

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Antônio Fernandes Júnior

Estudo da qualidade e estabilidade dos dados do Experimento ν -Angra

Juiz de Fora

2022

Antônio Fernandes Júnior

Estudo da qualidade e estabilidade dos dados do Experimento ν -Angra

Dissertação apresentada ao MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Processamento de Sinais

Orientador: Prof. Dr. Rafael Antunes Nóbrega

Coorientador: Dr. David de Melo Souza

Juiz de Fora

2022

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Sobrenome, Nome do autor.

Título : subtítulo / Autor. – Ano.

23 f. : il.

Orientador: Nome e sobrenome

Coorientador: Nome e sobrenome

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade

X. Nome do Curso ou Programa, Ano.

1. Palavra-chave. 2. Palavra-chave. 3. Palavra-chave. I. Sobrenome,
Nome do orientador, orient. II. Título.

Antônio Fernandes Júnior

Estudo da qualidade e estabilidade dos dados do experimento v-Angra

Dissertação
apresentada ao
Programa de Pós-
Graduação em
Engenharia Elétrica
da Universidade
Federal de Juiz de Fora
como requisito parcial
à obtenção do título de
Mestre em Engenharia
Elétrica. Área de
concentração: Sistemas
Eletrônicos

Aprovada em 23 de setembro de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rafael Antunes Nóbrega - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr. Davi de Souza Melo

Empresa WEG

Prof. Dr. Augusto Santiago Cerqueira

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Ernesto Kemp

Universidade Estadual de Campinas

Juiz de Fora, 14/09/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Ernesto Kemp, Usuário Externo**, em 26/09/2022, às 10:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Antunes Nobrega, Vice-Chefe de Departamento**, em 23/12/2022, às 10:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **David de Melo Souza, Usuário Externo**, em 23/12/2022, às 13:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Augusto Santiago Cerqueira, Professor(a)**, em 26/12/2022, às 09:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **0949566** e o código CRC **1E8A727A**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais Maria das Dores Gonçalves Fernandes e Antônio Fernandes que me apoiaram nessa minha trajetória. E sempre espero conseguir levar a herança do meu pai que morreu em 2012, de sempre buscar o conhecimento e ter fé na ciência. Também agradeço aos meus irmãos pelo companheirismo dado em toda minha vida.

Devo agradecer ao meu orientador Rafael Antunes Nóbrega em que desde o começo da sua orientação, me acarretou em grandes ensinamentos profissionais e pessoais. E sempre serei grato por todo tempo que foi dedicado ao compartilhar os seus conhecimentos sobre o mundo da engenharia e da física, e acima de tudo por sua amizade.

Também agradecer aos meus amigos que fiz no laboratório, Guilherme, Tiago, Igor Abritta, Igor Pains, Mariana, Amaro, Felipe, Alan, Marcelo Paschoal, Luan, Carlos Amorim e Rafael Fusário, que me ajudaram a levar essa caminhada de forma mais leve e de maneira bem divertida. Sobre o Davi, devo destacar o meu agradecimento por ser o meu coorientador no meu trabalho de conclusão de curso e no meu Mestrado, e ao todo tempo dedicado ao compartilhar os seus conhecimentos.

Aos pesquisadores Ernesto Kemp (UNICAMP) e Luiz Fernando (UNICAMP) devo agradecer toda ajuda ,ensinamentos, apoio e soluções dadas nas reuniões do experimento e fora delas. E claro, agradeço a todos os colegas que participaram destas reuniões, compartilhando as suas pesquisa.

Para a minha namorada Nathalia Oliveira Silva, sempre serei eternamente grato por todo carinho, amor e apoio nestes 5 anos de namoro. Por todas idas aos cinemas, lanches, sobremesas e viagens e aos melhores momentos do mundo.

E aos meus amigos que fiz nesta trajetória desde a graduação, aos professores e ao ramo estudantil, deixo o meu eterno obrigado por fazerem parte da minha história.

Finalmente, agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), Universidade Federal de Juiz de Fora e à Faculdade de Engenharia por todo o suporte dado para realização deste trabalho.

RESUMO

O experimento Neutrinos Angra tem como objetivos medir a potência dissipada no reator de Angra II através da leitura do fluxo de antineutrinos liberados no processo de queima do combustível nuclear e detectar qualquer emissão de radiação anômala que possa ocorrer ao redor das instalações do reator para fins de salvaguarda de material nuclear. Para isso, foi projetado e desenvolvido um detector de partículas baseado em água dopada de gadolínio, equipado com 40 tubos fotomultiplicadores para leitura dos sinais luminosos deixados por partículas que interagem em seu interior. Além do detector, um sistema completo composto de eletrônica de leitura e aquisição de sinal (um canal de leitura por tubo fotomultiplicador), módulos de controle e armazenamento de dados foram também desenvolvidos.

O detector está operando no sítio de Angra II, desde o segundo semestre do ano de 2018. O sistema de detecção, após instalado, entrou na fase de comissionamento onde passou a necessitar de ferramentas que auxiliasse nos ajustes de parâmetros, medidas de suas características e monitoramento a fim de garantir a qualidade dos dados coletados ao longo dos anos. Nesse contexto, essa Dissertação teve como objetivo propor ferramentas importantes com o intuito de auxiliar nos ajustes de parâmetros fundamentais do sistema como os limiares dos discriminadores dos canais da eletrônica de leitura, usados para detectar quando um tubo fotomultiplicador é atingido por algum evento, e os ganhos dos tubos fotomultiplicadores, assim como propiciar ferramentas de monitoramento de parâmetros, que além desses citados anteriormente, incluem também o pedestal e forma de onda dos sinais, e a distribuição de energia de cada um dos canais de leitura. Ao final da Dissertação, os dados coletados durante os anos de 2019, 2020 e 2021 são analisados e os períodos de estabilidade/instabilidade do detector identificados.

Palavras-chave: Antineutrinos, projeto Neutrinos Angra, salvaguardas nucleares, qualidade dos dados, estabilidade de detectores.

ABSTRACT

The Neutrinos Angra experiment aims to measure the dissipated power in the Angra II reactor by reading the flow of antineutrinos released in the process of burning nuclear fuel and detect any emission of anomalous radiation that may occur around the reactor facilities for the purpose of Nuclear safeguards.

For this purpose, a particle detector based on gadolinium-doped water equipped with 40 photomultipliers was designed and developed to read the light signals left by the particles that interact inside it. In addition to the detector, a complete system was developed, comprising electronics for reading and acquiring signals (one reading channel per photomultiplier tube), control modules and data storage.

The detector has been operating at the Angra II site since the second half of 2018. Its acquisition system, after installed, required tools to help adjust parameters, understand its characteristics and monitor it in order to guarantee the quality of the data collected over the years.

In this context, this Dissertation aimed to propose important tools in order to assist in the tuning of fundamental parameters of the system, such as the thresholds of the discriminators of the electronic reading channels, used to detect when a photomultiplier tube is hit by an event, and the gains of the photomultipliers tubes, in addition to providing parameter monitoring tools, for the pedestal, the waveform of the signal and the energy distribution of each channels. The data collected during 2019, 2020 and 2021 were analyzed and the periods of stability/instability of the detector identified.

Keywords: Antineutrinos, project Neutrinos Angra, nuclear safeguards, data quality, detector stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização do laboratório-contêiner	20
Figura 2 – Estrutura do detector ν -Angra	23
Figura 3 – Esquemático do sistema de medidas ν -Angra	25
Figura 4 – Rack contendo a eletrônica de aquisição	25
Figura 5 – Esquemático - de um fotomultiplicadora	26
Figura 6 – Ganho da fotomultiplicadora R5912/-100	27
Figura 7 – Esquemático do circuito <i>PMTs</i>	27
Figura 8 – Esquemático da <i>FEE</i>	28
Figura 9 – Circuito da <i>FEE</i> - frente (figura a esquerda) e verso (figura a direita) .	29
Figura 10 – Módulo NDAQ	30
Figura 11 – Esquemático do Trigger	31
Figura 12 – Valores dos <i>thresholds</i> em cada período	33
Figura 13 – Exemplo dos sinais que provem do sistema de medidas.	34
Figura 14 – Medida de pedestal dos sinais	37
Figura 15 – Figura a esquerda <i>outliers</i> do caso 1 e a direita é do caso 2	37
Figura 16 – Carga x Amplitude para os casos de remoção de pedestal	38
Figura 17 – Mais de um sinal por janela	38
Figura 18 – Posição da amplitude de pico x o seu valor	39
Figura 19 – Comparação da medida de carga e amplitude de pico entre o algoritmo proposto e os Casos 1 (esquerda) e 2 (direita)	40
Figura 20 – Valores de pedestal após 3 intervenções no sistema	41
Figura 21 – Diferença entre cada curva modelada e o médio	43
Figura 22 – Sinal médio e o formato padrão do sinal encontrado	44
Figura 23 – Valores de correlação medidos para cada deslocamento do sinal (es- querda) e sinal coletado em um dos canais sincronizado com o sinal de referência	44
Figura 24 – Medida de correlação de dois canais	45
Figura 25 – Relação entre amplitude de pico e a correção	45
Figura 26 – Exemplo de sinais com amplitude de pico < 20 <i>ADC counts</i>	46
Figura 27 – Comparando a medida de correlação entre dois canais	46
Figura 28 – Sinais médios com amplitude indo de 110 a 160 contagens de ADC. . .	47
Figura 29 – Exemplo de três canais com ajuste baseado na Equação (5.8).	49
Figura 30 – Relação entre n x Y	50
Figura 31 – Valores de Q e σ_1	50
Figura 32 – Tensão de alimentação x Q	51
Figura 33 – Figura a esquerda coeficiente angular de cada canal e a direita é o linear	52
Figura 34 – Novos valores de Q	52

Figura 35 – Medida de cargas nos períodos 1 e 2 para dois canais do <i>Target</i>	53
Figura 36 – Probabilidade de se obter um evento que passou de um <i>thresholds</i>	54
Figura 37 – Amplitude de pico de um canal do veto central à esquerda e de um canal do veto lateral à direita	54
Figura 38 – Monitoramento temporal do pedestal de cada canal do <i>Target</i> no ano de 2019.	55
Figura 39 – Monitoramento temporal do pedestal de cada canal do <i>Veto</i> no ano de 2019.	56
Figura 40 – Monitoramento temporal do pedestal de cada canal do <i>Target</i> no ano de 2020.	56
Figura 41 – Monitoramento temporal do pedestal de cada canal do <i>Veto</i> no ano de 2020.	57
Figura 42 – Monitoramento temporal do pedestal de cada canal do <i>Target</i> no ano de 2021.	57
Figura 43 – Monitoramento temporal do pedestal de cada canal do <i>Veto</i> no ano de 2021.	58
Figura 44 – Monitoramento temporal da correlação dos canais do <i>Target</i>	58
Figura 45 – Monitoramento temporal da correlação dos canais do <i>Veto</i>	59
Figura 46 – Monitoramento dos ganhos das <i>PMTs</i> no ano de 2019 para os canais do <i>Target</i>	60
Figura 47 – Monitoramento dos ganhos das <i>PMTs</i> no ano de 2019 para os canais do <i>Veto</i>	60
Figura 48 – Monitoramento dos ganhos das <i>PMTs</i> no ano de 2020 para os canais do <i>Target</i>	61
Figura 49 – Monitoramento dos ganhos das <i>PMTs</i> no ano de 2020 para os canais do <i>Veto</i>	61
Figura 50 – Monitoramento dos ganhos das <i>PMTs</i> no ano de 2021 para os canais do <i>Target</i>	62
Figura 51 – Monitoramento dos ganhos das <i>PMTs</i> no ano de 2021 para os canais do <i>Veto</i>	62
Figura 52 – Monitoramento temporal dos canais do <i>Target</i> no ano de 2019.	63
Figura 53 – Monitoramento temporal dos canais do <i>Veto</i> no ano de 2019.	64
Figura 54 – Monitoramento temporal dos canais do <i>Target</i> no anos de 2020	65
Figura 55 – Monitoramento temporal dos canais do <i>Veto</i> nos anos de 2020	65
Figura 56 – Monitoramento temporal dos canais do <i>Target</i> no anos de 2021	66
Figura 57 – Monitoramento temporal dos canais do <i>Veto</i> nos anos de 2021	66
Figura 58 – Pico dos sinais x correção entre os sinais com o formato ideal para os dados do período 1	73

Figura 59 – Pico dos sinais x correção entre os sinais com o formato ideal para os dados do período 2	74
Figura 60 – Pico dos sinais x correção entre os sinais com o formato ideal para os dados do período 3	75
Figura 61 – Espectro de energia dos canais do <i>Target</i> para os períodos 1 e 2 na região de 0 a 400 DUQ	76
Figura 62 – Espectro de energia dos canais do <i>Target</i> para os períodos 1 e 2	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Definição das fases/períodos mais importantes de funcionamento do detector	32
Tabela 2 – Datas das manutenções e o que foi feito em cada uma delas. . .	33
Tabela 3 – Dias dos períodos que foram selecionados para análise	34
Tabela 4 – Valores da curva do formato padrão.	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIA	Agência Internacional de Energia Atômica
CBPF	Centro Brasileiro de Pesquisa Física
UEFS	Universidade Estadual de Feira de Santana
UEL	Universidade Estadual de Londrina
UFBA	Universidade Federal da Bahia
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
Unicamp	Universidade Estadual de Campinas
PMT	Fotomultiplicadora
IP	Internet Protocol
TCP	Transmission Control Protocol
FEE	Front-End
I ² C	Inter-Integrated Circuit
CI	Circuito Integrado
DAC	Conversor digital-analógico
FPGA	Field Programmable Gate Array
CONNIE	Coherent Neutrinos Nucleus Interaction Experimente
ν -Angra	Experimento Neutrinos Angra
CAE	Chuveiro Atmosférico Extenso

LISTA DE SÍMBOLOS

p	Proton
η	Nêutron
e^-	Elétron
e^+	Pósitron
$\bar{\nu}_e$	Antineutrino
n	Número de dínodos
V_{th}	Tensão utilizada para acelerar os elétrons
R_L	Resistência de saída da <i>PMT</i>
k	Constante
E	Energia de um evento na escala de Mega elétrons-volt
$x_{p,e}$	Número de fotoelétrons de um evento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Divisão do trabalho	19
2	O Experimento Neutrinos Angra	20
2.1	Deteção dos eventos	21
2.2	<i>Ruído de fundo</i>	22
2.3	Estrutura do detector ν -Angra	22
3	Sistema de aquisição do detector	24
3.1	Tubos Fotomultiplicadores	26
3.2	<i>Front-end</i> e o seu sistema embarcado de controle	28
3.3	NDAQ	29
3.4	Trigger	30
4	Histórico da operação do detector	32
4.1	Histórico da Operação do Detector.	32
4.2	Banco de dados para análise.	33
4.3	Condições em que os dados selecionados foram adquiridos	34
5	Proposta e avaliação dos métodos usados para medição e/ou ajuste de parâmetros fundamentais ao experimento ν-Angra .	36
5.1	Estimação do pedestal dos sinais dos eventos coletados	36
5.2	Deformação da forma de onda dos sinais adquiridos	41
5.3	Equalização do ganho das PMTs do detector	47
5.4	Impacto dos ajustes de limiar nos eventos adquiridos.	53
6	Estabilidade do detector	55
6.1	Pedestal dos sinais adquiridos	55
6.2	Forma de onda dos sinais adquiridos	58
6.3	Ganho das <i>PMTs</i>	59
6.4	Distribuição de energia dos eventos.	63
7	Considerações finais	67
7.1	CONCLUSÃO	67
7.2	Proposta de continuidade	67
	REFERÊNCIAS	69
	APÊNDICE A – Medidas do condicionamento dos sinais para todos os canais	73
	APÊNDICE B – Impacto da mudança dos <i>thresholds</i> nos ca- nais <i>Target</i>	76

1 INTRODUÇÃO

Diversos países no mundo usam material nuclear como fonte para geração de energia elétrica. Para impedir que este material seja utilizado para fins não pacíficos, a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) estabeleceu uma série de medidas de salvaguarda em torno do acesso e utilização deste material.

Em particular, pesquisas mostraram que medidas do fluxo de antineutrinos emitido por uma usina nuclear podem ser utilizadas para inferir a quantidade de material nuclear usado por ela, uma vez que a energia térmica liberada no processo de fissão do combustível nuclear está correlacionada com esta primeira (BOWDEN, 2008; BERNSTEIN *et al.*, 2008). Como interagem muito pouco com a matéria, os antineutrinos produzidos neste processo podem ser detectados na parte externa das proteções físicas do reator, permitindo que detectores sejam instalados de maneira não intrusiva próximos às usinas nucleares, possibilitando a realização de estudos que visam auxiliar no controle do uso de materiais nucleares ao redor do mundo. Pesquisas passadas mostram que é viável o uso de detectores de antineutrinos como indicador para monitorar as atividades de reatores nucleares em tempo real (BERNSTEIN *et al.*, 2002).

A partir dessa realidade, surgiu a proposta do experimento Neutrinos Angra (ν -Angra) (ANJOS *et al.*, 2006), com o objetivo de desenvolver um sistema de detecção completo em solo nacional (conceito, simulação, desenvolvimento e implementação) para medição do fluxo de antineutrinos emitidos pelo reator da usina de Angra II e para detecção de qualquer emissão radioativa anômala que possa ocorrer em suas vizinhanças. O sistema desenvolvido é composto por fotomultiplicadoras (PMTs), circuitos para conformação e digitalização dos sinais gerados por estes sensores e sistema de seleção de eventos (*trigger*); além de uma estrutura computacional e módulos embarcados de monitoramento e controle para que seja possível que o mesmo funcione de maneira totalmente remota. Todo este sistema foi exaustivamente testado (ALVARENGA *et al.*, 2016; LOPES *et al.*, 2019; SOUZA *et al.*, 2021a) antes de ser levado para o sítio do reator de Angra II e, desde o segundo semestre de 2018, se encontra em operação ao lado da usina.

Em Angra II, o sistema passou por diversas intervenções para realização de manutenção e aplicação de técnicas para calibração dos parâmetros do sistema de aquisição, deixando-o em pleno funcionamento ao fim deste processo (MIGLIORINI *et al.*, 2020). Resultados importantes como a detecção e medida do espectro de elétrons de Michel (partículas que provêm do decaimento de múons) indicaram o bom funcionamento do detector (JR. *et al.*, 2019).

Os ajustes dos parâmetros do sistema de detecção tiveram duas metas principais: (1) aumentar a eficiência de detecção de partículas menos energéticas, sem que a taxa de seleção online de eventos (*trigger*) fosse comprometida, a partir de um processo de

calibração de limiar dos discriminadores que compõem os canais da eletrônica de leitura do sistema; e (2) equalizar os ganhos das diversas PMTs instaladas no detector, baseando-se nos dados coletados, a partir de um processo de calibração das tensões de alimentação das mesmas.

Todas essas calibrações foram feitas nos períodos anteriores ao desligamento do reator da usina Angra II, com o intuito de deixar o sistema de detecção em boas condições de operação durante o ciclo liga-desliga do reator. Nessa transição de estados espera-se uma diminuição da taxa de eventos selecionados pelo experimento, com o cessar da emissão de antineutrinos pelo reator. Adicionalmente, uma vez calibrado, também foi previsto que o sistema continue a coletar dados ao longo de todo o ano a fim de detectar, como comentado anteriormente, qualquer radiação anômala que possa ocorrer ao redor de suas instalações.

Este trabalho se insere neste contexto com dois objetivos principais; o primeiro de propor e avaliar alguns métodos usados para medição e/ou ajuste de parâmetros fundamentais ao experimento, listados abaixo, que podem favorecer a estimação de energia dos eventos coletados, a otimização das condições de funcionamento do sistema e o monitoramento de algumas de suas características.

- Pedestal dos sinais adquiridos, considerando sinais fora de tempo e/ou encavalados;
- Deformação da forma de onda do sinal considerando as características nominais da eletrônica de leitura do sistema;
- Equalização dos ganhos das PMTs do detector baseado na distribuição de carga de cada canal e sua relação com a resposta a um único fotoelétrico;
- Impacto dos ajustes de threshold aplicados aos discriminadores da eletrônica de leitura a partir de uma análise da distribuição de energia dos eventos selecionados pelo sistema de *trigger*.

O segundo objetivo tem como foco identificar os períodos em que todos os canais do sistema de detecção funcionaram de maneira estável durante os anos de 2019 a 2021, a partir de uma análise temporal detalhada dos seguintes parâmetros: pedestal, forma de onda dos sinais, ganho das PMTs e energia média dos eventos. Através dessa análise foi possível selecionar os períodos que devem ser privilegiados pela Colaboração em sua análise de dados.

Vale ressaltar que esses dois objetivos dialogam entre si, uma vez que os métodos discutidos na primeira parte são então usados para a análise temporal de estabilidade da coleta de dados do experimento. Adicionalmente, a primeira parte, além de propor e avaliar métodos para medição dos parâmetros usados para a análise de estabilidade, fez

parte de um processo de otimização do detector e entendimento de suas características relacionadas, usando como ferramenta auxiliar uma avaliação de tais parâmetros nos momentos anteriores e posteriores às mudanças de configuração do sistema de detecção.

Finalmente, além das medidas propostas neste trabalho, outras duas são usadas de maneira contínua pelo sistema de monitoramento *online* do experimento para detectar possíveis anomalias durante a aquisição de eventos: a taxa de *trigger* e a taxa de veto. As medidas aqui propostas funcionam portanto como complemento desses dois outros parâmetros, empregadas tanto para descobrir o(s) motivo(s) de qualquer eventual mudança nessas taxas, como para identificar anomalias mais sutis que não necessariamente as alteram significativamente.

1.1 Divisão do trabalho

Os capítulos que sucedem na divisão deste trabalho estão dispostos da seguinte maneira: o Capítulo 2 descreve as principais características do sistema desenvolvido pelo experimento ν -Angra, como a técnica utilizada para detecção de antineutrinos, principais fontes de ruído e uma descrição geral sobre a estrutura do detector; no Capítulo 3 são apresentados em detalhes os principais componentes eletrônicos que compõem o sistema de medidas do experimento; no Capítulo 4, é feita uma descrição sobre as condições de operação do detector durante a aquisição dos dados utilizados neste trabalho; no Capítulo 5 são apresentados os métodos e resultados relativos à medida de pedestal, de deformação da forma de onda dos sinais coletados, e de ganho das PMTs, além de uma análise do impacto dos ajustes de limiar dos discriminadores da eletrônica de leitura do sistema. No Capítulo 6, os resultados obtidos sobre a estabilidade do sistema de aquisição do detector são expostos e discutidos. Finalmente, as conclusões e próximos passos são apresentadas no Capítulo 7.

2 O Experimento Neutrinos Angra

A colaboração ν -Angra tem como escopo principal desenvolver um sistema capaz de medir o fluxo de antineutrinos ao lado de um reator nuclear para inferir sobre a quantidade de material nuclear utilizado no processo de queima de combustível e de detectar a presença de qualquer radiação anormal que possa ocorrer nas proximidades do reator para fins de salvaguarda nuclear (ANJOS *et al.*, 2012; ANJOS *et al.*, 2015; JR. *et al.*, 2019). Para realizar tal feito, um detector a base de água dopada com Gadolínio foi projetado e montado ao lado da cúpula do reator de Angra II, próximo da estrutura de acesso para a parte interna do seu domo de proteção. O detector está localizado a 25 metros do reator nuclear da usina de Angra-II dentro de um laboratório-contêiner. Esta localização, segundo simulações feitas, permite que sejam detectados um pouco mais de 5000 interações por dia ocasionadas por antineutrinos provenientes do reator (GONZALEZ, 2009), além de permitir observar a região de acesso ao domo. A localização do contêiner é vista na Figura 1.

Figura 1 – Localização do laboratório-contêiner



Fonte: Adaptada (RIBEIRO, 2019).

O órgão que administra o sítio (Eletronuclear) não autorizou a escavação de um túnel subterrâneo para abrigar o detector na região em torno da usina de Angra-II. O uso deste artefato poderia ser utilizado como uma blindagem natural para diminuir a contagem de ruídos oriundos dos raios cósmicos (APOLLONIO *et al.*, 1999; AN *et al.*, 2012). Esta restrição representou então mais um desafio ao experimento dado a alta taxa de ruído de fundo esperada. Uma outra condição imposta pela Eletronuclear é de não poder usar cintilador líquido em suas instalações, por ser inflamável. Isso fez com que o volume do detector fosse preenchido de água (dopada com 0,2% de Gadolínio) que, em relação ao cintilador líquido, diminuiria a relação sinal-ruído do experimento. A colaboração ν -Angra pretendia superar estas restrições a partir do uso conjunto de seu sistema de Veto (SOUZA *et al.*, 2021b; SANTOS, 2014) com uma eletrônica de aquisição de baixo ruído e com a aplicação de técnicas de seleção de eventos baseadas na energia dos eventos e no tempo

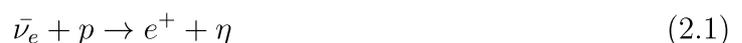
de ocorrência entre eles, podendo aplicar também técnicas de processamento de sinal e aprendizagem de máquina caso pertinente.

O experimento ν -Angra foi concebido e desenvolvido em solo nacional e atualmente sua colaboração é composta por pesquisadores e estudantes das seguintes instituições brasileiras: CBPF - Centro Brasileiro de Pesquisa Físicas (Rio de Janeiro - RJ), UEFS - Universidade Estadual de Feira de Santana (Feira de Santana - BA), UEL - Universidade Estadual de Londrina (Londrina - PR), UFBA - Universidade Federal da Bahia (Salvador - BA), UFJF - Universidade Federal de Juiz de Fora (Juiz de Fora - MG), Unicamp - Universidade Estadual de Campinas (Campinas - SP).

2.1 Detecção dos eventos

A detecção de eventos de antineutrinos em um detector composto basicamente de água é feita com base no efeito Cherenkov. Este efeito produz a emissão de radiação eletromagnética quando uma partícula carregada atravessa um meio isolante, com uma velocidade maior do que a da luz neste meio (MUSTAFÁ *et al.*, 2014). A radiação eletromagnética emitida pode ser lida por tubos fotomultiplicadores (do inglês *Photomultiplier Tube*, *PMT*), que são instrumentos capazes de converter luz em um sinal de corrente ou tensão elétrica.

O antineutrino ($\bar{\nu}_e$) emitido no processo de fissão dos isótopos que fazem parte do combustível nuclear interagem com um próton (p) existente na água dopada com gadolínio dentro do detector fazendo com que seja produzido um nêutron (η) e um pósitron (e^+). Esta interação é chamada de decaimento beta-inverso, representada pela Equação (2.1).



O pósitron que provém da reação beta-inverso pode possuir energia suficiente para emitir fótons pelo efeito Cherenkov. O nêutron, por sua vez, leva um tempo para ser capturado por algum núcleo de gadolínio, o que gera emissão de raios gama com 8 MeV . Estes raios podem interagir por alguns efeitos, como Fotoelétron ou Compton, liberando elétrons que por sua vez podem emitir radiação Cherenkov. A diferença temporal entre a leitura do sinal luminoso emitido pelo pósitron e pelo nêutron acontece em algumas dezenas de microssegundos, podendo variar de acordo com a dopagem do gadolínio. Quando o sistema de leitura do experimento observa dois eventos com esta diferença temporal, ele identifica o evento como um candidato de antineutrinos. Uma outra forma da interação do nêutron pode ocorrer através de sua captura por um núcleo de hidrogênio com raios gama de 2 MeV liberados (ABE *et al.*, 2012), porém, a ocorrência desta interação possui uma baixa probabilidade de acontecer.

2.2 Ruído de fundo

Um dos grandes desafios que o ν -Angra tem que superar é provocado pelo ruído de fundo (*Background*) gerado pelos raios cósmicos. Estes raios são partículas de energia elevada (radiação primária) que provêm do espaço e acabam bombardeando a atmosfera terrestre (ROSSI; GREISEN, 1941) e interagindo com núcleos de nitrogênio e oxigênio do ar, começando um processo de produção de partículas em cascata (radiação secundária) (CECCHINI; SPURIO, 2012). O nome dado para este fenômeno é Chuveiro Atmosférico Extenso (CAE).

Das partículas emitidas pelos raios cósmicos, os múons se destacam como uma das principais fontes de ruído para experimentos de neutrinos, devido a sua alta taxa de ocorrência na superfície da Terra e aos produtos da sua interação que pode gerar eventos no detector que mimetizam os pósitrons e nêutrons do decaimento beta-inverso; ou seja, uma parte não desprezível desses eventos pode gerar sinais com energia e intervalos temporais dentro da região de busca utilizada para a seleção de eventos de antineutrinos de maneira a falseá-los.

Além dos raios cósmicos, radiação de ambiente emitida por materiais ao redor do detector pode produzir um componente extra de ruído não desprezível para o Experimento e, deve-se considerar também os períodos de troca de combustível do reator que promove transporte de material radioativo nas proximidades do contêiner, podendo gerar ruído adicional devido à radiação emitida por este.

2.3 Estrutura do detector ν -Angra

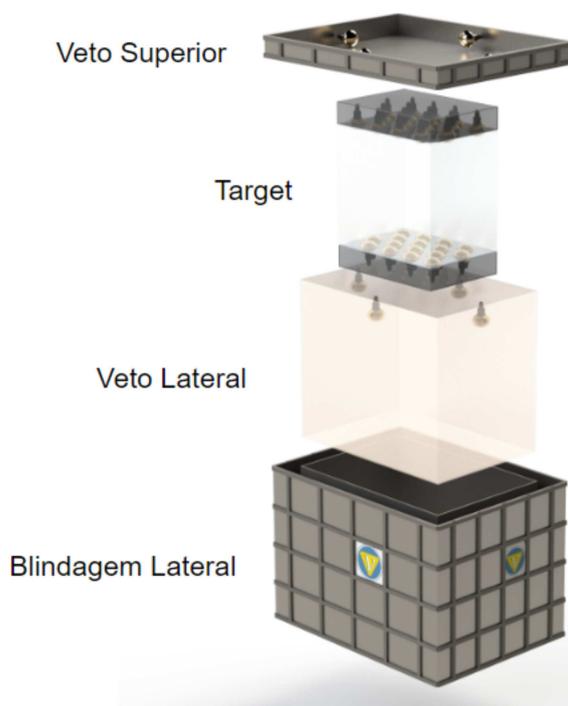
O detector ν -Angra tem as dimensões de 1,50 m x 1,05 m x 1,39 m para altura (h) - comprimento (c) - largura (l). Ele está equipado com 40 tubos fotomultiplicadores. A divisão da sua estrutura pode ser observada na Figura 2, dividida em 4 partes:

- Veto Superior: dimensões de 0,28 m \times 2,66 m \times 2,02 m (h-c-l), equipado com 4 PMTs e 0,25 m da sua (h) está preenchido com água pura e se encarrega de bloquear/detectar os eventos de ruído de fundo.
- Veto Lateral: possui 1 PMT fixada no centro de cada lado, totalizando 4 PMTs, e é preenchido com água pura e também tem como objetivo bloquear/detectar ruído.
- *Target*: preenchido com 1340 litros de água dopada com 0,2 % de gadolínio. Há 32 PMTs neste compartimento, sendo que 16 estão no topo e as outras na base. Sua função é detectar os eventos de interesse.
- Blindagem lateral: o veto lateral se encontra na parte interna de uma parede que envolve lateralmente o detector com espessuras de 0,14 m em dois lados opostos

e 0,22 m nos outros dois lados. Toda esta região está preenchida com água pura. A sua função é de reduzir o número de eventos de ruído de fundo que chegam no detector *Target*.

As paredes internas do *Target* e dos Vetos estão revestidas com uma membrana refletora difusa com refletância superior a 99% para fótons de 400 nm para o *Target* e de 97% no caso do Veto.

Figura 2 – Estrutura do detector ν -Angra



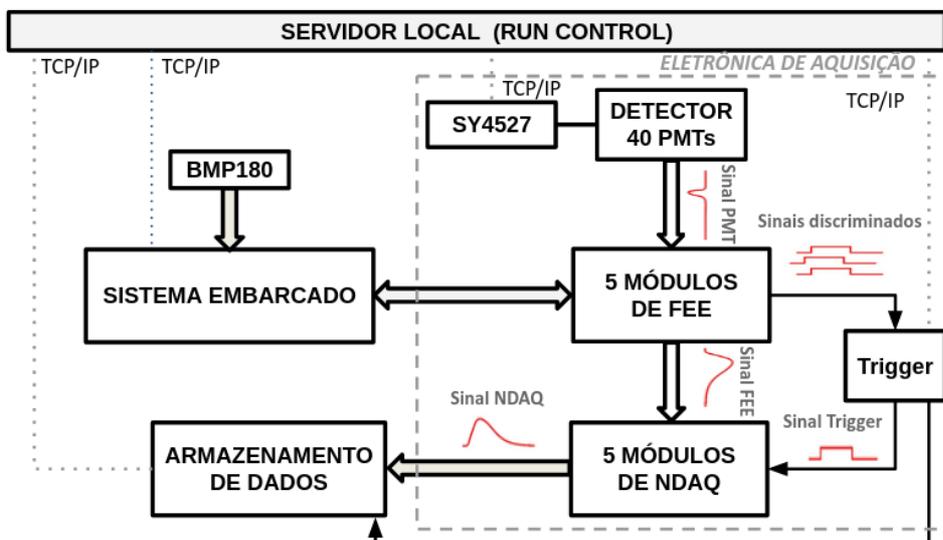
Fonte: Adaptada (LOPES *et al.*, 2019).

3 Sistema de aquisição do detector

O sistema de aquisição do Experimento ν -Angra foi projetado para ser operado de maneira remota, através de um servidor local que se comunica com a rede externa via protocolo *TCP/IP*. Nele há um programa denominado *Run Control*, operando com a função de inicializar a aquisição de dados, recebê-los, gravá-los e encaminhar pulsos para inicializar o *Trigger* do experimento. A troca de informações e controle com a eletrônica do sistema de medidas do experimento também é feita via *TCP/IP* (GONZALEZ, 2019; MIGLIORINI *et al.*, 2020). Na Figura 3 está sendo mostrado o diagrama de blocos do sistema de medidas do experimento.

O sistema de detecção do experimento é composto por um servidor local, 40 PMTs do modelo Hamamatsu R5912/-100 (PHOTONICS, 1998), uma eletrônica de condicionamento dos sinais analógicos (FEE - *Front-End*) (COSTA *et al.*, 2014; DORNELAS *et al.*, 2015), eletrônica de aquisição (NDAQ) (GAMA, 2011) e seleção de eventos (*Trigger*) (PASCHOAL *et al.*, 2018), um sistema embarcado para controle dos parâmetros da FEE (Migliorini *et al.*, 2019), fonte de alta tensão da CAEN modelo SY4527 (CAEN, 2014), sensor de temperatura e pressão do modelo BMP180 (SENSORTEC, 2013). Toda eletrônica de aquisição está organizada no contêiner em um *rack* mostrado na Figura 4.

O bloco de armazenamento de dados da Figura 3 se baseia em disco local do servidor. Nele são salvos os arquivos com os dados adquiridos pelo detector e um outro que contém informações sobre o *Trigger*. Aqueles que contém informações sobre os sinais adquiridos são sempre gravados com um tempo médio de aquisição de 30 minutos. Destes dados, são criados outros arquivos contendo informações mais concisas usadas na análise offline.

Figura 3 – Esquemático do sistema de medidas ν -Angra

Fonte: Adaptada (MIGLIORINI *et al.*, 2020).

Figura 4 – Rack contendo a eletrônica de aquisição



Módulos Digitalizadores (NDAQ)

8 canais/módulo × 5 módulos
125 MHz, 10 bits (VME)

Front-End (FEE) e Trigger

FEE: 8 canais/módulo × 5 módulos
Trigger: Altera DE 2 + Raspberry Pi 2 Model B (NIM)

Sistema de alta-tensão

CAEN Modelo SY4527

Fonte: (GONZALEZ, 2019).

Um ponto a se destacar sobre o laboratório-contêiner é que o mesmo não possui acesso direto à Internet, mas possui uma conexão usando um túnel de dados com o parque computacional do CBPF. Nesse sistema se encontra uma máquina que tem como função copiar todos os dados adquiridos pelo sistema de aquisição do experimento. Nesse parque

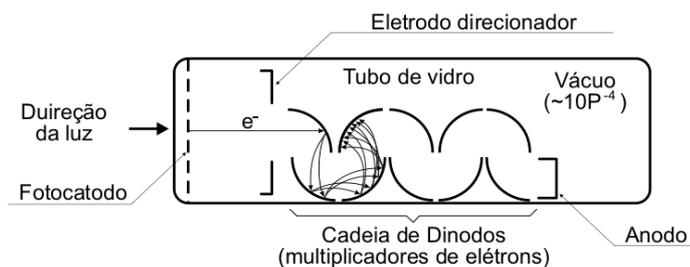
também encontra-se um servidor no qual está instalado um *Jupyter Hub* que permite a geração de *scripts* em *python* para análise dos dados.

Nas próximas seções serão descritos os principais componentes do sistema de aquisição do detector: tubos fotomultiplicadores, *Front-end* e o seu sistema embarcado de controle, NDAQ e *Trigger*.

3.1 Tubos Fotomultiplicadores

Os tubos fotomultiplicadores (*PMTs*) são dispositivos que possuem a capacidade de converter fótons (luz) em um sinal de corrente ou tensão elétrica. Eles são compostos basicamente por uma superfície (fotocatodo) que converte fótons em elétrons, eletrodos direcionais, multiplicadores de elétrons (dínodos) e um coletor de elétrons. Um esquema geral de um *PMT* é mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Esquemático - de um fotomultiplicadora

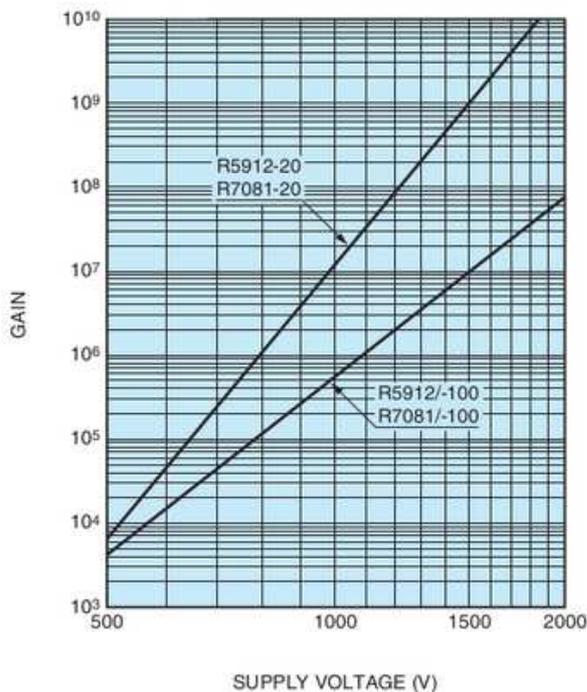


Fonte: (DORNELAS *et al.*, 2015).

Quando fótons colidem com o fotocátodo, elétrons são liberados e acabam sendo acelerados por um campo elétrico em direção ao primeiro dínodo. Neste processo, elétrons adicionais são arrancados da sua superfície e acabam sendo acelerados de novo pelo campo elétrico entre este e o próximo dínodo. Esta ação vai se repetindo até o último dínodo existente na *PMT*, gerando sempre mais elétrons. No final, todos eles chegam no ânodo, em uma quantidade muito superior mas proporcional ao número de elétrons que saíram do fotocátodo. Este ganho está equacionado na Equação (3.1), a qual mostra que o aumento no número de elétrons está relacionado com o número de dínodos (n), tensão utilizada para acelerar os elétrons (V_{ht}) e com uma constante (k) que varia de acordo com o modelo da *PMT* (MACLEODA, 2007). A Figura 6 mostra a relação do ganho médio com o valor de tensão utilizada para alguns modelos de *PMT*, incluindo aquele usado pelo Experimento ν -Angra.

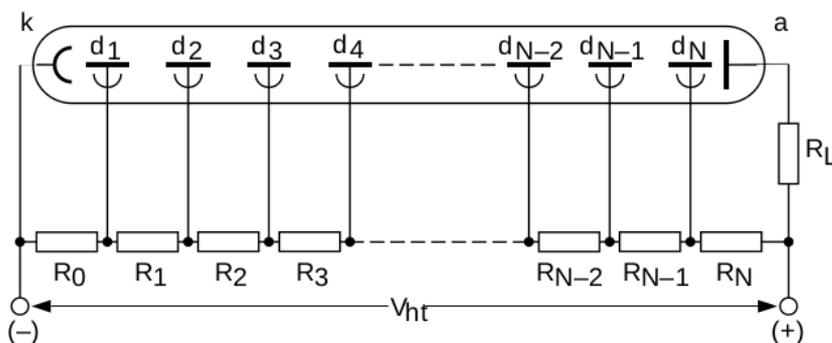
$$Ganho = kV_{ht}^n \quad (3.1)$$

Figura 6 – Ganho da fotomultiplicadora R5912/-100



Fonte: (PHOTONICS, 1998).

O ganho de uma *PMT* é tipicamente calibrado a partir do valor médio da distribuição de carga de sua resposta a um único fotoelétron (do inglês *single photoelectron*, SPE). O V_{ht} da Equação (3.1) representa a tensão fornecida por uma fonte externa utilizada para alimentar a *PMT*. Seu valor se divide entre os vários dínodos (d_i) seguindo o esquema do circuito da Figura 7. O resistor R_L é utilizado para converter a corrente de saída do circuito em um sinal de tensão.

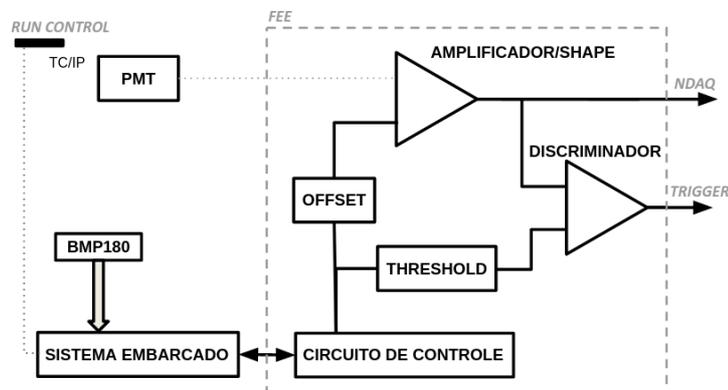
Figura 7 – Esquemático do circuito *PMTs*

Fonte: (FLYCKT, 2002).

3.2 *Front-end* e o seu sistema embarcado de controle

A *FEE* (COSTA *et al.*, 2014; DORNELAS *et al.*, 2016) foi desenvolvida especialmente para o experimento com a função de modelar os sinais que provêm das *PMTs* e ajustar os seus valores de amplitude para aproveitar da melhor forma possível o intervalo dinâmico dos conversores analógicos-digitais das *NDAQs*. Uma outra tarefa sua é a de fornecer sinais (um por canal) para o sistema de *Trigger*, através da geração de pulsos lógicos sempre que a amplitude do sinal analógico que sai da *FEE* superar um determinado valor de tensão (*threshold*). A sensibilidade dos canais da *FEE* é de $71,5 \pm 0,9 \text{ mV}$ de amplitude de pico por fotoelétron. Como alternativa, a Colaboração tem usado uma medida que é proporcional a carga do sinal, no qual a sua unidade de medida *DUQ* (do inglês *Digital Unit of Charge*) que é obtida pela soma de todas as amostras de uma janela de aquisição. Usando esta unidade, a sensibilidade dos canais fica em 77,96 *DUQ* por fotoelétron (SANTOS, 2022). Todos estes valores foram encontrados para um ganho de *PMT* de 10^7 . Por fim, considerando que a *FEE* satura com 1,4V na sua saída, isso faz com que ela opere de forma linear até 20 fotoelétrons aproximadamente. Um digrama de blocos representando um canal da *FEE* pode ser visto na Figura 8.

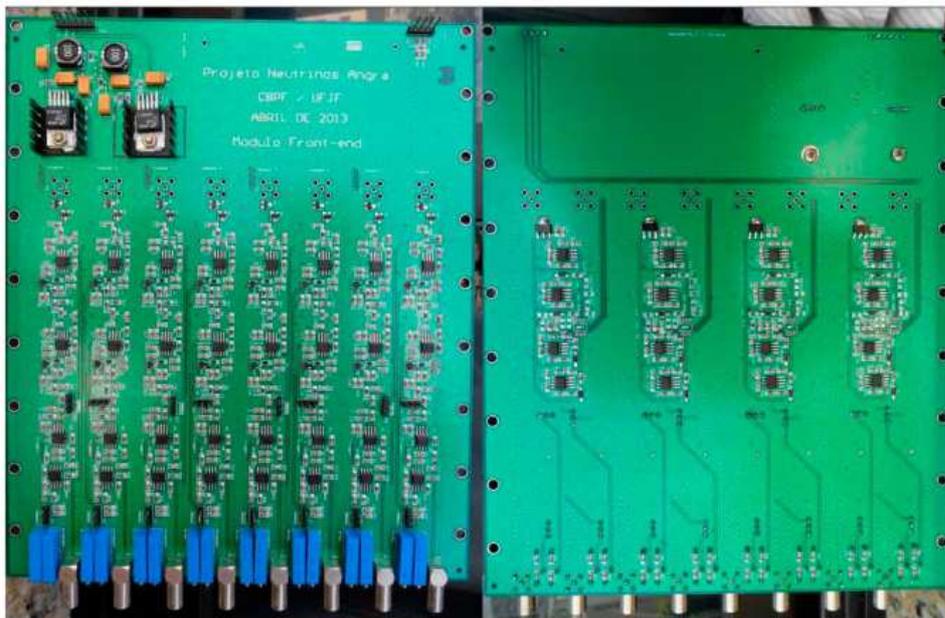
Figura 8 – Esquemático da *FEE*



Fonte: Adaptada (DORNELAS *et al.*, 2016).

O lado superior da placa de circuito impresso da *FEE*, composta por 8 canais de leitura, é mostrada na Figura 9 à esquerda. Cada um deles tem um circuito com 4 estágios para amplificar e modelar o sinal e um circuito discriminador. Na parte inferior da placa de *FEE* (Figura 9 à direita) existem 4 circuitos de controle, onde cada um controla os valores de *threshold* e do *offset* de dois canais da parte superior da *FEE*. A mudança destes valores são feitas por um computador embarcado do modelo *Raspberry Pi 3 Model B* via protocolo *I²C*, acessado via *TPC/IP* (MIGLIORINI *et al.*, 2020). Este sistema também é utilizado para monitorar temperatura e pressão atmosférica a partir do dispositivo *BPM180*.

Figura 9 – Circuito da *FEE* - frente (figura a esquerda) e verso (figura a direita)



Fonte: (COSTA *et al.*, 2014).

3.3 NDAQ

Os sinais obtidos pelo detector após serem amplificados e modelados pela *FEE* são enviados para um sistema encarregado de digitalizá-los. A eletrônica desenvolvida para tal fim foi chamada de NDAQ (JR *et al.*, 2014).

A NDAQ é um módulo eletrônico com duas FPGAs (do inglês Field Programmable Gate Array), 8 canais com conversores analógico-digital com uma resolução de 8 *bits*, um range dinâmico de $-1.25V$ a $1.25V$, e período de amostragem de 8 *ns*, programado para trabalhar com uma janela de aquisição de 400 *ns*, equivalente a 50 amostras. O tamanho desta janela e a quantidade de *bits* podem ser configurados via *Software*. A Figura 10 mostra um módulo NDAQ.

Figura 10 – Módulo NDAQ



Fonte: (GAMA, 2011).

3.4 Trigger

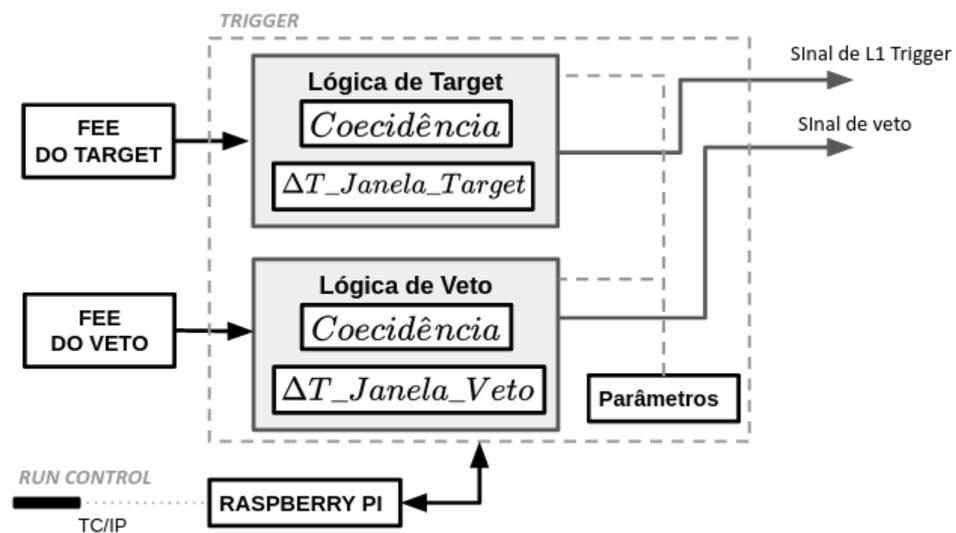
Quando acontece um evento, os sinais que foram digitalizados pela NDAQ são enviados para uma memória *FIFO* à espera de uma decisão do sistema de *Trigger* (SOUZA *et al.*, 2016). Para obter um desempenho de alta performance no quesito velocidade para decidir se um evento será gravado ou não para futuras análises, as condições para realizar esta seleção foram desenvolvidas para operar em um *FPGA*. Seus parâmetros de decisão podem ser configurados remotamente a partir de um *Raspberry Pi 3 Model B* que está integrado ao módulo *FPGA* do *Trigger*. Um esquemático do sistema de *Trigger* é mostrado na Figura 11.

O sistema de *Trigger* possui 40 entradas para os sinais discriminados emitidos por todas as *FEE*. Destas entradas, 32 são para os canais do *Target*, 4 para o Veto Lateral e as outras 4 para o Veto Superior. Os sinais que provêm do *Target* são avaliados em uma sequência de condições que, se alcançadas, gera um sinal de *Trigger*, caso o sistema de Veto não tenha sido acionado. Quando isso acontece, o sistema de *Trigger* fica bloqueado por $2,5 \mu s$, e então novos eventos podem ser detectados. As instruções para validar um evento devem seguir as seguintes exigências:

- Um número mínimo de canais do detector *Target*, discriminados pela *FEE*, deve ser alcançados para validar um evento. A configuração utilizada pelo Experimento exige que esse valor seja maior ou igual à 5.
- Se dois ou mais PMTs do sistema de veto (superior ou lateral) forem ativados, o

evento do item anterior, caso ocorra, é vetado. Caso contrário, o evento é confirmado.

Figura 11 – Esquemático do Trigger



Fonte: Autor.

4 Histórico da operação do detector

Entre os anos de 2019 e 2021 aconteceram diversas visitas ao detector para ajuste de seus parâmetros e manutenção do sistema. Duas delas ocasionaram mudanças relevantes de configuração do sistema: uma no ano de 2019 e outra em 2020, ambas ocorrendo antes do desligamento do reator nuclear da usina de Angra II. Em condições normais, o reator é desligado uma vez por ano, por um período de aproximadamente 1 mês, e é nessa fase que o experimento consegue obter uma aquisição de ruído puro, sem antineutrinos sendo produzido pelo reator.

4.1 Histórico da Operação do Detector.

O detector teve a primeira aquisição de dados oficial, com todos os canais operando satisfatoriamente, no mês de Março do ano de 2019. Em Abril de 2019 ocorre uma primeira intervenção para ajuste fino dos valores de *thresholds* e *offsets* (pedestais) dos canais da eletrônica de *Front-End*. O *threshold* de cada canal foi reduzido de modo que ficasse próximo da região de ruído eletrônico. Esse ajuste foi feito através de um procedimento denominado de *Threshold Scan* (MIGLIORINI *et al.*, 2020). Essa alteração teve como finalidade aumentar a eficiência de detecção de eventos que produzem baixas contagens de fotoelétrons, região esta de interesse para a detecção de eventos de antineutrinos. Um novo ajuste dos valores de *threshold* e de pedestal só foi ocorrer no primeiro semestre do ano de 2020, quando foi também executado um procedimento de equalização de ganho entre as PMTs do detector *Target*. As datas em que o detector operou com essas configurações estão representadas na Tabela 1. Portanto, a fase 1 remete ao período em que toda a eletrônica do detector entrou em operação; a fase 2 compreende o período após o primeiro ajuste fino dos valores de *offset* e de limiar dos discriminadores dos canais da eletrônica de leitura; a fase 3 engloba o período após equalização dos ganhos de todas as PMTs do *Target*; momento em que ocorreu também uma leve alteração dos valores de limiar e *offset* dos canais.

Tabela 1 – Definição das fases/períodos mais importantes de funcionamento do detector

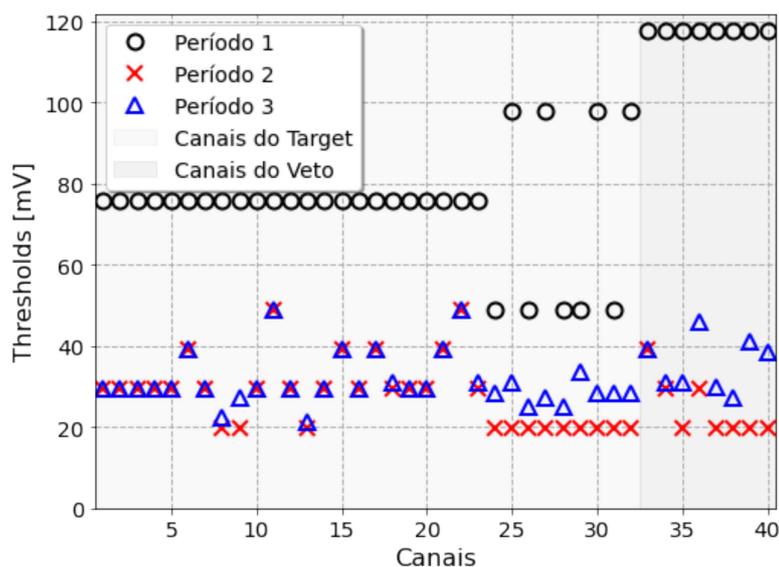
Fase	Início	Final
1	01/03/2019	21/03/2019
2	22/04/2019	10/10/2019
3	09/06/2020	21/12/2021

Para realizar esses ajustes referentes a Tabela 1 e demais intervenções de manutenção da eletrônica do detector, o sistema de aquisição teve que ser parado nos intervalos mostrados na Tabela 2, onde também é descrito o que foi feito em cada um desses hiatos de parada da aquisição.

Tabela 2 – Datas das manutenções e o que foi feito em cada uma delas.

Início da parada	Final da parada	Mudanças
22/03/2019	21/04/2019	Ajuste de <i>threshold</i> e <i>offset</i> de cada canal.
29/06/2019	16/07/2019	Troca do sistema de controle de <i>threshold</i> e <i>offset</i> .
24/08/2019	28/08/2019	Recalibração de <i>threshold</i> e <i>offset</i> de um canal.
19/10/2019	08/06/2020	Calibração dos ganhos das PMTs do <i>Target</i> . Novo ajuste de <i>threshold</i> e <i>offset</i> Troca de um dos módulos de <i>Front-End</i>
22/04/2021	09/05/2021	Período para manutenção do sistema de <i>Trigger</i>
28/08/2021	04/09/2021	Período para manutenção do sistema de <i>Trigger</i>

Os valores de *threshold* de cada fase/período são apresentados na Figura 12. Esses valores indicam as tensões, em *milivolts*, acima dos valores de *offset*, para cada canal do detector. Os primeiros 32 canais pertencem ao detector *Target* enquanto os 8 últimos aos detectores de *Veto*.

Figura 12 – Valores dos *thresholds* em cada período

Fonte: Autor

4.2 Banco de dados para análise.

Para realizar as caracterizações que foram propostas neste trabalho, três conjuntos de dados foram selecionados a partir das datas das fases citadas na seção anterior. Em cada um destes conjuntos houve aproximadamente um total de 168 horas de aquisição de dados. O número de eventos presentes em cada um deles e as datas em que esses dados foram adquiridos são apresentados na Tabela 3, onde cada um desses conjuntos estão denominados respectivamente de período 1, 2 e 3.

Tabela 3 – Dias dos períodos que foram selecionados para análise

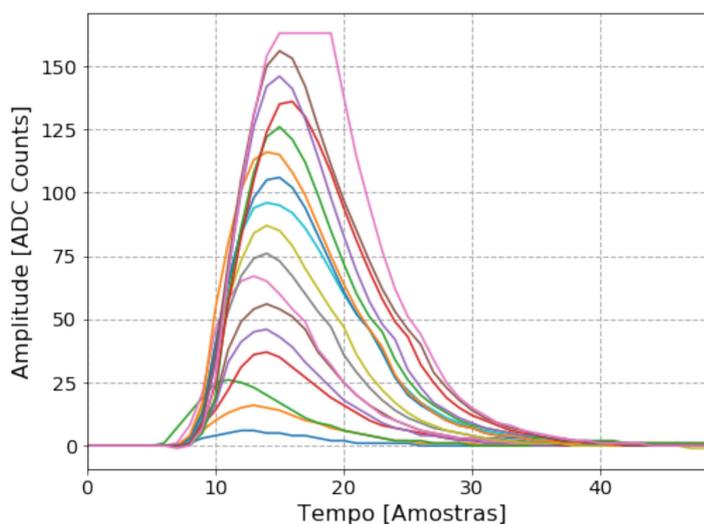
Período	Início	Final	Número de eventos
1	14/03/2019	20/03/2019	1514920
2	01/06/2019	07/06/2019	1522405
3	09/06/2020	15/09/2020	1662820

Nos dados estão presentes as informações contidas sobre a diferença temporal entre os eventos, a carga e amplitude de pico de cada sinal gerado quando uma partícula se choca no detector. A amplitude do sinal está representada em unidades de *ADC counts*, do conversor analógico-digital da NDAQ, onde 1 *ADC count* representa 9,8 mV. A carga dos eventos foi calculada por uma medida que é proporcional a ela, no caso pelo somatório de todas as amostras do sinal, onde a unidade desta medida está sendo representada por DUQ.

4.3 Condições em que os dados selecionados foram adquiridos

Os sinais foram obtidos quando a NDAQ estava configurada com uma janela de aquisição de 400 ns (50 amostras) e com os valores de suas amostras variando de -127 a 127 *ADC counts*. Na Figura 13 podem ser vistos alguns exemplos de sinais coletados. Vale ressaltar que o *offset* dos canais é ajustado para operar em uma tensão negativa, fazendo com que o intervalo dinâmico do ADC (-127 a 127 *ADC counts*) seja melhor aproveitado.

Figura 13 – Exemplo dos sinais que provem do sistema de medidas.



Fonte: Autor

O *Trigger* estava operando em todas as fases de aquisições de dados pelas seguintes condições: o *Target* deve enviar 5 ou mais sinais discriminados; o Veto lateral ou central nunca pode enviar 2 ou mais sinais discriminados ao *Trigger* para que o evento seja validado.

Todos os dados que serão utilizados para as caracterizações propostas, foram adquiridos para um ganho de 10^7 elétrons, para todas as PMTs do detector. Esse valor equivale a uma sensibilidade ao fotoelétron único por canal de $7,2 \pm 0,09$ *ADC counts* em amplitude de pico do sinal ou de $77,96 \pm 5,4$ em DUQ.

5 Proposta e avaliação dos métodos usados para medição e/ou ajuste de parâmetros fundamentais ao experimento ν -Angra

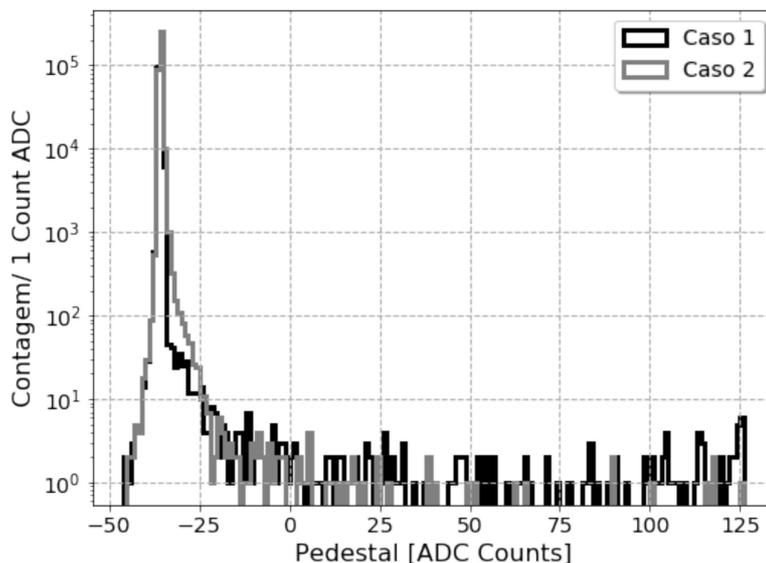
Neste capítulo serão apresentados os métodos e resultados relativos às seguintes questões: medida de pedestal (Seção 5.1) e de deformação da forma de onda (Seção 5.2) dos sinais fornecidos pela eletrônica de *front-end*, equalização de ganho das PMTs do sistema (Seção 5.3) e impacto dos ajustes de limiares aplicados aos discriminadores da eletrônica de *front-end* (Seção 5.4). Para tal, os dados anteriores e posteriores às mudanças de configuração do sistema de detecção foram usados, como especificado na Seção 4.2. Vale notar que as seções 5.3 e 5.4 fazem uso da medida de energia dos eventos e portanto são influenciadas pelos parâmetros avaliados pelas seções 5.1 e 5.2, ditando, desta maneira, a ordem em que os temas são apresentados neste capítulo.

5.1 Estimação do pedestal dos sinais dos eventos coletados

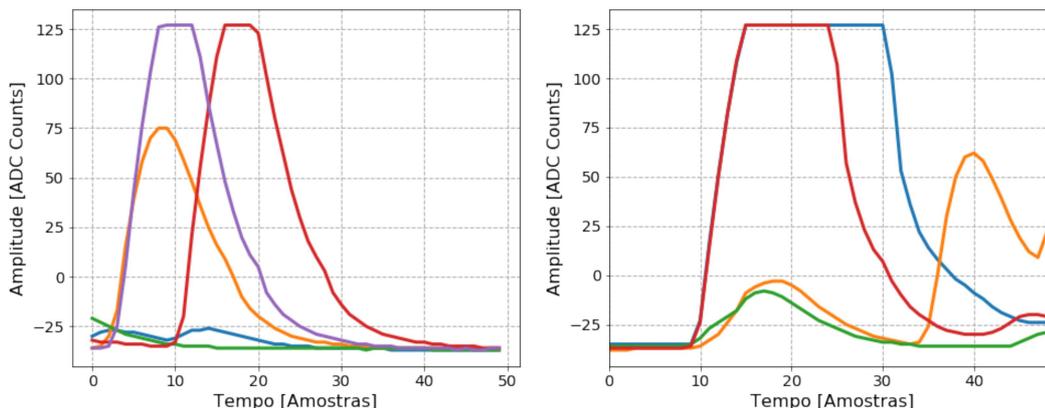
No contexto de monitoramento do sistema e avaliação da qualidade dos dados adquiridos, a medida de pedestal é importante pois influencia na estimação da energia dos eventos, usada para selecionar candidatos de antineutrinos, além de ser um elemento que pode ser usado para detectar o mal funcionamento do sistema ou uma desconfiguração eventual dos parâmetros da eletrônica de *front-end*. Para este último item, duas situações claras podem ser consideradas: (1) a mudança do valor do pedestal altera a faixa dinâmica do sinal fazendo com que este possa entrar na região de saturação do ADC do sistema de aquisição antes do programado e (2) reinicializações acidentais podem ocorrer no sistema de controle da *front-end*, levando os valores de pedestal à zero, fazendo com que o sistema não funcione mais como previsto.

A princípio a estimação de pedestal dos sinais adquiridos pode ser obtida usando a média das 5 primeiras amostras (Caso 1) da janela de aquisição, como feito em (GONZALEZ, 2019), ou as 5 últimas amostras (Caso 2), uma vez que o sinal adquirido pelo sistema de aquisição do experimento está sincronizado com a janela de aquisição para que, na ocorrência de um evento, o sinal se inicie após algumas amostras desta janela, e termine algumas amostras antes de seu fim (ver Figura 13). No entanto, analisando a distribuição dos valores de pedestal medidos, nota-se valores bem acima do valor esperado. Um exemplo pode ser visto na Figura 14 que mostra a distribuição dos valores de pedestal para um dos canais do detector *Target* estimados usando ambos os casos citados acima. A Figura 15 mostra alguns exemplos de sinais que apresentaram medida de pedestal bem acima de -25 *ADC counts*. Pode-se observar que uma das suas principais características é que o início e/ou término destes extrapolam a janela de aquisição do sistema. Portanto, o uso de um dos dois casos para a estimação de pedestal dos sinais que se encontram nessas condições pode provocar um erro significativo na estimação de energia do evento (seja pela medida de carga ou de amplitude de pico dos sinais).

Figura 14 – Medida de pedestal dos sinais



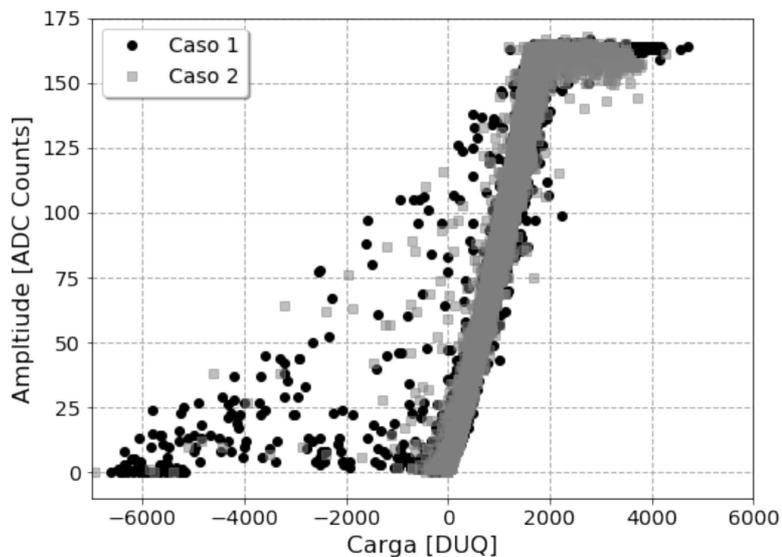
Fonte: Autor

Figura 15 – Figura a esquerda *outliers* do caso 1 e a direita é do caso 2

Fonte: Autor

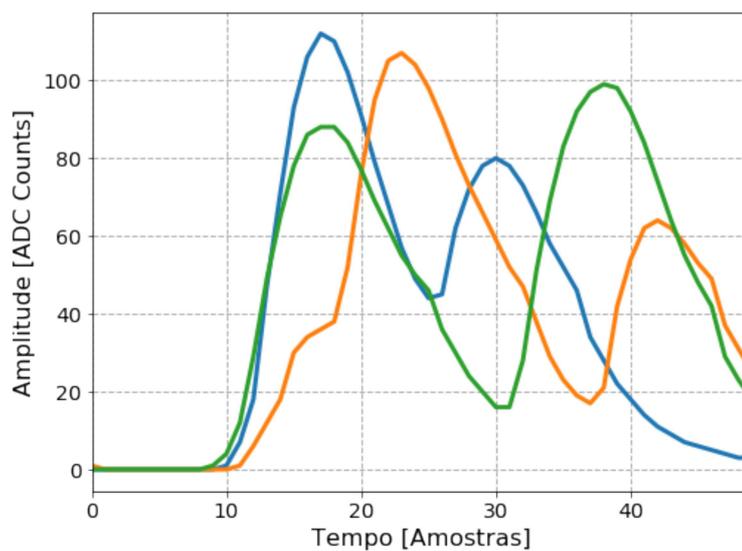
Para melhor entender o problema, foi proposto avaliar a relação entre carga e amplitude de pico dos sinais para ambos os casos, como mostra a Figura 16. Como pode ser visto, existe uma grande densidade de medidas que respeitam uma relação linear entre esses dois parâmetros, como esperado. As medidas fora desta região linear indicam erro de estimação de pedestal fazendo com que, em muitos casos, a carga do sinal fique negativa. Alguns casos, menos frequentes, indicam também um acréscimo do valor de carga em relação à amplitude de pico do sinal, trazendo valores de medida à direita da região linear. Isso ocorre quando mais de um sinal estão presentes na janela de aquisição. A Figura 17 mostra alguns exemplos desse caso.

Figura 16 – Carga x Amplitude para os casos de remoção de pedestal



Fonte: Autor

Figura 17 – Mais de um sinal por janela



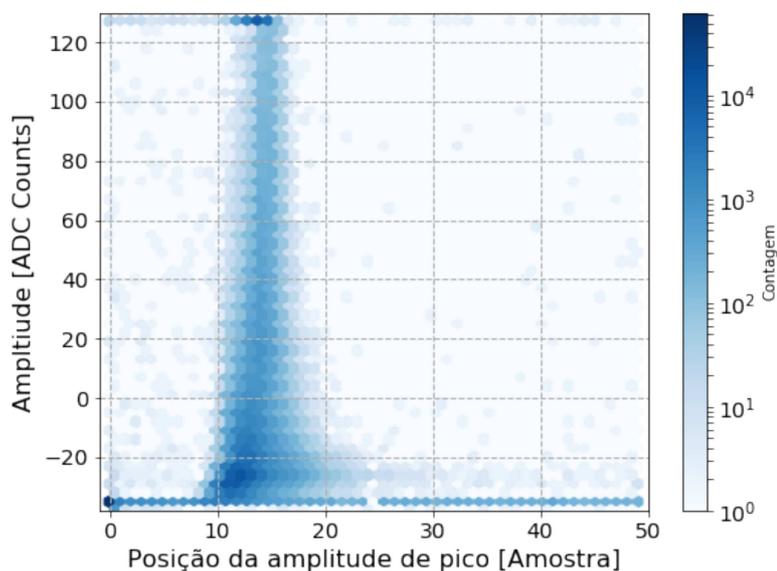
Fonte: Autor

A Figura 18 mostra uma análise da posição da amplitude de pico dos sinais na janela de aquisição. O sinal padrão tende a ter este valor ocorrendo entre as amostras 10 e 20, aproximadamente. Os sinais com picos localizados fora desta região podem ter origens diferentes conforme delineado abaixo:

- *Dark current*: pulsos que podem ocorrer em qualquer momento, respeitando as características de um processo de Poisson, que tem, de maneira geral, a amplitude correspondente a um fotoelétron.

- *Afterpulses*: são pulsos de baixa amplitude que aparecem após o pulso de maior energia emitidos pela PMT, depois de várias dezenas de nanossegundos ou vários microssegundos (AKGUN *et al.*, 2008).
- *Prepulses*: são sinais que possuem as mesmas características que os *afterpulses*, só que eles ocorrem antes do pulso principal disparado pelo PMT (LUBSANDORZHIEV *et al.*, 2000).

Figura 18 – Posição da amplitude de pico x o seu valor



Fonte: Autor

Como existe uma probabilidade maior de ocorrer eventos no início da janela, pode-se concluir que os *prepulses*, dentro da janela adquirida, ocorrem mais frequentemente em relação aos *afterpulses*. Adicionalmente, existe uma componente uniformemente distribuída ao longo da janela que pode ser classificado como ruído, por apresentar uma amplitude de pico próxima de zero.

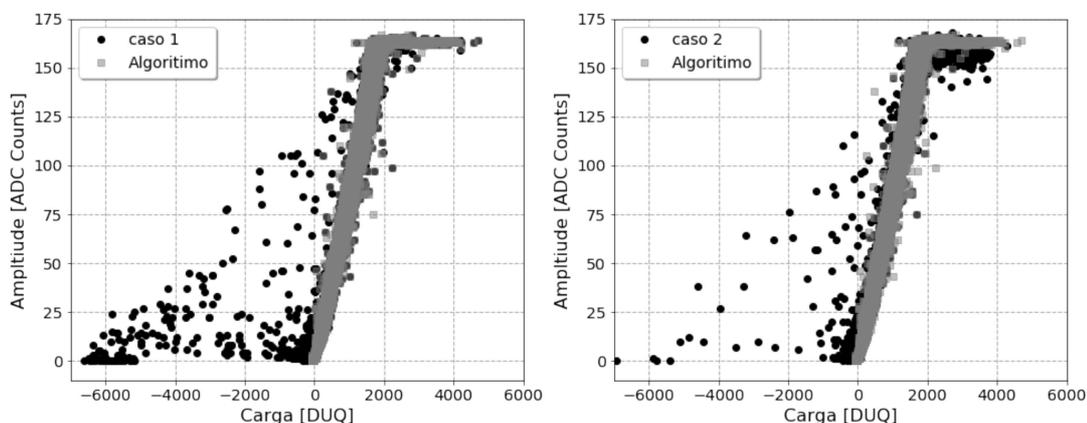
Para evitar que estes cenários apresentados impactem de forma negativa nas análises posteriores, um procedimento baseado em duas etapas foi proposto: (1) classificação dos sinais de acordo com sua posição de pico: entre as amostras 10 e 20 (classe 1) ou, caso contrário, (classe 2); (2) o pedestal de cada uma destas classes serão estimados de formas diferentes: para os sinais da classe 1, o pedestal é estimado pela média das suas 5 primeiras amostras enquanto que para os sinais da classe 2, duas situações diversas são previstas:

- Se o sinal começou antes da janela de aquisição, é utilizado a média das suas 5 últimas amostras.

- Se o sinal terminou depois da janela de aquisição é aplicado a média das suas 5 primeiras amostras.

A efetividade do procedimento criado pode ser verificada pela Figura 19, onde a técnica original, indicados na figura como Casos 1 e 2, são comparados com o procedimento proposto (Algoritmo). Pode-se notar uma grande redução de *outliers* à esquerda da região de linearidade, um menor espalhamento da medida de amplitude de pico para os sinais de baixa amplitude em ambos os gráficos, e um menor espalhamento da medida de amplitude de pico dos sinais saturados em relação ao Caso 2, que se encontram na parte superior do gráfico à direita, com alto valor de amplitude.

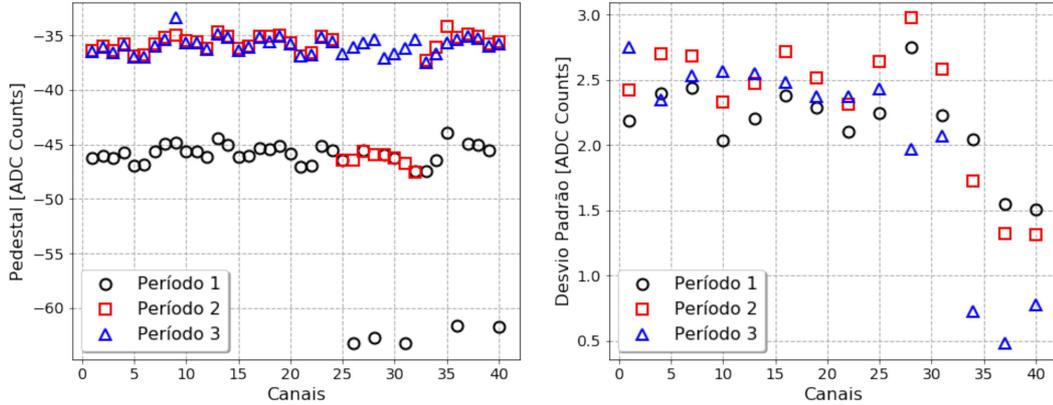
Figura 19 – Comparação da medida de carga e amplitude de pico entre o algoritmo proposto e os Casos 1 (esquerda) e 2 (direita)



Fonte: Autor

Durante todas as fases 1, 2 e 3 de aquisição de dados do detector, o pedestal de cada um dos seus canais foi modificado três vezes, conforme foi relatado no Capítulo 4. Esses valores estão sendo mostrados na Figura 20 e como pode ser visto, apenas na última visita se alcançou uma configuração de pedestal mais uniforme entre os canais. Uma análise temporal dos valores de pedestal será mostrada no Capítulo 6.

Figura 20 – Valores de pedestal após 3 intervenções no sistema



Fonte: Autor

5.2 Deformação da forma de onda dos sinais adquiridos

Como comentado anteriormente, sinais deformados podem provocar erro de estimação de energia do evento e, adicionalmente, a forma de onda dos sinais coletados pode ser usada para monitorar as condições da eletrônica de leitura e aquisição do sistema. Qualquer alteração significativa na forma de onda dos sinais de um canal de aquisição, por exemplo, pode indicar deterioração ou defeito do mesmo. Nesta seção é proposto e avaliado um método baseado em correlação para medir o grau de deformação da forma de onda dos sinais adquiridos.

Para tal, foi aplicado a correlação entre uma forma de onda padrão e os sinais que provêm de todos os canais da eletrônica do detector. O cálculo da correlação é feito segundo a Equação (5.1).

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{E_{Y_p} E_{Y_t}}} \sum_{n=1}^N Y_p[n] Y_t[n] \quad (5.1)$$

Os termos Y_t e Y_p representam, respectivamente, o formato do sinal que será avaliado e o formato do sinal padrão. Os termos E_{Y_t} e E_{Y_p} representam os valores das energias de cada um destes componentes e eles podem ser obtidos pelas Equações (5.2) e (5.3).

$$E_{Y_p} = \sum_{i=1}^N (Y_p[n])^2 \quad (5.2)$$

$$E_{Y_t} = \sum_{i=1}^N (Y_t[n])^2$$

O procedimento relativo à Equação (5.1) foi desenvolvido utilizando-se dados do período 3. Para encontrar o sinal utilizado como referência para realização do cálculo de correlação foram descartados todos os sinais corrompidos pelo efeito da saturação da NDAQ e todas as janelas de aquisição sem sinal, baseado em um valor de corte na amplitude de pico do sinal, posicionado um pouco acima da região de ruído eletrônico dos canais como mostrado anteriormente na Figura 12. Vale notar que, mesmo que esse corte de amplitude tenha sido usado pelo sistema online de seleção de eventos, janelas de aquisição sem sinal serão adquiridas uma vez que, para que um evento seja selecionado, exige-se apenas que 5, ou mais, canais do *Target* tenham de fato sinal acima do *threshold*.

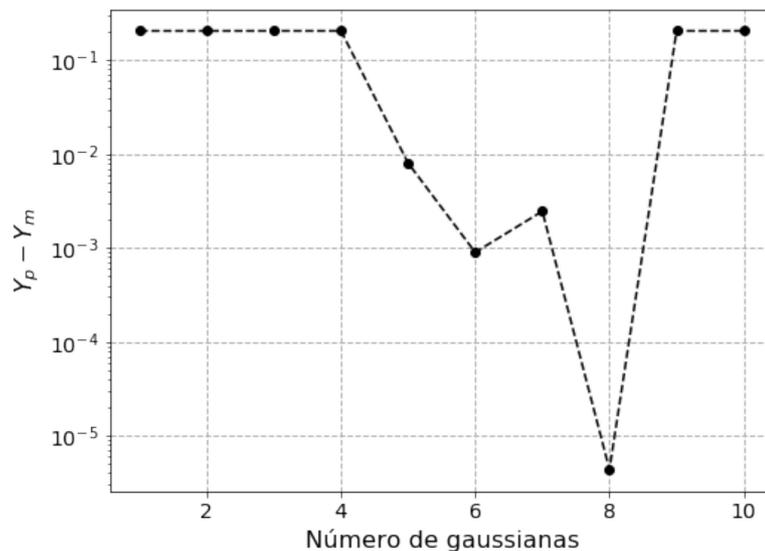
O próximo passo foi a estimação da forma de onda média do sinal da FEE. Para encontrar tal formato o seguinte procedimento foi aplicado:

- Um canal do *Target* foi selecionado de forma aleatória.
- Cada sinal teve a sua amplitude de pico normalizada.
- O pico de todos os sinais foram alinhados para acontecerem na mesma amostra da janela de aquisição.
- A média entre as amostras foram obtidas para determinar o sinal médio (Y_m).

Finalmente, a forma de onda do sinal referência (Y_p) é obtida ajustando uma curva modelada pelo somatório de um número n de gaussianas, descrito pela Equação (5.4). Para encontrar o valor de n (número de gaussianas), foram realizados diversos ajustes para diferentes valores de n (de 1 a 10). Para cada ajuste, foi aplicado a subtração entre suas amostras e o sinal médio. O resultado desta subtração é mostrado na Figura 21. Baseado neste resultado, foi escolhido o valor $n=8$ para a modelagem do sinal. Os parâmetros encontrados das oito Gaussianas envolvidas estão listados na Tabela 4. A Figura 22 mostra a forma de onda padrão encontrado pelo melhor ajuste feito, junto com o sinal médio calculado.

$$Y_p[n] = \sum_{i=1}^{i=n} a_i e^{-\frac{(n-b_i)^2}{2c_i^2}} \quad (5.4)$$

Figura 21 – Diferença entre cada curva modelada e o médio



Fonte: Autor

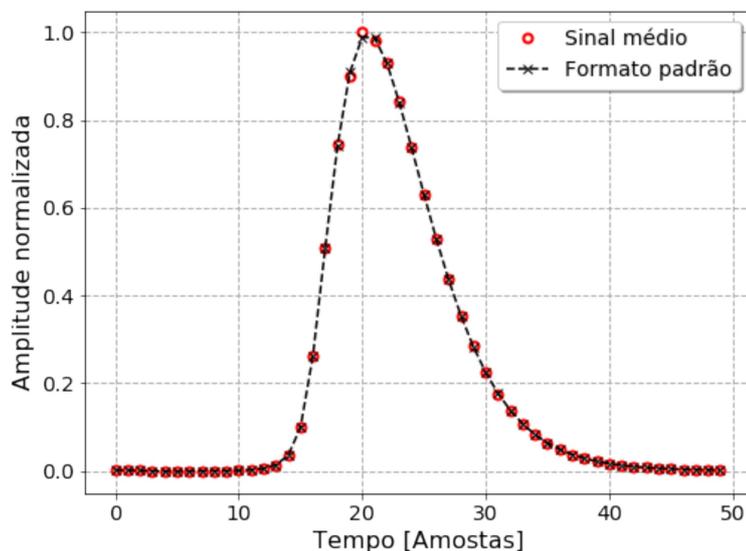
Tabela 4 – Valores da curva do formato padrão.

Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
a_1	3.39	a_5	27.87
b_1	27.85	b_5	372.48
c_1	1.02	c_5	1.2
a_2	3.39	a_6	3.39
b_2	27.85	b_6	372.48
c_2	1	c_6	1.06
a_3	3.39	a_6	3.39
b_3	27.85	b_6	27.85
c_3	1	c_6	1
a_4	27.87	a_7	27.87
b_4	27.85	b_7	27.85
c_4	1.08	c_7	1.08

Após encontrar a forma de onda padrão, a correlação entre os sinais adquiridos durante o período 3 e esta foi calculada. Para fazer essa medida todos os sinais foram normalizados para que a sua amplitude de pico tenha o valor igual a 1 e foi feito o cálculo da correlação em relação a cada deslocamento de uma amostra do sinal para dentro da janela do sinal modelado. A Figura 23 à esquerda mostra os valores de correlação obtidos para cada deslocamento do sinal para um caso específico, com passos de 1 amostra. Um deslocamento igual a -49 representa a situação onde uma única amostra foi deslocada para dentro da janela do sinal ideal. Um deslocamento igual a -48 tem duas amostras dentro da janela do sinal ideal, e assim sucessivamente. Em especial, um deslocamento igual a 0 (zero) representa a situação onde todas as amostras do sinal adentraram na janela do

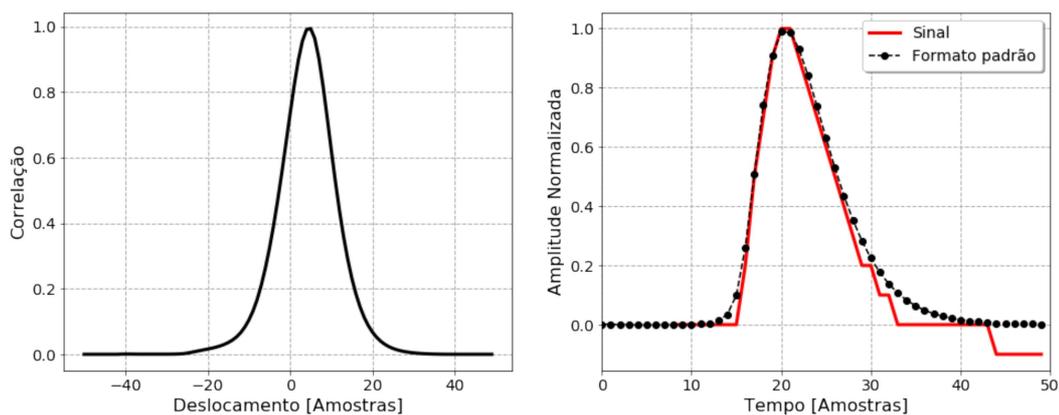
signal de referência. A partir desse procedimento, o valor de maior correlação é selecionado, onde ocorre o melhor casamento entre os dois sinais Y_p e Y_t , conforme é mostrado à direita da Figura 23.

Figura 22 – Sinal médio e o formato padrão do sinal encontrado



Fonte: Autor

Figura 23 – Valores de correlação medidos para cada deslocamento do sinal (esquerda) e sinal coletado em um dos canais sincronizado com o sinal de referência

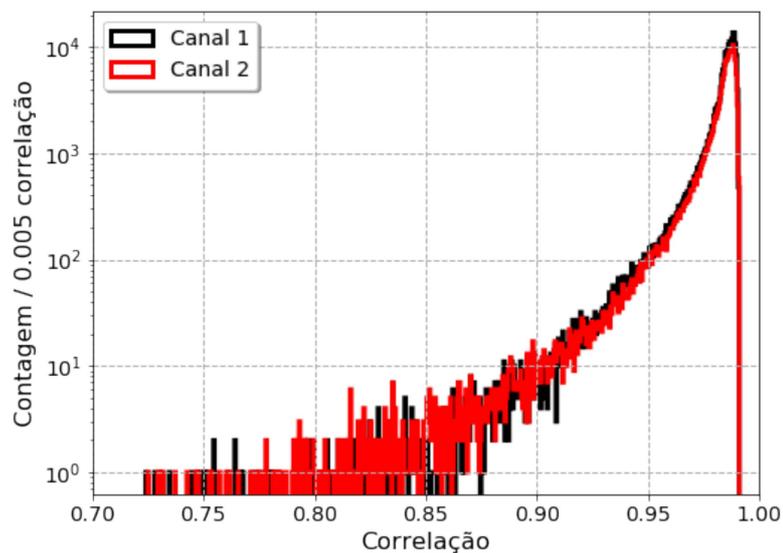


Fonte: Autor

A Figura 24 apresenta a distribuição dos valores de correlação obtidos para dois canais do sistema de detecção. As regiões de baixa correlação (< 0.9) se devem aos sinais com baixa amplitude de pico (< 20 ADC counts), conforme se pode observar pela Figura 25. Esse fato ocorre devido ao processo de digitalização do sinal, que distorce consideravelmente a forma de onda de sinais de baixa amplitude. A Figura 26 mostra

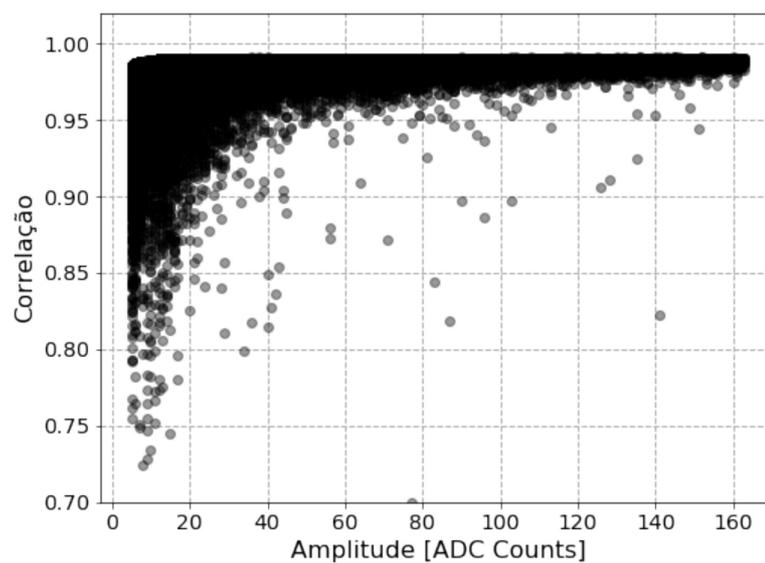
alguns exemplos destes sinais. Os pontos da Figura 25 que estão fora da região de alta intensidade (*outliers*) provêm de sinais que estão começando antes da janela de aquisição, terminado depois dela ou que apresentam mais de um pico.

Figura 24 – Medida de correlação de dois canais



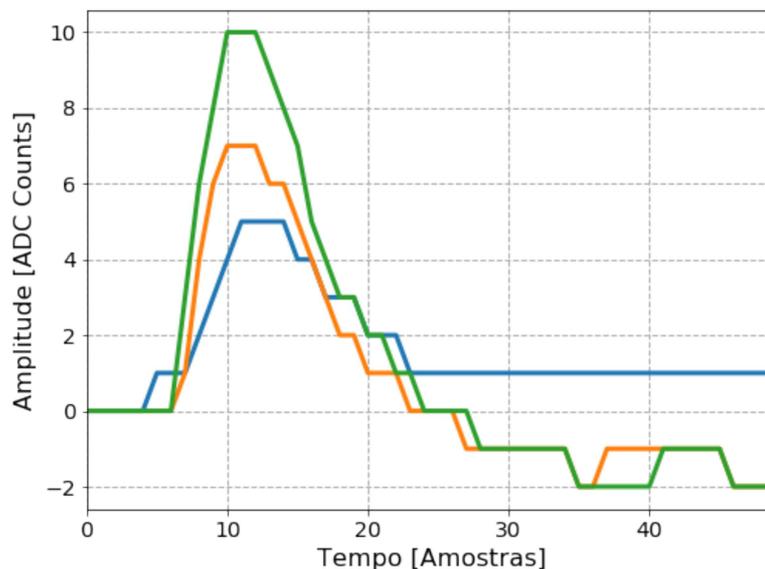
Fonte: Autor

Figura 25 – Relação entre amplitude de pico e a correção



Fonte: Autor

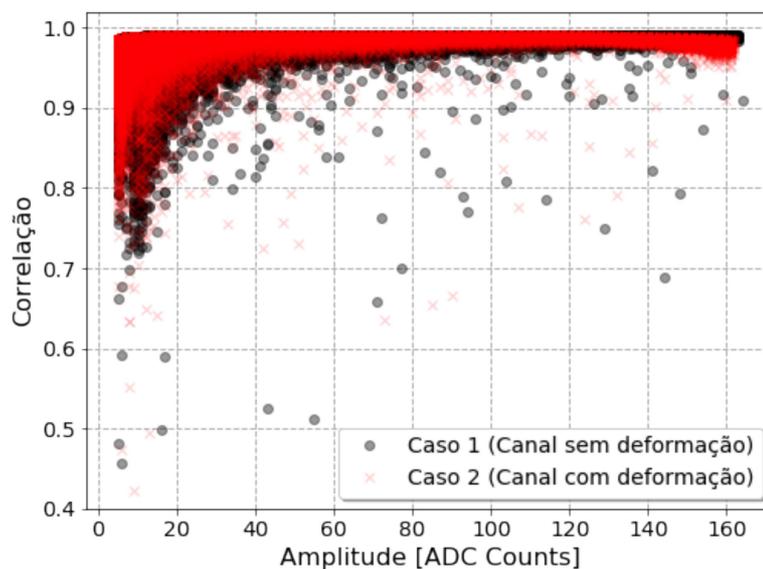
Figura 26 – Exemplo de sinais com amplitude de pico < 20 *ADC counts*



Fonte: Autor

Ao analisar todos os 32 canais do detector *Target*, de todos os conjuntos de dados de todos os períodos, foram encontrados 7 canais com comportamento diferenciado (em relação à Figura 25). Todos eles ocorreram no conjunto do período 3 e na mesma FEE. A Figura 27 compara os valores encontrados para um canal sem deformação (caso 1) e um canal com deformação (caso 2). Uma diferença significativa pode ser notada na região de alta amplitude. As medidas de todos os canais são mostrados no apêndice A.

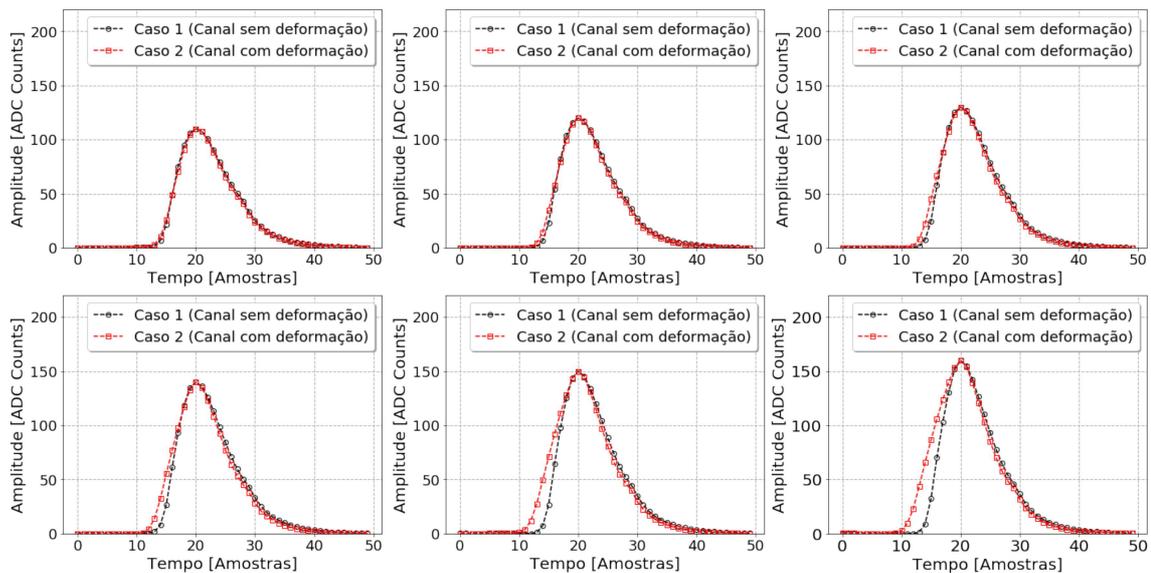
Figura 27 – Comparando a medida de correlação entre dois canais



Fonte: Autor

A Figura 28 compara a forma de onda de um dos canais com deformação detectada com a forma de onda padrão para diferentes amplitudes de pico. Como pode ser notado, a partir da amplitude de pico de 130 *ADC counts* os sinais começam a se diferenciar. A deformação embora seja pequena, sua presença sugere que o módulo de *front-end* que apresenta este comportamento deve ser substituído e avaliado em laboratório. Caso a mesma não seja substituída, é importante monitorar esse comportamento ao longo do tempo para certificar que o problema não se agrave.

Figura 28 – Sinais médios com amplitude indo de 110 a 160 contagens de ADC.



Fonte: Autor

Para entender um pouco mais sobre o possível impacto dessa deformação para o experimento, o número de eventos com energia abaixo de 200 fotoelétrons (região de interesse para detecção de partículas de antineutrinos (RIBEIRO, 2017)) foi medido. Desses eventos, apenas 5,1% deles têm ao menos um desses sete canais com problema com amplitude de pico acima de 130 *ADC counts*. Portanto, embora o problema exista, o baixo nível de deformação e a baixa porcentagem de eventos de interesse atingidos, indicam que o problema não deve comprometer de maneira significativa a qualidade dos dados coletados. Não obstante, este trabalho sugere que a Colaboração faça uma avaliação mais apurada desta situação a partir de simulações.

5.3 Equalização do ganho das PMTs do detector

As PMTs do detector foram calibradas pelo fabricante para trabalharem com um ganho de 10^7 electrons por fotoelétron. No entanto, medidas realizadas antes da instalação do detector em Angra já indicavam que existiam diferenças significativas entre os ganhos das PMTs, porém, não foi realizada uma recalibração deste parâmetro antes da instalações

das mesmas em Angra, e esta tarefa deixou para ser completada já com elas instaladas em suas posições finais. Para avaliar a diferença de ganho entre as PMTs no experimento, foi então proposto a aplicação de uma técnica usada para medida de ganho em situações onde eventos de mais de um fotoelétron são abundantes e então, com as medidas realizadas, a aplicação de um procedimento para equalização dos ganhos a partir de um ajuste fino das tensões de alimentação das PMTs. Uma vez equalizados os ganhos, tal técnica poderia então ser usada para monitorar as condições das PMTs ao longo do tempo; a análise com esse objetivo é mostrada no Capítulo 6.

A técnica aplicada propõe um ajuste de um modelo que se baseia na Equação (5.5). Esta equação representa a distribuição de probabilidade de carga/amplitude de pico da resposta de uma fotomultiplicadora ao número $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ N de fotoelétrons, quando a PMT está interagindo com uma fonte de fótons (ZHANG *et al.*, 2016). Para comparar os ganhos de cada uma delas, será utilizado o valor de Q encontrado em cada ajuste feito, visto que ele representa a sensibilidade que este sensor tem ao único fotoelétron (SPE).

$$S_{ideal}[x] = \sum_{n=0}^N \frac{u^n e^{-u}}{n!} \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi n}} e^{-\frac{(x-nQ)^2}{2n\sigma_1^2}} \quad (5.5)$$

A interpretação matemática dessa curva se dá pela convolução entre a equação que representa a probabilidade da PMT gerar algum sinal dado o número de fótons que provém de uma única fonte com o seu espectro de energia. O parâmetro u relata o número médio de elétrons que colidem no primeiro ânodo da fotomultiplicadora, dado o número de fótons que estão chocando nela (BELLAMY *et al.*, 1994). O termo u pode ser estimado através da razão entre o número total de respostas não geradas por ela e o número total de dados obtidos quando uma fonte de fótons está interagindo na fotomultiplicadora (Equação 5.6).

$$-\ln(S_{ideal}[0]) = u \quad (5.6)$$

O espectro de energia da PMT está descrito na Equação (5.7), onde cada termo dessa gaussiana representa o seu comportamento para um número n de fotoelétrons. Quando é aplicado a convolução entre essa equação e a distribuição de poisson, obtém-se a Equação (5.5).

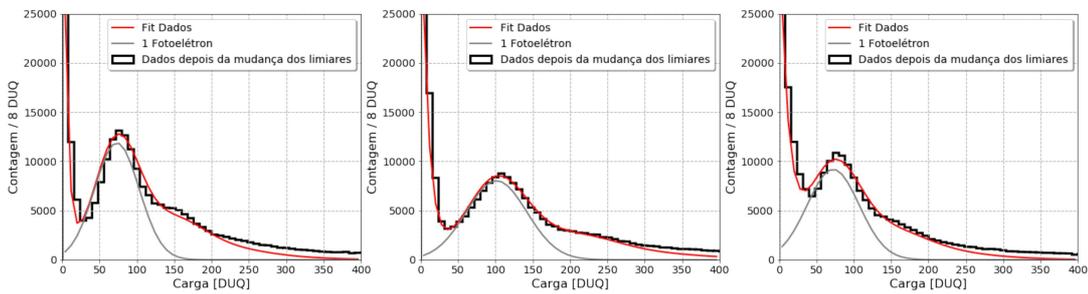
$$G[x] = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi n}} e^{-\frac{(x-nQ)^2}{2n\sigma_1^2}} \quad (5.7)$$

Para representar a distribuição de carga dos eventos que não geraram nenhum sinal na PMT, para modelar a componente de ruído eletrônico, foi acrescentado uma distribuição exponencial na Equação (5.5) (ZHANG *et al.*, 2016). Essa nova formulação matemática está sendo mostrada na Equação (5.8).

$$S_{final}[x] = Ce^{-\frac{\lambda}{x}} + \sum_{n=1}^N \frac{u^n e^{-u}}{n!} \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi n}} e^{-\frac{(x-nQ)^2}{2n\sigma_1^2}} \quad (5.8)$$

Um exemplo de tal ajuste aplicado em três canais do detector é apresentado na Figura 29. Onde também está sendo observado o espectro de 1 fotoelétron para estes canais, esta curva é encontrada quando o n da Equação (5.8) for 1. Como pode ser observado, existe uma diferença significativa nos ganhos dessas PMTs, já que os picos dos espectros de 1 fotoelétrons não estão no mesmo valor.

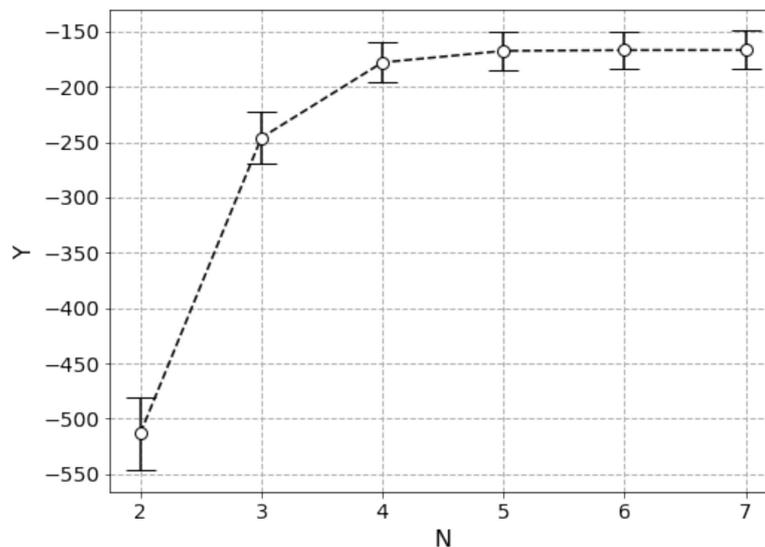
Figura 29 – Exemplo de três canais com ajuste baseado na Equação (5.8).



Fonte: Autor

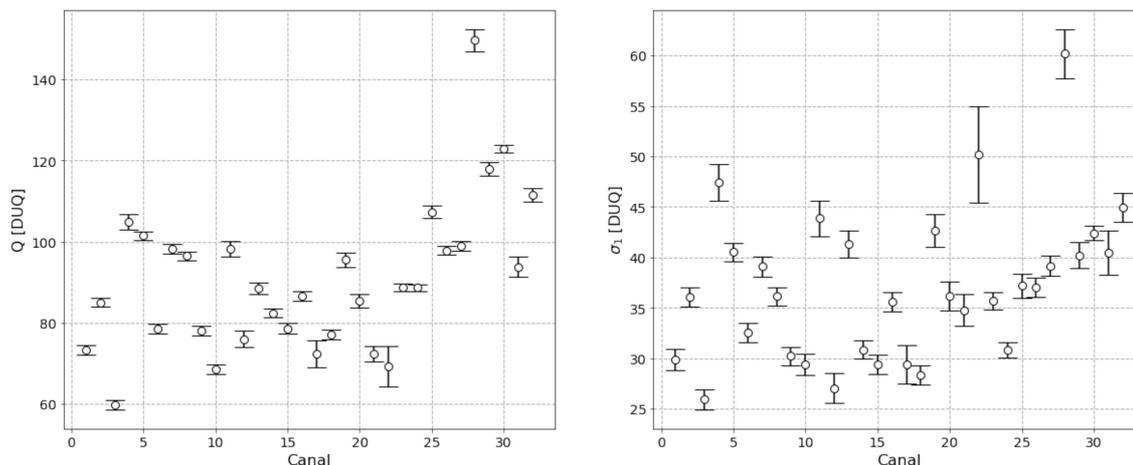
Vale ressaltar que os dados analisados foram obtidos na presença de um valor de *threshold*, o que pode alterar a distribuição de carga na região de baixa energia. Portanto, a estimação da distribuição de carga para um único fotoelétron é uma medida aproximada, que pode apresentar algum viés em relação à distribuição verdadeira. No entanto, aqui propomos que essa medida seja usada de maneira comparativa, para avaliar a diferença entre os ganhos das PMTs. Para a análise proposta nessa seção, dados do período 2 são utilizados uma vez que nesse período considera-se que o nível de *threshold* dos canais tenha sido ajustado próximo aos seus níveis de ruído, minimizando desta forma o impacto do *threshold* na análise proposta. Apenas canais do *Target* foram considerados uma vez que esses são fundamentais na medida de energia dos eventos. Os canais do Veto são usados apenas para fins de descarte de eventos de *background*.

Para definir o intervalo do somatório proposto pela Equação (5.8) (N) (número de Gaussianas a ser usado no ajuste proposto), varreu-se N de 2 à 7 e, para cada ajuste, subtraiu-se a amplitude da curva obtida pelos valores obtidos com os dados reais. Essa operação foi realizada considerando a região de carga entre 0 e 400 DUQ, onde o número de ocorrência se torna desprezível. O resultado é mostrado na Figura 30, onde o valor da subtração é denominado de Y (eixo vertical). Baseado nesses resultados, utiliza-se a partir de então o valor de $N = 5$.

Figura 30 – Relação entre n x Y 

Fonte: Autor

O valor de carga média para um único fotoelétron e seu desvio padrão obtidos para cada um dos canais do detector *Target* são mostrados na Figura 31. Como pode ser visto, ocorre uma dispersão significativa entre os valores de Q , indicando uma diferença considerável entre os ganhos das PMTs. No geral, temos então uma situação que requer uma equalização entre os ganhos das PMTs, e assim foi decidido pela Colaboração.

Figura 31 – Valores de Q e σ_1 

Fonte: Autor

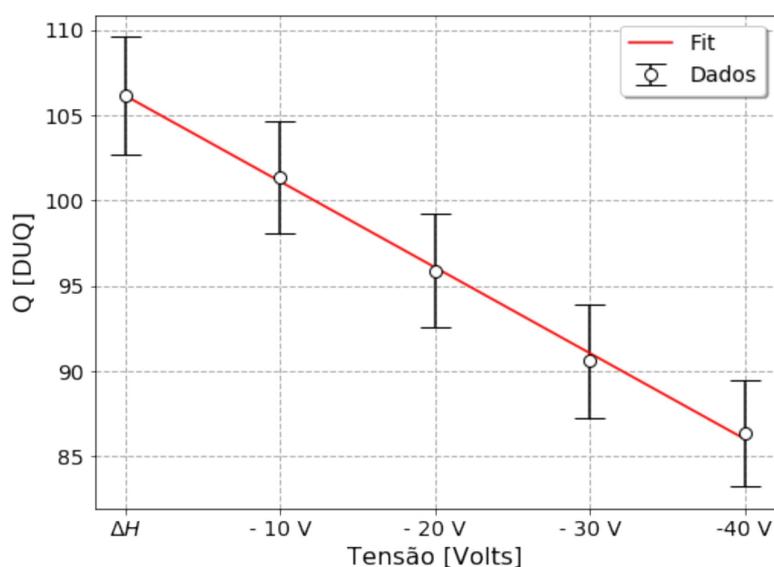
Para equalizar os canais, o seguinte procedimento foi aplicado, canal por canal:

- A tensão de alimentação da PMT V_{PMT} foi varrida e os valores de Q calculados.

- Um ajuste linear foi aplicado na curva resultante (V_{PMT} por Q).
- Através dos valores do coeficiente linear e angular encontrados, a tensão de cada PMT foi ajustada para que o valor de Q de cada canal do *Target* atingisse valores parecidos entre si.

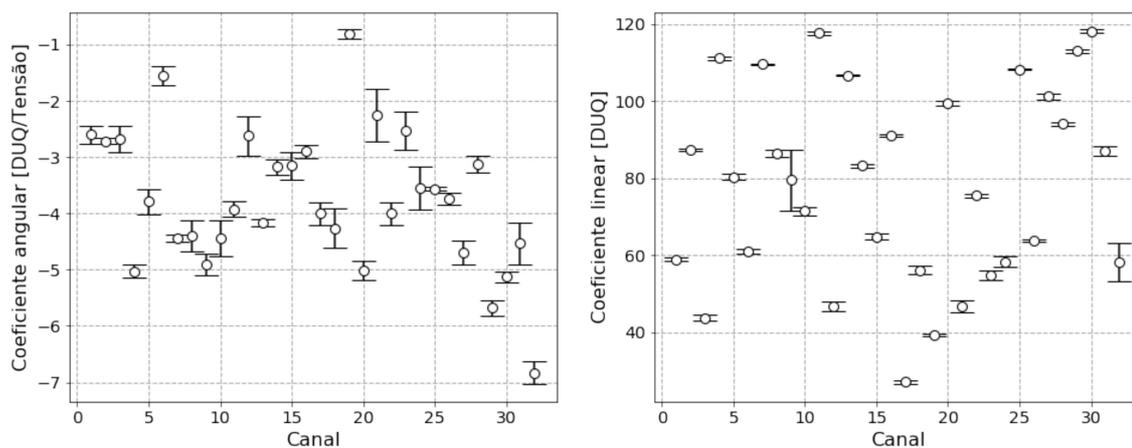
A Figura 32 mostra a curva V_{PMT} por Q encontrada para uma das PMTs. O valor ΔH da figura representa a tensão no qual a PMT estava sendo alimentada no período 2, -10 V representa o valor de tensão menos 10 Volts, -20V significa que o valor de foi subtraído -20 Volts e assim sucessivamente. Esse padrão de variação foi aplicado em todos os canais com intuito de encontrar as curvas lineares utilizadas nos ajustes de tensão das PMTs. O coeficiente angular (a) e linear (b) encontrados em cada ajuste feito se encontram na Figura 33.

Figura 32 – Tensão de alimentação x Q



Fonte: Autor

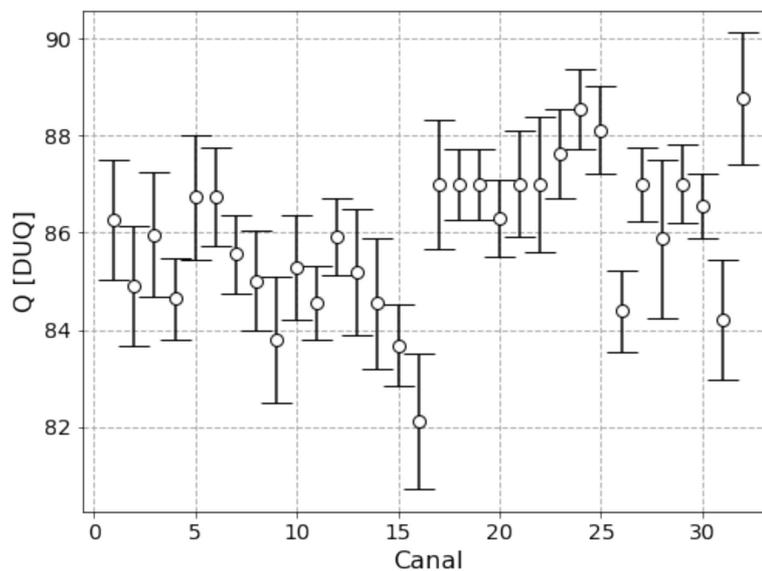
Figura 33 – Figura a esquerda coeficiente angular de cada canal e a direita é o linear



Fonte: Autor

Através dos ajustes feitos, o valor de tensão de cada PMT do *Target* foi posicionado para que o valor de Q de cada canal ficasse o mais próximo possível de 86 DUQ. Os novos valores obtidos são mostrados na Figura 34. E pode ser notado que a dispersão entre os valores de Q foram reduzidas quando comparado com aqueles que foram apresentados na Figura 31.

Figura 34 – Novos valores de Q



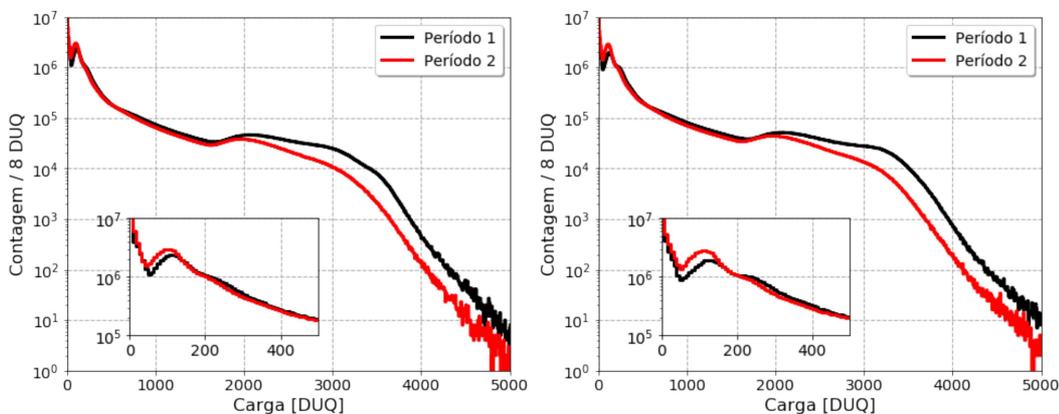
Fonte: Autor

5.4 Impacto dos ajustes de limiar nos eventos adquiridos.

O ajuste dos limiares de todos os discriminadores da eletrônica de leitura do sistema é de fundamental importância para que o mesmo consiga detectar eventos de baixa energia e, ao mesmo tempo, descartar eventos de *background* pelos detectores de *Veto* com alta eficiência. Tal ajuste é feito de maneira remota e seu impacto não é de fácil percepção pelos parâmetros monitorados pelo sistema de controle do experimento. Essa seção se propõe a medir o impacto dos ajustes dessa grandeza a partir dos dados adquiridos pelo experimento. Para este fim, foram utilizados os conjuntos de dados dos períodos 1 e 2 uma vez que na transição entre esses dois períodos houve um ajuste mais significativo dos limiares do sistema; o que não ocorreu na transição entre os períodos 2 e 3.

A Figura 35 mostra a distribuição de carga obtida durante esses dois períodos para o detector *Target*, ambas feitas com o mesmo número de eventos, para dois canais do *Target* (as demais distribuições são apresentadas no Apêndice B). É possível notar um aumento na captura de sinais na região de um fotoelétron (77,96 DUQ) e uma redução do número de eventos na região de alta energia (> 2000 DUQ). Esses dois efeitos se devem à diminuição dos limiares dos canais do *Target* e do *Veto*, respectivamente.

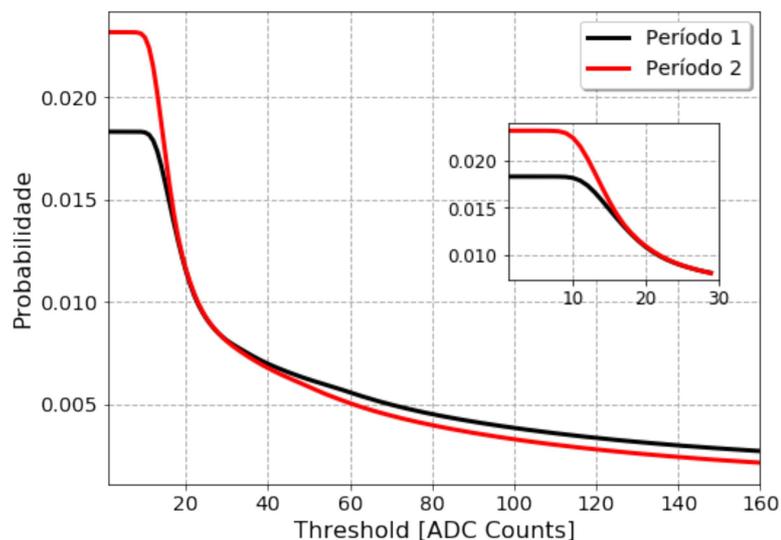
Figura 35 – Medida de cargas nos períodos 1 e 2 para dois canais do *Target*



Fonte: Autor

Para uma validação deste resultado, a probabilidade do número de ocorrência de eventos que dispararam 5 ou mais canais para diferentes níveis de *threshold* (2 a 160 ADC Counts) é mostrada na Figura 36 para os dados dos períodos 1 e 2. Conforme pode ser notado, houve um aumento considerável do número de eventos de baixa energia em torno da região de amplitude do fotoelétron único (7,2 *ADC counts*).

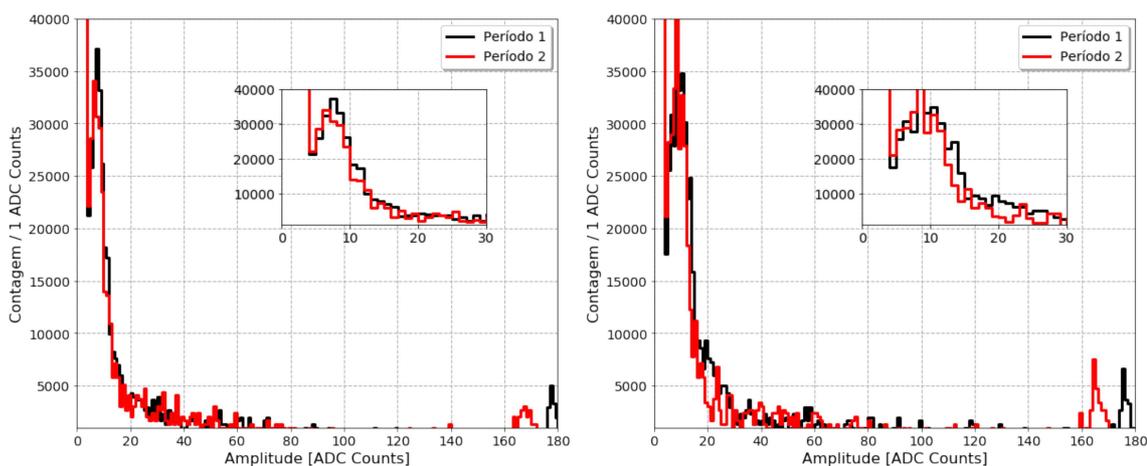
Figura 36 – Probabilidade de se obter um evento que passou de um *thresholds*



Fonte: Autor

O efeito da mudança dos *thresholds* nos canais do veto pode ser visto na Figura 37 a partir do espectro de energia, medido pela amplitude de pico, de dois canais do detector, um do *Veto* central (à esquerda) e outro do *Veto* lateral (à direita). Esses eventos passaram pelo sistema de *Veto* e representam uma medida relacionada à ineficiência deste. Lembrando que o sistema de *trigger* exige que ao menos dois canais dos detectores de *Veto* sejam atingidos para que o evento seja vetado.

Figura 37 – Amplitude de pico de um canal do veto central à esquerda e de um canal do veto lateral à direita



Fonte: Autor

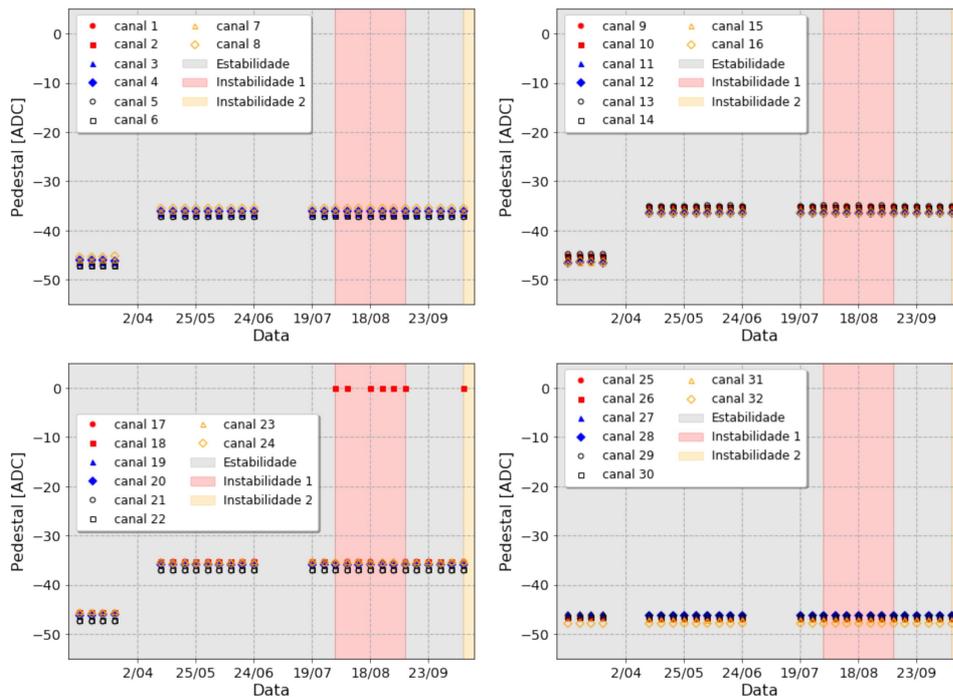
6 Estabilidade do detector

A estabilidade de sistema de detecção de partículas trata da garantia que os dados foram adquiridos a partir de uma configuração planejada e configurada previamente, antes do início da aquisição de dados (KEMP *et al.*, 2019; BARWICK *et al.*, 2015; KLEINFELDER; COLLABORATION *et al.*, 2013). No caso do experimento Neutrinos Angra, propomos o monitoramento do pedestal e da forma de onda dos sinais adquiridos, ganho das PMTs e energia média dos eventos coletados. As medidas de estabilidade de cada um desses componentes estão descritas no decorrer das próximas seções deste capítulo. Todas estas medidas foram feitas entre os anos de 2019 e 2021, em intervalos de 6 dias, com uma média de 12 horas de aquisição de dados por dia.

6.1 Pedestal dos sinais adquiridos

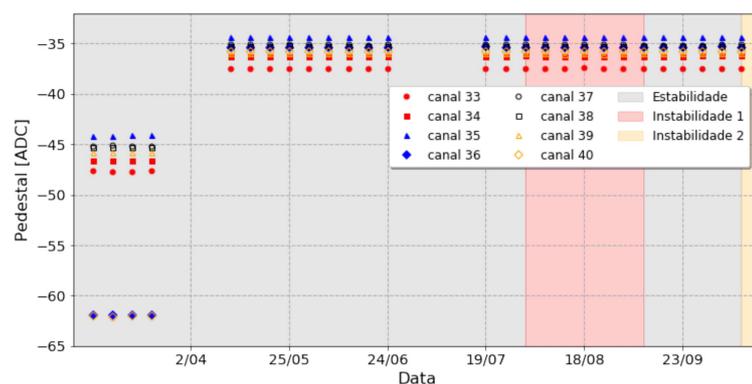
O monitoramento da estabilidade do pedestal de cada canal para o ano de 2019 está representado nas Figuras 38 e 39. Pela análise da figura, é possível identificar os períodos de estabilidade e instabilidade do ano de 2019. Essas ocorrências se devem a uma desconfiguração do valor de pedestal do canal 18 da eletrônica de leitura dos sinais, que foi reinicializado a zero de maneira abrupta, visto que existe uma mudança no seu valor. Esse efeito aparece apenas no gráfico na parte inferior à esquerda da Figura 38; todos os outros canais tiveram comportamento estável.

Figura 38 – Monitoramento temporal do pedestal de cada canal do *Target* no ano de 2019.



Fonte: Autor

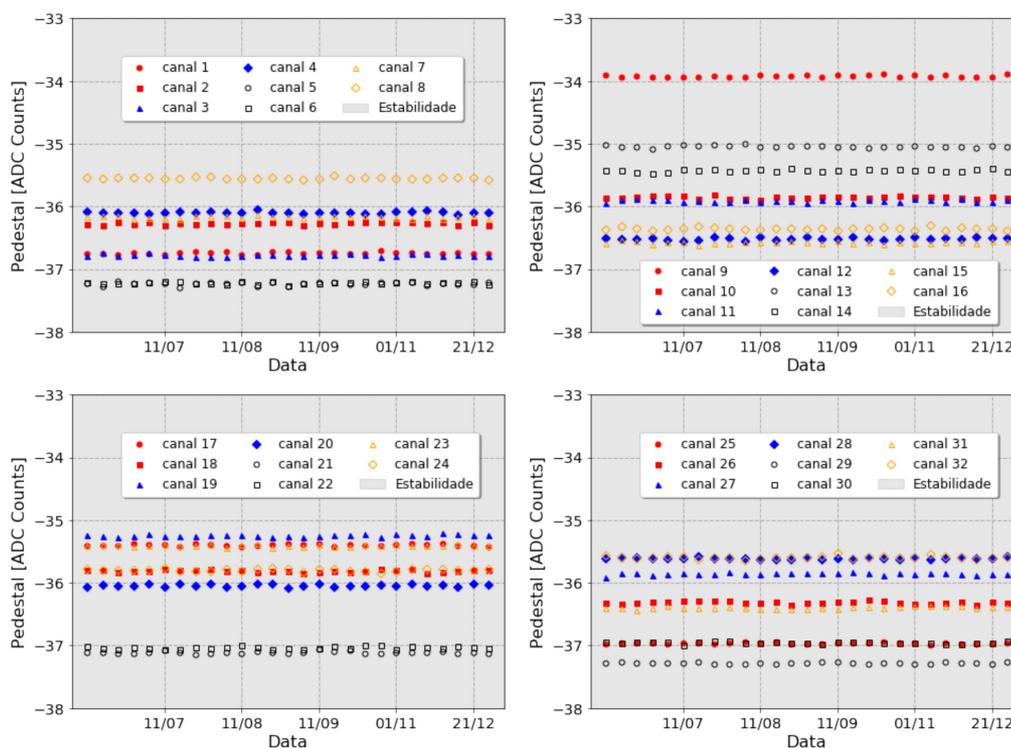
Figura 39 – Monitoramento temporal do pedestal de cada canal do *Veto* no ano de 2019.



Fonte: Autor

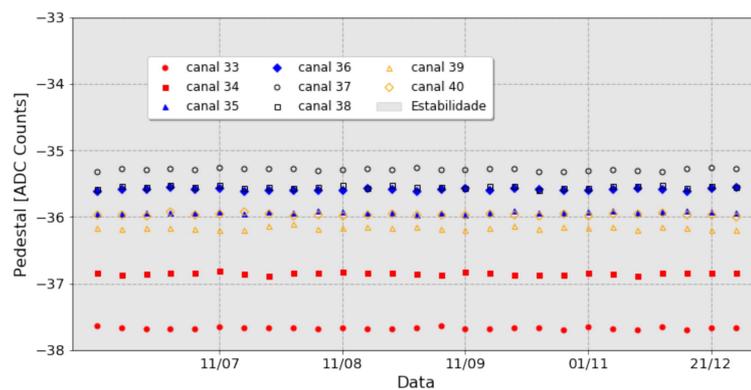
Em relação aos anos de 2020 e 2021 o pedestal de cada canal do detector permaneceu estável, como mostrado pelas figuras 40 e 41 para o ano de 2020, e pelas figuras 42 e 43 para o ano de 2021.

Figura 40 – Monitoramento temporal do pedestal de cada canal do *Target* no ano de 2020.



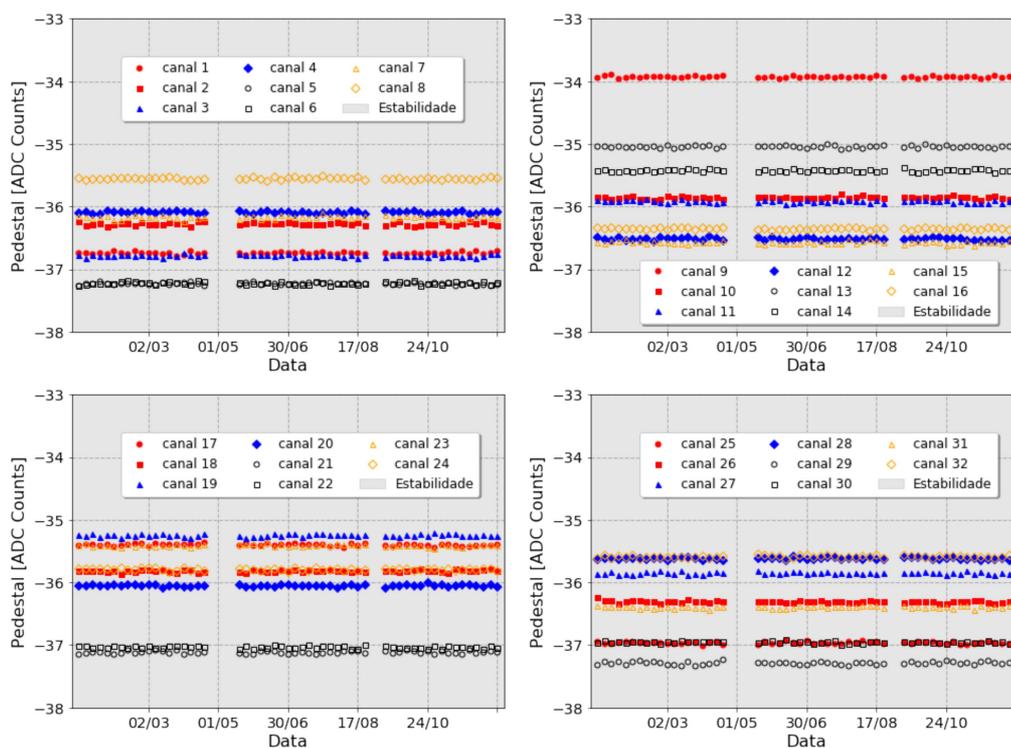
Fonte: Autor

Figura 41 – Monitoramento temporal do pedestal de cada canal do *Veto* no ano de 2020.



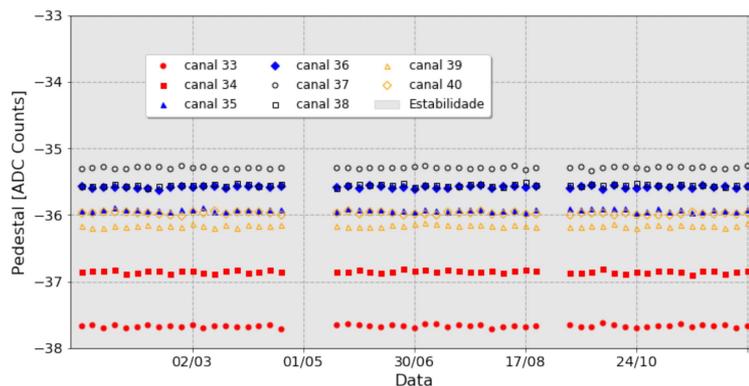
Fonte: Autor

Figura 42 – Monitoramento temporal do pedestal de cada canal do *Target* no ano de 2021.



Fonte: Autor

Figura 43 – Monitoramento temporal do pedestal de cada canal do *Veto* no ano de 2021.

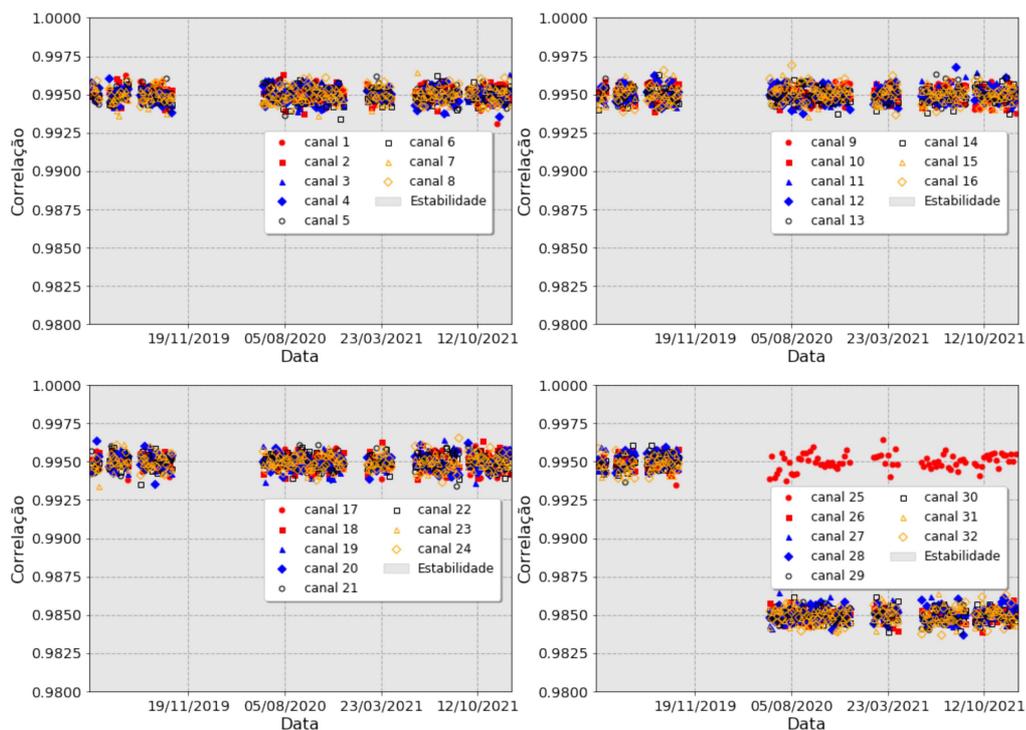


Fonte: Autor

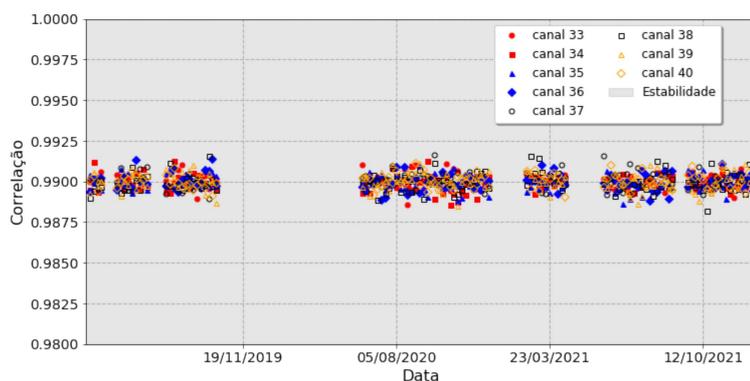
6.2 Forma de onda dos sinais adquiridos

O método descrito na Seção 5.2 para identificar deformações nas formas de onda dos sinais da FEE, é utilizado aqui para fins de monitoramento temporal. Essa medida está sendo mostrada nas figuras 44 (canais do *Target*) e 45 (canais do *Veto*).

Figura 44 – Monitoramento temporal da correlação dos canais do *Target*



Fonte: Autor

Figura 45 – Monitoramento temporal da correlação dos canais do *Veto*

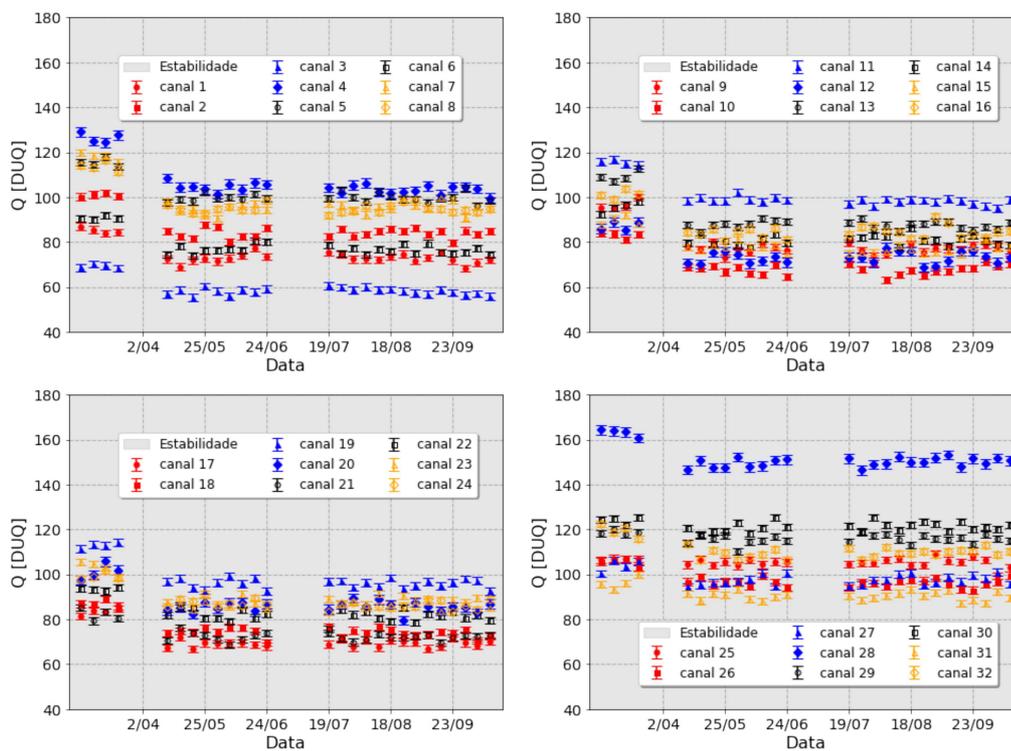
Fonte: Autor

Pode ser observado uma mudança abrupta no comportamento de 7 canais de um dos módulos de FEE, no gráfico inferior à esquerda da Figura 44. Esse efeito foi parcialmente discutido na Seção 5.2) e, como visto, sinais com uma amplitude de pico maior do que 130 *ADC counts* têm sua forma de onda alterada levemente. Note que o valor de correlação muda levemente, de 0.9950 para 0.9850. Esta ocorrência se apresenta após a mudança de um dos módulos de *front-end*, ocorrida no início do ano de 2020. É importante ressaltar que esse comportamento se manteve até o fim do ano de 2021 e portanto as condições deste parâmetro foram consideradas estáveis para este trabalho.

6.3 Ganho das *PMTs*

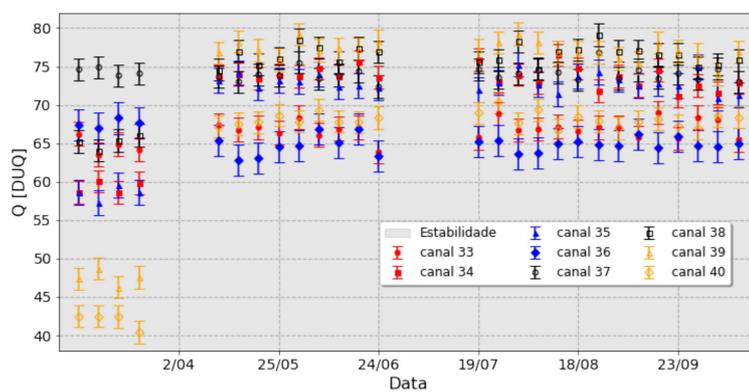
A estabilidade de cada *PMT* do *Target* e do *Veto* foi mapeada ao longo do tempo através da medida do parâmetro Q da Equação (5.8). Os resultados dessas medidas para os anos de 2019 a 2021 estão sendo mostrados respectivamente nas figuras (46, 47), (48, 49), e (50, 51).

Figura 46 – Monitoramento dos ganhos das *PMTs* no ano de 2019 para os canais do *Target*



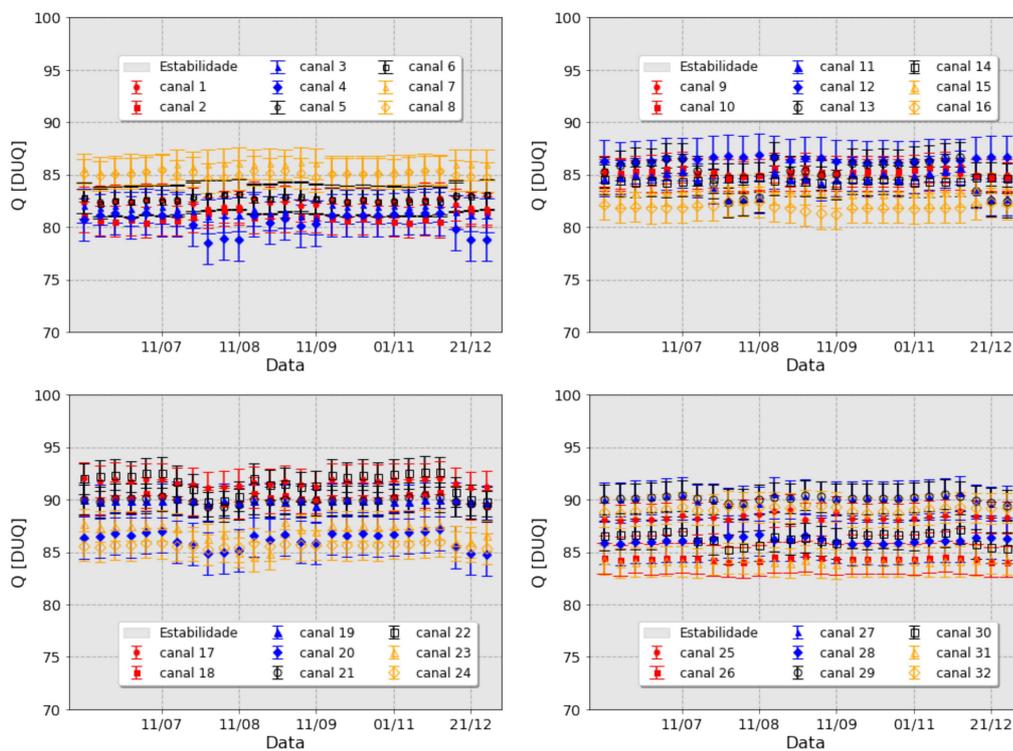
Fonte: Autor

Figura 47 – Monitoramento dos ganhos das *PMTs* no ano de 2019 para os canais do Veto



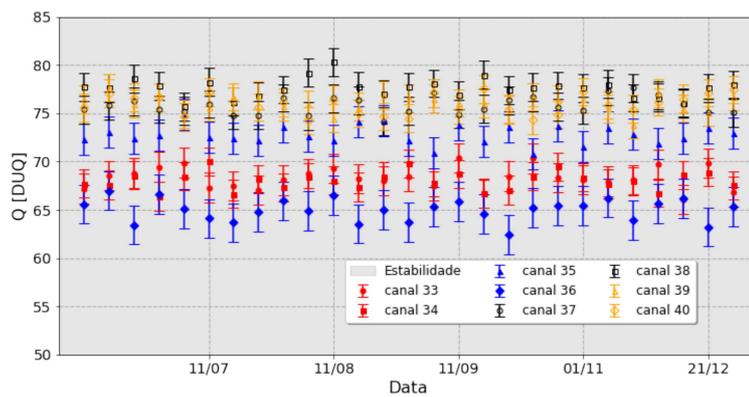
Fonte: Autor

Figura 48 – Monitoramento dos ganhos das *PMTs* no ano de 2020 para os canais do *Target*



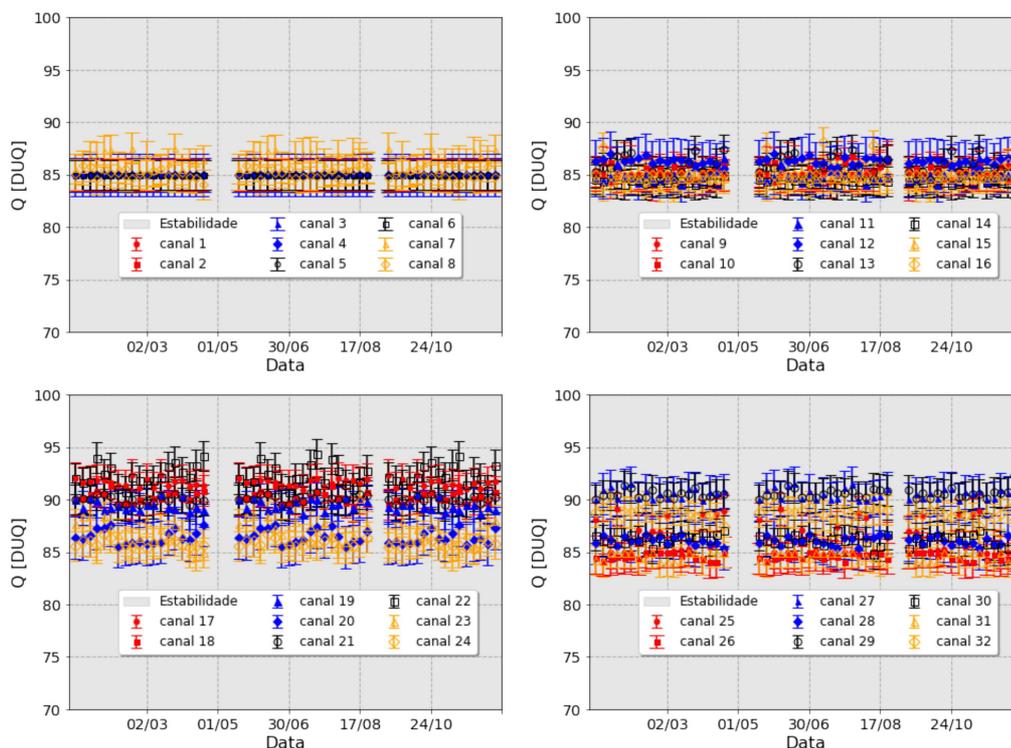
Fonte: Autor

Figura 49 – Monitoramento dos ganhos das *PMTs* no ano de 2020 para os canais do Veto



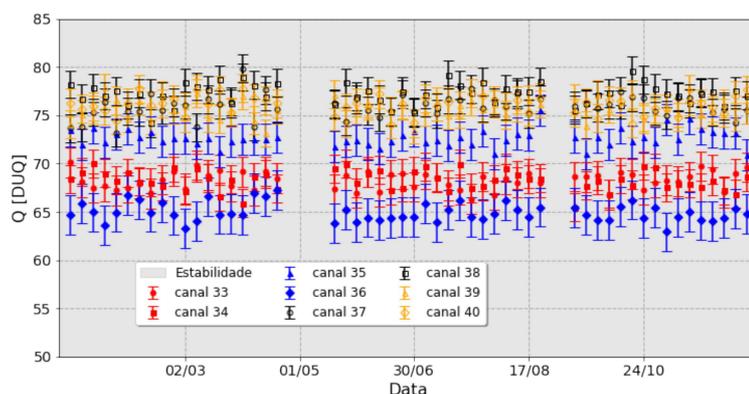
Fonte: Autor

Figura 50 – Monitoramento dos ganhos das *PMTs* no ano de 2021 para os canais do *Target*



Fonte: Autor

Figura 51 – Monitoramento dos ganhos das *PMTs* no ano de 2021 para os canais do Veto



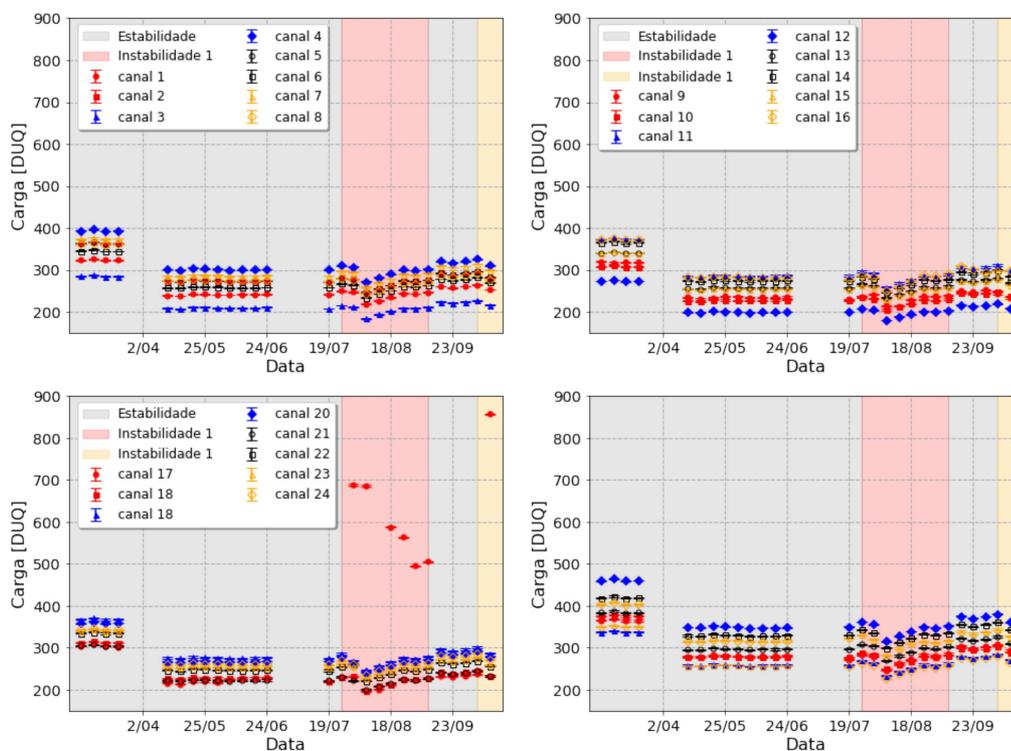
Fonte: Autor

Como os valores de Q só alteraram após os dias da calibração dos *thresholds* e/ou após as mudança das tensões de alimentação das *PMTs*, então pode-se considerar que os ganhos das fotomultiplicadoras permaneceram estáveis durante os anos de 2019 a 2021. No entanto, como discutido anteriormente, somente a partir do ano de 2020, após a campanha de equalização do detector *Target*, que os ganhos das *PMTs* começaram a trabalhar com valores mais próximos entre si.

6.4 Distribuição de energia dos eventos.

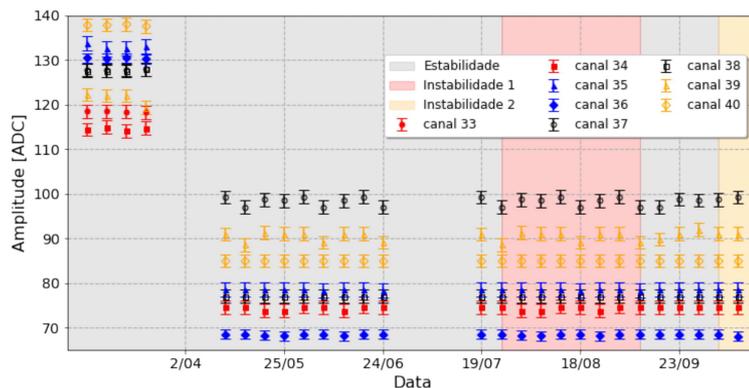
As medidas da estabilidade de energia dos canais para o ano de 2019 podem ser vistas nas Figuras 52 e 53. Os resultados mostram que em torno do dia 02/04/2019, aconteceu uma queda abrupta dos valores das cargas devido à mudanças dos limiares dos canais de FEE, os quais foram todos reduzidos. Isso aumentou a captura de eventos de baixa energia, diminuindo, conseqüentemente, a carga média dos canais, conforme já foi discutido na Seção 5.4. Também pode ser visto que existem dois períodos de instabilidade durante o ano de 2019. Essas duas regiões aconteceram devido à desconfiguração do valor de pedestal do canal 18, conforme visto na Seção 6.1. Nota-se também que essa desconfiguração acaba por alterar também a distribuição de carga dos outros canais. Este efeito se relaciona com a desconfiguração de pedestal, já que sinal do canal 18 ficou permanentemente acima do limiar, o que fez com que fosse necessário apenas 4 ou mais PMTs atingidas para que um evento fosse coletado, mudando naturalmente a distribuição de energia dos eventos. Todos os outros parâmetros medidos continuaram estáveis, havendo apenas mudança na taxa de *trigger* como consequência da desconfiguração do pedestal. Uma vez detectado o problema, os eventos adquiridos nesses períodos de instabilidade foram excluídos da análise de dados do experimento.

Figura 52 – Monitoramento temporal dos canais do *Target* no ano de 2019.



Fonte: Autor

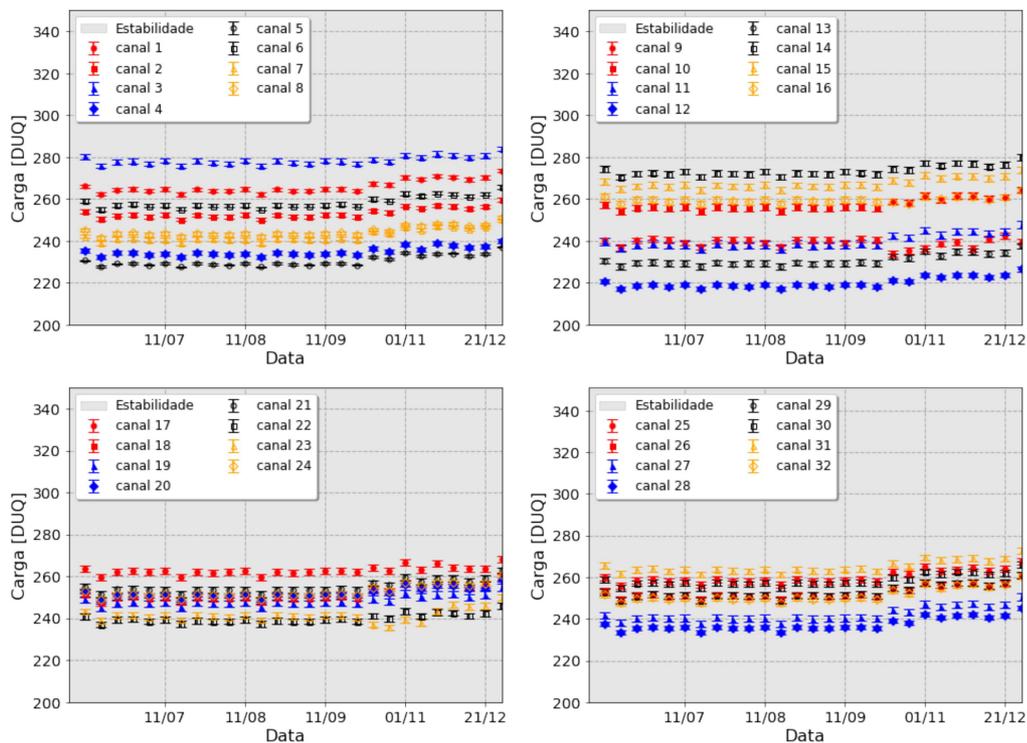
Figura 53 – Monitoramento temporal dos canais do Veto no ano de 2019.



Fonte: Autor

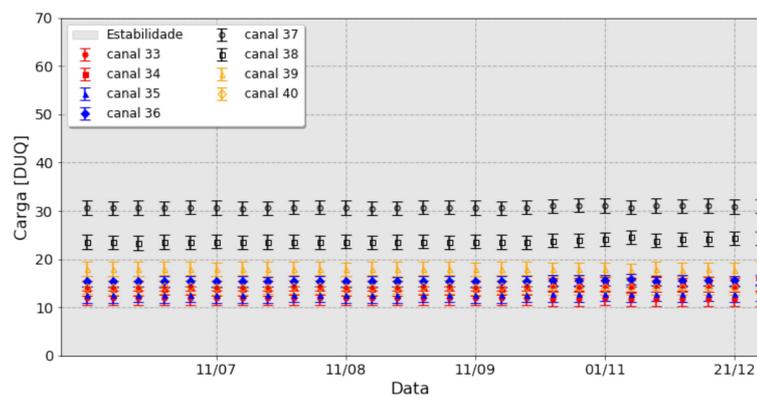
No ano de 2020 não foi detectada nenhuma instabilidade (ver figuras 54 e 55) e em 2021 ocorreram dois períodos de instabilidade no detector, conforme mostrado nas figuras 56 e 57. Em uma investigação para encontrar as causas dessas instabilidades foi revelado que as Usinas de Angra estão entrando em um processo de armazenamento de combustível nuclear a seco, sendo necessário sair com rejeitos nucleares pelo portão de acesso do domo do reator (ELETRONUCLEAR..., 2022). Essas movimentações foram executadas em datas que coincidem com os períodos de instabilidade detectados pelo nosso sistema. Portanto, esta medida indica que, possivelmente, um dos objetivos do Experimento Neutrinos Angra foi alcançado: o de detectar emissões de radiação anômalas ao redor do reator nuclear. Uma análise mais detalhada está sendo feita atualmente pela Colaboração.

Figura 54 – Monitoramento temporal dos canais do *Target* no anos de 2020



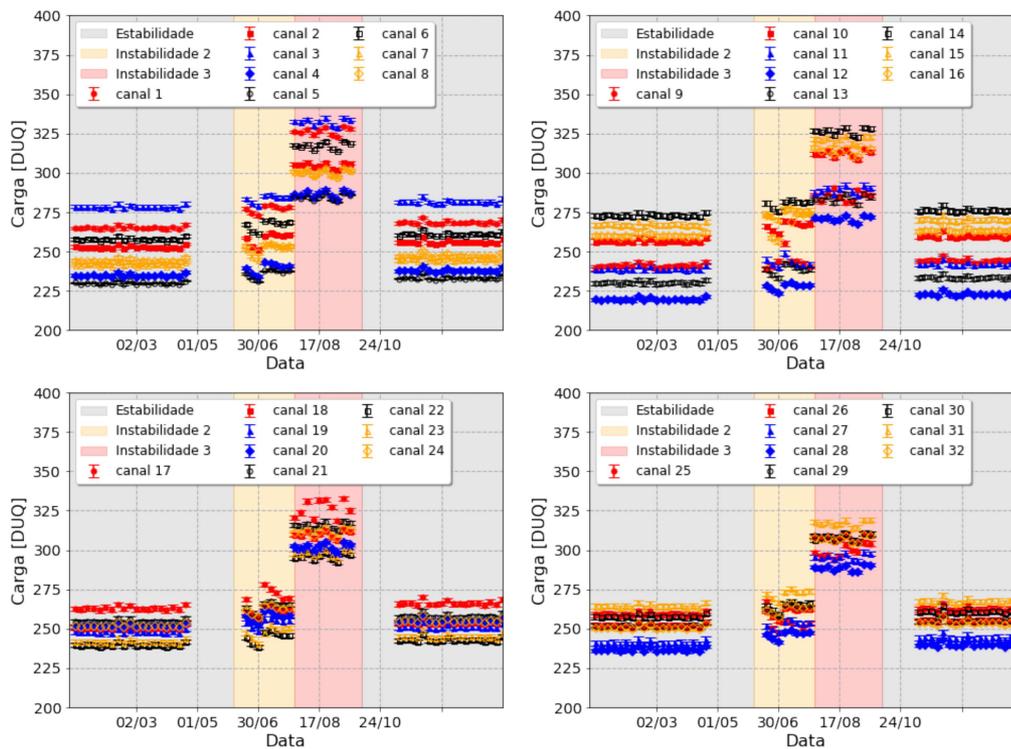
Fonte: Autor

Figura 55 – Monitoramento temporal dos canais do Veto nos anos de 2020



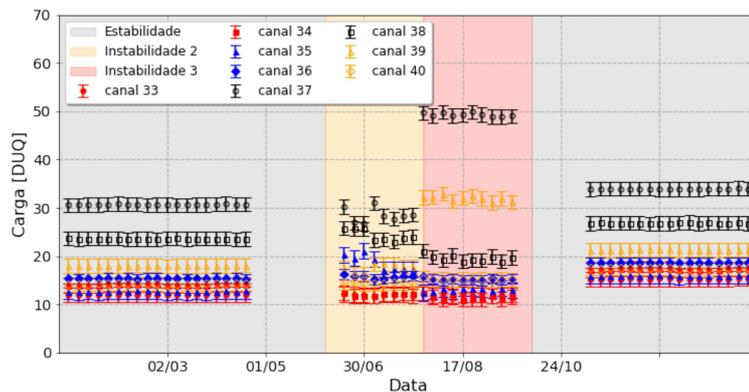
Fonte: Autor

Figura 56 – Monitoramento temporal dos canais do *Target* no anos de 2021



Fonte: Autor

Figura 57 – Monitoramento temporal dos canais do Veto nos anos de 2021



Fonte: Autor

7 Considerações finais

7.1 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho permitiu propor e avaliar métodos que, ao serem aplicados nos dados adquiridos, favoreceram à estimação da energia de eventos coletados e permitiram otimizar as condições de funcionamento do sistema de detecção do experimento ν -Angra. Em particular, a análise da medida de pedestal mostrou algumas vulnerabilidades do processo e propôs uma primeira melhoria para a mesma. Um método para equalização de ganho entre as PMTs foi proposto e utilizado pela Colaboração para ajuste fino dos ganhos das mesmas. Esses dois itens levaram a uma otimização do detector, principalmente quanto à estimação de energia dos eventos. Outras duas técnicas propostas nesse trabalho e usadas pela Colaboração foram: a medida de deformação da forma de onda dos sinais adquiridos a partir da correlação com um sinal de referência e o estudo do impacto dos ajustes de limiares dos discriminadores do sistema. A primeira identificou 7 canais com problemas de deformação no sinal, concluindo que o problema tem baixo impacto na análise de dados do experimento enquanto a segunda mostrou que a redução dos limiares, a um valor logo acima do nível de ruído dos canais, aumentou de eficiência de seleção de eventos de baixa energia e de descarte de eventos de alta energia, em sua maioria provenientes de raios cósmicos.

Adicionalmente, estas medidas citadas acima, em conjunto com a distribuição de energia dos canais do detector, foram utilizadas para monitorar a estabilidade do detector e assim identificar os períodos de aquisição que a Colaboração deve priorizar em análises futuras. Em especial, os resultados do último capítulo deste trabalho levou à identificação de um período onde a distribuição de energia dos canais do detector apresentou comportamento anômalo, sem clara justificativa. Este comportamento foi então relacionado mais tarde com as operações de movimentação de material radioativo na parte externa do domo do reator, promovidas pela Eletronuclear, realizadas para o armazenamento a seco de combustível irradiado. Atualmente a Colaboração está analisando em detalhes os dados coletados durante essas operações.

7.2 Proposta de continuidade

Este trabalho apresentou métodos que, ao serem aplicados, permitiram que as condições de funcionamento do sistema de detecção fossem otimizadas e monitoradas. No entanto, a parte de monitoramento proposta neste trabalho tem sido usada de maneira offline fazendo com que a Colaboração não consiga reagir rapidamente quando um problema ocorre. Portanto, a implementação dos métodos propostos neste trabalho devem ser incluídos no sistema de monitoramento online para que o sistema de detecção possa ser reconfigurado rapidamente caso necessário. Adicionalmente, o controle da qualidade da

água que preenche a parte interna do detector pode ser usado para melhor entendimento das condições de funcionamento do detector à médio/longo prazo. Portanto, é importante que o detector seja instrumentalizado de maneira que a condição da sua água possa ser medida e monitorada.

REFERÊNCIAS

- ABE, Y. *et al.* Indication of reactor $\bar{\nu}$ disappearance in the double chooz experiment. **Physical Review Letters**, American Physical Society (APS), v. 108, n. 13, Mar 2012. ISSN 1079-7114. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.131801>>.
- AKGUN, U. *et al.* Afterpulse timing and rate investigation of three different hamamatsu photomultiplier tubes. **Journal of Instrumentation**, IOP Publishing, v. 3, n. 01, p. T01001–T01001, jan 2008.
- ALVARENGA, T. *et al.* Readout electronics validation and target detector assessment for the neutrinos angra experiment. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 830, p. 206–213, 2016. ISSN 0168-9002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216304417>>.
- AN, F. P. *et al.* Observation of electron-antineutrino disappearance at daya bay. **Physical Review Letters**, American Physical Society (APS), v. 108, n. 17, Apr 2012. ISSN 1079-7114. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.171803>>.
- ANJOS, J. *et al.* Using neutrinos to monitor nuclear reactors: the angra neutrino experiment, simulation and detector status. **Nuclear and Particle Physics Proceedings**, Elsevier, v. 267, p. 108–115, 2015.
- ANJOS, J. *et al.* Status and perspectives of the neutrino angra project. In: **NuInt12: eighth International Workshop on Neutrino-Nucleus Interactions in the Few-GeV region, Rio de Janeiro Brazil**. [S.l.: s.n.], 2012.
- ANJOS, J. C. *et al.* Angra dos Reis reactor neutrino oscillation experiment. **Brazilian Journal of Physics**, Springer, v. 36, p. 1118 – 1123, Dez 2006.
- APOLLONIO, M. *et al.* Limits on neutrino oscillations from the chooz experiment. **Physics Letters B**, Elsevier BV, v. 466, n. 2-4, p. 415–430, Nov 1999. ISSN 0370-2693. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0370-2693\(99\)01072-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0370-2693(99)01072-2)>.
- BARWICK, S. *et al.* Design and performance of the arianna hra-3 neutrino detector systems. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, IEEE, v. 62, n. 5, p. 2202–2215, 2015.
- BELLAMY, E. o. *et al.* Absolute calibration and monitoring of a spectrometric channel using a photomultiplier. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Elsevier, v. 339, n. 3, p. 468–476, 1994.
- BERNSTEIN, A. *et al.* Monitoring the thermal power of nuclear reactors with a prototype cubic meter antineutrino detector. **Journal of Applied Physics**, AIP Publishing, v. 103, n. 7, p. 074905, Apr 2008. ISSN 1089-7550. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1063/1.2899178>>.
- BERNSTEIN, A. *et al.* Nuclear reactor safeguards and monitoring with antineutrino detectors. **Journal of Applied Physics**, v. 91, n. 7, p. 4672–4676, 2002.

BOWDEN, N. Reactor monitoring and safeguards using antineutrino detectors. v. 136, n. 2, p. 022008, 2008.

CAEN. **User Manual UM2462, Mod.: SY4527 - SY4527LC Power Supply Systems**. [S.l.]: Costruzioni Apparecchiature Elettroniche Nucleari S.p.A. (CAEN), 2014.

CECCHINI, S.; SPURIO, M. Atmospheric muons: experimental aspects. **Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems**, v. 1, 08 2012.

COSTA, J. A. *et al.* **Eletrônica de front-end do experimento Neutrinos-Angra**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2014.

DORNELAS, T. *et al.* Front-end design and characterization for the ν -angra nuclear reactor monitoring detector. **Journal of Instrumentation**, IOP Publishing, v. 11, n. 07, p. P07018, 2016.

DORNELAS, T. I. *et al.* **Estudo, desenvolvimento e análise da instrumentação do experimento Neutrinos-Angra**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, MG., 2015.

ELETRONUCLEAR inicia transferência de combustíveis usados para a UAS. 2022. Disponível em $\langle \Rightarrow \rangle$ <https://www.eletronuclear.gov.br/Imprensa-e-Midias/Paginas/Eletronuclear-inicia-transferencia-de-combustivel-usados-para-a-UAS.aspx>, Acesso em: 13 de dezembro 2022.

FLYCKT, S.-O. **Photomultiplier tubes: principles and applications**. [S.l.]: Photonis, 2002.

GAMA, R. G. **Desenvolvimento da instrumentação em lógica programável para aquisição de dados no Projeto Neutrinos Angra**. Dissertação (Mestrado) — Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, RJ., 2011.

GONZALEZ, L. F. G. **Estudo da Resolução em Energia do Detector de Neutrinos do Projeto ANGRA para Medidas de Composição do Combustível Nuclear**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física Gleb Wataghin, Campinas, SP., 2009.

GONZALEZ, L. F. G. **Estudo da relação sinal/ruído em detectores de antineutrinos de reator**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física Gleb Wataghin, Campinas, SP., 2019.

JR., H. L. *et al.* Neutrinos angra experiment: commissioning and first operational measurements. **Journal of Instrumentation**, IOP Publishing, v. 14, n. 06, p. P06010–P06010, jun 2019.

JR, H. P. L. *et al.* Data acquisition with optimal pulse amplitude estimation for a neutrino detection experiment. **Notas Técnicas do CBPF**, v. 4, n. 2, 2014.

KEMP, E. *et al.* Brazilian report on safeguards application of reactor neutrinos. 2019.

KLEINFELDER, S. A.; COLLABORATION, A. C. *et al.* Design and performance of the autonomous data acquisition system for the arianna high energy neutrino detector. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, IEEE, v. 60, n. 2, p. 612–618, 2013.

LOPES, G. *et al.* Target detector evaluation using cosmic ray events for the -angra experiment. In: . [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.

LUBSANDORZHIEV, B. *et al.* Studies of prepulses and late pulses in the 8 electron tubes series of photomultipliers. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 442, n. 1, p. 452–458, 2000. ISSN 0168-9002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900299012723>>.

MACLEODA, A. **Measuring the gain of a photomultiplier tube**. Dissertação (Mestrado) — McGill University, Montreal, Québec, Canada., 2007.

MIGLIORINI, M. *et al.* Front-end control system and precise threshold configuration of the -angra experiment. **Journal of Instrumentation**, IOP Publishing, v. 15, n. 09, p. T09001–T09001, sep 2020.

Migliorini, M. L. *et al.* Front-end's control system and threshold scan evaluation for the -angra experiment. In: **2019 4th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–4.

MUSTAFÁ, H. C. M. A. *et al.* The High-Altitude Water Cherenkov Observatory. **Brazilian Journal of Physics**, Springer, v. 44, n. 5, p. 571–580, 2014.

PASCHOAL, M. *et al.* v-angra readout electronics and target detector assessment using a cosmic rays based trigger. **3rd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers**, 2018.

PHOTONICS, K. H. **Photomultiplier Tube-R5912**. [S.l.]: Datasheet, 1998.

RIBEIRO, D. B. dos S. **Projeto Neutrinos Angra: o detector final**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica da Bahia - Instituto de Matemática e Estatística, Salvador, BA., 2019.

RIBEIRO, M. A. de F. **VALIDAÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO COMPUTACIONAL DO EXPERIMENTO NEUTRINOS ANGRA**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL), 2017.

ROSSI, B.; GREISEN, K. Cosmic-ray theory. **Rev. Mod. Phys.**, American Physical Society, v. 13, p. 240–309, Oct 1941. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.13.240>>.

SANTOS, L. M. **Estudo de eficiência para múons do sistema de veto do experimento Neutrinos-ANGRA**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física Gleb Wataghin, Campinas, SP., 2014.

SANTOS, W. V. d. S. **Estudo da Eficiência do Detector Neutrinos Angra Utilizando GEANT4**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física Gleb Wataghin, Campinas, SP., 2022.

SENSORTEC, B. Data sheet bmp180 digital pressure sensor. **Np: Bosch Sensortec**, 2013.

SOUZA, D. *et al.* Development and characterization of a water-based muon veto for the ν -angra experiment. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 1004, p. 165378, 2021. ISSN 0168-9002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900221003624>>.

SOUZA, D. M. *et al.* Development and characterization of a water-based muon veto for the ν -Angra Experiment. **Nucl. Instrum. Meth. A**, v. 1004, p. 165378, 2021.

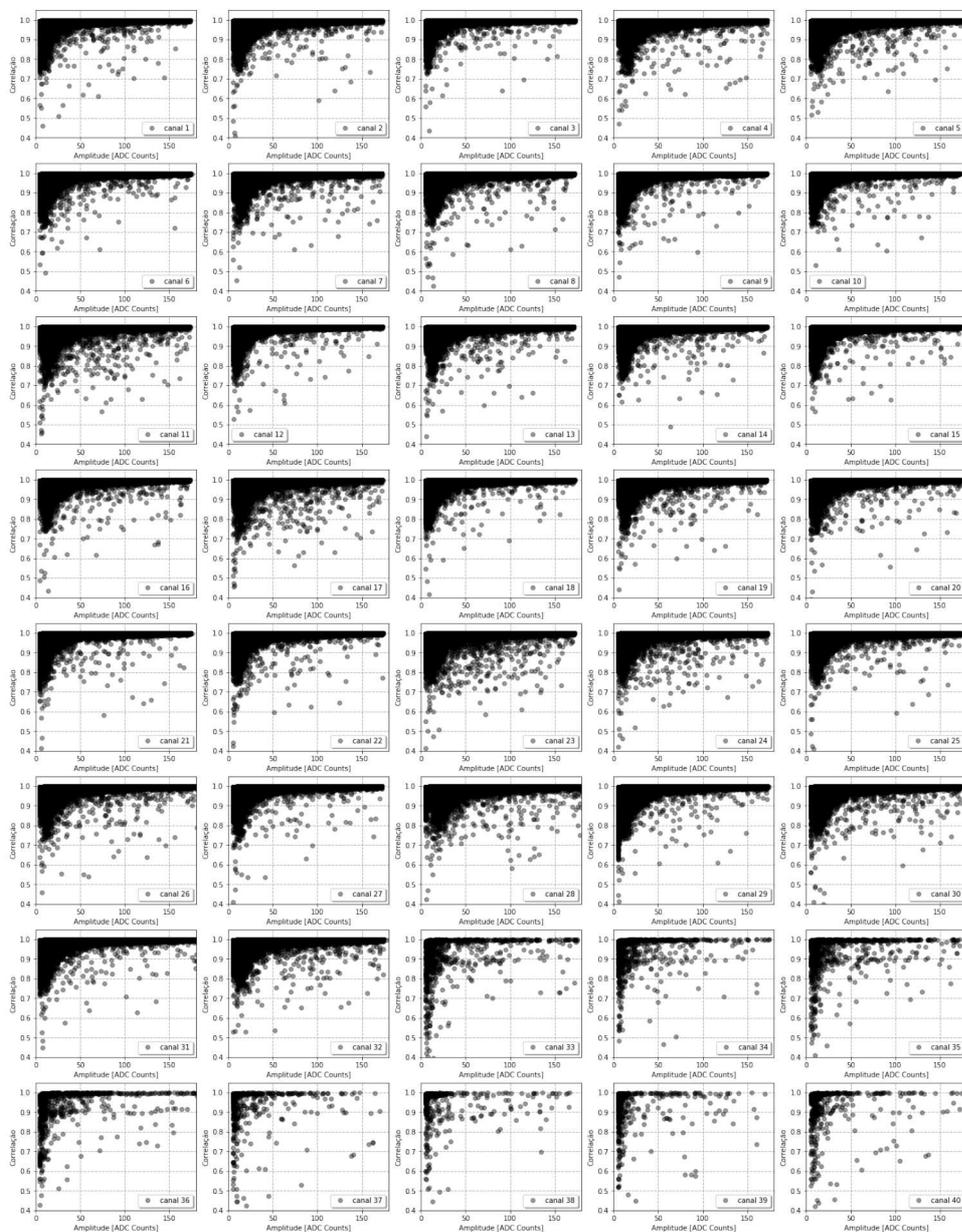
SOUZA, J. *et al.* Sistema online de seleção de eventos no detector neutrinos-angra. p. 1–6, 2016.

ZHANG, Y. *et al.* Performance of new 8-inch photomultiplier tube used for the tibet muon-detector array. **Journal of Instrumentation**, IOP Publishing, v. 11, n. 06, p. P06016–P06016, jun 2016.

APÊNDICE A – Medidas do condicionamento dos sinais para todos os canais

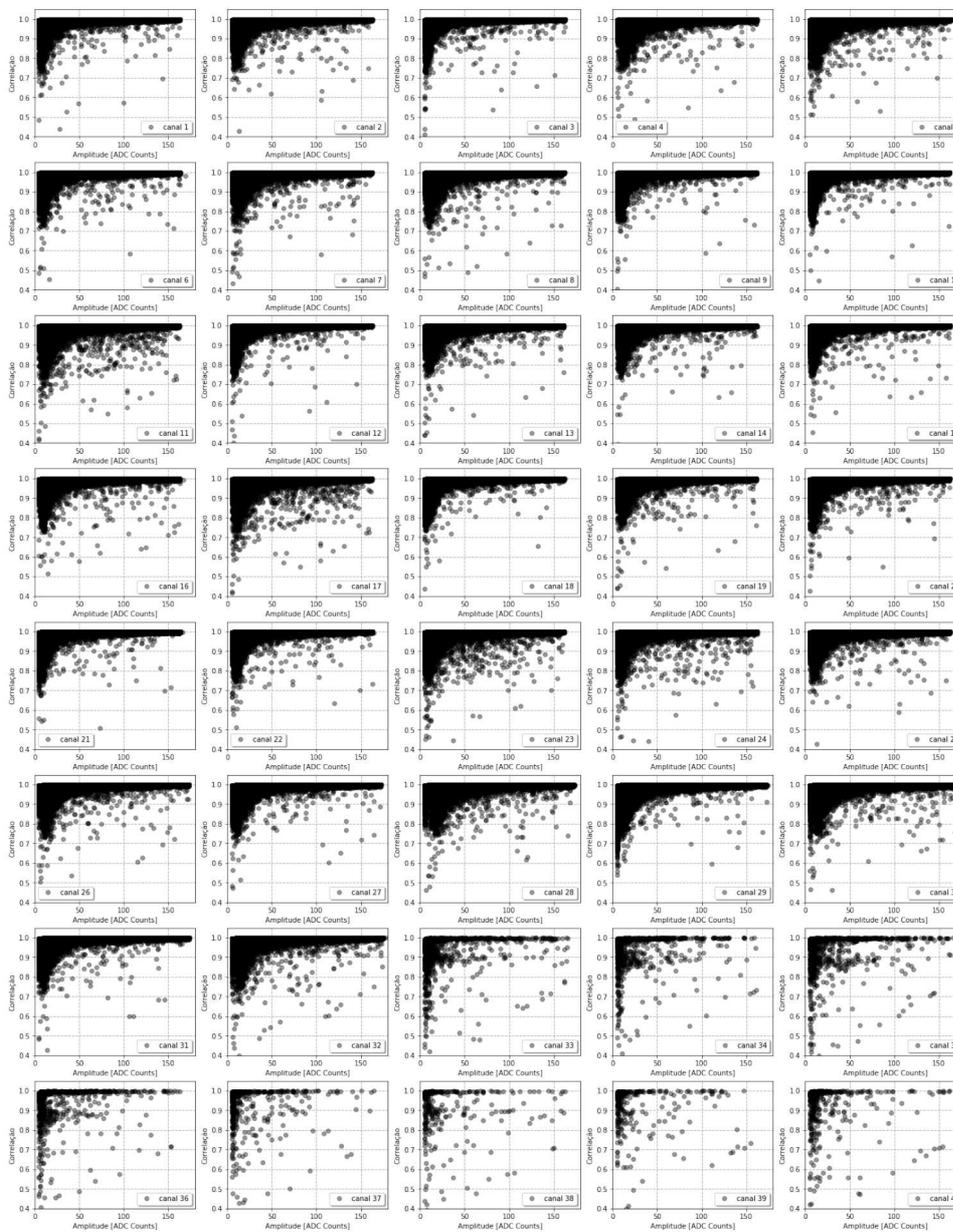
A relação entre o pico dos sinais e a sua correlação com o formato ideal para os conjuntos de dados dos período 1, 2 e 3 se encontram respectivamente nas figuras 58, 59 e 60. E pode ser observado que entre os canais 26 e 32, para os dados do período 3 os seus comportamentos estão se diferenciando em relação aos demais, conforme foi relatado na Seção 5.2 .

Figura 58 – Pico dos sinais x correção entre os sinais com o formato ideal para os dados do período 1



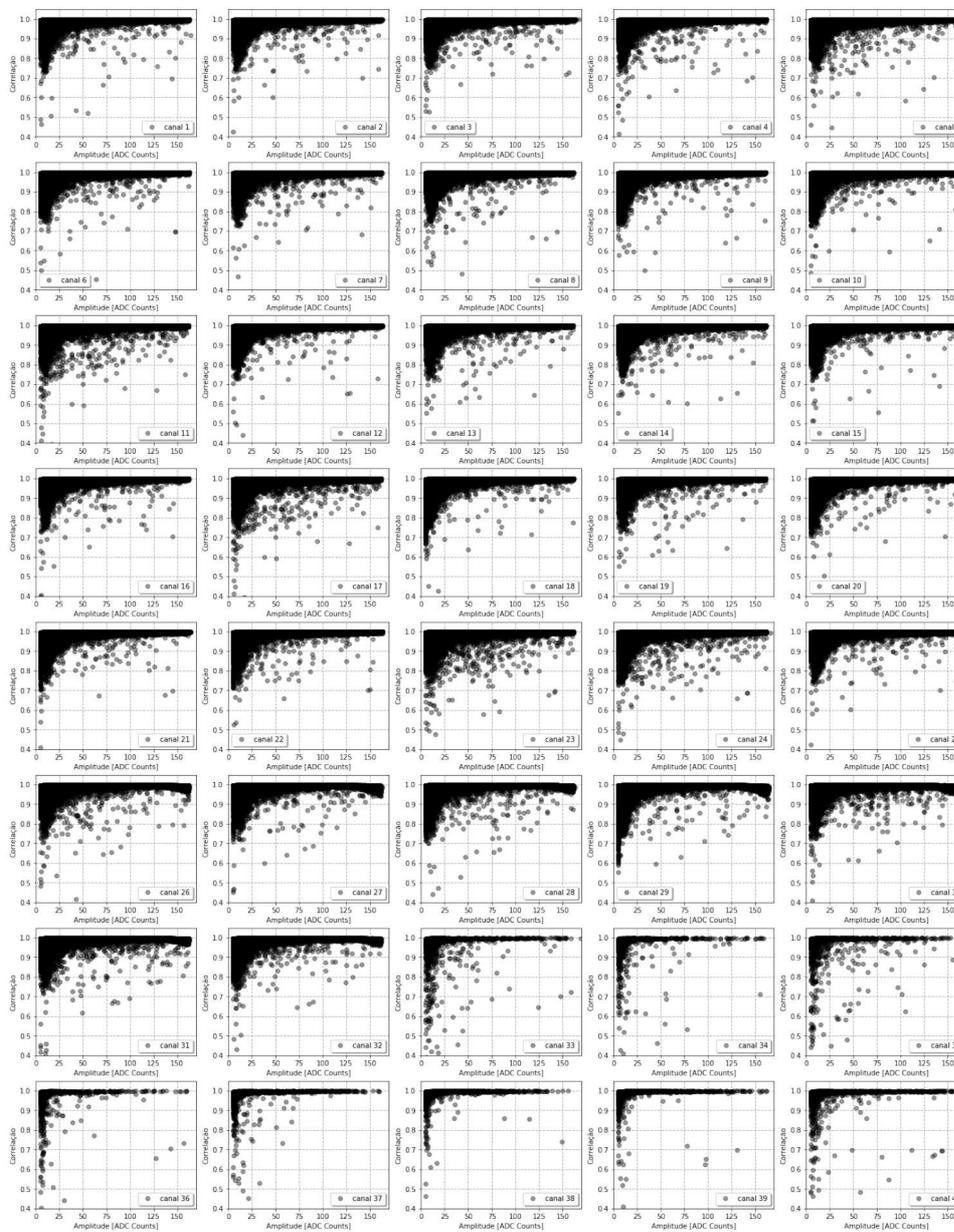
Fonte: Autor

Figura 59 – Pico dos sinais x correção entre os sinais com o formato ideal para os dados do período 2



Fonte: Autor

Figura 60 – Pico dos sinais x correção entre os sinais com o formato ideal para os dados do período 3

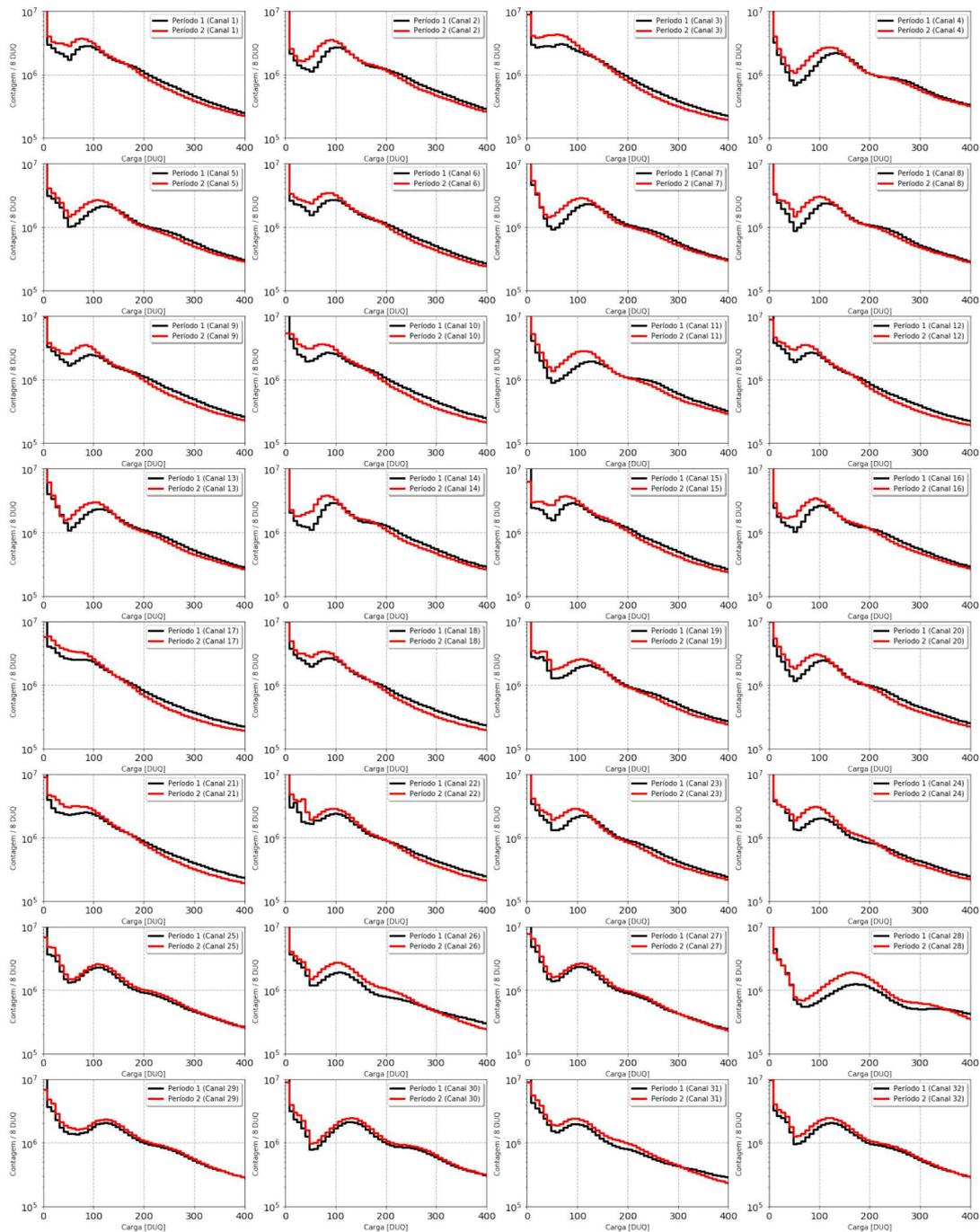


Fonte: Autor

APÊNDICE B – Impacto da mudança dos *thresholds* nos canais *Target*

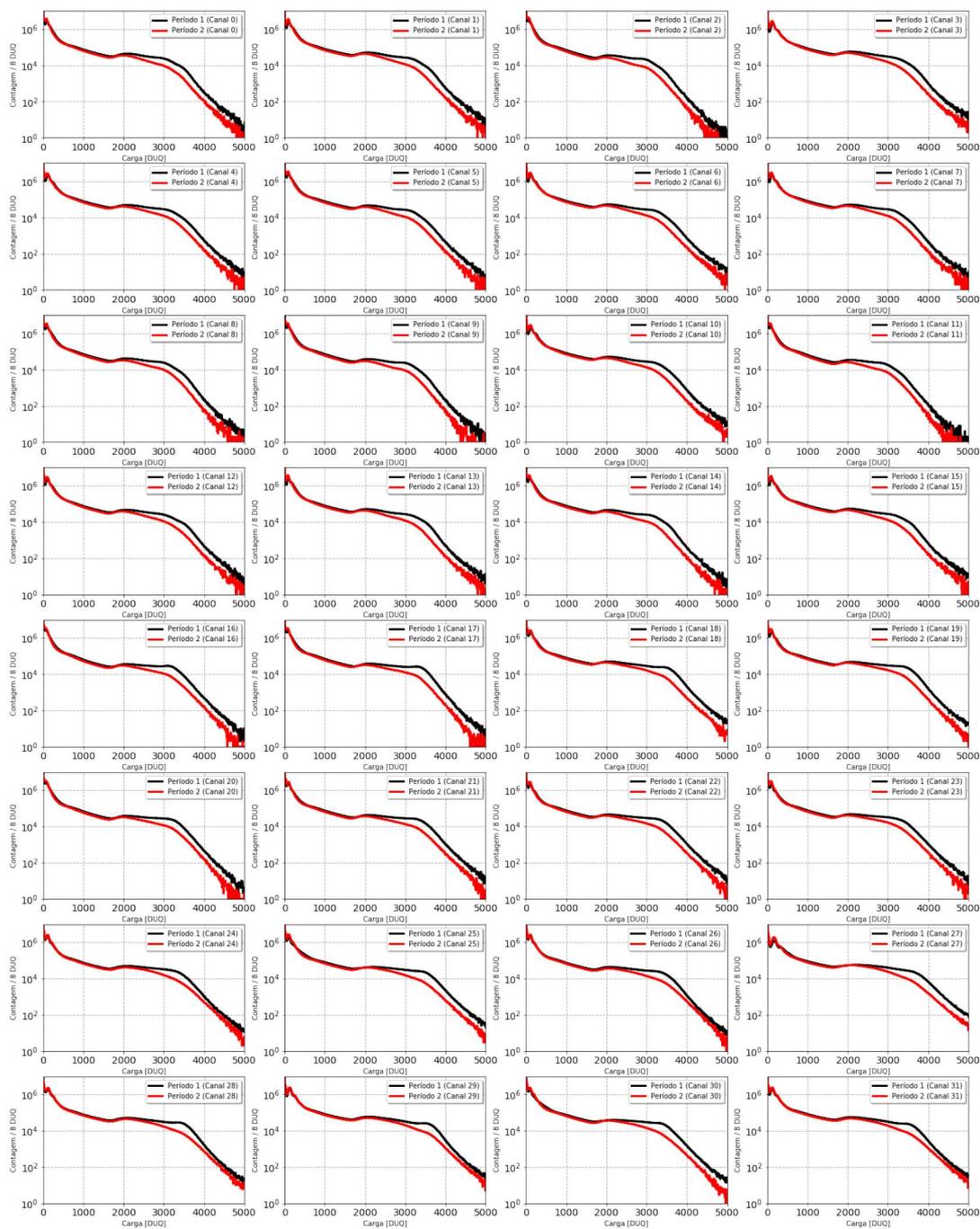
As medidas dos espectros de energia para todos os canais *Target* para os conjuntos do período 1 e 2 estão sendo destacadas na Figura 61 e através da medida de carga dos sinais. E pode ser notado que para todos os canais houve um ganho no aumento de eventos na região de SPE, por causa da redução dos *thresholds*.

Figura 61 – Espectro de energia dos canais do *Target* para os períodos 1 e 2 na região de 0 a 400 DUQ



Fonte: Autor

Figura 62 – Espectro de energia dos canais do *Target* para os períodos 1 e 2



Fonte: Autor