



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA DA BAHIA - INSTITUTO DE MATEMÁTICA E
ESTATÍSTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MECATRÔNICA**

DION BARBOSA DOS SANTOS RIBEIRO

Projeto Neutrinos Angra: o detector final

**Salvador
2019**

DION BARBOSA DOS SANTOS RIBEIRO

PROJETO NEUTRINOS ANGRA: O DETECTOR FINAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe

Co-orientador: Prof. Dr. João Carlos Costa dos Anjos

**Salvador
2019**

DION BARBOSA DOS SANTOS RIBEIRO

PROJETO NEUTRINOS ANGRA: O DETECTOR FINAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do título de doutor em mecatrônica.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe – Orientador _____

Doutor em Física Nuclear, Université Catholique de Louvain, U.C.L., Bélgica.

Universidade Federal da Bahia.

Prof. Dr. João Carlos Costa dos Anjos – Co-orientador _____

Doutor em Física Teórica, Université Paris Diderot, PARIS 7, França.

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas.

Prof. Dr. Antônio Ferreira da Silva _____

Doutor em Física, Linköping University, LINKO, Suécia.

Universidade Federal da Bahia.

Prof. Dr. Marcus Vinícius Americano da Costa Filho _____

Doutor em Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Brasil.

Universidade Federal da Bahia

Prof. Dr. Denis Gilbert Francis David _____

Doutor em Espectroscopia Atômica, Université de Caen, U.C., França.

Universidade Federal da Bahia.

Prof. Dr. Tiago França Paes _____

Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Brasil.

Universidade Federal da Bahia.

*Dedicado a Carina, a Lúgia e Gustavo; à família, amigos e
mestres*

AGRADECIMENTOS

A Deus.

A minha família, pelo apoio, e a Carina, por tudo.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe.

Ao meu Co-orientador Prof. Dr. João Carlos Costa dos Anjos.

A equipe do Laboratório de Propriedades Óticas (LaPO) do Instituto de Física da UFBA, em especial a Leandro do Rozário Teixeira e José Alejandro Moreno Alfonzo, que trabalharam demais neste detector.

A Colaboração do Projeto Neutrinos Angra e em especial, além dos já citados, Germano Guedes e Herman Lima.

Ao Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas e a Eletronuclear e seus colaboradores, fundamentais para a execução desse projeto.

Aos professores do programa de pós-graduação em mecatrônica (PPGM) da UFBA.

A CAPES, pelo apoio financeiro.

E a todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

A todos, minha gratidão e meus agradecimentos. Muito obrigado.

*Que o teu trabalho seja perfeito para que, mesmo depois de tua morte, ele
permaneça”*

Leonardo da Vinci

RESUMO

O projeto Neutrinos Angra visa monitorar a potência térmica e a evolução do combustível físsil da usina nuclear de Angra II, localizada na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, em Angra dos Reis, para corroborar com o desenvolvimento de salvaguardas nucleares e com a física de detecção de neutrinos a nível de superfície. Para tanto, um detector de neutrinos baseado na detecção de radiação Cherenkov em água ultrapura dopada com gadolínio a 0,2% em massa foi instalado adjacente ao edifício do reator desta usina. O projeto é uma colaboração iniciada em 2006 que logo se tornou um projeto 100% brasileiro. Essa condição promoveu um desenvolvimento ímpar de conteúdo e pessoal local, mas também impôs sérias restrições e atrasos à execução do projeto. O detector desenvolvido é um monólito de tanques concêntricos, com um tanque alvo de polipropileno com 32 fotomultiplicadoras e 1,3 metro cúbico de água dopada com gadolínio. Cercando-o, está uma blindagem de polipropileno com dois volumes de água com 1,65 m³ e 3 m³, respectivamente, e 4 fotomultiplicadoras para barrar múons e nêutrons. Acima desse conjunto está um tanque de veto adicional com 1,45 m³ de água e mais 4 sensores. Esse detector está conectado a um sistema de aquisição de dados composto de módulos de condicionamento, discriminação, discretização, seleção e armazenamento de sinal. Este trabalho descreve a montagem do detector de neutrinos no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, onde foi testado; a posterior desmontagem do mesmo, seu transporte e montagem final no contêiner-laboratório do projeto na CNAEA; e finalmente, o comissionamento desse detector.

Palavras-chave: Neutrinos, projeto Neutrinos Angra, salvaguardas nucleares, fotomultiplicadoras.

ABSTRACT

The Neutrinos Angra Project aims to monitor the thermal power and the fissile fuel's evolution on the Angra II nuclear power plant, located at the Almirante Álvaro Alberto's Nuclear Station, in order to corroborate with the development of nuclear safeguards and with surface detecting neutrino physics. For these purposes, a water-gadolinium Cherenkov radiation-based detector was installed adjacent to the reactor building. The project started in 2006 as a collaboration who soon became 100% brazilian. This status implied an unprecedented local knowledge and personnel development, but also imposed severe restrictions and delays to the project's execution. The developed detector is a concentric multi tank monolith, with a 1.3 cubic meter Gd doped water Target made of polypropylene in which are 32 photomultipliers. Surrounding it, there is a polypropylene Shielding with two pure water volumes of 1.65 m³ and 3 m³ and 4 PMTs in order to act as a veto for muons and neutrons. Above this setup is an additional veto tank with 1.45 m³ and 4 PMTs. The detector is connected to a data acquisition system made of data conditioning, discrimination, discretization, and selection and storage modules. This work describes the assembly of the neutrino detector in the Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, where it was tested; its further disassembly, transportation and final assembly at the container-laboratory of the project in the nuclear station; and finally, the commissioning of the detector.

Keywords: Neutrinos, Neutrinos Angra Project, nuclear safeguards, photomultipliers.

A COLABORAÇÃO NEUTRINOS ANGRA

J. C. Anjos^a, T. A. Alvarenga^b, L. P. Andrade^c, G. L. Azzi^a, A. S. Cerqueira^b, G. Cernicchiaro^a, P. Chimenti^d, I. A. Costa^b, M. P. Dias^b, T. I. Dornelas^b, P. C. M. A. Farias^g, A. Fernandes Júnior^b, F. França^a, L. F. G. Gonzalez^e, G. P. Guedes^f, E. Kemp^e, H. P. Lima Jr^a, G. S. Lopes^b, R. Machado^a, J. Marcelo^g, M. L. Migliorini^b, R. A. Nobrega^b, I. M. Pepe^g, A. L. M. Reis^c, D. B. S. Ribeiro^g, O. B. Rodrigues^e, L. M. Santos^e, S. M. V. Santos^c, E. F. Simas Filho^g, D. M. Souza^b, M. J. N. Souza^h, G. A. Valdiviesso^c, S. Wagnerⁱ

^a*Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, CBPF, Rio de Janeiro-RJ, Brasil*

^b*Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF, Juiz de Fora-MG, Brasil*

^c*Universidade Federal de Alfenas, UNIFAL-MG, Poços de Caldas-MG, Brasil*

^d*Universidade Estadual de Londrina, UEL, Londrina-PR, Brasil*

^e*Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas-SP, Brasil*

^f*Universidade Estadual de Feira de Santana, UEFS, Feira de Santana-BA, Brasil*

^g*Universidade Federal da Bahia, UFBA, Salvador-BA, Brasil*

^h*Universidade Federal do Oeste da Bahia, UFOB, Barra-BA, Brasil*

ⁱ*Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC, Rio de Janeiro-RJ, Brasil*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. O Modelo Padrão das partículas elementares	31
Figura 2. Diagramas de Feynman de interações de neutrinos para interações de corrente carregada e corrente neutra	34
Figura 3. Comparação dos termos S_i da equação 7 e suas influências individuais na probabilidade de sobrevivência para neutrinos de 3 MeV	39
Figura 4. Probabilidade de sobrevivência de um neutrino eletrônico de 3 MeV em função da distância percorrida	41
Figura 5. Hierarquias normal e invertida de massa	42
Figura 6 – Tubos fotomultiplicadores.....	45
Figura 7. Representação do funcionamento de uma fotomultiplicadora	46
Figura 8. Sinal de uma fotomultiplicadora Hamamatsu R5912, operando com ganho 10^7	46
Figura 9. Crate de instrumentação CAEN misto, com conectores para módulos padrão VME à esquerda e conectores para módulos NIM à direita.	49
Figura 10. O detector Super-KamiokaNDE.....	51
Figura 11. O detector do Sudbury Neutrino Observatory	52
Figura 12. Número de eventos de decaimento beta inverso em reatores nucleares, para cada isótopo, em função da energia	53
Figura 13. Taxa de decaimentos beta inverso (linha preta) como um produto do fluxo de antineutrinos do reator (linha vermelha) e a seção de choque da reação (linha azul)..	53
Figura 14. Evolução temporal das taxas de fissão fracionadas durante um ciclo de combustível nuclear típico	54
Figura 15. Esquemático do detector KamLAND	56
Figura 16. Mapa do experimento RENO. Os pontos vermelhos são reatores nucleares e os pontos amarelos são os detectores	59
Figura 17. Esquerda: Desenho esquemático do detector do experimento RENO....	59
Figura 18. Taxas médias medidas de neutrinos dos reatores após a subtração do background.....	60
Figura 19. Esquerda: Mapa do experimento Double-Chooz.....	62

Figura 20. Espectro de energia dos neutrinos (pontos pretos) sobrepostos a predição sem oscilação (linha azul) e ao melhor ajuste considerando oscilações de neutrinos (linha vermelha) nos dados de 2012 do experimento Double-Chooz	62
Figura 21. Ajuste RRM (reactor rate modulation) dos dados com termalização dos nêutrons em gadolínio e em hidrogênio	63
Figura 22. Mapa do experimento Daya Bay	65
Figura 23. Esquerda: Vista esquemática dos detectores de Daya Bay. Direita: EH3 com 3 dos 4 detectores instalados	65
Figura 24. Acima: Espectro de energia medido no EH3 em Daya Bay, após a subtração do background, comparado com a predição desconsiderando a oscilação de neutrinos, baseada nos dados dos halls experimentais próximos. Abaixo: Medidas e melhor ajuste para $\text{sen}^2(2\theta_{13})$	66
Figura 25. Sumário das principais medidas de $\text{sen}^2(2\theta_{13})$ apresentadas pelos experimentos entre 2011 – 2016.....	67
Figura 26. Mapa do experimento JUNO, com detalhe para a localização do experimento Daya Bay, algumas centrais nucleares (NPP) e cidades importantes locais.	69
Figura 27. Probabilidade de sobrevivência do ν_e em função da distância da central nuclear.	69
Figura 28. Vista esquemática do detector do experimento JUNO.....	69
Figura 29. Gráficos das medidas de neutrinos em base horária no experimento SONGS1.....	72
Figura 30. Taxas mensais de antineutrinos detectados diariamente no reator SONGS, ao longo de 16 meses, correlacionadas à potência do reator	72
Figura 31. Detector do experimento MiniCHANDLER	73
Figura 32. Esquerda: o Laboratório de Neutrinos Móvel do experimento MiniCHANDLER. Direita: o laboratório móvel ao lado do edifício do reator 2 da usina nuclear de North Anna.	74
Figura 33. Histograma de Δt para todos os eventos de 1-20 MeV	75
Figura 34. Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto.	76
Figura 35. Mapa da usina de Angra dos Reis e arredores, com as posições dos detectores do Projeto Neutrinos Angra marcadas.....	78

Figura 36. Esquemático do detector proposto do Projeto Neutrinos Angra, mostrando seus componentes principais	79
Figura 37. Contêiner-laboratório do Projeto Neutrinos Angra.....	81
Figura 38. Detector do Projeto Neutrinos Angra, como projetado	82
Figura 39. O detector construído e entregue originalmente, com destaque para o Target.....	83
Figura 40. Target e tampa do detector novos.....	84
Figura 41. Ademarlaudo França Barbosa.....	85
Figura 42. As PMTs montadas na tampa do detector ao lado dos pesquisadores, da esquerda para a direita: Carlos Eduardo Tanajura, Germano Guedes, Iuri Pepe e João dos Anjos.....	87
Figura 43. Esquerda: pulsador de LED de alto brilho. Direita: detalhe dos LEDs do pulsador.....	89
Figura 44. Sequência de retirada do Target do detector e disposição para trabalho interno.	90
Figura 45. Esquerda: bancada de corte de Tyvek®. Direita: furação do Tyvek®.....	91
Figura 46. Refletor de polipropileno revestido com Tyvek® e com os 4 espaços para PMTs centrais recortados. Ao lado, vista posterior do outro refletor	91
Figura 47. Limpeza do Target e montagem das PMTs no fundo do tanque	92
Figura 48. O Target com 4 PMTs e o pulsador de LEDs.....	93
Figura 49. Tampa provisória de madeira do Target, fechando-o.....	93
Figura 50. Representação do sistema de detecção de coincidência e sistema instalado no rack NIM, com detalhe para o inversor de sinal	95
Figura 51. Fotomultiplicadoras montadas em seus copos e régua, aguardando montagem no Target	96
Figura 52. Esquerda: nova tampa do Target, fechando-o. Direita: “caverna” no Shielding.....	97
Figura 53. 16 PMTs no fundo do Target.....	98
Figura 54. Acima: instalação de PMT no veto inferior	99
Figura 55. Suporte para fotomultiplicadora do veto lateral	100
Figura 56. Esquerda: veto superior durante montagem. Direita: detalhe da PMT no veto superior.....	101
Figura 57. Esquerda: Target sendo esvaziado. Direita: limpeza das PMTs in loco	102

Figura 58. Esquerda: Shielding. Direita: Target; ambos forrados com Tyvek®	102
Figura 59. Vista inferior da tampa do Target instrumentada com PMTs e iluminadores a LED	103
Figura 60. Target completo montado no Shielding	103
Figura 61. Duas das 4 PMTs do veto lateral montadas na placa 3 da tampa do Shielding.....	104
Figura 62. Representação da ordem das placas de polipropileno na tampa do Shielding.....	104
Figura 63. Veto superior com Tyvek suspenso e nível de água baixo.....	106
Figura 64. Iluminadores a LED da tampa do Target com particulado ferruginoso precipitado.....	107
Figura 65. Shielding em movimentação para o contêiner.....	109
Figura 66. Representação do passo-a-passo de entrada do detector no contêiner	109
Figura 67. Montagem do veto superior na usina Angra II	110
Figura 68. Montagem das PMTs no fundo do Target	110
Figura 69. Target instrumentado, com detalhe para revestimento das laterais e do refletor com Gore® e para os 6 iluminadores a LED instalados no refletor	111
Figura 70. Tampa do Target instrumentada, com refletor revestido com Gore®.....	111
Figura 71. Detector completo montado, na entrada do contêiner.....	112
Figura 72. Representação do circuito hidráulico empregado no enchimento do detector	113
Figura 73. Sistema de aquisição de dados do detector instalado em Angra II	114
Figura 74. Diagrama do sistema de aquisição de dados do Projeto Neutrinos Angra	115
Figura 75. Número de eventos de coincidência em função do threshold de uma PMT em um arranjo com 4 PMTs	117
Figura 76. Número de eventos detectados em coincidência pelas PMTs usando um pulsador de LEDs.....	118
Figura 77. Mapeamento das PMTs do detector como está instalado em Angra II .	119
Figura 78. Curvas de tensão de resposta da fotomultiplicadora SD2850, operando com ganho da ordem de 10^7	121
Figura 79. Curva de saturação da eletrônica de aquisição de sinal	121

Figura 80. Esquerda: espectro de carga obtido no Target. Direita: Amplitude relativa do pico de múons – entre 75 mil e 100 mil DUQs no gráfico da esquerda..... 122

Figura 81. Tempo entre eventos no Target 123

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 1. Partículas do Modelo Padrão.....	33
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABACC	Agência Brasileiro-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares
ACU	<i>Automatic Calibration Unit</i>
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
AEIA	Agência Internacional de Energia Atômica
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
B	Boro
Ba	Bário
Be	Berílio
C	Carbono
CBPF	Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
CCD	<i>Charged Coupled Device</i>
CERN	<i>Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire</i>
CHANDLER	<i>Carbon Hydrogen Anti-Neutrino Detector with a Enhanced Raghavan optical lattice</i>
Cl	Cloro
CNAANA	Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CNO	Carbono – Nitrogênio – Oxigênio
CONNIE	<i>Coherent Neutrino Nucleus Interaction Experiment</i>
CP	Carga-Paridade
Cs	Césio
DC	<i>Double Chooz</i>
DB	<i>Daya Bay</i>
DUQ	<i>Digital Unity of Charge</i>
EH	<i>Experimental Hall</i>
FAPERJ	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro
FD	<i>Far Detector</i>
FEE	<i>Front-End Electronics</i>

Fermilab	<i>Fermi National Accelerator Laboratory</i>
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
GALLEX	<i>Gallium Experiment</i>
Gd	Gadolínio
GNO	<i>Gallium Neutrino Experiment</i>
He	Hélio
ID	<i>Inner Detector</i>
IAV	<i>Internal Acrylic Vessel</i>
IH	<i>Inverted Hierarchy</i>
J-PARC	<i>Japan Proton Accelerator Research</i>
JUNO	<i>Jiangmen Underground Neutrino Observatory</i>
KamiokaNDE	<i>Kamioka Nucleon Decay Experiment</i>
KamLAND	<i>Kamioka Liquid Scintillator Antineutrino Detector</i>
LAPO	Laboratório de Propriedades Óticas
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
LHCb	<i>Large Hadron Collider beauty</i>
LSD	Laboratório de Sistemas Distribuídos
M.W.E.	<i>Meters of Water Equivalent</i>
N	Nitrogênio
ND	<i>Near Detector</i>
NDAQ	<i>Neutrino Data Acquisition</i>
NH	<i>Normal Hierarchy</i>
NIM	<i>Nuclear Instrument Module</i>
NMSM	<i>New Minimal Standard Model</i>
NPT	<i>Non Proliferation Treaty</i>
OAV	<i>Outer Acrylic Vessel</i>
OD	<i>Outer Detector</i>
Pb	Chumbo
PMNS	Pontecorvo – Maki – Nakagawa – Sakata
PMT	<i>Photomultiplier</i>
Po	Polônio
Pu	Plutônio

PVC	Policloreto de vinila
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i>
RENAFAE	Rede Nacional de Física de Altas Energias
RENO	<i>Reactor Experiment for Neutrino Oscillation</i>
RRM	<i>Reactor Rate Modulation</i>
SAGE	<i>Soviet American Gallium Experiment</i>
SBC	<i>Single Board Computer</i>
SCCC	Sistema Comum de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares
SNO	<i>Sudbury Neutrino Observatory</i>
SNU	<i>Solar Neutrino Unit</i>
SONGS	<i>San Onofre Nuclear Generating Station</i>
SSV	<i>Stainless Steel Vessel</i>
U	Urânio
UFBA	Universidade Federal da Bahia
VME	<i>VERSA Module Europa</i>
VND	<i>Very Near Detector</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

m_W	Massa do bóson W
m_Z	Massa do bóson Z
m_H	Massa do bóson de Higgs
W_{th}	Potência térmica
θ	Ângulo de oscilação de sabor de neutrinos
$P_{\nu_i \rightarrow \nu_j}$	Probabilidade de oscilação de sabor de neutrinos
$P_{\nu_i \rightarrow \nu_i}$	Probabilidade de sobrevivência de um sabor de neutrinos
Δm_{ij}^2	Diferença de massa dos estados de neutrinos
L	Distância percorrida pelo neutrino
E	Energia do neutrino
c	Velocidade da luz no meio
n	Velocidade da partícula no meio
$E_{\bar{\nu}_e}$	Energia do antineutrino
E_{e^+}	Energia do pósitron
T_n	Energia cinética do nêutron
m_n	Massa do nêutron
m_p	Massa do próton
G	Ganho da fotomultiplicadora
V_d	Tensão entre dinodos da fotomultiplicadoras
N_f	Número de antineutrinos produzidos por segundo em reator
P_{th}	Potência térmica
W	Energia liberada na reação físsil
R_D	Taxa de interações de antineutrinos com um detector
$\langle \sigma \rangle$	Seção de choque média do antineutrino
N_T	Número de possíveis alvos para um antineutrino
N_ν	Taxa de eventos de neutrinos
q	Energia emitida por fissão do elemento
f	Taxa de fissão do elemento
D	Função de produção de neutrinos para o elemento
N_{LED}	Número de contagens em função da frequência do LED

1. Sumário	
1. INTRODUÇÃO	22
1.1 OBJETIVOS	23
1.1.1 Objetivo geral	23
1.1.2 Objetivos específicos	23
1.1.3 Justificativa	24
1.2 CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO	25
1.3 MAPA DOS CAPÍTULOS	26
2. REVISÃO DA LITERATURA	28
2.1 O NEUTRINO	28
2.1.1 O Modelo Padrão	30
2.1.2 A interação fraca	34
2.1.3 Fontes de neutrinos	35
2.1.4 Oscilação de neutrinos	36
2.2 DETECÇÃO DE NEUTRINOS	42
2.2.1 Detecção da reação de decaimento beta	42
2.2.2 Fotomultiplicadoras – PMTs	44
2.2.3 Aquisição de dados	46
2.3 EXPERIMENTOS COM NEUTRINOS	49
2.3.1 Experimentos com neutrinos solares	49
2.3.1.1 Homestake	49
2.3.1.2 Kamioka Nucleon Decay Experiment (KamiokaNDE)	50
2.3.1.3 Super-KamiokaNDE	50
2.3.1.4 Sudbury Neutrino Observatory (SNO)	51
2.3.2 Experimentos com neutrinos de reatores	52
2.3.2.1 Kamioka Liquid Scintillator Antineutrino Detector (KamLAND)	55
2.3.2.2 Reactor Experiment for Neutrino Oscillation (RENO)	58
2.3.2.3 Double-Chooz (DC)	60
2.3.2.4 Daya Bay	63
2.3.2.5 Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO)	68

2.3.3	Salvaguardas nucleares.....	70
2.3.3.1	San Onofre Nuclear Generating Station (SONGS).....	71
2.3.3.2	MiniCHANDLER.....	73
2.4	O PROJETO NEUTRINOS ANGRA.....	76
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	86
3.1	MONTAGEM DO DETECTOR NO CBPF.....	86
3.2	TRANSPORTE À USINA NUCLEAR DE ANGRA DOS REIS.....	106
3.3	MONTAGEM DO DETECTOR EM ANGRA DOS REIS.....	109
3.4	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS INSTALADO.....	113
4.	RESULTADOS.....	117
5.	CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS.....	124
6.	REFERÊNCIAS.....	126
7.	APÊNDICE A – Artigos publicados.....	134
8.	APÊNDICE B – Modelo e desenho do detector construído.....	166
9.	ANEXO A – Desenho original do detector de neutrinos. Autor: Guilherme P. A. Magalhães (Apresentação realizada em 25 de agosto de 2011)......	171
10.	ANEXO B – Desenho do engradado para o veto inferior. Autor: Iuri M. Pepe.....	198
11.	ANEXO C – Desenho da tampa nova. Autor: Iuri M. Pepe.....	199
12.	ANEXO D – Desenho do novo suporte de PMT do veto lateral. Autor: Iuri M. Pepe.....	200
13.	ANEXO E – Final Test Sheet das Fotomultiplicadoras R5912. Autor: Hamamatsu Photonics.....	201

1. INTRODUÇÃO

O Prêmio Nobel de 2015, concedido aos pesquisadores Takaaji Kajita e Arthur B. McDonald pelas suas pesquisas com neutrinos, chamou mais uma vez a atenção do mundo para essas partículas tão elusivas. Todavia, para a comunidade científica, neutrinos já eram um dos temas mais fervilhantes em pesquisas, resultados e perspectivas. Há diversos experimentos em execução ao redor do mundo dedicados à detecção e medida das propriedades dos neutrinos, o conhecimento atual sobre essa partícula é fruto de várias pesquisas de sucesso que lançaram luz a ela.

O neutrino é uma partícula subatômica associada à reação de decaimento beta e ao lépton — elétron, múon ou tau — resultante desta. Inicialmente considerada como de massa nula, hoje sabe-se que possui massa real, não nula e que seu sabor pode oscilar entre os três léptons, determinando a mudança da sua massa, sua característica principal. Como não interage eletromagneticamente nem através da força forte, sua capacidade de atravessar sem interagir com meios materiais é virtualmente absoluta, tornando a observação dessa partícula muito difícil.

Os experimentos com neutrinos em execução atualmente têm como objetivo conhecer os detalhes das oscilações de sabor dos neutrinos, ou utilizá-los como mediadores portadores de informações acerca dos materiais que os emitiram, como os combustíveis nucleares. O decaimento beta é uma das reações que ocorrem nas estrelas e em reatores nucleares e, portanto, neutrinos são emitidos em ambos processos, em grande quantidade.

A taxa de emissão de neutrinos advindos de reatores nucleares depende do combustível físsil empregado e da potência térmica do reator. Assim, o monitoramento do fluxo de neutrinos é também um monitoramento indireto e não invasivo da própria usina nuclear.

O único complexo de geração de energia elétrica, a partir de energia nuclear, do Brasil é a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAEA) — que compreende as usinas nucleares de Angra 1, Angra 2 e o sítio de construção da futura usina Angra 3; administrada pela Eletronuclear, empresa subsidiária da Eletrobrás.

O Brasil é signatário do Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares e a Comissão Nacional de Energia Nuclear é responsável por realizar pesquisas,

coordenar e fiscalizar o emprego de tecnologia nuclear em solo brasileiro. A Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) é o órgão supranacional que fiscaliza os programas nucleares das nações, para garantir que em determinado país não está acontecendo o desenvolvimento de armas atômicas. Além disso, esta agência estabelece as salvaguardas nucleares.

As salvaguardas nucleares são procedimentos e condutas adotadas pelas nações para atestar à comunidade internacional, ou cobrar desta idoneidade no manejo de tecnologias nucleares, visto que o descaminho de materiais, divergência na metodologia de armazenamento e o controle da fabricação de radioisótopos, podem ter consequências catastróficas. A visita a usina nuclear por parte das comissões internacionais da AIEA é o exemplo mais conhecido de produção de salvaguardas nucleares; entretanto, esta exige a parada da produção energética e muitas vezes a exposição de segredos tecnológicos estratégicos.

Os países detentores de tecnologia nuclear têm especial interesse no desenvolvimento de salvaguardas nucleares que não imponham o desligamento dos reatores, nem exponham a tecnologia empregada. Nesse contexto, este trabalho tem especial importância ao propor um detector de neutrinos de reator nuclear, para ser disposto ao lado do edifício do reator da usina — pequeno e de design único, que pode ser reposicionado à conveniência. Ao realizar a detecção dessas partículas, o detector fornece informações sobre o combustível que está sendo empregado e a potência térmica do reator, ou seja, é uma inspeção indireta e não invasiva da usina, produzindo as salvaguardas nucleares almejadas sem os inconvenientes dos métodos tradicionais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Realizar a montagem final e instalação do detector de neutrinos do projeto Neutrinos Angra na usina nuclear de Angra 2 e comissionar o detector instalado.

1.1.2 Objetivos específicos

- Documentar o detector construído.

- Montar o detector em ambiente de testes, no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, detalhando as etapas envolvidas nesse processo.
- Desmontar o detector e prepará-lo para transporte à usina de Angra dos Reis.
- Sistematizar os processos de montagem e desmontagem do detector.
- Descrever a instrumentação de aquisição de dados instalada.

1.1.3 Justificativa

O projeto Neutrinos Angra é uma colaboração entre 9 instituições de ensino e pesquisa, capitaneadas pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), que visa estudar o fluxo de neutrinos gerados no reator nuclear da usina de Angra 2, para determinar de forma indireta e não invasiva a potência térmica do reator e realizar a caracterização do combustível físsil empregado.

As salvaguardas nucleares produzidas pelos dados fornecidos pelo detector contribuirão para atestar a posição brasileira de uso pacífico da energia nuclear, sem expor sigilos tecnológicos estratégicos.

A instalação de um detector de neutrinos de alta sensibilidade e de tamanho reduzido, o suficiente para ser colocado dentro de um contêiner naval, disposto ao lado do edifício do reator de uma usina nuclear, é uma oportunidade sem precedentes no mundo.

O sucesso desse projeto não apenas abre perspectivas para a continuidade das pesquisas em neutrinos de reatores nucleares, como permitirá o desenvolvimento de detectores cada vez menores e mais compactos que poderão auxiliar a produção de salvaguardas nucleares em outros países.

Este trabalho contempla o processo de montagem, instrumentação e comissionamento do detector de neutrinos do projeto Neutrinos Angra, desde sua montagem para testes no CBPF até sua instalação final na usina nuclear de Angra 2.

1.2 CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

O trabalho de pesquisa reportado nesta tese de doutoramento teve como principal contribuição o desenvolvimento do design, do projeto mecânico e de instrumentação, o transporte, a montagem e a instalação, nas dependências da Central Nuclear de Angra dos Reis, do detector de neutrinos do Projeto Neutrinos Angra, capitaneado pelo CBPF – Rio de Janeiro.

O trabalho que ora é apresentado na forma de texto dissertativo é um trabalho de cunho experimental, em engenharia, cuja entrega maior é o detector em si, alocado à 30 m do núcleo do reator, apto a ser usado na coleta de dados de intensidade do fluxo de neutrinos produzidos pelo reator 2 da Usina de Angra.

Neste sentido foram empregados diferentes recursos e ferramental de engenharia, que possibilitaram, partindo de um primeiro modelo de detector sem grande valor operacional, chegar ao detector entregue e validado na usina.

No que tange o aprimoramento do desenho do protótipo final, cada um dos 3 volumes do detector recebeu contribuições de geometria, da preparação das paredes para otimização da refletância interna, além de profundas modificações estruturais, permitido que o detector suportasse o seu próprio peso, assim como o peso da água nele contido uma vez que se trata de um detector do tipo *Cherenkov*.

No que diz respeito à instrumentação foram dadas contribuições importantes no sistema de detecção dos detectores de veto superior e inferior, inclusive uma adaptação mecânica e transparente para aumentar a capacidade de suporte de carga do detector de veto inferior. Foi encontrada a melhor maneira de aceder com os cabos de alta tensão das 32 fotomultiplicadoras que equipam o detector central ou *Target*, além da melhor forma de ter acesso com os cabos e conexões de água para cada um dos 3 volumes do detector.

É importante ressaltar que o Projeto Neutrinos Angra é uma colaboração com 19 membros, cuja dinâmica de trabalho precisa ser, por definição e na prática, cooperativa. Esta estrutura cooperativa de trabalho em rede de pessoas e instituições levou a contribuições para a literatura, já com a participação do autor dessa tese, como listado a seguir:

- 1) *Using neutrinos to monitor nuclear reactors: the Angra Neutrino Experiment, simulation and detection status*. Publicado na Nuclear and Particle Physics Proceedings, 2015.
- 2) *Readout electronics validation and target detector assessment for the Neutrinos Angra experiment*. Publicado na Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2016.
- 3) *Neutrinos Angra experiment: commissioning and first operational measurements*. Publicado no Journal of Instrumentation, 2019.
- 4) *Sistema online de seleção de eventos no detector Neutrinos Angra*. Publicado no Congresso Brasileiro de Automática, 2016.
- 5) *Avaliação do sistema de veto do Experimento Neutrinos Angra*. Publicado no Congresso Brasileiro de Automática, 2016.
- 6) *ν -Angra readout electronics and target detector assessment using a cosmic rays based trigger*. Publicado no International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers, 2018.
- 7) *Signal simulation based on characteristics of the ν -Angra Experiment's readout electronics*. Publicado no International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers, 2018.
- 8) *Neutrinos Angra Experiment: Assembly of the antineutrino detector at Angra 2 nuclear power plant*. Publicado no XXXIX Encontro Nacional de Partículas e Campos, 2018.

1.3 MAPA DOS CAPÍTULOS

Após a apresentação do tema neste capítulo, o segundo capítulo desta tese apresenta uma breve contextualização da física do problema, a revisão da literatura.

O terceiro capítulo se refere aos materiais e métodos utilizados para a montagem e comissionamento do detector. Neste capítulo serão abordados: (i) as etapas da montagem no CBPF, (ii) o preparo para o transporte à usina nuclear de Angra dos Reis, (iii) a montagem do detector na usina, (iv) e a descrição dos equipamentos de aquisição de dados instalados e seu funcionamento.

O quarto capítulo descreve os principais resultados da montagem, dos testes realizados no CBPF e em Angra dos Reis e realiza algumas discussões pertinentes.

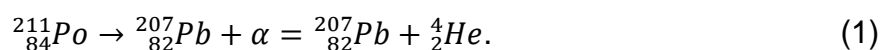
O quinto capítulo apresenta as conclusões, bem como, as sugestões de desenvolvimentos futuros e perspectivas na área, baseados nos resultados e prognósticos do detector uma vez montado.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 O NEUTRINO

A descoberta da radioatividade por Henry Becquerel, no final do século XIX, marcou a entrada da humanidade na era nuclear. Foram descobertas três reações de decaimento nuclear principais — alfa, beta e gama, em ordem crescente de energia liberada e de acordo com partícula, ou energia, liberada.

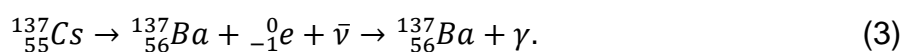
A reação alfa é a emissão de uma partícula alfa — hoje conhecida por ser equivalente a um núcleo de hélio, com dois prótons e dois nêutrons — de um núcleo instável, resultando em um núcleo filho, dois números atômicos e quatro números de massa menor, como no exemplo,



A reação beta, de maior interesse, explorada neste trabalho, é, resumidamente, quando uma partícula nuclear, próton ou nêutron, se transforma na outra, liberando ou capturando um elétron ou pósitron e um neutrino ou antineutrino, este último representado pela letra grega ν . O núcleo filho mantém o mesmo número de massa, mas seu número atômico varia em uma unidade. É a reação de decaimento responsável por muitas aplicações do cotidiano como, por exemplo, a datação por Carbono-14, em que se mede a quantidade de Carbono-14 presente no organismo, tendo em vista a meia-vida desse isótopo e a reação de decaimento,



A reação gama é a emissão de um fóton de energia, de comprimento de onda dos raios gama, pelo núcleo excitado. É a emissão mais energética entre as citadas, pois os níveis de energia dos núcleos são da ordem de mega-eletronvolts (MeV), determinando a energia dos fótons emitidos. Neste caso, não há transformação de partículas nucleares. O césio 137, elemento responsável pelo acidente radiológico de Goiânia, em 1987, sofre um decaimento beta e em seguida um decaimento gama, emitindo finalmente um fóton de 0,6617 MeV:



A energia observada no decaimento beta parecia infringir a lei da conservação da energia, de acordo com os experimentos realizados em 1911 e 1927 (Bayer, Hahn e Meitner, 1911) (Ellis e Wooster, 1927). Enquanto a comunidade de físicos se dividia sobre a universalidade da lei de conservação, Wolfgang Pauli, em 1930, propôs a existência de uma partícula, emitida junto ao elétron no decaimento beta que carregaria a energia necessária a satisfazer a conservação da energia. Na carta enviada a Lisa Meitner para ser lida na conferência de Tübingen, Alemanha, intitulada *Liebe Radioaktive Damen und Herren*¹, Pauli propunha uma partícula eletricamente neutra e provavelmente sem massa, que recebeu o nome temporário de partícula X (Caicedo, 2010).

Dois anos depois, em 1932, James Chadwick descobriu uma partícula sem carga elétrica que poderia ser a partícula X de Pauli, porém, logo foi descartada como tal devido à massa muito maior que a do elétron. Esta partícula foi denominada nêutron.

Enrico Fermi, em 1934, desenvolveu uma teoria para explicar o decaimento beta, incorporando a partícula X sob o nome de neutrino para diferenciá-la do nêutron de Chadwick. A teoria de Fermi previu também a reação beta inversa — quando um neutrino ou antineutrino é capturado por um núcleon,



A observação de neutrinos foi realizada pela primeira vez em 1956, por Frederick Reines e Clyde Cowan, que observaram a reação beta inversa utilizando um reator nuclear como fonte de antineutrinos de 1 MeV e um detector de 200 litros de água com cloreto de cádmio, observando o pósitron e o nêutron produzidos na reação, confirmando-a.

¹ Prezados senhoras e senhores radioativos.

Ao longo dos anos seguintes muitos resultados importantes emergiram, como a descoberta de helicidade levógira dos neutrinos e a detecção de antineutrinos. Em 1960 foi observado o neutrino do múon e em 1975 foi descoberto o neutrino do tau, sendo este observado diretamente em 2000 no Fermilab. Múon e tau são léptons instáveis e mais pesados que o elétron, produzidos nas interações entre raios cósmicos com átomos da atmosfera da Terra ou em aceleradores de partículas (Caicedo, 2010).

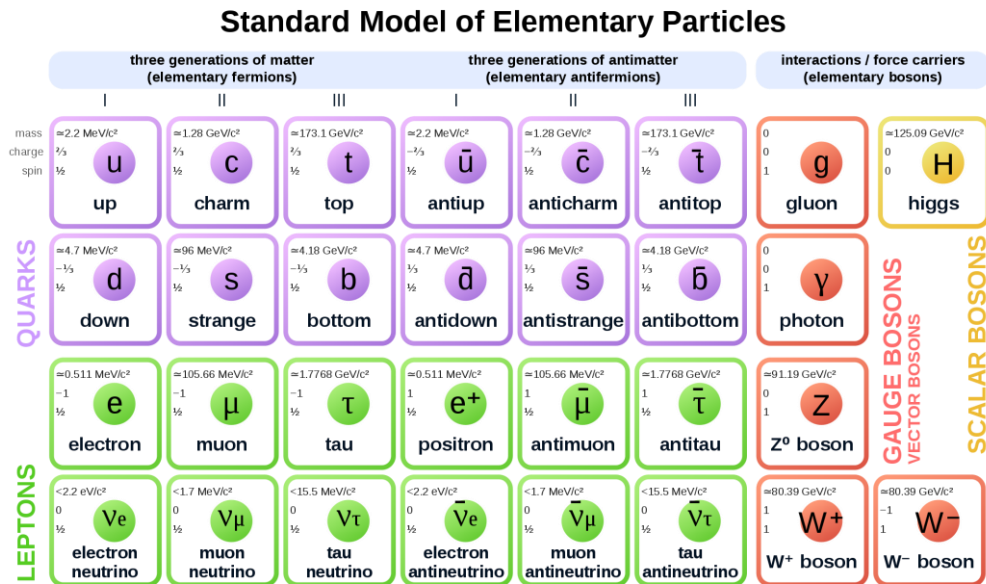
Em 1968 iniciaram-se os experimentos com neutrinos solares, entretanto, o número de neutrinos detectados foi, repetidamente, muito inferior ao previsto. Esta diferença ficou conhecida como o problema do neutrino solar. O mesmo problema também foi observado em experimentos com neutrinos atmosféricos. Enquanto que estes neutrinos são muônicos e aqueles, eletrônicos, o comportamento discrepante em relação à teoria era o mesmo.

Para propor uma solução, Gribov e Pontecorvo, também em 1968, previram a oscilação dos neutrinos. Segundo essa hipótese, um neutrino de determinado sabor poderia se transformar em neutrino de outro sabor conforme se propaga no espaço. Isso explicaria a baixa contagem de neutrinos nos experimentos em relação ao esperado, pois os aparatos montados apenas mediram um determinado sabor de neutrino, deixando de detectar os demais.

2.1.1 O Modelo Padrão

O Modelo Padrão da Física de Partículas é a teoria mais aceita que compreende os constituintes elementares da matéria e as interações fundamentais presentes no universo. Nesta formulação os elementos são classificados em férmions e bósons, sendo que estes seguem a estatística de Bose-Einstein e aqueles à de Fermi-Dirac e ao Princípio de Exclusão de Pauli. A Figura 1 mostra as partículas descritas no Modelo Padrão.

Figura 1. O Modelo Padrão das partículas elementares.



FONTE: Acesso em:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles_Anti.svg.

Acessado em 23/02/2019.

São os férmions as partículas correspondentes à matéria, com spin semi-inteiro, descritas pelo sabor:

- 6 quarks – up, down, charm, strange, top e bottom; são os componentes das partículas nucleares.
- 6 léptons – elétron, múon e tau; e um neutrino associado a cada um destes.

Os quarks, além do sabor, possuem também carga de cor, podendo ser vermelho, azul ou verde.

Os bósons são as partículas que intermediam interações e possuem spin inteiro:

- glúons – interação forte.
- fótons – interação eletromagnética
- W^\pm e Z^0 – interação fraca.
- Higgs – responsável pela massa dos outros bósons.

Enquanto que os glúons e os fótons são bósons sem massa, W^\pm e Z^0 são massivos — $m_W \sim 80,4 \text{ GeV}/c^2$ e $m_Z \sim 91,2 \text{ GeV}/c^2$ — e o bóson de Higgs — $m_H \sim 125$

GeV/c^2 e spin 0 — é o responsável pela quebra de simetria que confere massa não somente aos outros bósons como também aos férmions.

Cada partícula no Modelo Padrão possui sua antipartícula, igual em massa, mas oposta em seus números quânticos, como carga elétrica, spin, helicidade, etc. Entretanto, algumas partículas são suas próprias antipartículas, a exemplo do fóton; supostamente os neutrinos também seriam. São essas as partículas ditas de Majorana.

As partículas formadas por quarks, os hádrons, são divididas em bárions — com 3 quarks, como o próton e o nêutron, por exemplo — ou em mésons, com um quark e um anti-quark, a exemplo do píon.

O sabor dos férmions pode ser alterado a partir da interação com um bóson W^\pm e a cor dos quarks através da interação mediada por glúons. Os elétrons, múons e taus podem interagir eletromagneticamente mediados por fótons, ou interagem fracamente mediados pelos bósons W^\pm e Z^0 , enquanto que os neutrinos somente interagem por intermédio da força fraca, pois não possuem carga elétrica.

O bóson que media uma interação também determina o alcance desta. Os glúons atuam em distâncias da ordem de 10^{-15} m e os bósons W^\pm e Z^0 na ordem de 10^{-18} m. Os fótons têm alcance infinito de acordo com a teoria eletromagnética. Por esta razão, a força forte somente é percebida no interior do núcleo atômico, a força fraca apenas na atuação entre partículas e o eletromagnetismo tem alcance infinito.

Em virtude de as interações fraca e eletromagnética ocorrerem em léptons, e ambas estarem contempladas no Modelo Padrão, foi possível unificá-las na teoria eletrofraca. Por outro lado, a interação gravitacional, descrita brilhantemente na Teoria da Relatividade Geral, ainda não pôde ser descrita satisfatoriamente em termos do Modelo Padrão e seu bóson previsto, o gráviton, nunca foi evidenciado experimentalmente.

O Quadro 1 mostra algumas propriedades das partículas do Modelo Padrão:

Quadro 1. Partículas do Modelo Padrão.

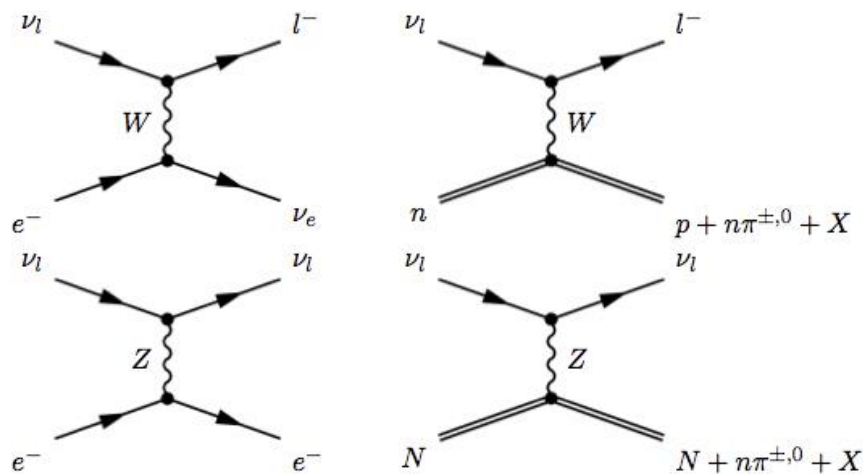
QUARKS		
Quarks	Massa	Carga elétrica
<i>up (u)</i>	$2,3^{+0,7}_{-0,5} \text{ MeV}/c^2$	$+2/3$
<i>down (d)</i>	$4,8^{+0,7}_{-0,3} \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$
<i>strange (s)</i>	$95 \pm 5 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$
<i>charm (c)</i>	$1,275 \pm 0,025 \text{ GeV}/c^2$	$+2/3$
<i>bottom (b)</i>	$4,65 \pm 0,03 \text{ GeV}/c^2$	$-1/3$
<i>top (t)</i>	$173,5 \pm 0,6 \pm 0,8 \text{ GeV}/c^2$	$+2/3$
LÉPTONS		
Léptons	Massa	Carga elétrica
<i>elétron (e)</i>	$0,510998928 \pm 11 \cdot 10^{-9} \text{ MeV}/c^2$	-1
<i>neutrino eletrônico (ν_e)</i>	$< 2 \text{ eV}/c^2$	0
<i>múon (μ)</i>	$105,6583715 \pm 35 \cdot 10^{-7} \text{ MeV}/c^2$	-1
<i>neutrino muônico (ν_μ)</i>	$< 0,19 \text{ MeV}/c^2$	0
<i>tau (τ)</i>	$1776,82 \pm 0,16 \text{ MeV}/c^2$	-1
<i>neutrino tauônico (ν_τ)</i>	$< 18,2 \text{ MeV}/c^2$	0
BÓSONS		
Bósons	Massa	Carga elétrica
<i>photon (γ)</i>	$< 1 \cdot 10^{-18} \text{ eV}/c^2$	0
W^\pm	$80,385 \pm 0,015 \text{ GeV}/c^2$	± 1
Z^0	$91,1876 \pm 0,0021 \text{ GeV}/c^2$	0
<i>gluon (g)</i>	0	0
<i>Higgs</i>	$125 \text{ GeV}/c^2$	0

FONTE: Adaptado de (Caicedo, 2014)

2.1.2 A interação fraca

Os bósons do Modelo Padrão são criados a partir de uma quebra de simetria espontânea conhecida como Mecanismo de Higgs, dando origem às interações forte, fraca e eletromagnética, bem como aos férmions. A interação fraca é mediada pelos bósons carregados W^+ e W^- , e pelo bóson neutro Z^0 determinando, respectivamente, a interação de corrente carregada e de corrente neutra. Os diagramas de Feynman a seguir, na Figura 2, mostram essas interações.

Figura 2. Diagramas de Feynman de interações de neutrinos para interações de corrente carregada e corrente neutra.



FONTE: (Caicedo, 2014).

Na interação de corrente carregada, um lépton absorve ou emite um bóson W^\pm e este decai em par elétron-antineutrino ou pósitron-neutrino. Na interação de corrente neutra, o lépton absorve ou emite um bóson Z^0 e permanece inalterado, enquanto que o bóson decai em um par de neutrinos.

Os bósons W^\pm possuem massa de 80.385 ± 0.015 GeV, carga de ± 1 , spin 1 e isospin fraco de ± 1 . O bóson Z^0 tem massa de 91.1876 ± 0.0021 GeV, carga 0, spin 1 e isospin fraco de 0. Dessa forma, na interação de corrente neutra, não há transmutação de partícula, pois o bóson Z^0 pode alterar spin, momento e energia, mas não os demais números quânticos das partículas.

A interação fraca é a única das interações fundamentais que viola a simetria de Carga-Paridade, uma vez que apenas neutrinos levógiros e antineutrinos dextrógiros participam da interação fraca.

2.1.3 Fontes de neutrinos

Os neutrinos podem ser produzidos em reações naturais, ou serem produzidos pelo homem. As fontes naturais são:

- Neutrinos cosmológicos ou primordiais: produzidos nos primeiros instantes após o Big Bang, estes neutrinos permeiam a radiação cósmica de fundo, similar à radiação cósmica de fundo de fótons.
- Neutrinos estelares: produzidos pelas reações nucleares nas estrelas. O caso mais estudado é, obviamente, o Sol, onde neutrinos podem ser produzidos por várias reações. O Modelo Solar Padrão descreve as reações que produzem neutrinos, classificando-as em duas cadeias - o ciclo CNO (carbono - nitrogênio - oxigênio), responsável por menos de 1,5% do total de neutrinos; e a cadeia pp (próton - próton), que produz o restante nas reações pp, pep (próton - elétron - próton), Hep (Hélio - próton), ^7Be - Berílio e ^8B - Boro (Valdivieso e Guzzo, 2005).
- Neutrinos de supernovas: produzidos em supernovas e em estrelas de nêutrons subsequentes, todos os sabores de neutrinos e antineutrinos são emitidos e podem ser detectados na Terra, como foi, pela primeira vez em 1987, pelo detector Super-Kamiokande (Abrahão, 2012).
- Neutrinos atmosféricos: produzidos pela interação de raios cósmicos com elementos da atmosfera terrestre. As partículas resultantes dessas interações são principalmente kaons e píons, instáveis e que decaem em múons e neutrinos muônicos:



- Geoneutrinos: produzidos pelo decaimento beta dos elementos presentes na Terra e em várias reações nos organismos vivos. Estes neutrinos formam o background de medidas de neutrinos dos detectores, tendo sido detectados pela primeira vez no experimento KamLAND, em 2004, e confirmados pelo experimento Borexino, em 2009.

Os neutrinos produzidos pelo homem advêm de:

- Aceleradores de partículas: neutrinos produzidos a partir do decaimento de partículas produzidas nas colisões dos feixes com o alvo em aceleradores de partículas, a exemplo do Fermilab (*Fermi National Accelerator Laboratory*) ou do J-PARC (*Japan Proton Accelerator Research Complex*), responsáveis por vários experimentos na área.
- Reatores nucleares: a reação de fissão produz uma cascata de decaimentos beta e um fluxo considerável de antineutrinos eletrônicos, proporcional ao combustível nuclear empregado e à potência do reator, em torno de 10^{20} antineutrinos por GW de potência térmica do reator. Esta é a fonte de neutrinos de maior interesse neste trabalho e será discutida em maior detalhe (Soo-Bong Kim, 2016).

2.1.4 Oscilação de neutrinos

No Modelo Padrão da Física de Partículas, o neutrino foi concebido como uma partícula sem massa e sendo sua própria antipartícula — partícula de Majorana. No entanto, o problema do neutrino solar levou a concepção e posterior confirmação das oscilações de neutrinos e estas requerem que as partículas possuam massas não nulas, indo de encontro a sua predição no Modelo Padrão. Há algumas observações na Física, incluindo a massa dos neutrinos, que apontam para a necessidade de se estabelecer um modelo de partículas e interações maior que o Modelo Padrão, o que é chamado de Física Além do Modelo Padrão.

O problema do neutrino solar surgiu a partir do experimento de Homestake, em 1968, em que o fluxo de neutrinos detectado foi de $34 \pm 7\%$ do que estava previsto. Essa discrepância também foi observada em outros experimentos, como o SAGE

(*Soviet-American Gallium Experiment*) e o Super-Kamiokande, que até 2002 detectou $48 \pm 2\%$ do previsto (Valdivieso e Guzzo, 2005).

O modelo que explica a oscilações de neutrinos se baseia no conceito de superposição de estados quânticos para estruturar um neutrino como uma superposição dos 3 sabores possíveis, proporcionais aos coeficientes de mistura de cada sabor. Matematicamente, esta mistura se traduz por

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e_1} & U_{e_2} & U_{e_3} \\ U_{\mu_1} & U_{\mu_2} & U_{\mu_3} \\ U_{\tau_1} & U_{\tau_2} & U_{\tau_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\nu_i = \sum_j U_{ij} \cdot \nu_j. \quad (8)$$

A matriz U é a matriz de mistura, contendo os coeficientes que determinam as proporções de cada sabor. Para um modelo de oscilações de dois sabores, como observado nos experimentos de neutrinos solares, entre neutrinos eletrônicos e muônicos:

$$|\nu_e\rangle = \cos \theta |\nu_1\rangle + \sin \theta |\nu_2\rangle \quad (9)$$

$$|\nu_\mu\rangle = -\sin \theta |\nu_1\rangle + \cos \theta |\nu_2\rangle \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

O ângulo θ é o ângulo de mistura que determina a matriz de mistura e por consequência a superposição de estados de sabor de neutrinos. A probabilidade de observar uma oscilação de neutrino neste modelo, pela conversão de um neutrino eletrônico em muônico, por exemplo, é

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right) \quad (12)$$

em que: Δm^2 é a diferença dos quadrados das massas desses estados, E é a energia relativística e L a distância percorrida pelos neutrinos, também chamada de baseline. A probabilidade de sobrevivência de neutrinos eletrônicos é dada pela diferença entre o total de eventos e a probabilidade da oscilação (Abrahão, 2012),

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right). \quad (13)$$

Para o caso de oscilações dos três sabores de neutrinos, a matriz de mistura, ou matriz de Pontecorvo - Maki - Nakagawa - Sakata (PMNS), é

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & -e^{-i\delta} \sin \theta_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{-i\delta} \sin \theta_{13} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

e os parâmetros necessários para conhecer as oscilações de neutrinos são os três ângulos θ e a fase δ de violação de Carga-Paridade (CP).

A probabilidade de um neutrino eletrônico de energia E ser detectado a uma distância L de sua fonte, usando uma notação simples, é:

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} = S_1 + S_2 + S_3 \quad (15)$$

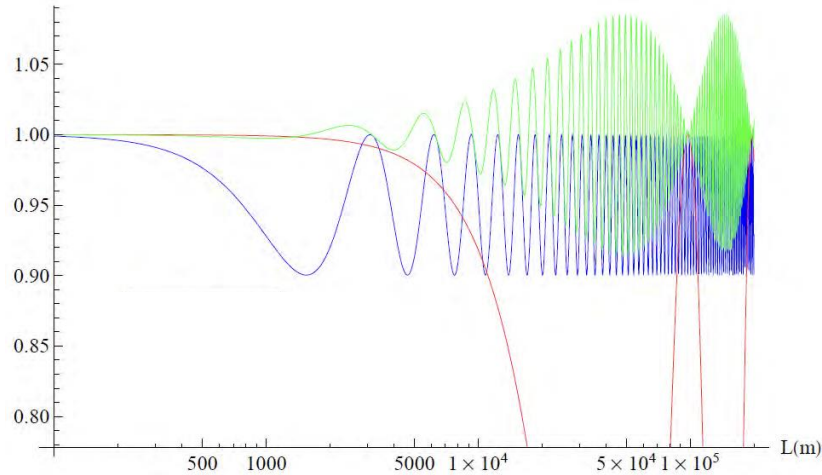
$$S_1 = 1 - \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}\right) \quad (16)$$

$$S_2 = -\cos^4(\theta_{13}) \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}\right) \quad (17)$$

$$S_3 = \frac{1}{2} \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2(\theta_{12}) \left[\cos\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{2E}\right) - \cos\left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{2E}\right) \right]. \quad (18)$$

Cada termo S_i é dado pelos ângulos de mistura e por uma oscilação dependente de Δm^2 . Enquanto que S_1 é determinado por θ_{13} e S_2 por θ_{12} , S_3 é influenciado por ambos, sendo um termo de interferência, com efeito nos *baselines* maiores que 5 km (Pfahler, 2012). A Figura 3 mostra a contribuição de cada termo na probabilidade de sobrevivência de neutrinos em função da distância, para $E = 3 \text{ MeV}$.

Figura 3. Comparação dos termos S_i da equação 7 e suas influências individuais na probabilidade de sobrevivência para neutrinos de 3 MeV. A linha azul representa o comportamento de S_1 , a linha vermelha o comportamento de S_2 e a linha verde representa S_3 .



FONTE: (Pfahler, 2013).

As probabilidades de oscilação de sabor entre os neutrinos eletrônico, muônico e tauônico podem ser simplificadas, no caso de neutrinos de reatores, bem como a probabilidade de sobrevivência de um neutrino eletrônico (Barbosa, 2008) (Lachenmaier, 2015):

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2(\theta_{23}) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right) \quad (19)$$

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\tau} = \sin^2(2\theta_{13}) \cos^2(\theta_{23}) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right) \quad (20)$$

$$P_{\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}} = \sin^2(2\theta_{23}) \cos^4(\theta_{13}) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right) \quad (21)$$

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} = 1 - \sin^2(2\theta_{13}) \left[\cos^2(\theta_{12}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}\right) + \sin^2(\theta_{12}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E}\right) \right] + \quad (22)$$

$$- \cos^4(\theta_{13}) \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}\right)$$

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} = 1 - \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}\right) - \cos^4(\theta_{13}) \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}\right). \quad (23)$$

Os valores de Δm^2 e θ já encontrados são:

$$|\Delta m_{21}^2| = 7,9 \pm 0,28 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2, \quad (24)$$

$$|\Delta m_{31}^2| = 2,6 \pm 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2, \quad (25)$$

$$\theta_{12} = 33,7 \pm 1,3^\circ \text{ e} \quad (26)$$

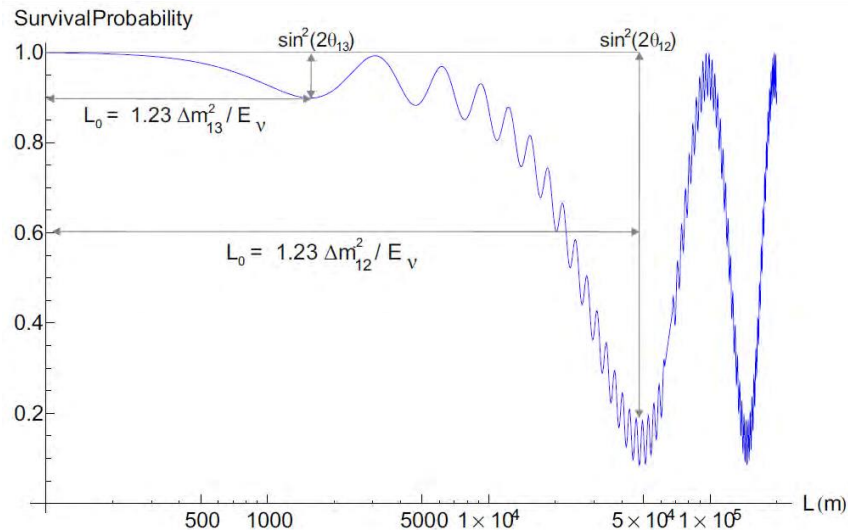
$$\theta_{23} = 43,3 \pm 1,3^\circ. \quad (27)$$

O último ângulo de mistura θ_{13} foi determinado por vários experimentos ao redor do mundo a partir de antineutrinos de reatores, valendo em torno de $8,3^\circ$. Similarmente, Δm_{13}^2 é estimado em torno de 2,62 milésimos de eV^2 (Soo-Bong Kim, 2016). Esses experimentos serão discutidos mais a diante nesse trabalho.

A Figura 4 mostra a probabilidade de sobrevivência de neutrinos em função da distância levando em consideração todos os ângulos de mistura, e por consequência todos os termos da equação geral, e com $E = 3 \text{ MeV}$. A amplitude de oscilação de *baselines* curtos é modulada por $\sin^2(2\theta_{13})$ – com o primeiro máximo em $L_0 = 1,23\Delta m_{13}^2/E_\nu$. Para neutrinos de reatores, essa distância está entre 1 e 5 km. As

oscilações definidas por $\sin^2(2\theta_{12})$ são para longo *baseline*, com pico de oscilação em distâncias da ordem de 50 km (Pfahler, 2013).

Figura 4 – Probabilidade de sobrevivência de um neutrino eletrônico de 3 MeV em função da distância percorrida.



Fonte: (Pfahler, 2013).

Como observado anteriormente, para que os resultados experimentais possam ser explicados utilizando o modelo de oscilações, é necessário que os neutrinos tenham massa não nula, violando sua previsão no Modelo Padrão. Assim, este modelo de partículas precisa ser expandido para, no mínimo, conter as massas dos neutrinos, sendo denominado o Novo Mínimo Modelo Padrão (*New Minimal Standard Model*, NMSM, em inglês) (Gonzalez-Garcia, 2016).

O termo Δm^2 é definido por:

$$\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2 \quad (28)$$

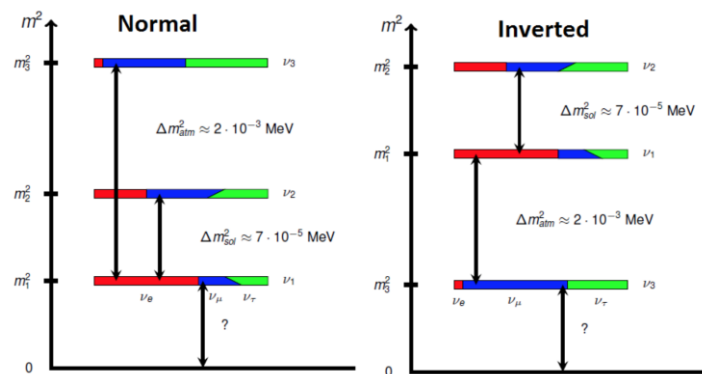
e Δm_{21}^2 é cerca de 30 vezes menor que os outros, Δm_{32}^2 e Δm_{31}^2 – revelando que as massas dos estados ν_1 e ν_2 têm valores próximos e que há grande contribuição do neutrino eletrônico neles, especialmente em ν_1 . Por outro lado, ν_3 tem maior contribuição de neutrinos tauônicos e muônicos e sua massa é bastante diferente dos anteriores. A oscilação entre ν_1 e ν_2 ocorre em longos *baselines*, sendo característica do fluxo de neutrinos solares. A oscilação entre ν_2 e ν_3 ou ν_3 e ν_1 ocorre em *baselines*

curtos e médios, como no fluxo de neutrinos atmosféricos. Por isso, Δm_{21}^2 e Δm_{32}^2 são chamados de delta de massa solar e delta de massa atmosférico, respectivamente.

Contudo, como ainda não foram determinadas as massas dos sabores isoladamente, não é possível saber se ν_3 é maior ou menor que ν_1 e ν_2 . Esse é o chamado problema da hierarquia de massa dos neutrinos (Patterson, 2016).

Se a massa do estado ν_3 é a maior dos três estados, a hierarquia é dita normal (*normal hierarchy*, NH, em inglês); se esse valor é a menor das massas, a hierarquia é invertida (*inverted hierarchy*, IH, em inglês). A Figura 5 mostra uma representação gráfica das hierarquias de massa (Cahn, 2013) (Patterson, 2016).

Figura 5. Hierarquias normal e invertida de massa.



Fonte: (Sorgenfrei, 2017).

2.2 DETECÇÃO DE NEUTRINOS

2.2.1 Detecção da reação de decaimento beta

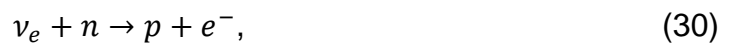
A detecção de neutrinos se baseia na determinação da energia liberada numa reação de decaimento beta ou beta inversa. Apesar dos refinamentos tecnológicos atuais, a metodologia não mudou muito desde o experimento de Reines e Cowan, em 1956.

Os experimentos têm como objetivo colocar sensores de luz em um reservatório com líquido, muitas vezes cintilador, de forma a captar os fótons emitidos pelas reações entre os neutrinos que atravessam o recipiente e a matéria nele contida.

A maioria dos detectores é baseada na observação da radiação Cherenkov, resultante da passagem de uma partícula carregada por um meio com velocidade superior a velocidade da luz naquele meio. Um cone de radiação eletromagnética característico na faixa do visível ou ultravioleta é emitido e detectado pelos sensores, por exemplo, fotomultiplicadoras. O cosseno do ângulo de abertura do cone de luz é dado pela divisão entre a velocidade da luz no meio e a velocidade da partícula no meio:

$$\cos\theta = \frac{c/n}{v}. \quad (29)$$

Na reação beta direta,



o neutrino interage fracamente com o nêutron produzindo um próton e um elétron, que emitem radiação Cherenkov, sensível aos sensores.

Na reação beta inversa:



o antineutrino interage fracamente com o próton, produzindo um pósitron, que se aniquila com um elétron do meio emitindo dois gamas de energia — de 511 keV; além disso, o nêutron que sai da reação, excitado, é absorvido por um núcleo próximo, a energia excedente do nêutron é emitida na forma de um gama, que acelera elétrons — por efeito Compton — suficiente para emitir radiação Cherenkov, detectável, com um atraso típico de até 180 μ s. Essa coincidência de sinais caracteriza a interação do neutrino. Nesta reação, a energia do antineutrino é dada por:

$$E_{\bar{\nu}_e} = E_{e^+} + T_n + (m_n - m_p) \cong E_{e^+} + 1,2 \text{ MeV} \quad (32)$$

onde E_{e^+} é a energia do pósitron, T_n é a energia cinética do nêutron e m_n e m_p são as massas de nêutron e próton, respectivamente (Soo-Bong Kim, 2016).

É possível diminuir o tempo de coincidência entre o sinal dos gamas e do nêutron dopando o meio líquido onde ocorrem as interações com elementos como cádmio (Cd) ou gadolínio (Gd), que aumentam a seção de captura de nêutrons — o Gd, por exemplo, possui seção cruzada de captura de cerca de 50 mil barn, aproximadamente $50 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, contra 0,3 barn do hidrogênio (An *et. al.*, 2016) (Pfahler, 2013). A energia de termalização destes nêutrons é bastante superior em um meio dopado, cerca de 8 MeV, tornando mais fácil a detecção desses eventos, isso em relação ao ruído de fundo (*background*). A maioria dos experimentos atuais utiliza esse recurso, trabalhando com atrasos de cerca de 30 μs entre os sinais do pósitron e do nêutron.

Algumas interações podem mimetizar o evento que caracteriza a interação do neutrino, a exemplo de nêutrons liberados em interações de múons, que ao passar pelo detector espalham prótons e depois são termalizados, apresentando sinais em coincidência; ou eventos randômicos, mas que se apresentam com assinatura similar aos de neutrinos, a exemplo de certos decaimentos radioativos (Bernstein, 2008). Esses eventos indesejados fazem parte do ruído de *background* e precisam ser filtrados com sistemas de veto, ativos e passivos.

2.2.2 Fotomultiplicadoras – PMTs

As fotomultiplicadoras, comumente chamadas de PMTs — do inglês *photomultiplier* — são sensores de luz baseados no efeito fotoelétrico. Consistem em um fotocatodo de material fotossensível que serve de janela óptica. Uma etapa de multiplicação de elétrons, constituída por uma série de dinodos, onde cada par está submetido a uma diferença de potencial de algumas centenas de volts, serve para multiplicar a foto-corrente gerada no catodo. A diferença de potencial total entre o fotocatodo e o anodo é de alguns milhares de volts. O sinal de saída da PMT é uma corrente que pode ser medida entre o anodo e o terra. Este conjunto é, em geral, encapsulado em vidro ou quartzo e mantido a vácuo (Hamamatsu Photonics, 2006).

O fóton que incide sobre o fotocatodo arranca um elétron que é acelerado e focalizado, por um potencial e uma grade de focalização, chegando ao primeiro

dinodo. Ao colidir com essa estrutura, os foto-elétrons depositam parte de sua energia, arrancando novos elétrons do dinodo, que são acelerados em direção ao próximo dinodo. O processo se repete em cascada, até que no anodo chega uma corrente mensurável. O número médio de elétrons secundários arrancados em cada dinodo é dado pelo fator de emissão secundário δ , que é função da tensão entre os dinodos. O ganho total da PMT é a exponencial desse fator δ para todos os estágios de multiplicação, i.e., o número de dinodos n ,

$$G = \delta^n = (KV_d)^n. \quad (33)$$

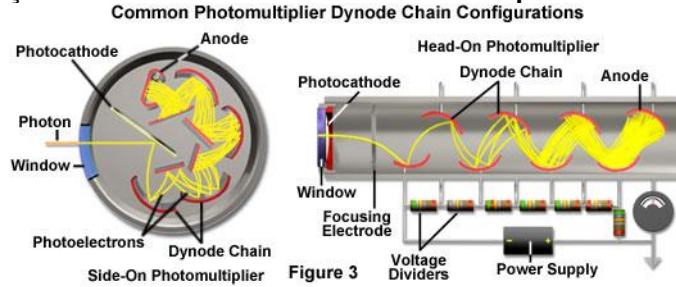
O valor de corrente medido a partir de um único fotoelétron é chamado de corrente de *single photoelectron*; ser capaz de resolver esta corrente é uma medida importante da qualidade do funcionamento e da estabilidade do ganho de uma PMT. Igualmente importante, a corrente de escuro é uma medida do ruído intrínseco de uma PMT, presente mesmo quando o sensor não está sendo iluminado, em geral associado a ruído térmico (Leo, 1987). A Figura 6 mostra modelos comerciais de fotomultiplicadoras, na Figura 7 está representado o funcionamento da PMT e a Figura 8 apresenta um sinal de saída típico de uma PMT visto em osciloscópio.

Figura 6 – Tubos fotomultiplicadores.



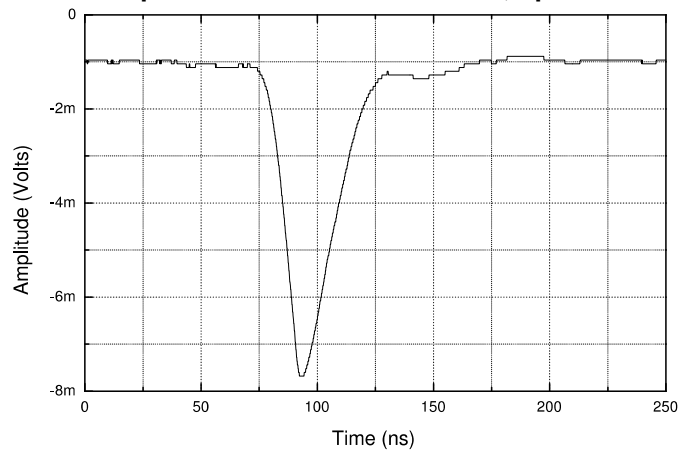
FONTE: (Hamamatsu Photonics, 2006)

Figura 7. Representação do funcionamento de uma fotomultiplicadora.



FONTE: <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/techniques/confocal/pmtintro/>. Acessado em 22/02/2019.

Figura 8. Sinal de uma fotomultiplicadora Hamamatsu R5912, operando com ganho 10^7 .



FONTE: (Barbosa, 2007).

2.2.3 Aquisição de dados

A aquisição de dados nos experimentos de detecção de neutrinos é feita a partir de uma série de módulos eletrônicos que adquirem, condicionam e transmitem o sinal de saída das PMTs. Os estágios de aquisição de dados geralmente empregados são:

- Pré-amplificador, que amplifica o tênue sinal da PMT e deve introduzir o menor ruído possível neste sinal. Existem três tipos de pré-amplificador: sensíveis a tensão, sensíveis a corrente e sensíveis à carga.
- Amplificador principal, que amplifica o sinal vindo do pré-amplificador, condicionando-o convenientemente para o posterior processamento deste sinal. O condicionamento pode ser feito a partir de atrasos propositais ou pela integração ou diferenciação do sinal das PMTs.

- Modulador de pulso, um circuito lógico que regula a largura do pulso, para adequar o sinal ao sistema de tratamento de dados e especialmente usado em sistemas de sinais rápidos.
- Discriminador, dispositivos que selecionam sinais acima de um limiar ajustável (*threshold*) e que geram um sinal lógico padronizado quando o *threshold* é atingido.
- Linhas de atraso, longos cabos utilizados propositalmente para atrasar um sinal, de forma a fazê-lo coincidir com outros sinais provenientes dos vários sensores montados em diferentes posições, transitando por cabos de diferentes comprimentos. O atraso médio de um cabo coaxial usado em instrumentação nuclear é de 2 ns para cada 5 cm de cabo. Para atrasos de 1 μ s ou mais, a atenuação é considerável e devem ser usados circuitos eletrônicos dedicados.
- *Gate* de transmissão, uma chave lógica, para comunicação do sinal com o restante da eletrônica, ativo apenas quando houver coincidência de sinais, para o caso de vários sensores, ou apenas quando o sinal estiver condicionado adequadamente.
- *Fan in e fan out*, dispositivo que aceita várias entradas de sinal simultaneamente e disponibiliza a soma destes sinais na saída; dispositivo que divide um sinal replicando-o em várias saídas, aumentando a capacidade de corrente do sinal de entrada. Muito empregados em experimentos com muitos sensores.

Após a etapa analógica, o sinal resultante é convertido em digital por conversores analógico digitais (ADC — *analog to digital converter*) e enviado a etapa de aquisição e tratamento de dados. Para acomodar de forma sistematizada esses equipamentos, foram desenvolvidos padrões de instrumentação em física nuclear e de altas energias, como os padrões NIM e VME.

O padrão NIM (*Nuclear Instrument Module*) foi o primeiro e ainda é o mais simples padrão de desenvolvimento de eletrônica em física nuclear e de partículas. Introduzido em 1964, é um sistema modular, em que todo o aparato comum a um dado sistema de instrumentação — fontes, amplificadores, contadores, etc — é desenvolvido em módulos mecanicamente e eletricamente compatíveis com os

bastidores (*crates*) NIM. Nos *crates*, os módulos — até no máximo 12, além da fonte — devem ter largura de 1,35 polegadas (ou múltiplos inteiros desse número), altura de 8,75 polegadas, com conectores de serviço (alimentações) na face traseira. A alimentação dos *crates* é padronizada, oferecendo tensões simétricas de alimentação, especialmente ± 6 , ± 12 , ± 24 volts em corrente contínua e 117 volts em corrente alternada, além de conexões extras customizáveis. Satisfazendo essas condições, o pesquisador é livre para desenvolver módulos conforme sua necessidade e é essa justamente a maior vantagem desse padrão, pois os módulos podem ser intercambiados conforme a necessidade. A desvantagem desse sistema é a falta de comunicação digital nativa, o que impede o controle e aquisição remotas. A impedância de entrada e saída em sistemas NIM é fixa em 50Ω e os cabos coaxiais empregados em transmissão de sinais rápidos são, geralmente, RG-58, de igual impedância (Leo, 1987).

O padrão VME (VERSA Module Europa) foi desenvolvido pela Mostek, Motorola, Phillips e Thompson em 1981. Oferece uma transmissão de dados digitais nativa, ampliando as capacidades de aquisição e tratamento de sinais em experimentos de física. Num *crate* VME é possível usar até 21 módulos, sendo o primeiro o controlador e os outros de montagem livre. É possível programar dos 96 pinos que compõem este barramento, quantos serão utilizados para transferência de dados. O VME é o padrão de instrumentação para aquisição de dados mais utilizado do mundo hoje, pois é robusto, confiável, versátil — permite uma variada gama de aplicações e até a incorporação de equipamentos de outros padrões — seu sistema de barramento e transmissão de dados, o VMEbus, vem sendo desenvolvido e atualizado até hoje. A Figura 9 apresenta um *crate* misto com os dois padrões NIM e VME.

Figura 9. Crate de instrumentação CAEN misto, com conectores para módulos padrão VME à esquerda e conectores para módulos NIM à direita.



FONTE: <https://www.caen.it/products/nv8020a/>. Acessado em 24/02/2019.

2.3 EXPERIMENTOS COM NEUTRINOS

2.3.1 Experimentos com neutrinos solares

2.3.3.1 *Homestake*

Em 1968, seguindo o trabalho de Pontecorvo, Raymond Davis Jr. desenvolveu um experimento para tentar detectar indiretamente neutrinos solares, utilizando a captura de neutrinos por átomos de cloro, segundo a equação:



A medida da quantidade de neutrinos era proporcional à quantidade de átomos de argônio. Um tanque com 615 toneladas de um detergente clorado, o C_2Cl_{14} , foi colocado numa mina a uma profundidade equivalente de 4100 metros de água para bloquear ruídos naturais.

O resultado teórico esperado era um fluxo de neutrinos de $8,2 \pm 0,23$ SNU (Solar Neutrinos Unit), definida por uma interação de neutrino por dia para cada 10^{33} átomos. Como já citado, o fluxo médio medido foi de $34 \pm 7\%$ do valor teórico, após 20 anos de experimento.

Outros experimentos foram realizados com base em reações de neutrinos com elementos químicos, especialmente o Gálio, como o GALLEX (Gallium Experiment), o GNO (Gallium Neutrino Observatory) e o SAGE (Soviet American Gallium Experiment), com resultados similares (Abrahão, 2012).

2.3.3.2 *Kamioka Nucleon Decay Experiment (KamiokaNDE)*

Localizado na mina Mozumi, próxima ao distrito de Kamioka, cidade de Hida, Japão. Iniciado em 1983 e finalizado em 1995, o objetivo principal era observar o decaimento de prótons em um detector do tipo Cherenkov em água, mas pouco tempo após o início foi convertido em um detector de neutrinos solares. O detector era um tanque cilíndrico com 3 mil toneladas de água pura e cerca de 1000 PMTs.

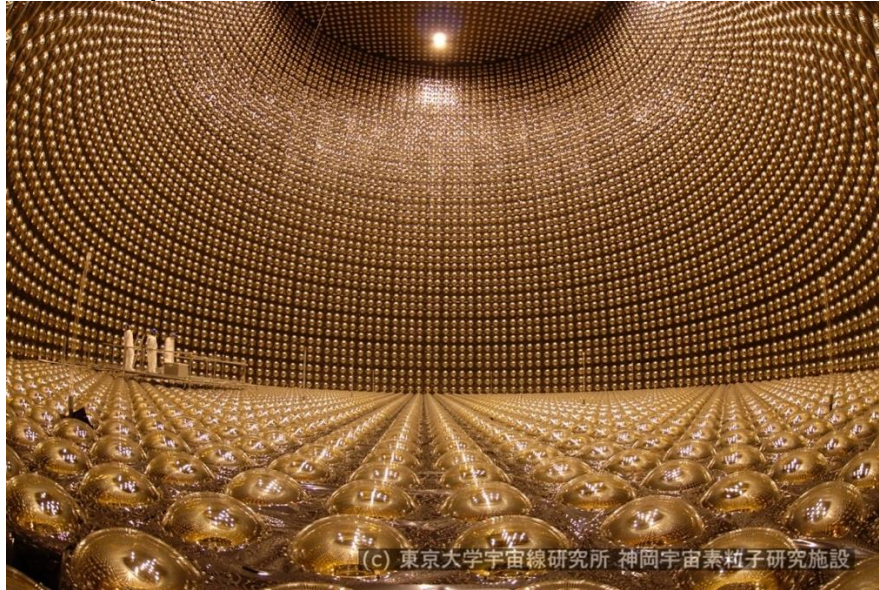
Os resultados do KamiokaNDE confirmaram experimentos anteriores, evidenciando o problema do neutrino solar; porém sem apresentar uma solução para o mesmo. Foi possível também determinar que os neutrinos eram, de fato, solares, observando as trajetórias, que apontavam para o Sol. KamiokaNDE também detectou, em 1988, neutrinos de uma explosão de supernova localizada na Grande Nuvem de Magalhães (Kamioka Observatory, 2015).

2.3.3.3 *Super-KamiokaNDE*

No mesmo complexo do experimento KamiokaNDE, no Observatório Kamioka, Super-Kamiokande é uma expansão do experimento original. Neste detector Cherenkov de aço inoxidável de 39 m de diâmetro e 41 m de altura, há 50 mil toneladas de água ultrapura e cerca de 13 mil PMTs. A aquisição de dados começou em 1 de abril de 1996 e seguiu até 2001 na medida de interação de neutrinos eletrônicos e muônicos para investigar as oscilações de sabor. O experimento confirmou a oscilação de neutrinos, pois o fluxo de neutrinos observado foi 45% do valor previsto no Modelo Solar Padrão, com nível de confiança de 99%.

O detector continua ativo e efetuando medidas de neutrinos, participando em outros experimentos, medindo além dos neutrinos solares, neutrinos atmosféricos, geoneutrinos, neutrinos cósmicos e neutrinos gerados em aceleradores de partículas. No mesmo local, está em desenvolvimento o Hiper-KamiokaNDE, um detector de neutrinos 20 vezes maior que o Super-KamiokaNDE (Kamioka Observatory, 2015). A Figura 10 mostra uma vista panorâmica do detector Super-KamiokaNDE.

Figura 10. O detector Super-KamiokaNDE.

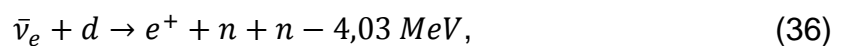


FONTE: (Kamioka Observatory, 2015). Acesso em: <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/index-e.html>. Acesso em 22/12/2018

2.3.3.4 Sudbury Neutrino Observatory (SNO)

Um detector Cherenkov que utiliza água pesada — onde deutério substitui os átomos de hidrogênio — o SNO está localizado em uma mina da cidade de Great Sudbury, Ontario, Canadá. Em formato esférico com 17,8 m de diâmetro, o detector de aço inoxidável emprega 1000 toneladas de D₂O e cerca de 9700 PMTs.

O SNO faz detecção de neutrinos a partir das reações:

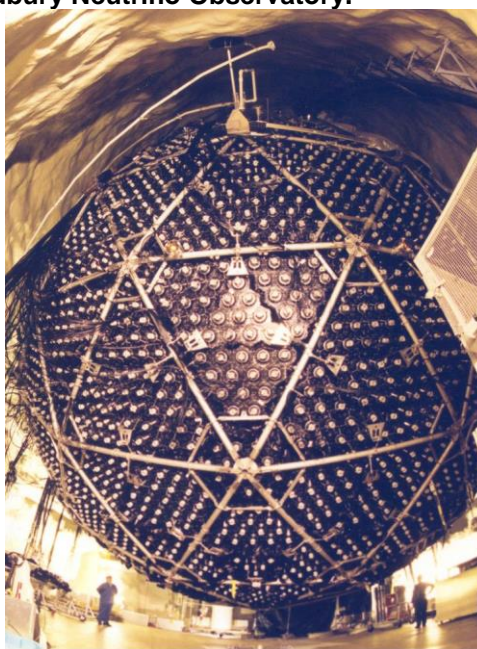


onde α simboliza a possibilidade de ser neutrinos eletrônicos, muônicos ou tauônicos. Os resultados desse experimento, que funcionou de 1999 a 2006, corroboraram para atestar as oscilações de sabor de neutrinos solares, na linha dos experimentos

japoneses. Atualmente o SNO está em fase de upgrade para se tornar o SNO+ (Abrahão, 2012). A Figura 11 mostra o detector do SNO.

Os vencedores do prêmio Nobel de Física de 2015 foram os coordenadores desses experimentos de Kamioka e Sudbury, por confirmarem as oscilações de neutrinos.

Figura 11. O detector do Sudbury Neutrino Observatory.



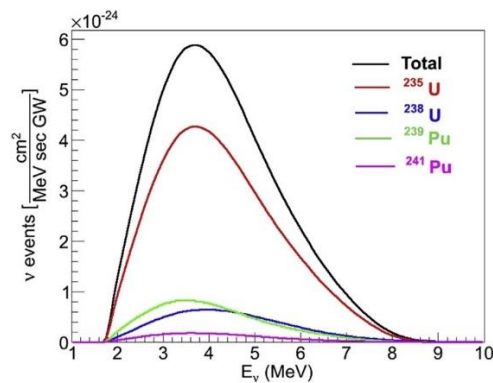
FONTE: (Queens Particle Astrophysics, 2018). Acesso em: <https://www.sno.phy.queensu.ca/group/index.html>. Acessado em 24/02/2019.

2.3.2 Experimentos com neutrinos de reatores

Os experimentos com antineutrinos produzidos em reatores nucleares, como subproduto das reações de fissão nuclear, foram importantes para a detecção dessas partículas e, recentemente, para determinar o último dos ângulos de mistura que determinam as oscilações de neutrinos, θ_{13} . Estes experimentos consistem em construir dois detectores idênticos e posicionar um deles próximo ao reator da usina, onde o feixe de antineutrinos é puramente eletrônico, e o outro afastado de poucos quilômetros, onde há elevada probabilidade de oscilação de sabor. Dessa forma, o fluxo de antineutrinos do reator é medido nos dois detectores e pode ser observado o desaparecimento de neutrinos eletrônicos no detector afastado devido a oscilação de sabor.

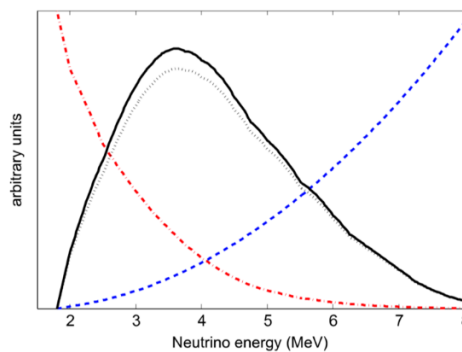
Nos reatores de água pressurizada, PWR (*pressurized water reactors*, em inglês), o combustível nuclear é composto principalmente de U^{235} , U^{238} , Pu^{239} e Pu^{241} . O fluxo de antineutrinos varia durante um ciclo de trabalho de uma usina nuclear, na proporção que a composição do combustível varia. A energia destes antineutrinos emitidos determina a sessão de choque e a taxa de interações de decaimento beta inverso. O limiar mínimo para a interação ocorrer é 1.8 MeV e atinge seu pico entre 3 e 4 MeV. Os gráficos das Figura 12 a 14 mostram o comportamento dos 4 principais isótopos do combustível nuclear na emissão de antineutrinos, sua evolução num ciclo de combustível, e a taxa de decaimentos beta inverso, como uma relação entre a energia e a seção de choque do decaimento beta inverso. (Lachenmaier, 2015) (Kim, 2016).

Figura 12. Número de eventos de decaimento beta inverso em reatores nucleares, para cada isótopo, em função da energia.



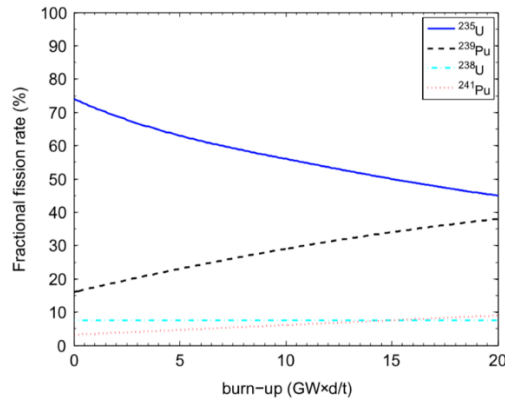
FONTE: (Kim, 2016).

Figura 13. Taxa de decaimentos beta inverso (linha preta) como um produto do fluxo de antineutrinos do reator (linha vermelha) e a seção de choque da reação (linha azul). A linha cinza é a taxa de decaimentos considerando a oscilação do ângulo θ_{13} .



FONTE: (Lachenmaier, 2015).

Figura 14. Evolução temporal das taxas de fissão fracionadas durante um ciclo de combustível nuclear típico.



FONTE: (Lachenmaier, 2015).

O número de antineutrinos produzidos por segundo num reator nuclear é dado pela razão entre a potência deste reator e a energia liberada na reação físsil:

$$N_f = \frac{P_{th}}{W} \quad (39)$$

A taxa de interações de antineutrinos com um detector, é dada pela equação:

$$R_D = \frac{N_f \langle \sigma \rangle N_T}{4\pi L^2} \quad (40)$$

em que P_{th} é a potência térmica do reator, W é a energia média liberada em uma fissão, N_T é o número de possíveis alvos que o antineutrino pode interagir, σ é a seção de choque média do antineutrino e L a distância entre o reator e o detector, em metros (Santos, 2014).

Segundo Suekane, a potência térmica do reator e a própria taxa de eventos de neutrinos, N_ν , podem ser relacionadas com as concentrações de combustíveis nucleares. Para tanto, assume-se U^{235} e Pu^{239} como os principais componentes do combustível. Esta relação é dada pelas seguintes equações:

$$P_{th}(t) = q_U f_U(t) + q_{Pu} f_{Pu}(t) \text{ e} \quad (41)$$

$$N_\nu(t) = D_U f_U(t) + D_{Pu} f_{Pu}(t) \quad (42)$$

onde q é a energia emitida por fissão do elemento, f é a taxa de fissão do elemento e D é a função de produção de neutrinos. Esta última depende das taxas de fissão do elemento, seção de choque cruzada da reação beta inversa, distância do reator, eficiência da detecção, etc (Suekane, 2013).

As energias emitidas por fissão são aproximadamente as mesmas para os elementos físseis discutidos, cerca de 200 MeV. Logo, para um reator operando a potência constante, o decréscimo da taxa de fissão de U^{235} está ligado ao aumento da taxa de Pu^{239} e ao decréscimo da taxa de detecção de neutrinos:

$$\frac{dN_\nu}{dt} = -0,35D_U \frac{df_{Pu}}{dt} \quad (43)$$

Dessa forma, é possível conhecer as concentrações dos elementos físseis no combustível nuclear, o que é fundamental para a realização de experimentos de oscilação de neutrinos. A detecção do fluxo de antineutrinos emitido pelo reator permite a caracterização dos elementos que reagem em seu interior.

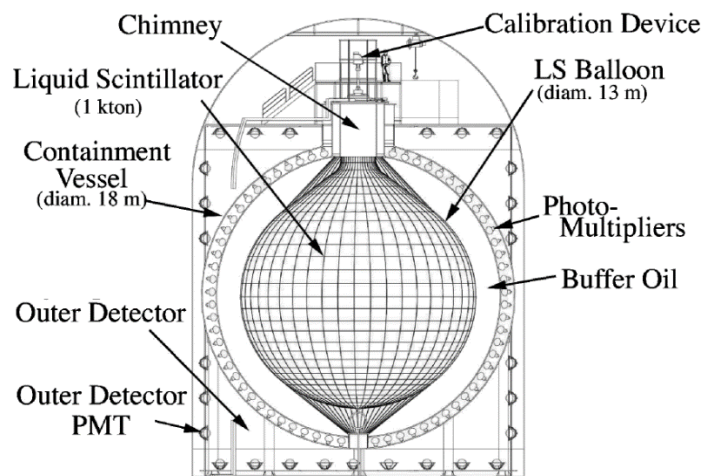
2.3.3.1 *Kamioka Liquid Scintillator Antineutrino Detector (KamLAND)*

O detector de antineutrinos de reatores localizado no Observatório de Kamioka, mais precisamente no mesmo espaço em que estava o experimento original KamiokaNDE, a 2700 m.w.e. (equivalente em metros de água, em inglês) de profundidade. Os reatores nucleares que produzem os neutrinos estão a distâncias da ordem de 180 km, tornando esse experimento do tipo longo *baseline*.

O detector consiste de um alvo em forma de balão esférico, com 13 metros de diâmetro, preenchido com 1000 toneladas de cintilador líquido; cercado por um *buffer* de óleo mineral. Este detector está contido em um reservatório de aço

inoxidável esférico com 18 m de diâmetro, onde estão instaladas as 1879 fotomultiplicadoras, sendo 554 destas reaproveitadas do KamiokaNDE. Este é o Detector Interno (*Inner Detector*, ID, em inglês) acomodado no interior do Detector Externo (*Outer Detector*, OD, em inglês), um tanque de veto ativo do tipo Cherenkov com 3200 toneladas de água e 225 PMTs (Eguchi, 2003). A Figura 15 mostra o desenho esquemático do detector.

Figura 15. Esquemático do detector KamLAND.



FONTE: (Eguchi, 2003).

KamLAND começou a tomar dados em 2002 e apresentou resultados preliminares menos de um ano depois, observando oscilações de neutrinos de reatores, na mesma linha dos resultados para neutrinos solares obtidos por experimento anteriores. Este fato comprova que a distância é o fator crucial para a observação de oscilação de sabor. Em 2005, este apresentou a oscilação do espectro de energia desses neutrinos e o valor de Δm^2 e de θ (Araki, 2005). Os valores foram:

$$\tan^2(\theta) = 0,40^{+0,10}_{-0,07}, \quad (44)$$

$$\theta \approx 32,3^{+2,9}_{-2,4} \text{ }^\circ \text{ e} \quad (45)$$

$$\Delta m^2 = 7,9^{+0,6}_{-0,5} \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2. \quad (46)$$

O incidente na usina nuclear de Fukushima, em 2011, levou KamLAND a uma situação inesperada: a ausência de fluxo de neutrinos dos reatores, pois toda a matriz energética nuclear japonesa foi desligada para verificações de segurança. Aproveitando-se dessa situação, o experimento pôde medir o sinal de *background* das medidas com neutrinos. A sensibilidade para medidas de geoneutrinos, provenientes de decaimentos beta de elementos radioativos presentes na crosta do planeta, como Urânio e Tório, que constituíam pequena parte do fluxo observado, melhorou significativamente. Estas medidas corroboraram para os modelos de composição do planeta.

Neste mesmo ano, foi iniciada uma nova fase no experimento KamLAND, a busca pelo decaimento beta duplo, etapa denominada KamLAND-Zen. Neste sentido, inseriu-se um balão de 3 m de diâmetro no interior do ID, preenchido com 13 toneladas de cintilador líquido dopado com xenônio, que é uma fonte de decaimentos beta duplos. Os resultados das medidas nessa configuração foram acrescentados à estatística final do experimento. A análise final levou em consideração, também, as restrições e resultados de outros experimentos contemporâneos (Gando, 2013).

Em 2013, KamLAND apresentou resultados para a medida de oscilação de neutrinos com 3 sabores:

$$\tan^2(\theta_{12}) = 0,436_{-0,025}^{+0,029}, \quad (47)$$

$$\theta_{12} \approx 33,4_{-0,74}^{+0,89} \text{ }^\circ; \quad (48)$$

$$\sin^2(\theta_{13}) = 0,0236_{-0,002}^{+0,002}, \quad (49)$$

$$\theta_{13} \approx 8,83 \pm 0,38^\circ \text{ e} \quad (50)$$

$$\Delta m_{21}^2 = 7,53_{-0,18}^{+0,18} \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2. \quad (51)$$

O desligamento das usinas nucleares japonesas não foi abordado diretamente, mas se mostrou uma oportunidade — aproveitada pelo KamLAND — para mostrar a

aplicação de detectores de neutrinos de reatores na medida do status destes, uma aplicação que será abordada em mais detalhes neste trabalho, mais a diante.

2.3.3.2 *Reactor Experiment for Neutrino Oscillation (RENO)*

O experimento RENO é uma colaboração de 11 instituições, a maioria coreana, com intuito de medir θ_{13} e Δm_{ee}^2 , a diferença de massa resultante da permanência de neutrinos eletrônicos no feixe que chega ao detector afastado. Localizada na Coréia do Sul, a cerca de 400 km de Seul, está a central nuclear de Hanbit, também conhecida como Yonggwang, que conta com 6 reatores de 2.8 GW_{th}, dispostos em linha. Os detectores se encontram a 294 m e 1383 m centro da distribuição dos reatores, ambos em instalações subterrâneas com cerca de 120 m e 450 m de coluna d'água equivalente. A Figura 16 mostra a localização dos detectores em relação aos reatores nucleares.

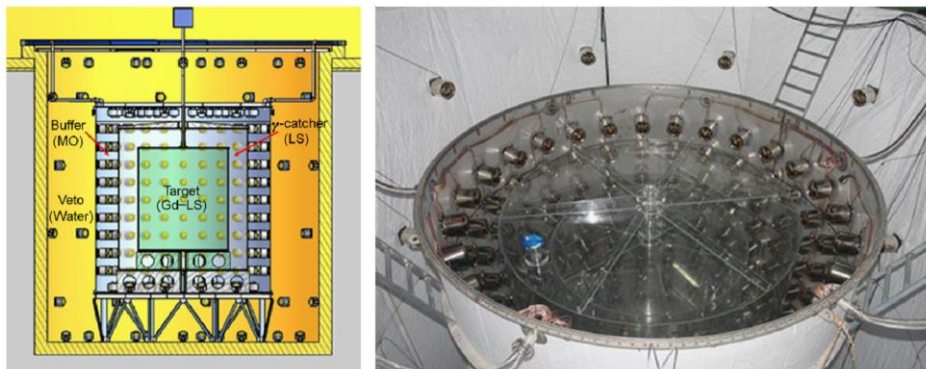
Os detectores são cilíndricos, com 8,8 m de altura e 8,4 m de diâmetro, contendo um detector interno e um veto externo. No detector interno há um alvo de acrílico de 18,7 m³ preenchido com cintilador líquido dopado com 0,1% de Gd. O alvo é cercado pelo *gamma-catcher*, preenchido com cintilador líquido, mas sem Gd, e pelo *buffer* com óleo mineral. Este *buffer* é instrumentado por 354 PMTs Hamamatsu de 10". O veto foi montado no espaço entre o detector interno e as paredes externas, cobertas com Tyvek®, contendo 67 PMTs de 10" submersas em 352 toneladas de água (Soo-Bong Kim, 2016). A Figura 17 mostra um desenho esquemático do detector e uma foto do detector construído.

Figura 16. Mapa do experimento RENO. Os pontos vermelhos são reatores nucleares e os pontos amarelos são os detectores.



FONTE: (Kim, 2016).

Figura 17. Esquerda: Desenho esquemático do detector do experimento RENO. Direita: Interior do detector com PMTs instaladas nas paredes do *buffer* e, em menor número, no veto.



FONTE: (Kim, 2016).

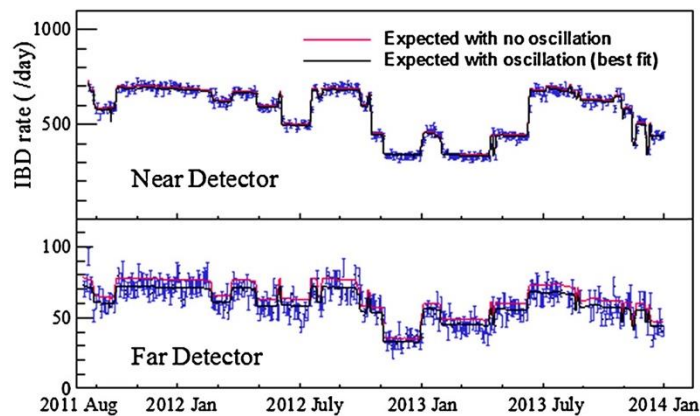
As medidas foram realizadas de 2011 a 2016, tomando dados durante mais de 1500 dias, com eficiência maior que 95%. Os dados permitiram medir o valor de θ_{13} e de Δm_{ee}^2 pelo desaparecimento dos antineutrinos eletrônicos nas medidas feitas no detector afastado, como mostra a Figura 18. Os resultados obtidos para θ_{13} e Δm_{ee}^2 são:

$$\sin^2(2\theta_{13}) = 0,082 \pm 0,010, \quad (52)$$

$$\theta_{13} \approx 8,3 \pm 0,5^\circ \text{ e} \quad (53)$$

$$|\Delta m_{ee}^2| = 2,62_{-0,26}^{+0,24} \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2. \quad (54)$$

Figura 18. Taxas médias medidas de neutrinos dos reatores após a subtração do background. As linhas vermelhas são previsões sem oscilação de neutrinos e as linhas pretas são a melhor previsão considerando a oscilação de neutrinos. As linhas azuis são os dados adquiridos pelos detectores.



FONTE: (Kim, 2016).

A colaboração RENO já estuda construir outro detector, de nome RENO-50, localizado a 50 km da central nuclear de Hanbit, que será consideravelmente maior que o original, podendo medir neutrinos vindos não só dos reatores coreanos, mas também do Sol, de outras fontes cósmicas e do acelerador de partículas J-PARC, no Japão, responsável pelos experimentos com aceleradores naquele país (Soo-Bong Kim, 2016).

2.3.3.3 Double-Chooz (DC)

Double-Chooz é o experimento de medição de θ_{13} que sucedeu o experimento Chooz — que durou 5 anos — de detecção de neutrinos do reator nuclear da usina de Chooz, nas Ardenas francesas. São dois reatores de 4,25 GW_{th} separados de 140 m. Em DC, o detector próximo está a cerca de 400 m dos reatores e o afastado está a 1050 m — sendo este um *upgrade* do mesmo detector empregado no experimento

Chooz — com coberturas de rocha equivalentes a 115 m e 300 m de água, respectivamente. Reaproveitar o detector antigo no novo experimento limitou o tamanho do sistema de detecção mas forneceu muito conhecimento da radiação de *background* e favoreceu a execução do cronograma (Cabrera, 2010). A Figura 19 mostra o mapa do experimento.

Cada detector consiste de um volume interno, denominado Detector Interno, com um tanque alvo de 10 m³ cheio de cintilador líquido dopado com 0,1% de Gd. Um *gamma catcher*, com 23 m³, preenchido com cintilador líquido não dopado. E, finalmente, um *buffer* com 110 m³ cheio com óleo mineral e instrumentado por 390 PMTs de 10". Tudo isso instalado num reservatório de aço inoxidável.

Além do reservatório de aço inoxidável, está o Veto Interno, com 90 m³, preenchido com cintilador, opticamente separado do Detector Interno. O Veto está equipado com 78 PMTs de 8"; já o Veto Externo de Muons, que consiste de uma matriz de placas de cintilador plástico e serve para vetar eventos de raios cósmicos (Suekane e Bezerra, 2016). A Figura 20 mostra a vista esquemático do detector de DC.

A eletrônica de aquisição de dados empregada em DC é customizada e baseada em Flash ADCs de 8 bits que operam em até 500 MHz.

A construção do detector próximo foi concluída em 2014 e o upgrade do detector afastado foi concluído em 2010. Mesmo com apenas um detector pronto, entre 2010 — 2014, foram realizadas medidas baseadas na diferença entre o número de neutrinos detectados e o número previsto. Com apenas 97 dias de medidas, já era possível comparar a observação de 4121 eventos, contra a predição de 4344 ± 165 eventos, evidenciando a oscilação de neutrinos (Suekane e Bezerra, 2016). Em 2012, em acordo com a Figura 20, obteve-se a diferença de massa

$$|\Delta m_{31}^2| = 2,32 \cdot 10^{-3} eV^2. \quad (55)$$

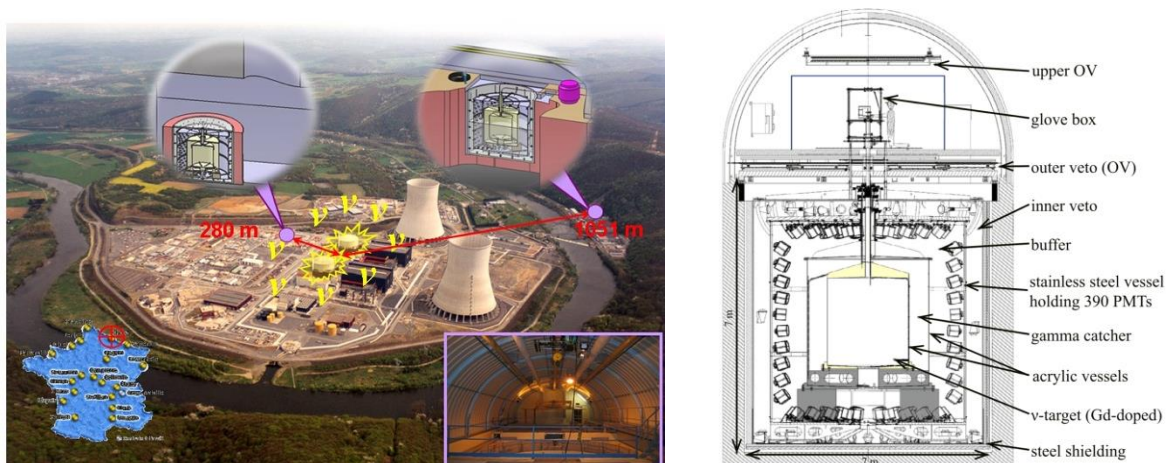
Além das medidas onde o nêutron é capturado pelo Gd, em DC também foram feitas medidas em que o nêutron é capturado por hidrogênio, com um tempo de termalização maior, mas uma estatística mais ampla. Assim, os resultados das medidas de DC incorporam tanto os dados para medidas em Gd, quanto para

hidrogênio. A melhor aproximação para ambas as medidas é exposta na Figura 21, onde é aplicada uma aproximação por modulação de taxa de reator (*Reactor Rate Modulation fit*, em inglês). Neste caso, a taxa prevista de decaimentos beta inverso é comparada com a taxa medida, em diferentes regimes de funcionamento do reator. O resultado combinado das duas análises é:

$$\sin^2(2\theta_{13}) = 0,088 \pm 0,033 \text{ e} \quad (56)$$

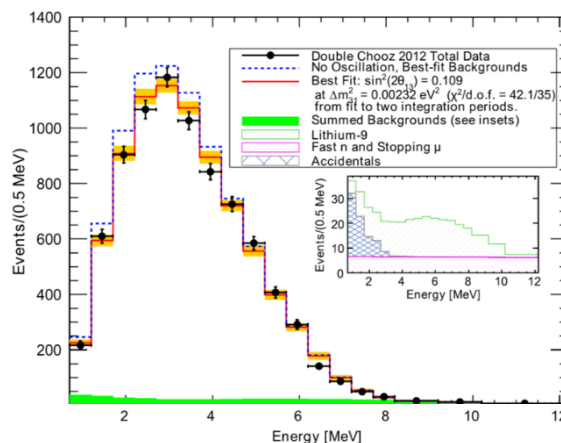
$$\theta_{13} = 8,6^{+1,58}_{-1,82} \text{ }^\circ. \quad (57)$$

Figura 19. Esquerda: Mapa do experimento Double-Chooz. Os pontos e distâncias indicadas são dos detectores. Os reatores estão destacados em amarelo. No detalhe, o hall experimental de um detector. Direita: Vista esquemática dos detectores do experimento.



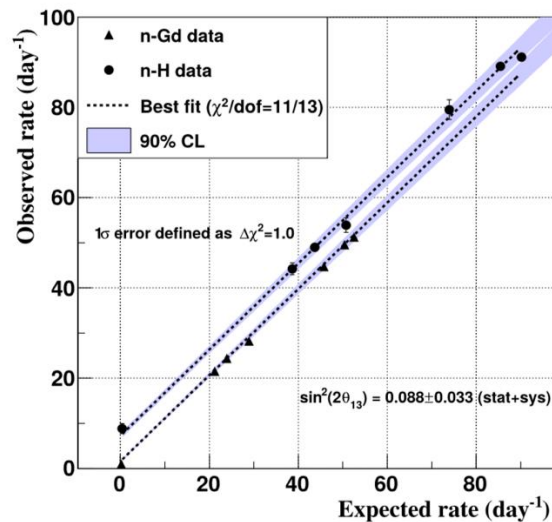
FONTE: (Abrahão, 2012 – esquerda; Suekane, 2013 - direita).

Figura 20. Espectro de energia dos neutrinos (pontos pretos) sobrepostos a predição sem oscilação (linha azul) e ao melhor ajuste considerando oscilações de neutrinos (linha vermelha) nos dados de 2012 do experimento Double-Chooz.



FONTE: Adaptado de (Lachenmaier, 2015).

Figura 21. Ajuste RRM (reactor rate modulation) dos dados com termalização dos nêutrons em gadolínio e em hidrogênio.



FONTE: (Suekane, 2016).

2.3.3.4 Daya Bay

O experimento Daya Bay está localizado próximo à central nuclear de mesmo nome e à central nuclear de Ling Ao, no litoral sul da China, a cerca de 45 km da cidade de Shenzhen e a 55 km ao nordeste de Hong Kong. Nessa localização, os 8 detectores idênticos de antineutrinos que formam Daya Bay são a 6 reatores de água pressurizada (PWRs), 2 em Daya Bay e 4 em Ling Ao, totalizando 17.6 GW_{th}. Estes 8 detectores estão instalados em pares em diferentes posições, em túneis subterrâneos denominados *halls* experimentais — EH1, EH2 e EH3, a 93 m, 100 m e 324 m de profundidade, respectivamente, sendo que este último hall conta com 4 detectores. Os detectores dos EH1 e EH2 foram posicionados o mais próximo possível dos reatores — Daya Bay e Ling Ao, respectivamente — e os detectores do EH3 estão numa posição calculada para promover a sensibilidade máxima às oscilações de neutrinos, em relação aos feixes de ambas as centrais nucleares (An *et. al.*, 2016). A Figura 22 mostra o mapa da região do experimento.

Os detectores de antineutrinos foram construídos na superfície e depois movidos para suas localizações subterrâneas. Cada um dos 8 detectores idênticos é constituído de 3 câmaras cilíndricas concêntricas de acrílico. O compartimento interno (*I*AV) tem 3

m x 3 m e contém cintilador líquido com gadolínio. Este volume é cercado pelo compartimento externo de acrílico (OAV) — 4 m x 4 m, com cintilador líquido não dopado. Um compartimento em aço inoxidável (SSV), de 5 m x 5 m, contém os outros volumes, tendo sido preenchido com óleo mineral; nele estão instaladas 192 PMTs, modelo Hamamatsu R5912. Nas bases do compartimento externo, ao invés de PMTs, há refletores que direcionam fótons incidentes para as PMTs laterais, reduzindo o número de fotossensores necessários, sem comprometer a energia ou resolução das medidas.

As unidades de calibração automatizadas (ACUs) posicionam fontes luminosas ou radioativas pulsantes no detector para calibração.

Os detectores foram colocados em reservatórios de água ultrapura para bloquear radiação de *background*; são pelo menos 2,5 m de água, monitorados por PMTs, e câmaras de placas resistivas do tipo RPC no topo dos reservatórios são utilizadas para identificar raios cósmicos.

O sistema de aquisição de dados de Daya Bay é customizado e flexível. Assim, um detector ou um conjunto de detectores podem ser controlados, ter seus dados registrados ou combinados, ou ainda receber *trigger* de outras unidades. O sistema de leitura das PMTs consiste de placas de *Front End*, Flash ADCs, placas de *Fan-out*, placas de trigger local e um computador controlador principal, utilizando o padrão VME.

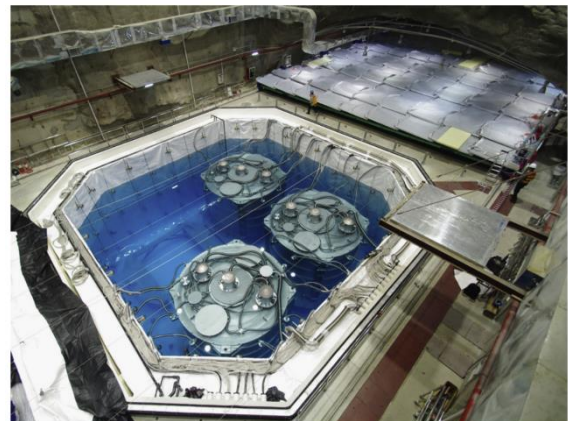
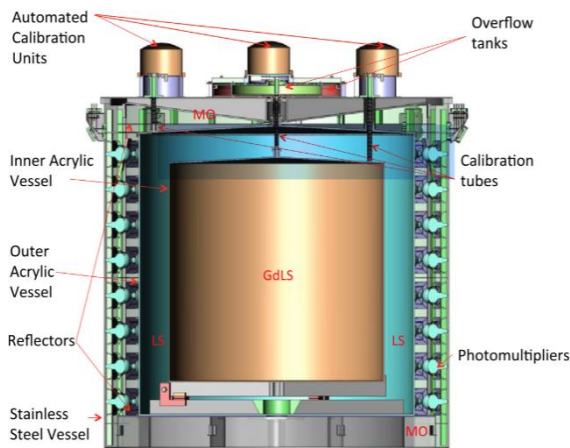
A construção do experimento começou em 2007 e os detectores foram instalados em suas posições finais entre julho de 2011 e setembro de 2012, começando a tomada de dados desde a instalação dos primeiros 2 detectores. Ao final de 2013, cerca de 1 milhão de antineutrinos foram detectados pelos detectores próximos e 150 mil pelos detectores afastados. A Figura 23 mostra a vista esquemática de um dos detectores e o hall experimental, com 3 dos 4 detectores instalados.

Figura 22. Mapa do experimento Daya Bay. Os pontos vermelhos são reatores nucleares. Os detectores estão localizados nos halls experimentais EH1, EH2 e EH3.



FONTE: (An, 2016).

Figura 23. Esquerda: Vista esquemática dos detectores de Daya Bay. Direita: EH3 com 3 dos 4 detectores instalados.



FONTE: (An, 2016).

Desde 2012, a colaboração Daya Bay vem apresentando resultados para θ_{13} , e em 2013, também apresentou Δm_{ee}^2 , além do resultado de θ_{13} com a configuração com 6 detectores, em acordo com o gráfico do espectro de energia da Figura 24:

$$\sin^2(2\theta_{13}) = 0,09_{-0,009}^{+0,008}, \quad (58)$$

$$\theta_{13} \approx 8,7_{-0,43}^{+0,42} \text{ }^\circ \quad (59)$$

$$|\Delta m_{ee}^2| = 2,59_{-0,20}^{+0,19} \cdot 10^{-3} eV^2. \quad (60)$$

Em 2015, o último resultado divulgado do experimento, com o conjunto de mais de 600 dias de aquisição de dados, contemplando as medidas com 6 e 8 detectores, foi divulgado:

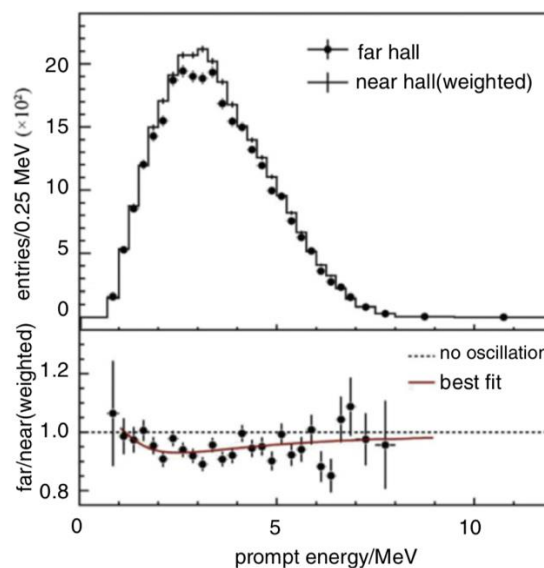
$$\sin^2(2\theta_{13}) = 0,084 \pm 0,005, \quad (61)$$

$$\theta_{13} \approx 8,4 \pm 0,3^\circ \text{ e} \quad (62)$$

$$\Delta m_{ee}^2 = 2,42 \pm 0,11 \cdot 10^{-3} eV^2. \quad (63)$$

Este é o resultado mais preciso até hoje, com precisão de 6%. Como o experimento continua rodando, é esperado um resultado com precisão de cerca de 3%. Além disso, esperam-se resultados da busca por neutrinos estéreis, que podem apontar na direção de neutrinos possuírem massas descritas em termos da formulação de Dirac ou de Majorana (Cao e Luk, 2016).

Figura 24. Acima: Espectro de energia medido no EH3 em Daya Bay, após a subtração do background, comparado com a predição desconsiderando a oscilação de neutrinos, baseada nos dados dos halls experimentais próximos. Abaixo: Medidas e melhor ajuste para $\sin^2(2\theta_{13})$.

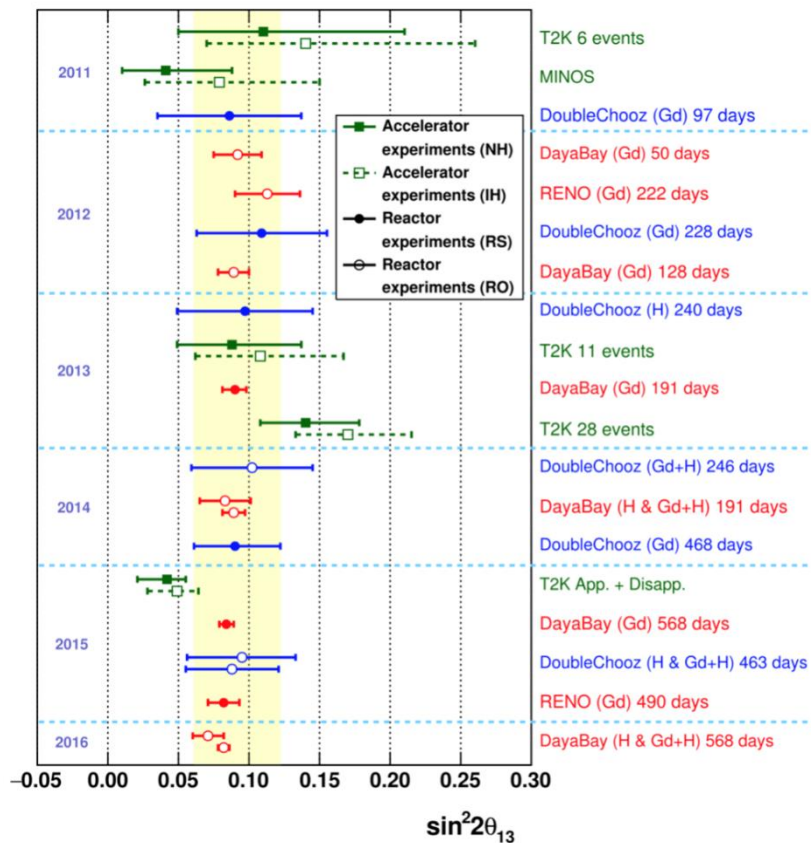


FONTE: (Lachenmaier, 2015).

A Figura 25 mostra um sumário dos resultados de $\sin^2(2\theta_{13})$ ao longo do período 2011 — 2016. O número de dias de tomada de dados em cada experimento está ao lado do resultado apresentado; bem como se foram medidas com gadolínio ou hidrogênio ou ambos; a faixa amarela representa o resultado com a menor incerteza apresentado por Double Chooz no período, em 2016 (Suekane e Bezerra, 2016). A incerteza das medidas cai sistematicamente ao longo dos anos, até as últimas medidas realizadas em RENO e Daya Bay.

Os experimentos *Tokai to Kamioka* (T2K) e MINOS, citados neste sumário, não são abordados neste trabalho por se tratarem de experimentos de neutrinos baseados em feixe de acelerador de partículas. De qualquer modo, seus resultados são divididos em Hierarquia Normal (NH) ou Hierarquia Invertida (IH), ao passo que os resultados de experimentos de reatores são divididos de acordo com o ajuste de dados realizado, se estes derivam direto das taxas medidas, ou pela forma do espectro de energia medido.

Figura 25. Sumário das principais medidas de $\sin^2(2\theta_{13})$ apresentadas pelos experimentos entre 2011 – 2016.



FONTE: (Suekane, 2016).

2.3.3.5 *Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO)*

JUNO é um experimento de neutrinos advindos de reatores nucleares em construção em Kaiping, sul da China. Os reatores mais próximos estão a 53 km de distância, nas centrais nucleares de Yangjiang (4 reatores), e Taishan (6 reatores), como mostrado na Figura 26. Esse experimento tem como objetivo determinar a hierarquia de massa dos sabores dos neutrinos, ainda não esclarecida, de fundamental para determinar se neutrinos são partículas de Dirac ou de Majorana. Além disso, o experimento promete determinar, com precisão melhor que 1%, alguns parâmetros da oscilação de neutrinos. A localização de JUNO foi intencionalmente escolhida para que o detector estivesse na posição mais propícia a oscilação de neutrinos. Na Figura 27 podem ser comparadas as posições deste experimento com as posições de Daya Bay e KamLAND no que tange a probabilidade de sobrevivência dos antineutrinos eletrônicos (Giaz, 2018).

O detector consiste de um único reservatório esférico de 35 metros de diâmetro, que será enchido com 20 mil toneladas de cintilador líquido. Este volume será montado no interior de um tanque de aço inoxidável, com 39 m de diâmetro, instrumentado por 18 mil PMTs de 20" e 25 mil PMTs de 3". O arranjo com dois grupos de sensores foi escolhido para aumentar a área de cobertura do detector e melhorar a eficiência de detecção. Esse conjunto esférico estará imerso em um tanque de veto ativo retangular de aproximadamente 44 m de lateral, que será preenchido por 35 mil toneladas de água ultrapura, instrumentado por 2000 PMTs de 20". No topo desta piscina de veto será montado um detector de múons adicional, utilizando cintilador plástico. A Figura 28 mostra uma vista esquemática do detector.

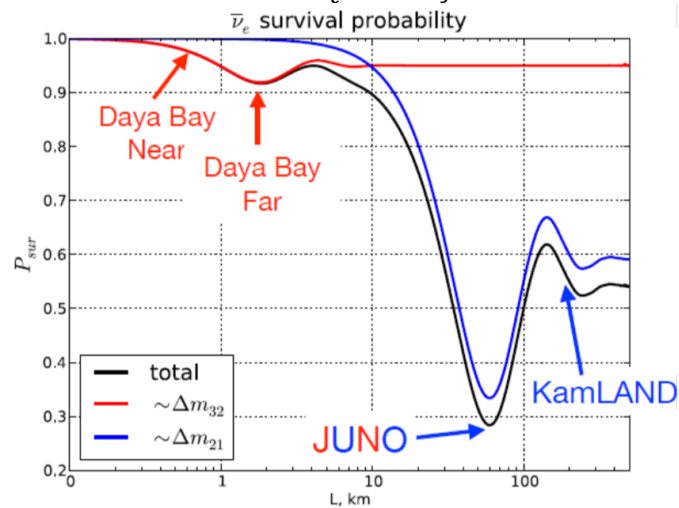
JUNO está previsto para começar a tomar dados em 2020 e, além dos objetivos já citados, também contribuirá na física de neutrinos de supernovas e de neutrinos atmosféricos (Giaz, 2018).

Figura 26. Mapa do experimento JUNO, com detalhe para a localização do experimento Daya Bay, algumas centrais nucleares (NPP) e cidades importantes locais.



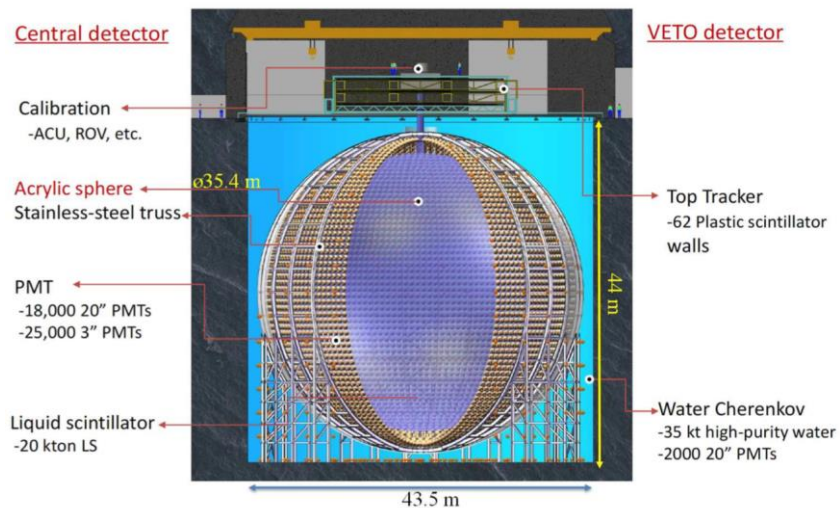
FONTE: (Li, 2014).

Figura 27. Probabilidade de sobrevivência do $\bar{\nu}_e$ em função da distância da central nuclear.



FONTE: (Giaz, 2018).

Figura 28. Vista esquemática do detector do experimento JUNO.



FONTE: (Giaz, 2018).

2.3.3 Salvaguardas nucleares

As salvaguardas nucleares são um sistema de medidas, procedimentos e visitas de fiscalização levados a cabo pela Agência Internacional de Energia Atômica (*IAEA*, em inglês) para evitar a proliferação de armas nucleares e garantir o uso pacífico da energia atômica pelos governos do mundo. A *IAEA* procura identificar precocemente desvios de materiais que indiquem eventual uso bélico da tecnologia nuclear.

O Tratado de Não-Proliferação de Armas Nucleares (*Non Proliferation Treaty*, *NPT*, em inglês), do qual o Brasil é signatário desde 1998, estabelece que os Estados que não possuem armas atômicas são obrigados a fornecer salvaguardas nucleares, em concordância com a *IAEA*, atestando à comunidade internacional que não estão desenvolvendo tais armamentos (*IAEA*, 2018).

Antes mesmo desse acordo, Brasil e Argentina, únicos países da América do Sul detentores de tecnologia nuclear, já haviam formalizado, em 1991, o “Acordo Bilateral para o Uso Exclusivamente Pacífico da Energia Nuclear”, estabelecendo uma série de salvaguardas e normas a serem seguidas por estas nações. O “Sistema Comum de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares” (*SCCC*) e a “Agência Brasileiro-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares” (*ABACC*), que administra o *SCCC* (*IAEA*, 1994), são frutos desse acordo. No mesmo ano, foi assinado o acordo Quadripartite — Brasil, Argentina, *ABACC* e *IAEA* — para oficializar o ingresso da *IAEA* no sistema de salvaguardas praticadas por Brasil e Argentina. Dessa forma, a *ABACC* trabalha como uma agência regional colaborando com *IAEA*.

Atualmente, a fiscalização dos complexos de energia nuclear se dá com técnicas como monitoramento de nêutrons e espectroscopia gama; registros do combustível físsil antes e depois do uso; filmagem e selagem de compartimentos de combustível e ensaios destrutivos e não destrutivos dos materiais (Cribier, 2011) (Suekane, 2013). Esses procedimentos requerem visitas regulares às instalações, feitas com os reatores desligados, ocupando a equipe de inspeção e o operador da central nuclear. Estas visitas têm o potencial de expor segredos industriais estratégicos ou ainda expor pessoas à ambientes radioativos.

A *IAEA* tem interesse especial no desenvolvimento de novas metodologias e tecnologias para elaborar salvaguardas, como a utilização de antineutrinos como

mediadores de informação sobre o combustível sendo consumido no reator, por exemplo. Essa inovação permite a caracterização do combustível usado, em tempo real, independentemente dos processos da usina, dispensando as visitas à planta e o risco de exposição dos segredos industriais (IAEA, 2008).

A primeira vez que foi inferida a potência térmica de um reator, a partir da medida de antineutrinos, foi nos anos 1970, no reator de Rovno na Ucrânia (Abrahão, 2012). No entanto, o experimento fundamental para determinar a viabilidade de desenvolver salvaguardas nucleares a partir da detecção de neutrinos de reatores foi o experimento SONGS1.

2.3.3.1 *San Onofre Nuclear Generating Station (SONGS)*

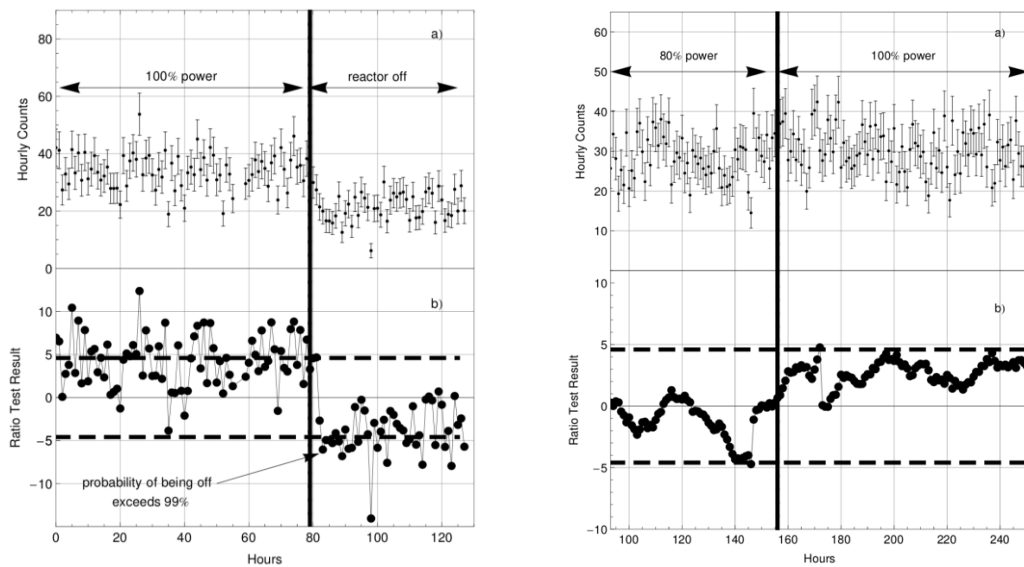
SONGS era uma central nuclear norte-americana no sul da Califórnia, hoje desativada e em processo de descomissionamento. Originalmente com 3 reatores, quando do experimento contava com apenas dois PWRs, as unidades 2 e 3, com capacidade de gerar 3,4 GW_{th}. O detector do experimento SONGS1 foi colocado a cerca de 30 m do núcleo do reator 2; seguindo a mesma linha de construção dos detectores de neutrinos de reatores já discutidos, com *Target* preenchido por cintilador líquido, blindagem de água e polietileno e veto ativo de cintilador plástico.

O monitoramento contínuo do detector permitiu determinar o status do reator em uma base horária – se ligado ou desligado, bem como determinar variações de potência do mesmo, com nível de confiança de 99%. A Figura 29 mostra essas medidas, com o teste de desligamento do reator (esquerda) e o teste de variação de potência, de 80% a 100% (direita) (Bernstein, 2008).

O detector instalado pôde acusar a parada da usina e substituição do combustível nuclear a partir das contagens de antineutrinos, ao longo dos meses, em dois ciclos de combustível, como mostra a Figura 30. Conforme o urânio é convertido em plutônio no reator, a taxa de antineutrinos emitidos, e por consequência medidos, cai; voltando aos patamares iniciais quando ocorre a parada da usina e o combustível é renovado. No intervalo entre os ciclos, 250 kg de Pu²³⁹ foram removidos e 1,5 toneladas de U²³⁵ foram adicionadas (Bowden, 2008).

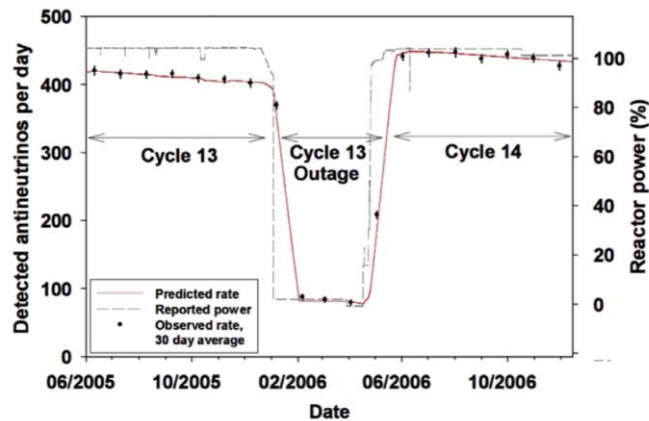
Estes resultados credenciaram os detectores de neutrinos de reator como fonte de informações para o estabelecimento de salvaguardas nucleares (Kim, 2016).

Figura 29. Gráficos das medidas de neutrinos em base horária no experimento SONGS1. Esquerda: Desligamento do reator. Direita: Aumento da potência do reator, de 80% para 100%. Na parte superior dos gráficos, marcados por a), estão contagens horárias de eventos de antineutrinos. Abaixo, em b), o resultado da estatística sequencial na mesma base horária. As linhas tracejadas marcam os níveis em que a estatística apresenta 99% de nível de confiança. As linhas verticais marcam o momento da mudança de regime no reator.



FONTE: (Bernstein, 2008).

Figura 30. Taxas mensais de antineutrinos detectados diariamente no reator SONGS, ao longo de 16 meses, correlacionadas à potência do reator.



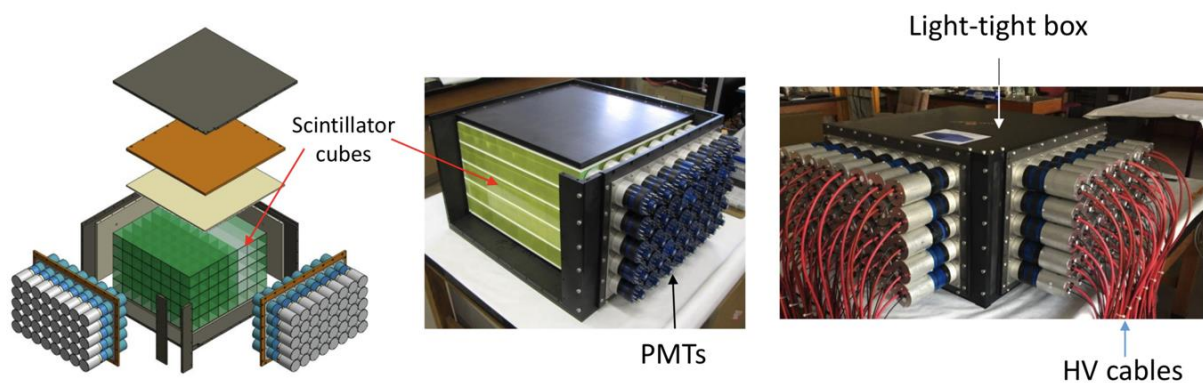
FONTE: (Kim, 2016).

Alguns grupos de pesquisa ao redor do mundo estão desenvolvendo detectores para monitorar reatores nucleares, especialmente utilizando detectores de superfície. Um dos experimentos mais recentes e até então bem sucedido é o MiniCHANDLER, nos Estados Unidos.

2.3.3.2 MiniCHANDLER

Derivado da tecnologia CHANDLER (*Carbon Hydrogen Anti-Neutrino Detector with a Lithium Enhanced Raghavan optical lattice*, em inglês) desenvolvida pelo professor Raju Raghavan do Virginia Tech, o MiniCHANDLER é um detector de neutrinos miniaturizado, em formato de prisma retangular, com 80 kg e 80 PMTs de 2 polegadas modelo Amperex XP2202s. Utiliza cintilador plástico sólido, mais seguro que o cintilador líquido usado comumente, à base de fluoreto de lítio e sulfeto de zinco; e entre camadas de cintilador, folhas de detecção de nêutrons. Esse detector foi instalado, junto com toda sua eletrônica de aquisição de dados, num trailer de 14 pés, nomeado Laboratório de Neutrinos Móvel. A Figura 31 mostra o detector e a Figura 32, o laboratório móvel.

Figura 31. Detector do experimento MiniCHANDLER. Esquerda: vista esquemática do detector. Centro: detector montado com uma lateral aberta para expor o cintilador e as folhas de detecção de nêutrons. Direita: detector completo e cabeado.



FONTE: (Haghighat, 2018).

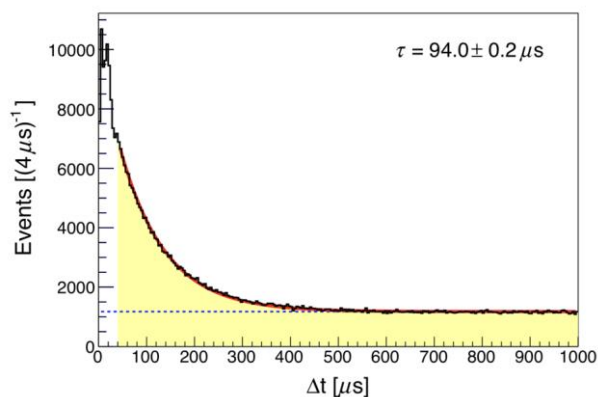
Figura 32. Esquerda: o Laboratório de Neutrinos Móvel do experimento MiniCHANDLER. Direita: o laboratório móvel ao lado do edifício do reator 2 da usina nuclear de North Anna.



FONTE: (Haghighat, 2018).

O laboratório móvel foi colocado a 25 m do núcleo do reator número 2 da central nuclear de North Anna, em Virgínia, Estados Unidos, que conta com dois reatores de 2,9 GW_{th}. Entre agosto e novembro de 2017, o detector coletou dados — incluindo períodos com o reator ligado e desligado — e foram confirmados 2880 eventos de neutrinos, além da correlação entre o momento do desligamento do reator e a redução do número de eventos detectados. Como está localizado na superfície, o detector está sujeito a elevada taxa de eventos atmosféricos e foi desenvolvido um tratamento para os dados adquiridos de forma a separar os eventos correlacionados com o reator dos eventos aleatórios coincidentes. O gráfico da Figura 33 mostra a contagem de eventos em função do tempo de integração, já subtraindo os eventos aleatórios coincidentes. O ajuste que melhor descreve a curva é uma exponencial e foi estabelecida uma constante de tempo $\tau = 94,0 \pm 0,2 \mu\text{s}$. O ajuste aplicado não contempla tempos menores que 40 μs , pois a instrumentação interfere na distribuição nesse intervalo.

Figura 33. Histograma de Δt para todos os eventos de 1-20 MeV.



FONTE: (Haghighat, 2018).

O MiniCHANDLER comprovou a viabilidade de um detector de neutrinos de pequeno porte, montado em superfície e que pode ser empregado, ou removido, rapidamente, para análise e monitoramento de reatores nucleares. A experiência do MiniCHANDLER será incorporada no detector CHANDLER, ainda em desenvolvimento e com maior escala. Novos testes em campo serão feitos com versões modificadas do MiniCHANDLER, com destaque para a inclusão de água como barreira para nêutrons rápidos (Haghighat, 2018).

Um detector de neutrinos pode ser usado para determinar, de forma indireta e não-invasiva, se um reator nuclear foi ligado ou desligado, além de sua potência operacional e o tipo de combustível empregado. Esses detectores também são sensíveis a reatores escondidos e até mesmo a detonações atômicas. Assim, tais detectores também se tornam ferramentas de dissuasão, uma vez que a possibilidade de monitoramento constante coíbe o descaminho de materiais e métodos em instalações nucleares (Suekane, 2013).

No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) é a instituição responsável por regulamentar, ordenar e controlar o uso de materiais e tecnologia nucleares, visando garantir seu uso pacífico, bem como o suprimento das necessidades em produtos radioativos. A CNEN é uma autarquia federal, subordinada ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, com normas que compreendem desde as licenças iniciais de instalações nucleares, até o destino dos

rejeitos, passando pelo transporte de materiais e treinamento de pessoal. Através das entidades estabelecidas em seu organograma institucional, a CNEN está presente desde a prospecção e extração do óxido de urânio, até nas centrais nucleares brasileiras.

A Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) é o complexo de usinas nucleares brasileiras, localizado em Angra dos Reis, Rio de Janeiro. Na CNAAA estão as usinas de Angra I, Angra II e o local de construção da futura usina Angra III. Angra I e II possuem um reator PWR cada, com potência térmica e produção elétrica de 2 GW_{th} e 650 MW e 4 GW_{th} e 1350 MW, respectivamente, que correspondem a importante fatia da matriz energética do estado do Rio de Janeiro. Os reatores datam dos anos 1980, sendo que Angra I entrou em atuação comercial em 1985 e Angra II apenas em 2001 (Angra, 2017) (Eletronuclear, 2018). A Figura 34 mostra uma vista aérea da CNAAA.

Figura 34. Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto.



FONTE: Eletronuclear. Acesso em: <http://www.eletronuclear.gov.br>. Acessado em: 06/01/2019.

2.4 O PROJETO NEUTRINOS ANGRA

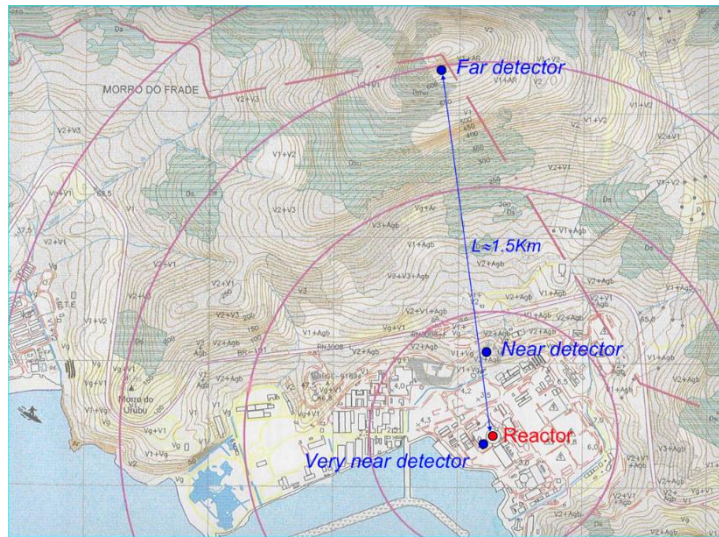
Em 2004, um *white paper* foi publicado revelando a expectativa de muitos pesquisadores ao redor do mundo em desenvolver experimentos com detectores de neutrinos para determinar θ_{13} , o último ângulo de mistura da matriz PMNS. Utilizando centrais nucleares ao redor do mundo, os vários experimentos comparariam seus

resultados, aumentando a confiança estatística e apresentando um resultado final para θ_{13} . Os experimentos com detectores de antineutrinos de reator que foram citados neste trabalho são decorrentes da iniciativa descrita neste *white paper*.

Dentre as várias localidades apresentadas no documento ditas como promissoras estava Angra dos Reis, onde não apenas há uma central nuclear, como seria possível construir detectores sob a cobertura dos morros próximos (Anderson, 2004).

Assim, foi estabelecido o Projeto Neutrinos Angra — ν -Angra — sob a capitania do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). O projeto visava construir 3 detectores próximos a usina nuclear de Angra II. O primeiro detector — denominado Detector Muito Próximo (*Very Near Detector*, VND, em inglês), adjacente ao edifício do reator, com cerca de uma tonelada, seria usado como protótipo de testes e para realizar a medida inicial do fluxo de antineutrinos, além do espectro de energia. Essas medidas seriam aplicadas no desenvolvimento de salvaguardas nucleares. O segundo detector — Detector Próximo (*Near Detector*, ND, em inglês), com 50 toneladas, seria construído a cerca de 300 m do reator, no perímetro da CNAAA. Neste ponto seria construído um túnel adentrando aproximadamente 1,2 km no Morro do Frade. No final do túnel, a cerca de 1,5 km do reator, estaria o terceiro e último detector — Detector Distante (*Far Detector*, FD, em inglês), com 500 toneladas e cobertura de 2000 m.w.e. As posições dos detectores podem ser vistas na Figura 35. A localização proposta para o FD é excelente, uma vez que o Morro do Frade é composto de rocha granita, conferindo boa proteção contra radiação de *background* de raios cósmicos e a distância da fonte de neutrinos conferir maior probabilidade de oscilação de sabor para neutrinos, com energia média de 3,5 MeV (Anjos, 2006).

Figura 35. Mapa da usina de Angra dos Reis e arredores, com as posições dos detectores do Projeto Neutrinos Angra marcadas. A seta azul representa o túnel que seria escavado.

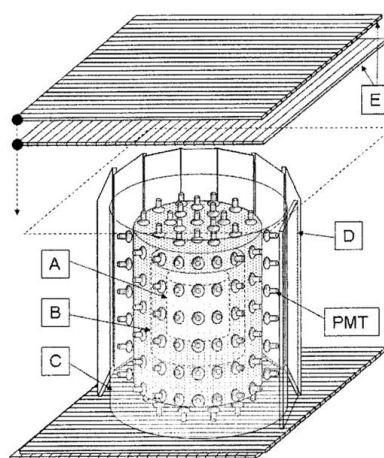


FONTE: (Anjos, 2006).

Os detectores foram planejados para serem idênticos, respeitadas as proporções, com tanques cilíndricos concêntricos e seguindo a mesma linha de construção dos experimentos já citados, como RENO e Double Chooz. Na Figura 36 está o esquema de como os detectores foram pensados quando o projeto começou. O detector seria composto de 5 elementos principais:

- A – Target;
- B – Gamma-Catcher;
- C – Buffer;
- D – Paredes do veto lateral;
- E – Pás cintiladoras do sistema de veto.

Figura 36. Esquemático do detector proposto do Projeto Neutrinos Angra, mostrando seus componentes principais.



FONTE: (Anjos, 2006).

No white paper de 2004 foram listados 12 locais promissores ao redor do mundo, onde seria possível construir o sistema de medida de θ_{13} a partir de neutrinos de reatores nucleares, incluindo a usina em Angra dos Reis (Anderson, 2004). Entretanto, destes, apenas 3 projetos se tornaram realidade, os já citados RENO, Double-Chooz e Daya Bay. Os grupos de pesquisa à frente destes experimentos conseguiram garantir a construção do sistema de detecção antes que outros grupos o fizessem — especialmente o experimento francês que aproveitou a expertise e a estrutura adquiridas no experimento Chooz; provocando uma reorganização da comunidade de físicos de partículas interessados e suas entidades, desencorajando as outras equipes que ainda não haviam viabilizado recursos para a construção dos seus experimentos. Dessa forma, esses 3 experimentos agregaram grandes colaborações internacionais com vastos recursos humanos e financeiros, enquanto as outras iniciativas minguaram (Abrahão, 2012). A maior parte dos pesquisadores brasileiros se alinhou ao projeto francês e colaborou com a sua realização.

A colaboração em torno do Projeto Neutrinos Angra, face às circunstâncias adversas, decidiu reavaliar o escopo e os objetivos do projeto e aproveitando a disposição da AEIA em utilizar experimentos de neutrinos de reatores para desenvolver salvaguardas nucleares, decidiu ressignificar o propósito do projeto. O novo objetivo passou a ser a construção do Detector Muito Próximo, com intuito de

monitorar a potência térmica do reator em tempo quase-real e a evolução da composição do combustível nuclear para corroborar com o desenvolvimento de salvaguardas nucleares (Abrahão, 2012).

Utilizando as equações 39 e 40, a energia média liberada por fissão $W = 203,78$ MeV, a potência térmica do reator de Angra II em $P_{th} = 4 GW_{th}$, a seção de choque média do antineutrino $\sigma = 5,825 \times 10^{-47} m^2$, assim, um detector de uma tonelada a 25 m do reator, seria capaz de contar cerca de $1,23 \times 10^{20}$ antineutrinos por segundo, emitidos pelo núcleo do reator. Desses, 0,061 poderiam interagir com o detector a cada segundo, totalizando cerca de 5270 interações por dia (Santos, 2014).

O modelo já consolidado de detector de antineutrinos de reator, como o proposto inicialmente na Figura 36, não pôde ser usado para a construção do detector em Angra. A Eletronuclear, gestora das usinas nucleares do Brasil e subsidiária da estatal que coordena o setor elétrico brasileiro — Eletrobrás — vetou a construção de uma câmara subterrânea para abrigar o detector, além de proibir o uso de cintilador líquido em suas instalações, por ser inflamável e um potencial risco para a usina.

Dessa forma, o detector foi remodelado para ser alocado em superfície e a nível do mar, uma situação péssima por conta da radiação de *background*. A técnica de detecção escolhida foi a detecção de radiação Cherenkov em água ultra pura, dopada com gadolínio a 0,2%. Este detector teria o *Target* com volume de uma tonelada.

Em novembro de 2008 foi instalado um contêiner naval de 40 pés — 12 m — nas adjacências do edifício do reator de Angra II para servir de laboratório onde o VND seria futuramente instalado e as medidas realizadas. Esse contêiner-laboratório serviu não apenas ao experimento Neutrinos Angra como também foi usado para abrigar o experimento CONNIE — *Coherent Neutrino Nucleus Interaction Experiment* — que usa CCDs (*Charged Coupled Device*, em inglês) como detectores de partículas, na tentativa de determinar o espalhamento elástico coerente neutrino-núcleo (Aguilar-Arevalo, 2016). O contêiner posicionado próximo ao reator pode ser visto na Figura 37.

Figura 37. Contêiner-laboratório do Projeto Neutrinos Angra.



FONTE: (Anjos, 2006).

Uma vez que o panorama internacional favoreceu as colaborações internacionais nos experimentos de determinação de θ_{13} , o projeto Neutrinos Angra passou a ser 100% nacional, incluindo suas fontes de financiamento. Apesar desse fato representar uma oportunidade ímpar de desenvolvimento de conteúdo local e formação de pessoal, também acarretou severas limitações de recursos financeiros e humanos, visto que a comunidade de físicos interessados em detecção de neutrinos no Brasil era pequena e pouco articulada.

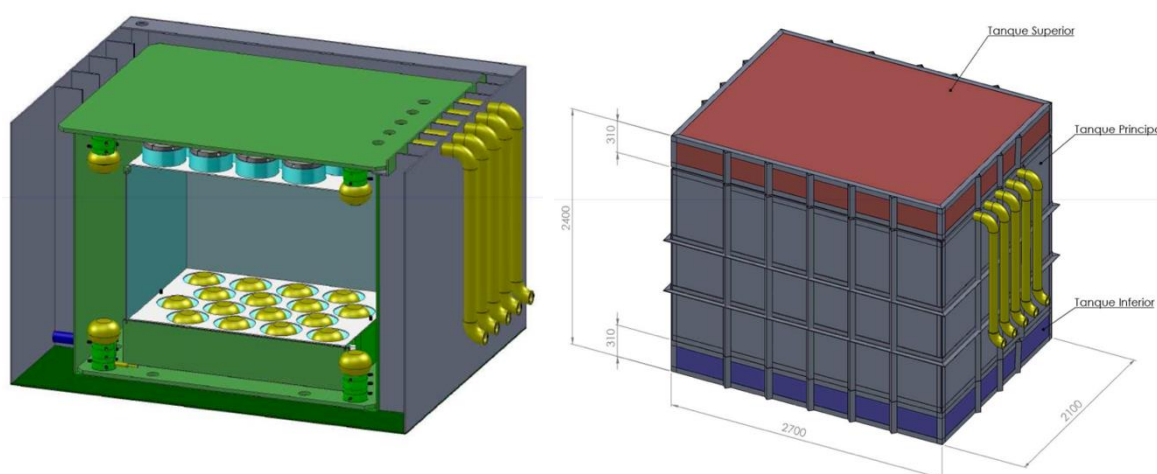
O detector, modelado de acordo com ajuda das simulações realizadas pelo grupo de pesquisa, foi proposto como um paralelepípedo de polipropileno de vários volumes concêntricos e dois tanques de blindagem externa. O *Target* com 1 m³ de água ultra pura dopada com Gd e com 32 PMTs, (16 no fundo e 16 na tampa) — este é o volume mais importante do detector. Envolvendo o *Target*, encontraria-se um volume de veto instrumentado por 8 PMTs. O conjunto estaria contido num tanque com paredes de 0,35 m de polipropileno, revestido com 0,01 m de aço, para bloquear principalmente nêutrons. As medidas externas desse detector seriam: 2,70 m de comprimento, 2,10 m de largura e 1,78 m de altura. O volume externo ao veto instrumentado serve de veto passivo.

Em cima e debaixo do detector central estariam dois tanques de veto ativo, equipados com 4 PMTs cada, com mesma espessura e mesmas dimensões de comprimento e largura do tanque principal, e 0,31 m de altura. Externamente a esse conjunto ainda estariam dispostas placas de cintiladores plásticos para aumentar a

eficiência do sistema de veto de múons (Abrahão, 2012). Todas as fotomultiplicadoras são do mesmo modelo, Hamamatsu R5912.

Na Figura 38 está o esquema do detector completo, como projetado, e no Anexo A está o documento com todos os desenhos originais do detector que fora proposto e do contêiner-laboratório instalado em Angra.

Figura 38. Detector do Projeto Neutrinos Angra, como projetado.



FONTE: (Magalhães, 2011).

A modelagem teórica e as simulações da física do detector foram desenvolvidas desde o início do projeto, bem como a eletrônica a ser embarcada e os primeiros testes com as primeiras fotomultiplicadoras que chegaram ao CBPF. Os resultados destas análises e desenvolvimentos que se seguiram foram publicados sob a forma de notas técnicas denominadas *Angra Notes*, compartilhadas pela colaboração.

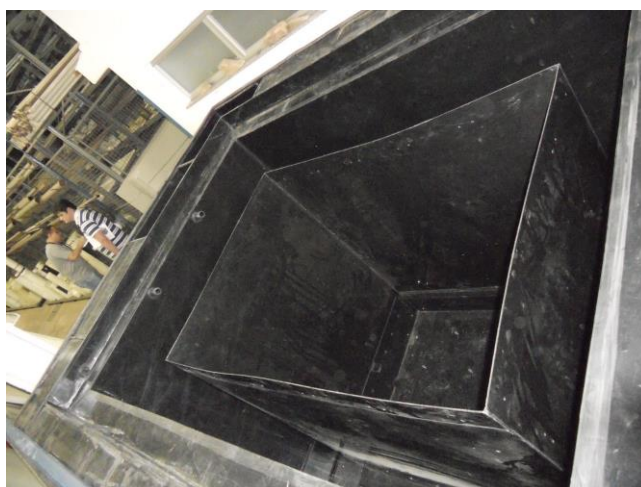
Os órgãos financiadores do projeto foram a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), que desde o início do projeto injetaram recursos. A Rede Nacional de Física de Altas Energias (RENAFAE) também colaborou financeiramente. Além do recurso financeiro para custear a construção do detector e a equipe, o CBPF disponibilizou um espaço em sua sede para o desenvolvimento do protótipo e testes. Nomeadamente foi disponibilizada uma área próxima às garagens do CBPF, próxima a sala de entrada do túnel que,

historicamente, abrigou o acelerador linear, que passou à qualidade de abrigo e local de acondicionamento de materiais radioativos. Essa sala, após breve reforma, passou a ser o Laboratório de Neutrinos.

Infelizmente, uma sucessão de problemas atrasou consideravelmente o projeto. O detector projetado não foi construído de acordo com o desenho, especialmente o *Target*, que foi completamente descaracterizado pelo prestador de serviço contratado. Os outros tanques foram entregues com soldas plásticas e metálicas inadequadas, folgas entre estruturas e entre o polipropileno e o aço, dentre outros defeitos. A Figura 39 mostra os tanques construídos, incluindo o *Target*, entregues pela empresa que ganhou a licitação de construção do detector.

O orçamento do projeto já estava bastante comprometido e não houve como encomendar um novo detector por completo, mas foi possível construir, à parte, um novo *Target* com nova tampa. O desenho deste volume foi remodelado, reforçado e integrado aos outros volumes já construídos. Além disso, foram montados suportes, hastes de sustentação para PMTs e parafusos de polipropileno, pois os originais não eram compatíveis com os tanques entregues. As diversas partes do detector foram estocadas no CBPF à espera da montagem e de sua instrumentação. A Figura 40 mostra o *Target* e a sua nova tampa.

Figura 39. O detector construído e entregue originalmente, com destaque para o *Target*.



FONTE: (Colaboração Neutrinos Angra).

Figura 40. *Target* e tampa do detector novos. No verso da tampa estão duas réguas com copos de polipropileno que acomodam PMTs. Acima: Tampa do detector. Abaixo: *Target*.



FONTE: (Colaboração Neutrinos Angra).

Lamentavelmente, em 26 de janeiro de 2012, um trágico acidente de trânsito vitimou um dos principais pesquisadores em instrumentação científica do Brasil e o responsável, até então, pela montagem do detector do projeto Neutrinos Angra: Ademarlaudo França Barbosa faleceu a caminho da usina de Angra dos Reis, deixando não apenas a colaboração, como toda a comunidade científica bastante consternada com sua perda. Laudo, como preferia ser chamado, trouxe para o Brasil sua larga experiência em detectores de partículas alcançada em sua formação e em seus anos de participação em experimentos pelo mundo, como o Observatório Pierre Auger, na Argentina, o LHCb/CERN, na Suíça, o Fermilab, nos EUA, e Double-Chooz, do qual era pesquisador ativo na França, para citar alguns. Foi um grande incentivador da pesquisa e desenvolvimento em instrumentação científica, tendo formado muitos pesquisadores. Além das responsabilidades com a montagem do detector do projeto Neutrinos Angra, Laudo também buscou recursos e intermediou as relações com a Eletronuclear.

Esse projeto não teria se concretizado não fosse a inestimável contribuição de Laudo; fica aqui, neste trabalho, registrada uma singela homenagem.

Figura 41. Ademarlaudo França Barbosa.



FONTE: (Souza, 2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O detector do projeto Neutrinos Angra foi montado no CBPF, de forma a ser testado antes da instalação em Angra dos Reis. O processo de montagem, desde a primeira PMT instalada no *Target*, até o detector completo, funcionando, levou mais de 2 anos. Em função da fatalidade pela qual passou a colaboração, a tarefa de montagem do detector passou para o grupo formado por físicos e engenheiros da Bahia, tanto da UFBA, quanto da UEFS. Durante o período de montagem, foram realizadas expedições para o Rio de Janeiro desse grupo de técnicos. A última expedição desmontou o detector, acondicionando-o adequadamente para transporte até a usina de Angra dos Reis, onde foi remontado em sua posição final, no contêiner ao lado do edifício do reator de Angra II.

Nesta seção será apresentado em detalhe o processo de montagem de cada elemento e os testes executados, com ênfase nos procedimentos realizados a cada uma das viagens ao CBPF.

Ao início de cada incursão ao CBPF, era realizada uma reunião com a colaboração presente no Rio de Janeiro, para definir o status do projeto e os objetivos da incursão.

3.1 MONTAGEM DO DETECTOR NO CBPF

O detector, já com seu novo *Target*, foi colocado no CBPF em julho de 2012, no espaço citado anteriormente. Em outubro de 2013 começaram as atividades de montagem. Inicialmente, foi realizada uma limpeza preliminar do detector; foram testados os posicionamentos das PMTs na tampa e instalada uma talha elétrica no local em que o detector se encontrava. Este equipamento passou a ser usado para deslocar de forma automatizada, cômoda e segura o *Target*, permitindo colocá-lo e retirá-lo do interior do tanque externo. Na Figura 42 é apresentada a equipe e as PMTs montadas na tampa do detector, ao final da primeira visita técnica ao CBPF, no início de 2014.

Figura 42. As PMTs montadas na tampa do detector ao lado dos pesquisadores, da esquerda para a direita: Carlos Eduardo Tanajura, Germano Guedes, Iuri Pepe e João dos Anjos.



FONTE: (Colaboração Neutrinos Angra).

Em maio de 2014, o detector foi colocado sobre paletes de aço, onde foram montadas rodas também em aço para suportar a carga e permitir a movimentação do tanque. A capacidade de deslocar o detector foi fundamental para a sequência de montagens e desmontagens do mesmo, pois cargas precisavam ser erguidas, baixadas e transportadas separadamente para depois serem montadas. Inicialmente, os deslocamentos foram feitos com a ajuda de um transpalete, mas a melhor solução foi o emprego de tartarugas de locomoção e macacos hidráulicos do tipo unha, adquiridos posteriormente.

O objetivo primário nesse momento era instalar PMTs no *Target* e testá-las, pois, até então os sensores tinham sido apenas testados em laboratório, no momento do seu recebimento. Para tanto, foi desenvolvido um sistema de suporte de LED (*Light-Emitting Diode*) em que 5 LEDs de alto brilho ligados em série e encapsulados foram montados num tubo plástico transparente vedado. A Figura 43 mostra o sistema de suporte de LED.

Esse iluminador foi testado no Laboratório de Sistemas Distribuídos do CBPF — LSD, onde ficavam guardados os sensores (PMTs). Neste laboratório foram realizados os trabalhos que exigiam maior limpeza e cuidados, aqueles que não podiam ser realizados em campo aberto e precisam de cuidados para evitar contaminação. A título de informação, todas as partes do detector foram limpas com

álcool isopropílico antes de serem montadas. Tal procedimento era fundamental para a eliminação de sujidades que poderiam comprometer o desempenho do detector.

Numa caixa de testes para PMTs — devidamente forrada para evitar entrada de luz — o iluminador a LED foi inserido e acionado, o sinal da PMT pôde ser observado num osciloscópio, confirmando a eficácia desse protótipo de iluminador a LEDs para teste das PMTs. Esse modelo foi empregado nas montagens parciais e na montagem final do detector. Para tanto, foram construídas várias réplicas dele; as alterações realizadas, em relação ao primeiro modelo, foram a substituição de 5 LEDs por 3, — um ciano (5 mm, 505 nm), um azul (5 mm, 430 nm) e um ultravioleta (3 mm, 385 nm) – e o acionamento independente desses efeitores.

A tampa do detector fechava simultaneamente o *Target* e o tanque de blindagem e veto lateral, que a partir desse momento será denominado *Shielding* (blindagem ou escudo, em tradução livre do inglês). Para acessar o interior do detector, remover o *Target*, trabalhar na tampa ou realizar qualquer outra tarefa, era necessário seguir esta sequência de ações:

- 1) Posicionar o detector embaixo da talha elétrica;
- 2) Içar a tampa do detector;
- 3) Deslocar o detector, agora destampado, para fora da área de ação da talha;
- 4) Baixar a tampa ao solo e removê-la desta área;
- 5) Retornar o detector à área da talha e içar o *Target*;
- 6) Deslocar o volume do *Shielding* para fora da área de operação da talha e baixar o *Target*;

Para trabalhar dentro do *Target*, era preciso realizar mais duas etapas uma vez o *Target* ao chão:

- 7) Suspender levemente o *Target* por apenas um de seus lados, mantendo uma de suas bordas laterais inferiores em contato com o solo, de forma a incliná-lo;
- 8) Descer o *Target* lentamente para que este ficasse apoiado sobre o costado no solo.

A Figura 44 mostra o processo de operação com a talha para desmontar e montar os tanques no detector. As imagens são de diferentes momentos durante este

trabalho, mas estão aqui para apresentar a ordem de desmontagem após a retirada da tampa; a ordem para a montagem é, conseqüentemente, a ordem inversa.

Com o *Target* no chão e em repouso sobre seu costado, foi possível inspecioná-lo e limpá-lo. As posições marcadas para receber revestimento reflectivo estavam cobertas com plástico. Esse plástico usado no *try out* das longarinas de fixação do revestimento interno foi removido e usado como guia para o corte de folhas de Tyvek®, uma fibra sintética de polietileno de alta densidade com elevada capacidade de reflexão, mesmo molhado, usada para cobrir as superfícies internas do detector, no intuito de aumentar a eficiência de coleta de fótons nos tanques. No caso específico do *Target*, por ser o elemento mais nobre e importante do detector, na montagem final foi usado Gore® como refletor, uma fibra de politetrafluoretileno expandido — tecido com refletância maior que 99%, para fótons em 400 nm. É importante lembrar que nos testes iniciais foi decidido usar Tyvek®, material de muito menor custo que o Gore®.

Figura 43. Esquerda: pulsador de LED de alto brilho. Direita: detalhe dos LEDs do pulsador.



FONTE: (AUTOR).

O Tyvek® foi cortado a partir de um rolo disponível no laboratório. Além disso, a folha precisou ser furada segundo uma padronização desenvolvida no LSD, como pode ser visto na Figura 45.

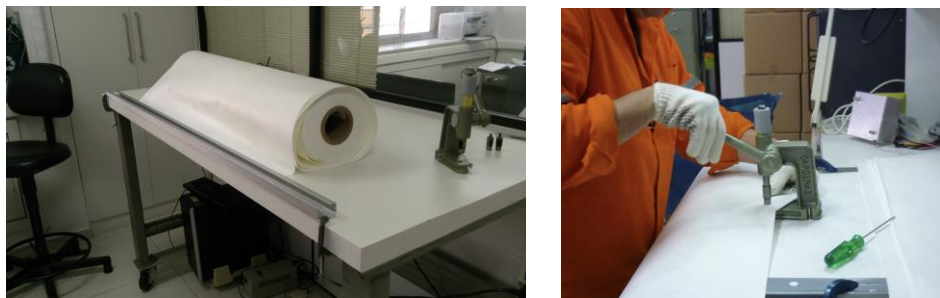
Figura 44. Sequência de retirada do *Target* do detector e disposição para trabalho interno.



FONTE: (AUTOR).

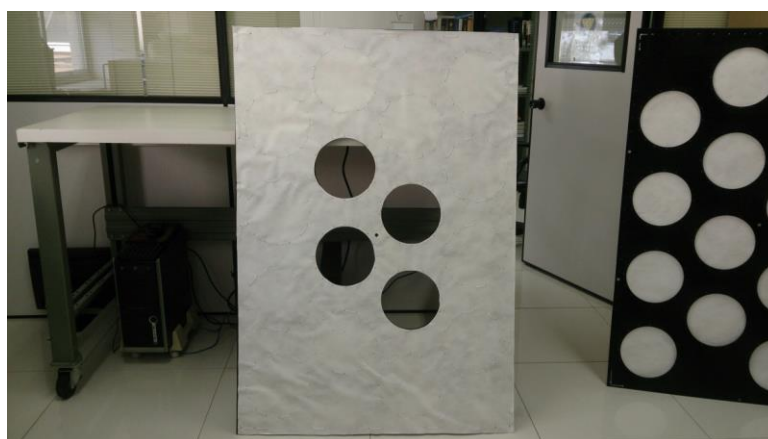
As PMTs no *Target* foram dispostas em duas réguas, agrupando 4 sensores em linha cada, tanto no fundo, quanto na tampa deste tanque. Os fotocátodos das PMTs eram inseridos numa máscara (*cache*) em polipropileno — que, uma vez recoberta, serviu de refletor para as PMTs opostas — aumentando a eficiência de captura de fótons no interior do *Target*. Foram usadas abraçadeiras de nylon (*cable tie*) brancas para fixar o tecido no refletor. Na Figura 46 está um dos refletores recoberto por Tyvek®.

Figura 45. Esquerda: bancada de corte de Tyvek®. Direita: furação do Tyvek®.



FONTE: (AUTOR).

Figura 46. Refletor de polipropileno revestido com Tyvek® e com os 4 espaços para PMTs centrais recortados. Ao lado, vista posterior do outro refletor.



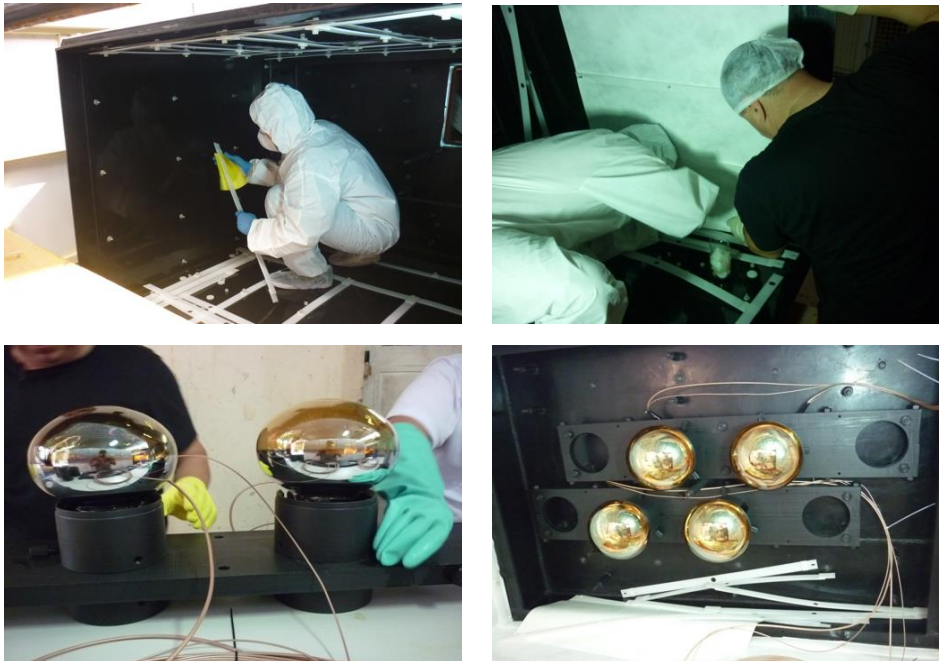
FONTE: (AUTOR).

Neste momento, foi decidido começar testando 4 PMTs nas posições centrais do fundo do *Target*. Este volume foi limpo, incluindo suportes, longarinas e copos de suporte, com água, sabão e álcool isopropílico. O Tyvek® foi instalado no interior do *Target*, em substituição às folhas de plástico que serviram de modelo para o corte preciso das superfícies a serem recobertas. As PMTs foram encaixadas nas régua de posicionamento e montadas no fundo do *Target*, como mostra a Figura 47.

O refletor e o iluminador de LED foram colocados em frente a essas PMTs. A Figura 48 mostra essa montagem. O *Target* foi colocado em sua posição de origem.

Como a tampa do *Target* era a mesma do detector completo, esta era de montagem complexa, sem garantia de estabilidade mecânica, foi decidido que o *Target* não seria remontado no interior do *Shielding* nesta etapa preliminar de testes. Foi, então, concebida uma tampa provisória para proteger o sistema e assegurar estanqueidade ótica. Foi confeccionada uma tampa em madeira com um acesso para a passagem dos cabos dos sensores e dos LEDs e uma entrada de água. Esta tampa fechou o *Target*, que finalmente foi coberto com lona. Esta mesma tampa foi usada até mesmo com todas as PMTs do fundo do *Target* instaladas. O detalhe da tampa de madeira e do *Target* fechado, pronto para testes, podem ser vistos na Figura 49. Os cabos das PMTs foram levados ao Laboratório de Neutrinos e o *Target* foi cheio com água potável filtrada.

Figura 47. Limpeza do *Target* e montagem das PMTs no fundo do tanque.



FONTE: (AUTOR).

Figura 48. O *Target* com 4 PMTs e o pulsador de LEDs.



FONTE: (AUTOR).

Figura 49. Tampa provisória de madeira do *Target*, fechando-o.



FONTE: (AUTOR).

No período entre maio e agosto de 2014, a eletrônica necessária à operação das PMTs — fonte de alta tensão, *front-end* amplificador de sinal, discriminador temporizado, unidade lógica e contador de eventos — foi instalada no Laboratório de Neutrinos no CBPF, sendo usados módulos NIM. O *front-end* foi desenvolvido pela colaboração, enquanto que os outros equipamentos eram:

- Fonte de alta tensão programável de 4 canais, marca CAEN, modelo N1470;
- Discriminador temporizado de 5 canais, marca PS, modelo 715;
- Unidade lógica de 4 canais, marca LeCroy, modelo 365al;

- Contador dual, marca Ortec, modelo 995.

O esquemático e o *setup* podem ser vistos na Figura 49. O amplificador de sinal inverte o pulso recebido das PMTs tornando-o positivo, foi montado um inversor de 4 canais, um para cada sensor, empregando um transformador de pulso. O inversor pode ser visto na Figura 50.

Foi testada a coincidência das 4 PMTs instaladas no *Target*. Para tanto, definiu-se um valor de *threshold* (limiar, em inglês) na eletrônica, para aceitar ou rejeitar o sinal das fotomultiplicadoras. Em seguida, o número de vezes em que os sensores registraram um evento simultaneamente foi contado. Foram ajustados valores entre -32 mV e -400 mV para uma das PMTs e fixado -32 mV nos outros 3 sensores. Cada medida durou uma hora.

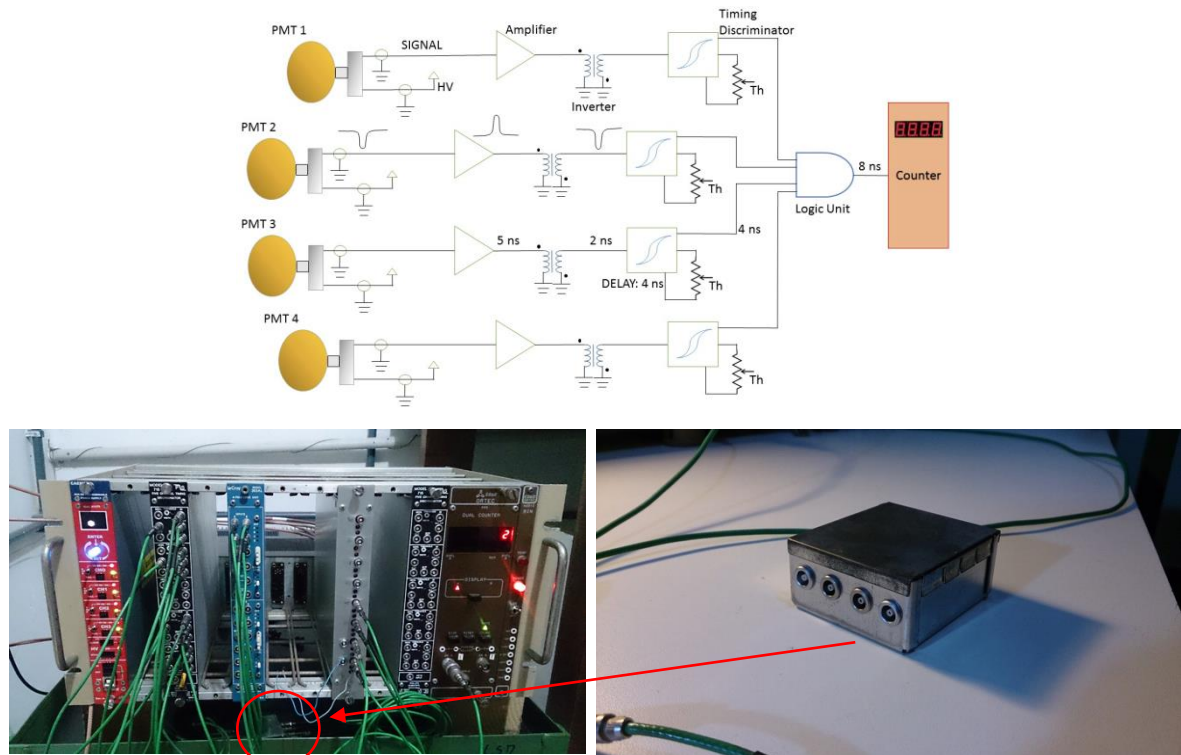
Nesse teste foram observados os eventos disparados pela passagem de partículas externas ao *Target*, como múons, por exemplo. A medida feita pulsando o iluminador a LED instalado não apresentou resultado, sugerindo que havia problemas com os LEDs. Uma vez que era esperado muitos sinais coincidentes, com os LEDs pulsando em visada direta com as fotomultiplicadoras.

O *Target* foi aberto para inspeção e os LEDs estavam avariados, provavelmente devido a um acionamento com largura e intensidade de pulso maiores que os tolerados. Os LEDs foram substituídos e as medidas passaram a ser condizentes com o esperado. Para tal, a tensão de *threshold* foi ajustada nas 4 PMTs em -32 mV, a tensão de pico-a-pico dos LEDs foi mantida em 1,6 V_{pp} e a largura do pulso em 30 ms. Cada tomada de dados levou 30s.

O tanque de veto inferior foi aberto e observou-se a necessidade de um reforço estrutural, para que esse pudesse suportar o peso do tanque principal e o veto superior, ambos instrumentados e cheios de água, quando fosse realizada a montagem final em Angra dos Reis. As 4 barras de plásticos soldadas neste tanque, bem como no veto superior, não tinham função alguma e precisaram ser retiradas, substituídas por um engradado de policarbonato transparente. O desenho desse engradado está no Anexo B. Sua construção foi encomendada à empresa Incomplast, fornecedora de peças de polipropileno, que já havia construído o *Target* e as tampas

dos detectores. Isso depois do fiasco na construção, pela empresa que venceu a licitação, do detector.

Figura 50. Representação do sistema de detecção de coincidência e sistema instalado no rack NIM, com detalhe para o inversor de sinal.



FONTE: (AUTOR).

Em segunda reunião ficou decidido testar o encaixe do *Target* no *Shielding*, o posicionamento das PMTs do veto e a entrega do *Target* com as 16 PMTs do fundo instaladas. As 4 PMTs que estavam no *Target*, bem como o refletor, foram retiradas e levadas ao LSD e outras 12 foram desembaladas e montadas em copos de fixação e régua, aguardando a montagem no detector, como mostra a Figura 51.

Figura 51. Fotomultiplicadoras montadas em seus copos e réguas, aguardando montagem no *Target*.



FONTE: (AUTOR).

Ao testar o processo de montagem do *Target* no *Shielding*, foi observado que as PMTs do veto lateral — originalmente fixadas aos copos soldados na base do *Target* — provavelmente quebrariam durante a movimentação dos tanques. Assim, era necessário realocar essas PMTs em outras posições. Para solucionar esse problema foi proposta uma nova configuração para a tampa do detector, que seria alterada de forma a suportar as PMTs do veto lateral.

A tampa original, que fechava o *Target* e o *Shielding* simultaneamente e continha a base de fixação das 16 PMTs do topo do *Target*, foi cortada para fechar apenas este último volume. Uma nova tampa de polipropileno foi projetada para fechar o *Shielding* e o volume central como um todo; nesta seriam soldadas estruturas para suportar as PMTs de veto lateral, agora posicionadas de cabeça para baixo. Esta nova tampa não é uma peça única, mas uma composição de 5 placas retangulares reforçadas com costelas que se encaixam no topo do *Shielding*, 3 delas com suportes para as PMTs, e mais chapas simples que cobrem a estrutura para impedir a entrada de luz e absorver nêutrons térmicos. No Anexo C estão os desenhos desta nova tampa.

O advento da nova tampa impôs uma alteração no interior do *Target*, pois os pontos de fixação do Tyvek® seriam, eventualmente, destruídos quando a tampa repousasse diretamente sobre este tanque. Assim, os parafusos de plástico

precisaram ser realocados em novas posições — o que acarretou uma diminuição do volume ativo desse tanque, em cerca de 100 litros. O *Shielding* também precisou sofrer alterações, pois as PMTs em sua tampa quebrariam ao contato com as paredes do tanque. Dessa forma, foram recortados sulcos retangulares nas paredes do *Shielding*, denominados, pelo grupo de montagem “cavernas”, para dar espaço às PMTs. O número de PMTs no veto lateral foi diminuído de 6 para 4.

Foi preciso contratar um soldador de plástico profissional, João Antunes da Silva, para realizar os serviços no detector. A nova tampa do *Target* e uma das cavernas do *Shielding* podem ser vistos na Figura 52. Ao longo de três dias de trabalho, não apenas essas tarefas foram executadas. Foram adaptadas as longarinas de fixação do Tyvek® e recuperadas várias peças de plástico quebradas. As placas que compõem a nova tampa do *Shielding* foram encomendadas a este mesmo soldador.

Figura 52. Esquerda: nova tampa do *Target*, fechando-o. Direita: “caverna” no *Shielding*.



FONTE: (AUTOR).

O *Target* foi içado e colocado no *Shielding* para avaliar o encaixe da sua nova tampa e se havia espaço suficiente nas cavernas para acomodar as PMTs do veto lateral. Foi constatado que as mudanças alcançaram os objetivos almejados. Em seguida, o *Target* foi posicionado para que as 16 PMTs do fundo fossem instaladas. A tampa de madeira, usada previamente, foi revestida internamente com Tyvek® e usada para fechar o *Target*, após este volume ser cuidadosamente posto em sua posição de origem. O conjunto *Target & Shielding* foi novamente coberto por lona e

courino preto. Os sensores instalados no fundo do *Target* podem ser vistos na Figura 53.

Figura 53. 16 PMTs no fundo do *Target*.



FONTE: (AUTOR).

No intermédio entre agosto de 2014 e fevereiro de 2015, as placas de polipropileno e o engradado de policarbonato foram entregues e o *Shielding* foi preenchido com água comum para avaliar sua estanqueidade mecânica. Infelizmente, os suportes das PMTs do veto lateral, que ficam presos de cabeça para baixo na nova tampa do *Shielding*, não puderam ser entregues.

Em fevereiro de 2015 decidiu-se focar o trabalho nos vetos, uma vez que ainda não estava disponível a eletrônica necessária para se instalar mais PMTs no *Target*.

O veto inferior foi aberto para inspeção. A tampa deste é composta por uma chapa de aço, com 1 mm de espessura, e uma chapa de 10 mm de polipropileno, cortada em 3 placas menores para facilitar a operação de abertura deste volume. A parte metálica estava bastante oxidada e para tratar e prevenir futuras ocorrências de ferrugem, esta foi pintada com Hammerite®, um esmalte sintético antioxidante. O tanque foi aspirado, o engradado foi colocado para teste e atendeu às expectativas, conferindo maior estabilidade mecânica à estrutura do tanque. Encheu-se o veto com água bombeada do *Shielding*, para minimizar o desperdício de água, no intuito testar se havia vazamentos, o que não ocorreu. Posteriormente, o mesmo teste de estanqueidade foi aplicado ao veto superior e o resultado final foi o mesmo.

Neste teste preliminar, após o enchimento, a coluna de água mediu 220 mm até a altura dos dutos de escoamento de transbordo — ou “*ladrões*” — e totalizando, segundo o medidor da própria bomba, 310 galões americanos — 1.17 m³ aproximadamente.

O engradado foi lavado e esterilizado com álcool e as chapas de polipropileno receberam Tyvek® de acordo com a furação previamente desenvolvida no LSD.

O veto inferior foi revestido com Tyvek®, o engradado de policarbonato foi instalado, as 4 PMTs deste volume foram montadas e o tanque foi fechado, como mostra a Figura 54, sendo em seguida coberto com courino para evitar vazamento de luz.

Figura 54. Acima: instalação de PMT no veto inferior. Abaixo, a esquerda: veto inferior com destaque para o engradado de policarbonato. Abaixo, a direita: veto inferior fechado após instrumentação.



FONTE: (AUTOR).

Os 5 suportes para as PMTs do *Shielding* e as placas para compor a nova tampa foram entregues; um desses suportes pode ser visto na Figura 55. O suporte é

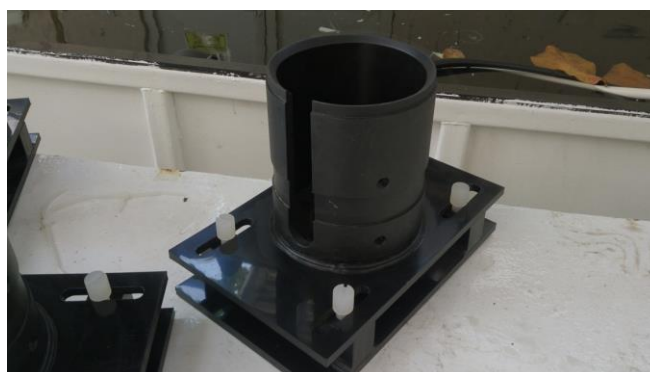
composto por uma base, soldada na placa da tampa do *Shielding*, um copo móvel foi parafusado à base. As bases foram soldadas nas placas costeladas da tampa. Pontos de ruptura do polipropileno do *Shielding* foram constatados e tiveram que ser reparados.

Em abril de 2015, o veto superior foi montado com um reforço interno diferente do veto inferior; enquanto que o Veto Inferior necessita suportar o peso de todo o detector, o Veto Superior só suporta seu próprio peso. Ademais, o espaço interno precisa estar livre para que a detecção de múons e outras partículas pelo veto seja eficiente.

Um suporte interno tubular de policloroetano, também conhecido como policloreto de vinila (PVC), satisfazendo as condições mencionadas acima, foi encomendado ao soldador João Silva. Após teste mecânico deste suporte no tanque de veto superior, tanto o suporte, quanto o tanque foram lavados e desinfetados.

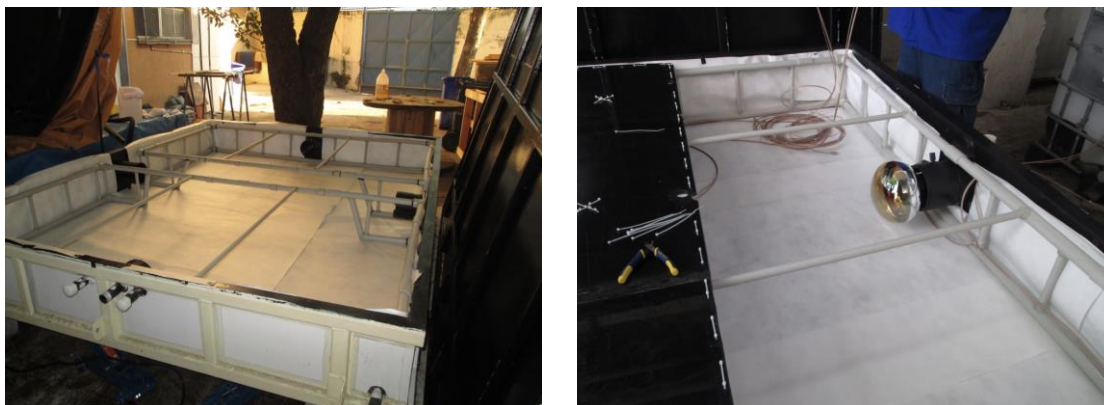
De forma análoga ao veto inferior, o veto superior foi preparado, a tampa de aço foi pintada com antioxidante e o tanque, inclusive as placas de polipropileno da tampa, foram limpos e revestidos com Tyvek®. As 4 PMTs deste volume foram montadas, o volume foi fechado e coberto com courino. A Figura 56 apresenta o veto superior instrumentado, além do suporte interno de PVC.

Figura 55. Suporte para fotomultiplicadora do veto lateral.



FONTE: (AUTOR).

Figura 56. Esquerda: veto superior durante montagem. Direita: detalhe da PMT no veto superior.



FONTE: (AUTOR)

Entre setembro e dezembro de 2015, a montagem do detector no CBPF foi finalizada; faltava apenas instalar as PMTs da tampa do *Target* e do veto lateral, além do preenchimento desses volumes com água. O *Target* foi lavado externamente, aberto e esvaziado com auxílio de uma bomba náutica limpa. Constatou-se que a água, que ficou neste volume por cerca de 1 ano, continuava límpida. Isso, à exceção de um particulado que se despreendeu da tampa de madeira, como mostra a Figura 57.

O *Target* foi virado para que pudesse ser limpo e para realizar a troca do Tyvek[®] do refletor — nessa chapa foi feito um recorte para passar a bomba náutica em futuros esvaziamentos. A Figura 57 também mostra a limpeza das PMTs do fundo do tanque e este volume depois de limpo.

O volume interno do *Shielding* foi limpo e forrado com Tyvek[®], as paredes externas do *Target* também receberam Tyvek[®], como mostra a Figura 58. O *Target* foi, então, içado e posicionado no interior do *Shielding*. Assim como nos outros volumes, no *Shielding*, o volume entre as paredes internas e o *Target* é área útil para a detecção de eventos de veto e precisa estar forrada com Tyvek[®] de forma a otimizar a coleção de fótons.

No *LSD* foram confeccionados os suportes estanques dos LED que seriam montados no refletor da tampa do *Target*. Foram montados 6 suportes neste refletor e preparados outros 6 para serem usados no fundo do *Target*, na montagem final do

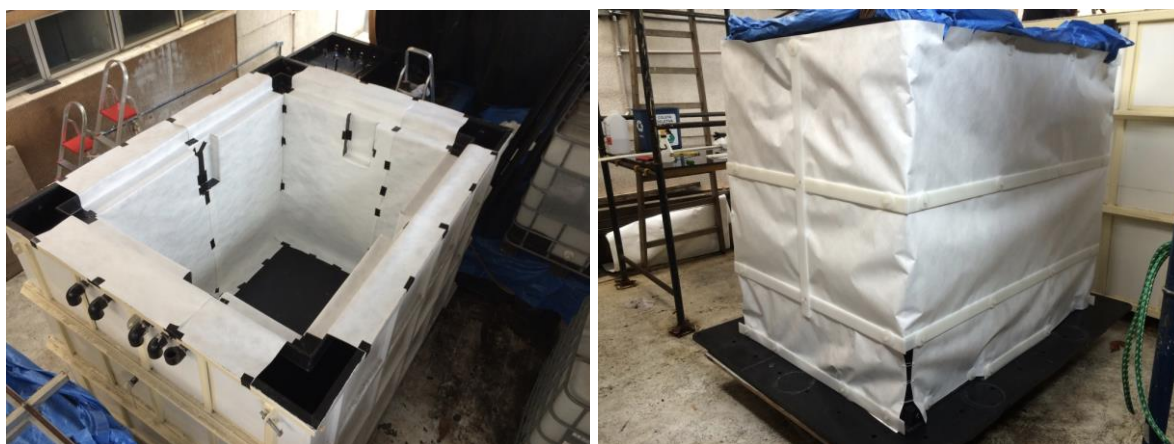
detector em Angra dos Reis. Para o acionamento independente de cada LED contido no suporte foi empregado um cabo de instrumentação de 7 vias, modelo AF-7 x 22 AWG.

Figura 57. Esquerda: *Target* sendo esvaziado. Direita: limpeza das PMTs *in loco*.



FONTE: (AUTOR).

Figura 58. Esquerda: *Shielding*. Direita: *Target*; ambos forrados com Tyvek®.



FONTE: (AUTOR).

Na tampa do *Target*, e por consequência no refletor superior, foi preparado um acesso para uma fonte radioativa, Califórnio-252, um emissor de nêutrons, que poderia ser usada para calibração do detector. Também foram preparados os acessos

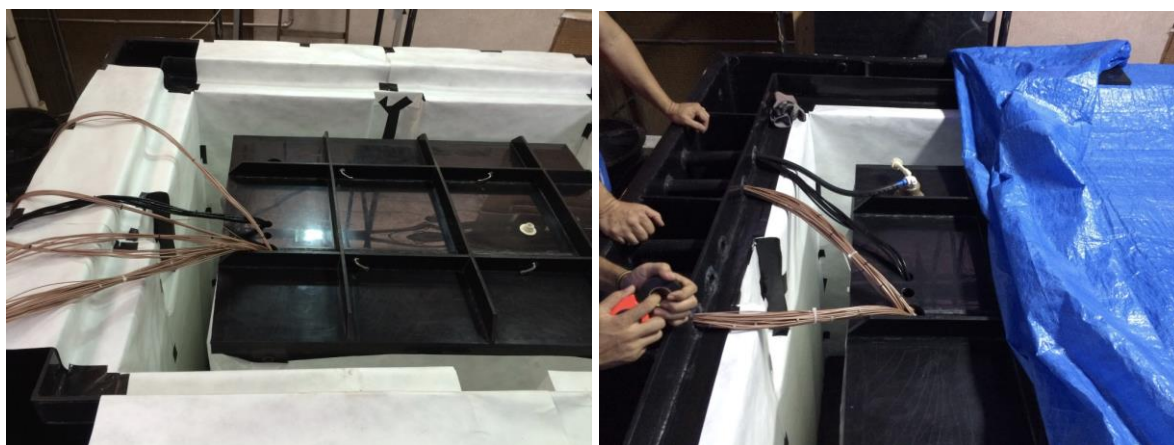
de água e a tubulação de acesso para o cabeamento da instrumentação. As PMTs foram montadas na tampa superior, que precisou ser içada para facilitar o trabalho de montagem; o refletor já com os LEDs foi instalado e a tampa, agora completa, foi baixada sobre o *Target*, fechando-o. A Figura 59 mostra a tampa montada. A Figura 60 mostra o *Target* completo já inserido no *Shielding*.

Figura 59. Vista inferior da tampa do *Target* instrumentada com PMTs e iluminadores a LED.



FONTE: (AUTOR).

Figura 60. *Target* completo montado no *Shielding*. Esquerda: o flange branco é o acesso da fonte de Califórnio-252. Direita: detalhe do cabeamento e entrada de água.

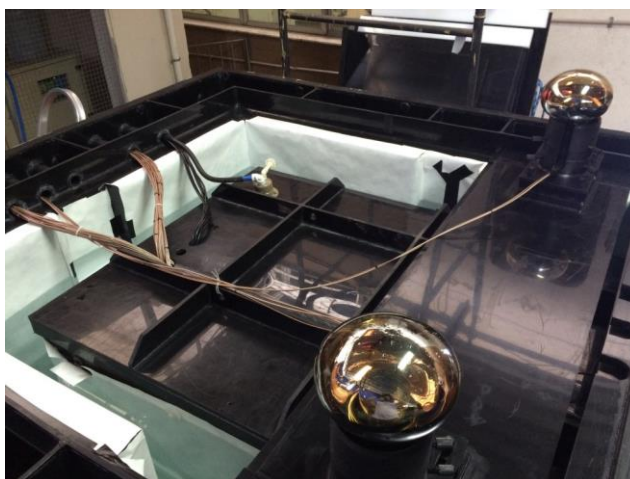


FONTE: (AUTOR).

As placas costeladas de polipropileno que compõem a tampa do *Shielding* foram marcadas, limpas e a placa número 1 foi preparada para a passagem dos cabos do detector. O *Target* e o *Shielding* foram cheios com água ultrafiltrada, o nível máximo de água foi sensoriado por uma bóia. As PMTs do veto lateral foram instaladas nas placas de número 1, 3 e 5, como mostra a Figura 61, e posicionadas no *Shielding*. A estrutura do *Shielding* requer que seu enchimento seja lento, alternando-se entre os volumes interno e externo para que não surja um diferencial de pressão estática entre os volumes de água.

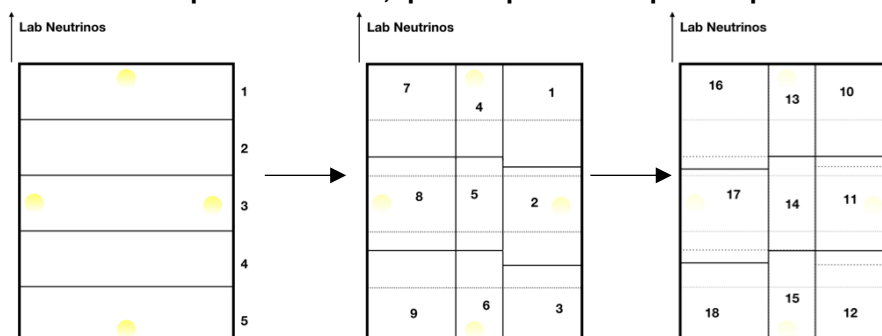
Acima das placas costeladas foram colocadas 18 placas de polipropileno, cortadas a partir das placas antigas de 700 e 800 mm, encomendadas como parte da nova tampa do *Shielding*. Estas placas foram devidamente identificadas e sua ordem de montagem está mostrada na Figura 62.

Figura 61. Duas das 4 PMTs do veto lateral montadas na placa 3 da tampa do *Shielding*.



FONTE: (AUTOR).

Figura 62. Representação da ordem das placas de polipropileno na tampa do *Shielding*. A etapa à direita é superior à central, que é superior à etapa à esquerda.



FONTE: (AUTOR).

Em dezembro de 2015 foi realizada uma viagem até usina de Angra dos Reis para verificar as condições do local e do contêiner onde seria instalado o detector. Foi percebido que o contêiner não tinha altura suficiente para receber o detector completo e que seria necessário abrir mão de um dos tanques de veto; ou construir outro detector. O veto inferior foi então desconsiderado da montagem final do conjunto. Em relação aos diferentes volumes que compõem o detector, a falta deste veto acarretava menor impacto no funcionamento do detector, pois a quantidade de partículas que poderiam atingir o *Target*, vindas a partir do solo, é muito inferior que às que chegam da atmosfera e do espaço. Estes eventos devem ser detectados pelos vetos superior e lateral.

O detector, que estava há cerca de um mês em testes no CBPF, teve o *Shielding* esvaziado para a correção de vazamentos e ressoldagem do polipropileno em pontos de fragilidade encontrados, principalmente no volume de veto passivo. Após esses reparos, o *Shielding* foi novamente preenchido com água e fechado.

Os dados dos testes com ambos os vetos foram analisados na tentativa de determinar, em primeira aproximação, se havia diferença de eficiência na detecção de múons, afetados pelos reforços estruturais implementados. Como o veto inferior continha um engradado em policarbonato com várias peças e o veto superior apenas um esqueleto feito em tubulação de PVC, foi considerado que este deveria ser tratado como um volume totalmente oco.

A diferença entre os vetos foi medida pela contagem total de eventos detectados. Era esperado que as PMTs do veto superior apresentassem contagem superior aos sensores no veto inferior. Entretanto, o número de eventos em uma das PMTs do veto inferior foi superior ao número de eventos detectados pela PMT equivalente do veto superior. Este resultado indicou que poderia existir algo errado com este veto, ao menos em uma das fotomultiplicadoras.

O veto superior foi averiguado em junho de 2016 e foi verificado que o Tyvek® estava fora de posição e o nível da água abaixo do desejado, expondo ao ar parte dos fotocatodos, como mostra a Figura 63. Esses problemas justificam uma contagem de eventos abaixo do esperado. O Tyvek® foi reposicionado, tensionado pelo uso de um

tubo de PVC extra, posicionado no fundo para prender a folha de Tyvek e o nível de água do tanque foi completado.

O veto superior foi aberto novamente, pouco tempo depois, para que melhorias fossem implementadas em sua mecânica. Além de limpo uma vez mais, o suporte de PVC foi recoberto com Tyvek® e foi adicionado, ao centro do tanque, um suporte estanque para acomodação dos LEDs de calibração das fotomultiplicadoras.

Figura 63. Veto superior com Tyvek suspenso e nível de água baixo.



FONTE: (AUTOR).

3.2 TRANSPORTE À USINA NUCLEAR DE ANGRA DOS REIS

O detector ficou em operação no CBPF por um ano sem intercorrências. Decidiu-se então, em setembro de 2017, realizar sua instalação definitiva na usina nuclear Angra II. Para tanto, foi organizada uma operação de descomissionamento, preparo, transporte e instalação na usina.

O processo de desmontagem dos volumes é rigorosamente o inverso do processo de montagem descrito neste trabalho, tomando-se o cuidado de proteger e guardar as PMTs, uma vez retiradas de seus suportes.

A desmontagem começou pelos vetos superior e inferior. Este último volume, mesmo não sendo usado na instalação final em Angra, foi devidamente desmontado

e suas fotomultiplicadoras foram colocadas na reserva. Em seguida, passou-se ao volume central, que foi desinstrumentado sem problemas.

No *Target* foi notado depósito de particulado nos suportes estanques dos iluminadores a LEDs, como mostra a Figura 64. Esse particulado se deu em função da infiltração de água com impureza no porta LED. Esses dispositivos foram trocados por novos, impermeabilizados, para a montagem final.

Figura 64. Iluminadores a LED da tampa do *Target* com particulado ferruginoso precipitado.



FONTE: (AUTOR).

Todos os volumes do detector foram limpos novamente e desinfetados; todo o Tyvek® foi trocado, à exceção do Tyvek® do interior do *Target*: neste foi instalado um novo refletor, o Gore®, utilizando a mesma metodologia empregada anteriormente. Assim, os tanques foram fechados e disponibilizados para o transporte à Angra dos Reis.

O transporte do detector foi organizado de forma que uma empresa de transporte levasse os tanques vazios e as fotomultiplicadoras e ferramentaria fossem transportadas à parte.

Na usina nuclear Angra II, uma plataforma adjacente ao contêiner-laboratório foi montada com paletes de aço e folhas de compensado. Esta plataforma permitiu

que o detector pudesse ser deslocado para o interior do contêiner, uma vez que havia um desnível entre o contêiner e o piso da usina. Assim, o *Shielding* foi entregue pela empresa transportadora já colocado sobre a plataforma. Este volume ainda poderia ser movimentado lateralmente conforme a necessidade, como mostra a Figura 65. A movimentação do detector em relação ao contêiner, representada na Figura 66, era realizada seguindo os seguintes passos:

- 1) O tanque era posto sobre tartarugas de locomoção, as anteriores eram colocadas à 70 cm da borda inferior anterior do tanque, para que essa seção ficasse livre, em balanço, até que as tartarugas ficassem no limite da plataforma.
- 2) Nesse ponto, a região anterior do tanque, agora dentro do contêiner, era levantada com dois macacos hidráulicos do tipo unha. As tartarugas anteriores eram removidas e recolocadas na extremidade da borda inferior anterior do tanque.
- 3) O tanque era empurrado para dentro do contêiner, até que as tartarugas posteriores se aproximassem do limite da plataforma.
- 4) Nesse ponto, a região posterior do tanque era levantada com o uso dos macacos hidráulicos. As tartarugas posteriores, agora próximas ao limite da plataforma, eram posicionadas na parte do tanque que já estava dentro do contêiner.
- 5) Novamente sobre as 4 tartarugas, o tanque já se encontrava completamente no interior do contêiner. Neste momento, as tartarugas de locomoção eram removidas.

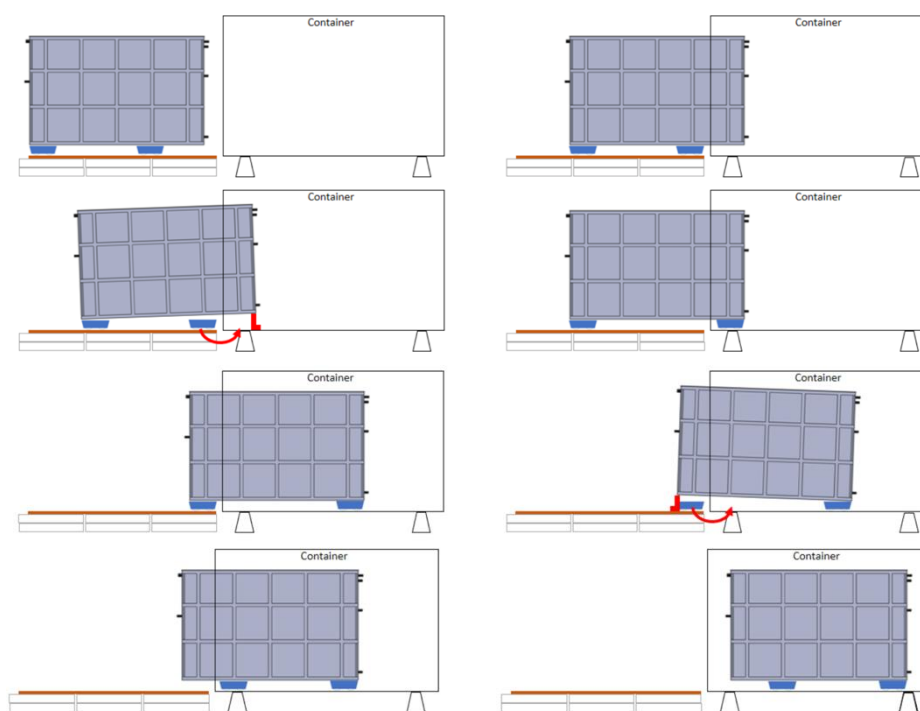
Os demais tanques foram dispostos próximos ao contêiner e um gazebo foi montado para criar um ambiente de trabalho controlado para que a montagem da instrumentação fosse realizada.

Figura 65. *Shielding* em movimentação para o contêiner.



FONTE: (AUTOR).

Figura 66. Representação do passo-a-passo de entrada do detector no contêiner.



FONTE: (AUTOR).

3.3 MONTAGEM DO DETECTOR EM ANGRA DOS REIS

O primeiro tanque a ser remontado foi o veto superior e em seguida o *Target* — primeiro pelas PMTs do fundo e depois pelas da tampa. As Figuras 67 a 70

mostram essas montagens. No refletor do fundo do *Target* foram adicionados 6 suportes estanque para os LEDs de calibração, similar à montagem da tampa deste mesmo tanque. Após montagem, o *Target* foi fechado e revestido externamente com Tyvek®.

Figura 67. Montagem do veto superior na usina Angra II.



FONTE: (AUTOR).

Figura 68. Montagem das PMTs no fundo do *Target*.



FONTE: (AUTOR).

Figura 69. *Target* instrumentado, com detalhe para revestimento das laterais e do refletor com Gore® e para os 6 iluminadores a LED instalados no refletor. Há uma folha de Tyvek® na parte inferior para proteger o Gore® durante a montagem.



FONTE: (AUTOR).

Figura 70. Tampa do *Target* instrumentada, com refletor revestido com Gore®.



FONTE: (AUTOR).

Um caminhão *munck*, operado pela Eletronuclear, realizou a movimentação e posicionamento final dos tanques. O *Target* foi colocado no interior do *Shielding* e após a passagem dos cabos, instalação das PMTs e fechamento, o veto superior foi posicionado no topo deste tanque, concluindo a montagem do detector. O detector concluído pode ser visto na Figura 71.

O detector foi movido para dentro do contêiner e começou-se o enchimento, utilizando água desmineralizada fornecida pela Eletronuclear. Foi montado um circuito

hidráulico com um reservatório de 1000 litros, uma bomba hidráulica com vazão de 9 gpm (aproximadamente 2000 l/h), mangueiras e adaptadores de mangueira de 3/4". Uma representação deste circuito pode ser vista na Figura 72. Foram instalados indicadores de nível para o monitoramento da etapa de enchimento dos tanques, mangueiras de 1/2 polegada adaptadas às válvulas de dreno dos tanques. Esse sistema de vasos comunicantes permite o monitoramento do nível de água nos tanques e o enchimento lento dos volumes.

A ordem de enchimento do detector foi:

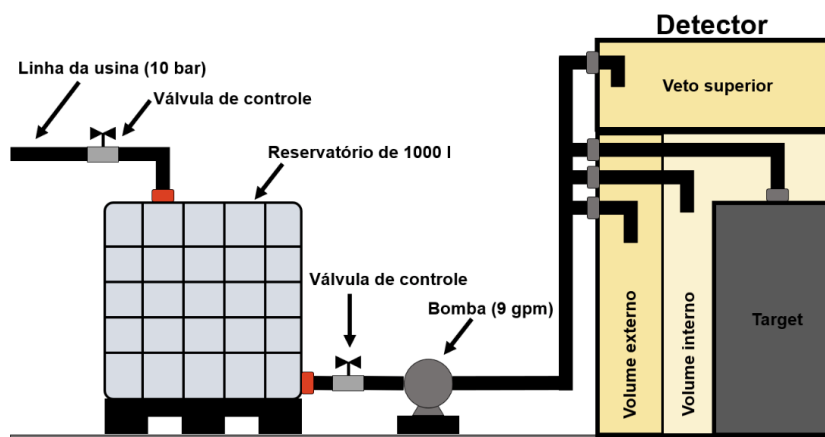
- 1) Encher o *Target* com solução de água desmineralizada dopada com cloreto de gadolínio hexaidratado — $GdCl_3 \cdot 6H_2O$ — na concentração de 0,2%.
- 2) Encher os volumes interno e externo do *Shielding* — alternadamente, evitando assim uma contrapressão das paredes do tanque — usando água desmineralizada.
- 3) Encher o veto superior com água desmineralizada.

Figura 71. Detector completo montado, na entrada do contêiner.



FONTE: (AUTOR).

Figura 72. Representação do circuito hidráulico empregado no enchimento do detector.



FONTE: (AUTOR).

O detector, agora completo, foi preenchido com 1700 litros de água dopada com gadolínio a 0,2% no *Target* — sendo que 1370 L estão no volume útil à detecção de neutrinos, entre os refletores do fundo e da tampa; 1630 L e 3000 L de água desmineralizada foram colocados nos vetos ativo e passivo do *Shielding*, respectivamente; e 1450 L dessa mesma água, preencheu o veto superior.

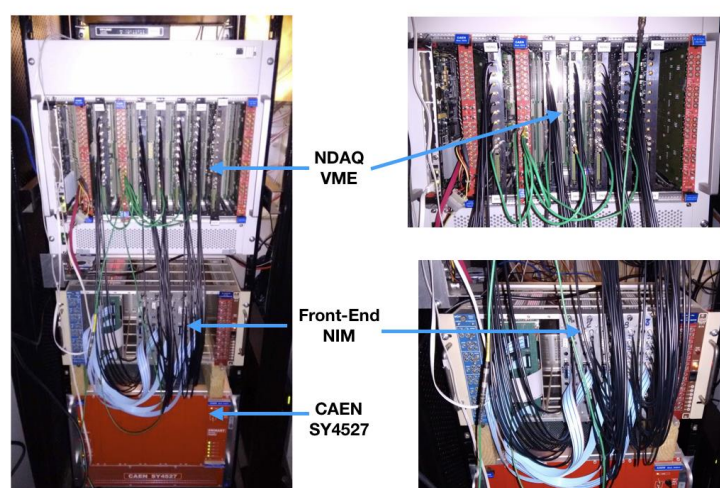
3.4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS INSTALADO

A eletrônica de aquisição de dados foi instalada no contêiner-laboratório pouco após a instalação do detector, como mostra a Figura 73, sendo composta por:

- Um *mainframe* CAEN SY4527 contendo duas fontes de alta tensão A1535SP;
- Cinco módulos de *front-end*;
- Cinco módulos de aquisição de dados de neutrinos (NDAQ - *Neutrino Data Acquisition*);
- Um *Single Board Computer* VME (VME SBC), modelo MVME3100;
- Um módulo *Fan-in Fan-out*, modelo CAEN V976;
- Um módulo de *trigger* (FPGA);
- Uma unidade de armazenamento de dados TS-431P;
- Um sistema supervisor.

No *rack* misto NIM/VME montado no contêiner, a fonte de alta tensão ficou localizada na base, os módulos NIM de *Front-End* estavam no centro, recebendo os sinais das PMTs e os módulos VME do NDAQ montados no topo. Essa configuração foi a mais interessante, pois o cabeamento dos sensores precisa estar conectado à fonte de alta tensão e ao *Front-End*, logo, era melhor estes blocos estivessem próximos.

Figura 73. Sistema de aquisição de dados do detector instalado em Angra II.



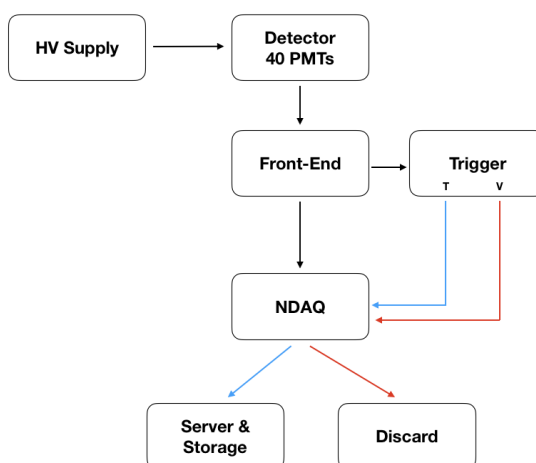
FONTE: (Colaboração Neutrinos Angra).

O sistema de aquisição condiciona, seleciona, digitaliza e armazena os sinais das PMTs do detector. Um fluxograma geral do sistema pode ser visto na Figura 74.

Os módulos de *Front-End* recebem e condicionam o sinal das PMTs e avisam ao *trigger* qual dos sensores gerou esse sinal. Cada módulo possui 8 canais de entrada, com sensibilidade de $71,5 \pm 0,9$ mV por fotoelétron. Como o canal de aquisição começa a saturar em 1,4 V, é possível processar o sinal acumulado de até 20 fotoelétrons, sem que haja saturação do sinal de saída de um dado canal do *Front-End*. Cada canal conta com um estágio de amplificação, um discriminador e um controle remoto, usado para monitorar e ajustar as tensões e o *threshold* das PMTs.

O sinal de saída da *Front-End* segue para os módulos VME de *trigger* e para o *NDAQ*. No estágio de *trigger*, o sinal que chega é comparado com as predefinições dos sinais do *Target* e dos vetos, com o objetivo de determinar se um dado sinal é válido para registro, e posterior análise, ou se deve ser descartado. A saída do *trigger* avisa ao *NDAQ*, que digitalizou os sinais vindos do *Front-End*, se deve encaminhá-los aos servidores de armazenamento, ou se deve descartá-los.

Figura 74. Diagrama do sistema de aquisição de dados do Projeto Neutrinos Angra. As linhas azuis representam sinais do *Target* que são registrados; as linhas vermelhas são os dados do sistema de veto que são descartados.



FONTE: Adaptado de (Alfonzo, 2019).

Em outubro de 2017 foi realizado um teste preliminar das fotomultiplicadoras no detector. A curva de tensão contra o tempo foi adquirida para uma PMT escolhida ao acaso – a SD2850, representando uma amostra do conjunto de sensores, e repetida sistematicamente, de forma a testar a estabilidade da resposta das PMTs instaladas. Essa representação amostral é válida, uma vez que os sensores já haviam sido testados em laboratório, quando do recebimento destes – tornando este um teste de segurança e validação da instalação – os outros sensores operam seguindo o mesmo protocolo.

As primeiras medidas de física do detector foram feitas com múons, medidas usadas para atestar a eficiência e a confiabilidade da eletrônica. Nestas primeiras

aquisições, o sistema de *trigger*, e por consequência o sistema de veto, apresentou instabilidade, registrando eventos com frequência acima do esperado. Após uma atualização do *firmware*, o sistema de veto recobrou estabilidade e eficiência.

Os artigos elencados no Apêndice A foram publicados durante a montagem do detector e apresentaram à comunidade científica os desenvolvimentos que estavam em curso. Dentre esses trabalhos, destaca-se o artigo *Neutrinos Angra experiment: commissioning and first operational measurements*, que detalha o status do projeto, incluindo a montagem em Angra dos Reis, além do sistema de aquisição instalado e os testes de comissionamento realizados.

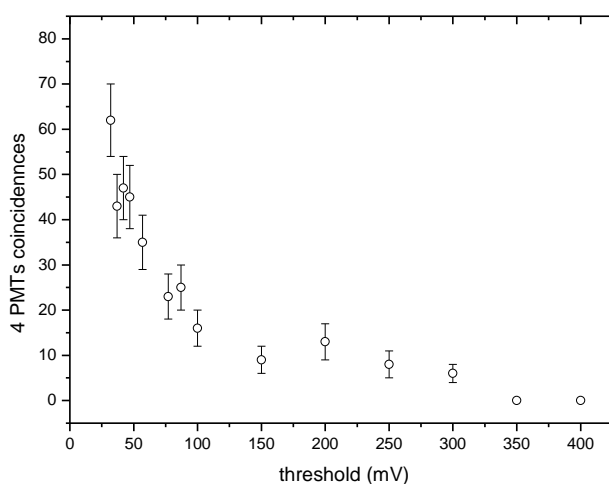
4. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios realizados no CBPF, além da montagem do detector na usina nuclear em Angra dos Reis. De maneira sucinta, é possível apresentar como resultado mais importante deste trabalho o fato de o detector de neutrinos estar completamente instalado e apto a funcionar adjacente ao edifício do reator de 3,764 GW_{th} da usina Angra II.

Apesar de todo o trabalho no detector — desde a sua concepção, até as interpretações dos dados adquiridos — foco maior do trabalho da colaboração, alguns resultados apresentados aqui foram obtidos pela equipe de montagem, assim como pela equipe de comissionamento; uma segmentação comum em projetos de pesquisa de maior porte. De qualquer forma, neste trabalho, o foco foi às atividades realizadas na montagem e os primeiros testes de comissionamento do detector.

O fundo do *Target*, em 2014, foi instrumentado parcialmente com 4 fotomultiplicadoras e testada à coincidência dos sinais de saída desses sensores em função da tensão de limiar de detecção (*threshold*). A Figura 75 apresenta o resultado dessas medidas, no eixo x são representados os valores de *threshold*, positivos por comodidade, no eixo y são apresentados o número de eventos de coincidência entre os 4 sensores. O erro de cada medida é dado pela raiz quadrada do número de eventos contados.

Figura 75. Número de eventos de coincidência em função do threshold de uma PMT em um arranjo com 4 PMTs.

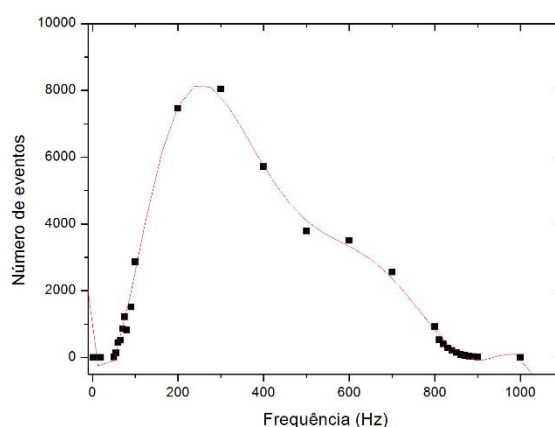


FONTE: (AUTOR).

O resultado do teste de coincidência das PMTs, quando iluminadas pelos LEDs de calibração, pode ser visto na Figura 76. Naturalmente, com uma fonte de luz abundante próxima aos sensores, as taxas de detecção são elevadas. A linha vermelha representa o melhor ajuste encontrado, à exceção do trecho à esquerda de 0 Hz, que é um erro do software utilizado na análise. A equação que permite prever o número de eventos em função da frequência do LED é:

$$N_{LED} = -4,87 \cdot 10^{-15} f^7 + 1,89 \cdot 10^{-11} f^6 - 2,91 \cdot 10^{-8} f^5 + 2,25 \cdot 10^{-5} f^4 - 0,01 f^3 + 1,66 f^2 - 73,45 f + 431,72. \quad (64)$$

Figura 76. Número de eventos detectados em coincidência pelas PMTs usando um pulsador de LEDs.



FONTE: (AUTOR).

Esse resultado mostrou ser possível o uso de LEDs de calibração dentro do *Target*.

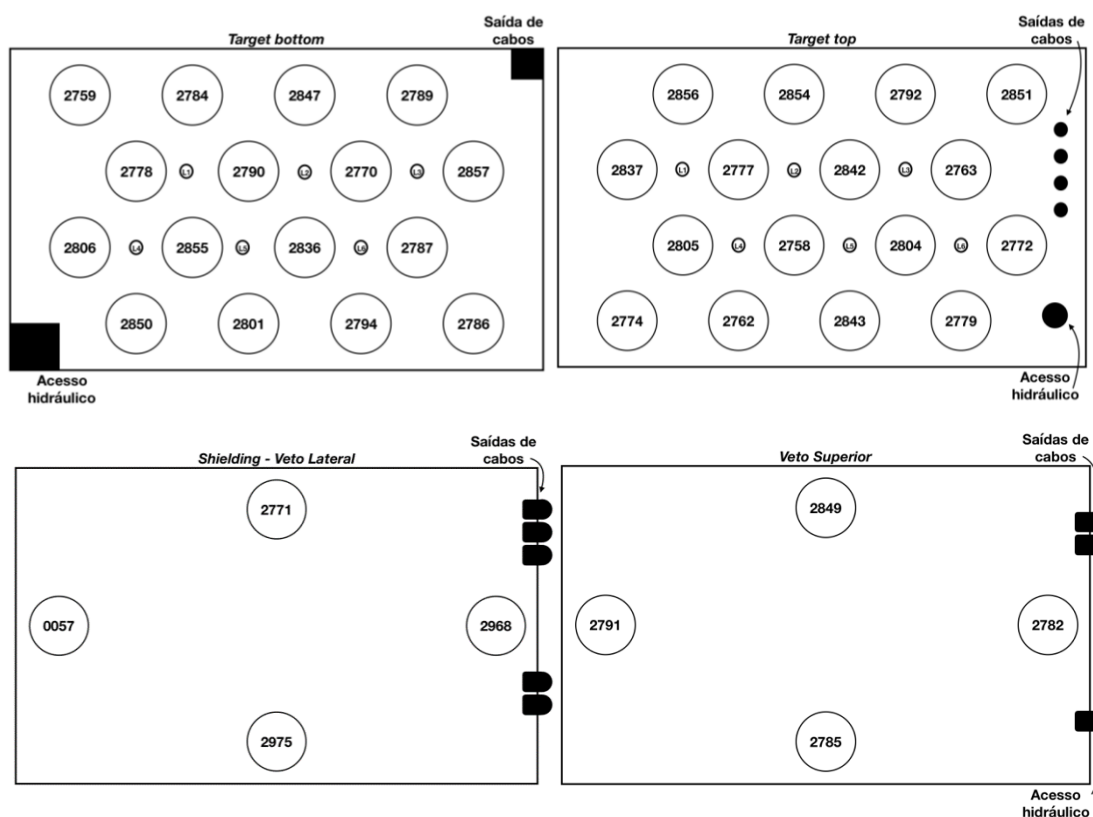
O detector terminado e entregue na usina teve características substancialmente diferentes do detector projetado no início do projeto. A versão final do detector contou com: (i) um novo *Target*, idealizado novamente e construído; (ii) tampas do detector que foram severamente modificadas; (iii) posições das PMTs do *Shielding* que sofreram alterações não planejadas na modelagem inicial.

Assim sendo, foi necessário documentar o detector que de fato foi montado em Angra II. O registro do detector como construído e montado é apresentado no Apêndice B. Este registro contempla inclusive um detalhamento das medidas internas e externas dos tanques, que diferem do projeto original apresentado no Anexo A.

O mapeamento das posições das fotomultiplicadoras instaladas também foi realizado. A Figura 77 apresenta este mapeamento — usando para tanto o número final dos códigos de identificação desses detectores — mantido desde a primeira montagem até a instalação em Angra dos Reis. Os elementos L1-6 designam os suportes dos iluminadores a LEDs instalados no *Target*.

Esta documentação é fundamental para o desenvolvimento de simulações fidedignas e para o comissionamento do detector, pois, por exemplo, a cada fotomultiplicadora é aplicada uma tensão de alimentação própria e única, que determina o ganho de cada sensor.

Figura 77. Mapeamento das PMTs do detector como está instalado em Angra II.



FONTE: (AUTOR).

Assumindo a potência do reator de Angra II e as dimensões do detector instalado, utilizando as equações 39 e 40, o número de antineutrinos produzidos por segundo é dado pela igualdade (65). Já o número de prótons no detector para cada antineutrino vale a igualdade (66). A taxa de interação com o detector por unidade de tempo é dada pela igualdade (67):

$$N_f = 1,15 \cdot 10^{20} \text{ s}^{-1}, \quad (65)$$

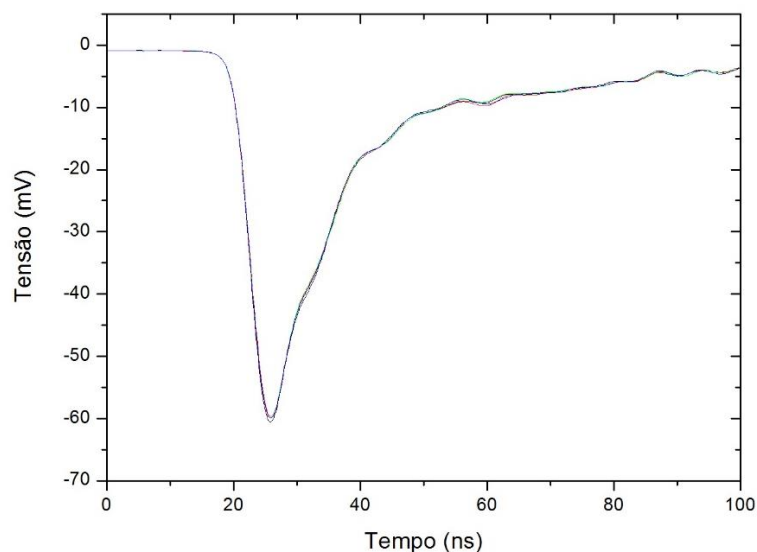
$$N_T = 9,15 \cdot 10^{28} \text{ e} \quad (66)$$

$$R_D = 0,078 \text{ s}^{-1}. \quad (67)$$

Esses resultados equivalem a 6739 eventos de captura de neutrinos por dia. Ou seja, com o detector funcionando bem, a expectativa é de uma excelente estatística de neutrinos detectados.

As curvas de tensão no tempo medidas para a fotomultiplicadora SD2850, como parte do teste de estabilidade, são apresentadas na Figura 78. Apesar de ser perceptível uma flutuação entre as curvas, esta é pequena e o padrão de resposta de uma PMT típica, operando com ganho da ordem de 10^7 , é mantido. As tensões aplicadas para tal ganho estão no documento das fotomultiplicadoras, fornecido pela Hamamatsu, no Anexo E.

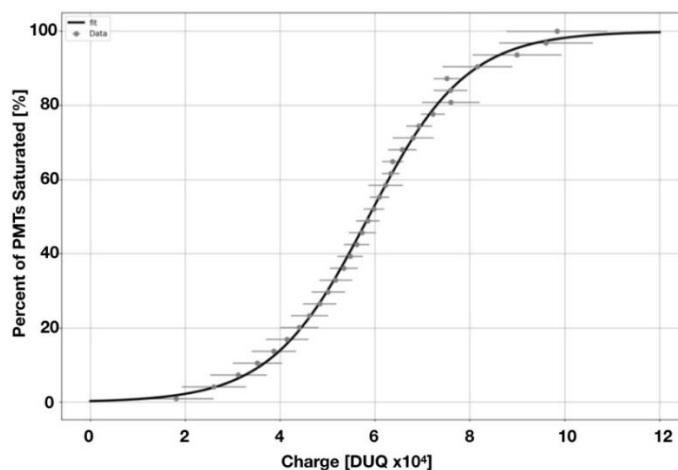
Figura 78. Curvas de tensão de resposta da fotomultiplicadora SD2850, operando com ganho da ordem de 10^7 .



FONTE: (AUTOR).

O sistema de aquisição foi testado quanto à saturação dos canais de aquisição das PMTs, em relação à carga depositada pelas partículas incidentes. A Figura 79 apresenta a curva de saturação desses sensores em relação à unidade de carga digital (DUQ, *digital unity of charge*, em inglês), calculada como a soma das contagens de ADC de cada PMT para um dado evento. A função de saturação das PMTs é suave e os eventos de neutrinos são esperados entre 2 e 4×10^4 DUQs, na região de baixa saturação do sistema.

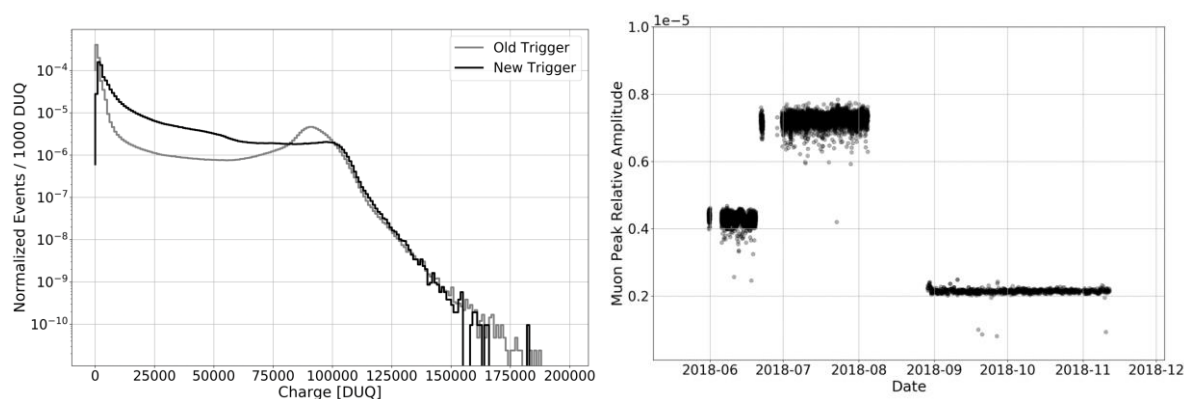
Figura 79. Curva de saturação da eletrônica de aquisição de sinal.



FONTE: Adaptado de (Alfonzo, 2019).

Os resultados das medidas com múons no *Target*, que atestaram a instabilidade do sistema de trigger e seu retorno à normalidade, podem ser resumidas na Figura 80. Há um pico de eventos de múons entre 75000 — 100000 DUQ que desapareceu uma vez o firmware atualizado, pois estes sinais passaram a ser corretamente descartados. A amplitude média do sinal dessas partículas, nessa faixa de carga, antes elevado e oscilante, se torna estável e constante.

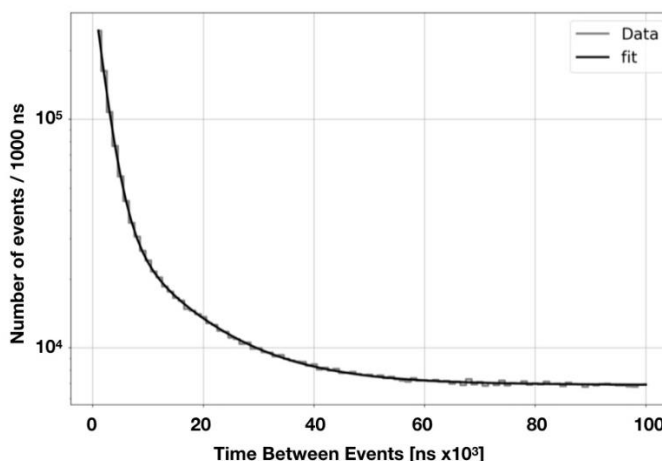
Figura 80. Esquerda: espectro de carga obtido no *Target*. Direita: Amplitude relativa do pico de múons – entre 75 mil e 100 mil DUQs no gráfico da esquerda.



FONTE: (Alfonzo, 2019).

O espectro de eventos no *Target* em função do tempo é mostrado na Figura 81. Na faixa de 0 a 10^5 ns ocorrem três eventos principais: a captura de nêutrons pelo Gd, com tempo médio de 12700 ns; o decaimento de múons que atravessam o detector, com média de 2015 ns; e as coincidências aleatórias de background, com espectro de tempo fora do intervalo compreendido no gráfico, em tempos maiores que 10^6 ns.

Figura 81. Tempo entre eventos no *Target*.



FONTE: Adaptado de (Alfonzo, 2018).

Apesar dessa medida ser parte da etapa de comissionamento do detector é possível realizar um comparativo qualitativo em relação ao gráfico da Figura 33 (ver Cap. 2), de um dos resultados apresentados no experimento MiniCHANDLER. Ambas as curvas são exponenciais, com a maioria das medidas associadas a eventos de neutrino, localizadas no início da curva. Esse resultado aponta para a confiabilidade e estabilidade do detector do Projeto Neutrinos Angra, uma vez que apresenta um comportamento similar referente a um detector cuja equipe já publicou resultados de física. Também é notável esse resultado, uma vez que os detectores citados utilizam tecnologias diferentes, sendo Angra um detector do tipo Cherenkov e MiniCHANDLER um detector de cintilador sólido.

Enquanto é feita a elaboração do texto desta tese, o detector se encontra realizando a aquisição de dados de física, com sua estrutura mecânica estanque e eletrônica em fase final de calibração. Os dados que estão sendo adquiridos serão, em seguida, analisados em detalhe para identificar os neutrinos do reator de Angra II. O que permite monitorar sua operação e desenvolver as devidas salvaguardas nucleares.

5. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

O detector de neutrinos do projeto Neutrinos Angra foi finalmente instalado e posto em operação em um laboratório remoto, montado em um contêiner de 42 pés, instalado adjacente ao edifício do reator da usina nuclear de Angra II, na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto — CNAAA — em Angra dos Reis, Rio de Janeiro, Brasil.

Esse detector é único de seu tipo, em função das customizações implementadas pela equipe de montagem; este sistema sensor pode ser desmontado e remontado quantas vezes sejam necessárias, sem perder suas características ou performance. Neste documento está descrito o processo de montagem realizado, sendo que uma eventual desmontagem deve seguir, rigorosamente, a ordem inversa do aqui registrado.

O detector se encontra em superfície, sendo necessário contabilizar e tratar os efeitos das interações e da radiação de *background* inerentes a esta condição. Os testes e avaliações durante o comissionamento do detector demonstraram sua capacidade de detectar e descartar sinais indesejados, através da eletrônica de aquisição de dados.

Para os detectores desse porte, usualmente é usado cintilador líquido como meio de detecção, o que foi vetado pela Eletronuclear. Face às exigências da gestora da CNAAA, o detector instalado utiliza a radiação Cherenkov em água dopada com gadolínio, como técnica de detecção de neutrinos. A colaboração se beneficiará da expertise adquirida com um detector de superfície, baseado em Cherenkov em água em futuros trabalhos.

O projeto Neutrinos Angra entrou em fase de coleta e análise de dados. Sendo o único experimento do tipo na América Latina, é esperado que pesquisadores, brasileiros ou não, se associem a esta colaboração científica no intuito de realizar medidas, ou participar de futuros desenvolvimentos de detecção de neutrinos em superfície ou salvaguardas nucleares.

O monitoramento do reator de Angra II, em tempo quasi-real, é uma contribuição no campo das salvaguardas nucleares sem precedentes no Brasil e com

potencial de atestar sobre a idoneidade brasileira no uso pacífico da tecnologia atômica. Ademais, este detector tem a capacidade de fornecer, para a Agência Internacional de Energia Atômica, dados e experiências valiosas como subsídio para o desenvolvimento de salvaguardas nucleares internacionais.

O sucesso do projeto Neutrinos Angra aponta para o fomento do desenvolvimento de mais projetos em física de partículas no Brasil e coloca a nação no panteão dos países que desenvolveram projetos 100% nacionais em ciência de fronteira.

O prospecto de um novo detector de antineutrinos de reator para monitoramento de reatores e produção de salvaguardas nucleares aponta para a compactação dos protótipos e aumento de suas relações sinal-ruído. Neste sentido, é preciso avaliar a experiência do experimento MiniCHANDLER, que utiliza cintilador plástico sólido, como solução para um detector de superfície compacto e com baixo risco de impacto ambiental, ou mesmo, como fonte de risco carcinogênico. Este material pode vir a ser uma realidade num futuro detector em Angra dos Reis.

O projeto Neutrinos Angra formou uma colaboração ativa, que publicou até a presente data um número considerável de trabalhos em diversos meios científicos, formou pesquisadores — de graduados a doutores — e divulgou a física de partículas e de detectores brasileira, em meios jornalísticos e de divulgação científica.

6. REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, Thamys. **Detecção de Antineutrinos de Reatores e Medidas de Fontes de Ruído**. 2012. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, 2012.

AGUILAR-AREVALO, A. et al. Results of the engineering run of the Coherent Neutrino Nucleus Interaction Experiment (CONNIE). **Journal Of Instrumentation**, [s.l.], v. 11, n. 07, p.07024-07041, 29 jul. 2016. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/11/07/p07024>.

AGUILAR-AREVALO, A. et al. The CONNIE experiment. **Journal Of Physics: Conference Series**, [s.l.], v. 761, p.012057-012062, out. 2016. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/761/1/012057>.

AHARMIM, B. et al. Electron antineutrino search at the Sudbury Neutrino Observatory. **Physical Review D**, [s.l.], v. 70, n. 9, p.1-7, 29 nov. 2004. American Physical Society (APS). <http://dx.doi.org/10.1103/physrevd.70.093014>.

ALVARENGA, T.a. et al. Readout electronics validation and target detector assessment for the Neutrinos Angra experiment. **Nuclear Instruments And Methods In Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, [s.l.], v. 830, p.206-213, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.05.052>.

AN, F.p. et al. The detector system of the Daya Bay reactor neutrino experiment. **Nuclear Instruments And Methods In Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, [s.l.], v. 811, p.133-161, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2015.11.144>.

AN, F.p. et al. The muon system of the Daya Bay Reactor antineutrino experiment. **Nuclear Instruments And Methods In Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, [s.l.], v. 773, p.8-20, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2014.09.070>.

ANDERSON, K. et al. White paper report on Using Nuclear Reactors to Search for a value of theta 13. Arxiv:hep-ex/0402041v1, 26 Fev 2004. <https://arxiv.org/abs/hep-ex/0402041>.

ANJOS, J. C. et al. Angra dos Reis reactor neutrino oscillation experiment. **Brazilian Journal Of Physics**, [s.l.], v. 36, n. 4, p.1118-1123, dez. 2006. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-97332006000700003>.

ANJOS, J.c. et al. Using Neutrinos to Monitor Nuclear Reactors: the Angra Neutrino Experiment, Simulation and Detector Status. **Nuclear And Particle Physics Proceedings**, [s.l.], v. 267-269, p.108-115, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2015.10.090>.

ANJOS, J.c.. Monitoring Nuclear Reactors with Antineutrino Detectors: The Angra Project. **Nuclear Physics B - Proceedings Supplements**, [s.l.], v. 229-232, p.571-571, ago. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2012.10.012>.

ANJOS, João C; BARBOSA, Ademarlaudo F; KEMP, Ernesto. **Física de neutrinos e reatores nucleares**: Rio de Janeiro: Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2009. 89 slides, color.

ARAKI, T. et al. Measurement of Neutrino Oscillation with KamLAND: Evidence of Spectral Distortion. **Physical Review Letters**, [s.l.], v. 94, n. 8, p.081801-0818015, 1 mar. 2005. American Physical Society (APS). <http://dx.doi.org/10.1103/physrevlett.94.081801>.

BARBOSA, Ademarlaudo F. **Preliminary simulation study of the front-end electronics for the central detector PMTs**. Rio de Janeiro: Angra Neutrino Project, 2007. 14 p.

BARBOSA, Ademarlaudo F.. **Projeto Neutrinos Angra**: Rio de Janeiro: Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2008. 24 slides, color.

BERINGER, J. et al. Review of Particle Physics. **Physical Review D**, [s.l.], v. 86, n. 1, p.1-1526, 20 jul. 2012. American Physical Society (APS). <http://dx.doi.org/10.1103/physrevd.86.010001>.

BERNSTEIN, A. et al. Monitoring the thermal power of nuclear reactors with a prototype cubic meter antineutrino detector. **Journal Of Applied Physics**, [s.l.], v. 103, n. 7, p.074905-074914, abr. 2008. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2899178>.

BERNSTEIN, A. et al. Nuclear reactor safeguards and monitoring with antineutrino detectors. **Journal Of Applied Physics**, [s.l.], v. 91, n. 7, p.4672-4676, abr. 2002. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1452775>.

BILENKY, S. M.. Neutrino. **Physics Of Particles And Nuclei**, [s.l.], v. 44, n. 1, p.1-46, jan. 2013. Pleiades Publishing Ltd. <http://dx.doi.org/10.1134/s1063779613010024>.

BOWDEN, N S. Reactor monitoring and safeguards using antineutrino detectors. **Journal Of Physics: Conference Series**, [s.l.], v. 136, n. 2, p.022008-022013, 1 nov. 2008. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/136/2/022008>.

BOWDEN, N.s.. Reactor monitoring using antineutrino detectors. **Nuclear Physics B - Proceedings Supplements**, [s.l.], v. 217, n. 1, p.134-136, ago. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2011.04.085>.

CABRERA, A. The Double Chooz detector. **Nuclear Instruments And Methods In Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, [s.l.], v. 617, n. 1-3, p.473-477, maio 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2009.10.115>.

CABRERA, Anatael. Neutrino Oscillations with Reactor Neutrinos. **Nuclear Physics B - Proceedings Supplements**, [s.l.], v. 168, p.90-95, jun. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2007.02.062>.

CAICEDO, David Alejandro Martinez. **Comissionamento e Análise do Feixe de Teste do Experimento MINERvA**. 2010. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, 2010.

CAICEDO, David Alejandro Martinez. **First Measurement of Muon Neutrino Charged Current Quasi-elastic to Charged Current Inclusive Cross Section Ratio on a Hydrocarbon Target at Neutrino Energies 2-10 GeV**. 2014. 162 f. Tese (Doutorado) - Curso de Física, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, 2014.

CAO, Jun; LUK, Kam-biu. An overview of the Daya Bay reactor neutrino experiment. **Nuclear Physics B**, [s.l.], v. 908, p.62-73, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2016.04.034>.

CAO, Jun. Determining Reactor Neutrino Flux. **Nuclear Physics B - Proceedings Supplements**, [s.l.], v. 229-232, p.205-209, ago. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2012.09.033>.

CAPOZZI, F.; LISI, E.; MARRONE, A.. Neutrino Mass Hierarchy and Neutrino Oscillation Parameters with One Hundred Thousand Reactor Events. **Physics Procedia**, [s.l.], v. 61, p.336-339, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2014.12.072>.

CERQUEIRA, Augusto Santiago et al. Avaliação do sistema de veto para o experimento Neutrinos Angra. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 21., 2016, Vitória-es. **Anais do XXI Congresso Brasileiro de Automática**. Vitória-es: Sociedade Brasileira de Automática, 2016. p. 1 - 6.

CHINCHESTER, David. **Introduction to Nuclear Safeguards: Nondestructive Analysis**. Idaho Falls: Idaho National Laboratory, 2014. 52 slides, color.
CONGRESSO BRASILEIRO DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL, 13., 2017, Niterói. **Controle do ganho das PMTs do Sistema de Veto do Experimento Neutrinos Angra baseado em RNA**. Niterói: Associação Brasileira de Inteligência Computacional, 2017. 12 p.

COWAN, C. L. et al. Detection of the Free Neutrino: a Confirmation. **Science**, [s.l.], v. 124, n. 3212, p.103-104, 20 jul. 1956. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.124.3212.103>.

CRIBIER, Michel. Reactor monitoring with Neutrinos. **Nuclear Physics B - Proceedings Supplements**, [s.l.], v. 221, p.57-61, dez. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2011.03.094>.

DIAS, M. P. et al. **V-Angra readout electronics and target detector assessment using a cosmic rays based trigger**. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/inscit.2018.8546700>. Acesso em: 27 ago. 2018.

EGUCHI, K. et al. First Results from KamLAND: Evidence for Reactor Antineutrino Disappearance. **Physical Review Letters**, [s.l.], v. 90, n. 2, p.0218021-0218026, 17 jan. 2003. American Physical Society (APS). <http://dx.doi.org/10.1103/physrevlett.90.021802>.

ELABD, A.a.; ELHEFNAWY, O.a.; BADAWY, I.. Nuclear safeguards culture: Roles and responsibilities. **Annals Of Nuclear Energy**, [s.l.], v. 110, p.1134-1138, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2017.08.030>.

GANDO, A. et al. Reactor on-off antineutrino measurement with KamLAND. **Physical Review D**, [s.l.], v. 88, n. 3, p.0330011-03300110, 2 ago. 2013. American Physical Society (APS). <http://dx.doi.org/10.1103/physrevd.88.033001>.

GIAZ, A. Status and Perspective of the JUNO experiment. Arxiv:180403575v1, 10 Abr 2018. <https://arxiv.org/abs/1804.03575v1>.

GONZALEZ-GARCIA, M.c.; MALTONI, Michele; SCHWETZ, Thomas. Global analyses of neutrino oscillation experiments. **Nuclear Physics B**, [s.l.], v. 908, p.199-217, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2016.02.033>.

GREINER, Daniel et al. Double Chooz detectors design. **Nuclear Instruments And Methods In Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, [s.l.], v. 581, n. 1-2, p.139-142, out. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2007.07.047>.

HAGHIGHAT, Alireza et al. Observation of Reactor Antineutrinos with a Rapidly-Deployable Surface-Level Detector. **Arxiv:1812.02163v1**, Blacksburg, p.1-10, dez. 2018.

HAMAMATSU PHOTONICS. **Photomultiplier Tubes: Basics and Applications**. 3. ed. Shizouka: Hamamatsu Photonics, 2006. 324 p.

IAEA SAFEGUARDS. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2018.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Agreement of 13 december 1991 between the republic of Argentina, the federative republic of Brazil, the Brazilian-Argentine agency for accounting and control of nuclear materials and the international atomic energy agency for the application of safeguards. **IAEA Information Circular**. Vienna, p. 01129-01167. mar. 1994.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Focused Workshop on Antineutrino Detection for Safeguards Applications**. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2008. 39 p.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **NVS-1: Safeguards Techniques and Equipment**. 2 ed. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2011. 162 p.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **The radiological accident in Goiânia**. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1988. 157 p.

JOLLET, C. The JUNO Experiment. **Il Nuovo Cimento C**, [s.l.], v. 39, n. 4, p.1-7, 9 jan. 2017. SIF. <http://dx.doi.org/10.1393/ncc/i2016-16318-6>.

KEMP, Ernesto. **Angra neutrino detector: preliminary design**: Campinas: Neutrinos Angra, 2013. 22 slides, color.

KEMP, Ernesto. **Física de neutrinos com reatores nucleares**: Rio de Janeiro: Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2010. 34 slides, color.

KIM, Soo-bong. Measurement of neutrino mixing angle θ_{13} and mass difference Δm_{ee}^2 from reactor antineutrino disappearance in the RENO experiment. **Nuclear Physics B**, [s.l.], v. 908, p.94-115, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2016.02.036>.

KIM, Soo-bong. RENO for neutrino mixing angle θ_{13} . **Progress In Particle And Nuclear Physics**, [s.l.], v. 64, n. 2, p.346-347, abr. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnpnp.2009.12.045>.

KIM, Yeongduk. Detection of Antineutrinos for Reactor Monitoring. **Nuclear Engineering And Technology**, [s.l.], v. 48, n. 2, p.285-292, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.net.2016.02.001>.

KURODA, Y. et al. A mobile antineutrino detector with plastic scintillators. **Nuclear Instruments And Methods In Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, [s.l.], v. 690, p.41-47, out. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2012.06.040>.

LACHENMAIER, T. The measurement of the neutrino mixing angle θ_{13} with reactor neutrino experiments. **Progress In Particle And Nuclear Physics**, [s.l.], v. 83, p.31-58, jul. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnpnp.2015.05.001>.

LEO, William R. **Techniques for Nuclear and Particle Experiments**. Berlim: Springer, 1987. 376 p.

LI, Yu-feng. Overview of the Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO). **International Journal Of Modern Physics: Conference Series**, [s.l.], v. 31, p.14603001-14603005, jan. 2014. World Scientific Pub Co Pte Lt. <http://dx.doi.org/10.1142/s2010194514603007>.

LIMA JUNIOR, H.p. et al. Neutrinos Angra experiment: commissioning and first operational measurements. **Journal Of Instrumentation**, [s.l.], v. 14, n. 06, p.1-16, 5 jun. 2019. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/14/06/p06010>.

LINARES, Edgar Casimiro; ANJOS, João dos. **The Angra Neutrino Detector**. Leon: Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2006. 87 slides, color.

LOPES, G. S. et al. Signal simulation based on the characteristics of the ν -Angra Experiment's readout electronics. **2018 3rd International Symposium On**

Instrumentation Systems, Circuits And Transducers (INSCIT), [s.l.], p.1-6, ago. 2018. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/inscit.2018.8546711>.

MAGALHÃES, Guilherme Pedroto de A.. **Projeto Neutrinos Angra**: Rio de Janeiro: Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2011. 27 slides, color.

MARIANI, C. **CHANDLER@North Anna**. Mumbai: Virginia Tech, 2017. 68 slides, color.

MARZO, Marco A; BIAGGIO, Alfredo L; RAFFO, Ana C. **Nuclear co-operation in South America: The Brazilian-Argentine common system of safeguards**. Rio de Janeiro: International Atomic Energy Agency, 1994. 6 p.

MCKEOWN, R.d.; VOGEL, P.. Neutrino masses and oscillations: triumphs and challenges. **Physics Reports**, [s.l.], v. 394, n. 6, p.315-356, maio 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physrep.2004.01.003>.

MCKEOWN, R.d.. Neutrino oscillation measurements with reactors. **Nuclear Physics A**, [s.l.], v. 844, n. 1-4, p.5-9, nov. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2010.05.005>.

MURTAGH, Michael J. BNL Neutrino Workshop: Opportunities for Neutrino Physics at BNL. In: BNL NEUTRINO WORKSHOP, 1., 1987, Upton, New York. **Proceedings of the BNL Neutrino Workshop**. Upton, New York: Ags Users Group, 1987. p. 1 - 248.

OGURI, S. et al. Reactor antineutrino monitoring with a plastic scintillator array as a new safeguards method. **Nuclear Instruments And Methods In Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, [s.l.], v. 757, p.33-39, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2014.04.065>.

PARK, Jaewon. **MiniCHANDLER Result**. Livermore: Virginia Tech, 2018. 15 slides, color.

PFAHLER, Patrick. **Realization of the low background neutrino detector Double Chooz: From the development of a high-purity liquid & gas handling concept to first neutrino data**. 2012. 267 f. Tese (Doutorado) - Curso de Física, Technischen Universität München, Munique, 2012.

REINES, Frederick; COWAN, Clyde L.. The Neutrino. **Nature**, [s.l.], v. 178, n. 4531, p.446-449, set. 1956. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1038/178446a0>.

RICOUX, J Pedro Ochoa. **Design and Status of the Juno Experiment**. Uppsala: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2017. 22 slides, color.

SANTOS, Lucas Mendes. **Estudo de eficiência para múons do sistema de veto do experimento Neutrinos-ANGRA**. 2014. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

SCHIAPPACASSA, Aridio. **Interface USB para módulo de aquisição de dados Uma contribuição ao Projeto Neutrinos – Angra**. 2011. 92 f. Dissertação (Mestrado) -

Curso de Mestrado Profissional em Instrumentação Científica, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, 2011.

SIMARD, Olivier. **Measurement of the Survival Probability and Determination of the Three-Flavor Neutrino Oscillation Parameters at the Sudbury Neutrino Observatory.** 2009. 278 f. Tese (Doutorado) - Curso de Física, Carleton University, Ottawa, 2009.

SOUZA, D M; A COSTA, I; A NÓBREGA, R. **Histórico de medidas 2:** Rio de Janeiro: Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2017. 22 slides, color.

SOUZA, D M; A COSTA, I; A NÓBREGA, R. **Histórico de medidas Veto.** Rio de Janeiro: Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2016. 15 slides, color.

SOUZA, João Marcelo Silva et al. Sistema online de seleção de eventos no detector Neutrinos Angra. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 21., 2016, Vitória-es. **Anais do XXI Congresso Brasileiro de Automática.** Vitória-es: Sociedade Brasileira de Automática, 2016. p. 1 - 6.

SOUZA, Marcelo Giovani Mota. **Paralelismo computacional de processamento digital de imagens aplicado à detecção de MARFes no JET.** 2013. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, 2013.

SUEKANE, F. Application of Reactor Antineutrinos: Neutrinos for Peace. **Nuclear Physics B - Proceedings Supplements**, [s.l.], v. 235-236, p.33-38, fev. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2013.03.008>.

SUEKANE, Fumihiko; BEZERRA, Thiago Junqueira de Castro. Double Chooz and a history of reactor θ_{13} experiments. **Nuclear Physics B**, [s.l.], v. 908, p.74-93, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2016.04.008>.

TOKYO, University Of. **Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo.** 2015. Disponível em: <<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/index-e.html>>. Acesso em: 22 dez. 2018.

UNITED STATES. U.S. NIM COMMITTEE. **Standard NIM Instrumentation System.** Springfield: U.S. Department Of Energy, 1990. 75 p.

UPADHYAY, A.; BATRA, M.. Phenomenology of Neutrino Mixing in Vacuum and Matter. **Isrn High Energy Physics**, [s.l.], v. 2013, p.1-15, 2013. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/206516>.

VALDIVIESSO, G.a.; GUZZO, M.m.; HOLANDA, P.c.. Equivalence Principle from the Solar and Reactor Neutrino Observations. **Nuclear Physics B - Proceedings Supplements**, [s.l.], v. 229-232, p.452-452, ago. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2012.09.089>.

VALDIVIESSO, Gustavo do A.; GUZZO, Marcelo M.. Compreendendo a oscilação dos neutrinos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [s.l.], v. 27, n. 4, p.495-506, dez. 2005. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1806-11172005000400002>.

WANG, Yifang. JUNO: A Multi-Purpose LS-based Experiment. **Proceedings Of Xv International Workshop On Neutrino Telescopes — Pos(neutel 2013)**, [s.l.], p.1-5, 28 mar. 2014. Sissa Medialab. <http://dx.doi.org/10.22323/1.196.0030>.

ZENDEL, M; MOESLINGER, M. **IAEA Safeguards Equipment**. Santa Fe: International Atomic Energy Agency, 2007. 73 slides, color.

ZITO, Marco. Neutrino experiments: highlights of accelerator and reactor results. **Nuclear And Particle Physics Proceedings**, [s.l.], v. 273-275, p.92-99, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2015.09.011>.

ZUBER, K. On the physics of massive neutrinos. **Physics Reports**, [s.l.], v. 305, n. 6, p.295-364, 1 dez. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0370-1573\(98\)00033-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0370-1573(98)00033-7).

7. APÊNDICE A – Artigos publicados



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Nuclear and Particle Physics Proceedings 267–269 (2015) 108–115



www.elsevier.com/locate/nppp

Using Neutrinos to Monitor Nuclear Reactors: the Angra Neutrino Experiment, Simulation and Detector Status

J. C. Anjos^{a,*}, T. Abrahão^a, T. A. Alvarenga^b, L. P. Andrade^c, G. Azzi^a, A. S. Cerqueira^b, P. Chimentí^d, J. A. Costa^b, T. I. Dornelas^b, P. C. M. A. Farias^e, F. França^a, L. F. G. Gonzalez^e, G. P. Guedes^f, E. Kemp^e, H. P. Lima Jr^a, R. Machado^a, R. A. Nobrega^b, I. M. Pepe^g, A. L. M. Reis^c, D. B. S. Ribeiro^g, O. B. Rodrigues^c, L. M. Santos^c, S. M. V. Santos^c, E. F. Simas Filho^g, M. J. N. Souza^h, G. A. Valdivieso^c, S. Wagner^a

^aCentro Brasileiro de Pesquisas Físicas, CBPF, Rio de Janeiro-RJ, CEP22290-180, Brazil

^bUniversidade Federal de Juiz de Fora, UFJF, Juiz de Fora-MG, Brazil

^cUniversidade Federal de Alfenas, UNIFAL-MG, Poços de Caldas-MG, Brazil

^dUniversidade Federal do ABC, UFABC, Santo André-SP, Brazil

^eUniversidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas-SP, Brazil

^fUniversidade Estadual de Feira de Santana, UEFS, Feira de Santana-BA, Brazil

^gUniversidade Federal da Bahia, UFBA, Salvador-BA, Brazil

^hUniversidade Federal do Oeste da Bahia, UFOB, Barra-BA, Brazil

Abstract

We present the status of the Angra Neutrino Experiment, aimed at developing an antineutrino detector for monitoring nuclear reactor activity. The detector comprises a 1.42 m³ Gadolinium-Water Cerenkov target, surrounded by 50 cm of water shielding, placed inside a commercial container about 30 m from the reactor core, at the Angra II nuclear power plant, Brazil. The 4 GW thermal power of the Angra II reactor will provide a few thousand antineutrino interactions per day. The main challenge of the experiment is to overcome the very high cosmic ray induced background at sea level. The present text describes the construction status and simulations results.

Keywords: Neutrino Detectors, Nuclear Safeguards

1. Introduction

Nuclear reactors are an intense source of antineutrinos and the thermal power released in the fission process is directly related to the emitted antineutrino flux. As antineutrinos interact only weakly with matter and escape the reactor containment without any significant change, measuring the antineutrino flux nearby can provide quasi real time information on the reactor status (on/off) and thermal power, as it has been shown by classical references [1, 2, 3, 4] and also in more recent ones [5, 6]. This unique characteristic makes such de-

ectors a powerful candidate to become in the near future a new tool for monitoring reactor facilities under the regime of nuclear safeguards.

As in all other neutrino experiment, the primary difficulty of the Angra Neutrinos Experiment [7] is the distinction of a small neutrino interaction signal from huge backgrounds from different sources, notably electronics and PMT dark noise, gamma rays from nearby radioactive materials and cosmic rays. The applied use of neutrino detectors on nuclear safeguards requires sea-level operation with minimum material overburden. The development of both electronics and simulations are aimed to accomplish this goal.

In what follows, the detector and electronics design (Sec. 2 and 3) and the simulation latest results (Sec. 4)

*Corresponding author

Email address: janjos@cbpf.br (J. C. Anjos)

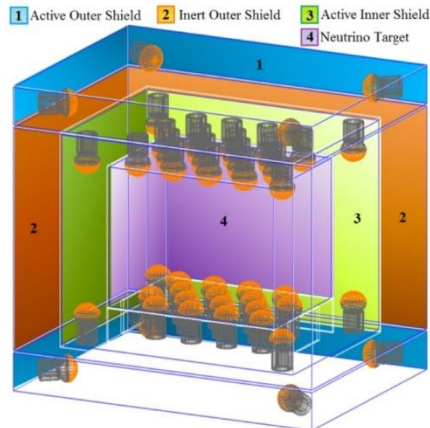


Figure 1: Geometry design of the Angra detector, as modeled with Geant4.

will be described.

2. Detector Design

The adopted detector design is an assembly of four subsystems, here labeled from the outside inwards: (1) two horizontal 25 cm layers (at the top and at the bottom) filled with pure water, equipped with 4 PMTs, acting as active external vetoes; (2) a lateral 25 cm passive water shield that, together with (1), protect the inner parts from cosmic ray induced neutrons and low energy external background as natural radioactivity; (3) a 25 cm intermediate layer of pure water equipped with PMTs, acting as an inner active shield; (4) the neutrino target, based on the water Cerenkov technique, with 0.3 % Gadolinium to enhance neutron capture. Each volume is represented in Fig. 1 as a Geant4 model (more details about the geometry and materials on Sec. 4.2).

Neutrino detection will occur by inverse-beta decay ($\bar{\nu}_e + p^+ \rightarrow n^0 + e^+$), where the emitted positron is above the Cerenkov threshold, thus been visible to the PMTs as a prompt signal. After thermalization, the emitted neutron is captured by the Gd which in turn emits a gamma cascade with average total energy of 8 MeV. These gammas are able to knock out some electrons above the Cerenkov limit, also visible to the PMTs as a delayed signal. The method for neutrino counting relies on the understanding of the temporal correlation between these two signals.

3. Readout Electronics

The readout electronics is composed of a front-end circuit [8, 9] and an acquisition module [10], both developed by the Angra Collaboration. The main functionalities of the former are to read and to conform the PMT signals according to the project requirements while the latter is designed to digitalize and to measure the arriving time of the front-end output signal and to transfer data to a local computer.

3.1. Front-end Module

Eight front-end modules have been produced to fully-equip the detector. Each module has eight channels composed of an Amplifier-Shaper-Discriminator (ASD) circuit; its analog part is shown in Fig. 2. Additionally, each single channel contains an I²C-based circuit able to fine-tune the discriminator thresholds and the offset of the output signals.

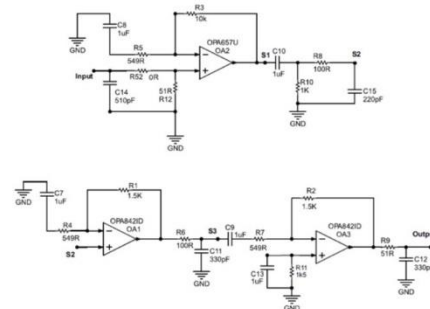


Figure 2: Neutrinos-Angra front-end analog circuit.

The ASD circuit has been characterized for three different gains. The relations between the input charge and the output peak amplitude are shown in Fig. 3 where the circuit linearity and the saturation region can be observed. Considering the highest gain configuration (*Gain-A*), the ASD circuit is linear up to a charge of 60 pC, which corresponds to approximately 37 single-photoelectrons, taking into account a PMT gain of 10⁷. For the lowest gain configuration (*Gain-C*), this value arrives to about 100 photoelectrons.

Fig. 4 shows the average waveforms in response to single photoelectrons for the three tested gain configurations. The front-end output signal has a peak time of 48 ns and a full width at half maximum (FWHM) of 74 ns.

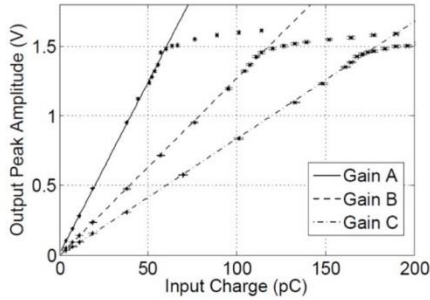


Figure 3: Front-end input charge versus output peak amplitude measurement for three different gains.

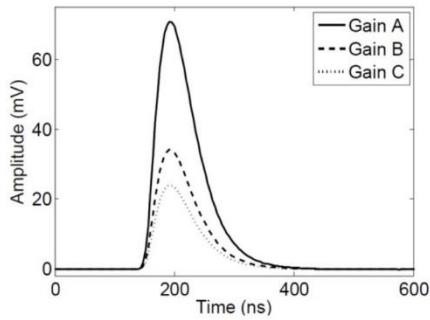


Figure 4: Front-end average waveforms in response to single photo-electrons for three different gains.

3.2. Acquisition Module

The Neutrino DAQ: Each analog-to-digital conversion channel is implemented using a 12-bit multi-stage pipeline ADC able to sample the input signal at 125 MHz. With resolution of 10 bits and a dynamic range of 2 V_{pp}, a voltage resolution around 2 mV is achieved, which covers the required energy resolution in the detector (considering 4 mV per p.e.). For high-precision time measurement of time between pulses an 8-channel Time-to-Digital Converter integrated circuit has been selected. The TDC presents a resolution of 81 ps and is able to measure pulses in a range of 8 μs. ADC and TDC information converge at the FPGA core, which build both measurements together for further readout by the control software through the VME bus. The low-level readout software runs on a commercial Single Board Computer under Debian OS.

4. Simulations

The simulations are required to describe properly the interaction between the primary sources (neutrinos or backgrounds) and the detector, reproduce the correct distribution of photo-electrons generated in each PMT for each kind of interaction (both in number and in timing), estimate frequencies of single interaction and of coincidences assuming Poisson statistics for all the primary sources, estimate the signal over noise for the neutrino detection and the capability to reconstruct the actual number of neutrino interactions in realistic conditions. For this reason the software is divided into logical units which interact through well defined interfaces.

4.1. Primary Generators

The fundamental quantity of interest for each kind of primary source is the differential directional intensity[2] (the number of particles dN incident on an area dA in a unit of time dt , per unit of energy dE within a solid angle $d\Omega$):

$$I_i(E, \theta, \phi) = \frac{dN_i}{d\Omega dE dt dA} \quad (1)$$

where i is the primary particle species and θ and ϕ the incoming direction. *A priori*, the intensity may depend on the position within the detector. We consider however an initial primary intensity homogeneous over a volume encompassing the full detector. As the interaction between primaries and detector materials will shield inner detector parts from many backgrounds, it is necessary to consider both angular and energy distributions for each particle species. Proper integrals of differential intensities permit the calculation of fluxes and rates.

4.1.1. Neutrino interactions

A reasonable approximation of the neutrino interaction rate in a water can be calculated according to:

$$R_\nu = \frac{N_f N_p \langle \sigma \rangle}{4\pi D^2} \quad (2)$$

where N_f is the average fission rate, given by:

$$N_f = 6.24 \times 10^{-8} \left(\frac{P_{th}}{MW^{-1}} \right) \left(\frac{MeV}{W} \right) s^{-1} \quad (3)$$

and $P_{th} \approx 4 \times 10^3$ MW is the nominal reactor thermal power, $W = 203.78$ MeV is the average energy release per fission, $\langle \sigma \rangle = 5.825 \times 10^{-43} \text{ cm}^2$ is the average cross section, N_p is the number of protons in the fiducial

(neglecting the presence of Chlorine for the moment), the inner veto, water shield and the top and bottom active shields, all filled with pure water. All the volumes are enclosed by plastic and metallic containers of variable thickness designed to sustain the detector weight, to maintain water purity and to ensure adequate light-tightness. The target is instrumented with 32, 8" PMTs, the inner veto by 8, and the shields by 4 each. The interior surfaces of the active volumes (target, inner veto and active shields) are covered with a white material (Gore in the target and Tyvek elsewhere) to diffuse light with > 95% efficiency, increasing the overall PMT light collection efficiency. The other two key optical properties are the water absorption length and the PMT quantum efficiency, the first is typical of filtered water, while the second is modeled according to the manufacturer's specifications (Hamamatsu). As the water absorption length increases with water purity, and the power plant has an abundant source of ultra-pure water, the total light collection efficiency is modeled in the simulation conservatively.

4.3. Signal and background characterization

After the transport of the primary particles through the detector, we are now able to analyze the shape and distribution of the signals left in the detector.

Charged particles with speed above the Cerenkov threshold emit photons which can be detected by PMTs. Photon collection happens on a time scale of about 10 ns and the front-end electronics have a shaping time of about 100 ns. Moreover, the DAQ electronics (with 8 ns sampling time) acquires a number of samples before the actual start of a signal in order to check the quality of the baseline. All p.e. generated within 512 ns (64 DAQ samples) will therefore appear as a single pulse (we use the word "pulse" to refer to signals in coincidence within this time window). As each PMT has dark noise of about 5 kHz, we expect a global dark-noise in the central detector of about 160 kHz. In order to reduce the trigger rate to acceptable levels it is therefore necessary at least to ask for the coincidence of few p.e. within the 512 ns DAQ time window. For example, asking for at least 5 p.e. in coincidence (using the approximation $R_{\text{coin}} \approx R_{\text{sing}}^n \Delta T^{(n-1)}$ with R_{coin} the desired coincidence rate, R_{sing} the singles rate, and ΔT the coincidence time and n the number of p.e. in coincidence) we expect a dark-noise rate of the order of 10Hz. With this requirement the dark-noise rate is far below background rates due to other sources. The inverse beta decay interaction results in a positron and a neutron. The positron may have a speed above the Cerenkov threshold and may be directly detected. The two gammas gen-

erated by positron annihilation have an energy of order 0.511 MeV and are unlikely to interact with other electrons to produce Cerenkov light. On the other end, the neutron thermalizes and is absorbed by the Gd, which in turn emits gammas with total energy of about 8 MeV. This gammas may interact with other electrons to produce Cerenkov light.

Analyzing only the events one by one, before the mixing process, it is possible to plan some selection rules (or cuts) to optimize the signal-to-noise ratio. Two selection rules are particularly promising: selecting only events that produce between 10 and 200 p.e. leaves about 90 % positrons and 89 % of neutrons untouched, while reducing dramatically the background level. Further restricting the selection to the interval 20 to 150 p.e., the efficiency drops to 78 % for positrons and 82 % for neutrons. These selection will from now on be referred as *Selection1* and *Selection2*, respectively. The time difference between the prompt (positron) and the delayed (neutron) signals is shown in Fig. 5. We see that 99 % of the events (here we use the word "event" to refer to the coincidence of two pulses) have time interval $\Delta T < 50 \mu\text{s}$ (*TimeSelection1*). One can also see that events with time difference inferior to $5 \mu\text{s}$ are also less likely to occur, which leads another possible time selection rule for events that have time intervals in the range $5 \mu\text{s} \leq \Delta T \leq 50 \mu\text{s}$ (*TimeSelection2*). This selection rule results in an efficiency of about 89 %. Although more stringent on the neutrino signal, *TimeSelection2* is ideal to prevent correlated background, when a positron and a neutron from cosmic sources could mimic a neutrino signal. The overall combined efficiency is 79 % for the combined loose selections ($S1 = \text{Selection1} + \text{TimeSelection1}$) and 54 % for the more strict ones ($S2 = \text{Selection2} + \text{TimeSelection2}$). These two combinations will be carried out to the mixer analysis. We therefore expect to select a rate of neutrino interaction of about 4.0 k events/day with *S1* and 2.7 k events/day with *S2*. Due to the mixing process, the final efficiencies have a tendency to be slightly lower.

Some remarks and highlights from the simulation are in order. It has been observed from the simulations that the relation between the number of p.e. in the prompt pulse and positron momentum may be regarded as been linear, for the purpose of measuring the emitted neutrino flux as a function of the reactor's burn-up. Also, pulses with more than 300 p.e. are mainly due to the passage of muons, while pulses with less than that are mainly due to the neutral component of cosmic rays (neutrons and gammas). The total rate is about 1.5 kHz, with about 350 Hz due to muons. Most of the background pulses however are easily vetoed by the external

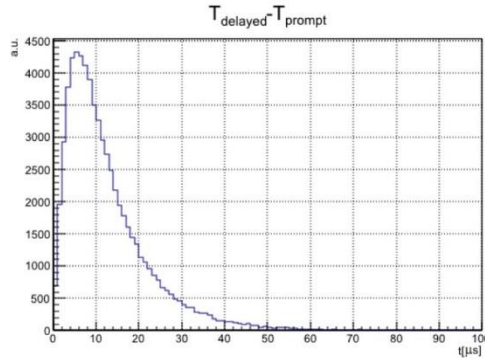


Figure 5: Time difference between prompt and delayed events. The average value around $10 \mu\text{s}$ is expected due to the chosen Gd concentration of 0.3 %.

modules, since from those values a total rate of 72 Hz would pass *Selection1* and 56 Hz *Selection2*. The rate of uncorrelated (random) background events passing *S1* is 4.5×10^{-4} Hz and 7.2×10^{-7} Hz for *S2*, both well below the neutrino selection rates (0.047 Hz with *S1* and 0.032 Hz with *S2*). About 20 % of muons generating a signal in the target are followed by at least a second pulse (called secondary) due to different process as muon decay, spallation neutrons etc. Secondary pulses with intervals smaller than about $5 \mu\text{s}$ are mostly due to muon decay. Moreover about 18 % of secondaries fulfill *S1* and 14 % *S2*. Assuming that 1 % of primaries are not vetoed, it is expected that the rate of correlated signals due to muons is 0.13 Hz with *S1* and 0.10 Hz with *S2*, both higher than the neutrino signal. It is worth remarking, however, that this background can be measured during reactor off periods and partially (at least the component not involving spallation neutrons) with a pure water target. Assuming a perfect accuracy in the background rate measurement we therefore have a signal-to-noise $S/N \equiv S/\sqrt{BG} = 38$ with *S1* and $S/N = 29$ with *S2* after 24 h of data acquisition. We therefore stress the importance of background measurements for the success of the project.

4.4. Mixer

The Mixer is the piece of software responsible for generating the time distribution for everything that might leave a signal in the detector. It takes as inputs the single events generated by each primary particle (and transported through the detector by Geant4) and a list of frequencies f_i for each primary species. Due to the generation procedure employed for cosmic backgrounds (as

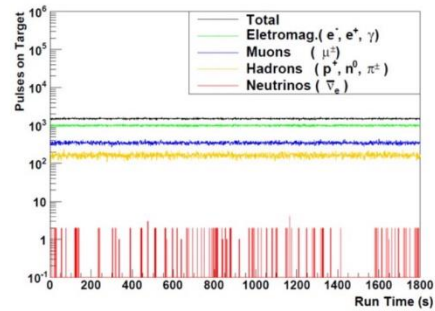


Figure 6: Pulses (p.e. in a 500 ns window) on Target, per second. The black line is the total rate (1.5 kHz on average), while the red represents pulses containing either the prompt or the delayed neutrino signals. Other colors show the EM (green), the muonic (blue) and hadronic (yellow) components of the cosmic background.

previously detailed in Sec. 4.1.2), a number of primaries do not leave any signal on the detector, mainly because of the random directions (also due to shielding efficiency). The frequencies are corrected by the ratio of events that produced any signal (p.e. on PMTs) by the total number of simulated primaries. This leads to an effective frequency \tilde{f}_i for each species. The Mixer then generates a time sequence assuming an exponential distribution. The result is a Poisson process where the average time between particles of the same kind is $\tau_i = 1/\tilde{f}_i$. The output of the mixer is time ordered collection of pulses, mimicking the kind of signal the electronics will face with the real detector. Fig. 6 shows the number of pulses per second on a 3600 s sample, generated on the target volume. The first result of the mixer is the total (background dominated) rate of pulses on the target, which is 1.5 kHz. Section 4.5 will describe how to significantly reduce the background rate, based on study of the mixer's output. A remark on the environmental gammas is in order: due to the 50 cm water shielding, the already small Cerenkov signal generated by this source is strongly suppressed, thus making it a negligible background.

4.5. Signal optimization

For the purpose of validating the selection strategies devised on Sec. 4.3 (namely, *S1* and *S2*) two sets of 24 samples each (simulating 24 h of data taking) were mixed for this study. Each set has the following characteristics: Set *I* contains a mixing of background and antineutrino signal (all sources described in Tab. 1). Events are identified via a MC tag so that each pulse is related to a specific primary event (thus, the type of

source is also identified). Set 2 contains only background events. The two sets can be read as individual packages of 1h, or sequentially up to 24 h of physics with (1) or without (2) the neutrino source, depending on the analysis. The random seeds were different for each hour, so the two sets may be regarded as independent days of data taking.

According to the MC information retained in the mixed data, from the 5 k $\bar{\nu}_e$ expected to be generated, around 4.5 k are fully contained, i.e., both prompt and delayed signals generated pulses inside the target. From Eq. 4, it is possible to obtain the effective volume of $1.26 m^3$ for the target, meaning that if the antineutrino interaction does not happen on a smaller volume inside the target, the event is unlikely to be identified.

The neutrino counting is performed as follows: the first selection rule (*Selection1* or *Selection2*) is applied on the sample, eliminating pulses with p.e. numbers outside the given range. The time difference of the remaining pulses is calculated, generating a histogram in the same manner as Fig. 5. The last step is the application of the second selection rule (*TimeSelection1* or *TimeSelection2*) leaving only values that fall in the predetermined interval. These values constitute neutrino candidates.

Starting with set 1 (signal+BG), strategy S1 selects 206985 candidates. For the sake of validating the strategy, these values can be split into signal and background using their MC tags, obtaining: $2747\bar{\nu}_e + 201587BG$. While the efficiency prediction from the unmixed sample is 79 %, the corresponding value after the mixer is $61 \pm 1\%$ (uncertainties are statistical only). In order to be able to observe the signal, it is enough that the antineutrino counts are larger than the background fluctuations, rather than the background itself. So the S/N (signal to noise) ratio is $S/\sqrt{BG} = 6.1 \pm 0.2$.

There is a clear discrepancy in both values when compared to the unmixed estimations. This effect might be attributed to the fact that the unmixed analysis looks to the data from an “event” perspective, i.e., the selection strategies remove the entire event while now, after the mixing, selection removes only individual pulses. The end result is that the unmixed expectations always overestimates the amount of signal cut by the selections strategies.

Repeating the process with strategy S2 leads to $71110 = 1946\bar{\nu}_e + 69164BG$, with efficiency 43 % and S/N ratio of $S/\sqrt{BG} = 7.4 \pm 0.5$. The last value means that although the neutrino counting efficiency is lower, strategy S2 is actually more effective on preventing the background as the unmixed analysis could reveal.

The next step is to mimic a blind analysis, using set

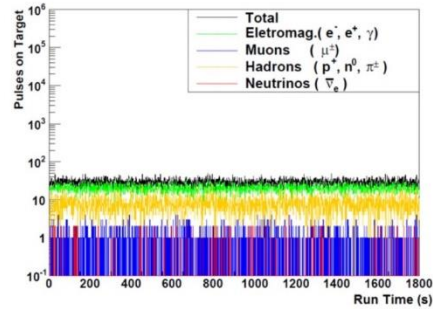


Figure 7: Number of pulses on Target (per second), after applying selection S1. The total background rates were cut from 1.5 kHz to 36 Hz. Analyzing the components of the background, it is possible to see that strategy S1 is in fact very effective on muons (in blue), but less restrictive to other components, like the EM (green) and hadronic (yellow) ones.

2 (background only). By applying strategies S1 and S2 to this set, a total of 201597 and 68236 candidates are selected. These can be regarded as a real measure performed with the reactor off (or away from the reactor). Taking into account the statistical fluctuations of these measurements, we have $N_{\text{off}} = BG \pm \sqrt{BG} = (201.6 \pm 0.4) \times 10^3$ counts with S1 and $(68.2 \pm 0.3) \times 10^3$ with S2. Now, consider a measurement done with the same duration (24h) with reactor on, here presented as the set 1. A total count of candidates leads to (from the values previously presented) $N_{\text{on}} = (207.0 \pm 0.4) \times 10^3$ and $(69.2 \pm 0.3) \times 10^3$ for S1 and S2, respectively. So, subtracting the reactor on counts from the reactor off, we have our signal:

$$N_{\bar{\nu}_e}(S1) = (5.4 \pm 0.6) \times 10^3 \quad (7)$$

$$N_{\bar{\nu}_e}(S2) = (9 \pm 4) \times 10^2 \quad (8)$$

Although S1 resulted on a non zero signal with a significance larger than 5σ , the S2 strategy demands more statistics. This is the consequence of dealing with large numbers (the total counts) and their Poisson variances. While the S/N ratio was favorable for set 1, the statistical uncertainties related to the Poisson processes are still large for a 24 h run, mainly in the case of choosing the S2 strategy. For this reason, the particular values obtained in these calculations (Eqs. 7 and 8) cannot be regarded as an absolute prediction of the simulation, but rather as a prove of concept. Taking the efficiencies obtained for set 1 as a reference, it is possible to calculate that a 10 day data set would bring the uncertainties of both strategies to the 5 % level. This may be

taken as an inferior limit for the time needed for Angra to blindly distinguish between the reactor-ON and reactor-OFF situations.

5. Conclusion

The present analysis shows that with appropriate selections it is possible to detect neutrino interactions from the Angra-II power plant with a sea-level Water-Cerenkov detector, with 95% confidence level, after a minimum of 10 days of data acquisition. This is based on the simulations assumptions and the real time will be naturally larger due to the ideal character of these hypothesis and the efficiency of the data acquisition, which was not considered here. Still, simulations are required to be calibrated by real background measurements, which could improve these predictions. These measurements are already being performed at the CBPF site, which will be a first estimate of the expected background at the Angra site.

Acknowledgments

This work is supported by several agencies, through a large number of funding projects. The Angra Collaboration acknowledges the support of Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), the Conselho Nacional para o Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) and the following state research agencies: FAPESP, FAPEMIG and FAPERJ. We also thank Dr. T.J.C. Bezerra and A. Cabrera for fruitful discussions and comments.

References

- [1] A. A. Borovi, L. A. Mikaelyan, Possibilities of the practical use of neutrinos, *Soviet Atomic Energy* 44 (1978) 589–592. doi:10.1007/BF01117861.
- [2] V. A. Korovkin, et al., Remote monitoring of reactor by means of neutrino instrument in process room of rovnoe nuclear power plant, *Soviet Atomic Energy* 71 (1991) 1018–1022.
- [3] A. Bernstein, Y. Wang, G. Gratta, T. West, Nuclear reactor safeguards and monitoring with antineutrino detectors, *Journal of Applied Physics* 91 (2002) 4672–4676. arXiv:0108001, doi:10.1063/1.1452775.
- [4] A. Bernstein, N. S. Bowden, A. Misner, T. Palmer, Monitoring the thermal power of nuclear reactors with a prototype cubic meter antineutrino detector, *Journal of Applied Physics* 103. arXiv:0804.4723, doi:10.1063/1.2899178.
- [5] N. S. Bowden, Reactor monitoring using antineutrino detectors, *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements* 217 (2011) 134–136. arXiv:0809.2128, doi:10.1016/j.nuclphysbps.2011.04.085.
- [6] T. Classen, A. Bernstein, N. S. Bowden, B. Cabrera-Palmer, A. Hoc, G. Jonkmans, L. Kogler, D. Reyna, B. Sur, Development of an advanced antineutrino detector for reactor monitoring, *Physics Research A* 771 (2014) 139–146. doi:10.1016/j.nima.2014.10.022.
- [7] J. Anjos, A. Barbosa, R. Funchal, E. Kemp, J. Magnin, H. Nunokawa, O. Peres, D. Reyna, R. Shellard, Angra Neutrino Project: status and plans, *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements* 155 (1) (2006) 231–232. doi:10.1016/j.nuclphysbps.2006.02.058.
- [8] J. A. Costa, Eletrônica de front-end do experimento neutrinos-angra, Master's thesis, UFJF (2014).
- [9] T. I. Dornelas, Medidas de caracterização do sensor, da eletrônica de leitura e do detector alvo do projeto neutrinos-angra, Master's thesis, UFJF (2015).
- [10] H. P. Lima, Data acquisition system for the angra project - angra note 12, Tech. rep., Angra Collaboration (2009).
- [11] Y. Abe, et al., Reactor ν_e disappearance in the double chooz experiment, *Phys. Rev. D* 86 (2012) 052008.
- [12] P. Voguel, J. F. Beacom, Angular distribution of neutron inverse beta decay, $\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$, *Phys. Rev. D* 60 (1999) 053003.
- [13] P. K. F. Grieder (Ed.), *Cosmic Rays at Earth*, Elsevier Science, 2001.
- [14] Measurement and reporting of alpha particle and terrestrial cosmic ray-induced soft errors in semiconductor devices (2012).
- [15] T. Abrahao, Detecção de antineutrinos de reatores e medidas de fontes de ruído, Master's thesis, CBPF (2012).
- [16] J. Terrell, Distributions of fission neutron numbers, *Physical Review* 108 (1957) 783–789.
- [17] L. Garren, P. Lebrun, *StdHep 5.06.01 - Monte Carlo Standardization at FNAL* (2006). URL <http://cepa.fnal.gov/psm/stdhep/>



Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/nima

Readout electronics validation and target detector assessment for the Neutrinos Angra experiment



T.A. Alvarenga^a, J.C. Anjos^b, G. Azzi^b, A.S. Cerqueira^a, P. Chimenti^c, J.A. Costa^a,
T.I. Dornelas^a, P.C.M.A. Farias^d, G.P. Guedes^e, L.F.G. Gonzalez^f, E. Kemp^f, H.P. Lima Jr.^b,
R. Machado^b, R.A. Nóbrega^{a,*}, I.M. Pepe^d, D.B.S. Ribeiro^a, E.F. Simas Filho^d,
G.A. Valdivieso^g, S. Wagner^h

^a Federal University of Juiz de Fora, Juiz de Fora-MG, Brazil^b Brazilian Center for Research in Physics, Rio de Janeiro-RJ, Brazil^c Federal University of ABC, Santo André-SP, Brazil^d Federal University of Bahia, Salvador-BA, Brazil^e State University of Feira de Santana, Feira de Santana-BA, Brazil^f State University of Campinas, Campinas-SP, Brazil^g Federal University of Alfenas, Poços de Caldas-MG, Brazil^h Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, Brazil

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 September 2015

Received in revised form

11 May 2016

Accepted 11 May 2016

Available online 24 May 2016

Keywords:

Neutrinos detector

Instrumentation

Photon detection

ABSTRACT

A compact surface detector designed to identify the inverse beta decay interaction produced by anti-neutrinos coming from near operating nuclear reactors is being developed by the Neutrinos Angra Collaboration. In this document we describe and test the detector and its readout system by means of cosmic rays acquisition. In this measurement campaign, the target detector has been equipped with 16 8-in PMTs and two scintillator paddles have been used to trigger cosmic ray events. The achieved results disclosed the main operational characteristics of the Neutrinos Angra system and have been used to assess the detector and to validate its readout system.

© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The main purpose of the Neutrinos Angra (ν -Angra) Experiment [1,2] is to develop a compact surface detector capable of identifying interactions produced by antineutrinos coming from a nearby operating nuclear reactor. By measuring the anti-neutrinos flux, it is possible to monitor the reactor activity and to estimate the thermal power produced in the reactor core [3]. The Collaboration also intends to study the possibility of measuring the neutrinos energy spectrum variation during the burn up of the nuclear fuel, which can be used to infer the isotopic composition of the reactor fuel [4].

Compared to the usually employed underground detectors, one of the main advantages of the ν -Angra detector design comes from the fact that it is of easy deployment and operation, since it is compact and there would be no need to open underground tunnels to acquire useful data. In addition, the detector will be filled

with water doped with Gadolinium (Gd) which is a non-flammable material, instead of using liquid scintillator which is used by most of the experiments of this type. Neutrinos' detection will occur by inverse beta decay ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$), where the emitted positron is above the Cherenkov threshold, becoming visible to the detector as a prompt light signal and the neutron goes through a thermalization process to be then captured by a Gd nuclei which in turn emits a gamma cascade with average energy of 8 MeV. These gammas are able to release electrons from the water atoms with energy above the Cherenkov limit, generating a new light signal a few microseconds after the prompt signal. This delayed time coincidence will be used as the signature for a neutrino interaction event candidate. According to Monte Carlo (MC) simulations, approximately 4.5 k $\bar{\nu}_e$ events per day are supposed to be fully contained, leaving light pulses from both prompt (positron) and delayed (neutron) signals inside the target.

The method for neutrino's detection relies on the time correlation between these two signals, on efficient shielding and veto systems and also on an accurate knowledge of the detector and background events characteristics. For instance, two selection

* Corresponding author.

E-mail address: rafael.nobrega@ufjf.edu.br (R.A. Nóbrega).

rules are particularly promising: (1) selecting events that produce between 10 and 200 photoelectrons which leaves about 90% of positrons and 89% of neutrons untouched; (2) considering the time difference between the prompt and the delayed signals. In this case, 99% of the positron–neutron events have a time shift lower than $50 \mu\text{s}$ (for a 0.3% Gd concentration). The overall combined $\bar{\nu}_e$ detection efficiency may be as high as 79% while background level is dramatically reduced, i.e., muon events rate might be reduced from 350 Hz to less than 0.2 Hz after selection cuts are applied.

The ν -Angra target detector has been recently assembled with 16 8-in R5912 Hamamatsu PMTs [5,6]. In order to acquire the signals generated by cosmic ray events, a full readout chain, composed of custom front-end and acquisition electronics, has been put together with the purpose of assessing the target detector, studying background signal characteristics and validating the readout electronics. This work completes the development phase of the target detector and its instrumentation, making them ready for acquiring data nearby an operating nuclear reactor.

In Section 2 the ν -Angra detector and its readout electronics are introduced, in Section 3 the cosmic rays acquisition setup is described, in Section 4 the cosmic rays acquisition results are presented and finally in Section 5 the conclusions are pointed out.

2. The ν -Angra detector and readout system

2.1. Detector

The ν -Angra detector will be installed at the outer side of the concrete dome of the Angra II nuclear reactor, in a 40 ft high cube commercial container, placed at 30 m from the reactor core. The power plant is located near the city of Angra dos Reis, Brazil. The adopted detector design is an assembly of four subsystems: (1) two water tanks, 25 cm high, placed at the top and at the bottom of the target tank, equipped with 4 PMTs each and used as active shields and muon veto; (2) a lateral 25 cm passive water shield that helps to protect the inner parts from cosmic ray induced neutrons and low energy particles; (3) a water tank containing and surrounding the lateral walls of the target detector with a 25 cm wide layer, instrumented with 4 PMTs, one in each side of the tank, used as active shield and muon veto; (4) a central tank with an active volume of 1.34 m^3 used as the antineutrino target and instrumented with 32 PMTs, 16 on the top and 16 on the bottom sides. The target detector working principle is based on the Water Cherenkov technique and it is filled with a 0.3% gadolinium doped water, to enhance neutron capture. Hence, a total of 44 PMTs will be installed.

A representation of each volume is shown in Fig. 1 using a Geant4 model. The overall detector dimensions are $(2.75 \text{ m} \times 2.10 \text{ m} \times 2.42 \text{ m})$ (length \times width \times height) and the target tank external dimensions are $(1.50 \text{ m} \times 1.05 \text{ m} \times 1.39 \text{ m})$. The target mass will provide a neutrino interaction rate in the order of $5 \cdot 10^3$ events per day, considering a distance of 30 m to the reactor core and 4 GW reactor thermal power.

2.2. Readout electronics

The overall scheme of the readout system is shown in Fig. 2. Each detector signal is individually processed by a front-end channel. The analog signals coming out from its amplifier-shaper stage are delivered to the acquisition modules (NDAQ) to be digitized, processed and stored in a buffer while waiting for a decision signal from the first level trigger system (L1TS). Whenever an event is approved, the stored data is sent to the high level trigger system, where a more careful and time consuming decision

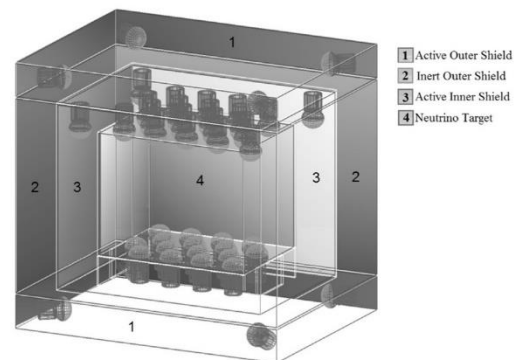


Fig. 1. Scheme of the ν -Angra detector.

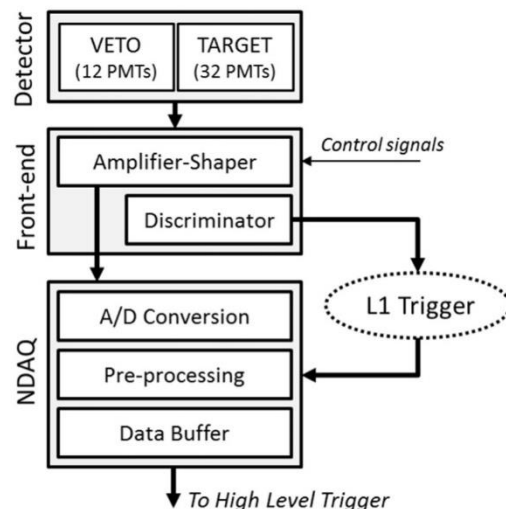


Fig. 2. Readout diagram of the ν -Angra Experiment.

is made. All the amplifier-shaper output channels, from both target and veto systems, are also connected to a discriminator circuit which, in turn, provides logic pulses to the L1TS for antineutrino candidates selection. The L1TS selection criteria are based on parameters such as time difference between the received signals, whether or not the incoming events hit the veto detectors and coincidence in time between the PMT devices signals. Additionally, the L1TS will be able to estimate the energy of each PMT signal by means of pulse width measurement which will be used to filter only those events with total energy within the expected positron–neutron energy spectrum, increasing significantly the L1TS background rejection efficiency.

The ν -Angra readout electronics is therefore composed of a front-end circuit [7] and an acquisition module named NDAQ [8]. Both are custom solutions developed by the Collaboration. The main functionalities of the former are to read and to conform the PMT signals according to the project requirements while the latter was designed to digitize and to measure the arriving time of the front-end output signal and to transfer data to a local computer after receiving the L1TS acceptance. The main front-end

requirements are listed below:

- Shaping the PMT signal to the NDAQ A/D conversion;
- Signal duration must be short enough (below $1 \mu\text{s}$) to allow proper measurement of the time shift between positron and neutron signals;
- Relation between injected charge and output peak amplitude should be linear;
- Possibility to work with different gains must be provided. The front-end gain of the target detector channels shall be adjusted to avoid saturation of the signals generated by positron and neutron events.¹ For the veto system, the front-end gain will be adjusted to optimize its detection efficiency.
- Analog and discriminated signals must be delivered to the data acquisition and to the trigger systems, respectively.

2.2.1. Front-end module

Eight front-end modules have been produced to fully-equip the Neutrinos-Angra detector. Each module has eight channels composed of a 50Ω input-impedance attenuator, an Amplifier-Shaper-Discriminator (ASD) and an I^2C -based circuitry, the latter makes it possible to control the discriminator threshold and the signal offset at the ASD output stage. A scheme of a front-end channel is shown in Fig. 3.

The target detector should detect and measure the energy left by the interacting neutrinos. The particles coming out from the neutrinos' interactions are expected to generate less than 10 photoelectrons/PMT, in average. Therefore, the front-end circuit has been designed to be linear up to a charge of 60 pC, which corresponds to approximately 37 photoelectrons, using a gain of 24.7 mV/pC and considering a front-end input impedance of 50Ω [9]. An attenuator circuit has been foreseen to enable the adjustment of the overall system gain should it be required.

2.2.2. Acquisition module

A simplified block diagram of the acquisition module is presented in Fig. 4. Each analog-to-digital conversion channel is implemented using a 12-bit multi-stage pipeline ADC² able to sample the input signal at 125 MHz. By using 10 bits for quantization and a dynamic range of 2Vpp, a voltage resolution around 2 mV is achieved, which is expected to cover the required resolution in energy for neutrino events detection. For high-precision measurement of time between pulses, an 8-channel Time-to-Digital Converter (TDC) chip³ has been selected. The TDC presents a resolution of 81 ps and is able to measure pulses in a dynamic range of 9.8 microseconds. ADC and TDC information feed the $FPGA_{core}$ ⁴ where additional processing algorithms can be applied before transferring data to a local computer. The $FPGA_{vme}$ ⁵ handles the VME data transfer which happens by means of a VMEbus single board computer.⁶

3. Cosmic rays acquisition setup

A scheme of the applied readout and trigger systems is presented in Fig. 5. The 16 PMTs signal cables were connected to the inputs of the front-end cards. The front-end output signals were sent to the NDAQ modules, where the signals are digitized and sent to a local computer through a VME controller by means of

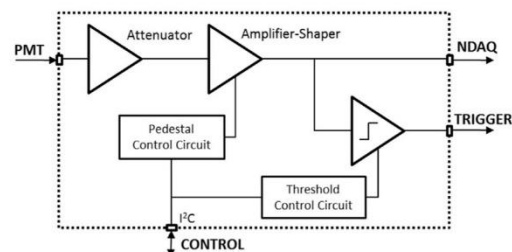


Fig. 3. Scheme of a front-end channel.

Ethernet protocol. Two scintillator paddles, with active area of $14 \text{ cm} \times 14 \text{ cm}$ and 1 cm thickness, were positioned just above the detector to produce trigger information for cosmic events. Their signals were sent to a discriminator and then to a logic port configured to provide coincidence between both scintillators. The resulting signal was sent to the NDAQ trigger inputs making use of a fanout NIM module. The NDAQ modules have been configured to digitize and store 100 samples (800 ns) of the input signals each time they receive a trigger pulse; 20 samples before and 80 samples after the trigger rising edge.

A high-voltage NIM module⁷ was used as power supply for the scintillator paddles applied for the trigger system. Both were supplied with a voltage value of -1450 V . This value was chosen based on a high-voltage scan performed for each one of the trigger paddles while the other one was set to a fixed HV value of -1400 V . The HV supply value was scanned from -1000 to -1800 Volts using steps of -100 Volts . For each HV value, the number of coincidences was registered, as shown in Fig. 6. A plateau region between -1400 and -1600 Volts could be identified.

3.1. Detector assembling

Fig. 7 shows, on the left, four R5912 Hamamatsu PMTs ready to be placed into the detector and on the right, 16 PMTs fully installed in the bottom of the target detector. It is also possible to observe that the detector inner walls are covered with Tyvek material [10].

After covering the inner walls with Tyvek sheets and installing the PMTs, the detector was flooded with 1370 liters of filtered water. The target detector was then covered with an endcap and a black tarp to seal and to protect the detector from external light. The PMTs' cables (signal and HV) were then routed to the control room located just a few meters from the detector. Fig. 8 shows the detector completely sealed and ready to be used.

3.2. Readout system preparation

The PMTs were characterized by Hamamatsu to operate with a gain of 10^7 , for this, the recommended high-voltage values were applied. The CAEN SY4527 system was used as power supply for all the 16 installed PMTs. This system was controlled by a local computer also placed in the control room. The front-end and NDAQ modules were calibrated and each single channel was checked individually.

3.2.1. Front-end calibration

To work with a lower gain to avoid signal saturation caused by the high amplitude PMT signals generated by cosmic rays, an attenuator circuit with 50Ω input impedance was used at the input

¹ From 1 to 35 photoelectrons per PMT based on MC simulations.

² AD9627, Analog Devices.

³ TDC-GPX, acam.

⁴ EP3C40F484C6, Altera.

⁵ EP3C25F324C8, Altera.

⁶ MVME3100, Emerson Network Power.

⁷ N1470, CAEN.

Particle	Intensity	Particle	Intensity
Electrons	4.4×10^{-3}	Pions	6.32×10^{-6}
Positrons	1.7×10^{-3}	Protons	1.87×10^{-4}
Photons	1.27×10^{-2}	Neutrons	3.6×10^{-3}
Muons	8.0×10^{-3}		

Table 1: Cosmic ray intensities per particle species. Values correspond to total intensities [$\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{cm}^{-2}$] (Ref. [13])

volume and $D \approx 30$ m is the core-detector distance. For a water target (H_2O), this equation reduces to

$$R_\nu \approx 3.215 \times 10^6 \left(\frac{V}{\text{m}^3}\right) \left(\frac{\text{m}}{D}\right)^2 \text{ events/day} \quad (4)$$

Considering a fiducial volume $V \approx 1.42 \text{ m}^3$ we get $R_\nu \approx 5.07 \times 10^3$ events/day. This estimate is good enough for the present studies and more refined rate calculations, including the reactor core isotopic evolution and other effects, as shown in [11], will be performed later on at the analysis stage. Anti-neutrino interactions via inverse beta decay result in the production of a positron and a neutron. The simulation of the direction and energy distributions of these two products is modeled according to reference [12], where a detailed description of the differential cross-sections is presented. The neutrino intensity is considered uniform through all the detector.

4.1.2. Cosmic rays

A compilation of cosmic ray intensities for various particle species (electrons, muons, neutrons, photons, pions, positrons and protons) have been collected from references [13, 14]. For a given species i , we consider differential intensities of the form: $I_i(E, \theta, \phi) = I_{vi}(E) \cos^2 \theta$, with vertical intensities $I_{vi} \equiv I_i(\theta = 0)$. The total intensities used are shown in Tab 1. In order to simulate a uniform intensity through the detector volume we first draw a particle direction and then choose its starting position on a surface $5 \times 5 \text{ m}^2$, orthogonal to the direction. The surface is at 4 m from the center of the detector. Finally, the particle energy (or momentum) is chosen according to the vertical intensity. In this way, incoming direction and initial energy are considered as independent variables: a more refined simulation, including correlations, will be implemented if necessary.

4.1.3. Gamma rays from the environment

The intensity of gamma rays from surrounding materials is considered isotropic and its spectrum have been measured by a High-Resolution Germanium detector [15]. The total intensity is normalized to about

16 photons $\text{s}^{-1}\text{cm}^{-2}$. Only a small fraction of these photons, however, is able to produce an electron (by Compton scattering for example) with speed above the Cerenkov threshold.

4.1.4. Calibration Source

Future calibration of the neutron capture and gamma yield will be performed using a known Californium source (Cf^{252}). Simulation of this neutron source is needed with the purpose of future comparison with the calibration data. The average number of neutrons per fission is known to be $\bar{n} = (3.86 \pm 0.07)$, with a probability P_n of emitting n neutrons on a random fission, implicitly given by [16]:

$$\sum_{i=0}^n P_n = (2\pi)^{-1/2} \int_{-\infty}^{(n+\bar{n}+1/2)/\sigma} \exp(-t^2/2) dt \quad (5)$$

where $\sigma = (1.207 \pm 0.012)$. The energy spectrum of the neutrons is given by an empirical relation

$$\frac{dN}{dE} = \exp\left(-0.88 \frac{E}{\text{MeV}}\right) \sinh\left(2.0 \frac{E}{\text{MeV}}\right)^{1/2} \quad (6)$$

4.2. Geant4 Simulation

Using Geant4 toolbox, the design is based on a clear separation between data specific to the experimental conditions (defined externally) and the actual simulation code. This enables data to be varied according to the known (or hypothetical) errors, in order to estimate the actual experimental errors in the neutrino measurements. The code permits to save with great details intermediate simulation results related to tracks, steps, trajectories and hits, as well as primary particles and vertices. This can be tuned according to the specific analysis. The primary particles are either taken as input either by the HepEvt interface [17] (coming from the primary generators previously described) or created in run time by simpler point-like generators. Hits are divided into two types: PMTHit, representing photoelectrons on the 8" Hamamatsu R5912 PMT, and VetoHit, representing energy released in the veto scintillator. The scintillator veto system however is foreseen to be installed only in a second stage of the experiment and therefore is not simulated at present.

4.2.1. Geometry and Materials

A lot of effort has been invested on the geometrical modeling of the experimental equipment (Fig. 1). The model encompasses the description of several volumes: the target, filled with a solution of water and Gadolinium at 99.7 and 0.3 % mass concentration respectively



Fig. 7. Four PMTs on the mechanical support just before their installation inside the target detector (left) and the 16 PMTs installed on the bottom part of the target detector (right).



Fig. 8. Picture of the assembled detector, filled with water and sealed.

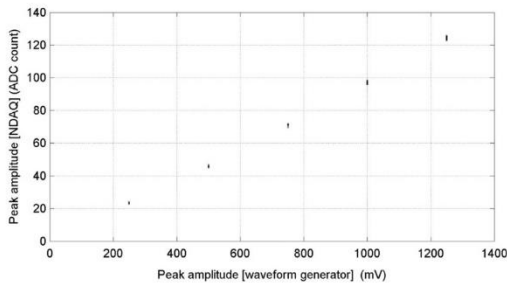


Fig. 9. Calibration data for the 16 NDAQ channels.

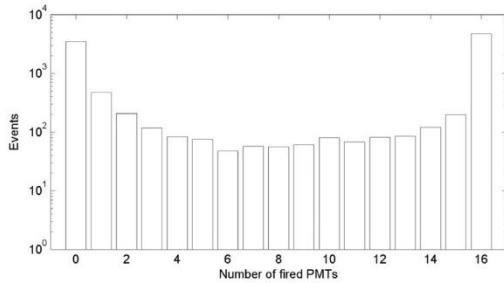


Fig. 10. Distribution of the number of coincidences.

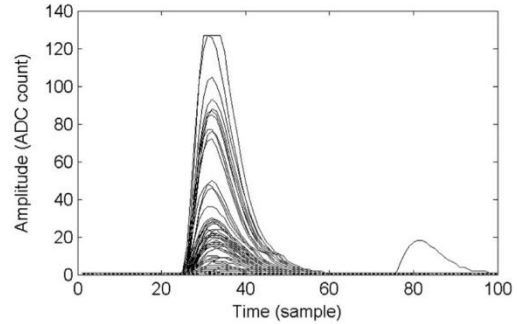


Fig. 11. Acquired pulses of the first 100 events for one readout channel.

occur around an average value of 32.18 ± 0.004 samples, with a standard deviation of 1.24 ± 0.003 samples, which is equivalent to a peak time spread of 9.9 ns. The distributions' mean and RMS values for each single channel are listed in Table 1.

About 2% of the signals have entered into the NDAQ saturation region, which occurs at 127 ADC counts (1250 mV). This effect can be seen in Fig. 13 where the peak amplitude versus the sum of sampled amplitudes of the generated signals for one detector channel is shown. A linear fit was applied to all the detector channels resulting in an average of 0.55 ± 0.025 and 0.08885 ± 0.00013 for A and B respectively according to the equation $A+Bx$; only non saturated signals were considered. The results for each single channel can be seen in Table 2. It confirms that the event charge can be inferred using either the area or the peak of the acquired signal.

As observed, 14% of the events produced a saturated signal in at least one of the 16 readout channels. Thus, the amplitude of those saturated signals must be estimated in order to allow fully reconstruction of the detector photoelectron spectrum produced by the cosmic rays particles. Those signals have been recovered by means of a χ^2 -based fit algorithm using the mean shape of the front-end output signal as reference. Fig. 14 shows examples of four recovered signals for different peak amplitudes. As can be observed, signals with peak amplitude values above 180 ADC counts present a slight waveform distortion due to saturation effects, mainly on the falling edge. In those cases, a higher weight has been given to the rising edge. Nevertheless, the number of signals with peak amplitude above 180 ADC counts is small, representing only 0.4% of the total. Fig. 15 shows the peak amplitude distribution for all the 16 PMT devices, after applying the χ^2 -based algorithm.

After estimating the signals peak amplitudes, those values were

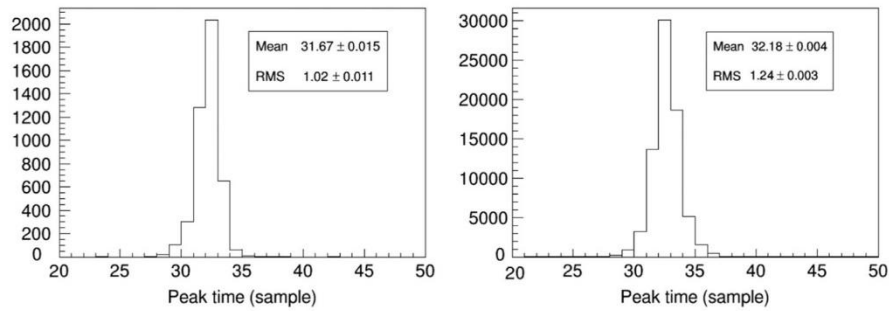


Fig. 12. Peak time distribution for channel 9 (left) and for the whole detector (right).

Table 1
Mean and RMS of the peak time distribution for each detector channel in sample units.

Ch	MEAN	RMS	Ch	MEAN	RMS
01	$32.21 \pm 1.5E-2$	$1.01 \pm 1.1E-2$	09	$31.67 \pm 1.5E-2$	$1.02 \pm 1.1E-2$
02	$32.62 \pm 1.5E-2$	$0.86 \pm 1.0E-2$	10	$31.63 \pm 1.6E-2$	$1.08 \pm 1.1E-2$
03	$32.98 \pm 1.7E-2$	$1.27 \pm 1.2E-2$	11	$31.62 \pm 1.7E-2$	$1.14 \pm 1.2E-2$
04	$33.39 \pm 1.6E-2$	$1.22 \pm 1.2E-2$	12	$32.38 \pm 1.5E-2$	$1.02 \pm 1.1E-2$
05	$32.15 \pm 1.5E-2$	$0.99 \pm 1.1E-2$	13	$31.61 \pm 1.7E-2$	$1.19 \pm 1.2E-2$
06	$31.79 \pm 1.4E-2$	$0.94 \pm 1.0E-2$	14	$31.62 \pm 1.5E-2$	$1.00 \pm 1.1E-2$
07	$32.15 \pm 1.4E-2$	$0.96 \pm 1.0E-2$	15	$31.70 \pm 1.8E-2$	$1.29 \pm 1.2E-2$
08	$32.90 \pm 1.5E-2$	$1.02 \pm 1.1E-2$	16	$32.22 \pm 1.8E-2$	$1.31 \pm 1.3E-2$

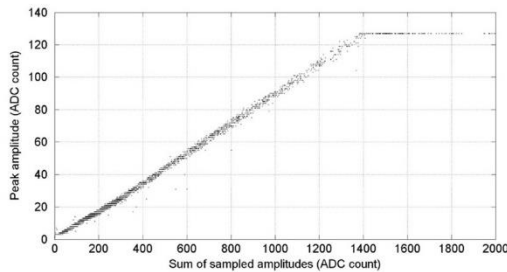


Fig. 13. Peak amplitude versus sum of the sampled amplitudes for channel 4.

converted into number of photoelectrons, according to Section 3.2. A clear picture of the channels' photoelectron distributions could be observed. Fig. 16 shows these distributions for two detector channels.

Table 2
Linear parameters estimation for each detector channel (A+Bx).

Ch	A	B	Ch	A	B
01	$0.372 \pm 6.2E-3$	$0.09126 \pm 2.6E-5$	09	$0.895 \pm 6.3E-3$	$0.08781 \pm 2.7E-5$
02	$0.413 \pm 6.2E-3$	$0.09164 \pm 3.3E-5$	10	$0.712 \pm 6.3E-3$	$0.08791 \pm 3.6E-5$
03	$0.480 \pm 6.2E-3$	$0.08958 \pm 3.0E-5$	11	$0.407 \pm 6.3E-3$	$0.08874 \pm 3.9E-5$
04	$0.403 \pm 6.2E-3$	$0.08986 \pm 2.7E-5$	12	$0.865 \pm 6.4E-3$	$0.08650 \pm 2.9E-5$
05	$0.409 \pm 6.3E-3$	$0.08973 \pm 3.4E-5$	13	$0.363 \pm 6.3E-3$	$0.08871 \pm 3.0E-5$
06	$0.406 \pm 6.3E-3$	$0.09034 \pm 3.5E-5$	14	$0.414 \pm 6.4E-3$	$0.08859 \pm 3.1E-5$
07	$0.392 \pm 6.2E-3$	$0.08921 \pm 3.3E-5$	15	$0.940 \pm 6.4E-3$	$0.08573 \pm 3.2E-5$
08	$0.438 \pm 6.1E-3$	$0.08950 \pm 3.0E-5$	16	$0.944 \pm 6.2E-3$	$0.08662 \pm 3.4E-5$

Table 3 shows the distribution's mean value for each channel. The measured values vary from 37.9 ± 0.8 to 53.6 ± 1.0 photoelectrons. Apart from the statistical fluctuation, two other factors can justify this variation: a small overall gain difference between channels and the PMT position inside the detector. The overall mean value is 45.0 ± 3.4 photoelectrons. Normalizing by this value, it is possible to estimate a gain variation of 12% (standard deviation) between the detector channels. If only PMTs in symmetrical positions are considered, which happens in pairs, this value goes to 7%.

By summing the number of photoelectron for the 16 readout channels, event by event, it was possible to reconstruct the photoelectron spectrum as measured by the target detector, as shown in Fig. 17. The photoelectron distribution can be described mainly by a Landau peak, attributed to through-going muons, together with an exponential background drop caused by low energy electromagnetic particles [11]. Fig. 17 shows also the simulated photoelectron spectrum produced by muon particles, which is in good agreement with real data concerning the muon energy distribution peak. This result indicates the proper operation and calibration of the detector and its readout system. The difference between both spectra is expected since low energy electromagnetic particles, which may have also triggered the data acquisition setup, have not been considered in the simulation.

5. Conclusions

A compact surface detector has recently been assembled and dressed with 16 PMTs by the ν -Angra Collaboration. In order to equip its readout channels, a set of front-end and acquisition custom modules has been integrated with the purpose of assessing a full readout chain of the detector and to measure some of its main operational characteristics. This document presented in

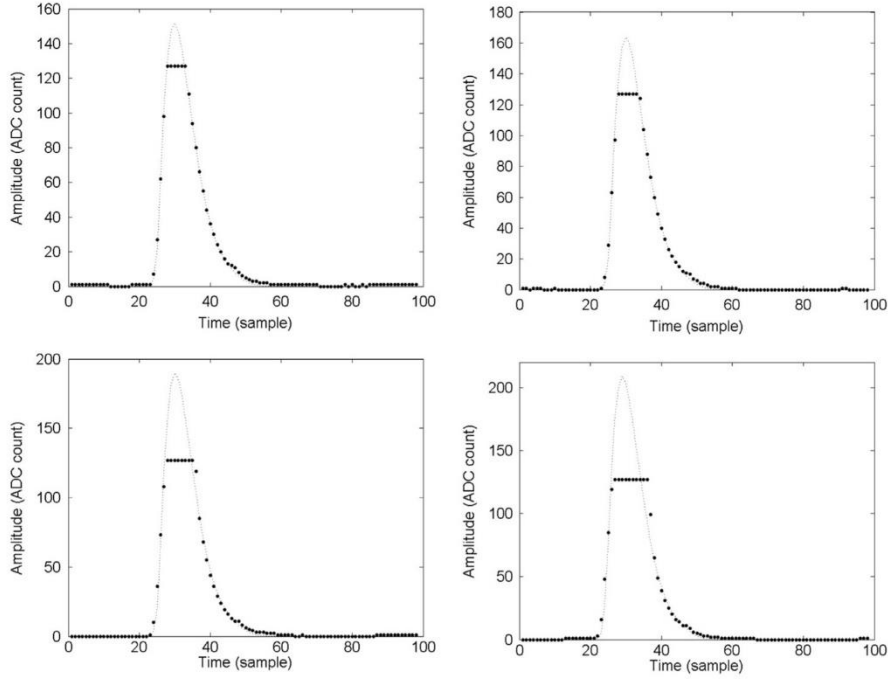


Fig. 14. Examples of saturated reconstructed signals based on a χ^2 -based fit algorithm. Data points represent the measured data and dashed line the resulting fit.

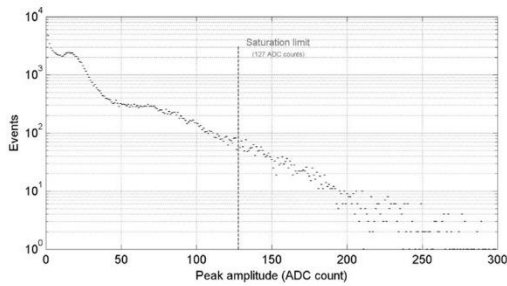


Fig. 15. Peak amplitude distribution considering all the detector channels. The peak amplitudes above 127 ADC counts were reconstructed by the χ^2 -based fit algorithm.

Table 3
Photoelectrons distribution mean value for each detector channel.

PMT	MEAN	PMT	MEAN
01	51.6 ± 1.0	09	40.7 ± 0.8
02	43.0 ± 0.8	10	52.2 ± 0.9
03	42.5 ± 0.8	11	52.2 ± 0.9
04	41.8 ± 0.8	12	47.0 ± 0.8
05	44.9 ± 0.9	13	53.6 ± 1.0
06	45.1 ± 0.9	14	37.9 ± 0.8
07	40.2 ± 0.8	15	40.0 ± 0.8
08	38.3 ± 0.8	16	48.6 ± 0.9

detail the detector modules measurements required to achieve the proposed goals, successfully validating the readout system and providing an indication, by means of the observed muon spectrum, of the proper operation of the target detector.

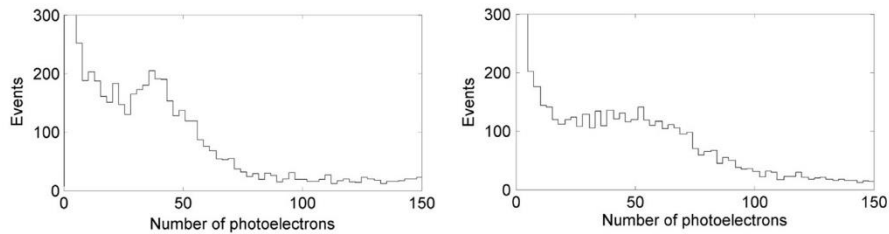


Fig. 16. Photoelectrons distribution for two readout channels: 9 (left) and 10 (right).

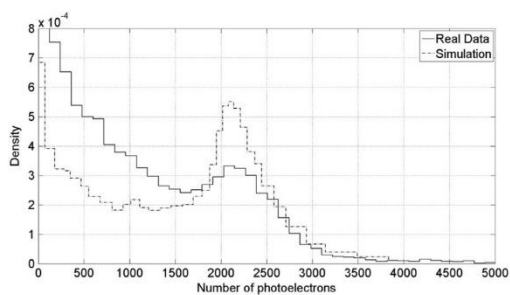


Fig. 17. Photoelectrons distribution normalized by area from experimental and simulated data.

Acknowledgement

This work was supported by several agencies, through a number of funding projects. The Angra Collaboration acknowledges the support from MCTI, CNPq, FINEP and the following state research agencies: FAPESP, FAPEMIG and FAPERJ.

References

- [1] J.C. Anjos, et al., Status and perspectives of the neutrino Angra Project, in: *NuInt12: Eighth International Workshop on Neutrino-Nucleus Interactions in the Few-GeV Region*, Rio de Janeiro, Brazil, 2012.
- [2] J.C. Anjos, et al., Using neutrinos to monitor nuclear reactors: the Angra neutrino experiment, *Simul. Detect. Status Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* (2015) 1–8.
- [3] N.S. Bowden, et al., Observation of the isotopic evolution of pressurized water reactor fuel using an antineutrino detector, *J. Appl. Phys.* 105 (2009) 064902.
- [4] Th.A. Mueller, et al., *Phys. Rev. C* 83 (2011) 054615.
- [5] Hamamatsu Catalog, Large Photocathode Area PMTs, Catalog No. TPMH1286E05, 2008.
- [6] S.J. Bricea, et al., Photomultiplier tubes in the MiniBooNE experiment, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* 562 (2006) 97–109.
- [7] J.A. Costa, T.I. Dornelas, R.A. Nóbrega, A.S. Cerqueira, Front-end electronics of the Neutrinos Angra Project, in: *Proceedings of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2014)*, Montevideo, Uruguay, 2014.
- [8] H.P. Lima Junior, et al., Data acquisition with optimal pulse amplitude estimation for a neutrino detection experiment, *Technical Note*, vol. 4, no. 2, pp. 34–41, Brazilian Center for Research in Physics, 2014.
- [9] T.I. Dornelas, *Estudo, Desenvolvimento e Análise da Instrumentação do Experimento Neutrinos Angra [Study, Development and Analysis of the Neutrinos Angra Experiment Instrumentation]* (Master thesis), Federal University of Juiz de Fora, February 2015.
- [10] J.C. Arteaga-Vellzquez, C. Viquez-Lpez, A. Zepeda, A measurement of the diffuse reflectivity of 1056 Tyvek in air and water, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A: Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.* 553 (1–2) (2005).
- [11] P. Billoir, The Cherenkov surface detector of the Pierre Auger observatory, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* 766 (2014) 78–82.

Neutrinos Angra experiment: commissioning and first operational measurements

H.P. Lima Jr.,^{a,1} J.A.M. Alfonso,^d J.C. Anjos,^a G. Cernicchiaro,^a P. Chimenti,^c I.A. Costa,^b M.P. Dias,^b P.C.M.A. Farias,^d A. Fernandes Junior,^b G.P. Guedes,^e L.F.G. Gonzalez,^f E. Kemp,^f G.S. Lopes,^b J. Marcelo,^d M.L. Migliorini,^b R.A. Nóbrega,^b I.M. Pepe,^d D.B.S. Ribeiro,^d D.M. Souza^b and L.R. Teixeira^d

^aCentro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, RJ, Brazil

^bUniversidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Brazil

^cUniversidade Estadual de Londrina, Londrina, SC, Brazil

^dUniversidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brazil

^eUniversidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA, Brazil

^fUniversidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brazil

E-mail: hlima@cbpf.br

ABSTRACT: The Neutrinos Angra Experiment has completed a major step by finishing the commissioning of the detector and the data acquisition system at the experimental site located in the Angra dos Reis nuclear power plant. The experiment, consisting of a water-based detector and associated electronics, was designed with the goal of detecting the electron antineutrinos produced by the nuclear reactor. The detection is possible due to the Inverse Beta Decay, where the final products in the water are photons in the UV-to-visible range of the spectrum. The assembled detector comprises three active volumes filled with water: (i) a cubic detector (Target) for electron antineutrinos, covered by 32 8-inch photomultiplier tubes (PMTs), (ii) a lateral layer surrounding the Target (Lateral veto) equipped with 4 PMTs and (iii) a third volume covering the top of both (Top veto), also equipped with 4 PMTs. In the present document the main features of the detector assembly as well as the integration of the readout electronics on-site are reported. Finally, some operational characteristics are shown based on analysis of the first measurements performed with the fully working detector.

KEYWORDS: Analogue electronic circuits; Data acquisition circuits; Neutrino detectors; Analysis and statistical methods

ARXIV EPRINT: [1812.11604](https://arxiv.org/abs/1812.11604)

¹Corresponding author.

Contents

1	Introduction	1
2	The ν-Angra Detector and the Readout Electronics	2
2.1	Detector Overview	2
2.2	Readout Electronics	4
2.2.1	Front-end electronics	4
2.2.2	Digitizer	5
2.2.3	Trigger	6
3	Assembling at the Experimental Site	7
3.1	Detector Assembling	7
3.2	DAQ Installation Campaigns	9
4	Preliminary Measurements and Data Analysis	10
5	Conclusions	14

1 Introduction

Nuclear reactors have been crucial to experimental neutrino physics as they are copious man-made sources of neutrinos. In addition to having made possible the confirmation of the neutrino hypothesis in 1956 [1], other experiments have been built since then inside such facilities. In the past decades, experiments like Palo Verde [2], CHOOZ [3], Daya Bay [4], Double Chooz [5] and RENO [6], to name a few, considerably increased the knowledge on the neutrino oscillation phenomenon by the precise measurements of the mixing angle θ_{13} .

The neutrino emission from nuclear reactors is closely related to the fission of heavy nuclei taking place inside the reactor: each fission contributes with a well-known fraction of the total released energy and is followed by the emission of neutrinos. By using a neutrino detector to monitor the flux, one can estimate the fission's rate and thus the energy released by the reactor, i.e., the neutrino flux is directly proportional to the power of the reactor.

The proposal to use neutrinos for remote monitoring of the thermal power of nuclear reactors was first considered in the mid-1970s [7, 8]. One of the first demonstration experiments was performed in a laboratory of neutrinos placed in the nuclear power plant at Rovno - Ukraine. It was clearly shown the relationship between neutrino counting rate and the reactor activity, so the neutrino radiation could be, in principle, used for such purposes [9, 10].

This scenario described above opens up solid perspectives for the use of neutrinos as reliable probes of the physical processes in which they participate. Thus, a neutrino detector can monitor

parameters related to the activity of nuclear reactors that are crucial for checking items of the non-proliferation safeguards dictated by the International Atomic Energy Agency (IAEA) [11].

An important point in the using of neutrino detectors for nuclear monitoring, especially regarding the verification of safeguards, is the possibility to remotely check the reactor activity, avoiding the need for operation and intrusion in the containment area or other restricted access areas in the nuclear power plant.

A neutrino experiment at the Brazilian nuclear power plant in Angra dos Reis was initially considered for studies of neutrino oscillations [12]. After a major reconfiguration in a worldwide scale of the groups willing to carry out this kind of experiment around the three proposals that would be effectively implemented (Double Chooz, RENO and Daya Bay), the Brazilian group decided that there was a great opportunity to perform an experiment in the premises of the plant, even if of smaller dimensions and with another objective, in this case the verification of non-proliferation safeguards. This is the origin of the Neutrinos Angra (ν -Angra) experiment, discussed in this paper.

A common challenge for all neutrino experiments, using reactors or not, is the background radiation - mainly neutrons and cosmic muons - that can mimic signals with similar features of those expected from the neutrino detection. To suppress the background level, the usual solution is to install the detectors in large underground cavities [3, 5] using the rock and soil overburden as a natural shield. Several measurements have shown that the vertical muons intensity can be reduced 10^4 times for 10^2 $hg\ cm^{-2}$ depth of rock [13]. Achieving a Signal-To-Noise Ratio (signals produced by neutrinos against neutrino-like signals caused by other particles) high enough in order to make possible to monitor the burning process of nuclear reactors is the main challenge (if not the biggest) for the ν -Angra experiment, since the detector is assembled on the surface, one of the points of the agreement with the plant operator to conduct the research inside the Angra dos Reis nuclear complex. In order to handle with the background, the main tools that will be used are: a cosmic rays VETO system surrounding the outermost part of the detector target volume, and discrimination techniques in data analysis based on the measurements of time and energy of events.

The purpose of this paper is to describe the commissioning of the experiment, which started in September 2017 and finished in the second half of 2018. The paper is organized as follows: section 2 provides an overview of the whole detector - including the neutrino TARGET and the two VETO volumes - and the Readout Electronics (RE) developed to readout and storage of the signals; in section 3 is reported the detector assembling procedure in the nuclear reactor site; section 4 covers a brief description of the RE, its installation in the site and the initial tests; the first measurements, and respective data analysis, with the full detector and readout electronics in operation are presented in section 5. Finally, conclusions and perspectives close the paper in section 6.

2 The ν -Angra Detector and the Readout Electronics

2.1 Detector Overview

The ν -Angra experiment intends to develop a system, based on a Cherenkov detector, capable of measuring antineutrino flux emitted by reactors. The Angra dos Reis nuclear site (which houses a 3764 MW power reactor named Angra II) is being used to assess the proposed technology. With the reactor in steady-state operation, the neutrino flux produced by that unit is estimated

thick on two opposite sides and 22.5 cm on the other two sides. It is completely filled with pure water and used as shield against background neutrons.

2.2 Readout Electronics

Besides the detector itself, a complete data acquisition system has been designed and integrated for the experiment in order to perform tasks, such as: biasing of the PMTs (High Voltage power supply), amplification of PMT output signals (Front-End electronics), sampling and digitization of the signals (NDAQ electronics), online events selection (Trigger system) and local data storage (commercial *Network Attached Storage*). An overview of the Readout Electronics with those systems is the diagram shown in figure 2.

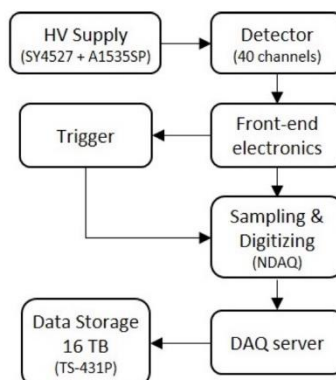


Figure 2. Overview of the Readout Electronics installed on the nuclear power plant.

The high voltage system and the local computing infrastructure - DAQ (Data Acquisition System) servers and local data storage - are commercial off-the-shelf parts in the readout electronics. The High Voltage Power Supply used to bias the 40 PMTs is a commercial mainframe-based system from CAEN. It is composed of one SY4527 mainframe housing two units of the A1535SP 24-channel positive voltage module with SHV-type output connectors. The HV system is remotely controlled through ethernet connection and a simple terminal-style user interface. The local data storage is a *network attached storage* unit, model TS-431P (QNAP), assembled with four 4 TB disks. Data read from the detector is continuously written to those disks and posteriorly transferred to two larger and permanent data servers: the primary one installed at CBPF, in Rio de Janeiro, and a mirror server installed at Unicamp, in Campinas.

2.2.1 Front-end electronics

In order to condition the PMTs output signals to the digitizing electronics (NDAQ modules), and to inform which channels have been fired to the trigger system, a custom front-end circuitry has been developed [15]. The front-end sensitivity was measured to be 71.5 ± 0.9 mV (output signal peak value) per photoelectron and it starts saturating after achieving an output peak amplitude of 1.4 Volts; therefore, each channel can process up to about 20 photoelectrons without linearity loss.

Five front-end boards (FEB) are used in the experiment, each one with eight independent channels. A channel is composed of a four-stage amplification/shaper circuit, a discriminator circuit and a control system. The former prepares the signal to the digitizer, the output of the second is delivered to the trigger system and the latter allows remotely adjustment of the offset of the analog signal and the threshold of the discriminator circuit according to the experiment requirements. Therefore, as shown in figure 3, each channel offers two output signals: an analog (ASIG) and a discriminated (DSIG) signal.

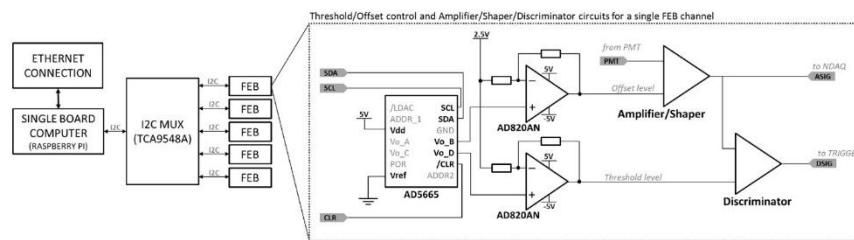


Figure 3. Front-end electronics channel.

The control system, also shown in figure 3, is based on an I^2C controllable DAC chip (AD5665), placed on the FEB, and a single-board computer (RaspberryPI) connected to the network to allow accessing all the DAC (Digital-to-Analog Converter) chips remotely. To access all the FEBs, a I^2C multiplexer (TCA9548A) is used. Each DAC provides four output voltages (only two of them are shown in figure 3 for simplification) and, therefore, to control all the eight offset and eight threshold levels of a FEB, four DAC chips are used per board. All boards' functionalities and channels were tested and calibrated in laboratory before installing the boards in the experiment container. Once they were installed in the nuclear site, all the thresholds were calibrated to produce a discriminator output rate between 500 and 3000 pulses per second for each channel.

2.2.2 Digitizer

The detector signals, amplified and shaped by the front-end electronics, are sent to a VME-based system able to sample and digitize the signals whenever it receives a trigger pulse. The system is composed of a commercial *single board computer* module, model MVME3100 (Artesyn Embedded Technologies), a commercial *Fan-In Fan-Out* module, model V976 (CAEN), and five NDAQ modules, specifically designed for the experiment [16]. The single board computer works as the readout processor of the digitizer cards. It hosts and executes a C language program that control and read, during data taking, the NDAQ cards installed on the mainframe. The fan-in fan-out module is used to distribute the digital trigger pulse coming from the Trigger system to the five NDAQ modules.

Each NDAQ module has eight ADC (Analog-to-Digital Converter) channels working at 125 MHz sampling rate with 10 bits vertical resolution, as shown in figure 4. The ADC output samples are sent to an FPGA (Field Programmable Gate Array), where a circuit based on two FIFO memories connected in series is programmed. This approach is used in order to flush and store pulse samples before and after the rising edge of the trigger pulse, otherwise only samples

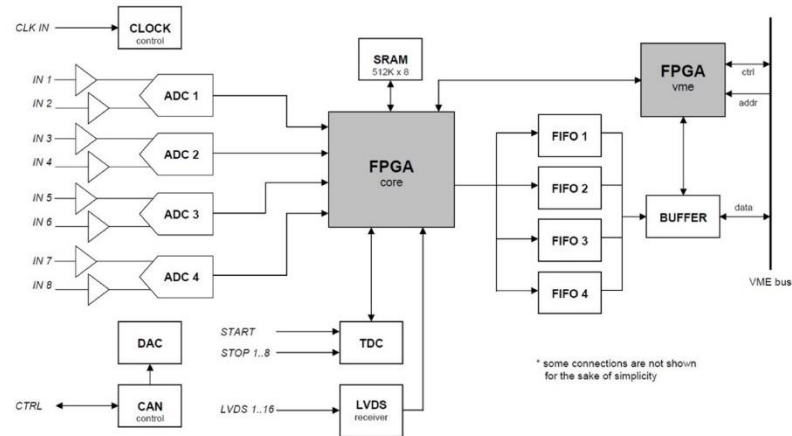


Figure 4. NDAQ data acquisition module design.

after the trigger instant would be read. It is worth noting that typical pulses coming out of the photomultiplier tubes feature spectral content up to 160 MHz, at the point where the spectrum falls -20 dB. After the front-end electronics, the signal bandwidth falls to less than 50 MHz and therefore can be properly discretized at 125 samples per second.

2.2.3 Trigger

In the occurrence of an event, the front-end output signals are digitized by the NDAQ modules and sent to on-board FIFO memories waiting for a trigger decision. If the event is selected by the Trigger System [17], shown in figure 5, the corresponding data is transferred to the experiment data storage unit for future analysis. For a fast trigger decision, the selection algorithm was developed to be implemented in a dedicated FPGA. For remote configuration and upgrade of its firmware, a RaspberryPI card with Ethernet connection has been integrated to the FPGA circuit.

The Trigger board receives as input the 40 discriminated signals from the discriminator section of the Front-end modules: 32 signals from the Target detector PMTs, 4 from the Lateral Veto and 4 from the Top Veto. Two output connectors deliver the results of the trigger logic processing: the overall Trigger L1 signal, a high level pulse that indicates whenever a minimum of PMT units have been fired at the same time window, and the Veto signal, which informs that a veto condition was found. The Veto condition, as the name suggests, blocks any Trigger L1 pulse during a short period (currently set to 2.5 μ s) after the rising edge of the Veto signal.

In the current design, the Trigger L1 condition is based only on multiplicity, which means that the Trigger L1 pulse is active whenever a minimum number of PMTs are fired in the Target detector inside a predefined time window. The same concept applies to the Veto system.

A number of configuration registers that define the Trigger functionalities are available and can be remotely configured. The values of those registers are defined in a text file stored in the

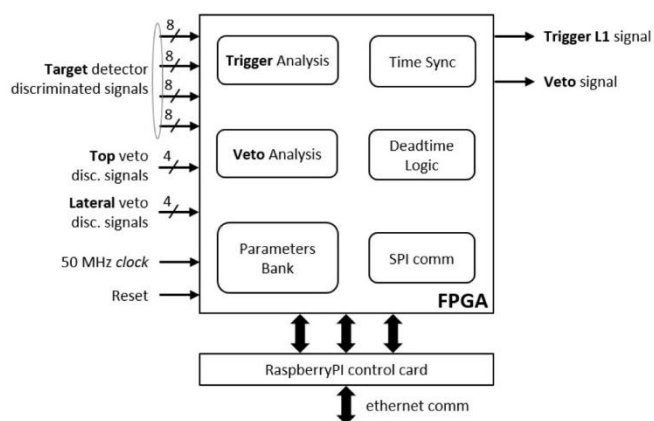


Figure 5. Trigger electronics overview.

RaspberryPI control card. In order to perform any change on the registers, one only needs to edit that file. A list of the most relevant registers are given below::

- minimum number of PMTs fired in the Target detector to generate a Trigger L1 pulse;
- minimum number of PMTs fired in the Lateral veto to generate a Veto condition;
- minimum number of PMTs fired in the Top veto to generate a Veto condition;
- time window length to accept Target PMTs discriminated pulses;
- time window length for blocking Trigger L1 pulses in a Veto condition;
- blocking mask for each PMT channel in the whole detector (40 bits).

3 Assembling at the Experimental Site

3.1 Detector Assembling

The final assembly of the detector was planned to be done just outside of its final position, the naval container of the project, located 2 m away from the wall of the nuclear reactor building. After an analysis of the best course of action to be taken, it was decided to prepare the Top veto first, due to its relative simplicity when compared to the Target detector tank; then the Target, and finally the Lateral veto were mounted in that order because the latter needed the target inside it to be instrumented. All volumes were already internally coated with Tyvek prior to the transportation to the nuclear reactor site in order to facilitate the assembly.

The Top veto was instrumented with 4 PMTs and a calibration LED. To equip the Target detector, it was laid sideways so that two researchers could enter and fit in the 16 bottom PMTs along with 6 calibration LEDs, as shown in figure 6. Finally the Target detector tank was carefully brought to its standard position and externally coated with Tyvek. Its lid was lifted and the 16 top

PMTs and 6 LEDs were placed. Figure 7 shows the Target detector lid fully instrumented just before lowering it down to its final position.



Figure 6. Bottom of the Target detector being instrumented in the nuclear power plant.



Figure 7. Target detector lid with the 16 PMTs and 6 LEDs installed.

With help of the nuclear power plant personnel, the Target, now complete, was lifted and placed inside the Lateral veto volume. The 4 PMTs of the Lateral veto were mounted on its main cover plates, upside down. The main plates were covered with secondary plastic plates and a canvas to block light leakage.

The Top veto was lifted and placed upon the Lateral veto tank. To finish the detector assembling, another canvas was placed on top of the detector and it was moved inside the container.

The filling with water started by the Target volume, in which was pumped 1.7 m^3 of Gd doped water. Then, the filling of the Lateral veto tank was done, with 1.6 m^3 of pure water in the active volume and 3 m^3 in the surrounding external volume. Finally, the Top veto was filled with 1.4 m^3 of pure water as well.

3.2 DAQ Installation Campaigns

The complete installation of the readout electronics and the computing infrastructure in the project's container happened in three short-time campaigns, each one consisting of one or two visits to the nuclear site. In each subsequent campaign new elements were added to the DAQ system and a few necessary modifications on the software and firmware level were done. Consequently, after each commissioning campaign the operational conditions of the DAQ were slightly changed.

In the first campaign, a simple DAQ was installed consisting of: one local server, the Front-end electronics (5 modules \times 8 channels), the NDAQ digitizers (5 modules \times 8 channels), the Trigger and the HV Power Supply systems, as shown in figure 2. Unfortunately, during the mission it was noticed that one of the 5 NDAQ modules was not accessible by the VME single board computer, which means that only 32 channels were effectively operational. A second issue also detected was that the Trigger system was not taking into account the VETO signals to reject cosmic muons crossing the Top VETO detector. That problem had a major impact on the overall trigger rate of the detector, keeping it around 1 kHz, well above the expected rate. To generate a trigger pulse, coincident signals were required on at least four PMTs on the target detector in a fixed time window. It was also found that the NDAQ modules could not handle such high trigger rate. Therefore, at the end of the first campaign, the experiment was not ready to acquire data continuously; only short time runs were performed for debugging.

During the second DAQ installation campaign, some software and hardware modifications have been done. There was no inclusion of new hardware. At the end, even with the Top VETO signals still not acting on the Trigger system as they were supposed to, the DAQ system was able to run with certain stability at 1 kHz trigger rate. From this campaign on, the experiment started to collect data through short-time RUNs of few minutes due to the high trigger rate.

In the last campaign, the first complete version of the DAQ system was achieved after three important actions: (i) new equipments were installed, (ii) a revised and corrected version of the Trigger firmware was configured and (iii) major fixes on the readout software were implemented. The new equipments included a high-power (3 kVA) UPS tower to provide stable AC power supply for all the DAQ elements, a commercial data storage unit with 16 TB capacity, and RaspberryPI-based electronics to allow remote configuration of the Front-end parameters - offset and threshold. After update of the Trigger firmware, the veto logic started to work properly. Whenever two or more PMT hits occur at the same time window, any trigger pulse is blocked during the programmed time window. Finally, with the VETO working as required, the overall trigger rate decreased to 150 Hz (under the condition of at least four PMT hits in the Target detector). A picture of the rack containing all the DAQ subsystems is shown in figure 8. From top to bottom, one can see: (i) the VME crate containing the Single Board Computer, the NDAQ digitizers and the fanout modules, (ii) the NIM crate with the Front-end electronics and the Trigger module and (iii) the HV power supply subsystem.

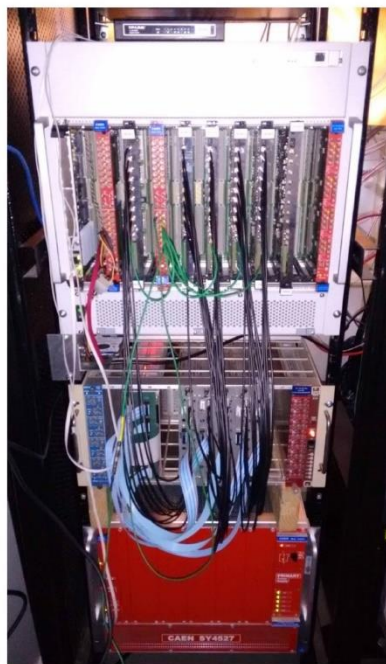


Figure 8. Data Acquisition electronics installed at the laboratory container located in the nuclear plant.

4 Preliminary Measurements and Data Analysis

Several experimental tests with the detector have been carried out during the commissioning campaigns in the nuclear facility, with the DAQ partially and fully installed. In the next paragraphs only the most relevant measurements, demonstrating its functionality and performance, will be described along with the achieved results.

The first test of the electronics was validating the non-saturated charge region of the DAQ. This test is independent of the trigger system, depending only on the PMTs, High-Voltage system and Front-End gain. We defined as *saturated* any pulse with at least 2 samples with the ADC saturated (using 8-bit configuration). The result can be seen in the figure 9 where each grey point represents the mean charge which n-PMTs are saturated (shown in percent) and the solid line is a logistic curve fit. Although there is no precise calibration available during this commissioning phase, the inverse beta decay positrons and neutrons are expected to be detected with less than $3 \cdot 10^4$ DUQ (digital unity of charge). The charge unity used during the commissioning phase, *DUQ*, is calculated as the sum of the digital value of the ADCs samples.

The first physics result obtained after several weeks of detector operational was the spectrum of particles (mostly muons) crossing and losing energy in the Target detector. Since the correction of the muon veto firmware was a drastic change in the way the detector was working, in figure 10 two

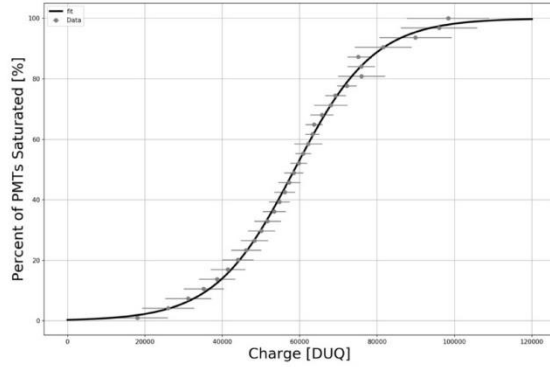


Figure 9. DAQ Electronics Saturation curve.

spectra are shown, one for events before the firmware correction and the other after the correction. It is clear to notice that a bump between 75000 and 100000 DUQ units disappears for the events acquired with the veto working, as expected due to the removal of most of vertical muons from the data. Those events are simply rejected by the veto system.

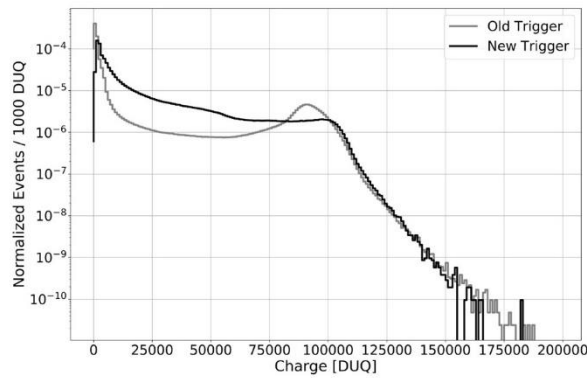


Figure 10. Charge Spectrum obtained with no cuts on the Target detector.

A useful measurement to check and monitor the detector operation in the long run is the stability of the bump region amplitude: the high energy region dominated by crossing muons. Although this region is heavily saturated (more than 80% according to figure 9), the saturation effect shouldn't change over time, ensuring the use of this feature as a stability check. This result is presented in figure 11 for periods after each commissioning campaigns. In the last group of measurements, more recent weeks, the mean reconstructed amplitude is reduced, as expected, since the veto system is in action.

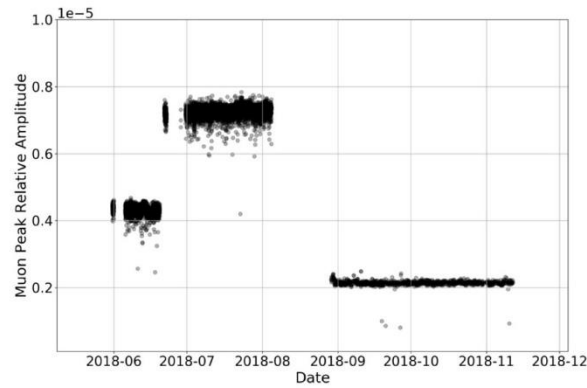


Figure 11. Relative amplitude of the muon peak (region showed between $7.5 \cdot 10^4$ and 10^5 on plot 10).

Trigger rate was also analyzed in this same context. In figure 12 is possible to see that the rate changes after each commissioning campaign, but between each of them the rate behavior remained stable. For the two first groups of measurements it should be emphasized that the veto system was not working. That is the reason for the higher mean value, close to 1 kHz, when compared to the last group (starting in 2018-09). The small increase in the rate from the first to the second group may be explained by the adjustments done on the Front-end thresholds during the second DAQ installation campaign. Some channels on the Target detector were operating with threshold values higher than necessary. After the decrease of the threshold on those channels, it was expected to observe an increase in the individual trigger rate and, consequently, an increase in the overall trigger rate. After the last commissioning campaign, the overall trigger rate got stable around a mean value of 170 Hz. The rate of muons crossing the VETO detector is also monitored by the Readout Electronics and fluctuates around a mean value of 1 kHz.

The distribution of time intervals between events in the Target detector is shown in figure 13. In the range of tens of microseconds, there are three main different phenomena: neutron capture in the Gd, muon decay and random coincidences. In the plot of figure 13 two exponential curves were adjusted to fit the phenomena: the random coincidence was fixed from a fit with larger temporal scale. With these fitting results, it was possible to compute: (i) the event rate (from the background time constant), (ii) the mean time of Gd neutron capture (that is proportional to the amount of Gd in the Target detector water) and (iii) the mean lifetime of muons (an ensemble of positive and negative muons). The fitting result can be seen on table 1.

A selection of stopping muon candidates was made using events with charge between $5 \cdot 10^4$ and $7.5 \cdot 10^4$ DUQ and time coincidence less than $6 \mu s$. A selection of background was made using a time coincidence between $6 \mu s$ and $12 \mu s$. After background exclusion, the charge of the second event of the coincidence can be plot as the Michel Electron Candidates charge spectrum, as shown in figure 14. One should note that this plot has negative values in the low energy limit due to

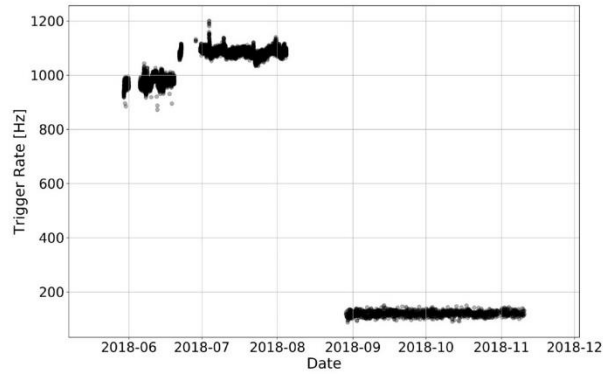


Figure 12. Trigger rate stability after each commissioning campaign.

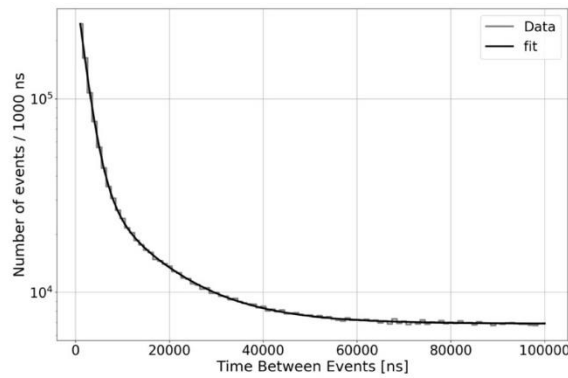


Figure 13. Time between events in the Target detector.

	Time Constant (ns)	Fit Error (ns)
Neutron Capture	12700	80
Muon decay	2015	4
Background	$7.83 * 10^6$	$5 * 10^4$

Table 1. Fitting results from data acquired on last commissioning period.

the background exclusion, which, as expected, is more dominated by background on this selection. The lack of sharpness on the end of Michel Electron Candidates spectrum can be explained by the saturation of about 40% expected in this charge region, combined with the finite size of the detector, that is not a perfect calorimeter for depositions based on multiple Compton scattering.

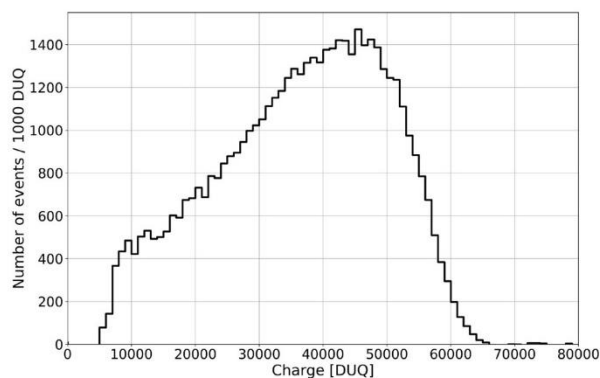


Figure 14. Michel electrons candidates.

5 Conclusions

The main aspects of the Neutrinos Angra detection system and its full commissioning were reported, with the description of the different tasks accomplished and the preliminary measurements achieved with the detector fully operational. First, the detector was fully assembled in the laboratory container located a few meters from the nuclear reactor protection. In a second moment, after three campaigns that had last for a few months, the Data Acquisition system was fully installed, tested and put into operation. As the preliminary measurements presented confirm, the experiment is fully operational, the detector is working as expected and the DAQ is continuously taking data for further precision analysis towards the detection and identification of neutrinos.

Acknowledgment

This work is supported by the Brazilian Ministry of Science, Technology, Innovation and Communications (MCTIC), FINEP and CNPq.

References

- [1] C. Cowan *et al.*, *Detection of the free neutrino: a confirmation*, *Science* **124** (1956) 3212
- [2] F. Boehm *et al.*, *Search for neutrino oscillations at the Palo Verde Nuclear Reactors*, *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 3764.
- [3] M. Apollonio *et al.*, *Limits on neutrino oscillations from the CHOOZ experiment*, *Phys. Lett. B* **466** (1999) 415.
- [4] F. P. An *et al.*, *Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay*, *Phys. Rev. Lett.* **108** (2012) 171803.
- [5] Y. Abe *et al.*, *Indication of reactor electron antineutrino disappearance in the Double Chooz experiment*, *Phys. Rev. Lett.* **108** (2012) 131801.

- [6] J. K. Ahn *et al.*, *Observation of reactor electron antineutrinos disappearance in the RENO experiment*, *Phys. Rev. Lett.* **108** (2012) 191802.
- [7] L. Mikaelian, *Neutrino laboratory in the atomic plant. Proceedings of the International Conference "Neutrino 77"* **2** (1978) 383.
- [8] A. Borovoi, L. Mikaelian, *Possibilities of practical applications of neutrinos*. *At. Énerg.*, **44**, **6** (1978) 508.
- [9] V. Korovkin, A. Kodanov, D. Yarichin *et al.*, *Measurement of nuclear fuel burnup in a reactor according to neutrino emission*. *At. Énerg.*, **56**, **4** (1984) 214.
- [10] V. Korovkin, A. Kodanov, Panashchenko *et al.*, *Measurement of power generation of a power reactor by the method of neutrino detection*. *At. Énerg.*, **65**, **3** (1988) 169.
- [11] N. S. Bowden, *Reactor monitoring and safeguards using antineutrino detectors*. *Journal of Physics: Conference Series*, **2**, **136** (2008) 022008.
- [12] J. C. Anjos, A. F. Barbosa, R. Z. Funchal *et al.*, *Angra neutrino project: Status and plans*. *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **155** (2006) 231
- [13] P. K. F. Grieder, *Cosmic Rays at Earth - Researcher's Reference Manual and Data Book*, Elsevier Science (2001).
- [14] A. Aguillar-Arevalo *et al.*, *Results of the engineering run of the Coherent Neutrino Nucleus Interaction Experiment (CONNIE)*, *JINST* **11** (2016) P07024.
- [15] T. I. Dornelas, F. T. H. Araújo, A. S. Cerqueira, J. A. Costa, R. A. Nóbrega, *Front-end Design and Characterization for the ν -Angra Nuclear Reactor Monitoring Detector*, *JINST* **11** (2016) P07018.
- [16] H. P. Lima Jr, L. M. de Andrade Filho, L. F. G. Gomez, R. G. Gama, *Data Acquisition with Optimal Pulse Amplitude Estimation for a Neutrino Detection Experiment*, *Notas Tecnicas CBPF-NT-006/14* (2014).
- [17] J. M. S. Souza, *Sistema digital de selecao online de eventos para o detector Neutrinos Angra*, *Master Thesis* Universidade Federal da Bahia (2016).
- [18] Hamamatsu Photonics K. K., *Photomultiplier Tubes and Assemblies*, (2017).

SISTEMA ONLINE DE SELEÇÃO DE EVENTOS NO DETECTOR NEUTRINOS-ANGRA

JOÃO MARCELO SILVA SOUZA*, ANTONIO FERNANDES JÚNIOR¹, AUGUSTO SANTIAGO CERQUEIRA¹, CÉSAR MANUEL CASTROMONTE FLORES², DAVI DE MELO SOUZA³, DION BARBOSA DOS SANTOS RIBEIRO*, EDUARDO F. DE SIMAS FILHO⁴, ERNESTO KEMP⁵, GABRIEL LUIS AZZI⁶, GERMANO PINTO GUEDES⁷, GUSTAVO DO AMARAL VALDIVIOSO⁸, HERMAN PESSOA LIMA JÚNIOR⁹, IGOR ABRITTA COSTA¹⁰, JURIMUNIZ PEPE¹¹, JOÃO CARLOS COSTA DOS ANJOS¹², LUIS FERNANDO GÓMEZ GONZÁLEZ¹³, OTTO ROCHA¹⁴, PIETRO CHIMENTI¹⁵, PAULO CÉSAR MACHADO DE ABRU FARIAS¹⁶, RAFAEL ANTUNES NÓBREGA¹⁷, STEFAN WAGNER¹⁸

¹Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora-MG, Brasil

²Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Rio de Janeiro-RJ, Brasil

³Universidade Federal do ABC
Santo André-SP, Brasil

⁴Universidade Federal da Bahia
Salvador-BA, Brasil

⁵Universidade Estadual de Feira de Santana
Feira de Santana-BA, Brasil

⁶Universidade Estadual de Campinas
Campinas-SP, Brasil

⁷Universidade Estadual de Alfenas
Alfenas-MG, Brasil

⁸Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro-RJ, Brasil

Email: joaomssouza@gmail.com

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

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

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

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

AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE VETO PARA O EXPERIMENTO NEUTRINOS ANGRA

AUGUSTO SANTIAGO CERQUEIRA¹, IGOR ABRITTA COSTA², ANTONIO FERNANDES JÚNIOR³, DAVI DE MELO SOUZA⁴, RAFAEL ANTUNES NÓBREGA⁵, JOÃO CARLOS COSTA DOS ANJOS⁶, GABRIEL LUIS AZZI⁷, HERMAN PESSOA LIMA JÚNIOR⁸, OTTO ROCHA⁹, PIETRO CHIMENTI¹⁰, PAULO CÉSAR MACHADO DE ABRU FARIAS¹¹, JURIMUNIZ PEPE¹², EDUARDO F. DE SIMAS FILHO¹³, DION BARBOSA DOS SANTOS RIBEIRO¹⁴, GERMANO PINTO GUEDES¹⁵, LUIS FERNANDO GÓMEZ GONZÁLEZ¹⁶, ERNESTO KEMP¹⁷, GUSTAVO DO AMARAL VALDIVIOSO¹⁸, STEFAN WAGNER¹⁹

¹Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora-MG, Brasil

²Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Rio de Janeiro-RJ, Brasil

³Universidade Federal do ABC
Santo André-SP, Brasil

⁴Universidade Federal da Bahia
Salvador-BA, Brasil

⁵Universidade Estadual de Feira de Santana
Feira de Santana-BA, Brasil

⁶Universidade Estadual de Campinas
Campinas-SP, Brasil

⁷Universidade Estadual de Alfenas
Alfenas-MG, Brasil

⁸Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro-RJ, Brasil

Emails: augusto.s.cerqueira@gmail.com, igorabritta@gmail.com, antonio.junior@engenharia.ufjf.br, davi.melo@engenharia.ufjf.br, ranob@gmail.com, janjoen.br, gabriel@cbpf.br, klina@cbpf.br, rochafiscomp@gmail.com, pietro.chimenti@ufabc.edu.br, paulo.farias@ufba.br, lapo.if@gmail.com, eduardosinas@gmail.com, ribeiriodion@gmail.com, germano.pfgs@gmail.com, joserodriguez_kemp@ifi.unicamp.br, gustavo.valdivioso@unifal-mg.edu.br, swagner@cbpf.br

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

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

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

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

Signal simulation based on the characteristics of the ν -Angra Experiment's readout electronics

G. S. Lopes*, D. M. Souza
I. A. Costa
M. Paschoal and R. A. Nóbrega
Federal University of Juiz de Fora
Juiz de Fora-MG, Brazil

J. C. Anjos, H. P. Lima Júnior
and G. Cernicchiaro
Brazilian Center for Physical Research
Rio de Janeiro-RJ, Brazil

L. M. Pepe and D. B. dos S. Ribeiro
Federal University of Bahia
Salvador-BA, Brazil

M. P. Dias*, G. S. Lopes, D. M. Souza,
I. A. Costa and R. A. Nóbrega
Federal University of Juiz de Fora
Juiz de Fora-MG, Brazil

J. C. Anjos, H. P. Lima Júnior
and G. Cernicchiaro
Brazilian Center for Physical Research
Rio de Janeiro-RJ, Brazil

I. M. Pepe and D. B. dos S. Ribeiro
Federal University of Bahia
Salvador-BA, Brazil

P. Chimenti
State University of Londrina
Londrina-PR, Brazil

G. P. Guedes
State University of Feira de Santana
Feira de Santana-BA, Brazil

L. F. G. Gonzales and E. Kemp
State University of Campinas
Campinas-SP, Brazil

P. Chimenti
State University of Londrina
Londrina-PR, Brazil

G. P. Guedes
State University of Feira de Santana
Feira de Santana-BA, Brazil

L. F. G. Gonzales and E. Kemp
State University of Campinas
Campinas-SP, Brazil

Abstract—The Neutrinos Angra (ν -Angra) Experiment has the objective of developing a compact surface detector capable of monitoring the activity of nuclear reactors. The collaboration ν -Angra makes use of the Geant4 package to simulate the interactions occurring inside the detector. The outcome of this Geant4-based software provides time, position and energy of photons that reach the detector sensors; therefore more information about the electrical signal formation is given. In this context, this work proposes a method to simulate the ν -Angra electrical signal coming out from the signal acquisition chain, such chain is composed of a photomultiplier, an amplifier-shaper circuit and an analog-to-digital converter. The characteristics of the proposed method will be described and its performance will be evaluated based on a comparison between its output response and the real signal, experimentally acquired.

Index Terms—Signal simulation, neutrinos detector, nuclear reactor

I. INTRODUCTION

The ν -Angra detector aims to measure the thermal power released by a nuclear reactor in the fission process. That power is directly proportional to the flux of antineutrinos coming out from the reactor core [1]. Therefore, by measuring this flux, it is possible to infer the thermal power of the nuclear reactor and the quantity of fuel that has been burned.

A challenging aspect of the ν -Angra detector is that it is a detector mounted on the ground level, unlike most of neutrino detectors that are underground with the purpose of using the ground layer as a natural filter for reducing noise due to cosmic rays. Due to its high exposure to these noise signal, the ν -Angra detector was designed with a Veto system [2] that should be highly efficient.

In particle physics experiments, as in many other types of scientific experiment, computational simulation of the underlying processes are essential to the design of the whole system, from the detector itself up to the complex algorithms

*Corresponding author e-mail address: pulberne@ufjf.br
This work is supported by the Brazilian Ministry of Science, Technology, Innovation and Communication (MCTIC), FAPESP, CNPq, and FAPRBR.

applied for identifying events of interest. Therefore, without a robust simulation, it is not possible to optimize the system, which might cause it to work in poor conditions and eventually compromise the goals of the research in progress.

This work aims to model the signal acquisition electronics of the ν -Angra experiment. In order to implement an algorithm to perform such task, experimental data obtained in laboratory was used to build-up the model. To validate the model, data provided by the Geant4-based [3] simulation, used as input for the implemented algorithm, and experimental data, acquired directly with the ν -Angra detector, were used.

In Section II it will be described the adopted methodology and the environment in which the research is inserted. Section III will show the details that underlie the proposed simulation model. Section IV will present the results achieved and Section V the final conclusions.

II. METHODOLOGY

In order to provide a better knowledge about the work environment this section presents details about the simulation of the physical interactions that takes place inside the detector, the information needed to propose a simulation model for the signal acquisition electronics of the experiment and, finally, the adopted strategy.

A. Simulation of physical interactions in the detector

In the ν -Angra collaboration there are specific research groups responsible for simulating the physical interactions that occur inside the detector. That simulation has been developed using the Geant4 package, a powerful tool that uses the Monte Carlo method to simulate the interaction processes between particles and materials. Its applications range from Medical Physics to High Energy Physics, being widely used in particle detector simulations [4]. The main output variables provided by the detector simulation used in this work are:

- Particles: particle identity, momentum and spin;

 ν -Angra readout electronics and target detector assessment using a cosmic rays based trigger

M. P. Dias*, G. S. Lopes, D. M. Souza,
I. A. Costa and R. A. Nóbrega
Federal University of Juiz de Fora
Juiz de Fora-MG, Brazil

J. C. Anjos, H. P. Lima Júnior
and G. Cernicchiaro
Brazilian Center for Physical Research
Rio de Janeiro-RJ, Brazil

I. M. Pepe and D. B. dos S. Ribeiro
Federal University of Bahia
Salvador-BA, Brazil

P. Chimenti
State University of Londrina
Londrina-PR, Brazil

G. P. Guedes
State University of Feira de Santana
Feira de Santana-BA, Brazil

L. F. G. Gonzales and E. Kemp
State University of Campinas
Campinas-SP, Brazil

Abstract—In this work, a battery of measurements have been carried out with the objective of characterizing the target detector of the Neutrinos Angra Experiment using a cosmic rays based trigger. It is its first assessment after the detector was fully equipped with all the 32 PMTs, as foreseen by the project, and its custom-based readout electronics. The ν -Angra detector was constructed with the purpose of measuring antineutrino particles generated in the fission process of the Angra dos Reis Nuclear Reactor. Before transporting to the nuclear reactor facility, it is important to measure its operational characteristics as a first step of the commissioning stage. The achieved results describing some of the main characteristics of the detector system are presented in this document.

Index Terms—Monitoring device, Nuclear reactor, Neutrino detectors, PMT.

I. INTRODUCTION

The ν -Angra Experiment aims to measure the flux of antineutrino particles ($\bar{\nu}$) generated by nuclear reactors. One of the peculiarities of this detector is that it is a surface detector, since neutrino detectors are usually placed underground to naturally filter cosmic rays events [1]. The $\bar{\nu}$ flux measurement can be used to monitor the reactor activity and to estimate the thermal power produced at its core [2] which would be related to the amount of burned fuel. This information could be used to indirectly account for the amount of spent nuclear fuel. It could be applied, for example, as an additional tool to control the amount of fuel entering and leaving the plant.

Another application would be to evaluate the composition of the reactor's current fuel by measuring the variation of the energy spectrum of neutrons during the burn up process [3]. The signature of the $\bar{\nu}$ particle is given by the interaction characteristics of the secondary particles ($n + e^+$): positron generates a first signal and then the neutron generates a second signal that occurs within a few microseconds of the first. The temporal relationship between the signals can be used to identify the events of antineutrinos. However, due to the huge amount of background events, the task of identifying such signature takes place under very low signal-to-noise

ratio (SNR) conditions, which is a challenge for the ν -Angra Collaboration.

The detector was recently fully-equipped for the first time and is undergoing its commissioning phase. This work intends to show some of the main characteristics of the detector measured using a cosmic rays based trigger, build up with scintillators. In a recent past the target detector was studied, using only 16 photomultiplier tubes (PMTs) [4] and [5]. Additionally, studies on the VETO system can be found in [6] and [7].

II. THE ν -ANGRA DETECTOR

A. Detector

The ν -Angra detector will be installed next to the dome of the Angra II nuclear reactor, and was designed based on four main subsystems, as show in Figure 1 and described next: 1) the target detector, equipped with 32 Photomultiplier Tubes (PMTs); 2) the lateral VETO, which is an additional layer equipped with 4 PMTs that surrounds the whole of the target detector; 3) the lateral shielding, which surrounds the lateral VETO; and 4) a upper VETO based on a lid filled with water and equipped with 4 PMTs positioned above the other parts of the detector. While the task of detecting the neutrinos particles must be accomplished by the target detector, the other subsystems have the function of filtering cosmic rays and external low-energy events, such as natural radioactivity. All detector parts are filled with water, making the Cherenkov [8] radiation the main measurement process. In total, the detector uses 40 PMTs, all from the same model (Hamamatsu RS912) [9].

The dimensions of the whole detector are 2.75m x 2.00m x 2.42m and the target detector tank are 1.50m x 1.05m x 1.39m. The mass of the target detector will provide a neutrino interaction rate in the order of 5.10^3 events per day, considering a distance of 25m from the center of the reactor and 40W of thermal energy.

The target detector was mounted with 16 PMTs on its lower surface and 16 on its upper surface. Figure 2 shows

NEUTRINOS ANGRA EXPERIMENT: ASSEMBLY OF THE ANTINEUTRINO DETECTOR AT ANGRA 2 NUCLEAR POWER PLANT



¹DION B. S. RIBEIRO, ¹LEANDRO R. TEIXEIRA, ¹JOSE ALEJANDRO M. ALFONZO, ¹JOÃO MARCELO S. SOUZA, ¹PAULO CÉSAR M. A. FARIAS, ¹EDUARDO F. DE SIMAS FILHO, ¹IURI M. PEPE, ²JOÃO CARLOS C. DOS ANJOS, ³HERMAN P. LIMA JR., ⁴GERALDO CERNICCHIARO, ⁵RAFAEL A. NOBREGA, ⁶ERNESTO KEMP, ⁶LUIZ FERNANDO G. GONZALEZ, ⁶GERMANO P. GUEDES, ⁶PIETRO CHIMENTI.

¹Universidade Federal da Bahia, ²Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, ³Universidade Federal de Juiz de Fora, ⁴Universidade Estadual de Campinas, ⁵Universidade Estadual de Feira de Santana, ⁶Universidade Estadual de Londrina

ABSTRACT

This work describes the process of assembly of the antineutrino detector currently installed at the Angra 2 nuclear power plant, just outside the reactor building. The Neutrinos Angra Project aims to monitor the thermal power output of the nuclear reactor by measuring the antineutrino flux emitted by the fissile fuel's reactions. The detector is composed of a target of pure water doped with gadolinium, surrounded by a muon veto system and a thermal neutron shielding; all volumes are instrumented with 8" photomultiplier tubes. This unique design is small enough to be placed inside a 42 feet container, and that said, it is a mobile, noninvasive device for characterizing the fuel used as a way to produce most valued nuclear safeguards by international community.

INTRODUCTION

The Neutrinos Angra Project was established in circa 2005, as an effort to measure the neutrino θ_{13} mixing angle and the thermal power output of the nuclear reactor of the Angra 2 nuclear power plant, located in Rio de Janeiro, Brazil, both by the analysis of the Cherenkov radiation emitted in the beta inverse decay reaction. Unfortunately, the θ_{13} detectors could not be constructed and only the very near detector of the 3 planned was installed. Nevertheless, the goal of presenting the world a new, small and modular detector capable of providing the nuclear safeguards most valued by the international community remains untouched, and that goal has been achieved with the installation of this detector in September 2017.

INSTALLED DETECTOR'S MODEL

The detector has the traditional monolithic concept with different concentric layers (see Fig. 1). The target (1.3 m^3) is filled with ultrapure water doped with 0.2% gadolinium in order to increase the capture cross-section of secondary neutrons from the interactions of $e - \bar{\nu}$ emitted by the reactor's core. The Cherenkov radiation from the prompt positrons and delayed gammas from neutron capture is observed by 32 Hamamatsu R5912 8" photomultipliers (PMT) installed at that target. Surrounding the target, there is a 1.6 m^3 active veto layer (optically separated from the target) viewed by 4 PMTs; followed by a 3 m^3 outer layer (non-instrumented, passive veto) for thermal neutrons shielding. Covering the top of the overall structure, there is a third 1.45 m^3 veto tank with 4 PMTs. The active vetoes aim to tag muons crossing the detector for background rejection.

DISASSEMBLY AT CBPF

The detector was previously assembled at the Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), in order to test its functionality and capability of being assembled, dismantled and moved to the nuclear power plant for final assembly. The test was successful and the first stage of the assembly in Angra 2 was the decommissioning of the operational detector at CBPF. The detector was disassembled in the reverse order of assembling and the sensors and plastic pieces were accommodated for transport. The tanks were moved by a third party specialized company and placed at the final assembly location, inside the nuclear power plant.

INSTALLATION AT ANGRA 2

Once all equipment was available on the installation site, the installation began by setting a platform of metal pallets and wooden sheets to accommodate the shielding tank and move it inside the container of the project. A walled gazebo was mounted in order to keep the assembly site protected from wind, rain and dust. The superior veto tank was instrumented with 4 PMTs and readied for the final positioning. The target tank was instrumented in sequence, with the installation of PMTs in the bottom and top lids, with 16 PMTs each (see Fig. 2 a and b).

The target was then lifted and accommodated inside the shielding tank, with Eletronuclear personnel help. The 32 PMT's cables were positioned as well as the access points of water and calibration sensors. The PMTs located at the shielding tank were installed once the target tank was already inside it, since they are placed upside down, facing the center of the detector. They are fixed under the cap of the shielding tank. The superior veto tank was placed on top of the shielding tank, again with Eletronuclear personnel help, and the detector, now complete, was moved inside the container and filled with ultrapure water (see Fig. 2 c and d).



Fig 1. Installed detector's model.



Fig 2. Detail of the detector.

CONCLUSION

The antineutrino detector of Neutrinos Angra is fully operational and running at this very moment, just outside of the reactor building, 30 m from the core. The nuclear safeguards produced as result of the analysis of the data provided, and the unique, small and modular design of this detector may revolution the way governments and societies look to the safety and monitoring of nuclear power plants.

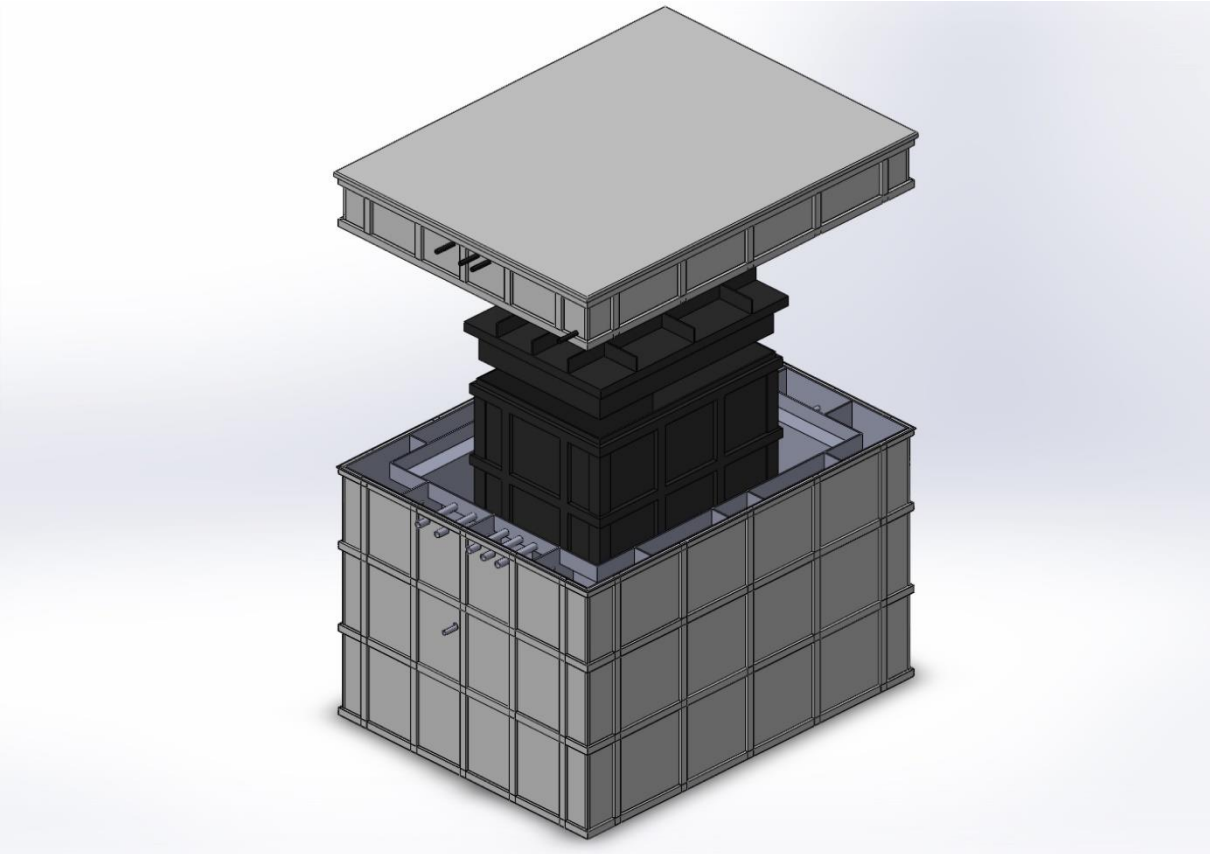
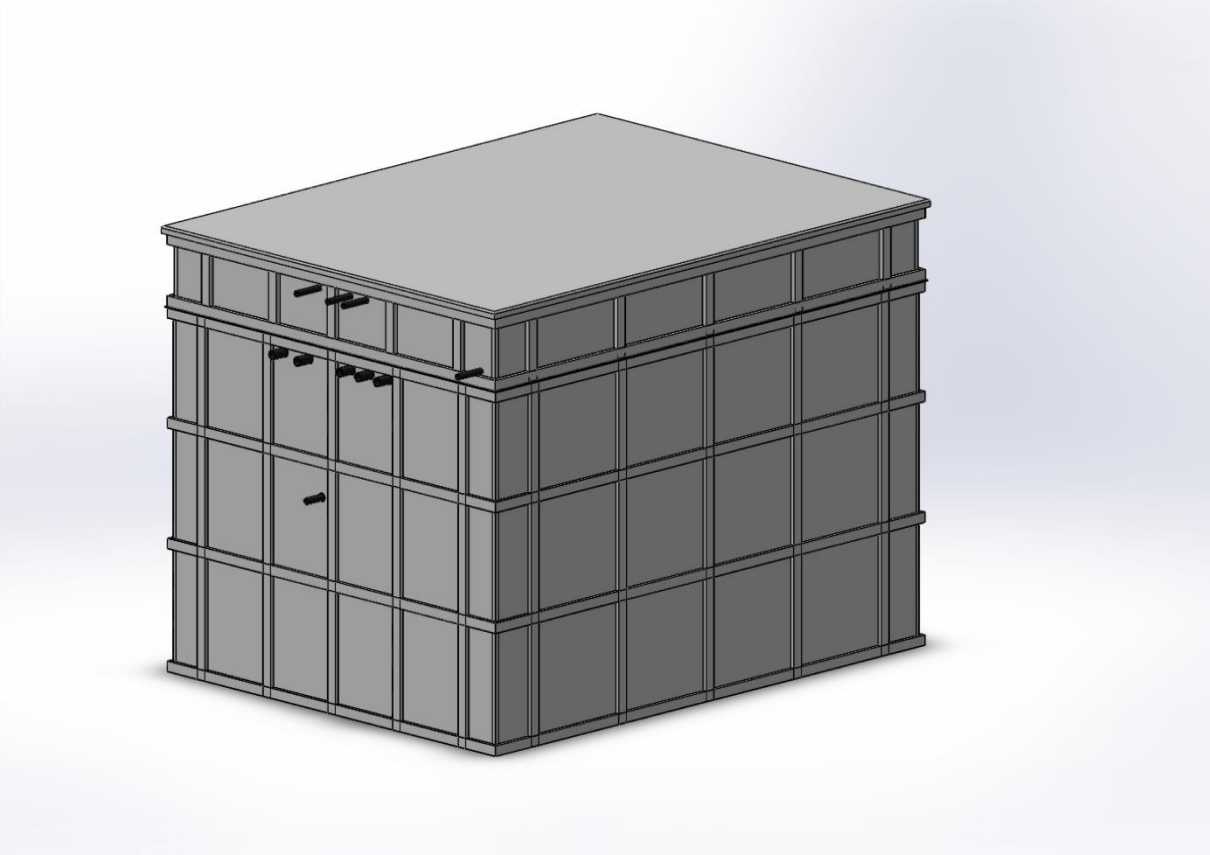
ACKNOWLEDGEMENT

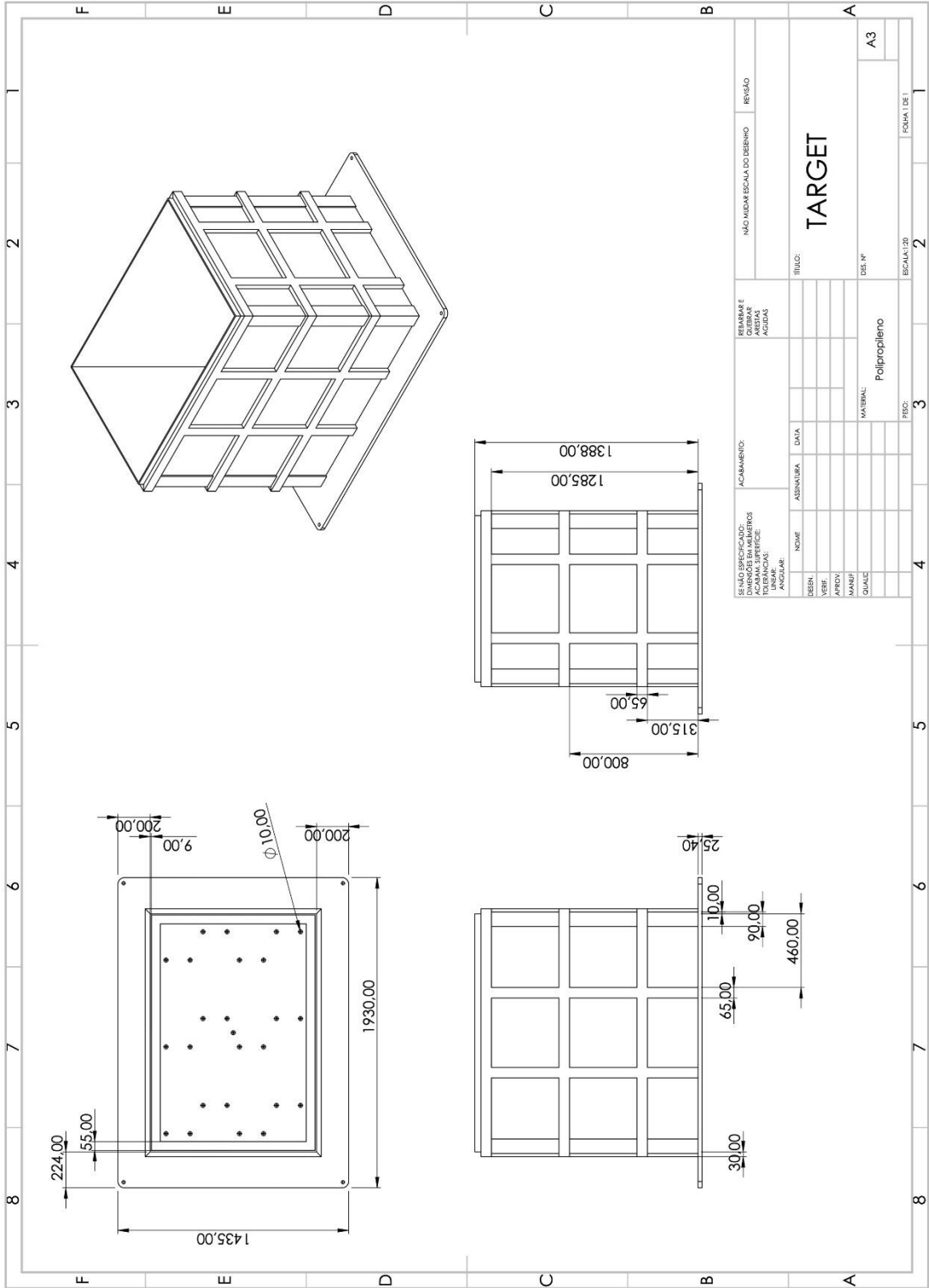
The Neutrinos Angra collaboration wishes to acknowledge Eletronuclear, for the support during the whole assembling process, and CNPq, CAPES, FAPERJ and FAPEMIG for financial support.

REFERENCES

- The Neutrinos Angra Collaboration. *V-Angra readout electronics and target detector assessment using a cosmic ray based trigger*. INSCIT, 2018.
- The Neutrinos Angra Collaboration. *Neutrinos Angra Experiment: Detector Status*. Encontro de Física – Sociedade Brasileira de Física, 2016.
- The Neutrinos Angra Collaboration. *Angra dos Reis reactor neutrino oscillation experiment*. Brazilian Journal of Physics, vol 36, 2006.

8. APÊNDICE B – Modelo e desenho do detector construído





9. ANEXO A – Desenho original do detector de neutrinos. Autor: Guilherme P. A. Magalhães (Apresentação realizada em 25 de agosto de 2011).



Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF)



Projeto Neutrinos Angra

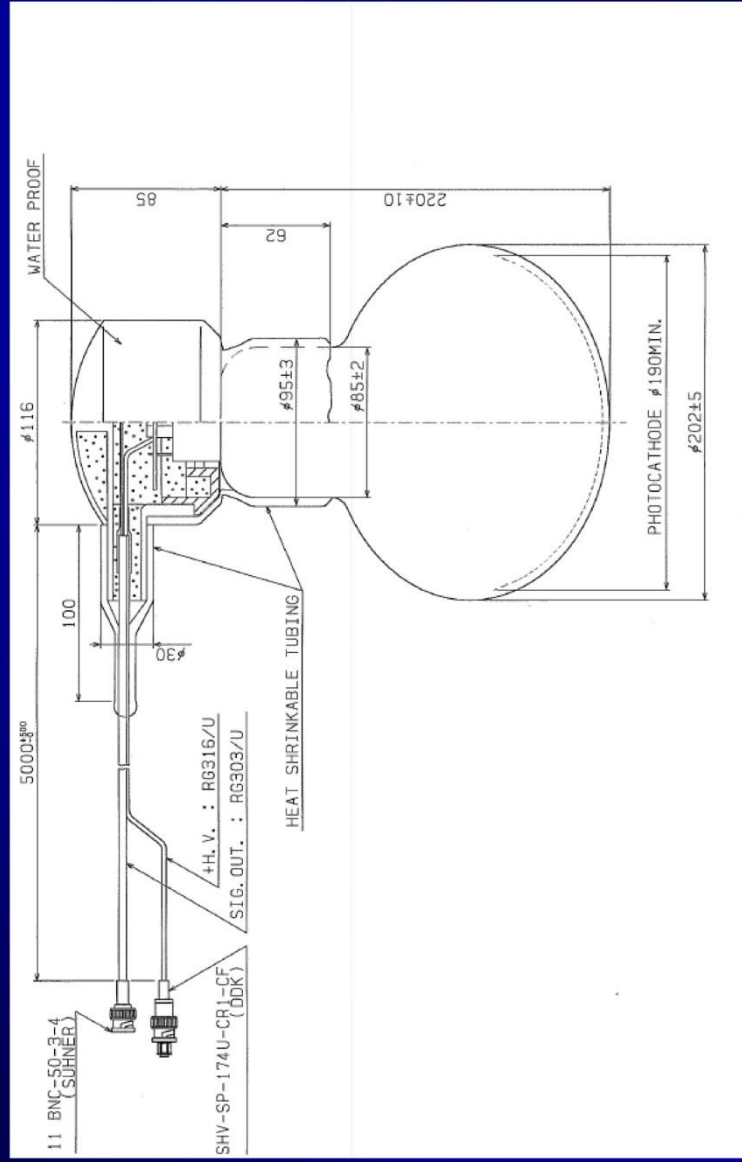
Desenho do detector de neutrinos

*Guilherme Pedroto de A. Magalhães
Rio de Janeiro, 25 de agosto 2011*

Índice

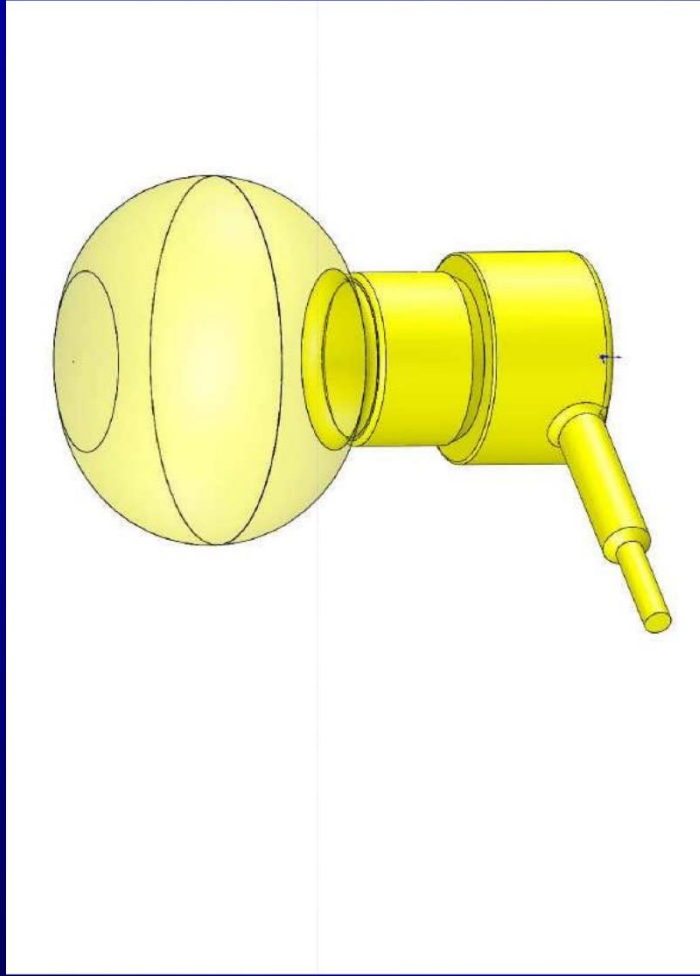
- As PMT's
- Fixação e orientação
- Protótipo
- Conjunto de Tanques
- Alvo
- Sistema de veto interno
- Blindagem
- Contêiner

PMT Hamamatsu R5912



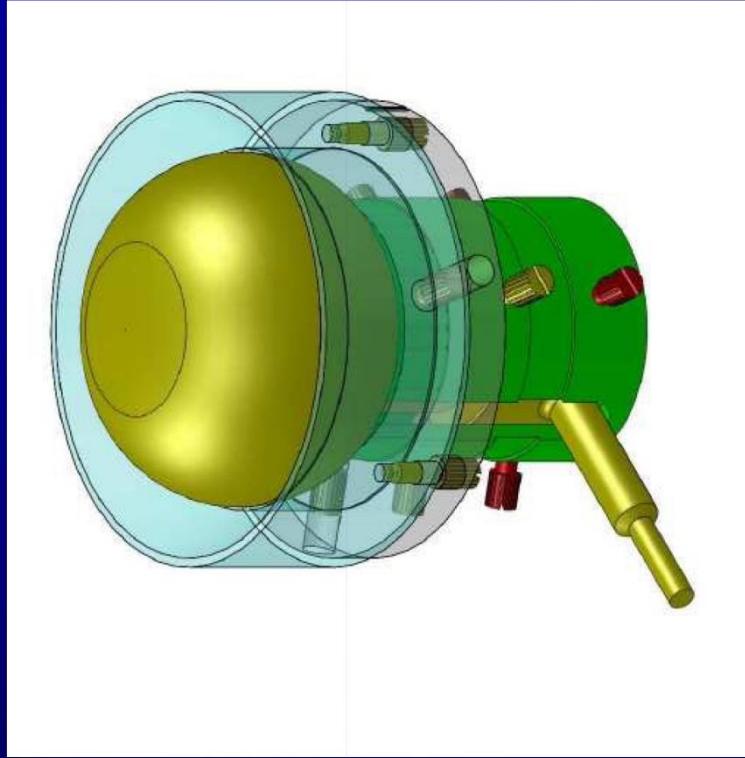
PMT R5912, water proof: Altura maxima 315mm

PMT Hamamatsu R5912



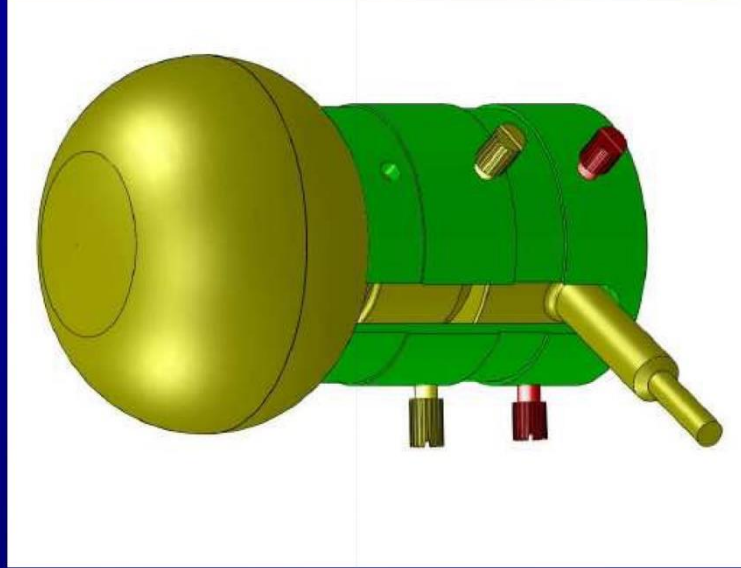
Modelagem da PMT R5912

Fixação das PMT's



Modelagem das 32 PMT's do alvo e bocal de fixação do refletor cônico

Fixação das PMT's



Modelagem da PMT do veto interno (base soldada)

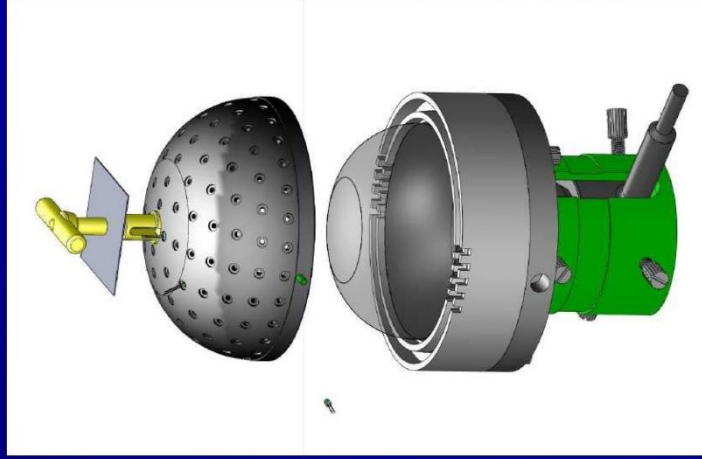
Fixação das PMT's



Protótipo do bocal

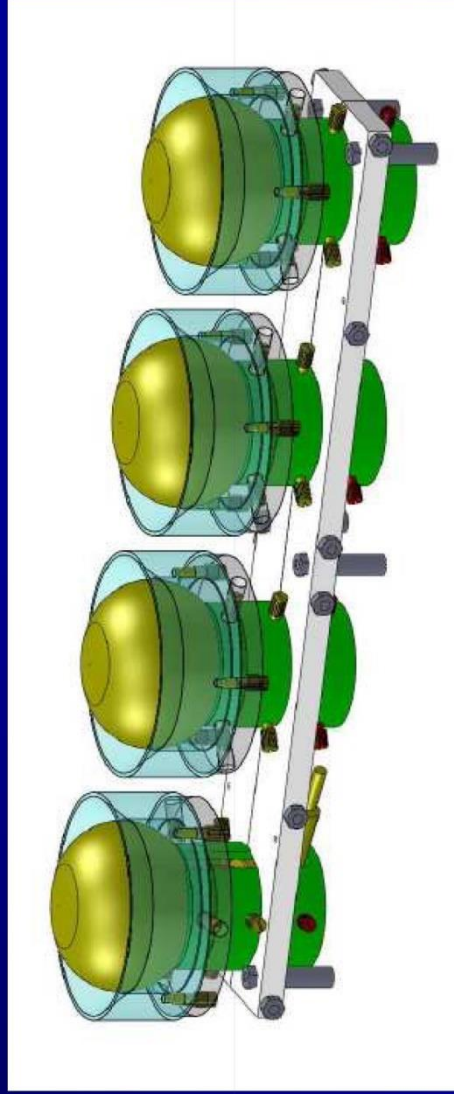
7

Fixação das PMT's



Instrumental para calibração e teste da PMT

Fixação das PMT's



Fixação com sistema de guilhotina

Calços soldados às pranchas

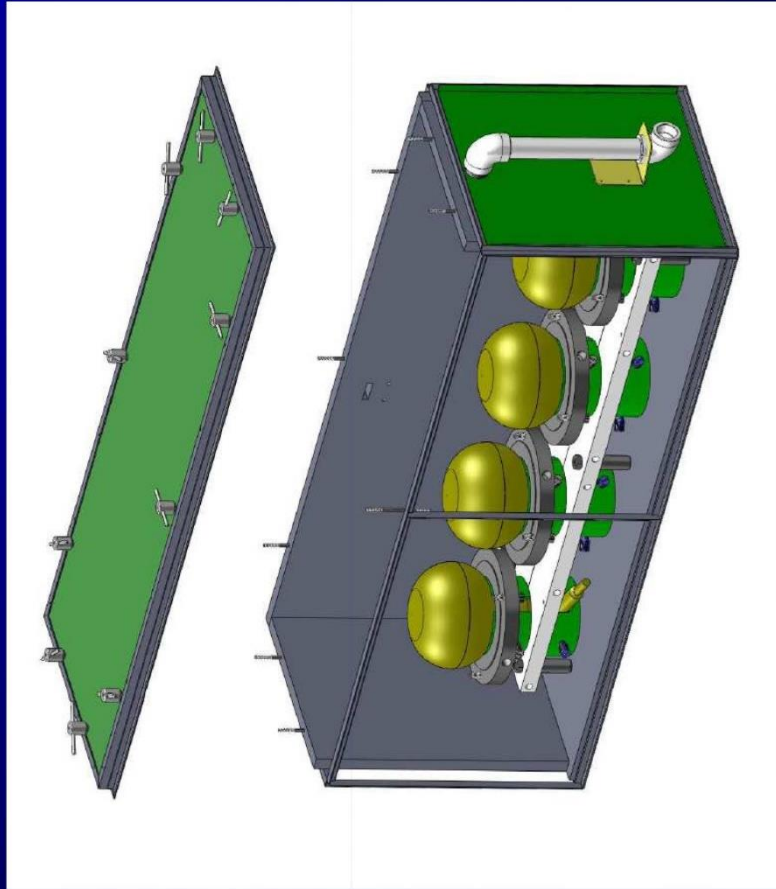
Fixação das PMT's



Fixação com sistema de guilhotina do protótipo

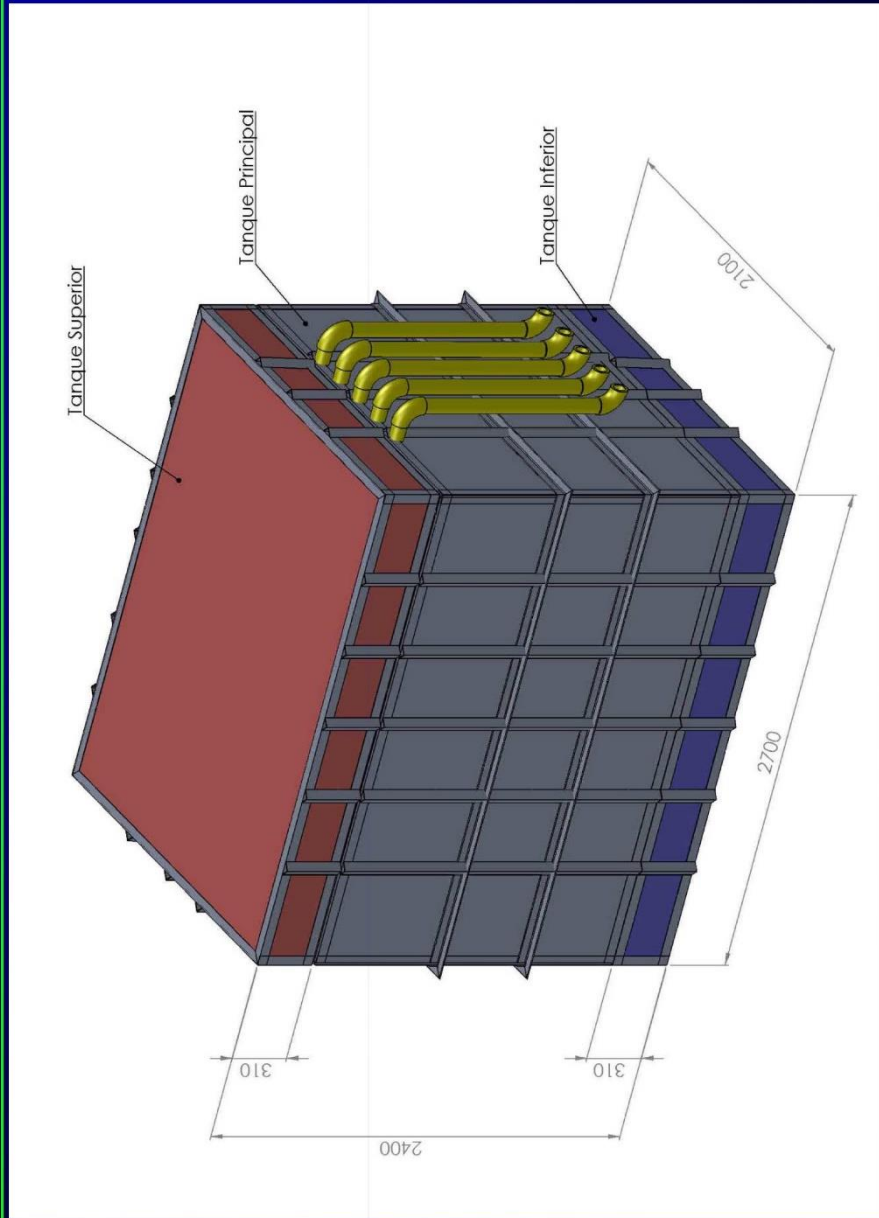
10

Protótipo

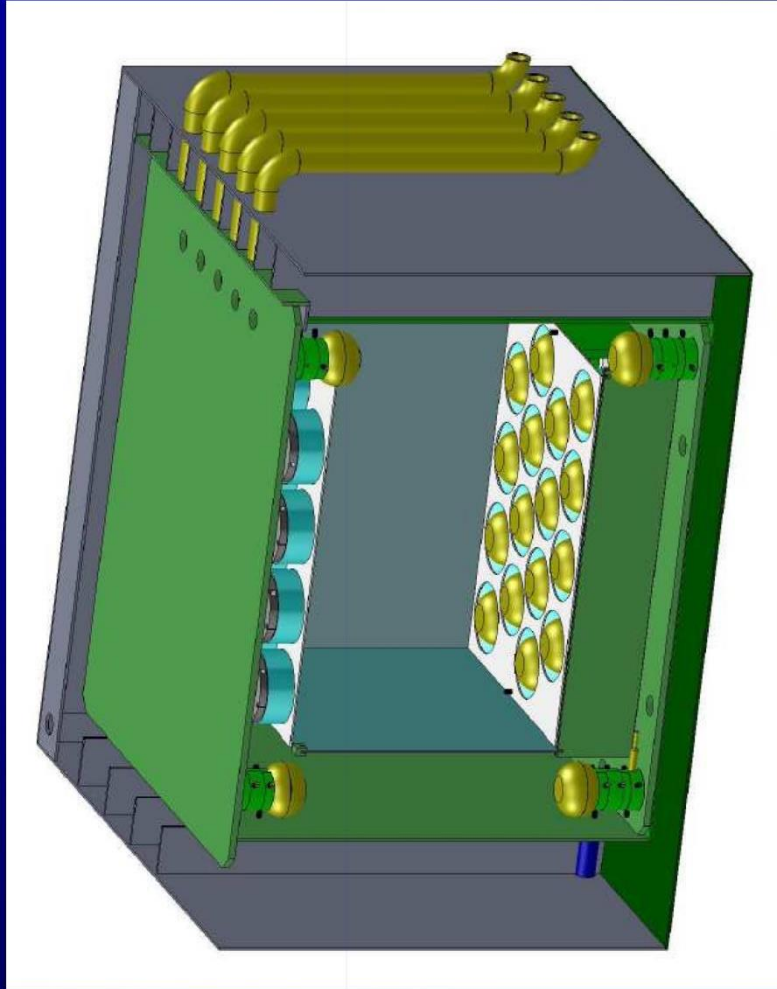


Protótipo para teste com 4 PMT's
1355x445x520mm³

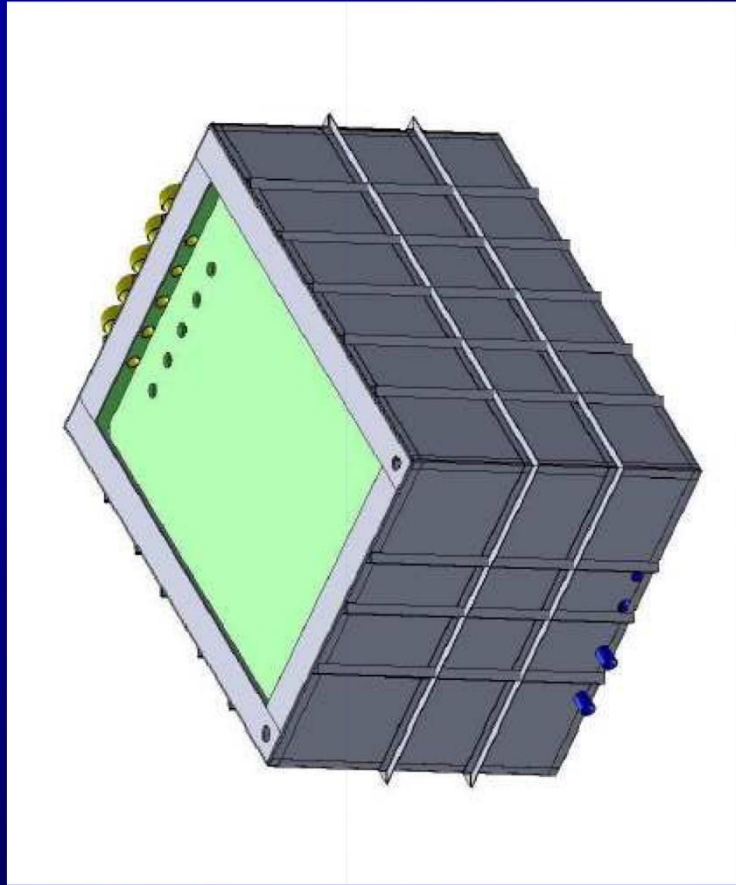
Conjunto de Tanques



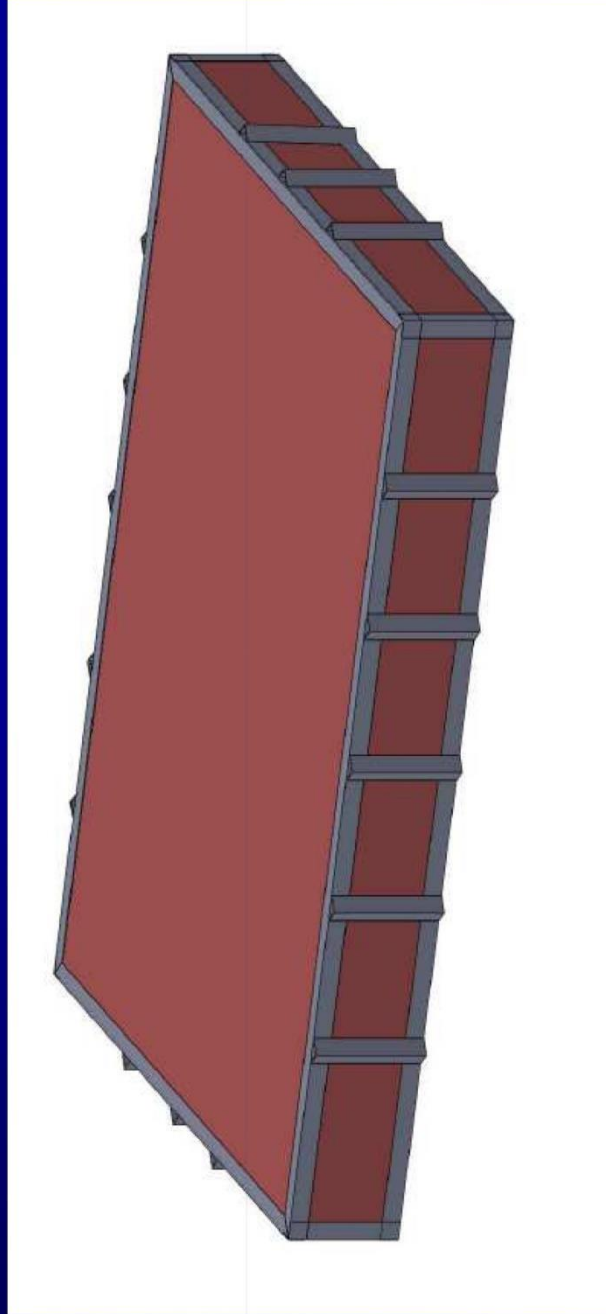
Tanque Principal



Tanque Principal



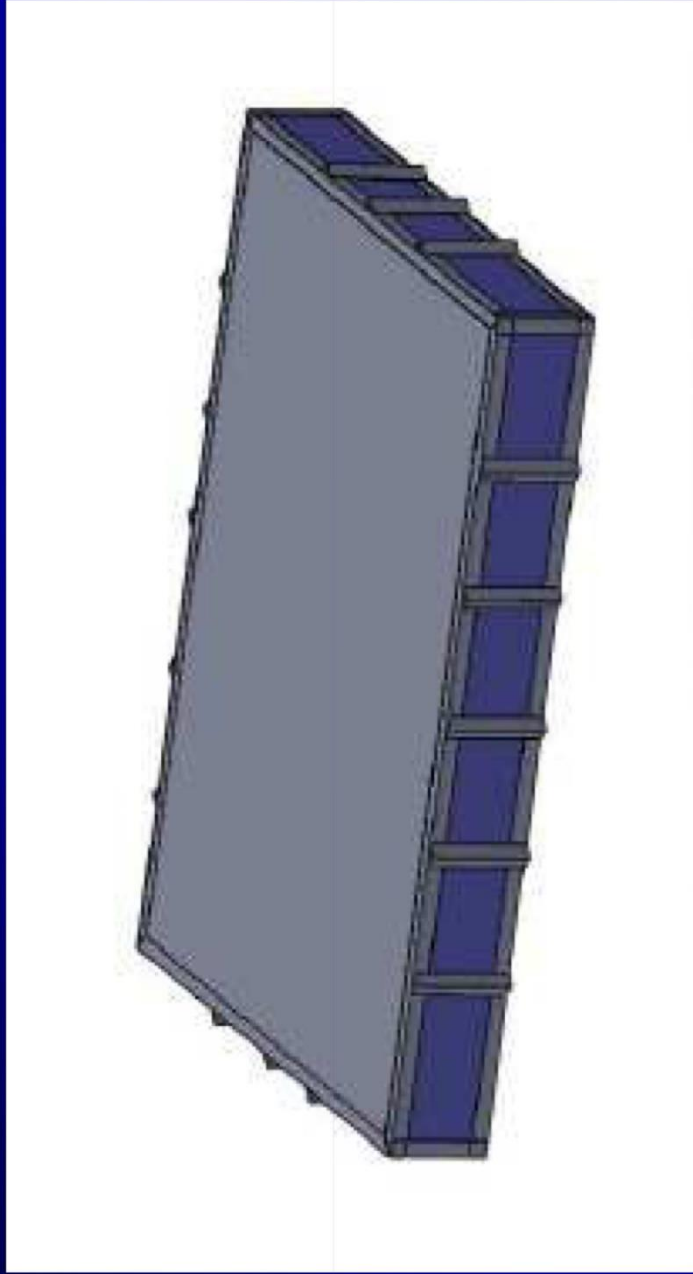
Tanque Superior



2700x2100x310mm³

15

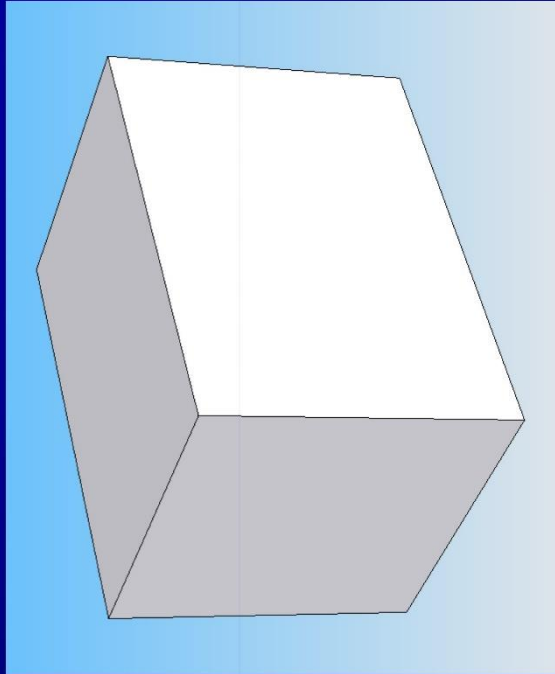
Tanque Inferior



2700x2100x310mm³

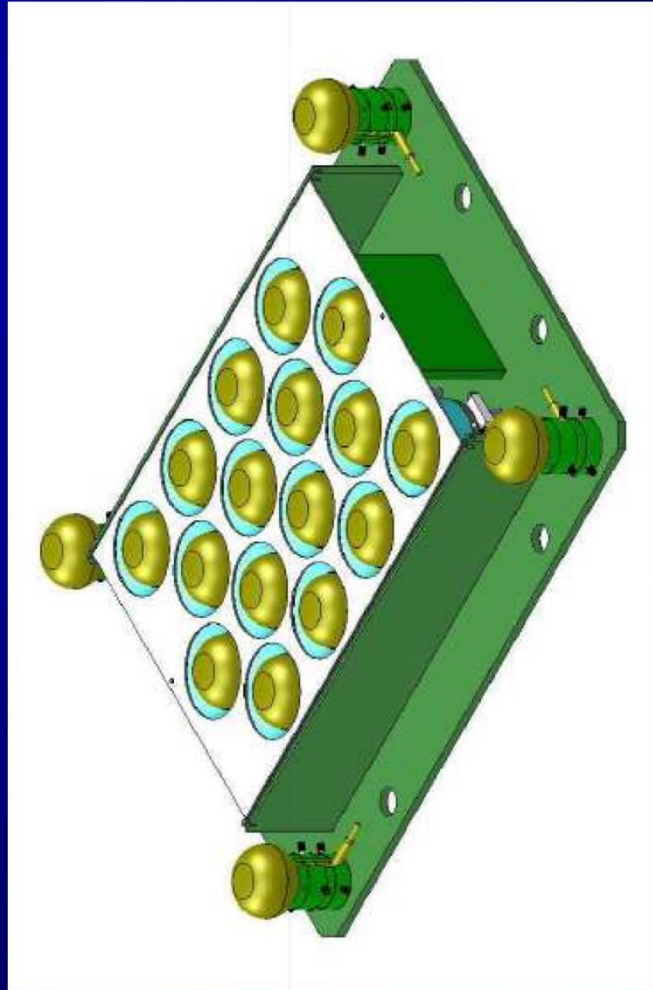
16

Volume inicial do alvo



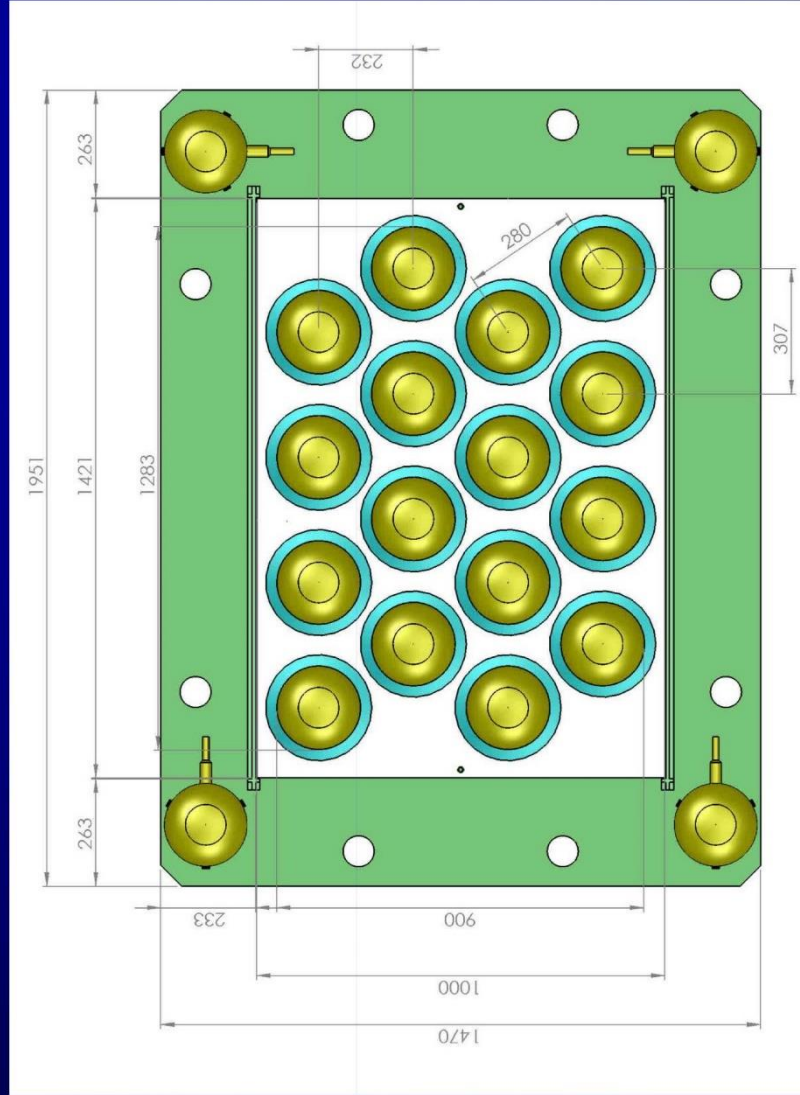
Alvo de 1.0368 Toneladas, dimensões: 1.28 x 0.9 x 0.9 m³

Prancha inferior



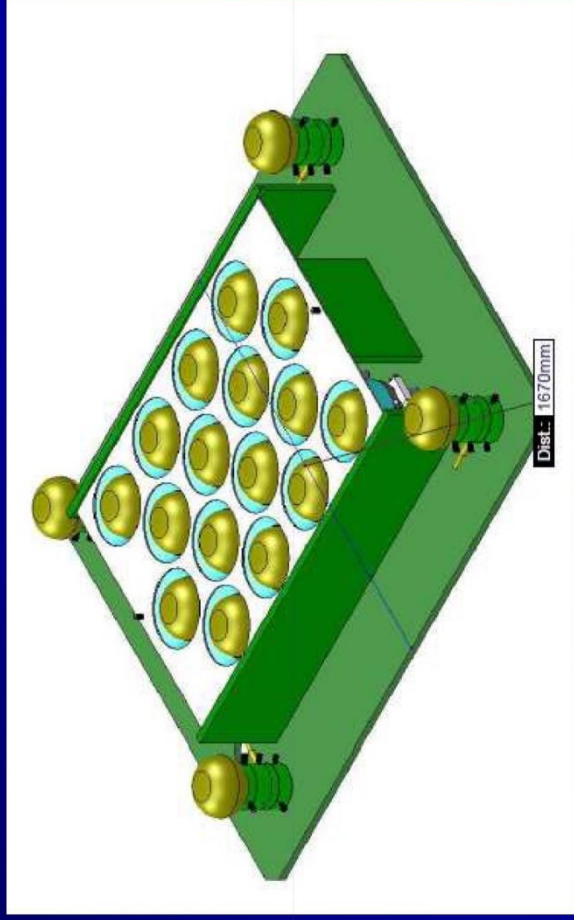
10

Prancha inferior / Veto interno



Superfície do Alvo: 900x1283 mm²

Prancha superior

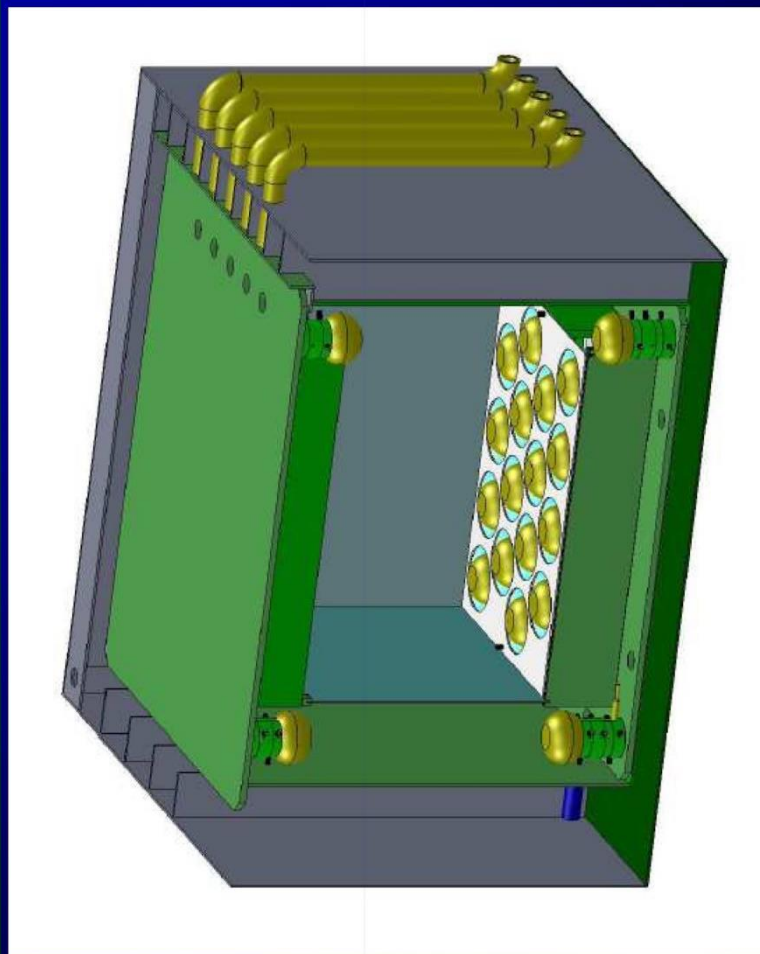


Semelhante à prancha inferior, porém mais larga e comprida para funcionar como tampa.

Superfície do Alvo: 900x1283 mm²

20

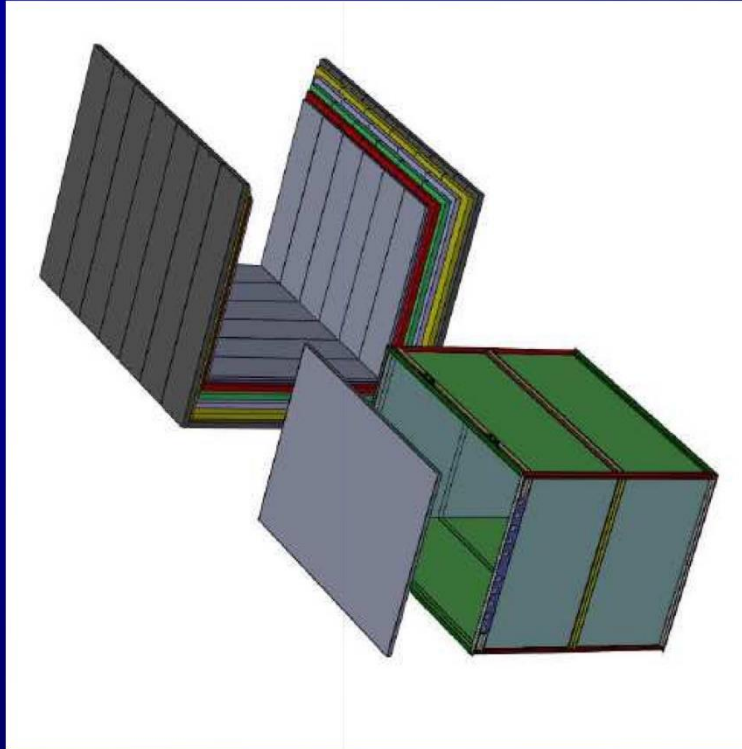
Tanque Principal



Altura do alvo: 936mm

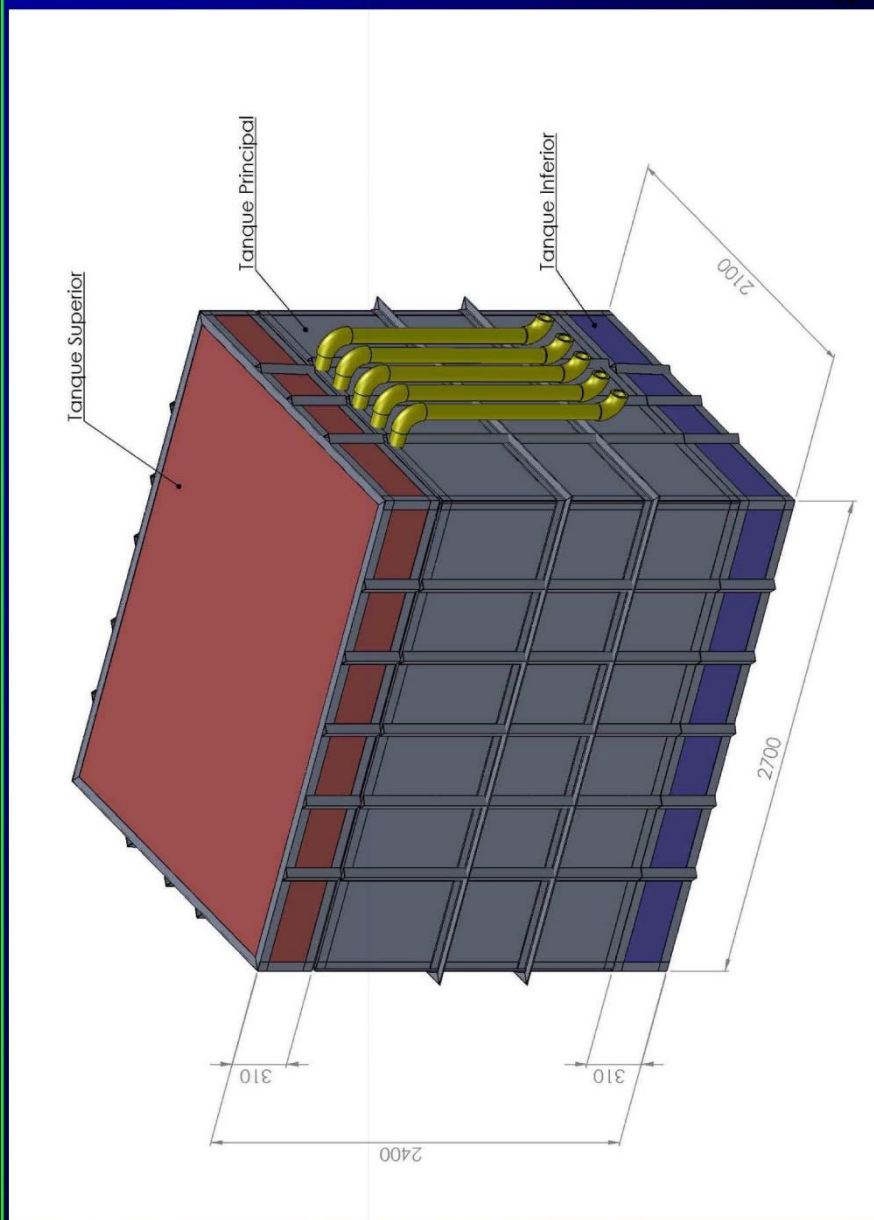
21

Blindagem

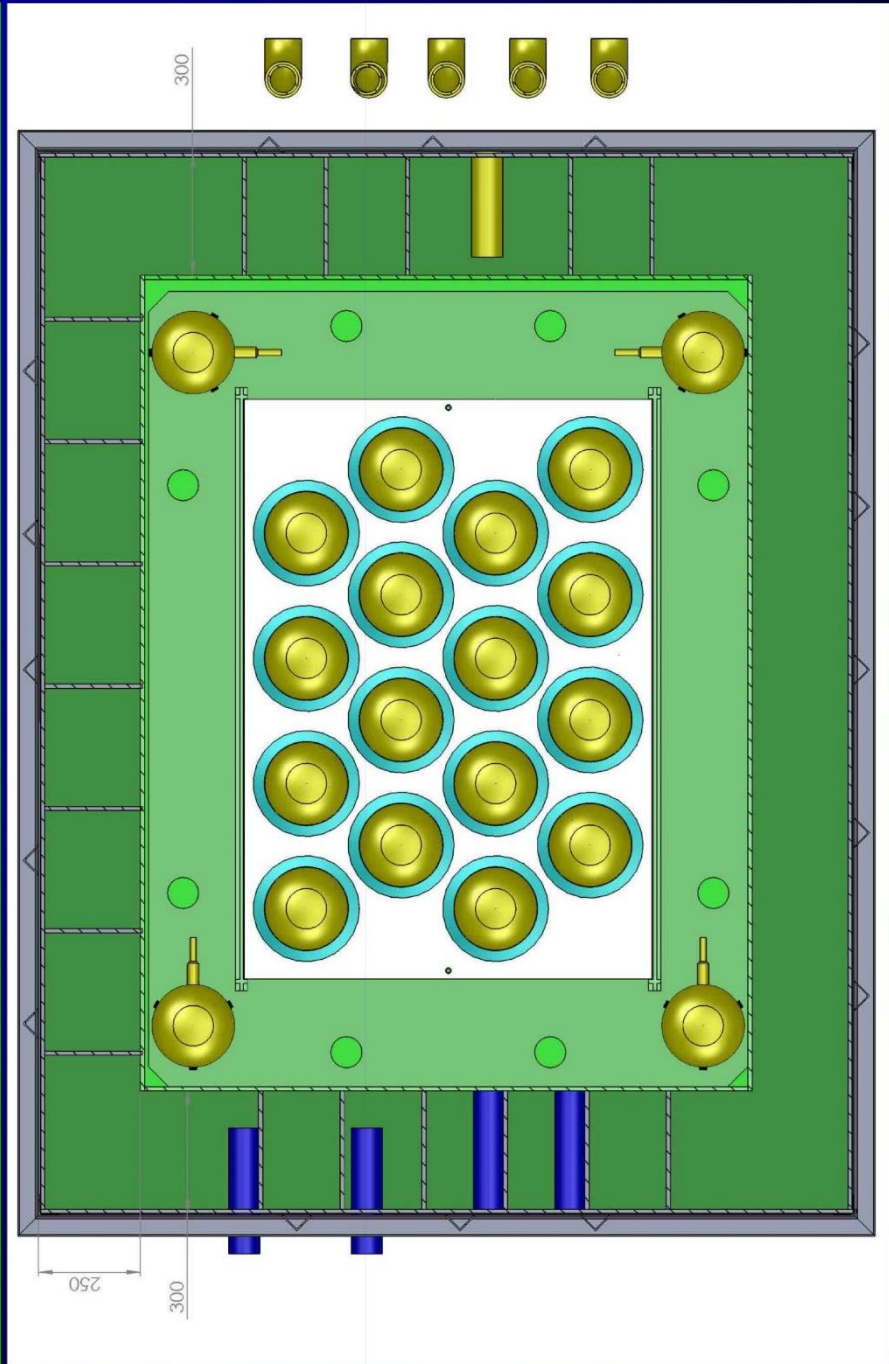


Blindagem antiga

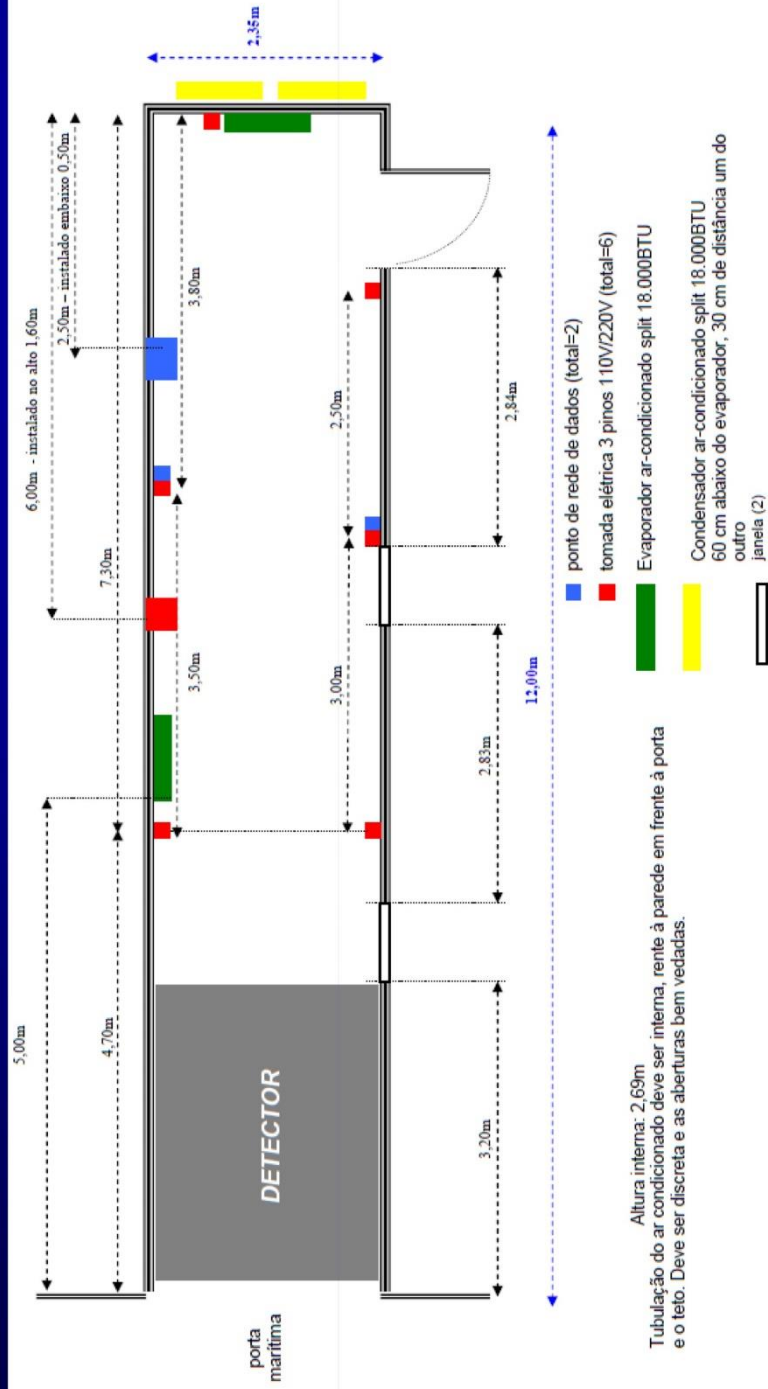
Blindagem do Conjunto de Tanques



Blindagem



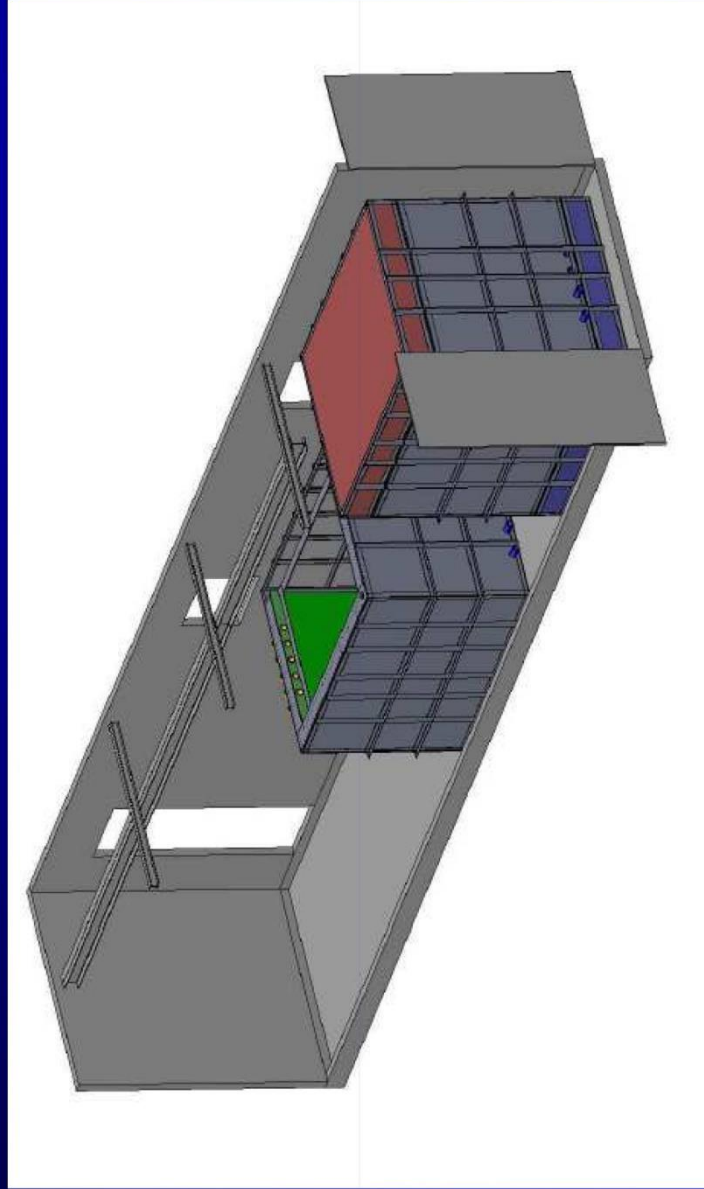
Contêiner HC 40



25

Relação entre contêiner e tanque

Contêiner

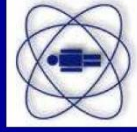


Posicionamento e área de montagem

26

OBRIGADO

Guilherme Pedoto de A. Magalhães

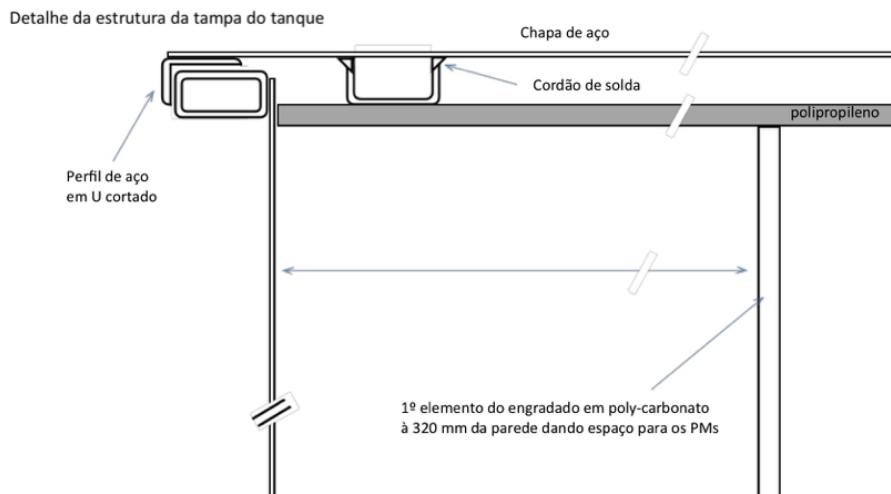
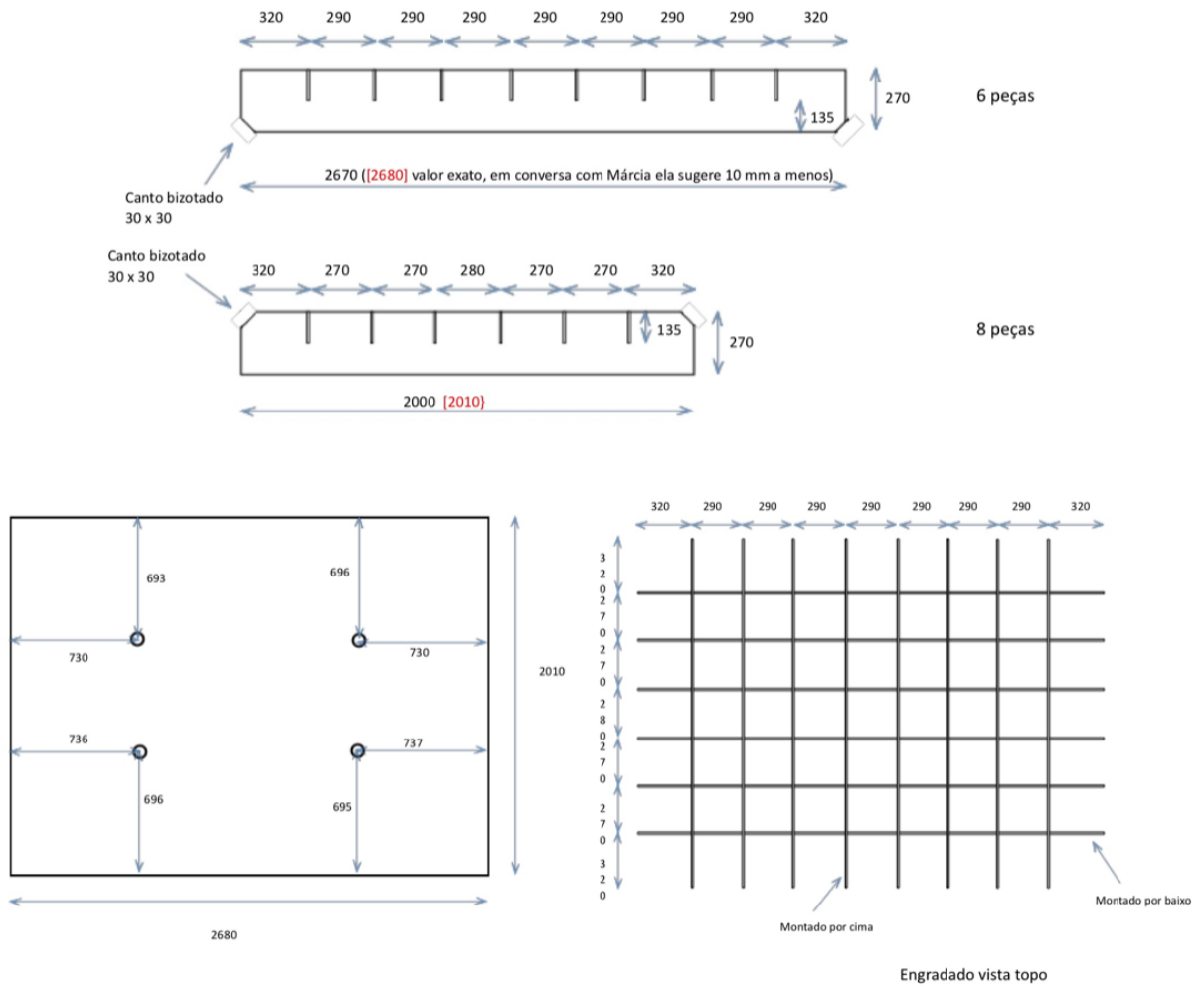


Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF)

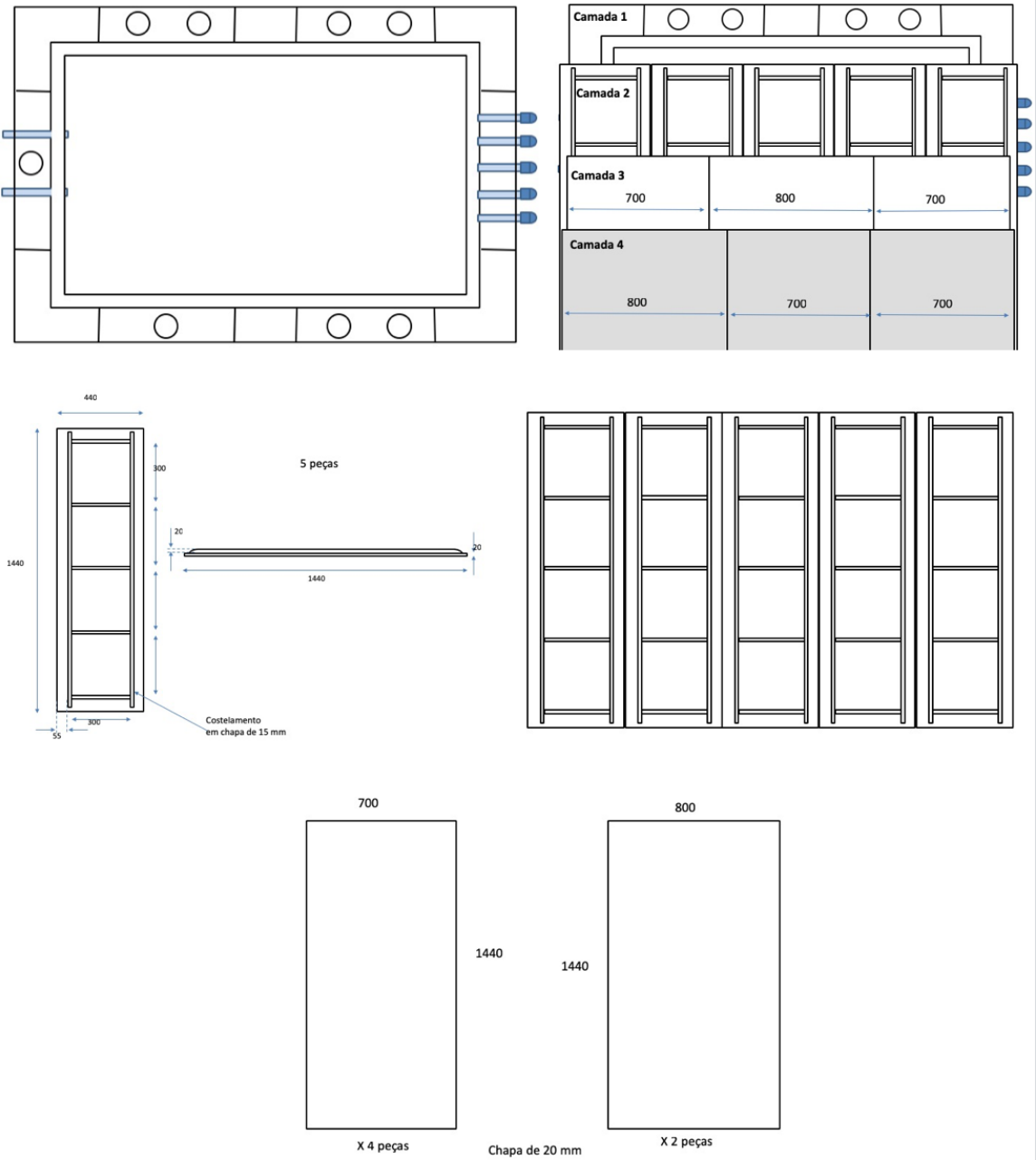


Projeto Neutrinos Angra

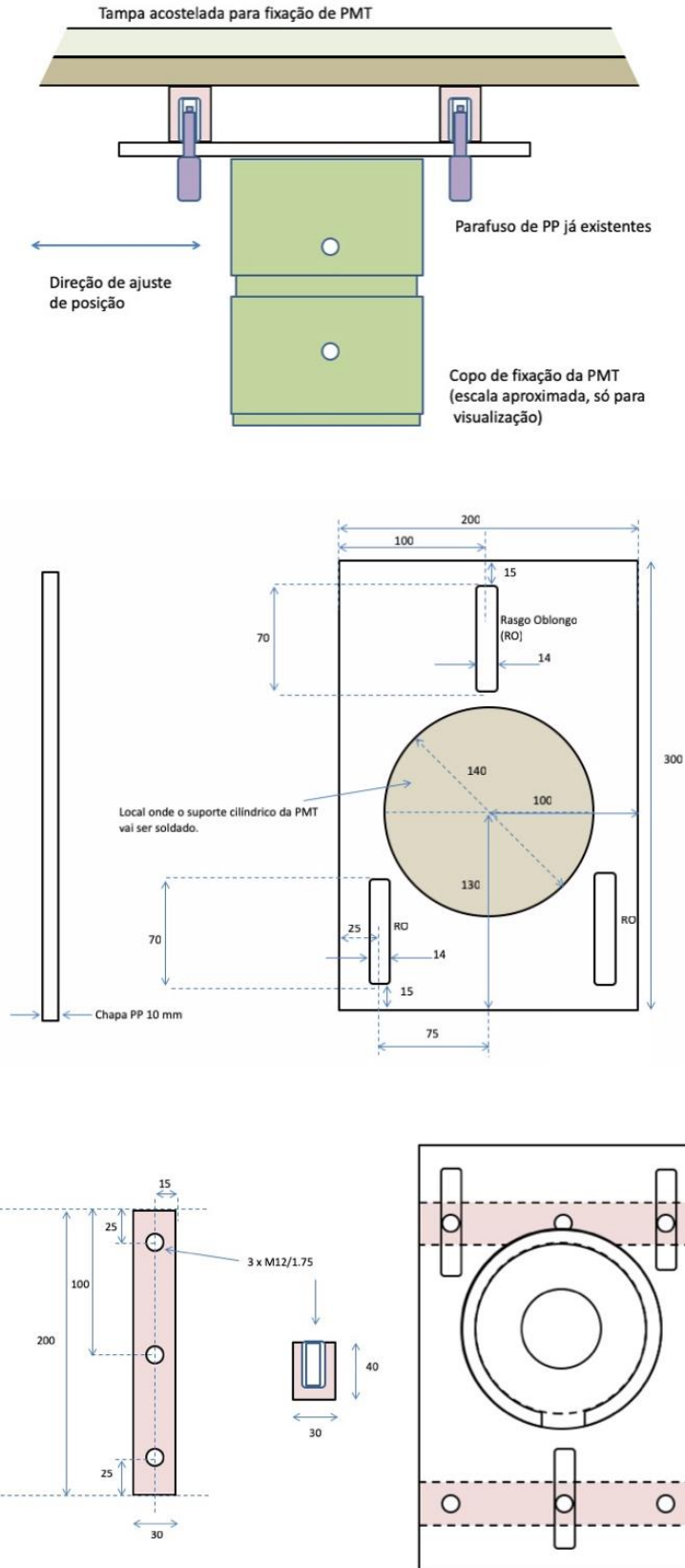
10. ANEXO B – Desenho do engradado para o veto inferior. Autor: Iuri M. Pepe.



11. ANEXO C – Desenho da tampa nova. Autor: Iuri M. Pepe.



12. ANEXO D – Desenho do novo suporte de PMT do veto lateral. Autor: Iuri M. Pepe.



**13.ANEXO E – Final Test Sheet das Fotomultiplicadoras R5912. Autor:
Hamamatsu Photonics.**

HAMAMATSU**FINAL TEST SHEET**JNO. 963878
PAGE 002 OF 002

PHOTOMULTIPLIER TUBE TYPE : R5912 ASSY (WP)

CUSTOMER : RICHARDSON ELECTRONICS QUANTITY : 24 pcs.

Serial Number	(5) Supply Voltage V	(6) P/V	(7) T. T. S ns	(8) Dark Counts s ⁻¹			
SD2758	1650	2.94	2.685	7100.0			
SD2759	1660	3.06	2.546	6900.0			
SD2762	1680	3.11	2.610	6800.0			
SD2763	1600	3.01	2.660	6600.0			
SD2770	1430	3.06	2.773	7100.0			
SD2772	1460	3.02	2.822	6900.0			
SD2774	1410	2.88	2.875	6600.0			
SD2777	1520	3.43	2.622	5800.0			
SD2778	1370	3.56	2.780	5900.0			
SD2779	1480	3.37	2.730	4600.0			
SD2782	1400	2.98	2.827	6800.0			
SD2784	1480	3.46	2.774	5100.0			
SD2785	1350	2.96	2.866	7200.0			
SD2786	1430	3.40	2.612	6800.0			
SD2787	1420	2.96	2.839	6100.0			
SD2789	1430	3.13	2.722	7200.0			
SD2790	1430	3.03	2.713	7500.0			
SD2791	1330	3.07	2.943	7100.0			
SD2792	1580	3.48	2.494	5800.0			
SD2794	1400	3.22	2.638	6900.0			
SD2801	1570	3.44	2.551	3600.0			
SD2804	1500	3.62	2.696	7600.0			
SD2805	1690	3.97	2.443	6200.0			
SD2806	1550	3.66	2.601	6500.0			

NOTES

- (5) Voltage to give a gain of 1×10^7 .
(6) P/V: Peak to Valley Ratio
(7) T. T. S: Transit Time Spread
(6) (7) (8) Supply voltage: Voltage in (5)

Date: MARCH 25, 2010

Approved by: *Yoshiki***HAMAMATSU**HAMAMATSU PHOTONICS K.K., Electron Tube Division
314-5, Shimokanzo, Iwata City, Shizuoka Pref., 438-0193, Japan, Telephone : (81)0539/62-5248, Fax : (81)0539/62-2205

HAMAMATSU**FINAL TEST SHEET**JNO. 641097
PAGE 002 OF 002

PHOTOMULTIPLIER TUBE

TYPE : R5912 ASSY (WP)

CUSTOMER : RICHARDSON ELECTRONICS

QUANTITY : 20 pcs.

Serial Number	(5) Supply Voltage V	(6) P/V	(7) T. T. S ns	(8) Dark Counts s ⁻¹			
SD2771	1340	3.46	2.746	7300.0			
SD2836	1570	3.02	2.615	4100.0			
SD2837	1700	2.75	2.492	4600.0			
SD2840	1640	3.58	2.517	5100.0			
SD2841	1680	3.59	2.525	4600.0			
SD2842	1620	3.16	2.567	5800.0			
SD2843	1650	2.89	2.604	3600.0			
SD2844	1700	2.67	2.571	4200.0			
SD2845	1600	2.75	2.603	4700.0			
SD2846	1510	4.05	2.734	5200.0			
SD2847	1540	2.99	2.890	5300.0			
SD2848	1560	3.26	2.801	4300.0			
SD2849	1450	3.38	2.894	6200.0			
SD2850	1510	3.54	2.749	5800.0			
SD2851	1500	3.38	2.894	5500.0			
SD2852	1510	3.49	2.719	5100.0			
SD2854	1480	3.17	2.899	6200.0			
SD2855	1470	3.52	2.798	6600.0			
SD2856	1540	3.87	2.759	5000.0			
SD2857	1530	3.10	2.719	5600.0			

NOTES

- (5) Voltage to give a gain of 1×10^7 .
 (6) P/V: Peak to Valley Ratio
 (7) T. T. S: Transit Time Spread
 (6) (7) (8) Supply voltage: Voltage in (5)

Date: DECEMBER 22, 2010

Approved by : *Y. Yoshida***HAMAMATSU**HAMAMATSU PHOTONICS K.K., Electron Tube Division
314-5, Shimokanzo, Iwata City, Shizuoka Pref., 438-0193, Japan, Telephone : (81)0539/62-5248, Fax : (81)0539/62-2205

HAMAMATSU

FINAL TEST SHEET

JNO. 764119
PAGE 002 OF 002

PHOTOMULTIPLIER TUBE

TYPE : R5912 ASSY-D10

CUSTOMER : RICHARDSON ELECTRONICS

QUANTITY : 4 pcs.

Serial Number	(5) Supply Voltage V	(6) P/V	(7) T. T. S ns	(8) Dark Counts s ⁻¹			
SD2968	1590	3.26	2.460	7100.0			
SD2975	1580	3.27	2.497	5400.0			
ZS0056	1670	3.47	2.592	1500.0			
ZS0057	1570	3.14	2.409	1800.0			

NOTES

- (5) Voltage to give a gain of 1×10^7 .
- (6) P/V: Peak to Valley Ratio
- (7) T. T. S: Transit Time Spread
- (6) (7) (8) Supply voltage: Voltage in (5)

Date: FEBRUARY 14, 2013

Approved by : *Yoshiki*

HAMAMATSU

HAMAMATSU PHOTONICS K.K., Electron Tube Division
314-5, Shimokanzo, Iwata City, Shizuoka Pref., 438-0193, Japan, Telephone : (81)0539-62-5248, Fax : (81)0539-62-2205