

**ESTUDO, DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DA INSTRUMENTAÇÃO DO
EXPERIMENTO NEUTRINOS ANGRA**

Tony Igor Dornelas

Dissertação de Mestrado apresentada
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica, da Universidade Federal de
Juiz de Fora, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de Mestre
em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Rafael Antunes Nóbrega
Herman Pessoa Lima Jr.

Juiz de Fora
Fevereiro de 2015

**ESTUDO, DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DA INSTRUMENTAÇÃO DO
EXPERIMENTO NEUTRINOS ANGRA**

Tony Igor Dornelas

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRICA (PPEE) DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Rafael Antunes Nóbrega, D.Sc.

Prof. Herman Pessoa Lima Jr., D.Sc.

Prof. Eduardo Furtado de Simas Filho, D.Sc.

Prof. Moisés Vidal Ribeiro, D.Sc.

Prof. Augusto Santiago Cerqueira, D.Sc.

JUIZ DE FORA, MG – BRASIL
FEVEREIRO DE 2015

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Dornelas, Tony Igor.

ESTUDO, DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DA INSTRUMENTAÇÃO DO EXPERIMENTO NEUTRINOS ANGRA / Tony Igor Dornelas. -- 2015. 110 f.

Orientador: Rafael Antunes Nóbrega

Coorientador: Herman Pessoa Lima Jr.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2015.

1. Projeto Neutrinos Angra.. 2. Eletrônica de Leitura.. 3. Caracterização.. I. Nóbrega, Rafael Antunes, orient. II. Lima Jr., Herman Pessoa, coorient. III. Título.

Agradecimentos

Desta vez a caminhada foi breve! Porém, não menos árdua!

Agradeço a todos que me apoiaram durante meu percurso.

À minha esposa, Maria, pelo companheirismo, paciência e compreensão nos momentos difíceis, e pela nossa filha, Maria Luiza.

Aos meus pais, Vania e Antonio, à minha avó Ivonilde e aos meus irmãos de sangue e de coração, pelo incentivo. E, em memória, ao meu avó Genário.

Ao meu orientador, Prof. Rafael Nóbrega, pela confiança, oportunidade, dedicação e amizade e ao meu coorientador, Prof. Herman Lima, por abrir as portas do CBPF.

Ao Prof. Augusto Cerqueira, também pela confiança.

À toda colaboração do Projeto Neutrinos Angra, pelas expectativas.

Agradeço também aos amigos do LAPTEL, em especial: Tiago, David e Igor, pela ótima convivência, e à todos os amigos que, direta, ou indiretamente contribuíram para que eu chegasse até aqui.

Obrigado Senhor, por mais esta conquista. Obrigado, também, por todos aqueles que me ajudaram nesta caminhada. Pois sem Você, eu nunca chegaria e sem eles, seria muito mais difícil.

Resumo da Dissertação apresentada à PPEE/UFJF como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO, DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DA INSTRUMENTAÇÃO DO EXPERIMENTO NEUTRINOS ANGRA

Tony Igor Dornelas

Fevereiro/2015

Orientadores: Rafael Antunes Nóbrega
Herman Pessoa Lima Jr.

Programa: Engenharia Elétrica

O Projeto Neutrinos-Angra tem como proposta fundamental o desenvolvimento de um detector de anti-neutrinos com o objetivo de medir a potência dissipada de reatores nucleares, em particular, o da usina Angra II, localizada em Angra dos Reis, Rio de Janeiro. O detector, em fase de teste, é composto de uma caixa de formato aproximadamente cúbico capaz de comportar uma tonelada de água, equipada com 48 sensores (fotomultiplicadores). Este detector é composto fundamentalmente de dois módulos, um dedicado à detecção de anti-neutrinos (chamado de detector alvo) e outro dedicado à detecção de partículas que representam ruído de fundo (chamado de sistema de VETO). Cada sensor é equipado com uma eletrônica de leitura dedicada e um sistema de digitalização de sinal. Estes sinais digitalizados devem passar por algoritmos de seleção para então serem armazenados para análises futuras.

A Dissertação aqui referida trata da implementação de um sistema de medidas para caracterização do sensor e da eletrônicas de leitura do Projeto Neutrinos-Angra. As medidas de caracterização realizadas em laboratório serão mostradas junto a uma análise feita com dados coletados a partir do detector alvo, usando raios cósmicos para um primeiro estudo do detector e de seu sistema de leitura integrado.

Abstract of Dissertation presented to PPEE/UFJF as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

TITLE

Tony Igor Dornelas

February/2015

Advisors: Rafael Antunes Nóbrega
Herman Pessoa Lima Jr.

Department: Electrical Engineering

The Neutrinos-Angra project aims at developing an anti-neutrino detector where the main proposal is to measure the dissipated power of nuclear reactors, in particular, the reactor of Angra II, located in Angra do Reis, Rio de Janeiro. The detector, which is in commissioning phase, comprises a box of around 1 cubic meter of water and it is surrounded by 48 sensor (photo-multipliers). This detector is basically composed by two modules, the inner one (the target) is designed to detect antineutrinos. The outer detector aims at detecting the background noise (the VETO system). Each sensor comprises a customized readout electronics and a signal digitizer system. The digitized signals are processed by an online event selector system in order to store only relevant information.

The work described here aims at implementing an environment to commissioning the Neutrinos-Angra sensor's and its readout electronics. The results of the main test will be described together with the analysis performed using real data acquired with the central detector, but using cosmic rays. Therefore, it allowed a first integration test of the detector and its readout electronics.

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xiii
1 Introdução	1
2 Projeto Neutrinos-Angra	4
2.1 Técnica para detecção	5
2.2 O Detector	6
2.2.1 Alvo	6
2.2.2 Veto	7
2.3 Estimativa da taxa de interações de antineutrinos	9
3 Chuveiros Atmosféricos	10
3.1 Composição dos Raios Cósmitos	10
3.2 Os Múons Atmosféricos	12
3.2.1 Produção	12
3.2.2 Propagação na atmosfera	12
3.2.3 Intensidade	13
3.2.4 Perda de energia por interação com a matéria	13
4 Estudo e caracterização dos sensores e da eletrônica de leitura	16
4.1 Fotomultiplicadoras Tubulares - PMT	16
4.2 Caracterização da PMT Hamamatsu R5912	21
4.3 Caracterização do Front-end	30
4.3.1 Características gerais do módulo <i>Front-end</i>	45
4.4 Caracterização do Módulo de Aquisição de dados (NDAQ)	48
5 Teste da eletrônica de leitura e do detector alvo	53
5.1 Descrição do sistema de medidas	53
5.2 Memorial descritivo - montagem, material utilizado e conexões	55
5.3 Caracterização e análise das aquisições	61

5.3.1	Pás cintiladoras	61
5.3.2	<i>Front-end</i> e pré análise das medidas.	63
5.3.3	Análise dos dados coletados.	68
5.4	Resultados e Considerações Finais	78
6	Conclusões	85
	Referências Bibliográficas	87
A		91

Lista de Figuras

2.1	Representação do processo do decaimento beta inverso..	6
2.2	Local de instalação do detector do Projeto Neutrinos Angra.	6
2.3	Ilustração do Detector do Projeto Neutrinos Angra.	7
2.4	Ilustração do sistema de blindagem do detector de anti neutrinos do Projeto Neutrinos Angra.	8
2.5	Ilustração do tanque de veto do Projeto Neutrinos Angra.	8
3.1	Esquema de desenvolvimento de um chuveiro atmosférico extenso (CAE) na atmosfera terrestre. Fonte: (FAUTH et al., 2007)	11
4.1	Fotomultiplicadora Tubular - PMT - Esquemático	17
4.2	Esquemático - Divisor de tensão com fontes independentes Fonte: (HAMAMATSU PHOTONICS, 2006)	17
4.3	Esquemático - Circuito de saída e casamento de impedâncias Fonte: (HAMAMATSU PHOTONICS, 2006)	18
4.4	Forma de onda e esquemático do circuito divisor de tensão sem resistores de amortecimento - PMT Hamamatsu R5912 Fonte:(PHOTONICS, 1998)	19
4.5	Forma de onda e esquemático do circuito divisor de tensão com resistores de amortecimento - PMT Hamamatsu R5912 Fonte:(PHOTONICS, 1998)	19
4.6	Esquemático do circuito divisor de tensão da PMT Hamamatsu R5912 (Apêndice ??)	20
4.7	Esquemático do circuito divisor de tensão da PMT Hamamatsu R5912. Fonte:(PHOTONICS, 1998)	20
4.8	Esquemático do sistema de aquisição dos sinais de saída do PMT.	21
4.9	Detalhe da sincronização pelo atraso de $160ns$ - formas de onda adquiridas na saída da PMT.	22
4.10	Distribuição de carga para cada variação na amplitude do pulso. .	23
4.11	Região de ruído ($k = 0$) - Aproximação pela gaussiana.	24
4.12	$p(k>1)$ versus amplitude do pulso	25

4.13 Distribuição da carga - Banco de Dados com 200 mil aquisições.	25
4.14 Corte em $1pC$	25
4.15 Exemplo de janela do banco de sinais.	26
4.16 Distribuição temporal do banco de sinais.	26
4.17 Distribuição de carga para os sinais cujos picos estão compreendidos no intervalo de $-2.5ns$ a $2.5ns$ e os respectivos parâmetros obtidos pela aproximação da curva por uma gaussiana.	27
4.18 Forma de onda da saída da PMT.	28
4.19 Recalibração da PMT (número de fotoelétrons versus alta-tensão).	29
4.20 Recalibração da PMT (pico versus alta-tensão).	29
4.21 Formas de onda na saída da PMT alimentada por $1510V$ e $1400V$ respectivamente.	29
4.22 Pico versus número de fotoelétrons (carga).	30
4.23 Esquemático do circuito de amplificação e filtragem do <i>Front-end</i>	31
4.24 Imagem da camada superior do circuito de <i>Front-end</i>	31
4.25 Representação das entradas e saídas do <i>Front-end</i> no módulo NIM.	32
4.26 Esquemático de ligação do sistema de medidas com o <i>Front-end</i>	33
4.27 Distribuição de carga do <i>Front-end</i> em resposta à PMT - Div1.	34
4.28 Distribuição temporal em relação aos picos do banco de sinais do <i>Front-end</i> - Div1.	34
4.29 Forma de onda média obtida pelo gerador de sinal.	35
4.30 Formas de onda média da saída do <i>Front-end</i> em resposta à PMT referente ao único fotoelétron, para cada divisor de tensão.	36
4.31 Distribuição da correlação dos sinais médios comparados com todos os sinais do banco de dados dos três divisores de tensão em resposta à PMT.	37
4.32 Desempenho dos modelos - média de ρ dos modelos comparados com todos os sinais do banco de dados dos três divisores de tensão em resposta à PMT.	37
4.33 Forma de onda do modelo da saída do <i>Front-end</i> sobreposto à forma de onda média referente ao divisor de tensão Div1.	38
4.34 Correlação versus pico na saída do <i>Front-end</i>	39
4.35 Correlação versus pico na saída do <i>Front-end</i> - Região Crítica.	40
4.36 Efeito da saturação na forma de onda - saída FE.	40
4.37 Efeito da saturação na forma de onda na saída do <i>Front-end</i> - Div1.	41
4.38 Efeito da saturação na forma de onda na saída do <i>Front-end</i> - Div2.	41
4.39 Efeito da saturação na forma de onda na saída do <i>Front-end</i> - Div3.	42
4.40 Carga na entrada versus carga na saída do <i>Front-end</i> - aproximação linear e indicação da região de saturação.	43

4.41	Carga na saída versus pico na saída do FE.	43
4.42	Pico na saída versus carga na entrada do FE.	44
4.43	Pico na saída versus carga na entrada do FE em número de foto-elétrons.	45
4.44	Pico na saída versus pico na entrada do <i>Front-end</i> 1.	45
4.45	Pico na saída versus carga na entrada do FE em número de foto-elétrons e região de saturação.	46
4.46	Resposta em frequência de todos os canais do <i>Front-end</i> 1 - versão definitiva.	46
4.47	Matriz de correlação do ruído do canal 5 do <i>Front-end</i> 1 - versão definitiva.	47
4.48	Diagonal das matrizes de correlação de todos os canais do <i>Front-end</i> 1 - versão definitiva.	47
4.49	Espectro de energia do ruído de todos os canais do <i>Front-end</i> 1 - versão definitiva.	47
4.50	Média do espectro de energia do ruído de todos os canais do <i>Front-end</i> 1 - versão definitiva.	48
4.51	Distribuição de todas as amostras das aquisições de ruído de todos os canais do <i>Front-end</i> 1 - versão definitiva.	48
4.52	Blocos de processamentos básicos de 1 canal do NDAQ - (do inglês: <i>Neutrinos Angra Data Acquisition</i>).	49
4.53	Distribuição de ρ para aquisições realizadas com o NDAQ a $125MS/s$ e com o osciloscópio a $625MS/s$	51
4.54	Forma de onda adquirida com o NDAQ a $125MS/s$ sobreposta ao modelo da forma de onda do <i>Front-end</i> (equação 4.11).	52
5.1	Esquemático de ligação do sistema de medidas CBPF.	54
5.2	Trilho para fixação das PMTs - Foto: <i>Germano Pinto Guedes</i>	55
5.3	PMTs afixadas no face inferior, no interior do tanque central do detector alvo - Foto: <i>Germano Pinto Guedes</i>	55
5.4	Disposição das PMTs no tanque central do detector alvo.	56
5.5	Esquemático do detector alvo.	56
5.6	Imagem do detector.	57
5.7	Fonte de alta-tensão utilizada.	58
5.8	Discriminador e porta lógica NIM.	58
5.9	Pás cintiladoras.	59
5.10	Pás cintiladoras. Fonte: (FÜR PHYSIK)	62
5.11	Curva da taxa de evento versus valor de alta tensão nas PMTs das pás cintiladoras (Platonagem).	63

5.12	Distribuição dos valores de pico na saída do sinal das aquisições do detector alvo com o <i>Front-end</i> número 2.	63
5.13	Distribuição dos valores de pico na saída do sinal das aquisições do detector alvo com o <i>Front-end</i> número 5.	64
5.14	Pico na entrada versus pico na saída do <i>Front-end</i> número 2.	65
5.15	Pico na entrada versus pico na saída do <i>Front-end</i> número 5.	65
5.16	Valores de ρ versus tensão de pico na saída do canal 7 <i>Front-end</i> 2.	66
5.17	Distribuição dos valores ρ para todos os canais do <i>Front-end</i> 2.	66
5.18	Valores de ρ versus tensão de pico na saída do canal 7 <i>Front-end</i> 5.	67
5.19	Distribuição dos valores ρ para todos os canais do <i>Front-end</i> 5.	67
5.20	Exemplos de formas de onda distorcidas do banco de dados das classes A e B.	68
5.21	Posição das pás cintiladoras sobre o tanque alvo.	68
5.22	Carga na saída (em número de fotoelétrons) versus pico na saída do <i>Front-end</i> número 5 - banco de dados do alvo.	69
5.23	Carga na saída (em número de fotoelétrons) versus pico na saída do <i>Front-end</i> número 2 - banco de dados do alvo.	69
5.24	Distribuição da relação Pico/Carga do banco de dados do <i>Front-end</i> número 5 - banco de dados do alvo.	70
5.25	Distribuição das tensões de pico dos dados da região de corte da distribuição da relação Pico/Garga do <i>Front-end</i> número 5 - banco de dados do alvo.	71
5.26	Proporção de sinais altos por PMT - pás cintiladoras no centro do tanque, distantes $27cm$	72
5.27	Proporção de sinais altos em relação a cada PMT - pás cintiladoras no centro do tanque, distantes $27cm$	72
5.28	Distribuição da proporção de sinais altos em relação a cada PMT - pás cintiladoras no centro do tanque, distantes $27cm$	73
5.29	Posição das pás cintiladoras sobre o tanque alvo.	73
5.30	Proporção de sinais altos por PMT - pás cintiladoras unidas no canto da tampa do tanque.	74
5.31	Proporção de sinais altos em relação a cada PMT - pás cintiladoras unidas no canto da tampa do tanque.	74
5.32	Distribuição de energia dos pósitrons e neutrons da assinatura de neutrinos - resultado de simulação para o detector equipado com 32 PMTs. Fonte: (ANJOS, 2010)	75
5.33	Proporção de sinais baixos por PMT - pás cintiladoras no centro do tanque, distantes $27cm$	76

5.34	Proporção de sinais baixos em relação a cada PMT - pás cintiladoras no centro do tanque, distantes <i>27cm</i>	77
5.35	Proporção de sinais baixos por PMT - pás cintiladoras unidas no canto da tampa do tanque.	77
5.36	Proporção de sinais baixos em relação a cada PMT - pás cintiladoras unidas no canto da tampa do tanque.	78
5.37	Forma de onda na saída dos 16 canais de <i>Front-end</i> com divisor de tensão por 10.4.	79
5.38	Pico do pulso de saída versus pico do pulso de entrada - Gerador de sinais - NDAQ.	80
5.39	Distorção na forma de onda - NDAQ.	80
5.40	Distorção na forma de onda adquirida no tanque alvo - NDAQ. . .	80
5.41	Pico versus carga - banco de dados com 9999 aquisições.	82
5.42	Distribuição dos picos dos sinais do banco de dados com 9999 aquisições.	82
5.43	Distribuição de número de fotoelétrons visto pelo detector alvo equipado com 32 PMTs para uma simulação de múons. Fonte: (ANJOS, 2010)	83
5.44	Distribuição da soma dos picos dos sinais do banco de dados com 9999 aquisições.	83
5.45	Número de PMTs em coincidência para eventos cujos sinais ultrapassam 2 ADC Counts - banco de dados com 9999 aquisições. . .	84
5.46	Distribuição de proporcionalidade de eventos abaixo de 5 fotoelétrons nas PMTs, em relação ao total destes eventos na PMT destacada.	84

Lista de Tabelas

4.1	Relação sinal-ruído (SNR).	30
4.2	Características de operação da <i>Front-end</i> (FE) em resposta à PMT.	34
4.3	Parâmetros do modelo de representação da forma de onda na saída do <i>Front-end</i> (Div1).	38
4.4	Parâmetros da aproximação pela reta (carga na saída versus carga na entrada).	43
4.5	Parâmetros da aproximação pela reta (pico na saída versus carga na entrada).	44
4.6	Calibração do NDAQ.	50
5.1	Conexões entre as PMTs e os canais de alta-tensão da fonte CAEN.	59
5.2	Conexões entre as saídas das PMTs e os canais de entrada dos módulos <i>Front-end</i>	60
5.3	Conexões entre as saídas dos módulos <i>Front-end</i> e as entradas dos NDAQs.	60
5.4	Pinagem do canal utilizado da porta lógica NIM.	61

Capítulo 1

Introdução

Muitos países utilizam material nuclear como combustível para geração de energia. Porém, este material pode ser utilizado para outras finalidades, as quais não são autorizadas pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA). As chamadas salvaguardas nucleares são medidas estabelecidas e assinadas entre os países que utilizam combustível nuclear, afim de proteger, controlar e impedir eventuais desvios deste material para utilização ilícita. A monitoração constante da produção, movimentação e do “consumo” de combustível nuclear, possibilita identificar em tempo hábil e garantir que se trata de uso exclusivamente pacífico e autorizado. No Brasil, as salvaguardas nucleares são garantidas pela Constituição Federal ([CNEN](#)).

Grandes evoluções vem sendo alcançadas pela física experimental, baseados na fenomenologia dos neutrinos. Devido à característica de rara interação com o a matéria, imensos detectores foram construídos para o estudo destas partículas. Para “isolá-los” da chamada radiação cósmica, além de outras radiações, estes detectores estão, normalmente, alocados subterraneamente, à uma considerável profundidade. Um dos produtos da “queima” de combustível que ocorre dentro das usinas nucleares é a emissão de neutrinos. Por isso, alguns destes detectores foram instalados nas proximidades de reatores de usinas termo-nucleares, com a finalidade de estudar estas partículas.

Diante do progresso dos estudos, criou-se uma grande perspectiva para a utilização de neutrinos como portadores confiáveis de informações dos processos físicos dos quais participam.

O Projeto Neutrinos-Angra propõe a construção de um instrumento capaz de monitorar informações relacionadas às atividades de reatores nucleares como a composição isotópica do combustível utilizado e também a potência térmica dissipada pelo reator, ambos de maneira não invasiva. Estas informações, além de contribuir para a otimização do processo de geração de energia, são extremamente importantes para a verificação dos parâmetros de salvaguardas nucleares

ditados pela AIEA.

A técnica atual utilizada para este tipo de monitoramento é a simulação computacional, cujos parâmetros de entrada são as condições iniciais e o histórico térmico do reator. Sendo assim, a confiabilidade dos resultados depende da cooperação do operador, dando margem para o desvio não declarado de material.

Dispor de um reator nuclear de 4GW de potência como o da usina termonuclear de Angra II, cujo núcleo proporciona uma taxa de 10^{20} fissões por segundo, permite que um “confortável” volume de apenas $1m^3$, posicionado em seus arredores, seja sensível à milhares de eventos de neutrinos por dia. O objetivo do projeto é construir um detector compacto a ser alocado acima da superfície. Com isso, além da capacidade de realizar medidas de forma não invasiva, o detector de anti-neutrinos proposto pelo Projeto Neutrinos-Angra tem como vantagem a mobilidade. Devido ao seu reduzido tamanho, o detector pode ser instalado na carroceria de um veículo e transportado para outros lugares. A concepção e a realização deste projeto, com certeza, irá contribuir para a inserção do Brasil, de maneira competitiva e atuante, na área da física de partículas, no cenário mundial ([J.C. ANJOS](#)).

O objetivo de meu projeto de mestrado é testar e caracterizar os sensores, a eletrônica de leitura e a parte central do detector do Projeto Neutrinos-Angra. Para isso, dois sistemas de medidas foram desenvolvidos.

No primeiro sistema, desenvolvido em laboratório, foi realizada a caracterização de um dos sensores a serem instalados no detector, além do desenvolvimento e caracterização dos dispositivos eletrônicos (*Front-end*) responsáveis pelo condicionamento e adequação dos sinais gerados pelos sensores ao sistema de aquisição de dados.

O segundo sistema contou com a utilização do detector alvo do Projeto Neutrinos-Angra, que é composto de um tanque contendo aproximadamente 1 tonelada de água. No contexto deste trabalho este tanque foi equipado com 16 fotomultiplicadoras (sensores), que proporcionaram a utilização de 16 canais da eletrônica de leitura do detector do projeto Neutrinos Angra, que é composta, basicamente, por dois componentes: o *Front-end* e um dispositivo responsável pela aquisição de dados (NDAQ). O princípio para geração de dados neste sistema parte da interação de partículas de radiação cósmica com o meio, no interior do detector alvo. As fotomultiplicadoras, geram sinais elétricos de curta duração, em resposta às interações das partículas no interior do detector. Estes sinais são enviados para o circuito de *Front-end*, que os condiciona e os envia para o dispositivo NDAQ. O NDAQ, por sua vez, digitaliza os sinais condicionados pelo *Front-end* e os envia para serem armazenados em um microcomputador. A partir dos dados adquiridos neste sistema, foi possível identificar as falhas dos dispo-

sitivos utilizados, reajustá-los e, por fim, comprovar o funcionamento de toda a cadeia de leitura de sinal e do detector alvo do Projeto Neutrinos-Angra.

O Capítulo 2 desta dissertação é dedicado à apresentação do Projeto Neutrinos Angra. Neste capítulo foram brevemente descritas algumas das características principais do projeto, como a localização, a técnica utilizada para detecção do anti neutrino, além de alguns detalhes construtivos do detector. No Capítulo 3 é feita uma introdução à fenomenologia dos raios cósmicas, que, apesar de serem a maior fonte de ruído para o detector de anti neutrinos do Projeto Neutrinos Angra, foram utilizados, no âmbito desta dissertação de mestrado, como fonte de informação para a realização dos testes com o detector alvo. O Capítulo 4 trata da caracterização, em laboratório, de uma das fotomultiplicadoras a serem utilizadas no projeto, além da caracterização dos circuitos de *Front-end* e NDAQ, que compõe a eletrônica de leitura. No Capítulo 5 é feita uma descrição completa do sistema desenvolvido com o detector alvo. Além da descrição, são mostrados os resultados obtidos pela análise dos dados das primeiras aquisições realizadas com o sistema. Também no Capítulo 5 são apresentadas as falhas ocorridas e os resultados obtidos após a remoção das falhas.

Capítulo 2

Projeto Neutrinos-Angra

Alguns trabalhos, recentemente publicados, demonstraram que, a emissão de neutrinos, pode ser utilizada como um indicador, em tempo real, das atividades de reatores nucleares. Vários testes já foram realizados com este tipo de monitoramento. Um exemplo de experimento desta natureza, se encontra em operação na usina de San Onofre, nos Estados Unidos (([KLIMOV *et al.*, 1994](#)), ([BOWDEN *et al.*, 2004](#))).

Constantemente, a superfície terrestre está sendo bombardeada por partículas provenientes do espaço (radiação cósmica). Assim como os neutrinos, estas partículas espaciais interagem com o meio dentro do detector. Esta interação excita os sensores, causando assim um ruído que interfere na detecção das partículas oriundas do reator nuclear. A camada de terra entre a superfície e os detectores subterrâneos, contribui fortemente para o decaimento das partículas de radiação cósmica, funcionando assim como uma blindagem para o sistema. A proposta inicial do Projeto Neutrinos Angra, era de construir um detector subterrâneo, nas proximidades do reator da usina termonuclear de Angra II. Esta proposta, na época, foi vetada pela Eletrobrás Eletronuclear. A empresa, que é a gestora da usina, não autorizou a escavação na área da termonuclear para instalação do detector. Porém, autorizou que o detector fosse instalado próximo à redoma do reator de Angra II, desde que não houvessem escavações no local. Os pesquisadores do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), que coordenam o projeto, aceitaram as condições propostas pela Eletronuclear. Com isso, estas condições se tornaram o grande desafio do Projeto Neutrinos Angra, que é a construção de um detector de superfície, capaz de lidar com os ruídos causados pela radiação cósmica, além de outras interferências abundantes na superfície terrestre.

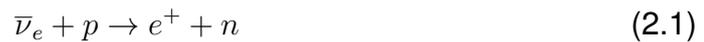
Diante desta realidade, o Projeto Neutrinos Angra propôs a construção de um detector eficiente, compacto e de superfície, capaz de medir o fluxo de antineutrinos provenientes das reações nucleares que ocorrem dentro do reator, possibi-

litando assim o monitoramento da potência térmica instantânea dissipada, além do consumo de material nuclear e sua composição química.

2.1 Técnica para detecção

A técnica utilizada para detecção é baseada na radiação Cherenkov. A radiação Cherenkov é a emissão de radiação eletromagnética (inclusive na faixa visível), por uma partícula carregada, que atravessa um determinado meio (isolante), a uma velocidade superior à velocidade da luz neste meio (BOLOTOVSKII, 1957). A luminosidade azul emitida pelos combustíveis nucleares armazenados dentro de tanques com água, por exemplo, se deve à radiação Cherenkov.

O detector terá um alvo formado de água dopada com gadolínio. O decaimento beta inverso será a reação utilizada para a detecção do antineutrino, que é descrito da seguinte forma:



um antineutrino do elétron ($\bar{\nu}_e$), oriundo do reator, interage com um próton (p) dentro do alvo, dando origem a um pósitron (e^+) e um nêutron (n).

Quando o pósitron possui energia suficiente, ele é capaz de emitir radiação Cherenkov antes de ser aniquilado. No processo de aniquilação do elétron com o pósitron, ocorre a produção de dois raios gama com $0.511MeV$ de energia cada um.

Passado um período de tempo, ocorre a captura do nêutron, o que produz a emissão de radiação gama. Os raios gama emitidos, interagem por efeito Fotoelétrico, efeito Compton ou produção de Pares. Esta interação libera elétrons que, por sua vez, emitem radiação Cherenkov. Assim, a detecção do antineutrino eletrônico é dada pelas interações do pósitron e do nêutron que são frutos da reação do decaimento beta inverso.

O nêutron, depois de capturado por algum núcleo de gadolínio, emite um total de aproximadamente $8MeV$ de energia de radiação gama. Além do gadolínio, a captura do nêutron pode também acontecer (porém, com menor probabilidade) através do núcleo de hidrogênio da água. Quando isso ocorre, há emissão de radiação gama com energia de aproximadamente $2MeV$ (FERNANDEZ). O tempo médio entre a aniquilação do pósitron e a captura do nêutron é de aproximadamente $30\mu s$, podendo variar de acordo com a concentração de gadolínio. A energia deixada no detector pelas duas interações e o intervalo de tempo entre elas, caracterizam a assinatura do anti neutrino. A Figura 2.3 representa um esquemático do processo de decaimento beta inverso.

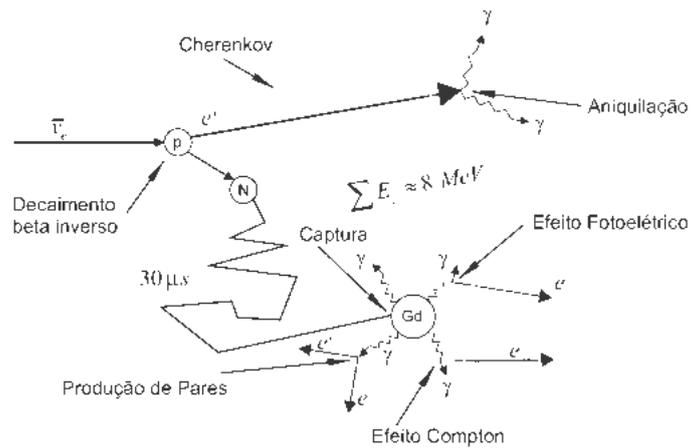


Figura 2.1: Representação do processo do decaimento beta inverso..

2.2 O Detector

A localização prevista para o detector é dentro de um container, do lado externo da cúpula do sistema de proteção, a aproximadamente $25m$ do núcleo do reator da usina Angra II, na cidade de Angra dos Reis - RJ, onde também estará instalado o laboratório de controle e de aquisição do experimento (Figura 2.2). O sistema proposto será formado por dois subsistemas: o “alvo”, para detecção de anti neutrinos, e o veto, para filtragem de radiação cósmica (ALVARENGA *et al.*, 2014).



Figura 2.2: Local de instalação do detector do Projeto Neutrinos Angra.

2.2.1 Alvo

Um reservatório cúbico, com as paredes internas revestidas por um material refletor, preenchido com uma tonelada de água dopada com Gadolínio, e 32 PMTs

divididas entre as paredes superior e inferior do reservatório, são os componentes básicos do Alvo. A Figura 2.3 mostra as características construtivas do alvo.

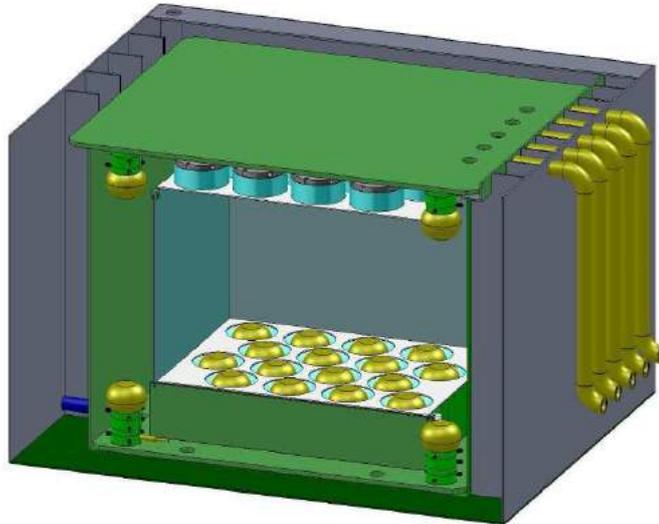


Figura 2.3: Ilustração do Detector do Projeto Neutrinos Angra.

A concentração de gadolínio (entre 0,1% e 0,5%), aumenta a eficiência de captura de nêutrons a um fator até 10^5 comparada ao processo de formação do dêuteron (associação de um próton e um nêutron) em água pura (BARISH *et al.*, 1977). A melhoria na eficiência de captura corresponde no aumento da relação sinal-ruído devido aos menores intervalos de tempo para detecção do processo de captura, reduzindo a probabilidade de contaminação do sinal por pulsos espúrios.

2.2.2 Veto

O sistema de veto tem como objetivo detectar raios cósmicos e eventos de outras fontes naturais de radiação, com a finalidade de separá-los dos eventos de neutrinos. Este sistema é composto por dois pequenos tanques, como mostrado na Figura 2.4, que serão posicionados como tampas, um em cima e o outro de baixo do tanque do detector alvo. Cada um destes pequenos tanques contém 4 PMTs e são preenchidos com água, conforme a Figura 2.5. Outras 8 PMTs serão usadas em um tanque externo, que envolve o tanque do alvo, e que também será preenchido com água. Este tanque externo tem a finalidade de aumentar a eficiência do sistema de veto.

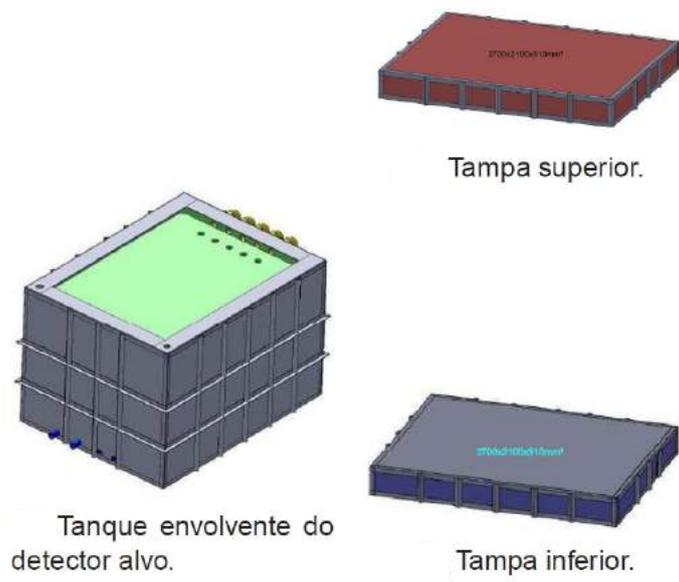


Figura 2.4: Ilustração do sistema de blindagem do detector de anti neutrinos do Projeto Neutrinos Angra.

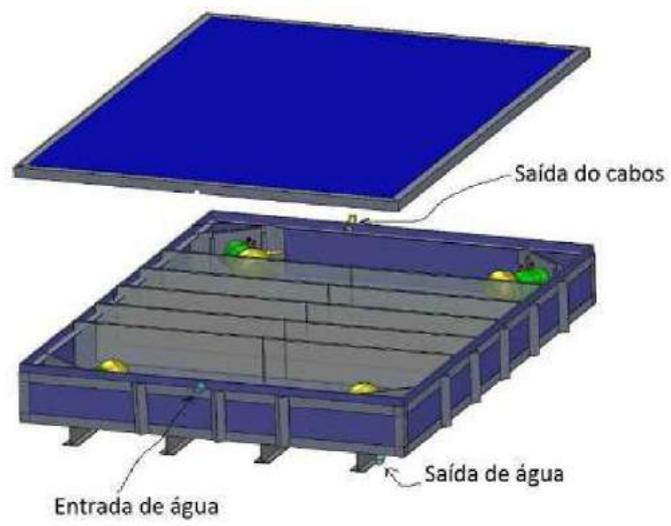


Figura 2.5: Ilustração do tanque de veto do Projeto Neutrinos Angra.

Todos estes componentes serão envolvidos por uma estrutura metálica responsável pela sustentação mecânica e pela blindagem eletromagnética e serão alocados dentro de um *container*, na parede externa da redoma do reator da usina de Angra II.

2.3 Estimativa da taxa de interações de antineutrinos

É possível obter uma estimativa da taxa de interações de antineutrinos no detector do Projeto Neutrinos Angra, pelo decaimento dos neutrinos vindos do reator da usina nuclear de Angra II. Para isso, é necessário que o valor da potência térmica média do reator seja conhecida. O cálculo desta estimativa pode ser realizado através da seguinte equação:

$$R_D = \frac{N_f \cdot \sigma \cdot N_T}{4\pi D^2} \quad (2.2)$$

onde R_D é a taxa de detecção de antineutrinos [Hz], N_f é taxa de fissões [Hz], σ é a seção de choque média cujo valor médio é de $5.825 \times 10^{-47} m^2$ e D é a distância entre o reator e o detector.

A taxa de fissões, pode ser obtida por:

$$N_f = \frac{P_{th}}{W} \quad (2.3)$$

onde P_{th} é a potência térmica dissipada pelo reator e W é a energia média liberada por fissão ($\sim 203,78 MeV$, no caso do reator de Angra II).

A potência térmica instalada do reator nuclear de Angra II é de $4GW$. Assim, através da equação 2.3, estima-se que sua taxa de fissão é de $1.23 \times 10^{20} Hz$.

O detector alvo pode ser preenchido por um volume de cerca de 1000 litros ($1m^3$) de água. Como a massa molar da água é de $18g/mol$, em 1000 litros existem cerca de 3.34×10^{28} moléculas de água. Cada molécula de água possui dois hidrogênios, assim, a quantidade de potenciais partículas para interação de antineutrinos é de 6.64×10^{28} . Considerando que distância entre o reator e o detector é de $25m$, e substituindo os valores obtidos na equação 2.2, a taxa estimada de interações de antineutrinos no detector alvo do Projeto Neutrinos Angra é de $0.061 Hz$ (5273 por dia), em água pura.

A eficiência do sistema de veto, assim como as técnicas utilizadas para identificação dos eventos de antineutrinos são alguns dos fatores que determinarão a taxa de detecção de neutrinos do detector do Projeto Neutrinos Angra.

Capítulo 3

Chuveiros Atmosféricos

Os raios cósmicos são partículas provenientes de todas as direções do espaço. Constantemente, a atmosfera terrestre é bombardeada por estas partículas, em todo seu redor.

As partículas da radiação cósmica (radiação primária), quando entram na atmosfera terrestre, percorrem uma certa distância e colidem com núcleos de moléculas dos gases atmosféricos. A seção de choque e, portanto, a possibilidade da interação ocorrer, aumentam de acordo com a energia e com a massa da partícula de radiação primária. A ocorrência destas colisões dá origem a uma seqüência de interações nucleares e eletromagnéticas. O produto disto, é uma chuva de partículas, neutras e carregadas, como o pión (π^\pm), múons (μ^\pm), dentre outras, cujas velocidades de deslocamento se aproximam da velocidade da luz (radiação secundária). Este fenômeno é chamado de Chuveiro Atmosférico Extenso (CAE).

Estas radiações são as principais fontes de ruído para o detector de anti neutrinos do Projeto Neutrinos Angra. Porém, neste trabalho de mestrado, a radiação cósmica (os múons, em particular) será utilizado como ferramenta para realização dos testes com a eletrônica de leitura do detector alvo.

3.1 Composição dos Raios Cósmicos

Os estudos da radiação cósmica vem se difundindo desde o final do século XIX. Porém, até os dias atuais, sua origem e composição ainda não foram completamente determinadas. As partículas que compõem os raios cósmicos, são conhecidos somente para as radiações de baixas e médias energias. Para $E \leq 100 GeV$ os raios cósmicos são constituídos de prótons (92%), partículas α (6%), núcleos pesados (1%), elétrons (1%) e raios γ (0,1%) ((GAISSER, 1990), (ENGELMANN *et al.*, 1990)). No intervalo $100 GeV < E < 10^4 GeV$ a composição contém núcleos

mais pesados cujas quantidades relativas são: 50% prótons, 25% partículas α , 13% Carbono, Nitrogênio e Oxigênio (CNO) e 13% Ferro. Já para as radiações com energias mais elevadas ($104 < E < 106 GeV$) ainda não foi possível obter uma evidencia significativa de suas componente primárias (GAISSER e STANEV, 2000).

Para $E > 106 GeV$, o fluxo de partículas é muito baixo: algumas partículas/ano.m². Isto dificulta a realização de medidas diretas destas partículas. Porém, é possível a realização de medidas indiretas, através do estudo das partículas secundárias. Muitas partículas hadrônicas são geradas na primeira interação. Estas partículas constituem o núcleo do chuveiro atmosférico. A maioria são mésons que podem interagir com os núcleos do ar ou decair. Já os mésons π^0 , por sua vez, decaem rapidamente em um par $\gamma\gamma$ dando origem à componente eletromagnética através de produção de pares e Bremsstrahlung (radiação produzida quando cargas elétricas sofrem aceleração) (BUFFINGTON et al., 1975). A componente penetrante é dada por múons, gerados nos decaimentos dos mésons π^\pm e K^\pm , e por os neutrinos. A Figura 3.1 representa os processos de interação na formação do chuveiro cósmico e suas componentes.

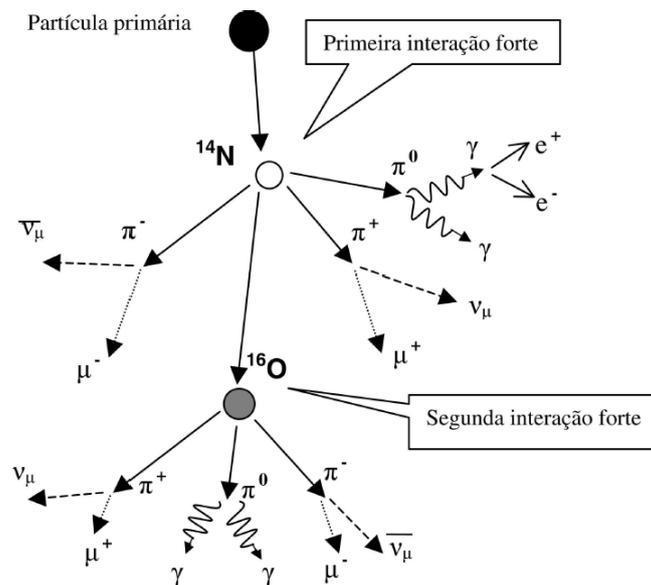


Figura 3.1: Esquema de desenvolvimento de um chuveiro atmosférico extenso (CAE) na atmosfera terrestre.

Fonte: (FAUTH et al., 2007)

3.2 Os Múons Atmosféricos

As partículas mais abundantes no nível do mar são os múons e os neutrinos. Os múons que alcançam o nível do mar, são os de baixa e média energias (alguns GeV). Eles são gerados principalmente a $\sim 15km$ de altitude, nos chuweiros dos raios cósmicos primários ((CECCHINI e SIOLI, 2000), (GAISSER e STANEV, 2000)). Os múons pertencem a família dos léptons (interações eletromagnéticas e fracas). Possuem um tempo de vida $\tau_0 = 2,19\mu s$ e massa $m_0 = 106MeV/c^2$. Devido ao fenômeno da dilatação do tempo (contração do espaço) uma grande quantidade de múons consegue alcançar a superfície terrestre.

3.2.1 Produção

A geração dos múons de baixa energia (alguns GeV) se dá principalmente pelo decaimento dos píons carregados π^\pm e em menor escala, no decaimento dos káons K^\pm . Estes processos são respectivamente representados pelos seguintes esquemas (GAISSER, 1990):

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu \quad \sim 100\% \quad (3.1)$$

$$K^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu \quad \sim 63.5\% \quad (3.2)$$

onde o valor percentual indica a taxa do decaimento. Os múons levam em média 79% e 52% da energia dos π^\pm e dos K^\pm respectivamente. A contribuição devido aos káons é uma função da energia. Para baixas energias $\sim 5\%$ dos múons verticais provém dos káons. Este percentual aumenta para 8% para $E_\mu = 100GeV$, 19% para $1000GeV$ e 27% para $E_\mu > 1TeV$.

3.2.2 Propagação na atmosfera

A propagação dos múons na atmosfera, geralmente, depende do intervalo de energia considerado, devido à dependência energética da interação nuclear. É possível diferenciar três intervalos de energia principais ((GAISSER e STANEV, 2000), (AMBROSIO *et al.*, 1998)):

1. $E_\mu < \varepsilon_\mu$, onde $\varepsilon_\mu \cong 1GeV$ é a energia crítica dos múons. Esta é a energia sobre a qual a interação nuclear prevalece em relação ao decaimento. Assim, neste intervalo de energia (muito baixa) os múons decaem. As perdas de energia pela partícula na atmosfera aumentam consideravelmente

e gradativamente. Isto dificulta a propagação destes múons na atmosfera terrestre.

2. $\varepsilon_\mu < E_\mu < \varepsilon_\pi, \varepsilon_K$, onde $\varepsilon_\pi = 115\text{GeV}$ e $\varepsilon_K = 850\text{GeV}$ são as energias críticas para píons e káons respectivamente. Neste intervalo quase todos os múons preferem decair em vez de interagir. O fluxo observado dos múons tem uma dependência com a energia do tipo potência com o mesmo índice do fluxo dos raios cósmicos primários. A distribuição angular é quase independente do ângulo zenital.
3. $E_\mu < \varepsilon_\pi$ e ε_K . Esta faixa de energia é típica dos experimentos subterrâneos e dos experimentos de superfície que observam partículas muito inclinadas. O espectro de produção dos múons tem a mesma dependência da potência da energia do espectro de produção dos primários. Mas o espectro dos decaimentos tem uma dependência extra de E^{-1} , como consequência da dilatação do tempo.

3.2.3 Intensidade

Vários fatores influenciam na mudança da intensidade dos múons verticais, como a latitude geomagnética (ECKART, 1996), a altitude, a atividade solar e os fatores atmosféricos. Por exemplo: o fluxo vertical muônico, com $p > 0.33\text{GeV}/c$ observado numa latitude de 60° , é 1.8 vezes maior do que o mesmo fluxo observado na linha do equador. Esta é uma causa do efeito latitude. Este efeito é observável nos múons ao nível do mar para energias até $\sim 5\text{GeV}$. No que concerne à modulação, devido a atividade solar, ela é estimada respectivamente em 7% e 4,5% no fluxo muônico diferencial e integral, no caso de grande latitude e para $p \sim 1\text{GeV}/c$.

A intensidade integral dos múons verticais, ao nível do mar, com $p > 1\text{GeV}/c$ é $\sim 70\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$. Muitas vezes se usa o seguinte número prático para detectores horizontais: $I \sim 1\text{cm}^{-2}\text{min}^{-1}$. A energia média dos múons ao nível do mar é obtida experimentalmente: $\sim 4\text{GeV}$. Teoricamente esta estimativa é muito complexa porque a energia, como a distribuição angular, é consequência dos seguintes fenômenos: espectro de produção, perda de energia na atmosfera e decaimento (PAGANINI, 2001).

3.2.4 Perda de energia por interação com a matéria

Os múons, quando atravessam a matéria, por serem léptons, interagem eletromagneticamente com os elétrons e os núcleos do meio. As interações com os

elétrons causam perdas de energia por ionização e excitação. Já as interações com os núcleos produzem a difusão de Coulomb ((LANDAU e BINDER, 2005), (ALLKOFER, 1975)).

A fórmula de Bethe-Bloch, a seguir, expressa a quantidade média de energia perdida pelo múon, pelo processo de ionização e excitação (PAGANINI, 2001).

$$-\frac{dE}{dx} = K\rho \frac{z^2 Z}{\beta^2 A} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 \nu^2 W_{máx}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right] \quad (3.3)$$

onde dx é a distância linear infinitesimal percorrida pela partícula nomeio, $K = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2$, m_e é a massa do elétron, z e ν são a carga e a velocidade da partícula incidente, respectivamente, $\beta = \frac{\nu}{c}$ é o número de Avogadro, Z é o número atômico e A o número de massa, ambos do meio, $r_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2}$ é o raio eletrônico clássico, δ é o efeito da densidade, C é a correção da camada nuclear e $W_{máx}$ é a energia máxima transferida numa colisão individual. , I é o potencial efetivo de ionização que, calculado considerando todos os elétrons do núcleo, resulta em $\sim 10.Z.eV$.

No caso de uma partícula incidente de massa M , a energia máxima transferida é dada, em uma colisão frontal, por:

$$W_{máx} = \frac{2m_e c^2 \eta^2}{1 + 2s\sqrt{1 + \eta^2} + s^2} \quad (3.4)$$

ond $s = \frac{m_e}{M}$ e $\eta = \beta\gamma$.

No caso dos múons, $M \gg m_e$, assim, ten-se que:

$$W_{máx} = 2m_e c^2 \eta^2 \quad (3.5)$$

A fórmula de Bethe-Bloch (equação 3.3) se aplica a partículas pesadas sem spin. Para os múons é necessário adicionar um termo extra, devido a presença do spin. As características mais importantes da fórmula de Bethe-Bloch são as seguintes:

- $-\frac{dE}{dx} \propto \frac{z^2}{\beta^2}$, isto é, a perda de energia é proporcional à carga (Z^2) e inversamente proporcional à velocidade no meio (β^2), da partícula incidente;
- $-\frac{dE}{dx} \propto \frac{Z}{A}$, ou seja, o meio material pouco interfere, pois $\frac{Z}{A} \sim 0,5$ para todos os materiais, exceto o hidrogênio e os mais pesados;
- $-\frac{dE}{dx}$ independe da massa M da partícula. Assim, a fórmula relacionada à β^2 é a mesma para todos os tipos de partículas.

Como as características do meio dentro do detector alvo são conhecidas, assim como as suas dimensões, então é possível calcular o $-\frac{dE}{dx}$ dos múons

que o atravessam. Este resultado pode ser comparado com a energia percebida pelos sensores e, assim, determinar a eficiência do detector.

Capítulo 4

Estudo e caracterização dos sensores e da eletrônica de leitura

4.1 Fotomultiplicadoras Tubulares - PMT

A PMT (do inglês: *Photomultiplier Tube*) é um instrumento extremamente sensível que converte fótons (luz) em corrente (e/ou tensão) elétrica. Ela é basicamente formada por um tubo de vácuo, de vidro, contendo uma janela de entrada, um fotocatodo feito de um material foto-sensível, eletrodos direcionadores, seguidos por uma cadeia de dinodos (multiplicadores de elétrons) e, por fim, um anodo (coletor de elétrons). A Figura 4.1 mostra de forma esquemática as características construtivas básicas de uma PMT. A luz que incide na janela de entrada do tubo excita os elétrons no fotocatodo, os quais podem ser liberados por efeito fotoelétrico (ARONS e PEPPARD, 1965) (KLEIN, 1961) (QUARANTA, 1969). Quando isto acontece, um ou mais fotoelétrons são emitidos no interior do tubo (vácuo). Os fotoelétrons emitidos são então acelerados pelos eletrodos direcionadores até o primeiro dinodo. Neste ponto, elétrons secundários são arrancados devido ao choque dos fotoelétrons. Os elétrons arrancados no primeiro dinodo se juntam com os fotoelétrons e excitam o segundo dinodo que emite mais elétrons. Este processo se repete sucessivamente até o último dinodo, promovendo assim a multiplicação dos fotoelétrons. Todos os elétrons secundários emitidos pelos dinodos na cadeia de multiplicação, juntamente com os fotoelétrons são coletados pelo anodo no final do trajeto.

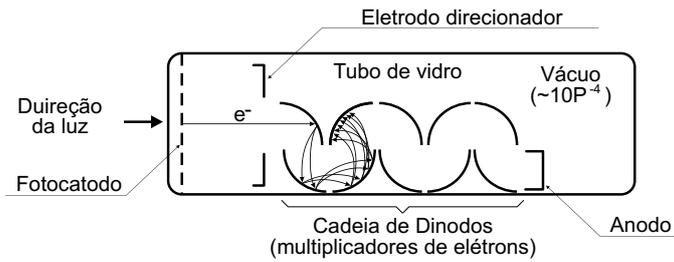


Figura 4.1: Fotomultiplicadora Tubular - PMT - Esquemático

Para operar, a PMT requer uma fonte estável de alta-tensão, com tensões normalmente em torno de $1kV$ à $2kV$. O ganho do dispositivo tem uma relação direta com a alta-tensão aplicada. Um circuito divisor de tensão é necessário para otimizar a distribuição da alta-tensão entre o catodo, os dinodos e o anodo. Os elétrons coletados pelo anodo podem ser modelados por uma fonte de corrente, como mostra a Figura 4.2, que apresenta de forma ideal o circuito divisor de tensão da PMT. Um resistor (R_L) de 50Ω é usualmente ligado entre o terminal do anodo e o GND do circuito afim de converter a corrente (elétrons) coletada em tensão e fazer o casamento de impedâncias com o sistema de medidas utilizado. Para transmitir o sinal elétrico gerado sobre R_L por um cabo coaxial longo, é necessário que o cabo, os conectores e a terminação na saída possuam a mesma impedância característica de R_L , como mostrado na Figura 4.3. Desta forma, a impedância vista pela PMT se mantém constante, independentemente do comprimento do cabo, promovendo assim o casamento das impedâncias do circuito. Este casamento impede a reflexão do sinal no cabo coaxial e o surgimento de oscilações na forma de onda do sinal na saída da linha de transmissão. Porém, é importante ressaltar que, como o anodo é uma fonte de corrente, a carga vista na extremidade final (SAÍDA) do circuito da Figura 4.3, por se tratar de um divisor de corrente, é metade da carga total gerada pela multiplicação dos elétrons na PMT.

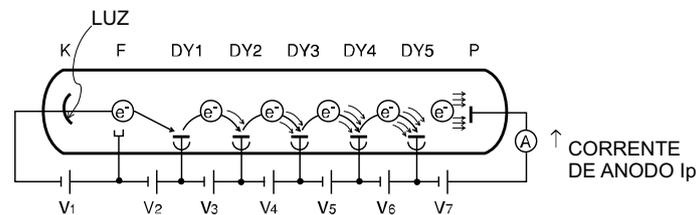


Figura 4.2: Esquemático - Divisor de tensão com fontes independentes
Fonte: (HAMAMATSU PHOTONICS, 2006)

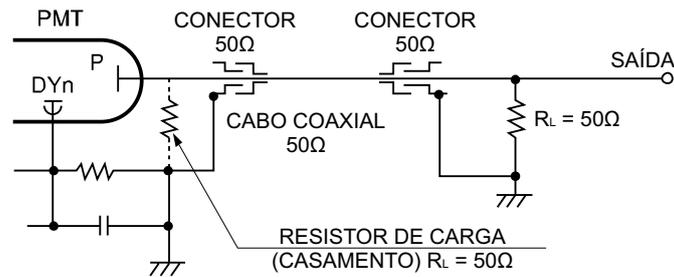


Figura 4.3: Esquemático - Circuito de saída e casamento de impedâncias
 Fonte: (HAMAMATSU PHOTONICS, 2006)

As tensões do circuito divisor de tensão entre os componentes da PMT são representadas na Figura 4.2 por fontes independentes de tensão, porém, na prática, o divisor de tensão é realizado de outra maneira. Existem diferentes tipos de circuitos divisores de tensão, de acordo com o manual da Hamamatsu (HAMAMATSU PHOTONICS, 2006): com diodo zenner, com transistores, puramente resistivo, com fonte de tensão auxiliar, etc. As características construtivas do circuito varia com a aplicação e com o modelo do dispositivo.

Outra característica importante é exibida pelas Figuras 4.5 e 4.4. As formas de onda mostradas são referentes às medidas de tensões sobre o resistor de 50Ω ligado entre o anodo (P) e o terra, como mostrado no esquemático imediatamente acima de cada forma de onda. A diferença entre os dois esquemáticos está nos resistores de 50Ω que, na Figura 4.5, estão ligados em série com os diodos. Note que estes resistores não existem no circuito da Figura 4.4. A função destes componentes é reduzir as oscilações na saída do circuito (resistores de amortecimento). É possível observar que a forma de onda da Figura 4.4 apresenta uma oscilação em sua base. Pelo gráfico da Figura 4.5, pode-se perceber que a oscilação é menor. Estes são os efeitos da ausência e da presença dos resistores de amortecimento, respectivamente.

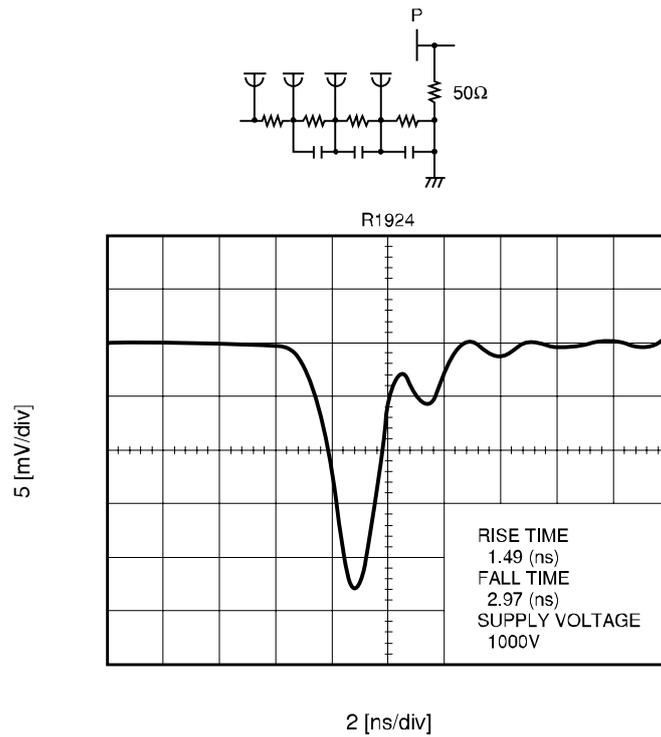


Figura 4.4: Forma de onda e esquemático do circuito divisor de tensão sem resistores de amortecimento - PMT Hamamatsu R5912
 Fonte:([PHOTONICS, 1998](#))

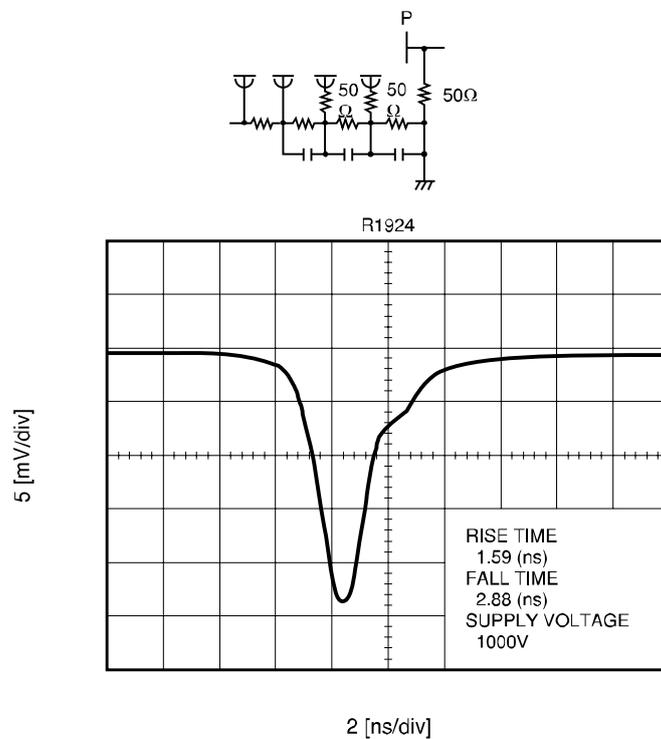


Figura 4.5: Forma de onda e esquemático do circuito divisor de tensão com resistores de amortecimento - PMT Hamamatsu R5912
 Fonte:([PHOTONICS, 1998](#))

O modelo de PMT utilizado no Projeto Neutrinos Angra é o R5912 fabricada pela Hamamatsu. Para o experimento, foram adquiridas algumas dezenas destes dispositivos. Duas informações diferentes acerca da mesma PMT serão apresentadas a seguir. As informações foram obtidas à partir de documentos distintos.

Um documento (Apêndice ??) com informações das PMTs adquiridas foi enviada pela *Hamamatsu* para a coordenação do projeto. A Figura 4.6 mostra o esquemático (página 4 da folha de dados - Apêndice ??) do circuito divisor de tensão do referido modelo de PMT. A Figura 4.7 mostra outro esquemático cuja fonte é um um outro documento (PHOTONICS, 1998) referente ao mesmo modelo de PMT (R5912) publicada também pela *Hamamatsu*.

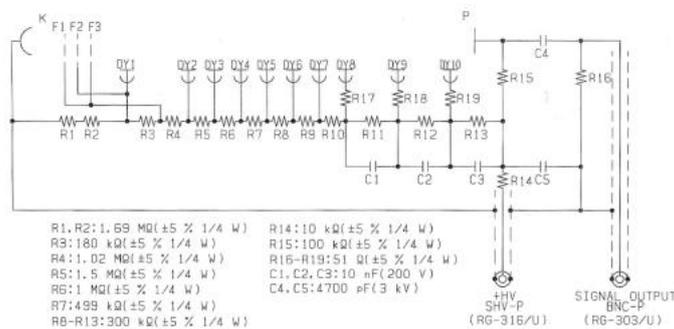


Figura 4.6: Esquemático do circuito divisor de tensão da PMT Hamamatsu R5912 (Apêndice ??)

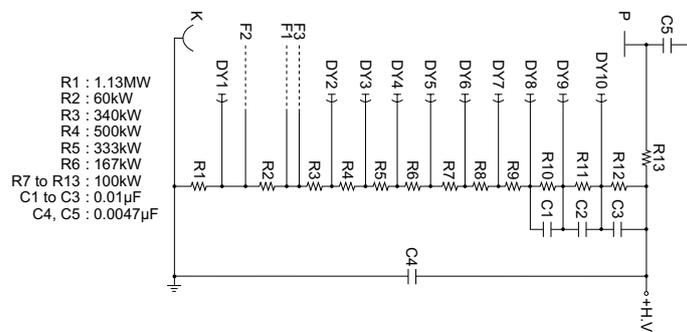


Figura 4.7: Esquemático do circuito divisor de tensão da PMT Hamamatsu R5912.

Fonte:(PHOTONICS, 1998)

As diferenças mais relevantes entre os dois esquemáticos, para este trabalho, são os resistores de amortecimento e o resistor de carga R_L que estão presentes somente no esquemático da Figura 4.6. Estas informações serão tomadas como referência na próxima seção desta dissertação.

4.2 Caracterização da PMT Hamamatsu R5912

Para caracterização da PMT, no âmbito desta dissertação, foi montado no Laboratório de Telecomunicações e Processamento de Sinais (LAPTEL), localizado no galpão do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPEE) da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) na cidade de Juiz de Fora - MG, um sistema de medidas composto por uma câmara escura de madeira, um gerador de sinais Agilent 33250A, uma fonte de alta tensão da Hamamatsu modelo C9525, um osciloscópio Tectronix TDS 5034B, uma PMT Hamamatsu R5912 (número de série SD2852), cedida por empréstimo pelo CBPF, e um LED (do inglês: *Light Emitting Diode*) verde.

O LED foi posicionado na parte frontal do "bulbo" da PMT. Foi utilizada a própria caixa do fabricante da PMT como estrutura para suportá-la e para posicionamento do LED. Esta caixa foi envolvida externamente por papel laminado afim de se criar uma blindagem eletromagnética e impedir a entrada de luz. A caixa, envolvida pelo alumínio, foi colocada no interior da câmara escura de madeira. A Figura 4.8 mostra o esquemático da ligação do sistema de medidas.

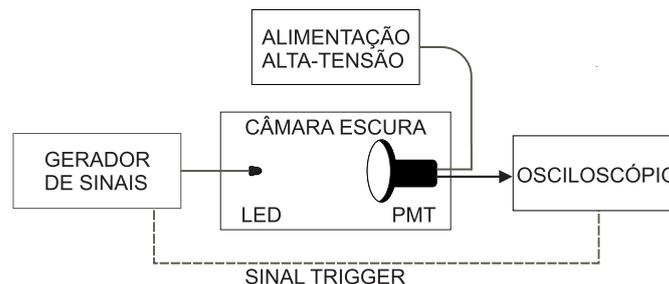


Figura 4.8: Esquemático do sistema de aquisição dos sinais de saída do PMT.

A PMT foi caracterizada a partir da sua resposta ao fotoelétron único. A técnica utilizada para a geração de um único fotoelétron, de acordo com Tokar (TOKAR *et al.*, 1999) e Asch (ASCH *et al.*, 2005), consiste em fornecer pulsos de curta duração, através de um gerador de funções, para os terminais de um LED posicionado na frente da PMT, afim de fazer com que o fotocátodo converta apenas um fóton em fotoelétron. Através de aquisições dos sinais, é possível estimar a carga elétrica coletada pelo anodo da fotomultiplicadora como consequência do evento fotoelétrico. Para que isto ocorra, o sinal enviado para o LED deve ter amplitude e duração tais que a grande maioria dos pulsos não se converta em nenhum fotoelétron, o que implica na geração de nenhum sinal na saída da PMT. Se bem configurada, essa condição faz com que a probabilidade de gerar apenas um fotoelétron seja muito maior do que a probabilidade de gerar mais do que um fotoelétron.

O pulso mais rápido que o gerador utilizado é capaz de produzir possui $8ns$ de largura à meia altura e $5ns$ nas bordas de subida e de descida. A amplitude do pico deste pulso pode ser variada mantendo as características temporais. Para estabelecer a amplitude que melhor configura o sistema de medidas de acordo com a técnica proposta, a estratégia foi variar a amplitude do pico e criar um banco de dados para cada variação. Cada banco possui cem mil janelas de aquisições de sinal da PMT em resposta ao LED excitado pelo pulso. Estes dados foram adquiridos a partir do *canal 1* do osciloscópio, com auxílio de uma ferramenta desenvolvida em *LabView*. Cada janela de aquisição tem duração de $100ns$ e possui 500 amostras com $80mV$ de excursão ($10mV/Div$). A sincronização das aquisições foi feita pelo *canal 3* do osciloscópio, com o nível de *trigger* em $1.8V$ e um *delay* (atraso) de $160ns$ para o centro das janelas adquiridas, a partir do sinal *TTL* (onda retangular com $3.6V_{pp}$) gerado pela porta "Sync" do gerador de função. A Figura 4.9 mostra algumas aquisições afim de ilustrar o detalhe da sincronização. O LED foi excitado por pulsos com 900, 925, 950 e 975mV de tensão de pico, à uma frequência de $10kHz$. A PMT foi alimentada com uma tensão de $1510V$ com o objetivo de obter um ganho de 10^7 de acordo com a tabela de altas-tensões fornecida pelo fabricante (Apêndice ??). A Figura 4.10 mostra a distribuição de carga da saída da PMT em resposta ao LED excitado pelas quatro tensões de pico propostas.

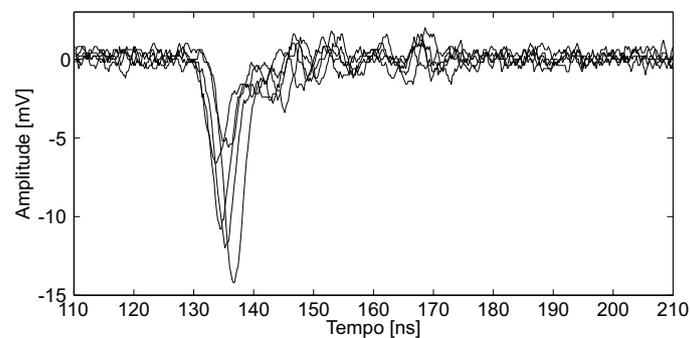


Figura 4.9: Detalhe da sincronização pelo atraso de $160ns$ - formas de onda adquiridas na saída da PMT.

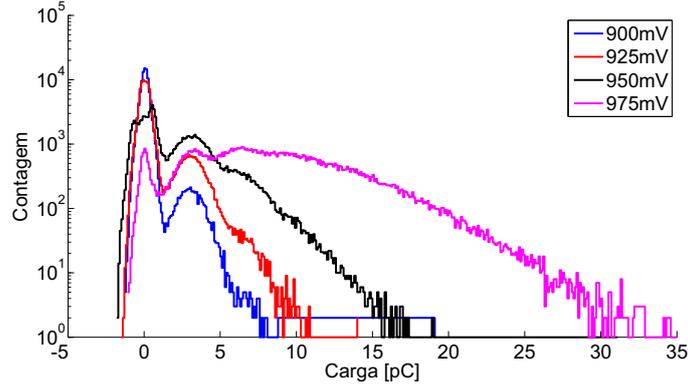


Figura 4.10: Distribuição de carga para cada variação na amplitude do pulso.

Os dados adquiridos passaram por um tratamento para eliminação da componente DC que também é chamada de pedestal, ou *offset*. A estimativa da carga foi realizada de acordo com a Equação 4.1, onde Q_{est} é o valor estimado da carga (em pico Coulombs), F_{esc} é o fator de conversão de escala (10^{12} , neste caso), R_{eq} e a resistência equivalente vista pela PMT (considerando que o circuito divisor de tensão da PMT em análise é idêntico ao circuito mostrado na Figura 4.6, o circuito de saída fica, então, idêntico à representação da Figura 4.2, ou seja, dois resistores de 50Ω em paralelo, sendo a resistência equivalente (R_{eq}) igual a 25Ω (HAMAMATSU PHOTONICS, 2006)), $v(n)$ é a tensão (em Volts) da n -ésima amostra da janela, Δt é o período de amostragem (intervalo de tempo entre as amostras n e $n+1$) da janela e N é o número total de amostras da janela (500, neste caso).

$$Q_{est} = \frac{F_{esc}}{R_{eq}} \sum_{n=1}^N v(n) \cdot \Delta t \quad (4.1)$$

Assumindo que o número de fotoelétrons produzidos na PMT respeita uma distribuição de Poisson (BAUER *et al.*, 2011), é possível calcular a probabilidade da quantidade de fotoelétrons, por aquisição, ser maior do que 1. Distribuição de Poisson é definida pela seguinte equação:

$$p(k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} \quad (4.2)$$

onde $p(k)$ é a probabilidade da PMT produzir k fotoelétrons.

Para calcular o $p(k > 1)$ de cada amplitude do pulso foi utilizada uma aproximação com intervalo de confiança de 95%. A Figura 4.11 mostra a aproximação feita para a distribuição de carga referente ao pulso de $925mV$.

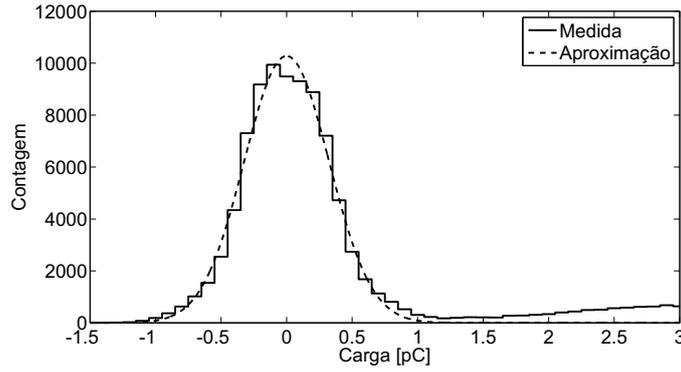


Figura 4.11: Região de ruído ($k = 0$) - Aproximação pela gaussiana.

A região ao redor do zero no eixo horizontal da distribuição de carga, destacada na Figura 4.11, representa a área onde não é produzido nenhum fotoelétron (região de ruído). Esta região pode ser aproximada por uma distribuição gaussiana (BAUER *et al.*, 2011). Através desta aproximação é possível estimar $p(0)$ e λ para cada amplitude do pulso injetado no LED da seguinte forma:

$$p(0) = \frac{\sum Y_{aprox}(Q)}{\sum Y_{med}(Q)} \quad (4.3)$$

$$\lambda = -\ln(p(0)) \quad (4.4)$$

onde Q é a carga (eixo horizontal da distribuição), Y_{aprox} é distribuição aproximada pela gaussiana da distribuição de carga na região do ruído e Y_{med} é a distribuição de carga medida para a respectiva tensão de pico do pulso no LED. A Equação 4.3 representa a quantidade total de eventos de ruído dividido pela quantidade total de medidas realizadas (quantidade total de aquisições) que, em outras palavras, é o percentual de eventos de ruído na medida.

A Figura 4.12 mostra os valores de $p(k > 1)$ para as variações de pico do pulso no LED. A curva em tracejado representa a aproximação das medidas por uma função exponencial. Os parâmetros da função utilizada para descrever o comportamento da PMT em função da amplitude do pulso no LED também são exibidos na Figura 4.12. Foi estimado que, para os pulsos com $900mV$ de amplitude, a contaminação de eventos com mais de 1 fotoelétrons é de 0,33%. De acordo com a literatura (BAUER *et al.*, 2011), um sistema para geração de 1 único fotoelétron na PMT está bem calibrado quando a taxa de eventos com mais de 1 fotoelétron é de aproximadamente 0.5%. Apoiado nesta tese, a amplitude do pulso em $900mV$ foi adotada como padrão de configuração do sistema na sequência deste estudo.

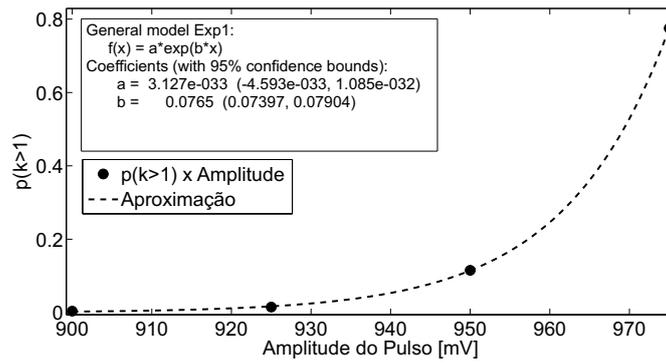


Figura 4.12: $p(k>1)$ versus amplitude do pulso

Para melhorar a análise estatística, um novo banco de dados, agora com 200 mil janelas, foi adquirido. O sistema de medidas foi configurado de acordo com o que foi descrito e determinado anteriormente, nesta nova aquisição, cuja distribuição de carga é exibido na Figura 4.13. Um corte simples foi realizado no vale da distribuição ($1pC$), em destaque na Figura 4.14. Este corte propõe que as aquisições cujas cargas são maiores ou iguais à $1pC$ possuem sinal e as demais, apenas ruído, separando assim o banco de dados em dois outros bancos: banco de sinais e banco de ruído.

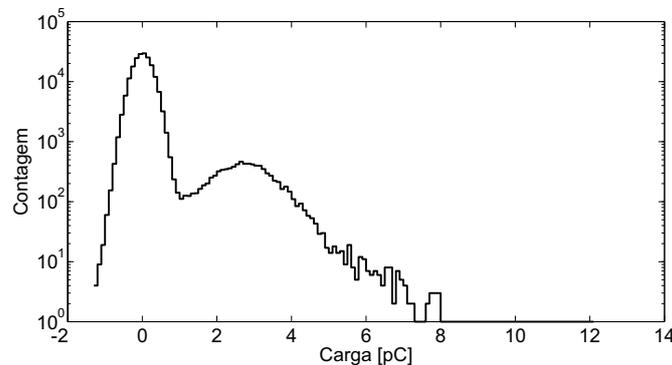


Figura 4.13: Distribuição da carga - Banco de Dados com 200 mil aquisições.

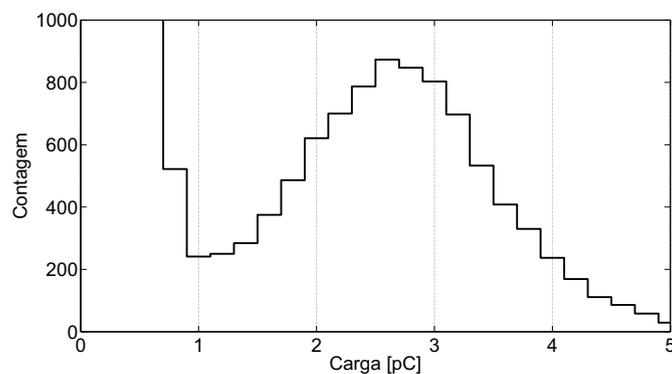


Figura 4.14: Corte em $1pC$.

A Figura 4.15 mostra uma das janelas temporais do banco de sinais. O ponto em destaque representa a máxima amplitude absoluta do sinal (pico). Note que é possível identificar o valor do pico e sua respectiva amostra dentro da janela temporal de aquisição. Como já dito anteriormente, cada janela possui 500 amostras em $100ns$. Assim, foi gerado uma distribuição temporal em função da posição do pico dentro de cada janela do banco de sinais (Figura 4.16).

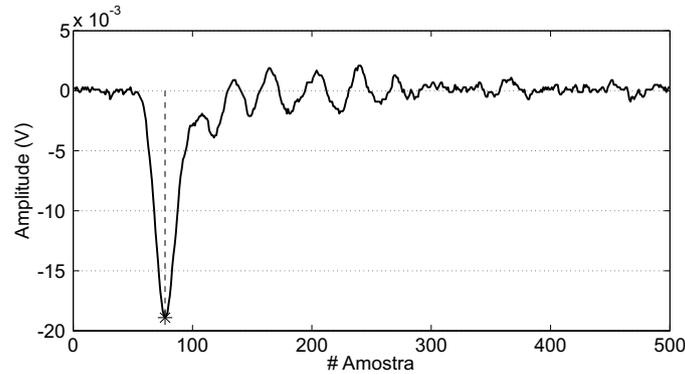


Figura 4.15: Exemplo de janela do banco de sinais.

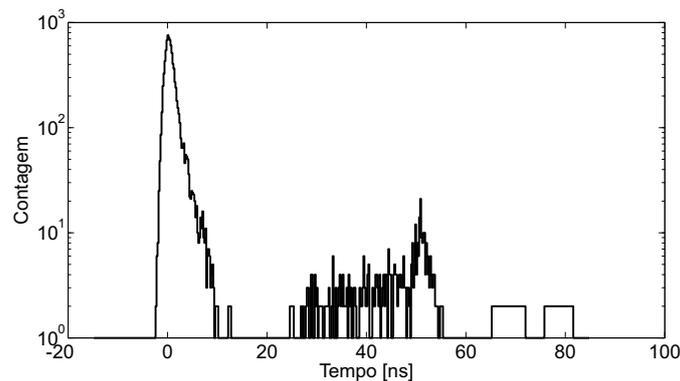


Figura 4.16: Distribuição temporal do banco de sinais.

De acordo com Kaetzer ([KAETHER e LANGBRANDTNER, 2012](#)), os pulsos correspondentes ao primeiro fotoelétron estão compreendidos no intervalo $-2.5ns < t_0 < 2.5ns$, onde t_0 é a média da distribuição temporal para o primeiro fotoelétron ($t_0 = 0ns$ - Figura 4.16). Estes dados foram separados e novamente uma distribuição de carga foi gerada, como exibido pela Figura 4.17 que também mostra a aproximação por uma função gaussiana, além de seus respectivos parâmetros. O parâmetro $b1 = 2.637$ representa a carga média em $[pC]$ para o primeiro fotoelétron. A carga do elétron amplificada 10^7 vezes corresponde à $1.602pC$. Sendo assim, a carga media medida, de acordo com o resultado obtido pela aproximação, corresponde à aproximadamente 1,64 fotoelétrons, ou 164% da carga do fotoelétron amplificado, para o ganho de 10^7 especificado pelo fabri-

cante. Em outras palavras, o ganho estimado, neste caso, foi de 1.65×10^7 para a PMT analisada.

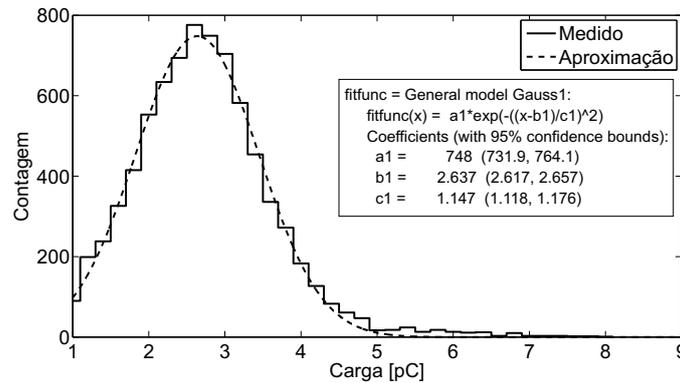


Figura 4.17: Distribuição de carga para os sinais cujos picos estão compreendidos no intervalo de $-2.5ns$ a $2.5ns$ e os respectivos parâmetros obtidos pela aproximação da curva por uma gaussiana.

A tentativa de justificar a discrepância entre a carga medida e o valor esperado pode induzir o pensamento de que o circuito divisor de tensão da PMT em voga seja o da Figura 4.7, pois este não possui o resistor de carga R_L . Assim, a resistência vista pela PMT é apenas a de 50Ω , na terminação do cabo. Isso implica no valor da carga medida, que passa a ser metade do valor obtido anteriormente, ou seja, $1.3185pC$, pois a resistência equivalente do circuito de saída (R_{eq}) passa a ser o dobro (50Ω) (vide Equação 4.1). Este valor corresponde a 82,3% do valor esperado. Os 17,7% que faltam podem ser atribuídos às perdas causadas pelas reatâncias parasitas do cabo, cuja atenuação se comporta da seguinte forma, de acordo com o fabricante (HUBER+SUHNER®, 2007):

$$Atten(f) = 0.3956\sqrt{f} + 0.0645f \quad (4.5)$$

onde $Atten(f)$ é a atenuação do sinal no cabo em $[dB/m]$ e f é a frequência em $[GHz]$. A Figura 4.18 representa a forma de onda da PMT em resposta à um único fotoelétron, obtido através da média, ponto-a-ponto, das amostras das aquisições do banco de sinais da Figura 4.17. Através de uma comparação visual simples, é possível perceber que a Figura 4.17 é mais semelhante à forma de onda da esquerda do que à da direita, na Figura 4.5. Note que o circuito divisor de tensão imediatamente acima da forma de onda mais similar está de acordo com o circuito apresentado na Figura 4.7, a menos do resistor de carga R_L , levando-se em conta a ausência dos resistores de amortecimento. Utilizando-se um ohmímetro (multímetro) é possível medir a resistência vista pela saída da PMT na extremidade do cabo, colocando-se uma das pontas de prova na parte externa do conector BNC e a outra na parte interna correspondente ao condutor

central do cabo coaxial. A medida foi realizada e o valor obtido foi de 50Ω . Isso indica que o resistor de carga R_L de 50Ω está presente no circuito de saída da PMT em estudo. Em resumo, de acordo com as observações, é possível imaginar que a PMT analisada não esteja em desacordo com as duas fontes de informações fornecidas pelo fabricante. Ou seja, existe resistor de carga R_L e não existe resistores de amortecimento na saída do dispositivo.

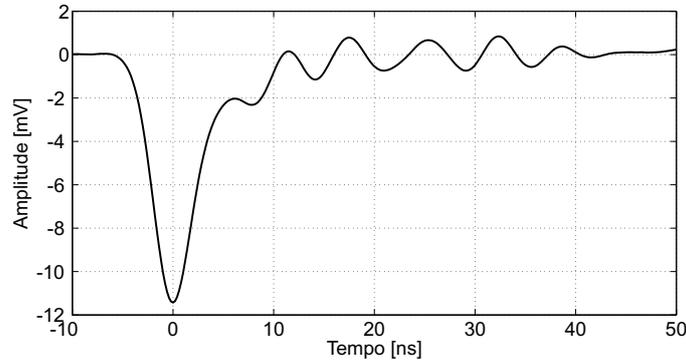


Figura 4.18: Forma de onda da saída da PMT.

Assim, com a finalidade de recalibrar o dispositivo, outras 4 medidas foram realizadas para as seguintes alta-tensões: $1300V$, $1400V$, 1600 e $1700V$. Um banco de dados com cem mil aquisições foi criado para cada um dos valores de alta-tensão. Para esta análise, o banco de dados da alta-tensão configurada em $1510V$ (tensão especificada pelo fabricante) foi reaproveitado. A Figura 4.19 mostra os resultados obtidos. A metodologia utilizada é a mesma da Figura 4.17. A curva em tracejado representa a aproximação por uma função potência ($f(x) = ax^b$) (BAUER *et al.*, 2011) do comportamento da carga (número de fotoelétrons) em função da alta-tensão em $[V]$. Através dos parâmetros obtidos, o valor de alta-tensão para o ganho de 10^7 é em torno de $1400V$. A Figura 4.20 é similar à Figura 4.19, porém para os valores de pico de sinal gerado pela PMT, em função dos valores de alta-tensão. A tensão média de pico obtido pela aproximação para uma alta-tensão de $1400V$ é de $6.3761mV$. Com a PMT alimentada por uma alta-tensão de $1510V$, a tensão média de pico é de 11.0681 , valor obtido também pela aproximação. As formas de onda médias para as alta-tensões de $1400V$ e $1510V$ são exibidas pela Figura 4.21. Visualmente, é possível perceber um comportamento similar entre as duas curvas. O comportamento linear do pico em função da carga é a característica destacada pela Figura 4.22. Estes fatores são indícios de que a a forma de onda na saída da PMT é fixa e suas amplitudes são proporcionais ao seu valor de pico, o que viabiliza a implementação de filtros digitais que utilizam a forma de onda média como padrão, como o filtro ótimo (ALVARENGA *et al.*) e o filtro ótimo, por exemplo.

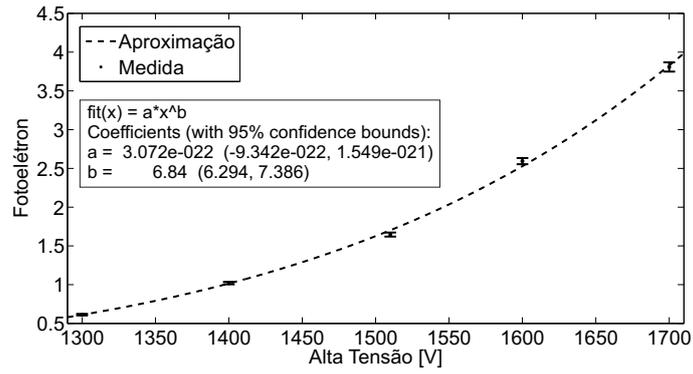


Figura 4.19: Recalibração da PMT (número de fotoelétrons versus alta-tensão).

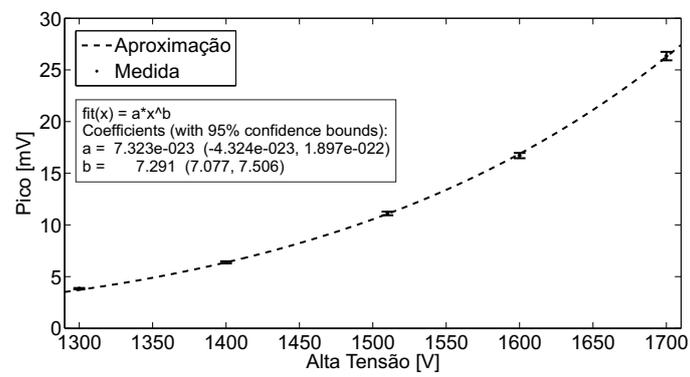


Figura 4.20: Recalibração da PMT (pico versus alta-tensão).

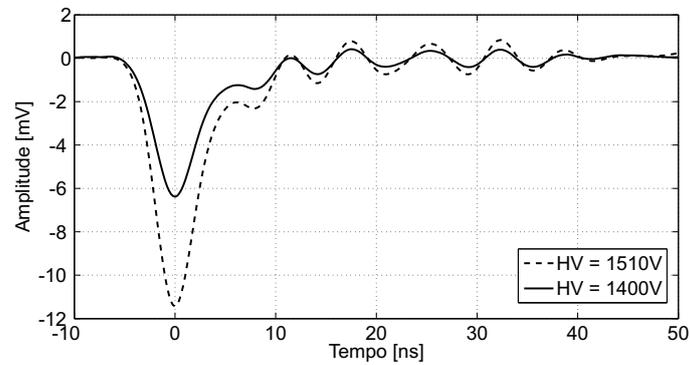


Figura 4.21: Formas de onda na saída da PMT alimentada por 1510V e 1400V respectivamente.

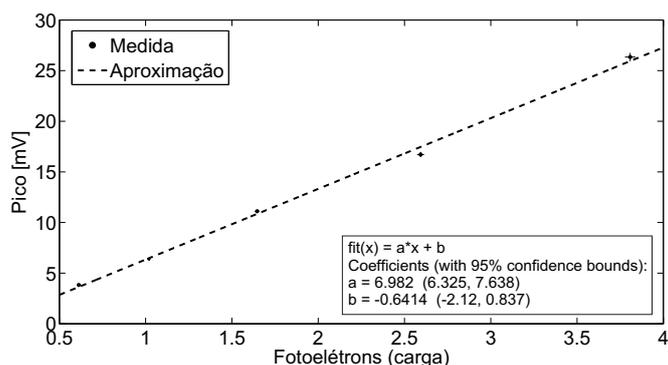


Figura 4.22: Pico versus número de fotoelétrons (carga).

Outra informação importante é a relação sinal-ruído (SNR, do inglês), obtida a partir da equação:

$$SNR = 10 \cdot \log \left(\frac{\mu_S}{\sigma_R} \right) [dB], \quad (4.6)$$

onde σ_R é o desvio padrão das amostras do banco de dados do ruído e μ_S é a média dos picos do banco de dados de sinais. Os resultados desta medida para os respectivos valores de alta-tensões são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Relação sinal-ruído (SNR).

Alta-tensão [V]	SNR [dB]
1300	9.85
1400	11.97
1510	13.56
1600	15.43
1700	15.66

4.3 Caracterização do Front-end

O *Front-end* é um dispositivo desenvolvido com a finalidade de condicionar o sinal da PMT de acordo com as especificações do sistema de aquisição de dados (NDAQ) (LIMA JR *et al.*, 2009), respeitando as características dos eventos a serem detectados. O circuito de *Front-end* do projeto Neutrinos Angra é composto por 8 canais. Cada canal contém 4 estágios de amplificação e filtragem (Figura 4.23 - primeiro estágio entre a Entrada e o ponto S_1 , segundo estágio entre S_1 e S_2 , terceiro estágio entre S_2 e S_3 , quarto estágio entre S_3 e a Saída), 1 discriminador e 1 circuito digital de controle e atuação do pedestal e do nível de tensão para disparo do discriminador. A Figura 4.24 mostra a camada superior

da placa onde estão montados os 8 canais de amplificação e filtragem e o circuito de alimentação.

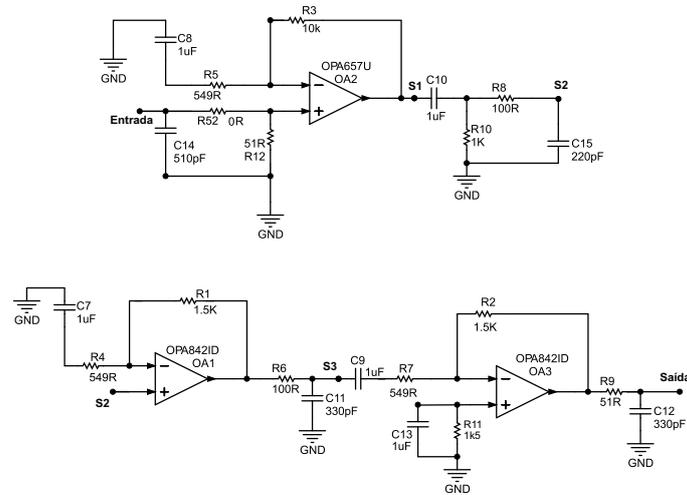


Figura 4.23: Esquemático do circuito de amplificação e filtragem do *Front-end*.



Figura 4.24: Imagem da camada superior do circuito de *Front-end*.

Na entrada do front-end existe um circuito (divisor de tensão) projetado para dividir a tensão do sinal da PMT através da simples substituição de dois resistores ($R52$ e $R12$ - Figura 4.23). O objetivo do divisor de tensão é possibilitar ajustes de ganho global do circuito de acordo com as características dos sinais gerados pelo detector. O discriminador é responsável por gerar um sinal lógico quando a tensão do sinal de saída do front-end for maior do que o limiar de disparo. Também faz parte do dispositivo, um circuito responsável por injetar um sinal de corrente contínua (pedestal) no último estágio do circuito de amplificação e filtragem, capaz de deslocar verticalmente o sinal de saída do *Front-end*. Próximo à saída do dispositivo, na parte frontal, existem dois potenciômetros,

em cada canal, sendo um responsável pelo ajuste manual do pedestal e o outro responsável pelo ajuste manual do nível de tensão de disparo do discriminador. Estes ajustes também podem ser feitos digitalmente através do circuito anteriormente mencionado, via comunicação I^2C . A seleção entre os modos manual e digital é feita alterando-se as posições físicas dos pinos contadores JN1 e JN2 (N representa os oito canais: A, B, C, D, E, F, G e H).

Foram confeccionadas 8 unidades do *Front-end* para o projeto Neutrinos Angra. Cada placa foi abrigada num módulo NIM (Nuclear Instrument Module - (RIBAS, 2002)) e recebeu uma numeração de 1 a 8. A placa caracterizada nesta seção foi a de número 4. A figura 4.25 representa as disposições (no módulo NIM) dos canais na saída e na entrada do circuito, além das posições dos potenciômetros de ajustes das tensões de disparo do discriminador e do pedestal dos seus respectivos canais.

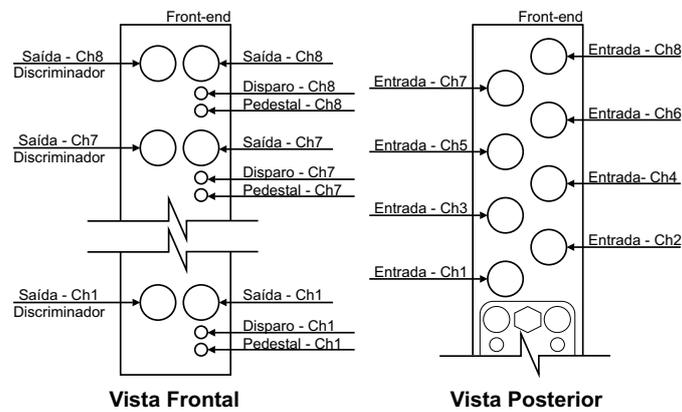


Figura 4.25: Representação das entradas e saídas do *Front-end* no módulo NIM.

Para caracterização do *Front-end*, foi utilizado o mesmo sistema de medidas descrito na seção anterior. O circuito foi estudado em três configurações diferentes em relação ao divisor de tensão: sem divisão de tensão ($R_{52} = 0\Omega$ e $R_{12} = 51\Omega$ - Div1), divisão por 2 ($R_{52} = 25.5\Omega$ e $R_{12} = 25.5\Omega$ - Div2) e divisão por 3 ($R_{52} = 33\Omega$ e $R_{12} = 16.5\Omega$ - Div3). É importante observar que a resistência equivalente vista na entrada do front-end é de cerca de 51Ω nas três situações, afim de promover o casamento de impedâncias (Seção 4.1). Cada configuração foi definida na placa da seguinte forma:

- Div1 - Canal 3;
- Div2 - Canal 2;
- Div3 - Canal 1.

A primeira análise foi feita seguindo a técnica proposta e utilizada anteriormente para geração de um único fotoelétron. A saída da PMT alimentada por

uma alta-tensão de $1510V$, excitada pelo LED estimulado por um pulso rápido de $900mV$ de amplitude (Seção 4.2) foi conectada na entrada do *Front-end* (Figura 4.26). O pedestal de cada canal do *Front-end* utilizado foi ajustado em $0V$ através da retirada dos contadores JN2 responsáveis pelo ajuste. Três novos bancos de dados foram gerados (um para cada cenário do divisor de tensão), com 100 mil aquisições cada um. Cada janela de aquisição possui duração de $2\mu s$ com 500 amostras. Cada banco de dados foi dividido em dois novos bancos: banco de sinais e banco de ruído. A primeira separação foi feita à partir do vale da respectiva distribuição de carga do conjunto de medidas, similarmente à análise realizada para a PMT na seção anterior. A Figura 4.27 mostra a distribuição de carga da saída do *Front-end* (Div1) em resposta à PMT (corte em $80pC$). O banco de sinais sofreu uma segunda separação pela seleção dos eventos cujas amplitudes estão compreendidas no intervalo $-8ns \leq t_o \leq 8ns$, onde t_o é a média da distribuição temporal do banco de sinais, como mostrado na Figura 4.28. O cálculo da carga foi realizado de acordo com a equação 4.1, porém, o intervalo de integração foi compreendido entre $-200ns < t_o < 200ns$, devido ao aumento da duração do sinal, com relação à duração do sinal de saída da PMT. A Tabela 4.2 mostra alguns resultados obtidos à partir dos dados armazenados. O ganho médio de pico foi obtido a partir da relação entre o valor médio de pico da saída da PMT e o valor médio de pico da saída do *Front-end*. O ganho médio de carga foi obtido através da relação entre a carga média da PMT e a carga média na saída do *Front-end*. Já a relação sinal-ruído (SNR) foi calculada de acordo com a Equação 4.6.

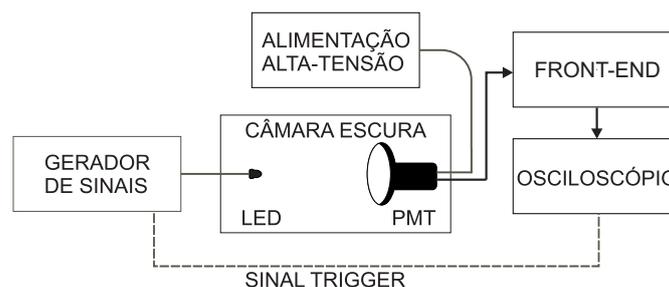


Figura 4.26: Esquemático de ligação do sistema de medidas com o *Front-end*.

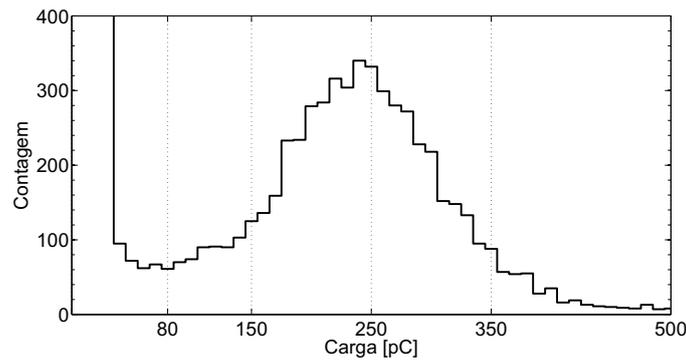


Figura 4.27: Distribuição de carga do *Front-end* em resposta à PMT - Div1.

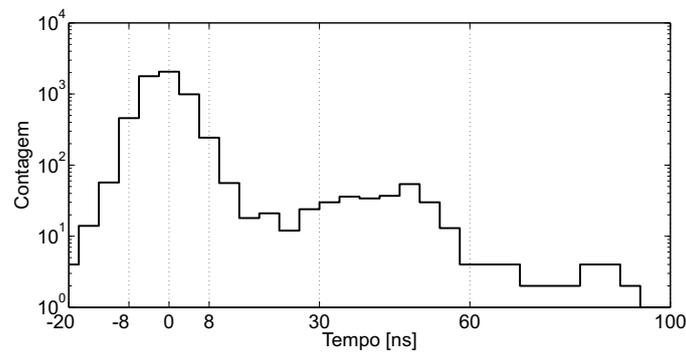


Figura 4.28: Distribuição temporal em relação aos picos do banco de sinais do *Front-end* - Div1.

Tabela 4.2: Características de operação da *Front-end* (FE) em resposta à PMT.

Divisor	Pico [mV]	Ganho de amplitude [V/V]	Carga [pC]	Ganho de carga [pC/pC]	SNR [dB]
1	71.89	6.50	236.47	89.67	15.62
2	34.56	3.12	113.32	42.97	14.40
3	24.17	2.18	79.17	30.02	13.40

A linearidade é uma característica muito útil, importante e explorada em sinais e sistemas. Costa (COSTA, 2014) mostrou em sua tese que o *Front-end* apresenta um comportamento linear dentro de uma determinada faixa. Este trabalho propõe analisar a linearidade do dispositivo a partir de uma métrica diferente da utilizada por Costa.

Com a finalidade de obter um sinal similar ao sinal da PMT, o gerador de sinal foi configurado para gerar pulsos de $10ns$ de largura à meia altura e $5ns$ em cada borda (valores estes que representam os limites inferiores do gerador de sinais utilizado). A saída do gerador foi conectada à entrada do *Front-end* que, por fim, foi conectada ao osciloscópio. Para cada configuração do divisor de tensão foi

adquirido um novo banco de dados com vários conjuntos de medidas. À cada conjunto de medidas, o pico do sinal de entrada era variado em valores múltiplos de $12mV$. Foram realizadas 2000 aquisições para cada um dos conjuntos de medidas. Também foi construído um banco de dados similar com a saída do gerador de sinais conectada diretamente ao osciloscópio. A Figura 4.29 mostra a média de sinais gerados pelo gerador com picos de $12mV$ sobreposto ao sinal médio da saída da PMT quando alimentada por uma alta-tensão $1510V$, em resposta à um único fotoelétron. O objetivo destas medidas é propor um cenário no qual o comportamento da PMT é linear com relação ao número de fotoelétrons excitados pela incidência simultânea de fótons em seu catodo. No cenário proposto, o valor de amplitude e de carga do sinal da PMT em resposta à N fotoelétrons será correspondente ao valor da amplitude e da carga em resposta à um único fotoelétron multiplicado por N .

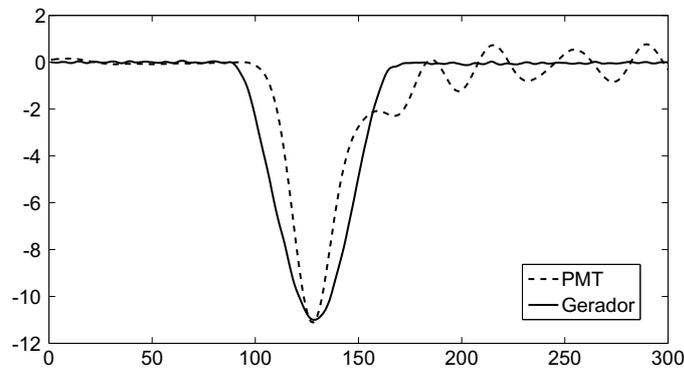


Figura 4.29: Forma de onda média obtida pelo gerador de sinal.

Antes de prosseguir com os estudos acerca da linearidade do dispositivo, é importante comprovar se o método utilizado está coerente. A alternativa escolhida para comprovação da validade do método foi comparar as respostas do circuito para os dois casos: real (em resposta à PMT); e simulado (em resposta ao gerador de sinais). Se as formas de onda na saída do circuito em resposta às duas diferentes entradas forem idênticas, isto indica que o sistema tem comportamento similar para ambas as entradas.

Uma medida simples para comparação de sinais é a correlação. Esta, pode ser obtida da seguinte forma:

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{E_y E_x}} \int_{-\text{inf}}^{+\text{inf}} y(t)x(t) dt, \quad (4.7)$$

onde $y(t)$ e $x(t)$ são os sinais a serem comparados e E_y e E_x são os valores de energia dos respectivos sinais, que neste caso são dados por:

$$E_x = \int_{-\text{inf}}^{+\text{inf}} [x(t)]^2 dt. \quad (4.8)$$

O parâmetro ρ é a medida de similaridade entre os dois sinais analisados. Seus valores estão compreendidos no intervalo: $-1 \leq \rho \leq 1$. Quando $\rho = 1$, acontece a máxima similaridade entre os sinais analisados. Em outras palavras, se $\rho = 1$ então $y(t) = s(t)$.

No caso de sistemas discretos, as equações 4.7 e 4.8 sofrem as seguintes transformações:

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{E_y E_x}} \sum_{n=1}^N y[n]x[n], \quad (4.9)$$

$$E_x = \sum_{n=1}^N (x[n])^2. \quad (4.10)$$

A Figura 4.29 mostra as formas de onda médias para a saída do *Front-end*, cuja entrada são os sinais da PMT em resposta a um único fotoelétron, correspondente à cada um dos divisores de tensão propostos. A Figura 4.31 mostra a distribuição de ρ para cada forma de onda mostrada na Figura 4.29 comparada com cada sinal de um banco de dados que contém os dados dos três divisores de tensão. Os picos dos sinais deste banco de dados estão compreendidos no intervalo de tempo $-8ns \leq t_o \leq 8ns$, que corresponde a um deslocamento de duas amostras para a esquerda, ou para a direita, com relação a amostra central onde ocorrem a maioria dos picos. Como este deslocamento é relativamente pequeno, se comparado à duração do sinal, o cálculo de ρ foi feito sem se preocupar com o alinhamento dos sinais. O objetivo é mostrar que qualquer uma das três formas de onda representa os sinais do banco de dados da mesma forma. Sendo assim, qualquer uma das três formas de onda média pode ser tomada como padrão para sequência do estudo.

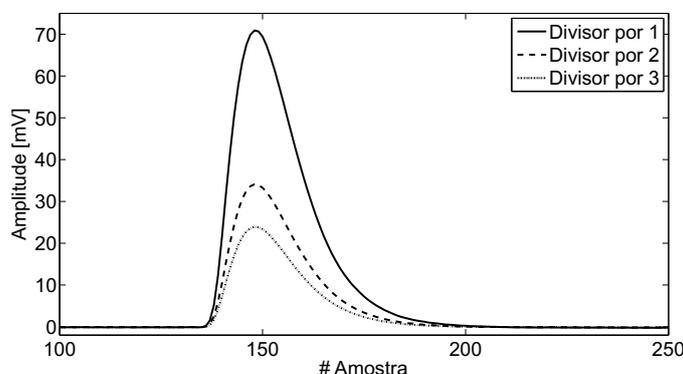


Figura 4.30: Formas de onda média da saída do *Front-end* em resposta à PMT referente ao único fotoelétron, para cada divisor de tensão.

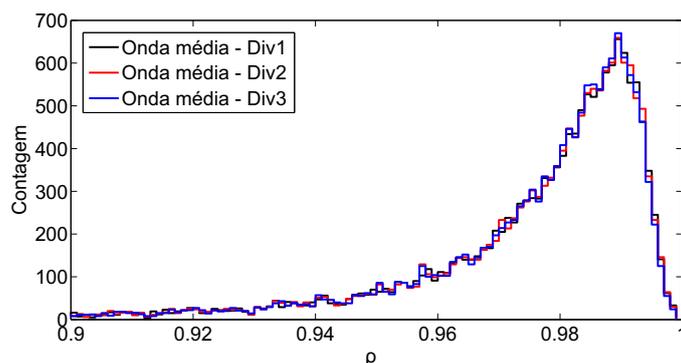


Figura 4.31: Distribuição da correlação dos sinais médios comparados com todos os sinais do banco de dados dos três divisores de tensão em resposta à PMT.

De maneira arbitrária, a forma de onda correspondente ao Div1 (vide Figura 4.30) foi escolhida como referência para obtenção de um modelo que descreva o sinal de saída do sistema. Foram testados alguns modelos baseados em somatório de 5 a 9 funções gaussianas. A métrica utilizada para medir o desempenho do modelo foi a média das correlações (ρ) de cada modelo comparado à cada sinal do banco de dados total, contendo apenas sinais em resposta à PMT devido ao único fotoelétron. A Figura 4.32 representa o resultado do desempenho de cada modelo onde é possível perceber que o melhor desempenho obtido foi para um somatório de 6 gaussianas. A equação 4.11 representa o modelo escolhido cujos respectivos parâmetros estão relacionados na Tabela 4.3. A figura 4.33 mostra o modelo sobreposto à forma de onda média referente ao divisor de tensão Div1.

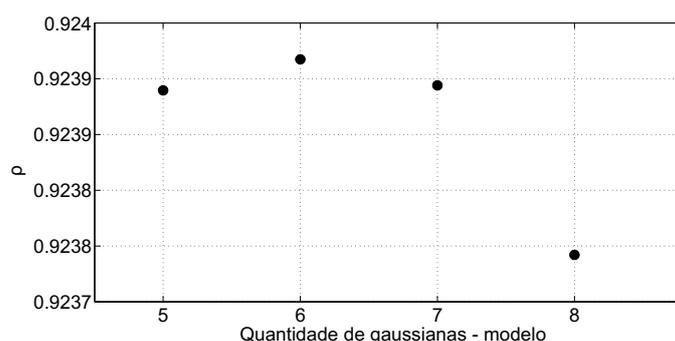


Figura 4.32: Desempenho dos modelos - média de ρ dos modelos comparados com todos os sinais do banco de dados dos três divisores de tensão em resposta à PMT.

$$\begin{aligned}
 f(t) = & a1.e^{-((t-b1)/c1)^2} + a2.e^{-((t-b2)/c2)^2} + \\
 & a3.e^{-((t-b3)/c3)^2} + a4.e^{-((t-b4)/c4)^2} + \\
 & a5.e^{-((t-b5)/c5)^2} + a6.e^{-((t-b6)/c6)^2}
 \end{aligned}
 \tag{4.11}$$

Tabela 4.3: Parâmetros do modelo de representação da forma de onda na saída do *Front-end* (Div1).

Parâmetro	Valor
a1	0.04661
b1	146.6
c1	4.732
a2	0.04877
b2	153.1
c2	6.385
a3	0.02197
b3	142.3
c3	3.293
a4	0.007114
b4	164
c4	7.391
a5	0.009653
b5	166.7
c5	14.34
a6	0.008325
b6	161.1
c6	4.481

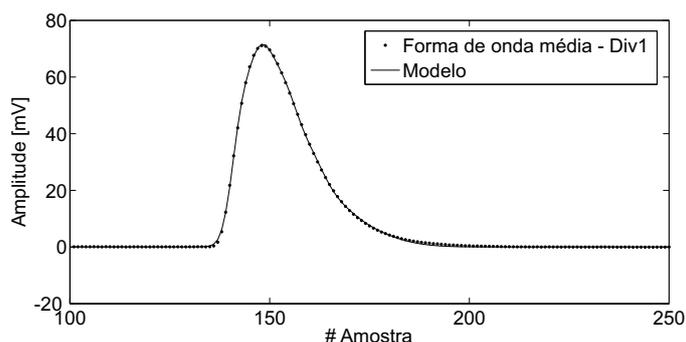


Figura 4.33: Forma de onda do modelo da saída do *Front-end* sobreposto à forma de onda média referente ao divisor de tensão Div1.

Definido o modelo que representa o sinal ideal na saída do circuito, o próximo passo foi medir a similaridade entre ele e as formas de onda médias para a saída do *Front-end* em resposta ao gerador de sinais. Os dados analisados foram os mesmos do banco de dados utilizado para o estudo de linearidade.

Uma restrição para utilização da métrica proposta é que os sinais em comparação devem estar sincronizados. O banco de dados utilizado tem um período de amostragem de $1.6ns$. A sincronização dos sinais foi feita variando a amostragem do modelo em passos de $200ps$, tomando como referência o ponto onde o modelo assume seu máximo valor (pico). Este movimento foi realizado ao redor do pico do sinal a ser comparado. Para cada passo, foi calculada uma correlação e armazenada num vetor. O comportamento deste vetor é similar ao de uma parábola cuja concavidade é voltada para baixo. Assim, foi considerado em sincronia a medida de máximo valor dentro de cada vetor. Foi realizado um vetor de correlação para cada pico médio de sinal de saída do *Front-end*, para cada divisor de tensão proposto. Todos os resultados são mostrados na Figura 4.34.

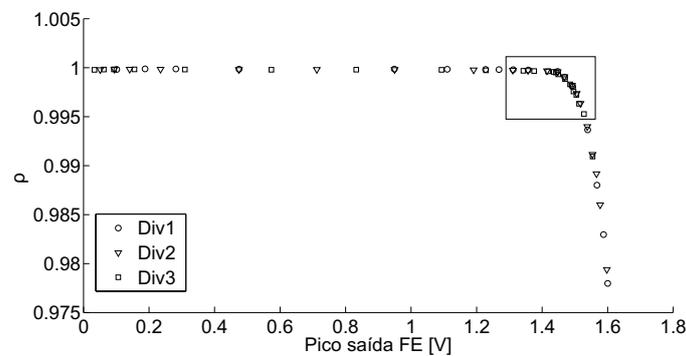


Figura 4.34: Correlação versus pico na saída do *Front-end*.

Na Figura 4.34 é possível perceber que os valores de ρ ao longo da excursão do sinal estão próximos de 1. Como mostrado anteriormente, $\rho = 1$ implica na condição de máxima semelhança. Como o modelo utilizado foi extraído dos sinais do *Front-end* em resposta à PMT (sinais reais), os resultados obtidos e mostrados na Figura 4.34 indicam que a metodologia utilizada está coerente, pois há similaridade entre as respostas do circuito ao sinal simulado e ao sinal real. Em outros termos, os resultados obtidos a partir da comparação dos sinais na saída do circuito em resposta à duas entradas distintas, indicam que a resposta do circuito é similar para ambas as entradas. Com esta constatação, outros resultados importantes puderam ser obtidos através do método proposto. Estes resultados serão mostrados a seguir.

Existem algumas técnicas de filtragem e processamento digital que utilizam como base a forma de onda do sinal ((ALVARENGA *et al.*, 2014)). Para possibilitar a implementação destas técnicas é importante que a forma de onda apresente um comportamento linear ao longo de sua excursão. O procedimento básico realizado neste tipo de processamento parte do conhecimento prévio do sinal analisado, onde uma forma de onda ideal (modelo) é comparada com as diversas informações que transitam pelo sistema. O objetivo é detectar o sinal

de interesse e separá-lo dos demais através de medidas de similaridade entre o modelo ideal e os sinais reais.

Afim de identificar e estabelecer os limites de linearidade do sinal, o gráfico da Figura 4.34 sofrerá uma divisão prévia em três regiões. Observe o retângulo em destaque no canto superior direito da figura. A faixa à esquerda do retângulo, será chamada de região linear. A faixa abaixo do retângulo, região de saturação. E a área dentro do retângulo, região crítica, mostrada em detalhes pela Figura 4.35.

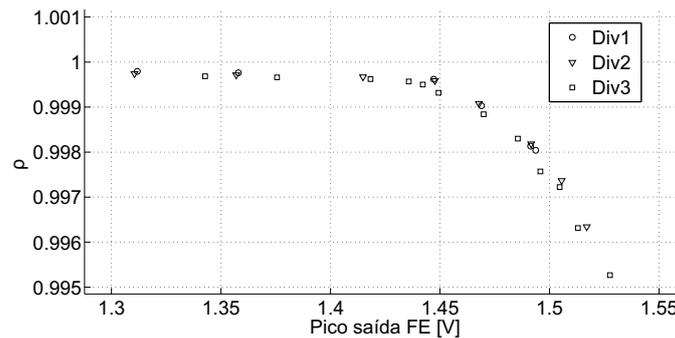


Figura 4.35: Correlação versus pico na saída do *Front-end* - Região Crítica.

Num sistema onde o índice de similaridade é alto, como no caso do sistema em estudo, onde os valores de ρ estão todos próximos de 1, estabelecer um limite que divida esta métrica entre bom e ruim pode não ser uma tarefa trivial. Um ρ igual a 0.98 pode ser considerado excelente para um determinado sistema, e ruim para outro, por exemplo. Por isso, uma análise apenas quantitativa pode não ser suficiente para extrair informações consistentes acerca do comportamento da forma de onda do sinal.

A Figura 4.36 exhibe as médias dos sinais do banco de dados utilizado na análise de linearidade, normalizadas pelas suas respectivas tensões de pico. Comparando as Figuras 4.36, 4.33 e fig5.3.7 é possível observar e identificar qualitativamente os sinais que sofreram deformação.

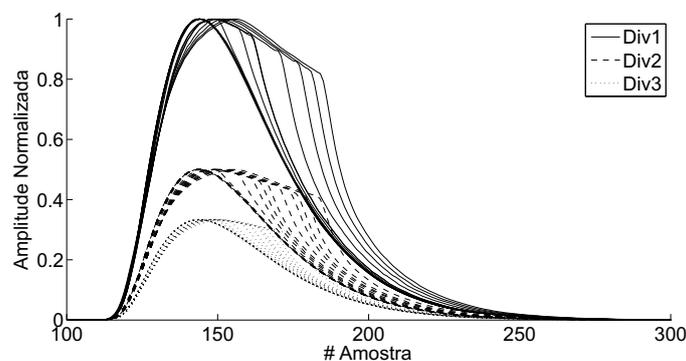


Figura 4.36: Efeito da saturação na forma de onda - saída FE.

As Figuras 4.37, 4.38 e 4.39 trazem as imagens aproximadas dos picos das formas de onda normalizadas pelas suas respectivas amplitudes dentro da região crítica, além do modelo padrão, para os três divisores de tensão, respectivamente (Div1, Div2 e Div3). As informações trazidas em suas legendas se referem as tensões médias de pico dos respectivos sinais representados. Observe pela Figura 4.36 que a maior deformação acontece na parte superior da onda, devido ao efeito da saturação. É importante perceber que os sinais sem deformação estão praticamente sobrepostos na figura e que são idênticos ao da Figura 4.33, o qual representa o modelo padrão utilizado no estudo. O objetivo desta análise é tentar identificar visualmente quando a deformação começa a acontecer. Em cada uma das três figuras foi destacada uma forma de onda em linha vermelha contínua. Estas são as prováveis primeiras ondas distorcidas dentro da região crítica.

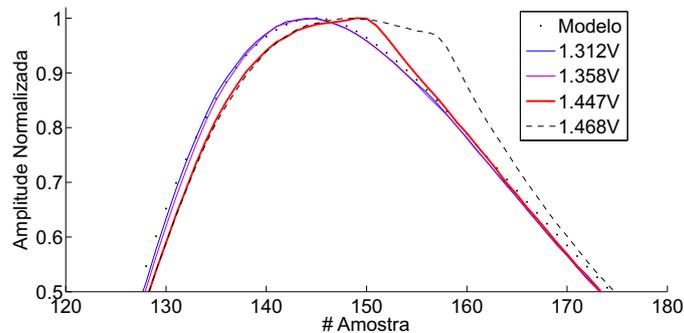


Figura 4.37: Efeito da saturação na forma de onda na saída do *Front-end* - Div1.

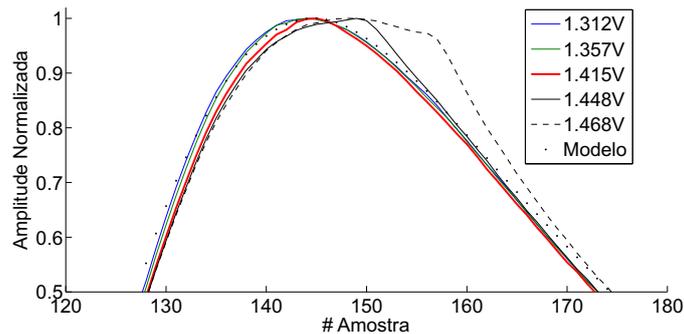


Figura 4.38: Efeito da saturação na forma de onda na saída do *Front-end* - Div2.

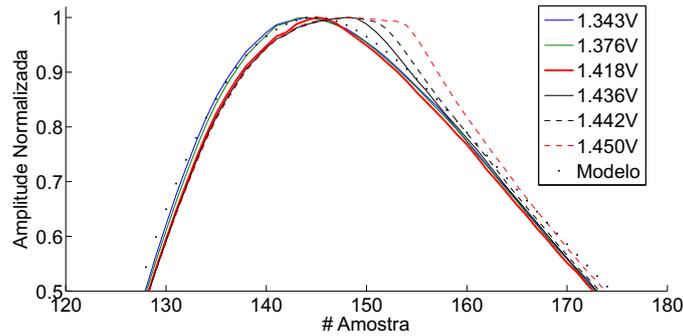


Figura 4.39: Efeito da saturação na forma de onda na saída do *Front-end* - Div3.

A tensão de pico para a primeira onda distorcida identificada do Div1 é de $1.447V$. A do Div2 é de $1.415V$ e a do Div3 é de $1.418V$. Nestes dois últimos casos a deformação é leve se comparada com a distorção do primeiro caso ($1.447V$). Perceba que levando estes valores para a Figura 4.35 é possível identificar suas respectivas amostras. As amostras do Div2 e do Div3 são os primeiros triângulo e quadrado à direita do marcador em $1.4V$. A amostra referente ao Div1 é o primeiro círculo à direita do marcador em $1.45V$, levando à um ρ cujo valor é bastante próximo de 0.999 . Note que os valores de ρ referentes ao triângulo e ao quadrado também levam a valores de ρ maiores do que 0.999 . Porém, qualitativamente é possível perceber que estes sinais sofrem deformação por influencia do processo de saturação do dispositivo. Com isso, é razoável estabelecer a tensão de $1.4V$ como o limite superior da excursão do sinal sem que hajam distorções relevantes em sua forma de onda.

Além da forma de onda, é importante analisar o comportamento de outros parâmetros do circuito, os quais são extremamente relevantes para o experimento.

A Figura 4.40 exhibe o comportamento da carga na saída do circuito em relação à carga na entrada para os 3 cenários propostos: Div1 - sem divisor de tensão; Div2 - divisão da tensão de entrada por 2 e Div3 - divisão da tensão de entrada por 3. As retas representam a aproximação da região linear (região abaixo da reta horizontal em torno de $5000pC$) pelo seguinte modelo:

$$C_{out}(C_{in}) = A.C_{in} + B, \quad (4.12)$$

onde C_{out} representa a carga na saída do *Front-end*, C_{in} a carga na entrada, A e B os parâmetros do modelo cujos resultados obtidos pela aproximação são exibidos na Tabela 4.4.

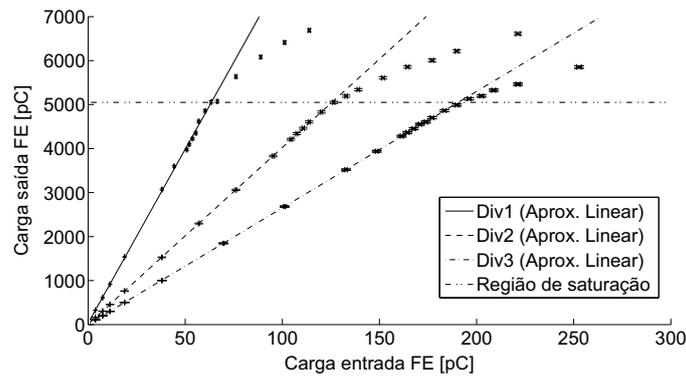


Figura 4.40: Carga na entrada versus carga na saída do *Front-end* - aproximação linear e indicação da região de saturação.

Tabela 4.4: Parâmetros da aproximação pela reta (carga na saída versus carga na entrada).

Cenário	A	B
Div1	79.08 ± 1.54	31.15 ± 73.00
Div2	40.18 ± 0.20	7.45 ± 16.43
Div3	26.48 ± 0.10	3.96 ± 12.70

Outra métrica utilizada neste trabalho para estudo da linearidade é a relação entre a carga e o pico na saída do *Front-end*. Pela Figura 4.41 é possível perceber que as duas grandezas possuem uma relação linear dentro de uma determinada faixa. Este comportamento é comprometido a partir de tensões de pico maiores que $1.46V$ e/ou a partir de cargas com mais do que $4630pC$.

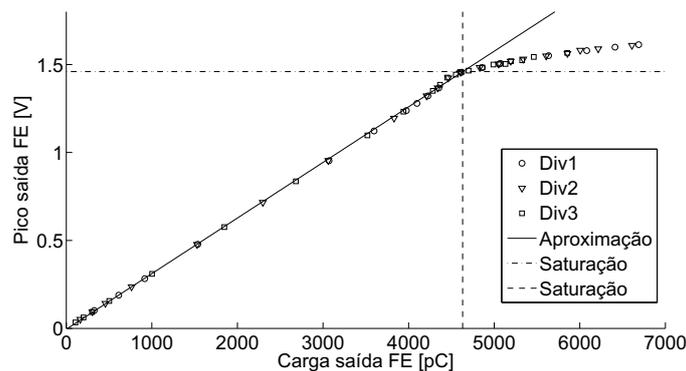


Figura 4.41: Carga na saída versus pico na saída do FE.

O estudo da linearidade para o cenário proposto se fecha com a análise do comportamento entre as tensões de pico na saída e os valores de carga na entrada do FE, mostrado na Figura 4.42. Este resultado indica que é possível

estimar a carga do sinal de entrada a partir do valor de tensão de pico do sinal de saída do *Front-end*. As retas mostradas na figura foram obtidas através da aproximação das medidas pelo modelo (equação 4.12) e seus respectivos parâmetros estão relacionados na Tabela 4.5.

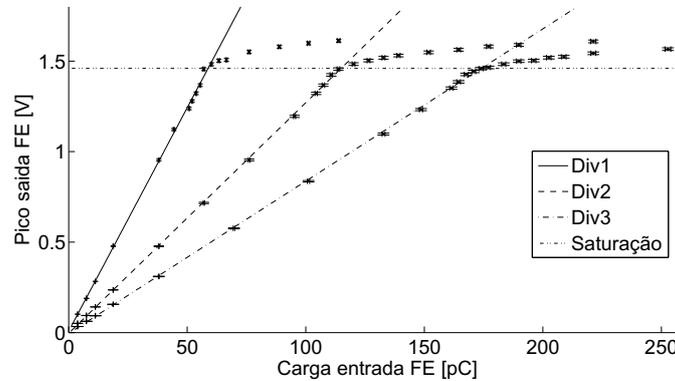


Figura 4.42: Pico na saída versus carga na entrada do FE.

Tabela 4.5: Parâmetros da aproximação pela reta (pico na saída versus carga na entrada).

Cenário	A	B
Div1	$24.69e^{-3} \pm 6.60e^{-7}$	$8.24e^{-3} \pm 18.88e^{-3}$
Div2	$12.74e^{-3} \pm 1.40e^{-7}$	$-36.93e^{-3} \pm 10.80e^{-3}$
Div3	$8.42e^{-3} \pm 8.80e^{-8}$	$-4.72e^{-3} \pm 10.50e^{-3}$

As medidas de pico na saída do FE e de carga na entrada, no cenário proposto, foram normalizadas pelo valor médio de pico da saída do *Front-end* em resposta à PMT e pela carga média da PMT, ambos para um único fotoelétron, com a PMT alimentada pela alta-tensão fornecida pela Hamamatsu. O resultado deste processo é mostrado na Figura 4.43. Esta medida representa a capacidade de excursão do dispositivo em número de fotoelétrons para cada um dos três tipos de configurações do divisor de tensão, num cenário em que não existe atraso entre os eventos. Para o primeiro caso (Div1 - sem divisor de tensão) o alcance do *Front-end* é de aproximadamente 22 fotoelétrons, para o segundo (Div2) 43 e no terceiro (Div3) 63.

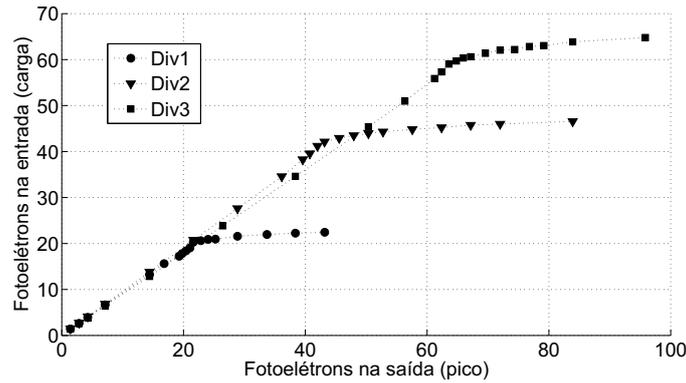


Figura 4.43: Pico na saída versus carga na entrada do FE em número de fotoelétrons.

4.3.1 Características gerais do módulo *Front-end*.

Para mostrar as características gerais de uma das placa da versão final do circuito de *Front-end* do projeto Neutrinos angra, todos os canais da placa de número de série 1 foram configurados identicamente ao esquemático mostrado na Figura 4.23, com o divisor de tensão configurado identicamente ao Div3. A Figura 4.45 mostra os valores de pico na saída do circuito em função dos valores de pico na entrada, para um banco de sinais gerados pelo gerador de sinais, onde é possível observar, pelas curvas, o grau de similaridade entre os canais da placa. A Figura 4.45 mostra o alcance da excursão do circuito em número de fotoelétrons. O eixo horizontal representa a carga na entrada do circuito convertida para número de fotoelétrons. O eixo horizontal, representa a tensão de pico na saída do sinal, convertida para número de fotoelétrons. Os pontos representam as médias das medidas do banco de dados gerado pelo gerador de sinais. O ganho médio global de todos os canais deste circuito é de $13.17 \pm 5.84e^{-2}mV/fotoel\acute{e}tron$. O dispositivo satura em $1.4V$ de tensão na saída, como mostrado anteriormente.

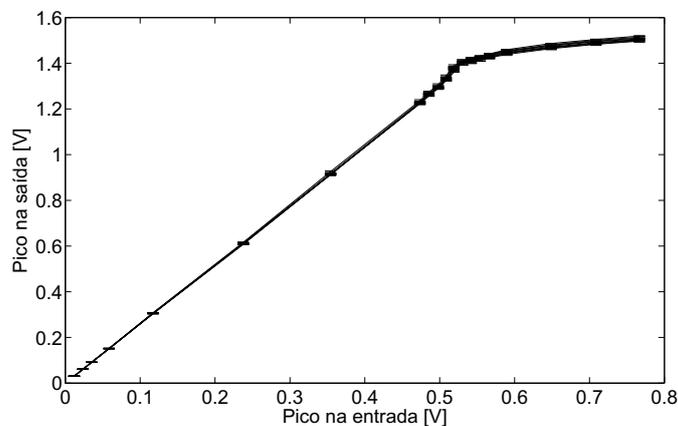


Figura 4.44: Pico na saída versus pico na entrada do *Front-end* 1.

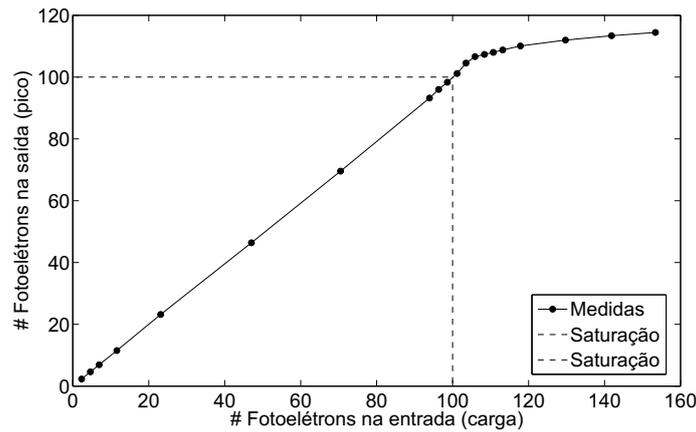


Figura 4.45: Pico na saída versus carga na entrada do FE em número de fotoelétrons e região de saturação.

A figura 4.46 mostra a resposta em frequências de todos os canais do circuito de *Front-end* número de série 1. Pela figura é possível observar a banda de passagem do circuito que vai de 80KHz à 3MHz .

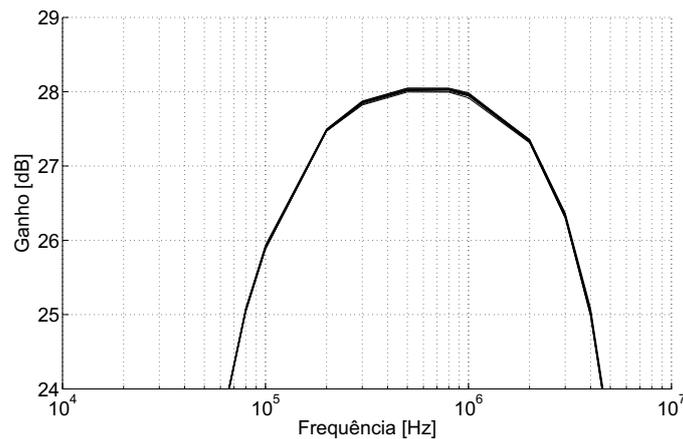


Figura 4.46: Resposta em frequência de todos os canais do *Front-end* 1 - versão definitiva.

A matriz de correlação do ruído do canal 5 do *Front-end* 1 é mostrada pela Figura 4.47. A Figura 4.48 traz a diagonal da matriz de correlação de todos os canais da placa 1. O espectro de energia do ruído, obtido a partir da Transformada de Fourier da diagonal da matriz de correlação é exibido pela Figura 4.48. Pelas Figuras 4.48, 4.49 e 4.50 é possível perceber que os canais do *Front-end* 1 são idênticos quanto ao ruído. O que é uma característica desejada para todos os circuitos de *Front-end* que irão compor a eletrônica de leitura do detector do projeto Neutrinos Angra.

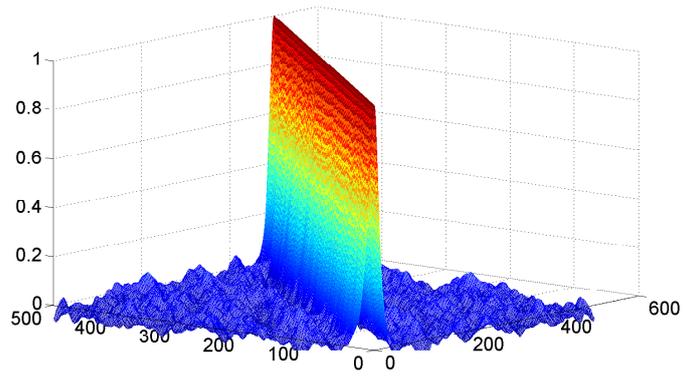


Figura 4.47: Matriz de correlação do ruído do canal 5 do *Front-end* 1 - versão definitiva.

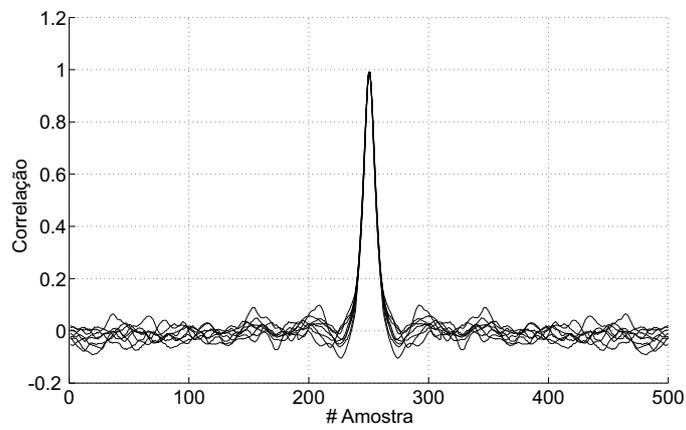


Figura 4.48: Diagonal das matrizes de correlação de todos os canais do *Front-end* 1 - versão definitiva.

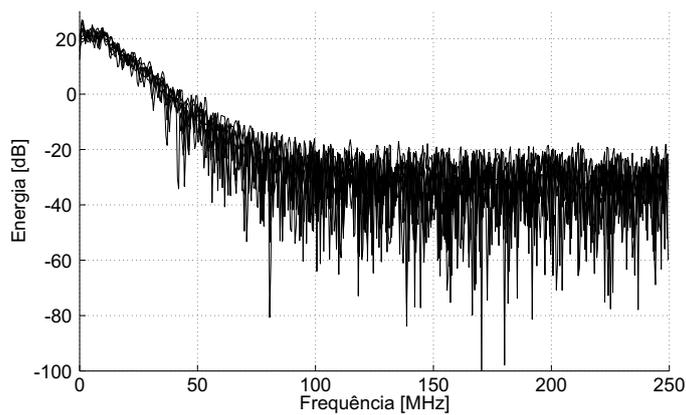


Figura 4.49: Espectro de energia do ruído de todos os canais do *Front-end* 1 - versão definitiva.

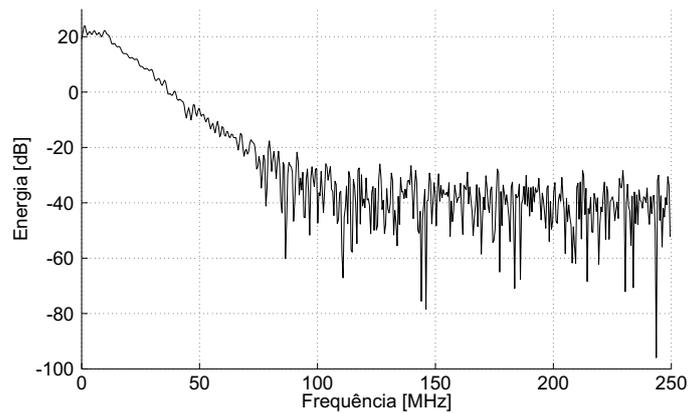


Figura 4.50: Média do espectro de energia do ruído de todos os canais do *Front-end* 1 - versão definitiva.

A Figura 4.51 exibe o histograma de todas as amostras das aquisições de ruído de todos os canais do *Front-end* 1, onde também é possível perceber que todos os canais são idênticos quanto ao ruído. Além disso, pela figura é possível observar que o ruído de fundo do *Front-end* tem uma distribuição gaussiana. Os parâmetros em destaque na legenda, são referentes à aproximação da distribuição dos dados por uma função gaussiana.

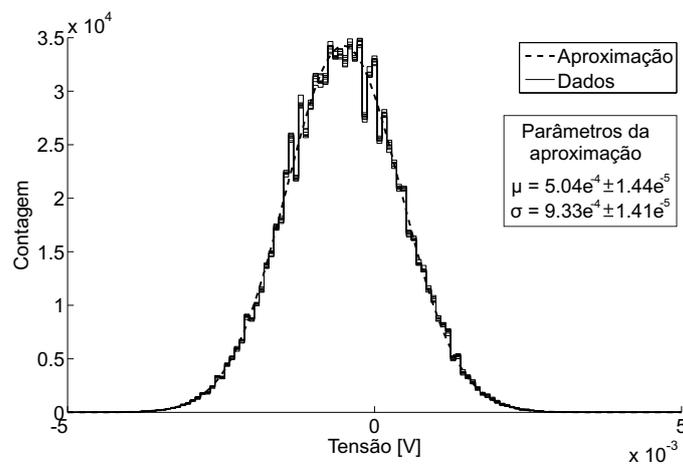


Figura 4.51: Distribuição de todas as amostras das aquisições de ruído de todos os canais do *Front-end* 1 - versão definitiva.

4.4 Caracterização do Módulo de Aquisição de dados (NDAQ)

O módulo NDAQ possui 8 canais de conversão analógico-digital implementado através de um ADC (do inglês - *Analog-to-Digital Converter*) de 12-bit capaz de amostrar o sinal de entrada à uma taxa de 125MHz . Este *chip* foi escolhido

devido a, menor susceptibilidade à problemas como interferências eletromagnéticas e *crosstalk*, baixo consumo de energia e pela tecnologia CMOS. Com com 10 bits de resolução e *range* de $2V_{pp}$, *steps* de tensões em torno de $2mV$ são alcançados. O sinal de entrada é amostrado e convertido em instantes periódicos, igual a um ciclo da frequência do *clock* do ADC. A Figura (4.52) ilustra um dos canais desta estrutura que, além dos ADCs, é composta por TDCs (do inglês: *Time-to-Digital Converter*) e por núcleos FPGA (do inglês: *Field Programmable Gate Array*).

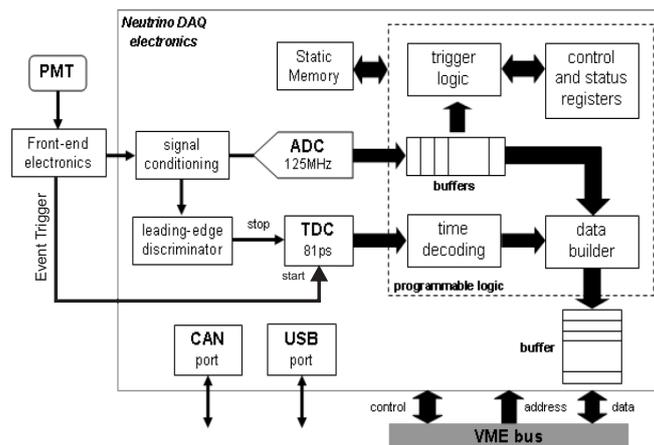


Figura 4.52: Blocos de processamentos básicos de 1 canal do NDAQ - (do inglês: *Neutrinos Angra Data Acquisition*).

Note que, depois do circuito de *Front-end*, dois sinais são enviados através de dois caminhos distintos para o NDAQ. Por meio de cabos coaxiais um caminho transmite o sinal da PMT processado de forma analógica pelo front-end para o canal de conversão analógico-digital do módulo de aquisição de dados. O segundo ramo leva o pulso gerado pelo discriminador que irá fornecer a medida de tempo de chegada do pulso através do TDC.

Todo o sistema de aquisição e de controle será conectado à um único computador de bordo via ethernet, de modo que, qualquer módulo possa ser acessado remotamente como uma máquina de IP diferente na rede. Todas as operações no hardware de aquisição de dados serão controladas por um conjunto de pequenas aplicações, principalmente em linguagem C. Todas essas aplicações serão executadas sob o controle de uma estrutura de software de alto nível executada no servidor do experimento.

A amostra digitalizada é entregue a um Field Programmable Gate Array (FPGA), com latência de 5 ciclos de clock, o que significa 40 ns depois. Este atraso não impõe qualquer limitação ao fluxo de aquisição de dados, pois os dados serão armazenados de forma contínua por buffers internos dentro do FPGA,

e, finalmente, em FIFOs externas (First-In-First-Out) memórias. Uma flexibilidade implementado no hardware design permite o uso de quatro canais ADC amostragem com o dobro da frequência, isto é, 250 MHz. Esta característica pode ser configurado em laboratório através da montagem 0 resistências nas posições indicadas por SW1, SW2, SW3 e SW4 na Figura 6, a configuração e distribuição de um chip de relógio para ajustar a fase de dois sinais de relógio a 180°. Neste modo de operação, apenas as entradas AIN1, AIN2, AIN5 e AIN6 são usados.

Foram confeccionados para o experimento algumas placas de circuito NDAQ. Estas, assim como as placas do circuito de Front-end, receberam uma numeração de série. Arbitrariamente, o dispositivo NDAQ escolhido para caracterização foi o de número de série *SN20*.

Para calibração do dispositivo, foram injetados pulsos de $40mV$ de pico, $150ns$ de largura à meia altura e tempos de subida e de descida iguais à $90ns$. O objetivo deste ensaio foi verificar se a resolução vertical (tempo) e horizontal (tensão) estão de acordo com o que foi especificado. Foram feitas 1000 aquisições destes pulsos em cada canal do NDAQ. A Tabela 4.6 traz alguns resultados obtidos através da análise destas aquisições.

A conversão dos dados discretizados para as unidades de tensão e tempo foram feitas a partir das resoluções especificadas ($2mV$ e $8ns$, respectivamente). Não foram feitas aquisições dos pulsos de entrada através de nenhum outro dispositivo. Assim, as variações entre os valores obtidos pela análise das aquisições no NDAQ e os valores configurados no gerador de sinais, podem ser atribuídas à imprecisão do gerador. Com isso, é possível verificar, pelos resultados mostrados na Tabela 4.6 que ambas as resoluções do dispositivo testado estão de acordo com os valores especificados. Outro resultado mostrado na Tabela 4.6 é o valor do desvio padrão das médias das medidas realizadas em cada canal do NDAQ testado. Através deste resultado é possível ter uma noção da diferença entre os canais do mesmo dispositivo.

Tabela 4.6: Calibração do NDAQ.

	Pico [mV]	Largura á meia altura [ns]	Offset [mV]
Média - todos os canais	$38.32 \pm 1.88e^{-2}$	$153.65 \pm 8.28e^{-2}$	$2.83 \pm 2.33e^{-2}$
Desvio padrão - todos os canais	$6.34e^{-1}$	7.00	$3.16e^{-1}$

Afim de medir o comportamento da forma de onda com o *Front-end* acoplado

ao NDAQ, novamente foi utilizado o parâmetro ρ . Novamente foram realizadas 1000 aquisições de dados para cada canal do NDAQ, porém com o *Front-end* conectado. Na entrada do *Front-end* foram injetados pulsos gerados pelo gerador de sinais com $8ns$ de largura à meia altura, $5ns$ de tempos de subida e de descida e $-6mV$ de pico. As formas de onda deste banco de dados foram comparadas com o modelo obtido na Sessão 4.3 (Figura 4.33). A Figura 4.53 mostra a distribuição de ρ para esta comparação. A Figura 4.53 também mostra a distribuição de ρ dos dados adquiridos em osciloscópio à uma taxa de amostragem de $625MS/s$ (Figura 4.31), que é maior do que a do NDAQ ($125MS/s$). Nesta dissertação não foi estabelecido um valor ideal para o parâmetro ρ . Porém, pela Figura 4.53 é possível perceber que a forma de onda na saída do NDAQ está sendo representada identicamente à forma de onda vista diretamente na saída do *Front-end*. Isto indica que o acoplamento *Front-end*/NDAQ funciona e não provoca distorções ou perdas no sinal. Esta constatação pode ficar mais clara através da observação da Figura 4.54 que traz um exemplo de forma de onda adquirida pelo NDAQ sobreposta ao modelo definido pela equação 4.11.

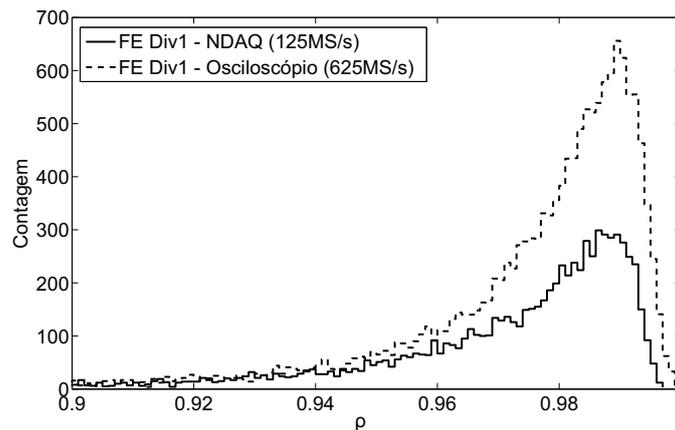


Figura 4.53: Distribuição de ρ para aquisições realizadas com o NDAQ a $125MS/s$ e com o osciloscópio a $625MS/s$.

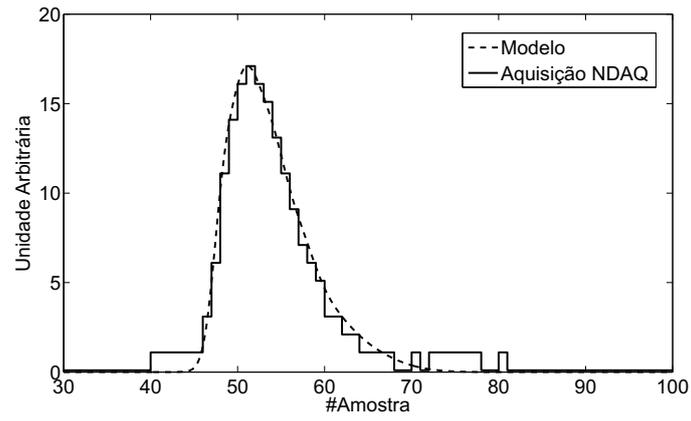


Figura 4.54: Forma de onda adquirida com o NDAQ a $125MS/s$ sobreposta ao modelo da forma de onda do *Front-end* (equação 4.11).

Capítulo 5

Teste da eletrônica de leitura e do detector alvo

em meados de 2014 a maioria dos dispositivos que compõem o detector de anti-neutrinos do Projeto Neutrinos-Angra já estavam disponíveis para utilização. Porém, o sistema ainda não havia sido testado integralmente. Aproveitando esta disponibilidade, o detector alvo foi montado no CBPF com algumas PMTs. A finalidade da montagem foi testar a integração dos principais componentes do sistema de aquisição, através da observação de múons.

Este capítulo descreve o sistema, caracteriza alguns dos seus componentes e mostra os resultados obtidos a partir das análises dos dados adquiridos.

5.1 Descrição do sistema de medidas

A Figura 5.10 representa o esquemático de ligação do sistema.

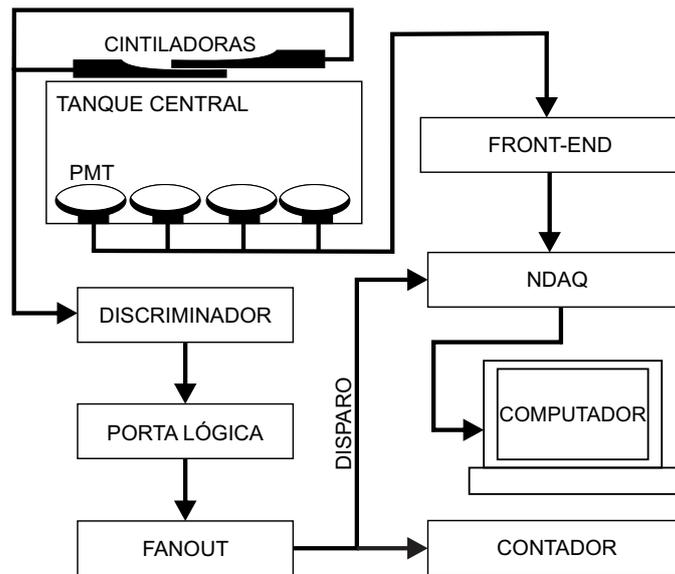


Figura 5.1: Esquemático de ligação do sistema de medidas CBPF.

O objetivo do sistema é realizar aquisições a partir da coincidência das duas pás cintiladoras. Quando a radiação cósmica (múons) atravessa o material cintilador das pás, a luminosidade gerada excita as pequenas PMTs que ficam acopladas na sua base. No sistema em voga, os sinais da saída da PMTs de cada pá são enviados para o discriminador, que, por sua vez, emite sinais lógicos "altos" quando as amplitudes dos sinais das PMTs ultrapassam uma tensão pré-estabelecida. Os sinais lógicos emitidos pelos canais do discriminador são enviados para a porta lógica. Para alcançar o objetivo desejado, a porta lógica foi configurada para gerar um sinal lógico alto somente quando os sinais na entrada da porta forem simultaneamente altos, ou seja, quando ocorrer coincidência entre as pás. A coincidência entre as pás ocorre quando um mesmo evento atravessa o material cintilador das duas. Assim, para isto acontecer, as duas pás devem ser colocadas de forma que o material cintilador de uma fique sobreposto ao da outra. Até este ponto, o padrão de sinal lógico utilizado é o NIM. A saída da porta lógica é enviada para um dispositivo *fanout* que converte a lógica NIM em TTL. Por fim, quando ocorre a coincidência entre as pás, um TTL alto é enviado para os módulos NDAQ, habilitando assim a aquisição dos sinais oriundo das PMTs localizadas no tanque, tratados pelos Front-end. Os dados adquiridos pelo NDAQ são enviados via USB para o computador. Um software específico faz o gerenciamento destes dados e os envia para armazenamento no disco rígido.

5.2 Memorial descritivo - montagem, material utilizado e conexões

Esta seção contém uma descrição detalhada do sistema de medidas com o detector alvo. O objetivo é deixar registrado todos os detalhes das conexões e da instrumentação utilizada para que seja possível a reprodução do sistema futuramente.

O sistema de medidas objeto de estudo deste capítulo fez uso de 16 PMTs Hamamatsu R5912. As PMTs foram afixadas em 4 trilhos contendo 4 PMT cada, como mostrado na Figura 5.2. Os 4 trilhos foram afixados na face interna inferior do tanque central do detector alvo. Todas as faces da parte interna do tanque foram revestidas por *tyvek* (*tyvek* é uma película reflexiva cuja reflexão é difusa, ou seja, a luz que incide em sua superfície é refletida em qualquer direção, independentemente o ângulo de incidência). A Figura 5.3 mostra as PMTs dispostas dentro do tanque e as paredes do tanque revestidas por *tyvek*. A disposição das PMTs dentro do tanque, de acordo com os seus respectivos números de série é mostrado na Figura 5.4.



Figura 5.2: Trilho para fixação das PMTs - Foto: Germano Pinto Guedes.



Figura 5.3: PMTs afixadas no face inferior, no interior do tanque central do detector alvo - Foto: Germano Pinto Guedes.

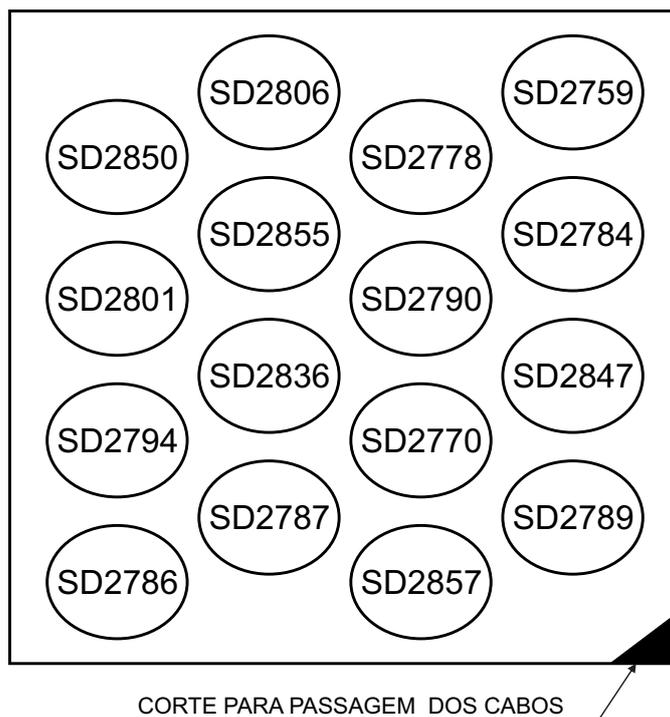


Figura 5.4: Disposição das PMTs no tanque central do detector alvo.

Após a instalação das PMTs, o volume do tanque foi inundado com cerca de 1370 litros de água triplamente filtrada. Um pequeno volume foi deixado vazio para que a água não tocasse a tampa improvisada de madeira na parte superior do tanque. A parte interna da tampa também foi revestida por *tyvek*. A Figura 5.5 representa um corte transversal do tanque após a montagem. Além da tampa de madeira, o tanque foi coberto por uma camada de material opaco, afim de impedir a entrada de luz, como mostrado na Figura 5.6. Os cabos das PMTs foram conduzidos até o interior da Sala de Equipamentos do Grupo Sistemas de Detecção, no pátio do CBPF, próximo de onde o tanque foi instalado.

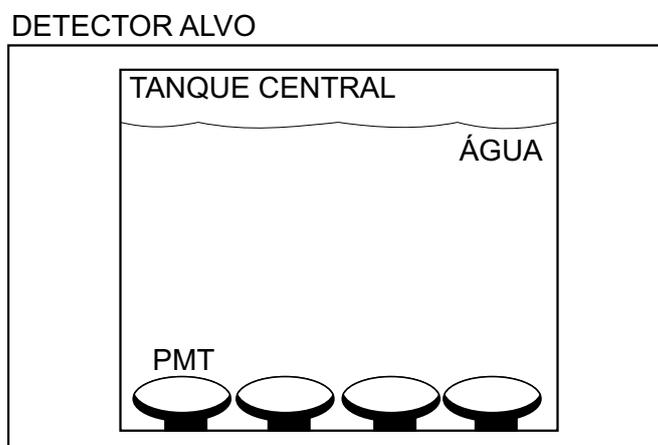


Figura 5.5: Esquemático do detector alvo.



Figura 5.6: Imagem do detector.

Além do tanque e das 16 PMTs, foram utilizados os seguintes itens:

- 01 - Fonte de alta-tensão CAEN modelo *SY4527* (Figura 5.7);
- 02 - Módulos *Front-end* (números de série 2 e 5);
- 02 - Módulos NDAQ (números de série *SN07* e *SN15*);
- 01 - Fonte de alta-tensão NIM modelo *N1470*;
- 01 - Discriminador NIM modelo 715 (Figura 5.8);
- 01 - Módulo de portas lógicas NIM modelo *365AL* (Figura 5.8);
- 01 - Módulo *Fan-out* VME CAEN modelo *V976*;
- 01 - Fonte de tensão DC Agilent modelo *E3648A*
- 02 - Pás cintiladoras com área ativa de $14cm \times 14cm$ (Figura 5.9);
- 01 - Contador NIM;
- 01 - Crate NIM;
- 01 - Crate VME;

- 01 - Microcomputador Pentium 4.



Figura 5.7: Fonte de alta-tensão utilizada.



Figura 5.8: Discriminador e porta lógica NIM.



Figura 5.9: Pás cintiladoras.

Para alimentar as PMTs, foi utilizado um módulo de alta-tensão positiva com 24 canais na fonte de alta-tensão CAEN. As conexões entre os cabos de alta-tensão das PMTs e os canais do módulo da fonte CAEN estão relacionadas na Tabela 5.1 onde as PMTs estão representadas pelos seus respectivos números de série. A fonte é controlada via computador, através de um navegador de internet qualquer. A conexão é feita através de rede *ethernet*. Um cabo de rede foi utilizado para conectar a fonte ao microcomputador. As alta-tensões de cada PMT foi configurada de acordo com a documentação fornecida pela Hamamatsu.

Tabela 5.1: Conexões entre as PMTs e os canais de alta-tensão da fonte CAEN.

Canal alta-tensão	PMT	Canal alta-tensão	PMT
0	SD2850	8	SD2759
1	SD2801	9	SD2784
2	SD2794	10	SD2847
3	SD2786	11	SD2789
4	SD2806	12	SD2778
5	SD2855	13	SD2790
6	SD2836	14	SD2770
7	SD2787	15	SD2857

A saída de sinal de cada PMT foi conectada à uma entrada de *Front-end*. A Tabela 5.2 relaciona as conexões entre as PMTs (representadas pelos seus respectivos números de série) e os canais de entrada dos módulos *Front-end*. Os dois módulos *Front-end* utilizados foram conectados no crate NIM que fornece a alimentação DC necessária (+6V e -6V) para o funcionamento dos dois dispositivos.

Tabela 5.2: Conexões entre as saídas das PMTs e os canais de entrada dos módulos *Front-end*.

Canal	Front-end (número de série 2)	Front-end (número de série 5)
1	SD2850	SD2759
2	SD2801	SD2784
3	SD2794	SD2847
4	SD2786	SD2789
5	SD2806	SD2778
6	SD2855	SD2790
7	SD2836	SD2770
8	SD2787	SD2857

As saídas dos Front-end foram conectadas às entradas dos NDAQs. A Tabela 5.3 relaciona as conexões entre os canais de saída dos módulos *Front-end* e os canais de entrada dos módulos NDAQ que estão representados pelos seus respectivos números de série (SN) e canais (Ch). Os NDAQs foram alimentados pela fonte de tensão DC da AGLENT, por uma tensão de 5V. O canal 1 da fonte AGLENT alimentou o NDAQ SN07 à uma corrente de 1.94A. O canal 2 alimentou o NDAQ SN15 à uma corrente de 1.95A.

Tabela 5.3: Conexões entre as saídas dos módulos *Front-end* e as entradas dos NDAQs.

Canal	Front-end (número de série 2)	Front-end (número de série 5)
1	SN15 - Ch1	SN07 - Ch1
2	SN15 - Ch2	SN07 - Ch2
3	SN15 - Ch3	SN07 - Ch3
4	SN15 - Ch4	SN07 - Ch4
5	SN15 - Ch5	SN07 - Ch5
6	SN15 - Ch6	SN07 - Ch6
7	SN15 - Ch7	SN07 - Ch7
8	SN15 - Ch8	SN07 - Ch8

Os dois módulos NDAQ foram conectados ao computador via cabo USB. No microcomputador utilizado foi instalado um software que gerencia e armazena os dados adquiridos pelos NDAQs.

As duas pás cintiladoras foram alimentadas pela fonte NIM de alta-tensão. As PMTs das pás requerem alta-tensão negativa. Por isso, a fonte NIM foi con-

figurada para alimentar as PMTs das pás corretamente (através de alta-tensão negativa).

As saídas das pás foram conectadas no conectores “IN” dos dois primeiros canais, de cima para baixo, do discriminador NIM. A tensão de disparo do discriminador foi configurada em $25mV$ e a largura de pulso configurada em $20ns$. Entre os conectores “delay” do mesmo canal, foram conectados cabos de $4ns$. O conector “OUT” do primeiro canal mais acima do discriminador foi conectado ao *Input(A)* do primeiro canal, de cima para baixo, da porta lógica NIM. Da mesma forma, o segundo canal “OUT” mais acima do discriminador foi conectado ao *Inputs(B)* do primeiro canal da porta lógica NIM. Na porta lógica NIM existem alguns pinos utilizados para configuração do dispositivo. A Tabela 5.4 relaciona a pinagem utilizada pelo sistema de medidas, onde:

- 0 - sem pino;
- 1 - com pino.

Tabela 5.4: Pinagem do canal utilizado da porta lógica NIM.

OFF	Pinagem	Coinclevel	Pinagem
A	0	1	0
B	0	2	1
C	1	3	0
D	1	4	0

A saída (*OUT*) da porta lógica NIM foi conectada no canal A0 na entrada (*IN*) do módulo Fanout VME e também no canal A da entrada do contador NIM.

E por fim, os canais A0 e A1 da saída do *Fanout* foram conectados ao *trigger* A dos NDAQs SN07 e SN15 respectivamente.

5.3 Caracterização e análise das aquisições

5.3.1 Pás cintiladoras

As pás cintiladoras são constituídas por três componentes: um cintilador plástico, uma guia de luz e uma PMT. A área ativa da pá é formada por um material que tem alta capacidade de converter a energia de partículas carregadas em luz visível, quando essas partículas atravessam este material. Esta luz é então conduzida até uma PMT, através de uma guia de luz, composta por um material

transparente, normalmente acrílico ou fibra ótica. As pás utilizadas no sistema de medidas aqui descrito, tem uma área ativa quadrada de 14cm de lado e 1cm de espessura, como mostrado na Figura 5.10 (BLASSE, 1994).

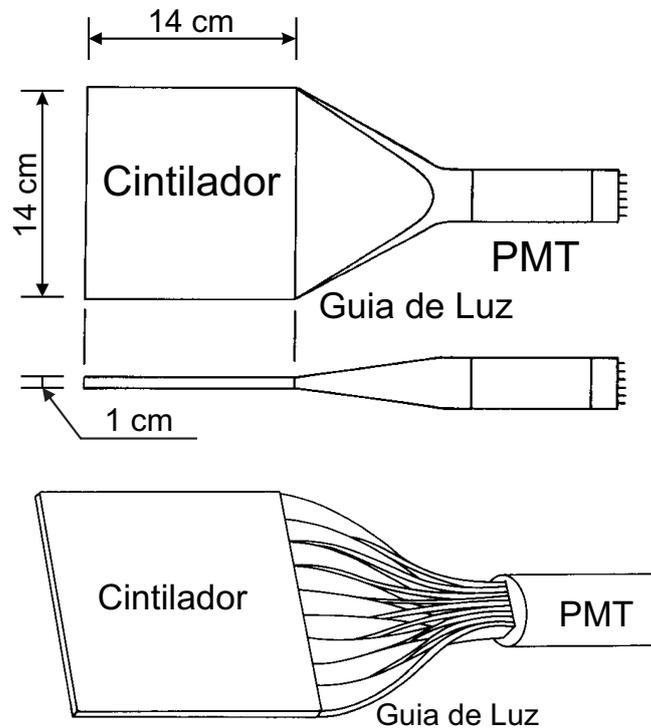


Figura 5.10: Pás cintiladoras.
Fonte: (FÜR PHYSIK)

Como descrito anteriormente, são as pás cintiladoras que habilitam a aquisição de dados. Para isso, é importante que as PMTs das pás estejam alimentadas por valores de alta tensão que proporcionem um comportamento estável. Para garantir esta estabilidade, foram feitas algumas medidas com ambas as pás. Com o auxílio do contador NIM e do discriminador NIM, foi levantada uma curva da contagem de eventos versus valor de alta tensão que alimenta a PMTs de cada pá. A medida foi feita da seguinte forma: a PMT da pá foi alimentada com um determinado valor de alta tensão. A parte quadrada da área ativa da pá foi posicionada horizontalmente para maximizar a exposição aos raios cósmicos (múons), que serão as partículas utilizadas para promover a excitação da PMT. Após o ajuste da alta tensão, o contador era disparado. Decorrido um determinado tempo (5 minutos, neste caso) o contador era pausado e a leitura realizada, convertida para taxa (Hz) e armazenada. Para cada valor de alta tensão, o contador NIM era zerado. A alta tensão era ajustada para outro valor e o processo repetido. A Figura 5.14 mostra a evolução das medidas. A escolha da alta tensão foi feita na região da curva onde a derivada da taxa em relação à alta tensão tende para zero (Platô). A alta tensão definida para alimentar as pás foi

de $-1500V$.

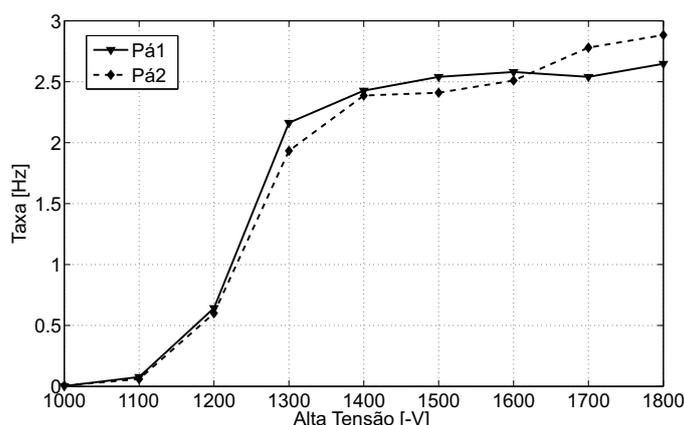


Figura 5.11: Curva da taxa de evento versus valor de alta tensão nas PMTs das pás cintiladoras (Platonagem).

5.3.2 *Front-end* e pré análise das medidas.

Os circuitos de *Front-end* utilizados no sistema foram os de número de série 2 e 5. Através de uma pré-análise de um banco de dados com 19168 aquisições realizadas com as 16 PMTs do tanque alvo, foi identificado um comportamento não esperado na saída dos circuitos de *Front-end* utilizados. A Figura 5.12, traz a distribuição dos picos do sinal de saída dos canais 1, 3, 6 e 8 do *Front-end* 2, cujos sinais de entrada são oriundos das PMTs mergulhadas no tanque alvo do detector. Os demais canais (2, 4, 5 e 7) seguem o mesmo comportamento dos canais destacados. Note que há uma preferência para tensões de pico em torno de $800mV$, como se os sinais estivessem saturando neste ponto. Porém, de acordo com o projeto, e como mostrado na Seção 4.3 do Capítulo 4 desta dissertação, a saída do circuito de *Front-end* satura em $1.4V$.

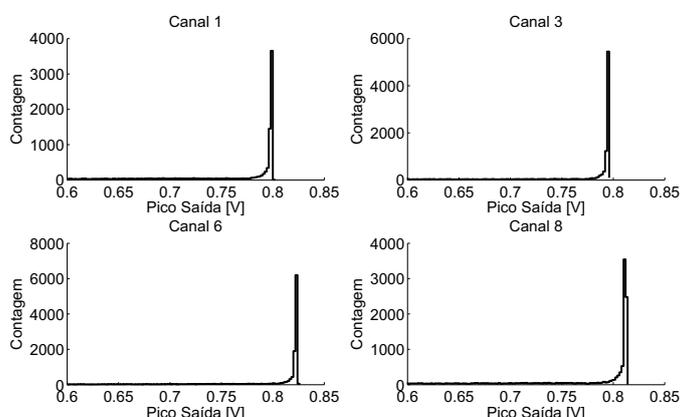


Figura 5.12: Distribuição dos valores de pico na saída do sinal das aquisições do detector alvo com o *Front-end* número 2.

Já no *Front-end* número 5 foram observados outros resultados inesperados. Além das diferenças vistas no *Front-end* 2, que também foram percebidas em alguns canais do *Front-end* 5, este ultimo apresentou comportamentos diferentes entres os próprios canais. A Figura 5.13 exhibe os valores de pico para a saída de alguns dos canais do *Front-end* 5, referentes ao mesmo banco de dados anteriormente citado. Note que neste circuito aparecem dois comportamentos diferentes que foram separados em duas classes: *A* e *B*. A classe *A*, é referente aos canais 1, 2 e 8 do *Front-end* 5. Também foram classificados como classe *A*, todos os canais do *Front-end* 2, devido a saturação em torno de $800mV$. A classe *B*, é referente aos canais 3, 4, 6 e 7 do *Front-end* 5, cujos limites da suposta saturação se encontra ao redor de $300mV$. O canal 5 do *Front-end* 5, que apresenta um nível de excursão maior, foi classificado como classe *A* devido a similaridade do seu comportamento abaixo dos $800mV$ com os outros canais de classe *A*.

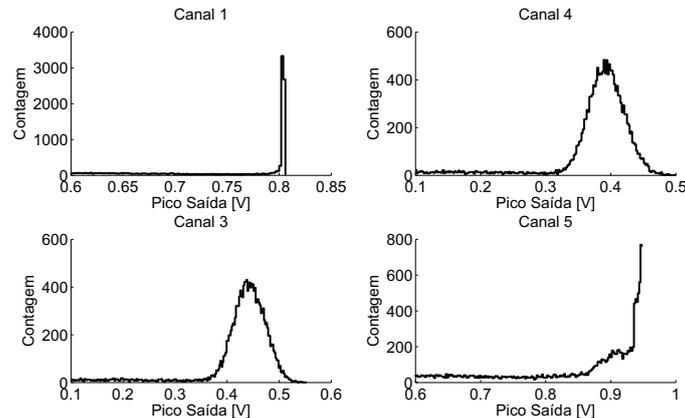


Figura 5.13: Distribuição dos valores de pico na saída do sinal das aquisições do detector alvo com o *Front-end* número 5.

Com a finalidade de investigar este comportamento, as duas placas foram levadas para laboratório e foram caracterizadas. A Figura 5.14 mostra a evolução do pico do sinal na saída de todos os canais do *Front-end* número 2 em função do pico do sinal de entrada, gerado pelo gerador de sinais. Também é possível visualizar na Figura 5.14 a mesma curva para um dos canais de uma versão do circuito de *Front-end* cujo comportamento está de acordo com a versão oficial do experimento. Comparando as duas curvas, pode-se perceber que os dois circuitos possuem, pelo menos, duas características diferentes: o ganho médio global, que pode ser aproximado pela inclinação da reta abaixo do limite de saturação ($1.4V$ na saída), e o comportamento depois da saturação (acima de $1.4V$ na saída).

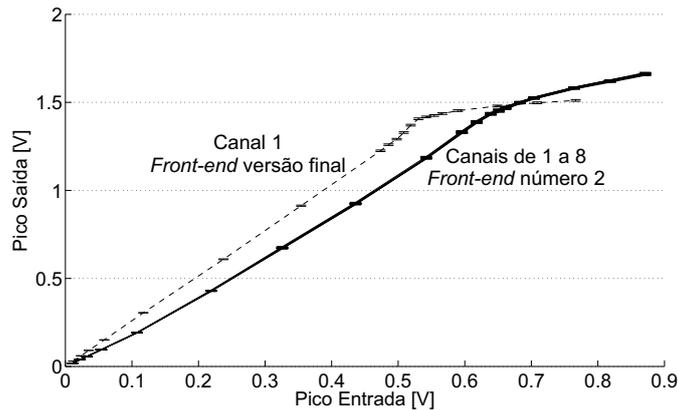


Figura 5.14: Pico na entrada versus pico na saída do *Front-end* número 2.

A Figura 5.15, representa a evolução da tensão de pico na saída em função da tensão de pico na entrada do *Front-end* 5, para sinais gerados pelo gerador de sinais. Como se pode ver, os canais 3, 4, 5 e 6 apresentam a saturação em níveis de tensão de pico bem menores do que os canais 1, 2 e 8, que mantêm o mesmo padrão do *Front-end* número 2.

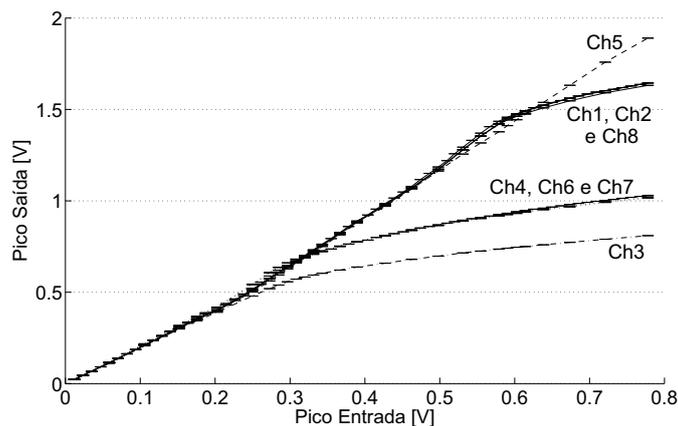


Figura 5.15: Pico na entrada versus pico na saída do *Front-end* número 5.

Comparando as Figuras 5.12 e 5.14, referentes ao *Front-end* 2, e as Figuras 5.13 e 5.15, referentes ao *Front-end* 5, é possível constatar que nenhum dos canais, dos dois circuitos alcançaram, de fato, suas respectivas tensões de saturação.

Outra análise foi feita a partir das formas de onda do mesmo banco de dados, formado pelas aquisições dos sinais das PMTs mergulhadas no tanque do detector alvo. Através do parâmetro ρ (correlação), as formas de onda deste banco de dados foram comparadas com o modelo obtido na Sessão 4.3 (Figura 4.33). Os pontos mostrados na Figura 5.16 representam os valores de ρ para o canal 7 do *Front-end* número de série 2, o qual representa os demais canais de classe A da placa 2 (todos os canais desta placa possuem comportamento idêntico quanto

ao parâmetro ρ). Perceba que, para valores baixos de tensão de pico, na saída do circuito ($< 30mV$), e para valores altos ($> 650mV$), ρ decai intensamente em relação ao platô ($30mV \leq V_{pico} \leq 650mV$). A Figura 5.17 trás a distribuição de ρ para todos os canais do *Front-end 2*. Em 75.5% das comparações, ρ é menor que 0.95. E em 99.95% dos casos, ρ é menor que 0.99.

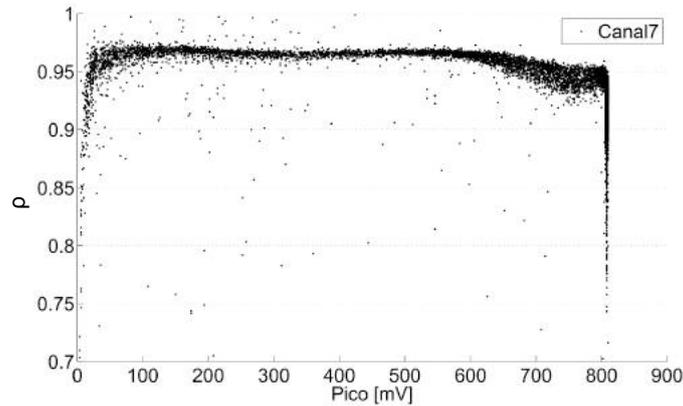


Figura 5.16: Valores de ρ versus tensão de pico na saída do canal 7 *Front-end 2*.

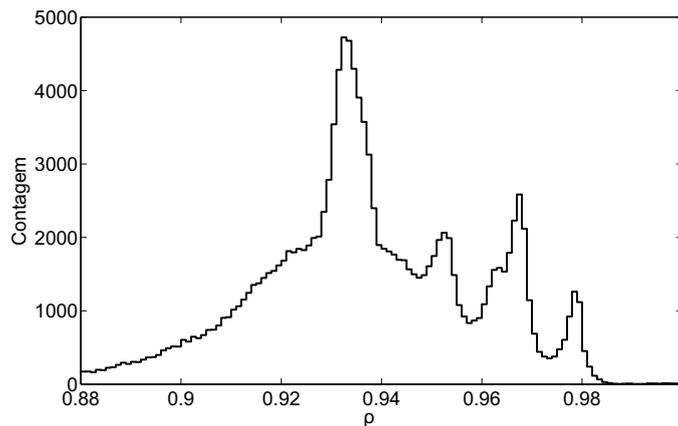


Figura 5.17: Distribuição dos valores ρ para todos os canais do *Front-end 2*.

A Figura 5.17 exhibe os valores de ρ para os canais 1, 3, 4 e 5 do *Front-end 5*. O canal 1 representa os canais 2 e 8, que possuem comportamento similar quanto ao ρ (canais de classe *A*). O canal 3, representa os canais 6 e 7 (classe *B*). Note que o decaimento de ρ nos canais de classe *B* para tensões altas, acontece em tensões menores do que as tensões dos canais de classe *A* ($< 650mV$). O canal 5, como mostrado anteriormente, é um caso especial da classe *A*, assim como o canal 4 é um caso especial da classe *B*. Assim, as tensões de pico estabelecidas como limites para o decaimento de ρ , de cada classe, são: $650mV$ para a classe *A*, e $300mV$ para a classe *B*. Os sinais cujos valores de pico são maiores do que as tensões-limite estabelecidas, são, a priori, considerados corrompidos. A distribuição de ρ para todos os canais do *Front-end 5* é mostrada na Figura 5.19.

Em 99.89% dos casos, ρ é menor que 0.95. A ocorrência de $\rho < 0.99$, corresponde a 99.96% das aquisições do banco de dados do *Front-end 5*.

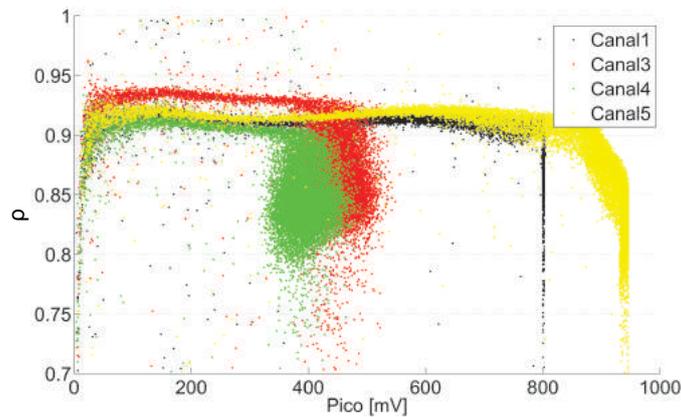


Figura 5.18: Valores de ρ versus tensão de pico na saída do canal 7 *Front-end 5*.

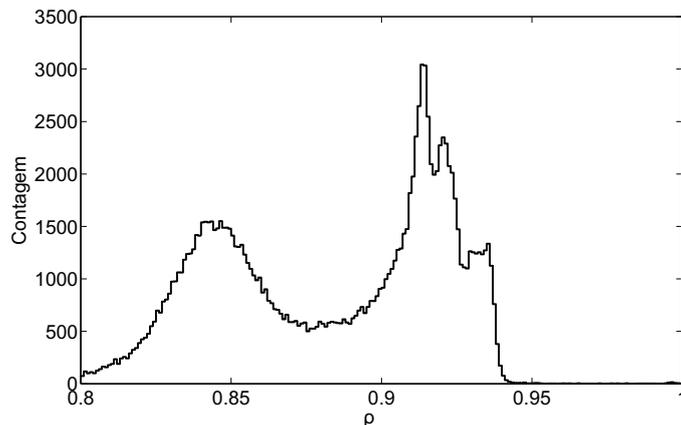


Figura 5.19: Distribuição dos valores ρ para todos os canais do *Front-end 5*.

No Capítulo 4 desta dissertação, o parâmetro ρ foi utilizado para medir o quão bem representado está o sistema, pelo modelo determinado (equação 4.11). Todas as distribuições de ρ apresentadas naquele capítulo, tem picos em torno de $\rho = 0.99$. Além disso, em mais de 95% daquelas comparações, os valores de ρ são maiores do que 0.95. Tomando estes valores como referência, pode-se constatar que as formas de onda do banco de dados analisado, não possuem um grau de representatividade adequado. A Figura 5.20 traz alguns exemplos de formas de onda distorcidas para algumas amplitudes de pulso dos bancos de dados de classe A e B.

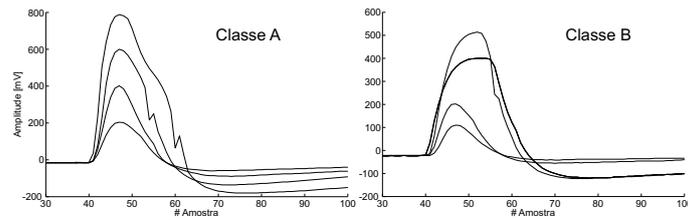


Figura 5.20: Exemplos de formas de onda distorcidas do banco de dados das classes A e B.

5.3.3 Análise dos dados coletados.

A estratégia para tentar aproveitar os dados, mesmo corrompidos, para a realização de alguma análise, partiu da investigação dos dados referentes à cada canal do sistema, individualmente. O banco de dados investigado contém 19168 aquisições dos 16 canais que compõem o sistema. Para realizar a aquisição destes dados, as pás cintiladoras foram posicionadas sobre o detector, alinhadas no centro da tampa e afastadas 27cm uma da outra, como mostrado na Figura 5.21. A taxa média de eventos desta aquisição foi de 0.42Hz . A taxa estimada de eventos para as dimensões das pás utilizadas e a distância entre as duas pás é de 1.0Hz ((AGGOURAS *et al.*, 2005), (FAUTH *et al.*, 2007)). A diferença entre a taxa obtida através das medidas é o valor estimado pode ser atribuída a fatores como eficiência das pás utilizadas, dentre outros.



Figura 5.21: Posição das pás cintiladoras sobre o tanque alvo.

As Figuras 5.22 e 5.23 mostram o comportamento do pico em relação à carga na saída dos dispositivos de *Front-end* números de série 5 e 2, respectivamente. As retas pontilhadas representam a relação Pico/Carga obtida a partir da caracterização das duas placas em laboratório. Para o *Front-end* 2, o valor estimado desta relação é de $32.68e^{-5} \pm 6.2e^{-6}\text{V}/pC$, para o *Front-end* 5,

$33.61e^{-5} \pm 6.4e^{-6}V/pC$. Pelas duas figuras é possível perceber que os dados adquiridos no tanque estão de acordo com os resultados obtidos em laboratório, dentro de uma faixa onde as tensões de pico na saída dos circuitos de *Front-end* são médias e baixas em relação às tensões onde ocorrem a deformação dos sinais.

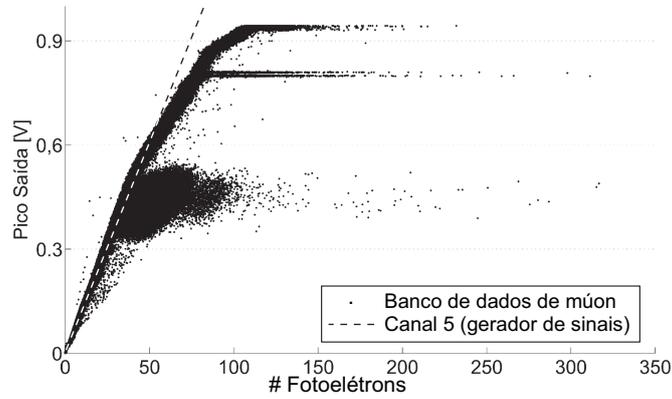


Figura 5.22: Carga na saída (em número de fotoelétrons) versus pico na saída do *Front-end* número 5 - banco de dados do alvo.

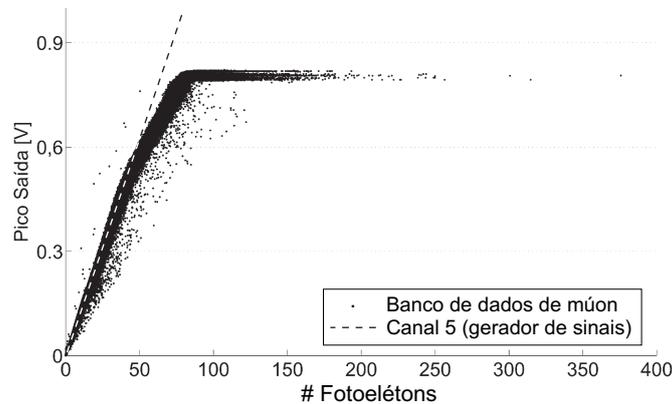


Figura 5.23: Carga na saída (em número de fotoelétrons) versus pico na saída do *Front-end* número 2 - banco de dados do alvo.

A distribuição de relação Pico/Carga para o banco de dados do *Front-end* 5, referente às aquisições realizadas no tanque, é exibida pela Figura 5.24. O pico à direita, no gráfico, foi aproximado por uma função gaussiana, cujos parâmetros também são mostrados na figura. Note que o parâmetro b_1 , que corresponde à média, está de acordo com a relação Pico/Carga do *Front-end* 5.

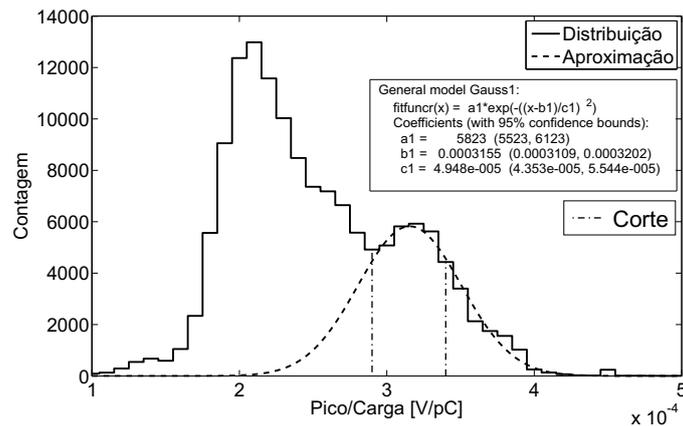


Figura 5.24: Distribuição da relação Pico/Carga do banco de dados do *Front-end* número 5 - banco de dados do alvo.

Pelos resultados obtidos a partir do ensaio realizado em laboratório, é possível perceber que o canal 4 do *Front-end* 5 apresenta a menor excursão do sinal, sem que a saída sature (Figura 5.15). Através dos dados da aquisição no tanque, pode-se notar que as distorções nos sinais ocorrem à menor tensão de pico neste canal, em relação aos demais canais dos dois dispositivos de *Front-end*. Assim, para melhor definir a região em que todos os canais dos dois dispositivos apresentem um comportamento similar, foi escolhido o banco de dados do canal 4 do *Front-end* 5. Os dados deste canal, referente as aquisições no tanque, cujos valores de Pico/Ganho estão dentro da região entre as duas retas verticais em traço-ponto, na Figura 5.24 foram separados para análise. A Figura 5.25 mostra a distribuição das tensões de pico dos dados separados. Note que a relação Pico/Carga no canal escolhido, é respeitada até tensões de pico de $500mV$. Porém, é possível observar na Figura 5.22, uma região acima dos $300mV$, onde os dados que respeitam a relação Pico/Carga se misturam com os dados que não respeitam esta relação.

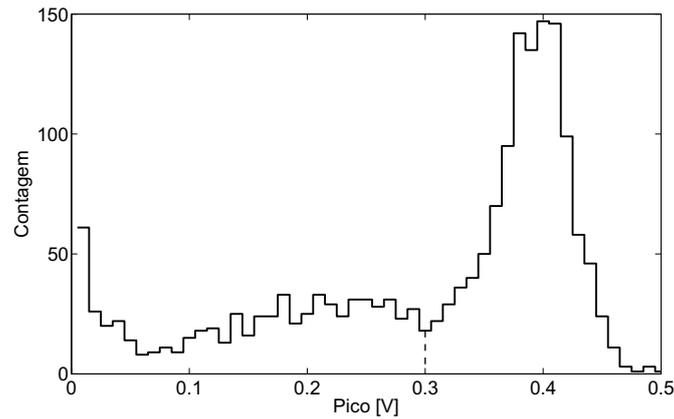


Figura 5.25: Distribuição das tensões de pico dos dados da região de corte da distribuição da relação Pico/Garga do *Front-end* número 5 - banco de dados do alvo.

Assim, para a análise a seguir, definiu-se como limiar de corte a tensão de pico de $300mV$.

O objetivo desta análise é mapear o comportamento das PMTs no tanque, de acordo com a sua posição. A Figura 5.26 mostra a proporção de PMTs que ultrapassaram o limiar de corte em relação a quantidade total de aquisições do banco de dados. Uma outra análise mostra o que acontece com as outras PMTs quando as amplitudes do sinal de uma PMT em específico ultrapassam a tensão de corte. Quando as tensões do sinal da PMT em observação ultrapassam o limite de corte, as outras PMTs são monitoradas. A Figura 5.27 mostra a proporção de vezes que as outras PMTs ultrapassam o corte em relação ao mesmo evento da PMT observada. Os quadrados pequenos representam as posições aproximadas das PMTs dentro do tanque, no mesmo sentido e direção representados pela Figura 5.4. O quadrado destacado com um ponto preto representa a PMT em observação.

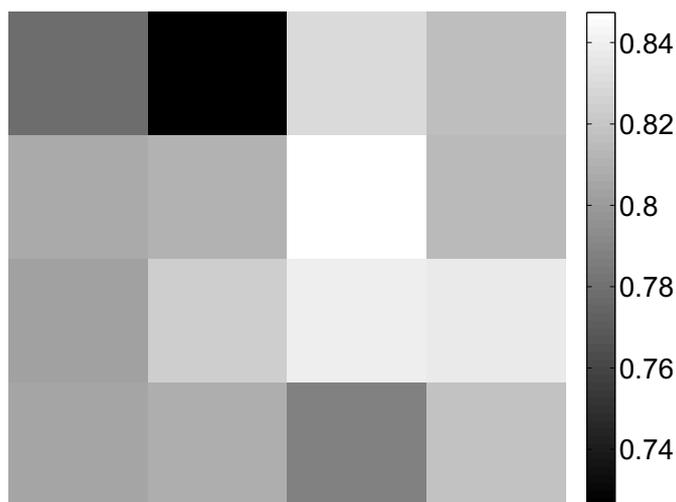


Figura 5.26: Proporção de sinais altos por PMT - pás cintiladoras no centro do tanque, distantes $27cm$.

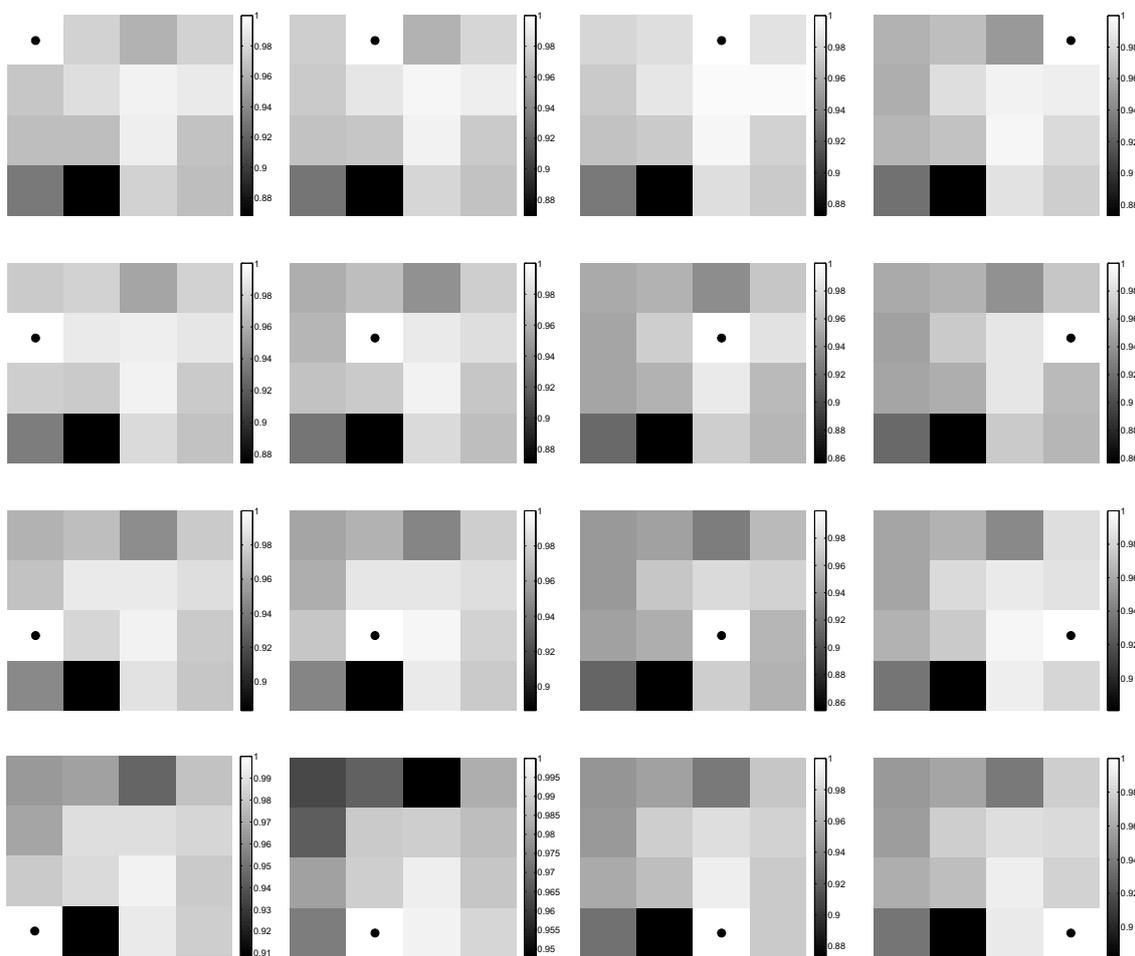


Figura 5.27: Proporção de sinais altos em relação a cada PMT - pás cintiladoras no centro do tanque, distantes $27cm$.

A Figura 5.28 mostra a distribuição da proporção de PMTs que ultrapassam o corte em relação à cada PMT observada através dos resultados obtidos pela

análise mostrada anteriormente na Figura 5.27. Perceba que em mais de 90% dos casos em que uma PMT ultrapassa o limite de corte as outras também ultrapassam.

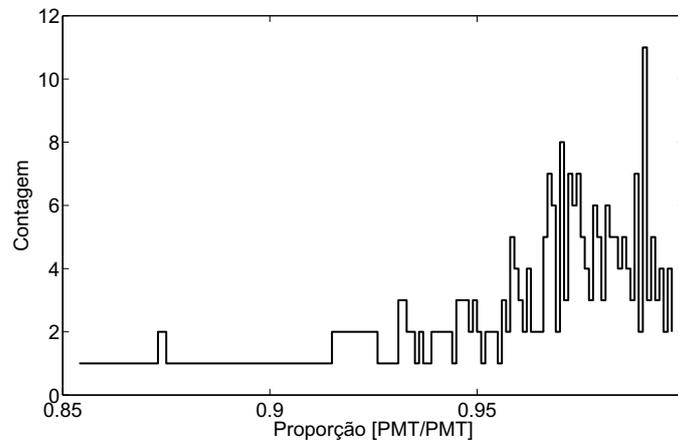


Figura 5.28: Distribuição da proporção de sinais altos em relação a cada PMT - pás cintiladoras no centro do tanque, distantes 27cm .

A mesma análise foi feita para outro banco de dados. Agora, as aquisições foram feitas com as pás, alinhadas pela área ativa, no canto da parte superior da tampa do tanque. Além disso, não há afastamento entre as superfícies cintiladoras das pás. A Figura 5.29 ilustra o posicionamento das pás para realização das aquisições de dados. A taxa de eventos desta aquisição foi de 2.44Hz .



Figura 5.29: Posição das pás cintiladoras sobre o tanque alvo.

A Figura 5.30 representa a proporção de ocorrências de eventos em relação a quantidade total de aquisições (12047), cujas amplitudes dos sinais ultrapassam o limite de corte por cada PMT. Pela figura é possível perceber uma tendência de sinais altos na região onde as pás foram posicionadas. A Figura 5.30 mostra o comportamento das demais PMTs em relação a cada uma, individualmente. Os resultados exibidos correspondem à proporcionalidade de ocorrência de sinais altos para um mesmo evento em relação à uma PMT em específico.

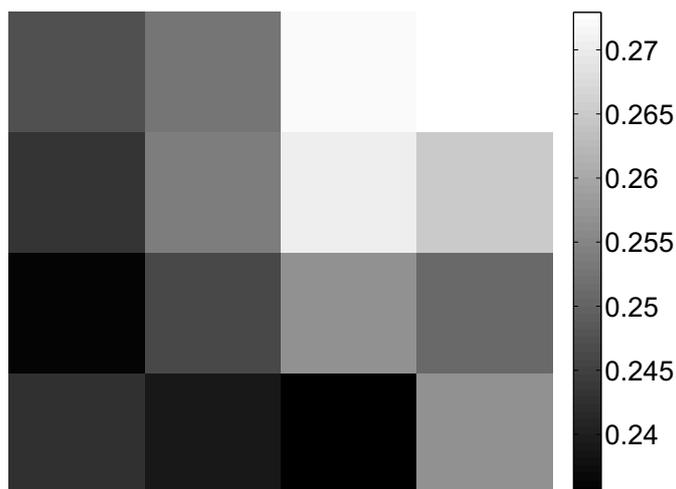


Figura 5.30: Proporção de sinais altos por PMT - pás cintiladoras unidas no canto da tampa do tanque.

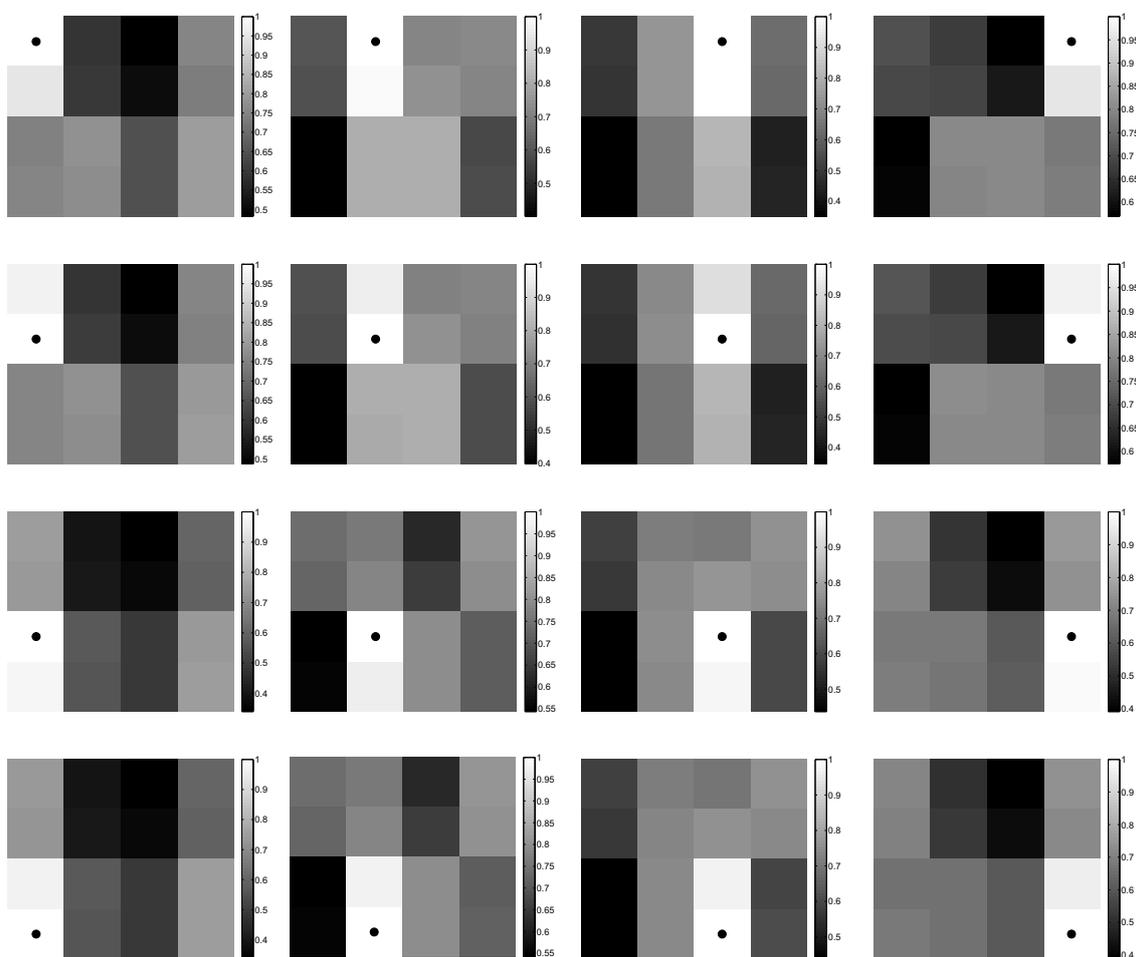


Figura 5.31: Proporção de sinais altos em relação a cada PMT - pás cintiladoras unidas no canto da tampa do tanque.

De acordo com os resultados obtidos a partir de algumas simulações com o detector do projeto Neutrinos Angra ([ANJOS, 2010](#)), a energia do pósitron e do

neutron, que são as partículas responsáveis pela assinatura do neutrino, está concentrada abaixo dos 160 fotoelétrons (Figura 5.32), para o detector equipado com 32 PMTs. Dividindo 160 fotoelétrons por 32 PMTs, o resultado é 5 fotoelétrons por PMT. A partir das simulações, é possível observar que a radiação cósmica também deixa rastros de baixas energias no detector, inclusive nas regiões onde se concentram as energias do pósitron e do neutron. Isto pode levar ao sistema a classificar uma partícula de radiação cósmica como neutrino, gerando assim o chamado falso alarme. Com a finalidade de mapear as PMTs quanto aos potenciais eventos de geração de falso alarme, foi proposto um novo limiar de corte, porém agora de energia. Os eventos cujas energias são menores do que 5 fotoelétrons e acima de 0 fotoelétrons (ruído), foram computados e uma análise similar à anterior foi realizada.

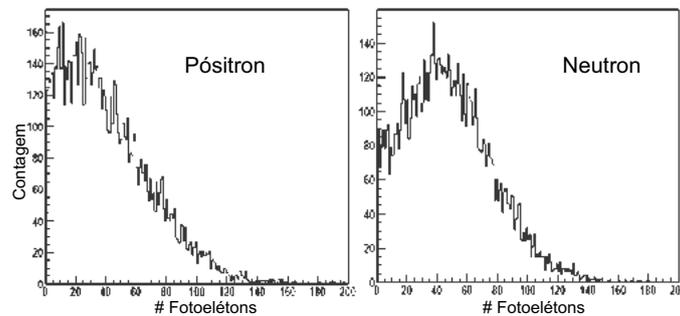


Figura 5.32: Distribuição de energia dos pósitrons e neutrons da assinatura de neutrinos - resultado de simulação para o detector equipado com 32 PMTs.
 Fonte: (ANJOS, 2010)

A Figura 5.33 mostra a proporção de ocorrências de sinais de baixas energias em relação à quantidade de dados armazenados, por PMT. Os dados analisados são referentes à aquisição feita com as pás cintiladoras posicionadas no centro do topo do detector, distantes 27cm uma da outra. Perceba que a ocorrência de sinais de baixas energias está entre 3% e 10% para este cenário, enquanto para os sinais de altas energias, essa proporção está entre 74% e 84%. A Figura 5.35 traz a relação entre as demais PMTs e cada uma em específico. Note que o comportamento das PMTs vizinhas não sofre grandes variações com relação à mudança da PMT observada. Outro detalhe é o indício da existência de um padrão comportamental de cada PMT para estes sinais de baixas energias. Veja que a figura formada pelos quadros que representam as PMTs, com tonalidades mais escuras, permanece praticamente a mesma em ambas as 16 situações.

Na sequência, as Figuras 5.35 e 5.36 exibem os resultados para as mesmas análises realizadas com os dados adquiridos com as pás unidas, no canto do detector. Neste caso, a ocorrência de sinais de baixas energias está compreendida entre 10% e 60%. Enquanto os sinais de altas energias, para o mesmo cenário,

estão compreendidos entre 24% e 27%. Outro detalhe é a figura formada pelos quadrados mais escuros, que estão apresentado o mesmo padrão do cenário anterior.

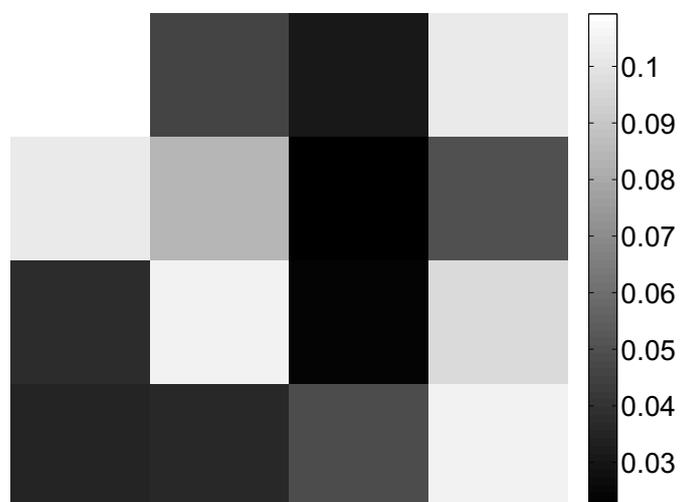


Figura 5.33: Proporção de sinais baixos por PMT - pás cintiladoras no centro do tanque, distantes 27cm.

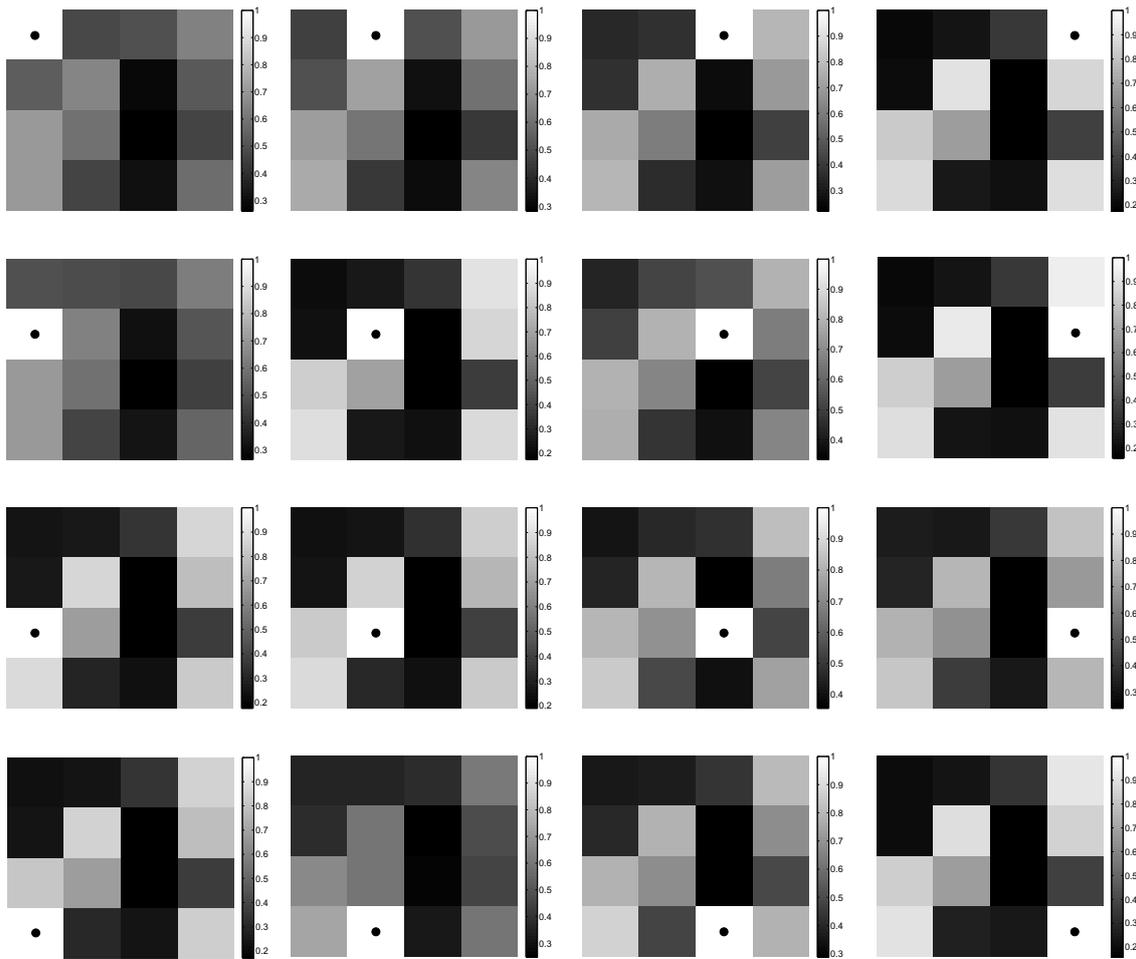


Figura 5.34: Proporção de sinais baixos em relação a cada PMT - pás cintiladoras no centro do tanque, distantes $27cm$.

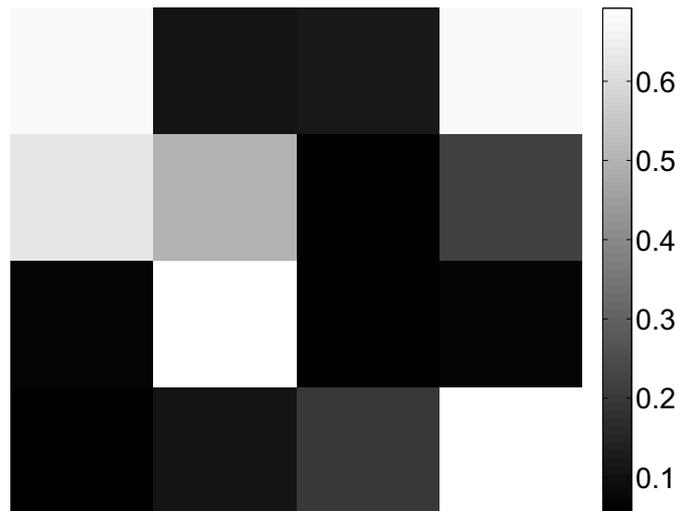


Figura 5.35: Proporção de sinais baixos por PMT - pás cintiladoras unidas no canto da tampa do tanque.

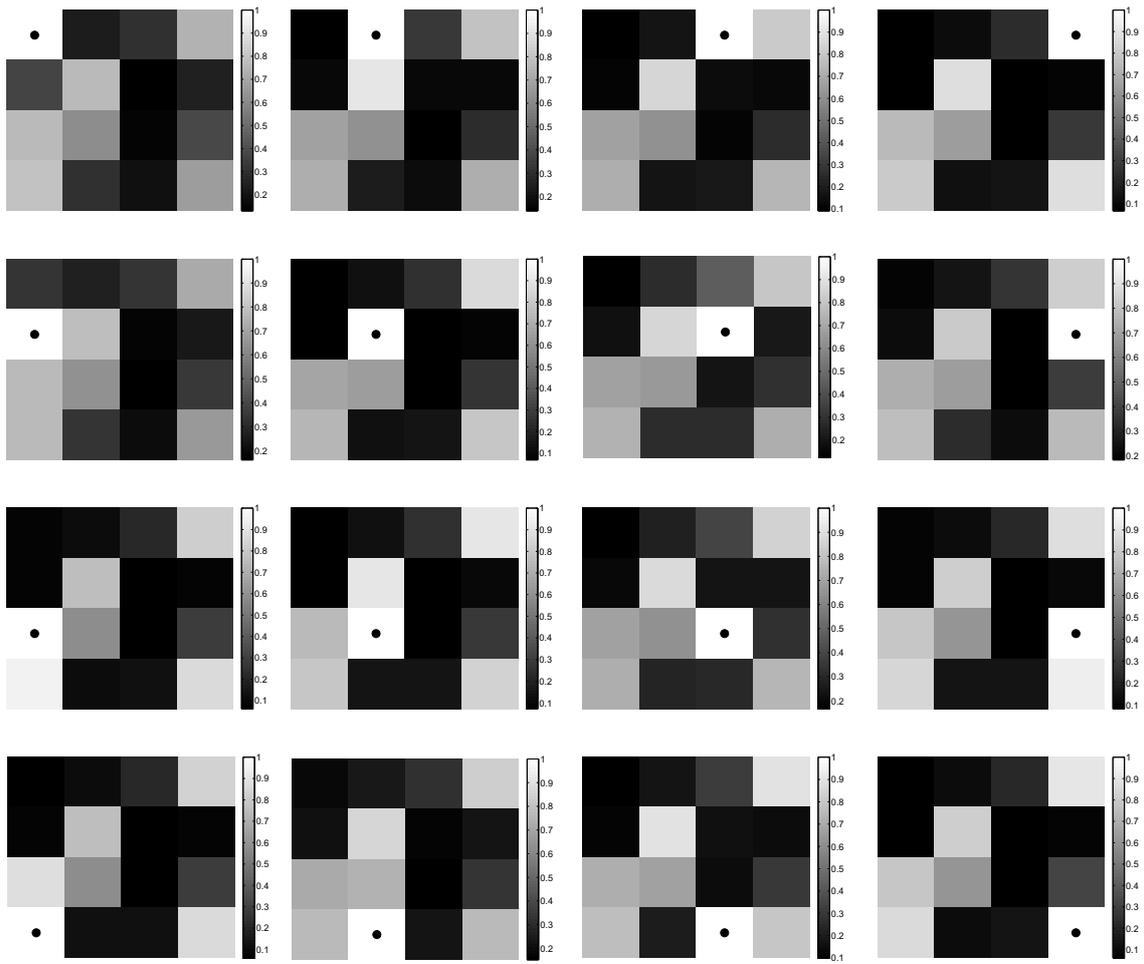


Figura 5.36: Proporção de sinais baixos em relação a cada PMT - pás cintiladoras unidas no canto da tampa do tanque.

O fato de não se ter controle sob as características exatas da entrada dos circuitos de *Front-end* (sinais das PMTs) para cada respectiva saída, no sistema, impossibilita a recuperação dos dados corrompidos. Outras análises, além das exibidas nesta sessão, foram realizadas, na tentativa de extrair resultados relevantes relacionados à fenomenologia das interações ocorridas dentro do detector. Porém, devido à distorção das informações, os resultados obtidos foram inconsistentes com o esperado. Desta forma, estes resultados não acrescentam informações concisas e relevantes, por isso, não foram exibidos nesta dissertação.

5.4 Resultados e Considerações Finais

A partir do apontamento das falhas, os dois circuitos de *Front-end* utilizados para as aquisições de dados no tanque foram recolhidos. Estes dois dispositivos apresentaram características diferentes da configuração definitiva, que causa-

ram distorções nos dados adquiridos. Outras duas placas, com características idênticas às da versão definitiva foram acopladas ao sistema, em substituição às defeituosas.

Para que a maioria dos sinais correspondentes às interações dos múons dentro do tanque não saturassem, os resistores $R52$ e $R12$, nos divisores de tensão na entrada dos canais dos dois circuitos de *Front-end*, foram configurados com 5Ω e 47Ω , respectivamente, o que proporciona uma divisão do sinal de entrada por 10.4. A figura 5.41 mostra as formas de onda na saída dos 16 canais dos dois dispositivos de *Front-end* que substituíram os outros dois defeituosos. Esta configuração do divisor de tensão, com auxílio das imagens das formas de onda exibidas na Figura 5.41, confirma que qualquer configuração do divisor de tensão, desde que preservado o casamento de impedâncias, não influencia em outros parâmetros do circuito de *Front-end*, além do ganho global.

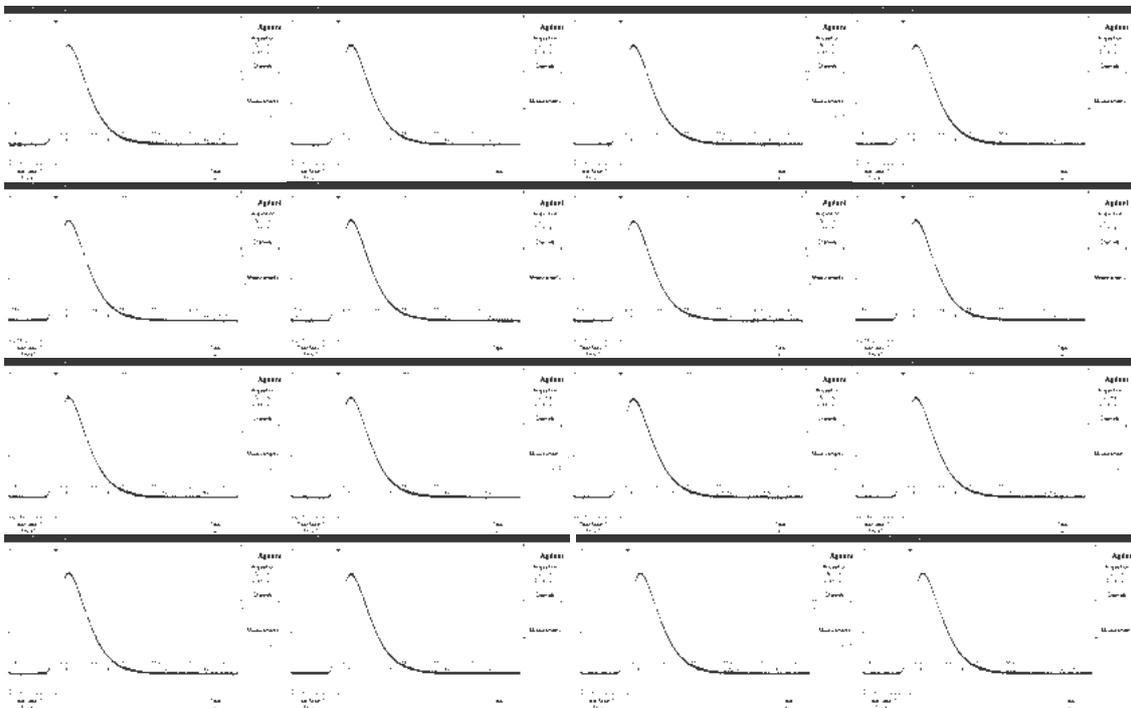


Figura 5.37: Forma de onda na saída dos 16 canais de *Front-end* com divisor de tensão por 10.4.

A percepção das falhas no sistema de medidas, contribuiu também para que os os módulos NDAQ fossem verificados. Na verificação, foi constatado que os dois módulos utilizados também apresentaram falhas que causavam distorções nos dados. A Figura 5.38 mostra a curva de linearidade dos dois dispositivos utilizados para realizar as aquisições de dados no tanque alvo. Na entrada dos canais das placas, foram injetados pulsos gaussianos gerados pelo gerador de sinais. O eixo horizontal corresponde as tensões de pico dos pulsos injetados. O eixo vertical, corresponde aos valores discretos correspondentes à conversão

analgico/digital, no pico do sinal de saída das placas. Note que a curva não apresenta um comportamento linear como esperado.

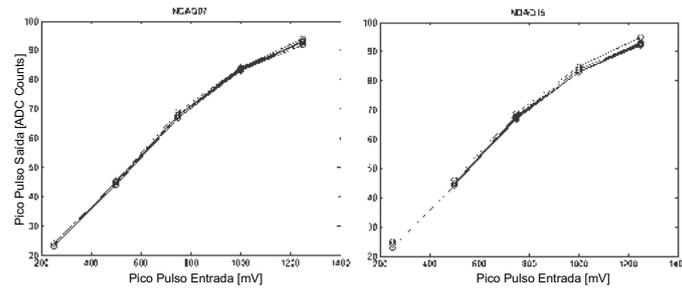


Figura 5.38: Pico do pulso de saída versus pico do pulso de entrada - Gerador de sinais - NDAQ.

Outro problema identificado nos módulos NDAQ é mostrado na Figura 5.39, que traz a forma de onda dos pulsos gaussianos adquiridos pelas placas. Veja que a forma de onda sofre uma distorção na região apontada pelas setas. A Figura 5.40 mostra um exemplo de sinal adquirido no tanque alvo, com estes dois módulos NDAQ, onde se pode perceber uma distorção similar na direção das setas. A falha foi atribuída à presença de um transformador de tensão em cada canal, conectado à entrada de sinal e ao terra do circuito. A retirada deste transformado resolveu o problema sem afetar o funcionamento dos dispositivos.

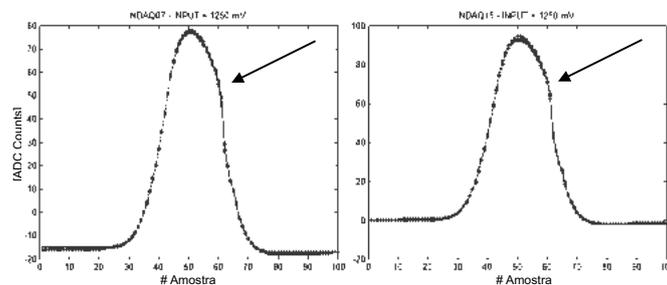


Figura 5.39: Distorção na forma de onda - NDAQ.

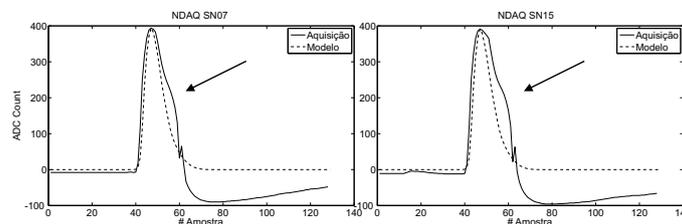


Figura 5.40: Distorção na forma de onda adquirida no tanque alvo - NDAQ.

A taxa de aquisição de dados da versão do *firmware* para aquisição de dados via USB, com sincronismo entre dois módulos NDAQ, é limitada em $3Hz$. A versão do *firmware* dos módulos NDAQ foi substituída para que eles pudessem

utilizar o barramento VME, que proporciona maior velocidade na transmissão dos dados a serem armazenados. Características como sincronismo entre vários módulos e limite máximo de taxa de aquisição ainda devem ser verificados e ajustados caso necessário.

Após a identificação da causa da distorção na saída dos módulos NDAQ e a substituição dos circuitos de *Front-end*, foi realizada uma nova aquisição de dados. Esta nova aquisição foi feita na época em que esta dissertação foi finalizada. Desta forma, não houve tempo suficiente para que os dispositivos fossem caracterizados após realizados os devidos ajustes. Isto inviabilizou a conversão das informações para as unidades até agora utilizadas nesta dissertação (pC , mV , número de fotoelétrons...). Assim, os resultados obtidos a partir deste novo banco de dados foi utilizado simplesmente para constatar que as falhas anteriormente apresentados foram resolvidas.

As pás cintiladoras foram posicionadas unidas, no centro do topo do tanque. As PMTs das pás foram alimentadas por tensões de $-1450V$. Foram feitas 9999 aquisições. A taxa média de eventos ao final da aquisição foi de $0.17Hz$ (10 eventos por minuto). Esta nova aquisição foi realizada através do sistema totalmente acoplado. A Figura 5.41 mostra as curvas de pico versus carga dos dados adquiridos nos 16 canais desta nova aquisição. Os eixos verticais, correspondem aos valores discretos da conversão analógico/digital (com 8 bits nesta nova versão de *firmware*) no pico de cada sinal adquirido. Os eixos horizontais, correspondem à soma das amostras positivas de cada sinal do banco de dados adquirido. Pela Figura 5.41 pode-se constatar que, depois das correções realizadas, o sistema está seguindo o comportamento esperado. A Figura 5.42 mostra as distribuições dos picos dos sinais dos 16 canais do banco de dados adquirido. Note que, agora, com o sistema ajustado, pode-se observar um comportamento similar entre todos os canais, o que é mais uma comprovação do funcionamento do sistema totalmente acoplado.

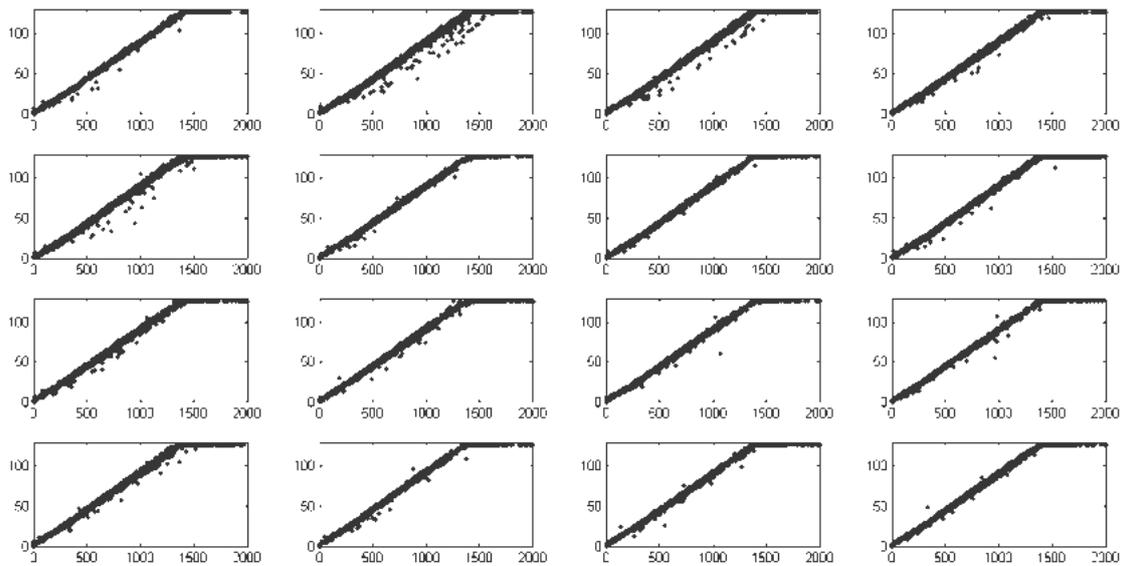


Figura 5.41: Pico versus carga - banco de dados com 9999 aquisições.

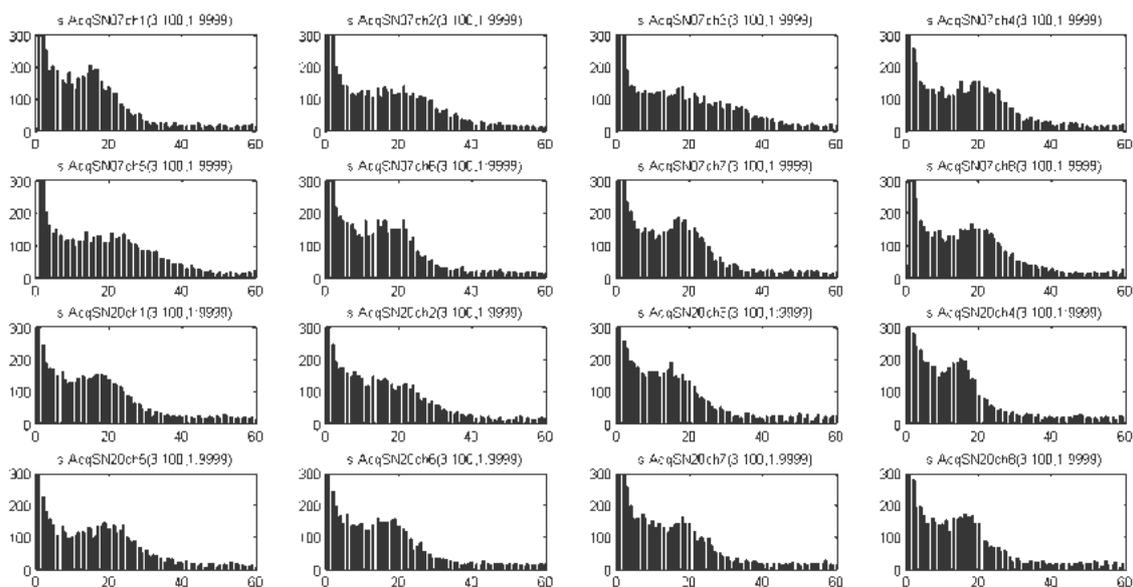


Figura 5.42: Distribuição dos picos dos sinais do banco de dados com 9999 aquisições.

O resultado obtido através de uma simulação computacional com base nas características dos múons, para detector do projeto Neutrinos Angra, equipado com 32 PMTs ((ANJOS, 2010)), é mostrado na Figura 5.43. A Figura 5.44 mostra a soma dos picos dos sinais do banco de dados da ultima aquisição citada. Perceba que a aquisição segue o padrão da simulação, que é baseada nas características físicas dos múons. Com isso, pode-se concluir que o sistema de medidas está funcionando de acordo as especificações necessárias para observação destes fenômenos.

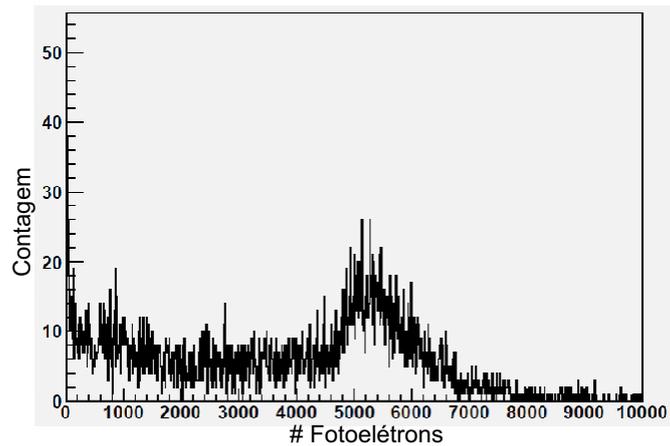


Figura 5.43: Distribuição de número de fotoelétrons visto pelo detector alvo equipado com 32 PMTs para uma simulação de múons.
 Fonte: (ANJOS, 2010)

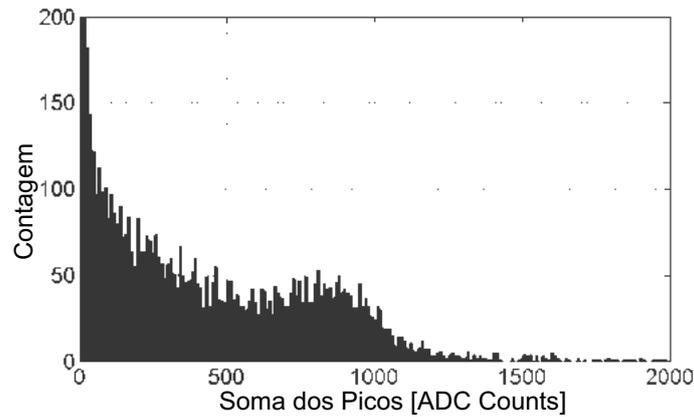


Figura 5.44: Distribuição da soma dos picos dos sinais do banco de dados com 9999 aquisições.

A Figura 5.45 mostra a quantidade de PMTs em coincidência para a quantidade de eventos cujos sinais ultrapassaram o limiar estabelecido em 2 *ADC Counts*. Note que, nesta aquisição, a maioria dos eventos deixou sinal em todas as PMTs. Análises deste tipo, assim como aquelas apresentadas na Sessão 5.3.3, serão fundamentais para a definição do sistema de disparo (*trigger*) das aquisições para detecção de neutrinos. Por isso, é importante que os sensores e a eletrônica de leitura estejam bem calibradas e que não apresentem falhas.

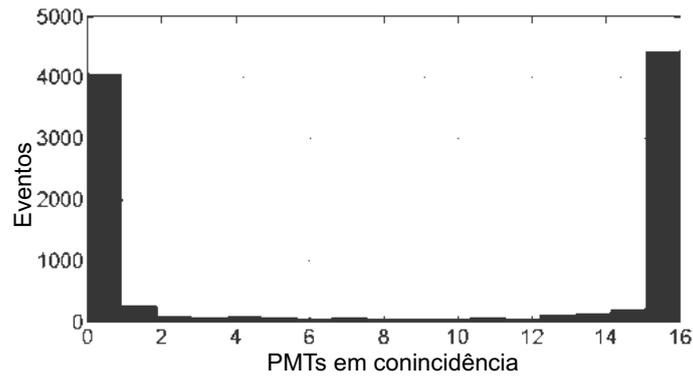


Figura 5.45: Número de PMTs em coincidência para eventos cujos sinais ultrapassam 2 ADC Counts - banco de dados com 9999 aquisições.

Uma análise similar é mostrada na Figura 5.46. O resultado exibido significa a proporção de eventos nas demais PMTs cujos sinais são inferiores à carga de 5 fotoelétrons, em relação à quantidade total de eventos similares na PMT destacada pelo ponto preto. Comparando esta figura com a Figura 5.36 é possível perceber a formação de um padrão pelas PMTs em destaque, dentro da linha cinza. No caso de uma calibração, pelo menos, uniforme, seria razoável esperar uma distribuição de proporção também uniforme entre as PMTs. Este comportamento pode star relacionado com calibração das PMTs, como na discussão da Sessão 4.2, onde foi levantada a hipótese de uma imprecisão na calibração da Hamamatsu.

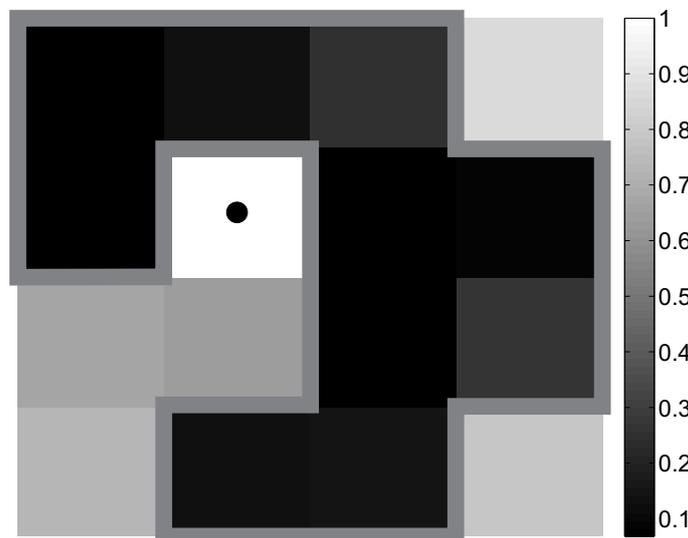


Figura 5.46: Distribuição de proporcionalidade de eventos abaixo de 5 fotoelétrons nas PMTs, em relação ao total destes eventos na PMT destacada.

Capítulo 6

Conclusões

A realização deste trabalho contribuiu para a integração dos principais dispositivos de leitura de dados que compõem o detector do projeto Neutrinos Angra. Até então, estes dispositivos haviam sido testados apenas individualmente, ou em sistemas de pequena escala, desenvolvidos em laboratório, com utilização simultânea de poucos canais. Através das análises dos resultados obtidos neste trabalho de mestrado, foi possível, além de destacar as características dos componentes do sistema de leitura do detector, apontar suas falhas e comprovar o funcionamento do sistema totalmente acoplado.

A caracterização da PMT *Hamamatsu R5912* levantou a discussão acerca dos valores de alta-tensão fornecidos pelo fabricante, para que o sensor trabalhe com um ganho de 10^7 . Os resultados dos ensaios realizados mostraram que um dos dispositivos alimentado pelo valor de alta-tensão informado pelo fabricante trabalhou com um ganho estimado de 1.65×10^7 . O registro deste resultado pode ser relevante para investigação das causas de possíveis futuras discrepâncias entre os resultados obtidos e os esperados no detector, visto que a ganho nominal adotado como padrão do sistema é o de 10^7 . Por outro lado, discrepâncias desta ordem podem não prejudicar o funcionamento do detector.

A descrição do circuito de *Front-end* proporcionou o estabelecimento de um circuito padrão para o experimento. Além disso, foi possível destacar suas principais características como ganho médio global e tensão de saturação na saída do circuito. O estudo contribuiu também para a validação da funcionalidade de um dos seus recursos disponíveis: o divisor de tensão. Outro detalhe importante mostrado através da caracterização do circuito é a manutenção das características da forma de onda dentro da região de linearidade. Como visto, esta última característica proporciona a extração de um modelo padrão para a forma de onda do sinal na saída do circuito, possibilitando assim, a implementação de filtros digitais que utilizam este modelo como base, como o filtro casado, apresentado na Angra Note 021 – 2013 ([ALVARENGA et al.](#)), por exemplo.

Os resultados obtidos a partir da caracterização do NDAQ, mostrou que as características dos sinais adquiridos pelo módulo de aquisição não são influenciadas pelo próprio módulo. Ou seja, o estudo mostrou que a forma de onda dos sinais adquiridos pelo NDAQ, representam o sistema identicamente aos sinais adquiridos diretamente na saída do *Front-end* pelo osciloscópio. Validando, assim, a funcionalidade do acoplamento *Front-end/NDAQ*.

As medidas realizadas no detector alvo possibilitaram a identificação de algumas falhas que causavam distorções nos dados coletados. Estas distorções inviabilizaram a obtenção de resultados relacionados a fenomenologia dos eventos ocorridos no interior do detector. Também devido às falhas ocorridas, não foi possível estimar a eficiência do detector alvo. Mesmo assim, a partir da análise dos dados adquiridos, foi feito um mapeamento do comportamento das PMTs, para eventos de baixas e altas energias. Este mapeamento pode ser importante no direcionamento dos estudos para definição do sistema de disparo (*trigger*) das aquisições, para detecção de neutrinos, além de serem úteis para a comparação e ajustes dos programas de simulação da colaboração do Projeto Neutrinos Angra.

Após apontados, os problemas foram resolvidos e uma nova aquisição de dados foi realizada. Através da análise deste novo banco de dados, foi possível detectar um comportamento, de acordo com o esperado pela fenomenologia dos múons. Este resultado implicou na confirmação da funcionalidade do acoplamento de toda a eletrônica de leitura do detector de neutrinos do projeto Neutrinos Angra.

Referências Bibliográficas

- AGGOURAS, G., ANASSONTZIS, E., BALL, A., et al., 2005, “A measurement of the cosmic-ray muon flux with a module of the NESTOR neutrino telescope”, *Astroparticle Physics*, v. 23, n. 4, pp. 377–392.
- ALLKOFER, O. C., 1975, “Introduction to cosmic radiation”, *NASA STI/Recon Technical Report A*, v. 75, pp. 46929.
- ALVARENGA, T. A., ANTÔNIO, J., DORNELAS, T. I., et al., “Estudo do impacto de filtros digitais aplicados ao sinal de saída do circuito de front-end do Projeto Neutrinos-Angra”, .
- ALVARENGA, T. A., CERQUEIRA, A. S., DORNELAS, T., et al., “ANÁLISE DO SINAL DA RESPOSTA AO FOTOELÉTRON PARA TUBO FOTO-MULTIPLICADOR UTILIZADO NO EXPERIMENTO NEUTRINOS-ANGRA”, .
- ALVARENGA, T. A., DORNELAS, T. I., ESTERCE, D. R., et al., 2014, “Performance study of digital filters applied to the Readout System of the Neutrinos-Angra Detector”. In: *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2014 IEEE International*, pp. 1437–1442. IEEE.
- AMBROSIO, M., ANTOLINI, R., ARAMO, C., et al., 1998, “Measurement of the atmospheric neutrino-induced upgoing muon flux using MACRO”, *Physics Letters B*, v. 434, n. 3, pp. 451–457.
- ANJOS, J., 2010, “Monitoring nuclear reactors with antineutrino detectors: The ANGRA project”, .
- ARONS, A., PEPPARD, M., 1965, “Einstein’s Proposal of the Photon Concept—a Translation of the Annalen der Physik Paper of 1905”, *American Journal of Physics*, v. 33, n. 5, pp. 367–374.
- ASCH, T., GEMMEKE, H., KLEIFGES, M., et al., 2005, “**Single photoelectron resolution for the calibration of photomultiplier systems**”. In: *Nu-*

clear Science Symposium Conference Record, 2005 IEEE, v. 2, pp. 887–890. IEEE.

BARISH, S., CAMPBELL, J., CHARLTON, G., et al., 1977, “Study of neutrino interactions in hydrogen and deuterium: Description of the experiment and study of the reaction $\nu + d \rightarrow \mu^- + p + p_s$ ”, *Physical Review D*, v. 16, n. 11, pp. 3103.

BAUER, C., BORGER, E., HOFACKER, R., et al., 2011, “**Qualification tests of 474 photomultiplier tubes for the inner detector of the Double Chooz experiment**”, *Journal of Instrumentation*, v. 6, n. 06, pp. P06008.

BLASSE, G., 1994, “Scintillator materials”, *Chemistry of Materials*, v. 6, n. 9, pp. 1465–1475.

BOLOTOVSKII, B., 1957, “The theory of the Vavilov-Cherenkov effect”, *Uspekhi Fiz. Nauk*, v. 62.

BOWDEN, N., OTHERS, 2004, “First Results from a Nuclear Reactor Monitoring Antineutrino Detector”. In: *Proceedings of the INMM 45th Annual meeting*.

BUFFINGTON, A., ORTH, C. D., SMOOT, G. F., 1975, “Measurement of primary cosmic-ray electrons and positrons from 4 to 50 GeV”, *The Astrophysical Journal*, v. 199, pp. 669–679.

CECCHINI, S., SIOLI, M., 2000, “Cosmic ray muon physics”, *arXiv preprint hep-ex/0002052*.

CNEN, P. “CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear - Salvaguardas Nucleares”. <http://www.cnen.gov.br/seguranca/salvaguardas.asp>. Acessado em: 14-01-2014.

COSTA, J. A., 2014, “Eletrônica de Front-end do Experimento Neutrinos-Angra”, *Portal Neutrinos-Angra*.

ECKART, P., 1996, “The Extraterrestrial Environment”. In: *Spaceflight Life Support and Biospherics*, Springer, pp. 39–77.

ENGELMANN, J., FERRANDO, P., SOUTOUL, A., et al., 1990, “Charge composition and energy spectra of cosmic-ray nuclei for elements from Be to Ni-Results from HEAO-3-C2”, *Astronomy and Astrophysics*, v. 233, pp. 96–111.

- FAUTH, A., PENEREIRO, J., KEMP, E., et al., 2007, “Experimental demonstration of time dilatation and space contraction of cosmic-ray muons”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 29, n. 4, pp. 585–591.
- FERNANDEZ, R. A. “**Double Chooz: Neutron Capture Analysis**”. Disponível em: <<http://www.nevis.columbia.edu/reu/2011/FernandezReport.pdf>, year={2011}, note={Acesso em: 14dejaneirode2015}>.>
- FÜR PHYSIK, K. I. “Scintillation Detectors - Particle Detection via Luminescence”. http://www.kip.uni-heidelberg.de/~coulon/Lectures/Detectors/Free_PDFs/Lecture4.pdf. Acessado em: 25-01-2014.
- GAISSER, T. K., 1990, *Cosmic rays and particle physics*. Cambridge University Press.
- GAISSER, T. K., STANEV, T., 2000, “Cosmic rays”, *The European Physical Journal C-Particles and Fields*, v. 15, n. 1, pp. 150–156.
- HAMAMATSU PHOTONICS, K., 2006, “Photomultiplier tubes: Basics and applications”, *Edition 3a*.
- HUBER+SUHNER® , 2007. “Coaxial Cable: RG 303/U”. .
- J.C. ANJOS, A.F. BARBOSA, R. F. R. G. G. G. M. G. E. K. H. L. J. J. M. H. D. M. H. N. I. P. O. P. R. S. F. S. M. V. “Detector de Antineutrinos para Monitorar a Composição do Combustível e Potência Térmica de Reatores Nucleares”. http://www.cbpf.br/~hlima/files/angra/Neutrinos_Angra.pdf. Acessado em: 14-01-2014.
- KAETHER, F., LANGBRANDTNER, C., 2012, “Transit time and charge correlations of single photoelectron events in R7081 photomultiplier tubes”, *Journal of Instrumentation*, v. 7, n. 09, pp. P09002.
- KLEIN, M. J., 1961, “Max Planck and the beginnings of the quantum theory”, *Archive for History of Exact Sciences*, v. 1, n. 5, pp. 459–479.
- KLIMOV, Y. V., KOPEIKIN, V., MIKAELIAN, L., et al., 1994, “Neutrino method remote measurement of reactor power and power output”, *Atomic Energy*, v. 76, n. 2, pp. 123–127.
- LANDAU, D. P., BINDER, K., 2005, ***A guide to Monte Carlo simulations in statistical physics***. 2 ed. , Cambridge University Press.

- LIMA JR, H., BARBOSA, A., GAMA, R., et al., 2009, “Data Acquisition System for the Angra Project”, *Angra Note*, , n. 012.
- PAGANINI, S., 2001, *Os muons observados com o detector central do EAS-CAMP*. Tese de Doutorado, Instituto de Física Gleb Wataghin.
- PHOTONICS, H., 1998. “Photomultiplier Tube-R5912-02”. Disponível em: <<https://www.repic.co.jp/pdf/rg303.pdf>>.
- QUARANTA, A. A., 1969, “Modern Physics: An Introductory Survey”, *Il Nuovo Cimento A (1965-1970)*, v. 60, n. 3, pp. 507–508.
- RIBAS, R. V., 2002, “Instrumentação Nuclear”, *Instituto de Física, Departamento de Física Nuclear-USP*, v. 31.
- TOKAR, S., SÝKORA, I., PIKNA, M., et al., 1999, “**Single Photoelectron Spectra Analysis for the Metal Dynode Photomultiplier**”, *Acta Phys. Univ. Comeniana*, v. 40, pp. 114.

Apêndice A

