

AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE VETO PARA O EXPERIMENTO NEUTRINOS ANGRA

AUGUSTO SANTIAGO CERQUEIRA*, IGOR ABRITTA COSTA*, ANTÔNIO FERNANDES JÚNIOR*, DAVID DE MELO SOUZA*, RAFAEL ANTUNES NÓBREGA*, JOÃO CARLOS COSTA DOS ANJOS[†], GABRIEL LUIS AZZI[†], HERMAN PESSOA LIMA JÚNIOR[†], OTTO ROCHA[†], CÉSAR MANUEL CASTROMONTE FLORES[†], ROGÉRIO MACHADO[†], PIETRO CHIMENTI[‡], PAULO CESAR MACHADO DE ABREU FARIAS[§], IURI MUNIZ PEPE[§], EDUARDO F. DE SIMAS FILHO[§], DION BARBOSA DOS SANTOS RIBEIRO[§], GERMANO PINTO GUEDES[¶], LUIS FERNANDO GOMEZ GONZALEZ^{||}, ERNESTO KEMP[‡], LUCAS MENDES SANTOS[‡], GUSTAVO DO AMARAL VALDIVIESSO^{**}, STEFAN WAGNER^{†‡}

** Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora-MG, Brasil*

*† Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Rio de Janeiro-RJ, Brasil*

*‡ Universidade Federal do ABC
Santo André-SP, Brasil*

*§ Universidade Federal da Bahia
Salvador-BA, Brasil*

*¶ Universidade Estadual de Feira de Santana
Feira de Santana-BA, Brasil*

*|| Universidade Estadual de Campinas
Campinas-SP, Brasil*

*** Universidade Estadual de Alfenas
Alfenas-MG, Brasil*

*†‡ Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro-RJ, Brasil*

Emails: augusto.s.cerqueira@gmail.com, igorabritta@gmail.com,
antonio.junior@engenharia.ufjf.br, david.melo@engenharia.ufjf.br, ranobr@gmail.com,
janjos@on.br, gabriel@cbpf.br, hlima@cbpf.br, rochafiscomp@gmail.com, cesarc@cbpf.br,
romachad@cbpf.br, pietro.chimenti@ufabc.edu.br, paulo.farias@ufba.br,
lapo.if@gmail.com, eduardosimas@gmail.com, ribeirodion@gmail.com,
germano.uefs@gmail.com, lfgomez@gmail.com, kemp@ifi.unicamp.br, lmendes@fnal.gov,
gustavo.valdiviesso@gmail.com, swagner@cbpf.br

Abstract— The Neutrinos Angra (ν -Angra) Experiment aims to construct an antineutrinos detection device capable of monitoring the Angra dos Reis nuclear reactor activity. Nuclear reactors are intense sources of antineutrinos, and the thermal power released in the fission process is directly related to the flow rate of these particles. The system proposed in this collaboration considers a detector operating on the surface, next to a nuclear reactor. This condition exposes the detector to a high rate of background noise events, mainly generated by cosmic rays. Therefore, the veto system has a fundamental role in the experiment viability and should be evaluated carefully by our Collaboration. This paper presents the first results related to the characterization and evaluation of the Neutrinos Angra Detector's Veto System.

Keywords— Veto System, Neutrino detectors, Nuclear reactor, Monitoring device.

Resumo— O Experimento Neutrinos Angra (ν -Angra) tem como objetivo a construção de um dispositivo para detecção de antineutrinos ($\bar{\nu}_e$) capaz de monitorar a atividade do reator nuclear de Angra dos Reis. Reatores nucleares são uma fonte intensa de antineutrinos, e a energia térmica liberada no processo de fissão é diretamente relacionada a taxa de fluxo dessas partículas. O sistema proposto por nossa Colaboração considera um detector operando na superfície, ao lado de um reator nuclear. Essa condição faz com que o detector fique exposto a uma grande taxa de eventos de ruído de fundo, gerados principalmente por raios cósmicos. Portanto, o sistema de veto tem um papel fundamental na viabilidade do Experimento e deve portanto ser avaliado criteriosamente por nossa Colaboração. Propomos neste trabalho apresentar os primeiros resultados de caracterização e avaliação do sistema de veto do detector Neutrinos Angra.

Palavras-chave— Sistema de veto, Detector de Neutrinos, Reator nuclear, Dispositivo de monitoramento.

1 Introdução

O objetivo do Experimento Neutrinos Angra (ν -Angra) é desenvolver um detector de superfície compacto capaz de identificar as interações das partículas de antineutrinos provenientes da operação de um reator nuclear (Anjos et al., 2015).

Medindo o fluxo de antineutrinos ($\bar{\nu}_e$) é possível monitorar a atividade do reator e estimar a energia térmica produzida em seu núcleo. Outra intenção da Colaboração Neutrinos Angra é estudar a possibilidade de medir a variação do espectro de energia dos neutrinos durante a queima do combustível nuclear, o que pode ser usado para inferir a composição do combustível do reator.

Uma das particularidades desse detector é o fato de ser um detector de superfície, visto que, comumente detectores de neutrinos são subterrâneos objetivando uma menor sensibilidade aos ruídos oriundos de raios cósmicos, como Goesgen (Zacek et al., 1986), Bugey (Achkar et al., 1995), Chooz (Apollonio et al., 1998), KamLAND (Eguchi et al., 2003) e Palo Verde (Boehm et al., 2001). Um dos desafios em se trabalhar com um detector de superfície recai sobre o sistema de veto, que deve ser altamente eficiente para que os eventos raros de neutrinos possam ser detectados em meio a uma enorme taxa de ruído de fundo.

A assinatura da partícula $\bar{\nu}_e$ é dada pelas características de interação das partículas secundárias ($n + e^+$): o pósitron gera um primeiro sinal e em seguida a interação do nêutron gera um segundo sinal que acontece com um intervalo de poucos microssegundos do primeiro. A relação temporal entre os sinais pode ser usada para identificar os eventos de antineutrinos.

Esse trabalho apresenta os primeiros resultados experimentais referentes às características do sistema de veto do detector Neutrinos Angra a partir da análise de medidas feitas com os vetos superior, inferior e central do experimento realizadas no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) no Rio de Janeiro.

2 O Detector ν -Angra

2.1 Descrição do Detector

O detector ν -Angra será instalado ao lado da cúpula do reator nuclear Angra II, e foi projetado com 4 subsistemas principais: 1) o detector central, equipado com 32 PMTs (do inglês, *Photomultiplier Tube*); 2) o detector externo, que é uma camada adicional que fica em torno das paredes do detector central, equipado com 4 PMTs; 3) *Shielding* lateral, que fica em torno do detector externo e 4) Duas tampas posicionadas abaixo e acima dos detectores, cada um equipado com 4 PMTs. Enquanto que a tarefa de detectar as partículas resultantes do decaimento beta inverso fica a cargo do detector central, os outros dois subsistemas têm a

função de filtrar os raios cósmicos e os ruídos externos de baixa energia, como radioatividade natural, funcionando portanto como sistema de veto. Tanto as tampas, quanto os detectores interno e externos são preenchidos com água, tornando a radiação de Cherenkov (Malone, 2014) o processo principal de medida para as 44 PMTs, sendo todas do mesmo modelo (Hamamatsu R5912).

As dimensões do detector inteiro são $2,75m \times 2,10m \times 2,42m$ e do tanque do detector alvo são $1,50m \times 1,05m \times 1,39m$. A massa do detector alvo proverá uma taxa de interação de neutrinos na ordem de 5.10^3 eventos por dia, considerando uma distancia de $30m$ do centro do reator e $4GW$ de energia térmica. Na Figura 1 encontra-se um esquemático do detector ν -Angra.

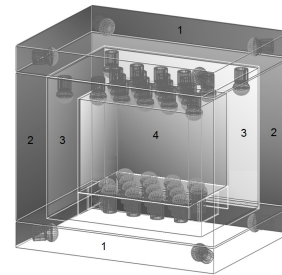


Figura 1: Esquemático do detector ν -Angra. (1) - Vetos superior e inferior, equipados com 4 PMTs cada. (2) - *Shielding* lateral. (3) - Veto Central, equipado com 4 PMTs. (4) - Tanque central (Detector Alvo), equipado com 32 PMTs, metade na parte superior e metade na inferior.

As tampas inferior e o superior, com dimensões $2,75m \times 2,10m \times 0,25m$, foram projetados identicamente, diferenciando-se somente pelo acréscimo de um gradeamento de policarbonato existente na tampa inferior, objetivando um reforço estrutural.

2.2 Síntese da eletrônica

O sistema de leitura do detector ν -Angra, mostrado na Figura 2, em resumo, consiste em: 44 PMTs (12 Veto e 32 Alvo), imersas em água e energizadas por um sistema de Alta Tensão configurado para garantir um ganho de 10^7 elétrons por fotoelétrons para as PMTs; Cada canal do detector é processado individualmente pelo circuito de *front-end*; o sinal analógico proveniente do circuito Amplificador-Modulador é entregue ao módulo de aquisição (NDAQ) para ser digitalizado, processado e mantido em *buffer* enquanto aguarda o sinal de decisão do primeiro nível de filtragem (L1TS); Caso o evento seja aprovado, o NDAQ envia esse dado para o segundo nível de filtragem (L2TS), onde uma decisão mais criteriosa e mais demorada poderá ser efetuada.

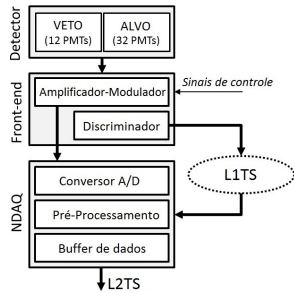


Figura 2: Esquemático do sistema de leitura do detector.

3 Sistema de medidas para a caracterização do sistema de veto

O esquemático da leitura e sistema de filtragem aplicado nas medidas desse artigo é mostrado na Figura 3. Os cabos das 4 PMTs dos vetos foram conectadas as entradas da *front-end*, os sinais de saída da *front-end* são enviados ao módulo NDAQ, onde são digitalizados e enviados a um computador local. Duas pás cintiladoras de medidas com 40cm x 40cm e 1cm de espessura foram posicionadas uma em cima e outra abaixo do veto, com aproximadamente 50cm de distância vertical entre elas (para as tampas), no intuito de produzir a informação de filtragem para os eventos de raios cósmicos. Esses sinais foram enviados a um discriminador e a uma porta lógica configurada para fornecer a coincidência entre os dois cintiladores. O módulo NDAQ foi configurado para digitalizar e armazenar 100 amostras do sinal de entrada a uma taxa de 125 MHz.

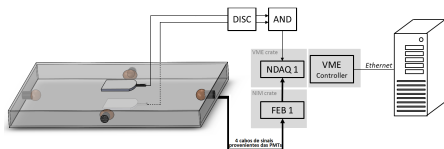


Figura 3: Esquemático do sistema de leitura usado para aquisição de raios cósmicos.

Como os vetos superior e inferior são simétricos, as medidas foram feitas em 3 posições de uma metade do detector, como mostrado na Figura 4, sendo que a posição 3 encontra-se no meio do detector e as posições 1 e 2 são simétricas. A posição 1 está a 48 cm da maior lateral do veto, e a 43 cm da menor lateral, em relação ao centro do cintilador. As posições podem variar em até ± 5 cm.

As medições para o veto central foram feitas em 3 posições. Como mostra a figura 5, para posição 1 foram utilizadas as pás cintiladoras 1 e 2; já para posição 2 foram utilizadas as pás 1 e 3; e a posição 3 utilizou as pás 4 e 2.

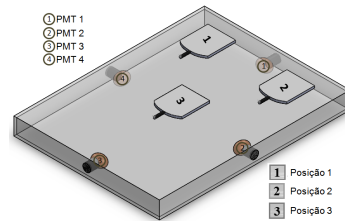


Figura 4: Esquemático das posições dos cintiladores para aquisição dos dados de raios cósmicos no sistema de veto inferior e superior.

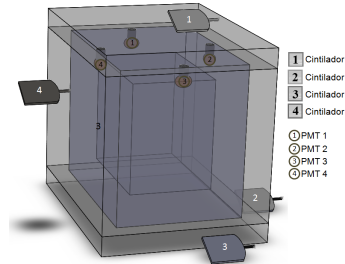


Figura 5: Esquemático das posições dos cintiladores para aquisição dos dados de raios cósmicos no sistema de veto central.

4 Resultados da aquisição de medidas de raios cósmicos

A aquisição dos eventos é coordenada pela coincidência dos sinais gerados pelas pás cintiladoras, que compõem o sistema de filtragem. O objetivo do sistema de filtragem é selecionar os eventos que interagem com as duas pás, como mostra a figura 3. Porém, existem eventos que podem falsear o sistema de filtragem, que serão tratados nesse trabalho como contaminação (formada principalmente por sinais de corrente de escuro). Esse efeito, adiciona um viés negativo no cálculo de eficiência.

A coluna de raios cósmicos na Tabela 1 mostra que o sistema de filtragem usado nas medidas dos vetos inferior e superior funciona a uma taxa acima de 4 mil eventos por 5 minutos enquanto que para o veto central esse sistema trabalha a uma taxa de 103 vezes por 5 minutos. Essa diferença ocorre devido a distância entre as pás ser maior nos testes do veto central, como mostra a figura 5.

Detector	Raios Cósmicos / 5 min	Taxa de Contaminação (%)	Erro
Veto Superior	4537	0,375	+0,225 -0,156
Veto Inferior	4028	0,323	+0,229 -0,151
Veto Central	103	5,825	+6,423 -3,658

Como caracterizado em (Costa et al., 2014), o pico do pulso produzido por uma fotomultiplicadora é linearmente proporcional a quantidade de fótons que interagiram com ela. Ao analisar o sis-

tema de filtragem na posição 1 do veto inferior, como mostra a figura 4, espera-se que a PMT 1 possua a maior energia e a PMT 3 possua menor energia. O padrão para a distribuição de picos dos eventos de sinal na posição 1 apresentado na figura 6 foi verificado em todas as medidas. Este caso, representativo, informa-nos que a PMT 1 possui mais eventos com maiores valores de picos, seguida pela distribuição da PMT4. Por último percebemos que as distribuições que possuem menos energia são as da PMT 2 e 3. A figura 7

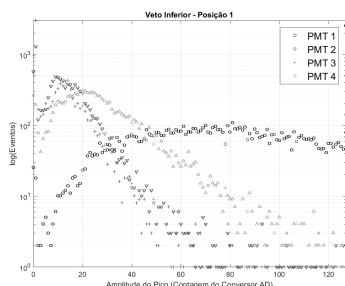


Figura 6: Distribuição de Pico dos eventos de sinal na Posição 1 das pás cintiladoras para as 4 PMTs.

mostra a distribuição de cada posição de acordo com a PMT. Se relacionarmos a PMT 1 com as posições mostradas na figura 4, a distribuição de pico das posições 1 e 2 devem indicar os maiores valores e a posição 3 deve apresentar os menores valores.

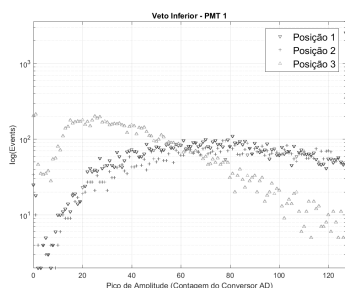


Figura 7: Distribuição de Pico dos eventos na PMT1 para as 3 posições das pás cintiladoras.

Foi avaliada a eficiência dos vetos em relação aos eventos selecionados pelo sistema de filtragem, com os limiares de detecção variando de 0 a 127 ADC. A figura 8 mostra a eficiência das quatro PMTs do veto inferior, na posição 1. Essa figura está relacionada a figura 6, ou seja, as PMTs que possuem maiores valores de pico são detectadas por limiares mais altos, definindo em ordem decrescente as energias e eficiências como: $PMT1 > PMT4 > PMT2 > PMT3$. A figura 9 mostra que ao analisarmos a PMT 1 do veto inferior, as posições 1 e 2 possuem os maiores valores de eficiência e a posição 3 apresenta os piores índices. Esses resultados mostram a eficiência na mesma

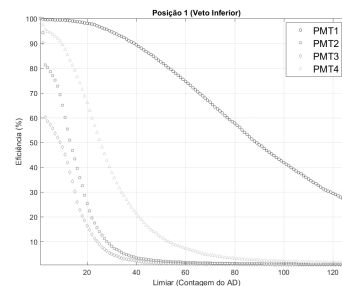


Figura 8: Eficiência de cada PMT na posição 1.

perspectiva da figura 7, obedecendo o mesmo padrão de energia verificado. Nessa figura é possível perceber a sensibilidade da eficiência em relação a posição da pá cintiladora. De acordo com a figura 4, as eficiências das posições 1 e 2 deveriam ser as mesmas, entretanto, na execução prática das medidas pode ter ocorrido um desvio na posição das pás cintiladores, de até 5 cm. A figura 10

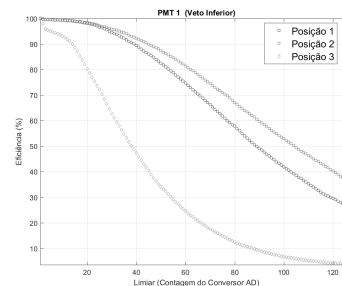


Figura 9: Eficiência em cada posição para PMT1.

representa o comportamento do veto inferior com quatro possíveis configurações, onde cada uma delas representa um requisito mínimo de PMTs disparadas. Devemos analisar essa figura de 3 ADC em diante, visto que o ruído de fundo está compreendido de 0 até 1 na saída do conversor AD. Percebemos que o requisito de ≥ 1 PMT permanece próximo a 100% até $\approx 20ADC$, já o requisito ≥ 2 PMTs está em $\approx 98\%$ até 5 ADC. A seguir

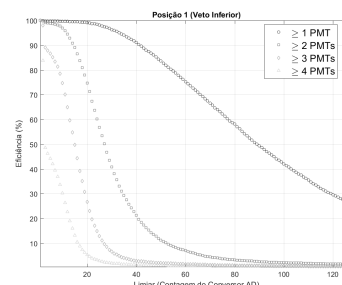


Figura 10: Eficiência verificando o número de PMTs disparadas.

temos as tabelas que contemplam a avaliação de todo o sistema de veto, adotando um limiar de 3

ADC. Nessa etapa é importante salientar que as porcentagens relativas a detecção dos eventos está referenciada no sistema de filtragem. Foi visto na tabela 1 que existe uma contaminação no sistema de filtragem que deve ser considerada ao analisarmos as eficiências das tabelas.

A tabela 2 mostra a eficiência individual de cada PMT de acordo com a posição das pás cintiladoras, no veto superior. Nota-se que as maiores eficiências se encontram na linha da PMT 1, nas colunas das posições 1 e 2. Esse fato se dá pela maior proximidade entre a pá cintiladora e PMT ocorrer nessa ocasião. Analogamente os piores níveis de eficiência se encontram na linha da PMT 3, nas posições 1 e 2. A coluna da posição 3 mostra um maior equilíbrio entre as eficiências, tendendo para um maior valor nas PMTs 2 e 4, devido a posição central das pás cintiladoras e a geometria retangular do veto.

Tabela 2: Veto Superior
Eficiência(%) das PMTs por posição

PMT	Posição		
	1	2	3
1	99,65 ± 0,11 0,14	99,60 ± 0,11 0,15	90,73 ± 0,56 0,59
2	67,27 ± 0,93 0,92	98,67 ± 0,22 0,24	93,69 ± 0,49 0,73
3	45,21 ± 0,98 0,98	36,99 ± 0,96 0,95	83,17 ± 0,75 0,75
4	94,40 ± 0,44 0,47	68,71 ± 0,91 0,92	97,19 ± 0,32 0,34

Os testes realizados no veto inferior estão quantificados na tabela 3. Apesar dos resultados indicarem o mesmo padrão do veto superior, é possível perceber que as eficiências do veto inferior estão maiores. Este fato originou estudos, ora em curso, visando responder o porquê de tais diferenças. Procede-se a análise dos ganhos, a uma avaliação da integridade e de possível diferenças no volume de água dos vetos, e, por fim, a avaliação do efeito causado pela camada de policarbonato do veto inferior.

Tabela 3: Veto Inferior
Eficiência(%) das PMTs por posição

PMT	Posição		
	1	2	3
1	99,55 ± 0,12 0,15	99,52 ± 0,13 0,16	96,46 ± 0,35 0,38
2	80,11 ± 0,78 0,78	95,83 ± 0,41 0,41	99,35 ± 0,18 0,31
3	58,48 ± 0,97 0,43	60,21 ± 0,96 0,84	97,22 ± 0,34 0,16
4	94,67 ± 0,46 0,46	75,51 ± 0,86 0,86	99,21 ± 0,19 0,19

A tabela 4 mostra os testes feitos para o veto central. Como mostra a figura 5, as PMTs do veto central se encontram na parte superior da estrutura e a posição 1 utiliza uma pá no centro do veto, na parte superior, e outra a 10 cm do chão na lateral que possui a PMT 2. Na tabela 4, a coluna da posição 1 mostra que a PMT 2 possui a melhor eficiência, enquanto que a PMT 4, na direção oposta, a pior eficiência. Na posição 2 a pá que se encontra a 10 cm do chão é colocada na lateral que possui a PMT 3, e essa alteração pode ser vista na coluna da posição 2, onde a PMT 3 possui maior eficiência em contraste com PMT1,

na direção oposta. A posição 3 é feita com a pá superior próxima a lateral que possui a PMT4, e a outra pá a 10 cm do chão, perto da lateral da PMT2. Nesse teste as partículas se encontram abaixo do nível das PMTs, embora as eficiências se apresentem mais equalizadas, o máximo de eficiência chega a 92,26% na PMT4.

Tabela 4: Veto Central
Eficiência(%) das PMTs por posição

PMT	Posição		
	1	2	3
1	65,01 ± 1,32 1,34	19,91 ± 0,80 0,78	77,61 ± 1,14 1,17
2	96,36 ± 0,56 0,50	79,65 ± 0,79 0,80	89,67 ± 0,87 0,87
3	89,97 ± 0,82 0,87	96,41 ± 0,36 0,38	87,24 ± 0,90 0,94
4	17,87 ± 1,09 1,05	78,44 ± 0,80 0,82	92,26 ± 0,72 0,77

As tabelas 5, 6 e 7 mostram, de fato, como seria a associação do disparo das 4 PMTs, dos seus respectivos vetos, na detecção de uma determinada partícula, utilizando o mesmo limiar na saída do conversor AD utilizado nas tabelas anteriores, cujo valor foi 3.

Na tabela 5, os testes são feitos no veto superior. Em todas as três posições, com o requisito mínimo de 1 PMT disparada, as eficiências estão acima dos 99% de patamar indicados pela colaboração. Com o requisito mínimo de 2 PMTs, apenas a posição 1 não obteve tal patamar. Porém, devemos considerar que os erros envolvendo a eficiência e a contaminação do sistema de filtragem deixam em aberto essa suposição. Acima de 3 PMTs disparadas a eficiência começa a ser degradada.

Tabela 5: Veto Superior
Eficiência(%) pelo Número de PMTs disparadas

Nº PMTs	Posição		
	1	2	3
≥1	99,72 ± 0,09 0,12	99,65 ± 0,11 0,14	99,49 ± 0,13 0,16
≥2	98,34 ± 0,24 0,27	99,25 ± 0,16 0,19	99,27 ± 0,16 0,19
≥3	78,04 ± 0,81 0,82	78,45 ± 0,80 0,82	95,96 ± 0,38 0,40
=4	30,44 ± 0,91 0,90	26,63 ± 0,88 0,87	70,06 ± 0,90 0,91

A tabela 6 mostra em sua primeira linha que com o disparo de apenas 1 PMT, as 3 Posições possuem eficiência maior do que 99%. Na segunda linha, somente a posição 3 ultrapassa esse patamar, porém ao analisar o valor da contaminação, é provável que todos os valores ultrapassem os 99%. Como visto na tabela 5, a eficiência do veto inferior começa a se degradar com o requisito mínimo de 3 PMTs disparadas. Entretanto, devido ao veto inferior geralmente apresentar melhores eficiências individualmente por PMT em relação a veto superior, essa degradação se apresenta menor.

A tabela 7 mostra que o nível da eficiência do veto central atingiu níveis menores do que os vetos inferior e superior, com o requisito mínimo de 1 PMT. Esse fato pode ser explicado pela tabela 1, que mostra como a taxa de contaminação das medidas do veto central é mais expressiva. Caso a contaminação seja considerada, as eficiências da

Tabela 6: Veto Inferior
Eficiência(%) pelo Número de PMTs disparadas

Nº PMTs	Posição		
	1	2	3
≥ 1	$99,74 \pm 0,09$	$99,67 \pm 0,10$	$99,73 \pm 0,09$
≥ 2	$98,96 \pm 0,12$	$98,97 \pm 0,13$	$99,62 \pm 0,12$
≥ 3	$87,82 \pm 0,19$	$87,38 \pm 0,22$	$99,35 \pm 0,11$
$= 4$	$46,28 \pm 0,63$	$45,04 \pm 0,64$	$93,54 \pm 0,15$

primeira linha da tabela 7 podem ultrapassar os 99% e os da segunda linha os 98%.

Tabela 7: Veto Central
Eficiência(%) pelo Número de PMTs disparadas

Nº PMTs	Posição		
	1	2	3
≥ 1	$97,20 \pm 0,44$	$97,45 \pm 0,30$	$94,22 \pm 0,62$
≥ 2	$94,18 \pm 0,50$	$93,78 \pm 0,33$	$93,01 \pm 0,67$
≥ 3	$64,27 \pm 0,63$	$68,40 \pm 0,47$	$89,67 \pm 0,73$
$= 4$	$13,57 \pm 1,33$	$14,78 \pm 0,91$	$69,90 \pm 0,82$

5 Conclusões

Os testes realizados mostraram uma alta performance ($\approx 99\%$) na detecção de partículas cósmicas pelo sistema de veto do experimento Angra Neutrinos. De acordo com o artigo (Anjos et al., 2015) uma eficiência acima de 99% viabilizaria o funcionamento do experimento Angra-Neutrinos.

Analisando os resultados percebemos que existe uma pequena queda de eficiência ($\approx 1\%$) no veto inferior e superior quando utilizamos o requisito mínimo de 2 PMTs, em relação a 1 PMT, na detecção de partículas. No veto central essa queda é mais acentuada ($\approx 4\%$), o que poderia indicar futuras configurações diferentes entre os vetos.

Foi observado o impacto da contaminação do sistema de filtragem nas eficiências de todos os vetos, apontando para uma justificativa na queda de eficiência global.

Ressalta-se que a análise aqui apresentada foi feita observando os vetos individualmente, entretanto existe a possibilidade de usar uma combinação de mais de um veto simultaneamente com o intuito de aumentar a eficiência final do sistema.

Além da satisfatória avaliação do sistema de veto do experimento, foi possível observar as sensibilidade do sistema em relação a posição das pás cintiladoras, abrindo a possibilidade de novos estudos, buscando uma melhor caracterização do sistema de veto.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado por várias agências de fomento, através de uma série de projetos de financiamento. A Colaboração Angra reconhece o apoio do MCTI, CNPq, FINEP e as seguintes agências de pesquisa estaduais: FAPESP, FAPEMIG e FAPERJ.

Referências

- Achkar, B., Aleksan, R., Avenier, M., Bagieu, G., Bouchez, J., Brissot, R., Cavaignac, J.-F., Collot, J., Cousinou, M., Cussonneau, J.-P. et al. (1995). Search for neutrino oscillations at 15, 40 and 95 meters from a nuclear power reactor at bugey, *Nuclear Physics B* **434**(3): 503–532.
- Anjos, J., Abrahão, T., Alvarenga, T., Andrade, L., Azzi, G., Cerqueira, A., Chimenti, P., Costa, J., Dornelas, T., Farias, P. et al. (2015). Using neutrinos to monitor nuclear reactors: the angra neutrino experiment, simulation and detector status, *Nuclear and Particle Physics Proceedings* **267**: 108–115.
- Apollonio, M., Baldini, A., Bemporad, C., Caffau, E., Cei, F., Declais, Y., De Kerret, H., Dieterle, B., Etenko, A., George, J. et al. (1998). Initial results from the chooz long baseline reactor neutrino oscillation experiment, *Physics Letters B* **420**(3): 397–404.
- Boehm, F., Busenitz, J., Cook, B., Gratta, G., Henrikson, H., Kornis, J., Lawrence, D., Lee, K., McKinny, K., Miller, L. et al. (2001). Final results from the palo verde neutrino oscillation experiment, *Physical Review D* **64**(11): 112001.
- Costa, J. A., Dornelas, T. I., Nobrega, R. A. and Cerqueira, A. S. (2014). Front-end electronics of the neutrinos angra project, *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2014 IEEE International*, IEEE, pp. 1501–1505.
- Eguchi, K., Enomoto, S., Furuno, K., Goldman, J., Hanada, H., Ikeda, H., Ikeda, K., Inoue, K., Ishihara, K., Itoh, W. et al. (2003). First results from kamland: evidence for reactor antineutrino disappearance, *Physical Review Letters* **90**(2): 021802.
- Malone, K. (2014). The high altitude water cherenkov observatory, *Bulletin of the American Physical Society* **59**.
- Zacek, G., Feilitzsch, F. v., Mössbauer, R., Oberauer, L., Zacek, V., Boehm, F., Fisher, P., Gimlett, J., Hahn, A., Henrikson, H. et al. (1986). Neutrino-oscillation experiments at the gösgen nuclear power reactor, *Physical Review D* **34**(9): 2621.