quando o Veto está ligado.

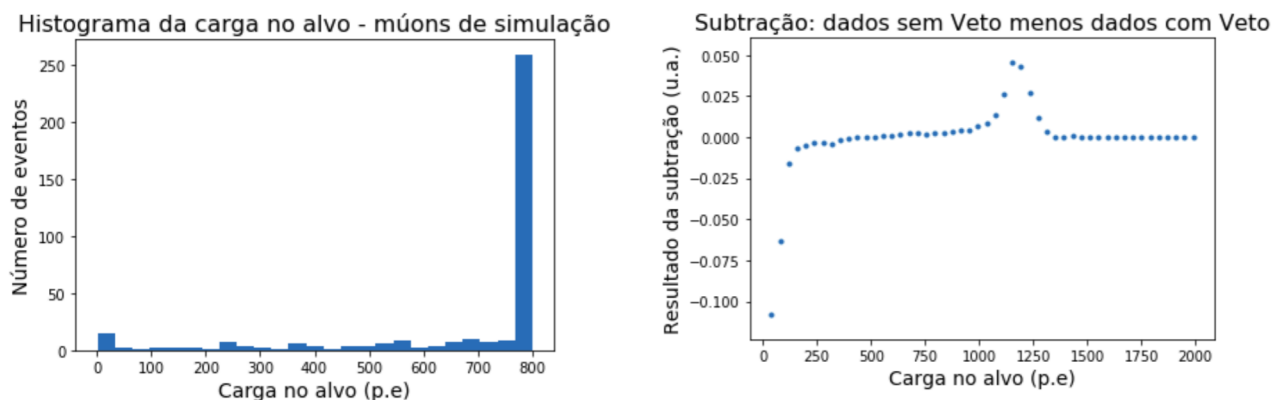


Figura 4: Diferença entre a carga depositada no alvo no simulação

Figura 3: Distribuição da carga no alvo depositada por múons da sem Veto e com Veto

Comparando os plots obtidos foi possível verificar que o pico que aparece no gráfico da subtração corresponde aos eventos de múons de raios cósmicos, que são bastante energéticos como visto no resultado da simulação. Com isso vê-se também que o Veto está sendo bem sucedido em

bloquear esses eventos de múons muito energéticos, dado que eles diminuem drasticamente quando há Veto, como visto pelo histograma de sinais no alvo, quando o veto está ativo.

Outro aspecto interessante desse resultado são os pontos vistos até aproximadamente 500 p.e. no gráfico da subtração que assumem valores negativos, indicando que nessa região a atividade no alvo foi maior quando havia Veto do que quando não havia. A região entre 65 e 200 foto-elétrons é a região de interesse para eventos de antineutrinos [3], logo isso mostra que os eventos de interesse do detector são privilegiados quando o Veto está funcionando, se comparado ao cenário em que o Veto não está funcionando. Esse fenômeno é atrelado ao fato de que sem o Veto a estatística principal vem dos múons cósmicos que são muito mais abundantes do que os eventos de neutrino, enquanto que com o Veto esses dados são bloqueados e vê-se mais dados referentes a antineutrinos e outros ruídos.

Assim, foi possível estimar o quanto o sistema de Veto privilegia os dados na faixa energética de interesse para eventos de antineutrinos. Para isso, foi realizado o plot da razão entre as cargas no detector no cenário sem Veto e no cenário com Veto de 0 a 200 p.e. A partir desse plot mostrado na Fig. 5 podemos estimar o ganho do detector na região de interesse a partir do seguinte procedimento: o ganho é a razão de contagens por p.e. entre os casos com Veto e sem Veto, portanto, o recíproco desse gráfico. Devido ao intervalo de 65 a 200 p.e. ser a região de interesse, ajustamos uma reta a esse intervalo, como mostra a figura 6, pois antes de 65 p.e. os sinais são devidos majoritariamente a ruídos [6].

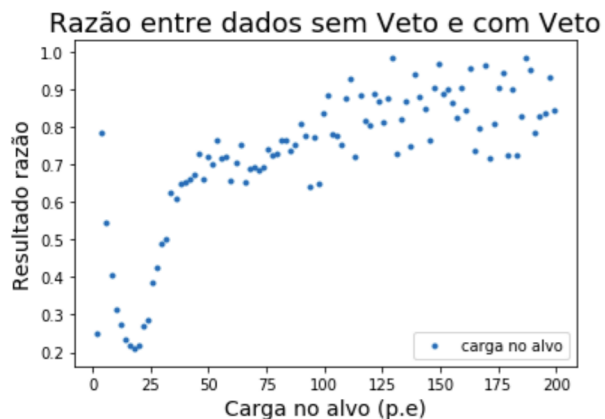


Figura 5: Resultado da razão entre a carga depositada no alvo no caso sem Veto e no caso com Veto



Figura 6: Ajuste linear feito na região de interesse para estimar o ganho do detector nessa região

O coeficiente angular obtido na reta ajustada no gráfico da Fig. 6 foi de  $-(0,0019 \pm 0,0003)$  ganho/p.e, onde o sinal negativo vem do fato do ganho proporcionado pelo Veto ser maior em energias mais baixas e ir diminuindo a medida que a energia da região de interesse aumenta. Isso pode ser visto na região de interesse onde ganho se inicia em 50% e cai até 10% no fim dela.

## => Eficiência do detector – simulação

Com os dados da simulação foi possível ainda estimar a eficiência do detector utilizando o seguinte critério:

. Se um evento de múon passa pelo Veto sem ativar nenhuma de suas PMTs mas ativa PMTs no alvo, então esse evento representa uma ineficiência do sistema, pois não foi visto pelo Veto mas foi visto pelo alvo e corresponde a um evento de múon, não a um evento de neutrino.

Com isso, dos 368 eventos que atingiram o alvo, 2 não produziram nenhum sinal em nenhuma das PMTs do Veto, tanto Superior com o Lateral. Com isso, é estimada uma ineficiência de 0.05% e consequentemente uma eficiência de 99.5%. O erro dessa medida pode ser estimado

considerando que podemos adotar uma estatística poissoniana, e com isso a eficiência do sistema de Veto para múons cósmicos calculada a partir da simulação foi de:

$$\text{Eficiência} = (99.5 \pm 0.3)\%$$

Comparando esse resultado com o resultado obtido também através de simulação em [3] para a eficiência do sistema de Veto do detector de neutrinos-Angra para múons cósmicos, temos que o resultado obtido aqui concorda dentro da faixa de incerteza com o resultado obtido em [3] de 99.73%.

## CONCLUSÕES:

Com o presente estudo foi possível confirmar o bom funcionamento do Veto para bloquear eventos de múons cósmicos comparando os dados do experimento obtidos sem o sistema de Veto e com diferentes configurações do mesmo. Além disso, foi possível observar um comportamento interessante acerca do ganho na estatística de eventos na região de interesse para detecção de antineutrinos quando o Veto estava ativado em relação a quando o Veto estava desligado, sendo possível quantificar esse ganho como mostrado. Por fim, foi possível estimar a eficiência do sistema de Veto para múons cósmicos por meio da simulação como  $(99.5 \pm 0.3)\%$ , valor que concordou com estudos prévios.

---

## BIBLIOGRAFIA

- [1] LIMA Jr, H.P. et al. **Neutrinos Angra experiment: commissioning and first operational measurements**. Journal of Instrumentation, v. 14, 2019 .
- [2] BEZERRA, Thiago. **Estudo da sensibilidade do detector de neutrinos do projeto angra para medidas de composição do combustível nuclear**. Dissertação de mestrado, 2009.
- [3] SANTOS, Lucas. **Estudo da eficiência para múons do sistema de veto do experimento neutrinos-angra**. Dissertação de mestrado, 2014.
- [4] SOUZA, D. M. et al. **Development and characterization of a water-based muon veto for the neutrino-Angra Experiment**. Nucl. Instrum. Meth. A, 2021.
- [5] <https://geant4.web.cern.ch>
- [6] **V dos Santos, Willian**. Comunicação particular. Resultado preliminar da dissertação de mestrado em fase de redação "Estudo da Eficiência do Detector Neutrinos-Angra Utilizando GEANT4". Previsão de defesa: out/2022.