

SISTEMA ONLINE DE SELEÇÃO DE EVENTOS NO DETECTOR NEUTRINOS-ANGRA

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

^{II}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

Email: joaomssouza@gmail.com

Abstract— This work presents the first stage of the online selection of events (trigger) of the Neutrinos Angra detector, which has been designed to measure the antineutrino flux originated from the Angra II nuclear reactor located in the state of Rio de Janeiro, Brazil. The detector is currently installed in the Brazilian Center for Physics Research (CBPF), where functional tests and calibration procedures are being carried out. The first-level trigger system has been developed for FPGA devices and includes additional modules for remote configuration and data acquisition. The architecture and performance tests are presented. The results were obtained by using as target particles the cosmic muons, since the antineutrinos rate at CBPF is very low to be detected. It was possible to automate the data acquisition, so far performed by hand, to calibrate the trigger parameters and coefficients, as well as validate the current proposal based on previous measurements done in a similar scenario.

Keywords— First Level Trigger, High Energy Physics, Remote Data Acquisition, Neutrinos Detector.

Resumo— Este trabalho apresenta o primeiro estágio de seleção *online* de eventos (*trigger*) do detector Neutrinos Angra, o qual foi projetado para medir o fluxo de antineutrinos emitidos pelo reator nuclear Angra II, localizado no estado do Rio de Janeiro, Brasil. Atualmente, o detector está instalado no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), onde vem sendo realizados testes funcionais e procedimentos de calibração. O primeiro nível de *trigger* foi desenvolvido para dispositivos FPGA e inclui módulos adicionais para configuração remota e aquisição de dados. A arquitetura e testes de desempenho são apresentados. Os resultados foram obtidos utilizando-se como partículas alvo os múons cósmicos, visto que a taxa de antineutrinos no CBPF é muito baixa para ser detectada. Foi possível automatizar a aquisição de dados, até então realizada manualmente, calibrar parâmetros e coeficientes de *trigger*, assim como validar a proposta atual com base em medidas anteriores feitas em um cenário semelhante.

Palavras-chave— *Trigger* de Primeiro Nível, Física das Altas Energias, Sistema de Aquisição Remoto, Detector de Neutrinos.

1 Introdução

O Experimento Neutrinos Angra é um projeto brasileiro da física de altas energias que visa detectar e monitorar o fluxo de antineutrinos no reator nuclear da usina de Angra II, no Rio de Janeiro. O princípio básico é utilizar os eventos de antineutrinos gerados

pelo reator para monitorar a potência térmica instantânea liberada e estimar de forma indireta a composição nuclear do material utilizado (Anjos, 2015).

A topologia do experimento Neutrinos Angra, comparada a outros detectores de neutrinos, contém alguns desafios relacionados à seleção de eventos em virtude das restrições impostas ao projeto, como instalação na superfície (Gonzalez, 2009). Estes aspectos geram uma incidência maior de ruído de fundo e

falsos eventos nos transdutores, itens que impactam diretamente nas rotinas de seleção *online* (*trigger*).

O presente trabalho tem como objetivo o projeto da eletrônica digital de *trigger* de primeiro nível (*Level 1* ou *L1*) e da aquisição de dados remotos do detector Neutrinos Angra. O módulo *trigger L1* é responsável por coletar os sinais discriminados do *front-end*, avaliar as condições de veto e indicar o instante de aquisição dos sinais. Para atender às restrições de tempo de resposta inerentes à aplicação (em nanossegundos), o sistema foi implementado em *field programmable gate array* (FPGA).

Este documento está organizado da seguinte forma: *Seção 2* - introdução sobre tipos de *trigger*; *Seção 3* - contextualização do detector Neutrinos Angra; *Seção 4* - proposta dos sistemas de *trigger* e aquisição; e *Seção 5* - resultados preliminares.

2 Sistemas de *Trigger* em Física de Altas Energias

Na física de altas energias, os sistemas de *trigger* têm importância significativa na identificação e seleção *online* de eventos de interesse, a partir da observação dos mais variados fenômenos físicos; por exemplo, como fissão nuclear e aceleração de partículas (Watts, 2003). Estes sistemas utilizam níveis hierárquicos de seleção, isto é, quando uma condição é satisfeita em um certo nível, os sinais são disponibilizados para o nível seguinte. Os primeiros níveis são realizados em *hardware*, devido à necessidade de ações rápidas, em nanossegundos (Simas, 2010).

No experimento de neutrinos Super-Kamiokande é, por exemplo, utilizado um *trigger* com janela periódica, onde é verificado se o evento de neutrino ocorreu de acordo com uma janela definida (Nishino, 2007). No detector Double Chooz, o *trigger* é determinado quando os sinais das *Photomultiplier Tubes* (PMTs) estão de acordo com duas condições simultâneas: energia e multiplicidade. Na energia, é verificado se o sinal corresponde às faixas de múons, neutrinos ou antineutrinos. Para a multiplicidade, existem três estágios: (1) discriminação dos sinais analógicos em grupos através de patamar inferior e superior; (2) contagem da quantidade de grupos ativos; (3) comparação da quantidade de grupos ativos através de *threshold* (Beissel, 2014).

No experimento Daya Bay, o *trigger* ocorre se a energia depositada for correspondente a determinadas faixas ou se atingir os critérios de multiplicidade (Ji, 2008). Nos detectores RENO (Ahn, 2012) e Borexino (Alimonti, 2009), o *trigger* é determinado somente utilizando o critério da multiplicidade.

3 Projeto Neutrinos Angra

O sistema de detecção do experimento Neutrinos Angra é baseado na técnica de detecção de radiação Cherenkov em água. No total, foram utilizados apro-

ximadamente 1,03 tonelada de água dopada com gadolínio (concentração de 0,3%), que colabora com a captura de nêutrons, que irão gerar fótons detectáveis. Quando o neutrino interage com os prótons da água, gera-se um pósitron e um nêutron. O pósitron é gerado com energia entre 1 MeV e 12 MeV, sendo facilmente detectável por se tratar de uma partícula carregada e estar em velocidade superior à da luz no meio, gerando luz Cherenkov. Já o nêutron é capturado pelo gadolínio e, na desexcitação, libera radiação gama totalizando 8 MeV (Gonzalez, 2009; Gamma, 2009; Alvarenga, 2013).

A amostragem dos sinais oriundos dos eventos Cherenkov na água é realizada por PMTs (Costa, 2014). O detector, após confecção e validação em laboratório, será disposto acima do solo, num contêiner ao lado do reator, conforme ilustrado na Figura 1 (Gonzalez, 2009).



Figura 1 - Container do detector de neutrinos ao lado do reator da usina nuclear de Angra II (Anjos, 2015).

Comumente, os detectores de neutrinos são instalados a dezenas de metros de profundidade, tais como os experimentos Double Chooz (Beissel, 2014), Daya Bay (Ji, 2008), e Super Kamiokande (Nishino, 2007), com o objetivo de utilizar o solo como blindagem natural contra interferências e ruído de fundo, oriundo de partículas de radiação cósmica.

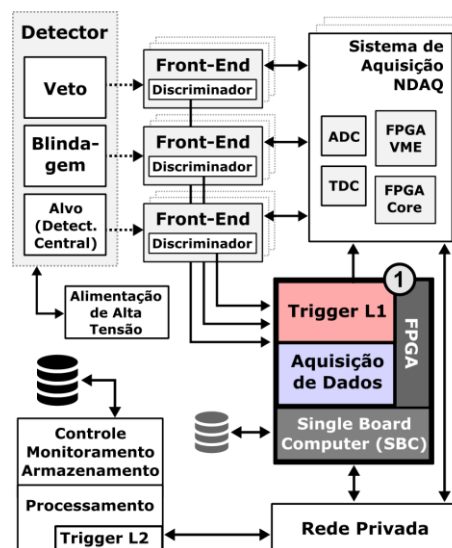


Figura 2 - Módulos do Experimento Neutrinos Angra.

Para mitigar tais interferências, no experimento Neutrinos Angra, fez-se necessário o uso de sistemas auxiliares para identificação e bloqueio destas interferências e ruído de fundo, chamados de blindagem e veto (Alvarenga, 2009). Na Figura 2 são ilustrados os principais módulos do experimento, o *Item 1* em des-

taque corresponde ao *trigger*, objeto de estudo deste trabalho.

O detector é formado por 44 PMTs polarizadas pelo sistema de alta tensão e distribuídas nos grupos, conforme Figura 3: (1) *Detector Central (Alvo)*: 32 PMTs para identificação dos antineutrinos, 16 na tampa superior e 16 na inferior; (2) *Sistema de Veto Externo*: 8 PMTs, 4 superiores e 4 inferiores; (3) *Sistema de Blindagem Ativa (Shield)*: 4 PMTs na lateral do volume externo ao alvo (Anjos, 2015).

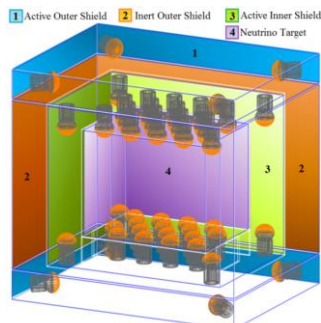


Figura 3 - Disposição das PMTs do detector Neutrinos Angra (Anjos, 2015).

Os sinais analógicos de assinatura de um neutrino nas PMTs têm duração em torno de 4 ns, o que inviabiliza a aquisição direta pelos módulos desenvolvidos para o experimento o *Neutrinos Data Acquisition* (NDAQ), o qual trabalha com taxa de amostragem de 125 MHz (Gama, 2009). Deste modo, foram projetados módulos eletrônicos de *front-end* para condicionar o sinal e deixá-lo com duração em torno de 200 ns (Dornelas, 2015). O *front-end* contém duas funcionalidades: (1) condicionar e amplificar o sinal analógico para o NDAQ; (2) discriminar o sinal analógico a partir de um patamar ajustável e prover para o sistema de *trigger* um sinal digital (DC) de duração proporcional à energia do sinal analógico (Costa, 2014; Dornelas, 2015). Na Figura 4 são ilustrados os comportamentos dos parâmetros, sinais de entrada e saída do *front-end*.

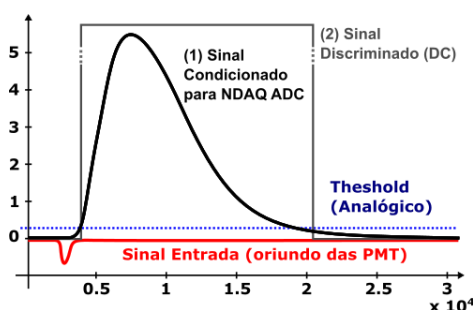


Figura 4 - Formato dos sinais de entrada e saída do *front-end*.

4. Sistema Eletrônico Proposto

Este trabalho enfatiza o projeto eletrônico e resultados de uma proposta de sistema de *trigger* de primeiro nível para o detector Neutrinos Angra e também aborda os módulos para configuração, aquisição e transmissão de dados remotos.

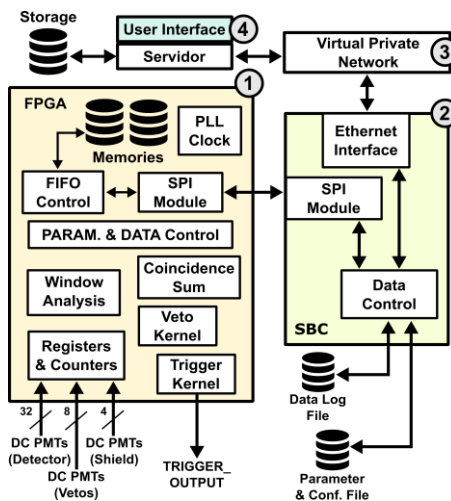


Figura 5 - Diagrama de blocos do sistema de *trigger*.

Os sistemas de *trigger*/aquisição fazem uso de FPGA e os de transmissão/configuração de um módulo *Single Board Computer* (SBC), responsável por realizar a interface entre o FPGA e um servidor remoto. Na Figura 5, são apresentados os detalhes dos módulos desenvolvidos, os itens enumerados correspondem a: (1) Módulos FPGA; (2) Módulos SBC; (3) Rede Privada; (4) *User Interface*, com terminal para configurações/manipulação dos dados.

4.1 Sistema de Trigger de Primeiro Nível

O sistema de *trigger* de primeiro nível do detector Neutrinos Angra tem a função de avaliar os sinais discriminados do detector central (32 canais), blindagem (4 canais) e veto (8 canais). Ao final, o sistema deve indicar a ocorrência de um evento de interesse para os NDAQs. Os NDAQs realizam a aquisição analógica de uma janela de 800ns, onde 160ns (20%) corresponde às amostras anteriores ao sinal de *trigger* e 640ns (80%) correspondem às posteriores (Gama, 2009).

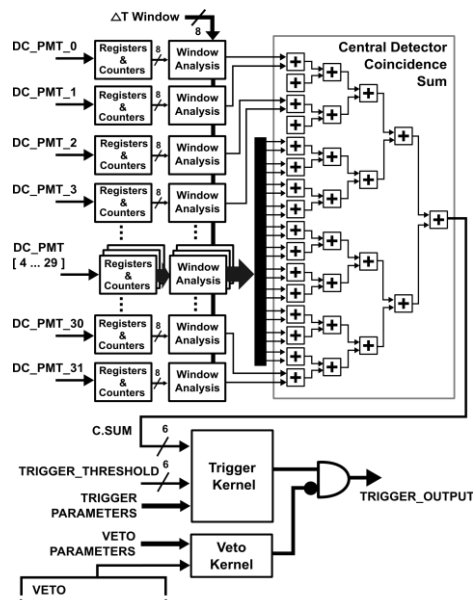


Figura 6 - Arquitetura base do sistema de *trigger*.

O sistema de decisões de *trigger* proposto faz uso de uma abordagem baseada nos critérios da multiplicidade, similar aos princípios dos experimentos RENO (Ahn, 2012), Borexino (Alimonti, 2009) e Double Chooz (Beissel, 2014). Nesta abordagem, o estágio da discriminação analógica é realizado pela eletrônica de *front-end* e os demais, responsáveis pelas funções de *trigger*, são realizados pelos módulos apresentados na arquitetura da Figura 6.

Os sinais discriminados pelo *front-end*, conforme Figura 6, passam por um banco de registradores (para evitar metaestabilidade) e tem durações atribuídas de acordo com contadores do módulo *Registers & Counters*. As entradas (Item 1) e saídas (Item 2) deste módulo são ilustradas na Figura 7.

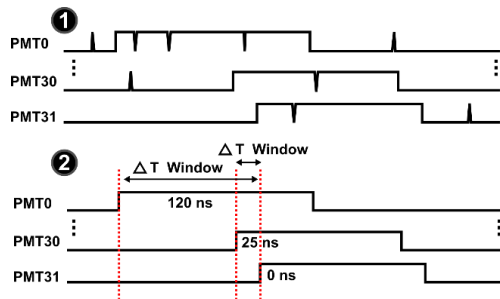


Figura 7 - Entradas (Item 1) e respectivas Saídas (Item 2) do Módulo *Registers & Counters*.

No módulo *Window Analysis*, os sinais das PMTs (oriundos do *Registers & Counters*) que tiverem duração maior que o parâmetro ΔT Window são descartados, conforme ilustrado no Item 1 da Figura 8. O uso do módulo *Window Analysis* garante que os sinais que vão para a análise de *trigger* pertençam ao mesmo evento. Se eles estiverem fora do ΔT é assumido que correspondem a uma reflexão ou pertencem a um outro evento (posterior ou anterior).

O módulo *Coincidence Sum* conta quantos sinais das PMTs estão ativos simultaneamente, conforme ilustrado no Item 2 da Figura 8. No módulo *Trigger Kernel*, o resultado da contagem é comparado com um patamar (*threshold*) parametrizável pelo usuário. Logo, caso a contagem seja maior ou igual ao *threshold* definido, um sinal de *trigger* interno é gerado.

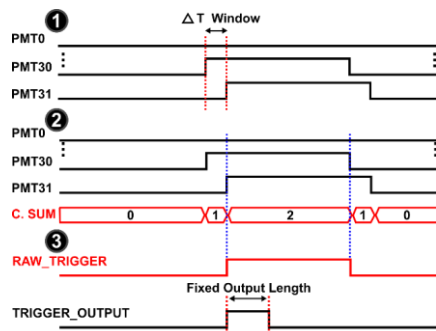


Figura 8 - Sinais de entradas e saídas dos módulos *Window Analysis* e *Trigger Kernel*.

Com base no sinal de *trigger* interno e nos parâmetros do sistema (Tabela 1) é definida uma saída de

tamanho fixo, conforme Item 3 da Figura 8. De acordo com o projeto NDAQ, os sinais de *trigger* recebidos devem ter uma duração padrão em torno de 50 ns para melhor funcionamento das máquinas de estado internas da *FPGA Core* (Gama, 2009).

A análise das condições das PMTs dos Vetos (Superior, Inferior e Blindagem) ocorre de forma similar as do *trigger* do detector central, descritas anteriormente, através do módulo *Veto Kernel* que tem a função de bloquear a saída principal de *trigger* conforme Figura 6.

4.2 Transmissão Remota de Dados de Trigger

Na comunicação remota com o sistema de *trigger* existem basicamente duas atividades: (1) Configuração de parâmetros do usuário, via terminal, para o sistema de *trigger* e (2) Transmissão de *Log* de eventos de *trigger* para o servidor. Os principais parâmetros são relacionados às configurações dos sistemas de *trigger* e *veto*, descritos na Tabela 1. Quando ocorre um evento de *trigger* do detector central, a função de *log* é ativada e as informações dos sinais discriminados das PMTs são armazenadas em um *buffer* para posterior envio via rede privada (ver Figura 5).

Tabela 1 - Parâmetros de configuração do sistema de *trigger*.

Nome	Funcionalidade
<i>THRESHOLD_TRIGGER</i>	Patamar de coincidências para determinar <i>trigger</i> do detector.
$\Delta T_WINDOW_TRIGGER$	Janela de tolerância para considerar sinais do mesmo evento.
<i>FIXED_OUT_TRIGGER</i>	Duração da saída fixa de <i>trigger</i> principal.
<i>THRESHOLD_VETO</i>	Limite inferior de coincidências para determinação do <i>veto</i> .
ΔT_WINDOW_VETO	Janela para considerar sinais do mesmo evento de <i>veto</i> .
<i>LOCK_WINDOW_VETO</i>	Janela de bloqueio de <i>trigger</i> após ocorrer um evento de <i>veto</i> .

No arquivo *log* são gravados dados básicos dos sinais para que seja possível, após uma sequência de aquisições, reconstruir as formas de onda no terminal do usuário através de ferramentas de simulação, como MATLAB.

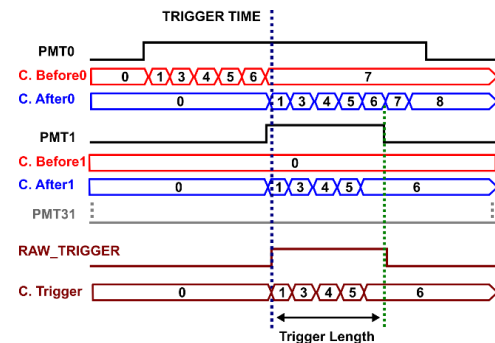


Figura 9 - Funcionamento base do *log* de dados.

Com base nesta estratégia, para cada PMT avaliada foram colocados dois contadores, um para medir a

duração do sinal antes do *trigger* (*before*) e outro para depois (*after*), como indicado na Figura 9. Na reconstrução do sinal, os valores destes contadores determinam a duração dos sinais em nanossegundos, por meio da multiplicação do valor do contador e do período de *clock* do sistema FPGA.

Também são gravados no *log* a duração do sinal de *trigger* interno, o instante absoluto de tempo do evento (sincronizado com o servidor do experimento) e os valores dos parâmetros utilizados na aquisição, conforme Tabela 1. Os dados de *log* são coletados do FPGA pelo SBC através da interface SPI, salvos em uma memória local e então, transferidos para o servidor remoto, Figura 5.

5 Resultados

O detector e parte da aquisição de dados do experimento Neutrinos Angra estão montados no laboratório do CBPF para testes e calibrações. Como o CBPF está localizado a dezenas de quilômetros do reator de Angra II, a taxa de antineutrinos é muito abaixo do mínimo necessário para sua detecção. Por esta razão, para a execução dos testes do sistema de *trigger* e detecção, as PMTs e *front-ends* do experimento foram ajustadas para detectar múons cósmicos. Os resultados apresentados a seguir foram obtidos a partir de experimentos de *trigger* com uso dos critérios da multiplicidade e com base nos sinais dos *font-ends* das 32 PMTs do detector central.

Para os testes do projeto foi utilizado o kit FPGA Altera DE-2, com *clock* de 200 MHz (a partir de PLL interna) e o *Raspberry PI B+* como SBC. O *clock* de 200 MHz do FPGA delimita a resolução de aquisição realizada no sistema de *log* em 5 ns.

Nos testes, o sistema de *front-end* do detector central foi calibrado para aquisição de múons, com patamar do discriminador analógico igual a 100 mV e as PMT's foram polarizadas para ganho 10^7 (Anjos, 2015). Para o *trigger*, foram definidas uma saída fixa de 50 ns e uma janela (ΔT) de tolerância de 100 ns.

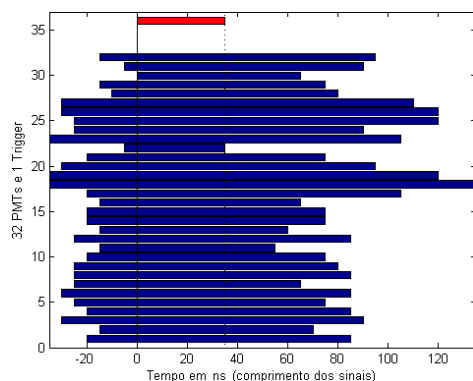


Figura 10 - Evento de *trigger* com *threshold* igual a 32.

Na Figura 10 é ilustrado o resultado de um evento de *trigger*, reconstituído no MATLAB com base no arquivo de *log*. Este evento pertence a um conjunto de 2.612 eventos que ocorreram em uma rodada de

coleta de sinais de 60 segundos considerando coincidência (*threshold*) de 32 PMTs.

No gráfico da Figura 10, o *Eixo y* representa os índices das 32 PMTs e o sinal de *trigger* interno (no topo da imagem), as barras horizontais são as respectivas durações (em ns) dos sinais das PMTs e o instante 0 do *Eixo x* corresponde ao momento de ativação do *trigger*.

Para *threshold* de 32 PMTs, foram realizadas 4 rodadas de aquisições, com uma duração total de 240 segundos, que geraram 10.976 eventos de *trigger* de múons. A distribuição das durações dos sinais de *trigger* destas rodadas é apresentada na Figura 11.

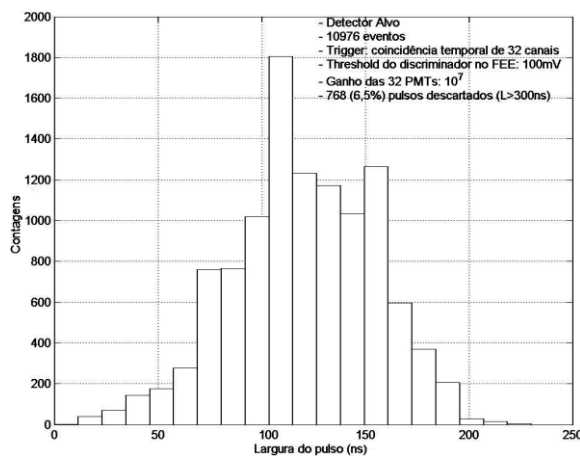


Figura 11 - Histograma da Duração dos Pulsos de 10976 eventos com *threshold* igual a 32.

A duração média obtida a partir do sistema de aquisição remoto desenvolvido foi de 115 ns, valor próximo aos resultados obtidos anteriormente de pulsos médios de múons, que tiveram aproximadamente 130 ns (Dornelas, 2015).

Com o sistema de aquisição de dados associado ao *trigger* também foi possível estimar as frequências de eventos de múons para diversos valores de *threshold* entre as PMTs, conforme apresentado na Figura 12. Os resultados até 16 PMTs estão em coerência com os dados previamente publicados pelo CBPF (Dornelas, 2015). Os resultados para *thresholds* entre 18 a 32 foram obtidos pela primeira vez neste trabalho.

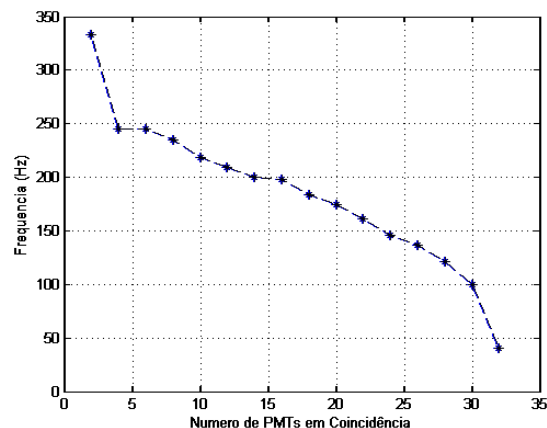


Figura 12 - Frequência de eventos para diferentes *threshold* de PMTs.

De modo similar, na Figura 13 são ilustrados os resultados das PMTs que participaram de um evento de *trigger*, com *threshold* igual a 18. A rodada que gerou o resultado da Figura 13 teve 32.688 eventos e durou 30 segundos.

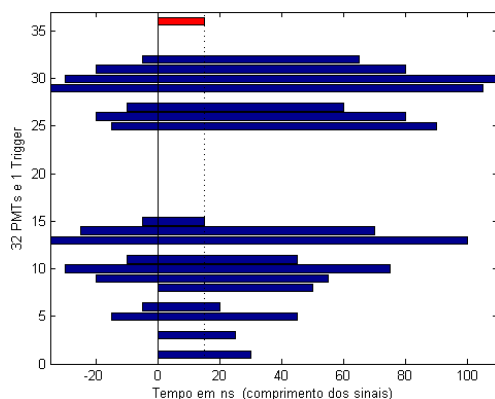


Figura 13 - Evento de *trigger* com *threshold* igual a 18.

A partir da observação dos resultados mostrados na Figura 10 e Figura 13 é possível observar que os sinais das PMTs iniciam em até 40 ns antes do *trigger*, valor consistente com o limite de 100 ns aplicado no parâmetro $\Delta T_{Window_Trigger}$.

O circuito digital dos sistemas de *trigger* e aquisição de dados no kit FPGA Altera DE-2 foi projetado utilizando a linguagem de descrição de hardware *Verilog* e de forma resumida, teve os seguintes resultados: 5.350 (16% do kit FPGA) elementos lógicos; 4.664 (14%) funções combinacionais; 3.624 (11%) registradores; 104 (22%) pinos de I/O; 327.680 (68%) bits de memória dedicada; 1 (25%) PLL.

6 Conclusões

De acordo com as informações apresentadas neste trabalho foi possível observar a relevância do sistema de *trigger* de primeiro nível, com uso de critérios de multiplicidade para a integração do experimento Neutrinos Angra. Com o sistema desenvolvido também foi viável testar o experimento contemplando pela primeira vez os 32 canais de PMTs do detector central e avaliar o comportamento das frequências dos eventos para diversos valores de *threshold*.

Em resumo, os resultados das durações dos eventos obtidos com o sistema de aquisição remota associado ao *trigger* foram condizentes com os previamente realizados com múons e com a resolução adotada no FPGA.

De modo a obter uma melhor adequação do sistema de *trigger* para sinais de antineutrinos, quando o experimento for transferido para o container em Angra II, ainda faz-se necessário aperfeiçoar os parâmetros de configuração, através de simulações e projetar o sistema de calibração/parametrização automático. Estes itens e o sistema de *trigger* baseado nos critérios da energia dos sinais dos antineutrinos estão em estudo e desenvolvimento na UFBA e no CBPF.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESB pelo apoio financeiro e à Colaboração Neutrinos Angra pelas contribuições a este trabalho.

Referências

- Ahn, J. et al., 2012. Observation of Reactor Electron Antineutrino Disappearance in the RENO Experiment, *Phys. Rev. Lett.* 108, 191802.
- Alimonti, G., et al., 2009. The Borexino detector at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso, *Nucl. Instrum. Meth. A* 600 568.
- Alvarenga, T. A., 2013. Simulação da Interação de Partículas no Detector Central e dos Sinais Elétricos Gerados pela Eletrônica de Leitura no Projeto Neutrinos Angra. Juiz de Fora - Minas Gerais - Brasil. Dissertação de Mestrado.
- Anjos, J.C., et al, 2015. Using Neutrinos to Monitor Nuclear Reactors: The Angra Neutrino Experiment. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*, v. 267-269, p. 108-115.
- Beissel, F., et al, 2014. The trigger and timing system of the Double Chooz experiment. *J. Instrum.* 8(01), T01003. Publishing and Sissa Medialab.
- Costa, J.A.; Dornelas, T.I.; Nobrega, R.A.; Cerqueira, A.S., 2014. Front-end electronics of the Neutrinos Angra Project. *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. IEEE International, p. 1501-1505.
- Dornelas, T. I., 2015. Medidas de caracterização do sensor, da eletrônica de Leitura e do detector alvo do projeto Neutrinos-Angra. Juiz de Fora - Minas Gerais - Brasil. Dissertação de Mestrado.
- Gama, R. G., 2009. Desenvolvimento de instrumentação baseada em lógica programável para aquisição de dados no Projeto Neutrinos Angra, R. J. - Brasil. Dissertação de Mestrado.
- Gonzalez, L. F. G., 2009. Estudo da Resolução em Energia do Detector de Neutrinos do Projeto ANGRA para Medidas de Composição do Combustível Nuclear. Campinas - São Paulo - Brasil. Dissertação de Mestrado.
- Ji, X. et al., 2008. Research and design of daq system for daya bay reactor neutrino experiment. In: *IEEE. Nuclear Science Symposium Conference Record. NSS'08. IEEE.* p. 2119-2121.
- Nishino, H. et al., 2007. Development of new front-end electronics for Super-kamiokande. *IEEE. Real-Time Conference*, 15th. [S.l.], p. 1-5.
- Simas, E. F., 2010. Análise Não-Linear de Componentes Independentes para uma Filtragem Online Baseada em Calorimetria de Alta Energia e com Fina Segmentação. Rio de Janeiro - Brasil. Tese de Doutorado UFRJ.
- Watts, G., 2003. Review of Triggering. *Proceedings of the IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*, v. 1, pp. 282-287, Portland, EUA.