

MARCELO ASSIS DE FARIA RIBEIRO

**VALIDAÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO
COMPUTACIONAL DO EXPERIMENTO NEUTRINOS
ANGRA**

Poços de Caldas/MG

2017

MARCELO ASSIS DE FARIA RIBEIRO

**VALIDAÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO COMPUTACIONAL
DO EXPERIMENTO NEUTRINOS ANGRA**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Física pelo Programa de Pós Graduação em Física da Universidade Federal de Alfenas *campus* Poços de Caldas. Área de concentração: Física de Partículas e Campos.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo do Amaral Valdiviesso.

Poços de Caldas/MG

2017

R484v Ribeiro, Marcelo Assis de Faria.

Validação do modelo geométrico computacional do Experimento Neutrinos Angra / Marcelo Assis de Faria Ribeiro. – Poços de Caldas, 2017.

182 f. –

Orientador: Gustavo do Amaral Valdivieso.

Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2017.

Bibliografia.

1. Interações de neutrinos. 2. Geometria computacional. 3. Não-proliferação nuclear. I. Valdivieso, Gustavo do Amaral. II. Título.

CDD: 539.7215


MARCELO ASSIS DE FARIA RIBEIRO

VALIDAÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO COMPUTACIONAL DO EXPERIMENTO NEUTRINOS ANGRA

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Física pelo Programa de Pós Graduação em Física da Universidade Federal de Alfenas *campus* Poços de Caldas. Área de concentração: Física de Partículas e Campos.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo do Amaral Valdiviesso.

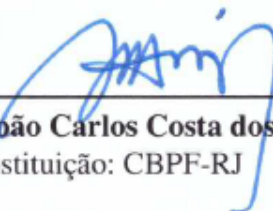
Trabalho aprovado. Poços de Caldas/MG, 08 de Setembro de 2017.



Prof. Dr. Gustavo do Amaral Valdiviesso
Orientador



Prof. Dr. Fernando Gonçalves Gardim
Instituição: UNIFAL-MG



Prof. Dr. João Carlos Costa dos Anjos
Instituição: CBPF-RJ

Poços de Caldas/MG

2017

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*

AGRADECIMENTOS

À Deus: minha força e vitória!

À minha esposa Núbia e filha Maria Rita, pelo apoio e compreensão.

Aos meus pais, Joel e Marilena, pelo carinho, afeto e dom da vida.

Aos meus irmãos Leandro e Sílvia, por acreditarem na minha capacidade.

Ao meu grande amigo Pe. Juliano, que por diversas vezes me acolheu em sua casa em Poços de Caldas.

Ao meu orientador Prof. Gustavo Valdiviesso pela oportunidade e pelo intangível repasse de conhecimento. À sua esposa Prof. Renata Piacentini, por me receber em casa até quando estavam em férias.

À todos meus colegas e amigos de Furnas Centrais Elétricas. De maneira especial, ao grupo de Padrões Primários de Eletricidade: Delayne, Elenice, Ivair, Michelle, Ricardo Fernandes, Thiago, Wilma e estagiários. Aos gerentes: Jorge Teles, Heron Galinari e Hamilton Batista. Muito obrigado! Sem o apoio de vocês, não seria possível.

Aos professores do Programa de Pós graduação em Física.

Aos meus colegas de mestrado, pela amizade e companheirismo.

À todos os funcionários da Unifal de Alfenas e Poços de Caldas.

Finalmente, meus sinceros agradecimentos a todos que me ajudaram direta ou indiretamente na concretização de mais este sonho.

*Sê humilde para evitar o orgulho,
mas voa alto para alcançar a sabedoria.
(Santo Agostinho)*

RESUMO

Em 1977, Mikaelyan propôs que a taxa de detecção de antineutrinos do reator de uma usina nuclear daria uma medida da energia produzida pelo reator, devido a proporcionalidade entre o número de antineutrinos e o número de fissões. Mostrou também que a forma do espectro destas partículas poderia fornecer informações sobre a composição isotópica no combustível nuclear durante sua queima. Esta descoberta elevou o neutrino do *status* de “partícula fantasma” para a condição de “pedra angular” na física de partículas. Estudos relacionados ao neutrino estão na vanguarda tecnológica especialmente quando se trata de salvaguardas nucleares – tema que atende aos propósitos do programa da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) de desenvolvimento de novas técnicas para controle da não-proliferação de armas nucleares. O Experimento Neutrinos Angra apresenta a particularidade de ser uma experiência realizada em um *container* colocado fora do edifício do reator, na superfície, com o detector Cherenkov de antineutrinos à base de água dopada com gadolínio sujeito ao ruído de raios cósmicos existentes ao nível do mar. Neste trabalho, realizamos uma simulação computacional para verificar as possibilidades de subtrair esses ruídos, com a menor perda de informação possível e extrair o sinal de antineutrinos, monitorando assim o funcionamento do reator. Também será realizada a atualização do modelo geométrico computacional do detector, bem como a simulação para validar esta nova geometria.

Palavras-chave: Neutrinos Angra. Modelo Geométrico Computacional. Salvaguarda Nuclear.

ABSTRACT

In 1977, Mikaelian proposed that the detection rate of antineutrino reactor of a nuclear power plant of a measure of the energy produced by the reactor, due to the proportionality between the number of antineutrino and the number of fissions. It also showed that the shape of the spectrum of these particles could provide information on the isotopic composition of the nuclear fuel during its burning. This discovery raised the neutrino status of "ghost particles" to the condition of "cornerstone" in particle physics. Studies related to neutrino are cutting edge technology especially when it comes to nuclear safeguards - a theme that serves the purposes of the International Atomic Energy Agency program (IAEA) to develop new techniques for control of non-proliferation of nuclear weapons. The Neutrino Project Angra has the distinction of being an experiment in a container placed outside the reactor building, on the surface, with the Cherenkov detector antineutrinos water-based doped with gadolinium subject to noise existing cosmic rays at sea level. In this work a computer simulation to verify the possibilities of removing these noises, with the least possible loss of information and extract the antineutrinos signal, thereby monitoring the operation of the reactor. It will also be performed to update the computational geometric model of the detector as well as the simulation to validate this new geometry.

Keywords: Neutrinos Angra. Geometric Model Computational. Nuclear Safeguards.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Decaimento β . O nêutron decai em um próton, um elétron e antineutrino eletrônico através da partícula mediadora da força fraca, o bóson W^-	27
Figura 2 –	Decaimento β Inverso no interior do detector. A figura mostra também os principais fenômenos físicos após o decaimento β Inverso. O sinal imediato ou <i>prompt</i> , ocorre quando o pósitron emite radiação por estar com velocidade maior que a da luz no meio e energia acima do limiar de Cherenkov. O sinal atrasado ou <i>delayed</i> é caracterizado pela emissão de raios gama pelo gadolínio após ter sido excitado pela captura do nêutron. Ocorre também a aniquilação e produção de pares elétron-pósitron, Efeito Compton e Efeito Fotoelétrico.	28
Figura 3 –	A linha pontilhada que decai exponencialmente mostra a forma do espectro de energia de neutrinos (unidade arbitrária) via decaimento β -Inverso. A linha pontilhada da seção de choque representa a probabilidade do antineutrino interagir com os prótons do alvo do detector. A linha sólida descreve a interação dos neutrinos com alvo do detector em função fluxo e da energia.	30
Figura 4 –	Cone da Radiação Cherenkov.	34
Figura 5 –	Ilustração do princípio de funcionamento de um tubo fotomultiplicador à vácuo (efeito cascata).	36
Figura 6 –	Tubo Fotomultiplicador do fabricante Hamamatsu modelo R5912.	37
Figura 7 –	Ganho típico da PMT declarado pelo fabricante Hamamatsu modelo R5912.	37
Figura 8 –	Gráfico de tensão elétrica por tempo de um sinal médio proveniente da PMT, aproximado por uma Gaussiana, evidenciando a perda da informação quando o sistema de aquisição de dados tem frequência de 125 MHz e largura à meia altura (FWHM) de 4 ns.	39
Figura 9 –	Esquema Eletrônico do Sistema de Aquisição de Dados Analógico - Parte 1.	40
Figura 10 –	Esquema Eletrônico do Sistema de Aquisição de Dados Analógico - Parte 2.	41
Figura 11 –	Primeiro estágio do circuito de <i>Front-end</i>	41
Figura 12 –	Segundo estágio do circuito de <i>Front-end</i>	42
Figura 13 –	Terceiro estágio do circuito de <i>Front-end</i>	42
Figura 14 –	Quarto estágio do circuito de <i>Front-end</i>	43

Figura 15 – Mix dos estágios do circuito de <i>Front-end</i>	43
Figura 16 – Carga de entrada em função do pico da amplitude medida para três ganhos diferentes.	44
Figura 17 – Carga de entrada em função do pico da amplitude medida para três ganhos diferentes.	44
Figura 18 – Gráfico ilustra um exemplo da parcela de cada elemento físsil durante processo de queima gradual de um combustível nuclear ao longo do tempo. . .	45
Figura 19 – Diferença de tempo entre o sinal imediato e atrasado. Temos uma probabilidade de 95% de encontrar um evento de neutrino para um concentração de 0,3% de sal de gadolínio (ou seja, 99,7% do alvo é composto por água e 0,3% em massa de sal de gadolínio) entre 0 e 30 μ s. No entanto, pode ser considerado um intervalo de tempo de até 50 μ s sem prejudicar a identificação do evento.	47
Figura 20 – Sinal Background após aplicação da regra S1 = Selection1 + TimeSelection1. Estão representadas as frequência de pulsos de p.e. (em janelas de 512 ns) de <i>Background</i> e $\bar{\nu}_e$ no alvo do detector. A taxa média total de 1,5 kHz caiu para 36 Hz. S1 foi mais eficiente para filtrar a componente de <i>background</i> relacionada aos múons.	50
Figura 21 – Quantidade de fotoelétrons produzidos por múons cósmicos.	51
Figura 22 – Distribuição de fotoelétrons produzidos por um pósitron. Sinal de Energia Imediato. Nota-se que a grande maioria dos sinais oriundos do pósitron e do nêutron situam-se no <i>range</i> de energia até 200 p.e.	51
Figura 23 – Distribuição de fotoelétrons produzidos por um nêutron. Sinal de Energia Atrasado. Nota-se que a grande maioria dos sinais oriundos do pósitron e do nêutron situam-se no <i>range</i> de energia até 200 p.e.	52
Figura 24 – Algumas dimensões do detector de antineutrinos do Experimento Neutrinos Angra tiradas no CBPF-RJ.	54
Figura 25 – Estrutura geral do GDML.	55
Figura 26 – PMT's do alvo central do detector. Para efeito de simulação computacional, apenas compõem o alvo central, as abóbodas dos hemisférios superiores das PMT's.	58

Figura 27 – Alvo central do detector construído a base de polipropileno, em verde. As abóbodas inferiores e as bases das PMT's são destacadas em vermelho.	58
Figura 28 – O sistema de veto interno possui 8 PMT's, confeccionado em polipropileno e preenchido com água destilada. Diminuir o ruído de fundo, especialmente de nêutrons cósmicos, é a principal função desta blindagem interna que reveste o alvo.	59
Figura 29 – O sistema de blindagem externa ou <i>shield</i> não possui PMT's. Ele é construído de polipropileno revestido com um reforço mecânico em aço e preenchido com água. A principal função desta blindagem externa é auxiliar a blindagem interna a diminuir o ruído de fundo e também vetar ruído de baixa energia como a radiação natural.	60
Figura 30 – O veto inferior destacado em vermelho possui 4 PMT's localizadas no centro de cada lado. Como o <i>Shield</i> , os vetos são construído a base de polipropileno, revestidos com um reforço mecânico em aço e preenchidos com água. O sistema auxilia na exclusão de eventos falsos.	60
Figura 31 – O veto superior possui 4 PMT's localizadas no centro de cada lado do tanque. É construído de polipropileno revestido com um reforço mecânico em aço e preenchido com água. Analogamente aos demais sistemas de veto, auxilia na separação entre o ruído e do evento de interesse.	61
Figura 32 – Detector de partículas do Experimento Neutrinos Angra.	62
Figura 33 – Este gráfico representa a contagem de 67430 pulsos observados a partir da simulação de 70 mil antineutrinos. A linha vermelha é o tempo do primeiro <i>hit</i> . A linha azul representa o tempo do último <i>hit</i> . O primeiro <i>hit</i> é uma boa aproximação do tempo que ocorre o sinal <i>prompt</i> produzido pelo pósitron e o último <i>hit</i> é uma aproximação do sinal <i>delayed</i> . Na média, o intervalo de tempo entre os dois sinais foi de $(9,154 \pm 0,022) \mu s$	68
Figura 34 – Gráfico de 3 curvas de nível do números total de <i>hits</i> contabilizados pelas PMT's do alvo em função do tempo.	69

- Figura 35 – Este gráfico separa em grupos, os últimos fótons em função do tempo final com que estes acontecem. Como exemplo, vamos tomar o retângulo de cor laranja na origem do gráfico. Ele nos mostra que a aproximadamente $0,9 \times 270$ pulsos de um total de 67430 eventos com tempo final menores que $1 \mu s$ produziram em torno de 10 *hits* nas PMT's do alvo. 70
- Figura 36 – Histograma de eventos sem cortes de eventos no alvo do detector de antineutrinos em função do tempo para uma concentração de 0,3% de cloreto de gadolínio. A constante de normalização é de 3165 pulsos ou eventos de antineutrinos e a resolução é de $0,5 \mu s$ para um total de 67430 eventos observados. Por exemplo, o número total de pulsos no intervalo de de 9,5 e $10 \mu s$ (pico do histograma) é de 3165. O número total de pulsos de 67430 pulsos é dado pela somatória dos produtos da áreas dos retângulos formados no histograma. A base de cada retângulo é igual a uma resolução de $0,5 \mu s$ e a altura igual a quantidade de pulsos correspondente. A diferença de tempo média entre os sinais *prompt* e *delayed* é de $(9,80 \pm 0,02) \mu s$ 71
- Figura 37 – Simulação do tempo de termalização dos nêutrons no processo de decaimento β Inverso em função da concentração percentual de cloreto de gadolínio no alvo do detector de antineutrinos. Para a concentração de 0,3% em massa de cloreto de gadolínio, o tempo médio de captura é de aproximadamente $9 \mu s$. 72
- Figura 38 – O histograma representa uma comparativo entre a eficiência de cada critério de seleção de eventos em função do tempo de termalização do nêutron e captura pelo cloreto de gadolínio. Selecionando os eventos entre 10 e 150 *hits* temos uma eficiência de 88,6% e entre 15 e 200 *hits* a eficiência cai para 83,8%. 72
- Figura 39 – O gráfico representa a distribuição do número de fotoelétrons em função da energia referente ao gráfico da figura 38. Vale ressaltar que a constante de normalização e a resolução são as mesmas: 3165 pulsos e $0,5 \mu s$, respectivamente. 73
- Figura 40 – O gráfico mostra a distribuição de eventos de antineutrinos em função do número de *hits*. Aplicando a seleção 1, temos uma eficiência de 88,6%. . . . 74
- Figura 41 – O gráfico mostra a distribuição de eventos de antineutrinos em função do número de *hits*. Aplicando a Seleção 2, temos uma eficiência de 83,8%. . . . 75

- Figura 42 – O gráfico compara o número de eventos de antineutrinos quando é aplicada a Estratégia 1 e o número de eventos sem cortes. Aplicando esta estratégia, são excluídos da contagem 13805 eventos. A eficiência do corte é de 79,5%. . . 76
- Figura 43 – O gráfico compara o número de eventos de antineutrinos quando é aplicada a Estratégia 2 e o número de eventos sem cortes. Aplicando esta estratégia, são excluídos da contagem 13805 eventos. A eficiência do corte é de 77,0%. . . 77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplo de composição média percentual no combustível nuclear.	42
Tabela 2 – Análise comparativa entre as estratégias para determinação do Sinal-Ruído para 24 horas de aquisição de dados. $S1 = Selection1 + TimeSelection1$ e $S2 = Selection2 + TimeSelection2$	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PMT's	Photomultipliers Tubes
CBPF	Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
GW	Giga Watts ou 10^9 Watts.
GDML	Geometry Description Markup Language

LISTA DE SÍMBOLOS

θ_{13}	Ângulo de mistura da oscilação de neutrinos
σ_f	Seção de choque do decaimento β inverso
E_f	Energia liberada por cada fissão no reator
P_{ter}	Potência térmica do reator nuclear
n_p	Número de prótons-alvo no detector
R	Distância detector-núcleo do reator
ε	Eficiência do detector
π	Número irracional igual a 3,14159....
α_i	i -ésima fração da composição isotópica do combustível nuclear
Γ	Constante que depende das características do Reator Nuclear
$k(t)$	Variável com dependência temporal relacionada à composição isotópica do combustível nuclear
M_M	Massa do núcleo antes do decaimento β
M_D	Massa do núcleo depois do decaimento β
m_e	Massa do elétron
c	Velocidade da luz no vácuo
$n(\lambda)$	Índice de refração do meio que depende do comprimento de onda da radiação eletromagnética
β	Relação entre a velocidade da partícula e a velocidade da luz no vácuo (v/c)
γ	Fator de Lorentz igual a $(1 - \beta^2)^{-1/2}$
m_0	Massa de repouso da partícula
$p.e.$	Fotoelétrons

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	SOBRE A FÍSICA DE NEUTRINOS	20
2.1	Aspectos gerais sobre a história da física de neutrinos	20
2.2	Modelo padrão da física de partículas	22
3	O EXPERIMENTO NEUTRINOS ANGRA	26
3.1	Neutrinos oriundos de reatores nucleares: o decaimento beta	26
3.2	O decaimento beta inverso	28
3.3	Método de detecção de antineutrinos	29
3.4	Efeito Cherenkov	31
3.5	Sinal imediato e atrasado	33
3.6	Tubos fotomultiplicadores	35
3.7	Circuito de <i>front-end</i> e sistema de aquisição de dados de neutrinos - NDAQ	36
3.8	Composição e evolução do combustível em reatores nucleares	41
3.9	Relação do combustível nuclear com o espectro de neutrinos	43
3.10	Regras de seleção	46
3.10.1	Caracterização do sinal e <i>background</i>	46
3.10.2	Otimização do sinal	47
4	ATUALIZAÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO COMPUTACIONAL	53
4.1	GDML: <i>Geometry description markup language</i>	53
4.1.1	Por que atualizar a geometria do detector?	53
4.1.2	Estrutura do GDML	54
4.1.3	Exemplo de Aplicação: Construindo uma PMT	55
4.2	O detector de partículas!	57
4.2.1	O Alvo Central	57
4.2.2	O Sistema de Veto	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
5.1	Critérios e definições	63

5.2	Descrição do <i>RUN</i>	64
5.3	Avaliação do sinal no tempo	65
5.4	Avaliação dos critérios de seleção	66
6	CONCLUSÕES	78
	Referências	80
APÊNDICE A	Relação de Mikaelyan do combustível nuclear com o espectro de neutrinos	82
APÊNDICE B	Arquivo GDML da Atualização do Modelo Geométrico Computacional	84

1 INTRODUÇÃO

Proposto em 2002, com o objetivo de determinar o ângulo de mistura da oscilação de neutrinos [θ_{13}], o Experimento Neutrinos Angra, colocava o Brasil em um seleto grupo de cooperação internacional da física de neutrinos. A concepção original do Experimento contava com um detector à base de um cintilador líquido inflamável. O detector seria instalado em um laboratório subterrâneo, sob o Morro do Frade no município de Angra dos Reis - RJ. O local foi escolhido partindo de duas premissas básicas (i) viabilidade geográfica: por ser uma blindagem natural à radiação cósmica de fundo, o que minimizaria os erros sistemáticos produzidos por tal radiação e (ii) viabilidade técnica/experimental: ser instalado próximo ao reator nuclear de 4 GW de potência térmica da Usina Nuclear de Angra II. Entretanto, a Eletrobras Eletronuclear, empresa estatal brasileira fornecedora de energia elétrica a partir da energia nuclear, impôs algumas restrições ao Experimento. Devido à presença de estruturas ao redor do prédio do reator, a construção de um poço subterrâneo para instalação do laboratório do Experimento Neutrinos Angra não seria viabilizada. O sistema de refrigeração secundário foi um dos motivos desta restrição. As normas de segurança da estatal também não permitiam a utilização de cintilador líquido inflamável (a base de óleo mineral). Diante destas restrições, a Colaboração do Experimento optou então em construir um detector Cherenkov a base de água dopada com sal de gadolínio do tipo "*Water Box*". Devido a estas restrições, houve uma mudança significativa na motivação original do Experimento que era determinar o ângulo de mistura da oscilação de neutrinos [θ_{13}], pois o detector deveria ser instalado na superfície ao lado do reator nuclear da Usina de Angra II. O objetivo do Experimento Neutrinos Angra passou a ser o monitoramento da composição do combustível nuclear a partir da potência térmica de reatores nucleares. Esse objetivo está alinhado com o Programa da AIEA (Agência Internacional de Energia Atômica) para o desenvolvimento de novas técnicas para controle e aplicação de salvaguardas para não-proliferação de armas nucleares. De acordo com [1], a salvaguarda nuclear proposta pela AIEA é realizada pela verificação de entrada e saída de materiais, validada pela análise dos resíduos gerados pelo reator quando da geração de energia. Atualmente, todas as informações inerentes ao processo de salvaguarda são declaradas pelo operador e mantenedor da usina nuclear. Já foi provado conceitualmente [2] que os antineutrinos podem ser observados com o objetivo de salvaguarda nuclear. Neste sentido, o método não invasivo proposto pelo Experimento Neutrinos

Angra, surge como uma boa alternativa de salvaguarda nuclear, uma vez que as informações necessárias não dependem do operador, aumentando a segurança no monitoramento e controle do resíduo nuclear produzido pelo reator. O princípio do monitoramento se baseia na relação entre a potência térmica do reator nuclear e a taxa de eventos de neutrinos registrados pelo detector. Há também a possibilidade de detectarmos modificações no espectro dos antineutrinos durante a "queima" do combustível. Estas modificações ficam evidenciadas com a alteração gradual das frações dos isótopos da composição ao longo da vida útil do combustível.

Em síntese, o objetivo atual do Experimento, no contexto de salvaguarda nuclear, é monitorar a composição e evolução do combustível nuclear de reatores relacionando o número de antineutrinos observados em função da potência térmica do reator nuclear.

Atualmente, o detector encontra-se em fase final de testes no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) na cidade do Rio de Janeiro. Em seguida, seguirá para montagem em definitivo para a Usina Termonuclear situada no município de Angra dos Reis -RJ (Angra II).

Os capítulos subsequentes desta dissertação foram divididos da seguinte forma: o capítulo 2 traz um breve histórico sobre a física de partículas. Apresenta desde a descoberta do neutrino por Wolfgang Pauli em 1930 com pistas da aparente não conservação da energia evidenciada por J. Chadwick em 1914, passando pela descoberta experimental do neutrino por Reines e Cowan em 1956, até o marco histórico em 2012 com a observação experimental do bóson de Higgs pelo LHC. No capítulo 3, são descritos em detalhes os principais fenômenos físicos envolvidos no Experimento Neutrinos Angra, seu método de detecção dos eventos de antineutrinos, sobre a amplificação do sinal via tubo fotomultiplicadores e posterior identificação do evento pela eletrônica do sistema de aquisição de dados, sobre as regras de seleção empregadas para caracterizar de maneira inequívoca o evento de interesse, além de descrever sobre a evolução temporal do combustível durante o processo de geração de energia e a sua relação entre a potência térmica do reator nuclear e o número de neutrinos. O capítulo 4 descreve a principal contribuição desta tese no contexto do Experimento Neutrinos Angra. É discutido sobre a necessidade de atualizar o modelo geométrico computacional do detector de partículas no formato GDML (*Geometry Description Markup Language*). Ainda neste capítulo são apresentados os resultados desta atualização. No capítulo 5, são apresentados os resultados da simulação para validação da nova geometria. No capítulo 6 são descritas as principais conclusões obtidas neste trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

2 SOBRE A FÍSICA DE NEUTRINOS

Neste capítulo será apresentado um breve histórico sobre a física de neutrinos e introduzidos os principais conceitos das interações fundamentais previstas pelo Modelo Padrão da Física de Partículas.

2.1 Aspectos gerais sobre a história da física de neutrinos

A radioatividade do urânio foi proposta por A. Becquerel em 1896 e ocorreu de modo acidental quando ele percebeu partes escuras ao revelar uma chapa fotográfica que estava guardada junto a sais de urânio. Esta propriedade da matéria pode ser natural ou induzida pelo bombardeio de determinadas partículas em núcleos instáveis como o Césio, Cobalto e o Tório, originando novos núcleos atômicos. A radiação é a emissão de energia por meio de partículas ou ondas e são classificadas, dependendo da intensidade, como ionizantes ou não-ionizantes. Alguns exemplos de tipos de radiação estão sintetizados abaixo:

- Alfa ou raios α : são fluxos de partículas carregadas positivamente e ionizantes. São formadas pelo núcleo do átomo de hélio (dois prótons e dois nêutrons). São pouco penetrantes e podem ser blindadas com uma folha de papel. Portanto, quando um átomo emite a radiação α , o valor da carga elétrica cai de duas unidades e a massa atômica de quatro unidades.
- β ou raios β : as partículas emitidas neste tipo de radiação são os elétrons β^- ou pósitrons β^+ com velocidades próximas à da luz no vácuo. São mais penetrantes que a radiação α . O átomo que emite radiação β sofre um decréscimo diminuto em sua massa atômica e seu número atômico cresce uma unidade.
- Raios-X: são fótons com espectro de energia discreto ou contínuo. O espectro discreto é observado para os denominados "raios-X característicos" originados de transições de elétrons entre as camadas atômicas. O valor da energia é igual ao da transição entre essas camadas. O espectro de energia contínuo, por sua vez, é característico dos raios-X gerados por *bremstrahlung* ou de freamento que ocorre quando o elétron emite radiação depois de interagir com matéria. Esse fenômeno é resultado da conversão de parte de sua energia cinética em radiação X.

- Gama ou raios γ : são partículas/ondas eletromagnéticas (fótons) altamente energéticos emitidos por núcleos instáveis imediatamente após a emissão de uma partícula α ou β . Possuem maior penetração que os outros tipos de radiação, o que a torna portanto um tipo de radiação muito perigosa para tecidos vivos.
- Infravermelha: radiação eletromagnética não-ionizante na porção invisível do espectro com comprimentos de onda entre 1 mm e 700 nm.
- Ultravioleta: radiação eletromagnética não-ionizante com comprimentos de onda entre 400 nm e 15 nm.
- Cósmica de Fundo ou *Background*: proveniente dos raios cósmicos e representa, no Experimento Neutrinos Angra, a principal fonte de ruídos e erros sistemáticos nas medidas.

A aparente não conservação da energia e momento linear do sistema no decaimento β evidenciado por J. Chadwick em 1914, foram os principais responsáveis pela descoberta do neutrino. Experimentalmente, neste processo de decaimento, a energia do elétron emitido assume valores que variam de zero até um valor máximo, de modo a fornecer um espectro contínuo de energia. Porém, de acordo com a teoria da lei de conservação, esperava-se que o elétron assumisse um valor de energia fixo. Para que a teoria fosse consistente com o resultado experimental, quando ocorresse este processo de decaimento radioativo, o núcleo do átomo deveria emitir uma partícula e ter como resultado um novo núcleo [3] conforme a relação 2.1. Esta proposta tinha como objetivo confirmar a o princípio de conservação da energia.

$$M(A, Z) \rightarrow D(A, Z + 1) + e^-, E_e = \left(\frac{M_M^2 - M_D^2 + m_e^2}{2M_A} \right) c^2 = cte \quad (2.1)$$

O mistério foi resolvido por Wolfgang Pauli em 1930. Ele propôs que a parte de energia perdida no decaimento β era devido à uma nova partícula com algumas características físicas especiais, a seguir: um férmion, com carga elétrica neutra, spin 1/2, que obedecesse ao Princípio de Exclusão, que interagisse fracamente com a matéria e de massa infinitesimal. Dois anos depois, Chadwick descobriu o nêutron como conhecemos hoje. Para diferenciar da partícula proposta por W. Pauli, o italiano Enrico Fermi a batizou de neutrino - o pequeno nêutron. A equação da conservação da energia do decaimento β deve ser então corrigida acrescentando-se na 2.1, a contribuição da parcela de energia devido ao neutrino de forma a contemplar o espectro contínuo.

$$M(A, Z) \rightarrow D(A, Z + 1) + e^{-} + \nu_e, E_e + E_{\nu_e} = cte \quad (2.2)$$

A confirmação experimental do neutrino só aconteceu em 1956 pelos físicos experimentais Clyde Cowan e Frederick Reines, 26 anos depois da proposta de Pauli [4]. O método de detecção experimental proposto por estes cientistas foi um grande êxito e até hoje, sua metodologia é aplicada nos principais experimentos de neutrinos de reatores nucleares. Especificamente, para o Experimento Neutrinos Angra, as diferenças básicas do método de detecção de Cowan e Reines é que o detector do Angra é instalado na superfície e a solução do alvo é de cloreto de gadolínio. Na metodologia de Cowan e Reines, os detectores foram instalados a 20 metros de profundidade abaixo do reator nuclear na Carolina do Sul (EUA) e a solução utilizada no alvo foi de cloreto de cádmio. Neste arranjo de 1956 [5], quando o neutrino interage com o próton do alvo, ocorre o fenômeno da emissão de luz devido à ionização do meio e a liberação de um nêutron que se movimenta no meio e sofre múltiplos espalhamentos, perdendo energia até o nível em que é capturado pelo núcleo do cloreto de cádmio. A captura do nêutron deixa o núcleo em estado excitado. Quando ocorre a desexcitação, são emitidos uma cascata de raios gama. A diferença de tempo entre a ionização do meio e a captura e emissão de gamas pelo núcleo excitado, é em torno de 5 ms. Ou seja, é o intervalo entre os sinais de luz. Ficou evidenciada a existência dos neutrinos até então previstos apenas teoricamente.

Dessa forma, a "integridade" da lei de conservação da energia continuara intacta e a observação experimental de acordo com a previsão teórica. Na seção 3.1, será explicitado em detalhes os neutrinos oriundos de reatores nucleares através do decaimento β .

2.2 Modelo padrão da física de partículas

O Modelo Padrão da Física de Partículas, iniciou-se no ano de 1897 com a descoberta do elétron. Apesar de não ser uma teoria finalizada e consolidada, ela é consagrada pela comunidade científica como uma das mais completas teorias físicas. O Modelo caracteriza as partículas e suas interações. Todas as partículas podem ser divididas em dois grandes grupos: os férmions, partículas que constituem a matéria e os bósons, que são as partículas mediadoras das interações fundamentais [6].

Há quatro tipos de interações fundamentais: a interação gravitacional, eletromagnética, fraca e forte. A teoria eletromagnética, por exemplo, diz que uma carga elétrica em movimento

produz um campo eletromagnético ao seu redor. De maneira análoga, a interação gravitacional ocorre devido à presença de um corpo com massa, a interação forte ocorre devido à carga de cor (também uma propriedade da matéria e não uma cor propriamente dita) e a interação fraca devido à presença de carga fraca. Neste sentido, as interações fundamentais ocorrem devido às propriedades fundamentais da matéria: massa, carga elétrica, carga de cor e carga fraca.

As interações se dão através das partículas mediadoras, conhecidas também como bósons de calibre. São as partículas transmissoras da "mensagem" por troca de pulsos de energia. Embora ainda não detectados, os grávitons seriam os mediadores da interação gravitacional, os fótons da interação eletromagnética, os glúons da interação forte e as partículas W e Z as mediadoras da interação fraca. As partículas mediadoras são os *quanta* ou pacotes de energia dos campos gravitacional, eletromagnético, forte e fraco. Vale ressaltar que as partículas podem sofrer várias interações simultaneamente, porém o alcance ou região de domínio de determinada força pode ser desprezível quando comparada às demais. A título de exemplo, se normalizarmos a força gravitacional para magnitude de 10 N, a força nuclear fraca teria 10^{29} N, a eletromagnética 10^{39} N e a força nuclear forte 10^{41} N. Isto denota portanto que, a força gravitacional é irrelevante no universo subatômico.

Os férmions são constituintes da matéria e podem ser divididos em dois grandes grupos de partículas elementares (que não possuem estrutura interna): os léptons e os quarks. O Modelo prevê ainda que todas as partículas possuem uma antipartícula correspondente. São 6 léptons, cada um com seu anti, perfazendo um total de 12 léptons. Quais sejam: (anti)elétron ou pósitron, (anti)múon, (anti)tau, (anti)neutrino do elétron, do múon e do tau. Já os quarks possuem uma característica singular: possuem carga elétrica fracionada da fundamental de $(+2/3e)$ ou $(-1/3e)$. Porém, os quarks nunca foram observados de forma isolada. Outra característica, são as cargas de cor para cada tipo de quark e antiquark (vermelho, verde e azul). Os tipos de quark são: (anti)quark *up* (u), (anti)quark *down* (d), (anti)quark *strange* (s), (anti)quark *charm* (c), (anti)quark *bottom* (b) e (anti)quark *top* (t). São 12 quarks que podem ter 3 cores cada, totalizando 36 quarks.

Na família das partículas que constituem a matéria, existem os hádrons que não são elementares, ou seja, possuem estrutura interna. São formados por quarks e antiquarks. Os hádrons são divididos em bárions (formados por três quarks ou três antiquarks) e mésons (formados por pares quark-antiquark). O próton e o nêutron por exemplo, são formados por quarks tipo *uud* e *udd*, respectivamente.

Um marco histórico na Física ocorreu em 2012. O bóson de Higgs finalmente teve sua observação experimental comprovada pelo LHC-*Large Hadron Collider* com massa de $125 \text{ GeV}/c^2$. Anos antes, físicos teóricos já previram que, em caso de confirmação experimental, o bóson de Higgs, responsável pela origem da massa das partículas elementares, deveria ter massa entre 114 e $200 \text{ GeV}/c^2$ [6].

Estudaremos de maneira especial, o (anti)neutrino do elétron $\bar{\nu}_e$. Ele faz parte da primeira geração de léptons. Foi proposto em 1930 por W. Pauli para garantir a conservação da energia e momento no decaimento β . Os neutrinos possuem spin $1/2$ (pois são férmions), carga zero (não interagem eletromagneticamente), não interagem via interação nuclear forte por serem léptons e possuem massa praticamente nula. Os neutrinos participam apenas da interação nuclear fraca e gravitacional. O Modelo Padrão previa que os neutrinos não deviam possuir massa. Até que em 2002, foi comprovado experimentalmente a oscilação entre os sabores de neutrinos oriundos do Sol. Estes novos resultados exigiam que, apesar de muito pequena, os neutrinos deveriam possuir massa. Outra limitação do Modelo em respeito aos neutrinos é que, mesmo com a descoberta do Higgs, pode ser que este bóson não seja o único responsável pela existência da massa dos neutrinos. Os neutrinos seriam uma exceção. Há uma hipótese que a massa possa ser proveniente também de outro mecanismo. O Modelo Padrão também pressupunha que a propagação do neutrino era oposta à de seu spin (neutrinos de mão esquerda). Outra implicação dos neutrinos oscilantes é que também devem existir os neutrinos de mão direita, em que a direção de propagação é a mesma de seu spin. Este fato reforça a tese de que deve haver outro mecanismo, além do de Higgs, para prover a massa. Caso realmente existam, os neutrinos de mão direita seriam pesados, ao invés dos de mão esquerda que são muito leves. Outras questões que podem ser citadas e que ainda não temos respostas é sobre a assimetria entre partículas e antipartículas, sobre a composição da matéria escura e energia escura, dentre outras.

A *filosofia do não* de Bachelard [7], diz que uma nova teoria surge a partir da desilusão com uma teoria antiga. Não trata-se do refugio da teoria antiga perante à nova, mas que a nova é concebida a partir da teoria velha. No caso do Modelo Padrão, a desilusão seria no sentido de não conseguirmos obter respostas às nossas perguntas. Apesar do Modelo Padrão funcionar muito bem, estas respostas provavelmente virão quando conseguirmos acessar níveis de energia cada vez maiores em detectores, aceleradores ou colisores de partículas. Restando poucos parâmetros para serem descobertos, os neutrinos já estão muito bem caracterizados, chegando ao ponto onde eles saem do *status* de ciência pura para aplicada. Como exemplo, podemos citar

a salvaguarda nuclear. A salvaguarda pode ser monitorada devido ao fato de que, cada isótopo que compõe o combustível nuclear apresenta um do espectro de energia. Conforme [8], o fato dos antineutrinos serem de diferentes elementos reflete em seus espectros de energia. Assim, se o espectro particular de cada isótopo é conhecido com uma boa resolução, pode-se mapear as concentrações destes isótopos após um período de geração de energia do reator.

Como então observar uma partícula sem carga elétrica, com massa ínfima e que interage muito fracamente com a matéria? No capítulo 3, especificamente na seção 3.3, será descrito o método de detecção de antineutrinos do Experimento Neutrinos Angra. Este evento de interesse é observado indiretamente através da reconstrução do fenômeno conhecido como Efeito Cherenkov devido à emissão da radiação eletromagnética no processo de decaimento β -inverso.

3 O EXPERIMENTO NEUTRINOS ANGRA

A concepção atual do Experimento Neutrinos Angra prevê um detector compacto e que esteja apto para operar na superfície. O detector é composto basicamente de quatro partes principais: (i) Alvo Central: estrutura fabricada em polipropileno com uma massa de aproximadamente 1000 kg de água dopada com sal de gadolínio e equipado com 32 tubos fotomultiplicadores (PMT's). O cloreto de gadolínio aumenta a seção de choque do processo de captura de nêutrons, além de ter um perfil de emissão gamas bem característicos com a emissão fracionada de fótons em efeito cascata. (ii) Veto Interno: estrutura em polipropileno com 4 fotomultiplicadores e preenchido com água pura para auxiliar na blindagem dos raios cósmicos. (iii) Veto Externo: estrutura externa em aço e a interna em polipropileno preenchido com água. (iv) Vetos Superior e Inferior: estrutura externa em aço e estrutura interna em polipropileno também preenchida com água para blindagem de raios cósmicos com 4 PMT's cada.

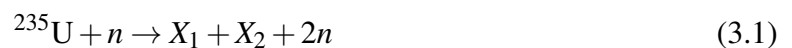
A dinâmica do método proposto no Experimento Neutrinos Angra, permite mensurar em tempo real, em uma eventual parada do reator, se houve desvios na composição isotópica que compõem o combustível nuclear [8]. Este é um importante diferencial do Experimento Angra em relação aos métodos atuais, no que tange à detecção do fluxo de antineutrinos. Por se tratar de um método preditivo e não invasivo, o reator nuclear pode ser monitorado à uma distância segura. O número de fissões é calculado como o quociente entre a potência térmica e a energia por fissão conforme será detalhado na seção 3.9.

3.1 Neutrinos oriundos de reatores nucleares: o decaimento beta

Reatores nucleares produzem energia por fissão nuclear e constituem uma intensa fonte de neutrinos. Estudos realizados [9], demonstraram conceitualmente que a potência térmica liberada no processo de fissão dos elementos combustíveis é diretamente relacionada com o fluxo emitido de antineutrinos. A fissão em si não produz antineutrinos, porém os subprodutos da fissão são radioativos e decaem via interação fraca, por processos conhecidos como decaimentos β . O nêutron do decaimento β sempre produz um próton, um elétron e um antineutrino do elétron. Conforme o combustível gera energia, as frações dos elementos que compõem o combustível nuclear se alteram com tempo, produzindo um espectro particular de antineutrinos. Portanto, a

forma do espectro de antineutrinos pode fornecer informações sobre a composição isotópica do combustível nuclear. Outros exemplos de fontes de neutrinos que podemos citar são: as reações nucleares nas estrelas, bombas nucleares, partículas cósmicas que interagem com a atmosfera terrestre (núcleos de oxigênio e nitrogênio) gerando partículas secundárias que decaem em neutrinos.

Partindo do pressuposto que os neutrinos deveriam ter uma massa desprezível ou nula, Fermi concebeu em 1934, uma teoria matemática sobre o decaimento β que posteriormente tornou-se a teoria das interações fracas [10]. O decaimento β que ocorre no interior dos reatores devido à fissão nuclear, produz em média 200 MeV de energia. O ^{235}U , por exemplo absorve um nêutron do meio, formando o ^{236}U , que também participa do processo de fissão nuclear. Os núcleos instáveis dividem-se em núcleos mais leves (X_i) conforme a reação 3.1 [11]:



Cada nêutron decai em um próton, um elétron e um antineutrino do elétron. A reação 3.2 e a figura 1 mostram o decaimento β :

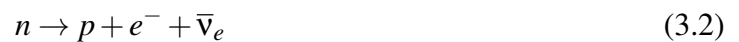
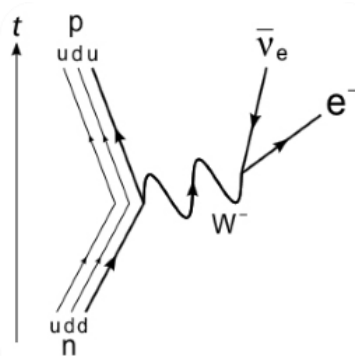


Figura 1 – Decaimento β . O nêutron decai em um próton, um elétron e antineutrino eletrônico através da partícula mediadora da força fraca, o bóson W^- .



Fonte: [1]

A observação dos antineutrinos é feita indiretamente pelo processo do decaimento β inverso que será explicado na seção 3.2.

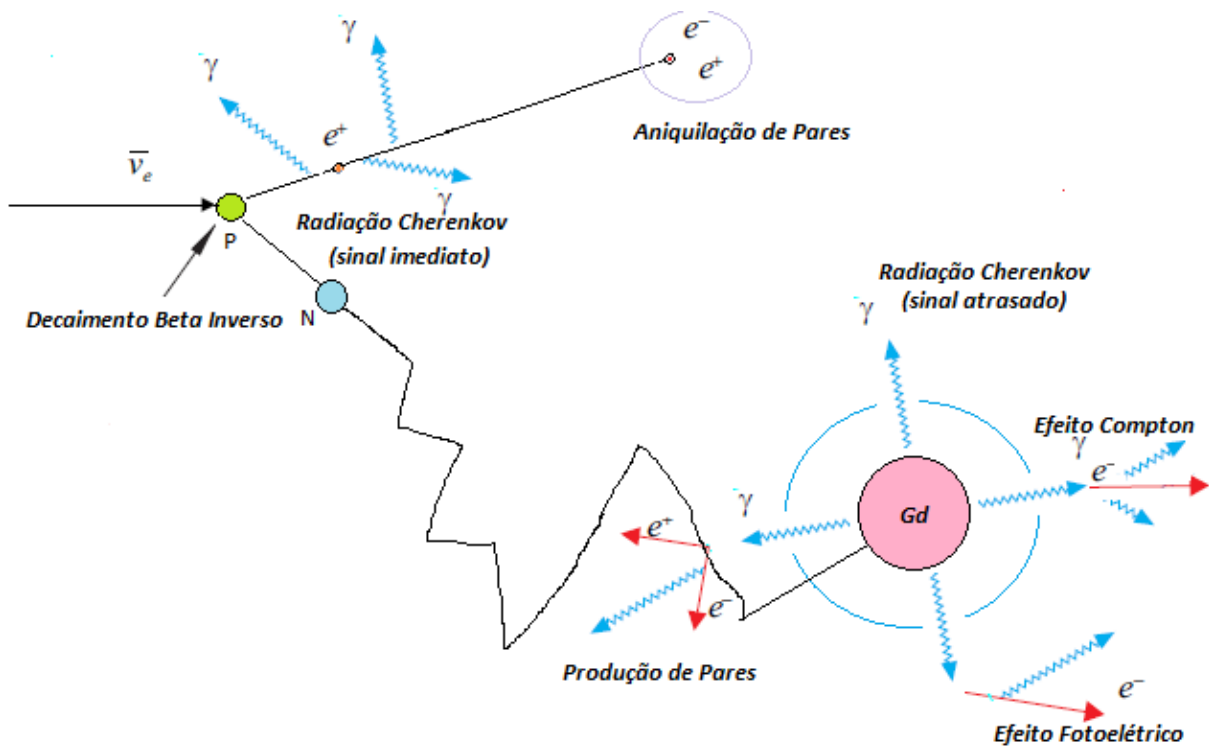
3.2 O decaimento beta inverso

Os antineutrinos produzidos no decaimento β no interior do reator nuclear podem ser observados indiretamente pelo detector através do decaimento β -inverso. O antineutrino interage, devido à troca de partículas da interação fraca, com os prótons-alvo da água dopada com aproximadamente 0,3% em massa de cloreto de gadolínio $GdCl_3$. A dopagem da água tem por objetivo aumentar a seção de choque dos antineutrinos com os prótons-alvo do detector, produzindo um nêutron e um pósitron conforme a relação 3.3:



Para as características do reator nuclear do Experimento Neutrinos Angra, estima-se [8] a partir da relação 3.26 que o número de antineutrinos observados indiretamente pelo decaimento β -inverso seja da ordem de 4 a 5 mil eventos por dia.

Figura 2 – Decaimento β Inverso no interior do detector. A figura mostra também os principais fenômenos físicos após o decaimento β Inverso. O sinal imediato ou *prompt*, ocorre quando o pósitron emite radiação por estar com velocidade maior que a da luz no meio e energia acima do limiar de Cherenkov. O sinal atrasado ou *delayed* é caracterizado pela emissão de raios gama pelo gadolínio após ter sido excitado pela captura do nêutron. Ocorre também a aniquilação e produção de pares elétron-pósitron, Efeito Compton e Efeito Fotoelétrico.



Fonte: Do autor.

A figura 2 ilustra o decaimento β -Inverso. Em suma, os antineutrinos são observados indiretamente ao interagirem com o detector através dos "rastros" de luz deixados pelos pósitrons

e pela desexcitação do gadolínio que absorveu o nêutron térmico. Esta radiação ocorre devido ao fenômeno conhecido como Efeito Cherenkov, que será tratado com mais detalhes na seção 3.4. No Experimento Neutrinos Angra, os sinais deixados pelo pósitron e pela desexcitação do gadolínio, são denominados respectivamente de sinal imediato e atrasado. Estes serão descritos na seção 3.5.

A figura 3 mostra a curva da interação de neutrinos no alvo do detector citado na referência [12] em função do fluxo de neutrinos e da energia e também a forma do espectro de energia de neutrinos via decaimento β -Inverso. Esta figura também será útil na análise dos resultados da simulação computacional dos histogramas de número de fotoelétrons que serão apresentados no capítulo 5. O número de interações no detector é determinada pela multiplicação entre a seção de choque de interação e do número de prótons livres no detector. O nível mínimo de energia para o decaimento β -Inverso ocorrer é de 1,8 MeV. A energia do sinal ou excesso de energia deixado pelo antineutrino no decaimento é dado pela equação 3.4:

$$E_{sinal} = E_{\nu} - 1,8 \text{ MeV} + 2m_e c^2 \quad (3.4)$$

Onde: $m_e c^2 = 0,511 \text{ MeV}$ é a energia de repouso do elétron ou pósitron e E_{ν} é a energia do neutrino no decaimento β -Inverso.

Observando a equação 3.4, podemos inferir que o limiar de energia que o antineutrino deve carregar para que a energia do sinal seja maior que zero é dado por 3.5:

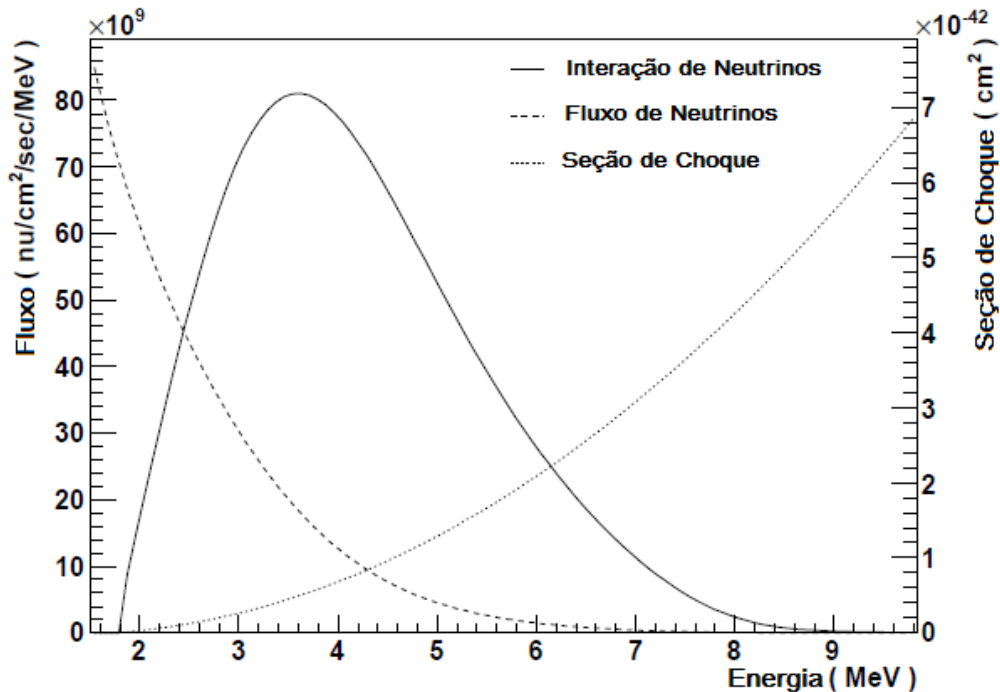
$$E_{\nu_{min}} = 1,8 \text{ MeV} - 2m_e c^2 = 0,78 \text{ MeV} \quad (3.5)$$

Na seção 3.3 será discutido o método indireto de detecção de neutrinos do Experimento Neutrinos Angra.

3.3 Método de detecção de antineutrinos

Nesta seção será discutido de maneira particular, o método de detecção de antineutrinos do Experimento Neutrinos Angra. Sintetizando o que será explicado em detalhes nas próximas seções, um reator nuclear com uma potência térmica de 4 GW, como o da usina de Angra II, produz da ordem de 10^{20} antineutrinos por segundo. Apesar deste número astronômico, espera-se que sejam observados, em média, apenas 1 antineutrino a cada 17 segundos. O antineutrino

Figura 3 – A linha pontilhada que decai exponencialmente mostra a forma do espectro de energia de neutrinos (unidade arbitrária) via decaimento β -Inverso. A linha pontilhada da seção de choque representa a probabilidade do antineutrino interagir com os prótons do alvo do detector. A linha sólida descreve a interação dos neutrinos com alvo do detector em função fluxo e da energia.



Fonte: [12].

candidato à observação oriundo do reator nuclear, é produzido pelo decaimento radioativo das frações que compõem o combustível por processos de decaimento β . Já no alvo do detector, existe uma solução com uma determinada concentração de água e cloreto de gadolínio aguardando esse antineutrino. Se o antineutrino interagir com um núcleo de hidrogênio presente no alvo do detector, ocorrerá o decaimento β Inverso. Esta interação, antineutrino-próton, gera um nêutron e um pósitron no interior do detector. O pósitron criado, sai com velocidade maior que a da luz no meio, produzindo ondas de radiação Cherenkov. Esta radiação será identificada pelos tubos fotomultiplicadores e rotulado como sinal imediato pelo circuito eletrônico de detecção do Experimento. O nêutron da reação, perde energia ao sofrer múltiplos espalhamentos até ficar com energia baixa o suficiente a ponto de ser capturado pelo gadolínio presente no alvo do detector. Este processo, desde a criação até a captura do nêutron, é denominado de termalização. O gadolínio tem a maior seção de choque a nêutrons conhecida na natureza. Ao capturar o nêutron térmico, seu núcleo fica no estado excitado. Quando ocorre a desexcitação, o excesso de energia é emitido em forma de uma cascata de raios gama, produzindo radiação Cherenkov. Este sinal de radiação é bem característico e assim como no caso do sinal imediato, também

é detectado pelas PMT's. Em seguida, este é registrado e rotulado como sinal atrasado pelo sistema eletrônico do Experimento. A diferença de tempo entre os sinais de radiação depende da concentração de cloreto de gadolínio no alvo que, neste Experimento, é de 0,3% em massa. Simulações realizadas anteriormente [8], revelaram que o intervalo de tempo entre os sinais para esta concentração é em torno de $10 \mu\text{s}$. Este intervalo de tempo será adotado, dentre outros métodos, como regra de seleção para separar o evento de antineutrino dos sinais espúrios de radiação cósmica ou até mesmo sinais falsos produzidos, em sua maioria, pela chamada corrente de escuro dos tubos fotomultiplicadores.

3.4 Efeito Cherenkov

Para o Experimento Neutrinos Angra, o Efeito Cherenkov é o fenômeno físico mais fundamental. Tanto é que o próprio detector de antineutrinos é batizado com o nome de Detector Cherenkov à base de água.

Em 1958, os cientistas Tamm, Frank e Cherenkov foram laureados com prêmio Nobel pela descoberta e interpretação do que viria a ser denominado de Efeito Cherenkov. O fenômeno ocorre devido à polarização dos átomos próximos à passagem da partícula carregada, transformando-os em dipolos elétricos. A emissão de radiação eletromagnética, por sua vez, ocorre devido à taxa de variação temporal do campo destes dipolos. Em reatores nucleares, o Efeito Cherenkov está no comprimento de onda que vai do azul ao ultravioleta do espectro eletromagnético. Este efeito é provocado por partículas carregadas que se propagam com velocidade maior que a da luz em meios opticamente transparentes com índices de refração maiores que 1. O fenômeno análogo para ondas mecânicas ocorre em aerodinâmica quando a velocidade da fonte sonora é maior que a do som no meio (Cone de Mach).

A figura 4 ilustra o fenômeno e o ângulo da radiação Cherenkov de uma partícula deslocando-se na horizontal a uma velocidade βc emitindo radiação eletromagnética a uma velocidade c/n , gerando uma envoltória cônica em relação ao seu eixo de deslocamento. Partindo da premissa que para existir o Cherenkov, a velocidade da partícula deve ser maior que a da luz no meio, $\beta > 1/n(\lambda)$ e desconsiderando o recuo da partícula carregada no momento da emissão da radiação eletromagnética, podemos equacionar e determinar os limiares de energia, momento e ângulo para que o efeito ocorra.

A partir do conhecimento do índice de refração do meio, podemos determinar os limiares

de velocidade, energia e momento para que o Efeito Cherenkov ocorra [11]. O valor do ângulo $\cos\theta$ pode ser facilmente extraído pela razão entre os seguimentos \overline{AC} e \overline{AB} da figura 4.

$$\cos\theta = \frac{\overline{AC}}{\overline{AB}} = \frac{1}{\beta n(\lambda)} \quad (3.6)$$

O estudo do intervalo de validade da equação 3.6, nos permite concluir que, para ocorrer Cherenkov num índice de refração de $n_{\text{água}} \simeq 1,33$, a velocidade da partícula deve ser maior que 75% da velocidade da luz no vácuo. A velocidade β da partícula no meio deve estar compreendida entre:

$$\frac{1}{n(\lambda)} \leq \beta < 1 \quad (3.7)$$

O ângulo da envoltória é nulo quando $\beta = 1/n(\lambda)$ e tem valor máximo para o limite em que $\beta \rightarrow 1$ conforme descrito pela equação 3.8:

$$\theta_{max} = \arccos\left(\frac{1}{n_{\text{água}}}\right) \simeq 41^\circ \quad (3.8)$$

A partir da igualdade das relações entre energia-massa $E = \gamma m_0 c^2$ e energia-momento $E^2 = (pc)^2 + (m_0 c^2)^2$, pode-se demonstrar que o momento p mínimo para emissão de radiação Cherenkov para uma dada velocidade $\beta = 1/n(\lambda)$. O termo $n(\lambda)$ foi substituído por n na dedução algébrica para simplificar a notação.

$$(pc)^2 + (m_0 c^2)^2 = (\gamma m_0 c^2)^2 \quad (3.9)$$

Substituindo o fator de Lorentz em 3.9, temos:

$$(pc)^2 + (m_0 c^2)^2 = \frac{1}{1 - \beta^2} (m_0 c^2)^2 \quad (3.10)$$

Isolando o termo $(pc)^2$ no lado direito da igualdade e substituindo a expressão $\beta = 1/n$ em 3.10:

$$(pc)^2 = \frac{1}{1 - \left(\frac{1}{n}\right)^2} (m_0 c^2)^2 - (m_0 c^2)^2 \quad (3.11)$$

Reagrupando os termos de modo a ficarmos apenas com o valor do momento linear em função da energia de repouso e do índice de refração do meio, obtém-se 3.12:

$$p^2 = \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) m_0^2 c^2 - m_0^2 c^2 \quad (3.12)$$

Agora basta colocar o termo em evidência $(m_0 c)^2$, para obtermos 3.13:

$$p^2 = m_0^2 c^2 \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} - 1 \right) \quad (3.13)$$

Extraindo o denominador comum de 3.13, temos:

$$p^2 = m_0^2 c^2 \left(\frac{n^2 - n^2 + 1}{n^2 - 1} \right) \quad (3.14)$$

O quadrado do momento linear fica então igual a:

$$p^2 = m_0^2 c^2 \left(\frac{1}{n^2 - 1} \right) \quad (3.15)$$

Extraindo a raiz quadrada, finalmente chegamos na expressão que descreve o momento linear mínimo para que uma partícula produza a radiação Cherenkov, conforme é dado pela 3.16:

$$p \geq \frac{m_0 c}{\sqrt{n^2 - 1}} \quad (3.16)$$

Seguindo a mesma linha de raciocínio, podemos calcular o limiar para a energia cinética para produzir Cherenkov para o elétron (3.17) e para o próton (3.18):

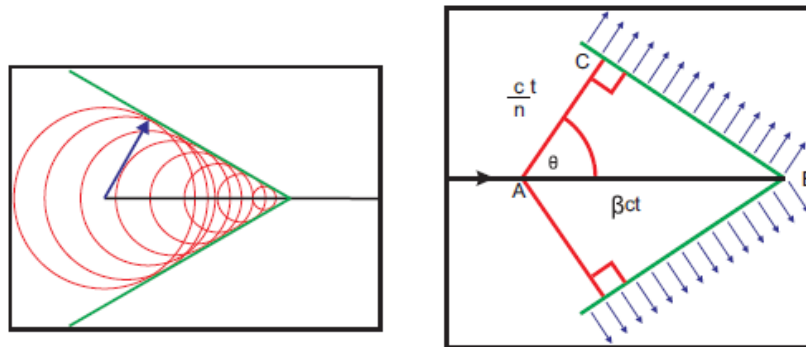
$$T_e = m_{0e} c^2 (\gamma - 1) = 0,511 \left(\frac{1}{\sqrt{0,75^2 - 1}} - 1 \right) = 0,26 \text{ MeV}. \quad (3.17)$$

$$T_p = m_{0p} c^2 (\gamma - 1) = 1846 \left(\frac{1}{\sqrt{0,75^2 - 1}} - 1 \right) \simeq 480 \text{ MeV}. \quad (3.18)$$

3.5 Sinal imediato e atrasado

A detecção de antineutrinos é acessível por meio do decaimento beta inverso que tem uma seção de choque bem conhecida. O antineutrino oriundo da fissão do reator nuclear, interage com o próton que está praticamente com energia de repouso. Por se tratar de uma reação endotérmica, ou seja, que ocorre quando os produtos tem massa maior que a dos reagentes, o antineutrino tem

Figura 4 – Cone da Radiação Cherenkov.



Fonte: [13]

que trazer consigo pelo menos a diferença de massa e momento para haver a conservação de momento e energia. O antineutrino ainda necessita de momento linear para colocar o pósitron e o nêutron em movimento. Desta interação, são produzidos um nêutron e um pósitron. O pósitron, por sua vez, é lançado com boa parte da energia e momento do neutrino incidente, gerando as ondas de choque da radiação Cherenkov, pois sua velocidade é maior que a da luz no meio. No experimento Neutrinos Angra, esta radiação Cherenkov produzida pelo pósitron é observada pelos tubos fotomultiplicadores e rotulada como Sinal Imediato. Em seguida, o pósitron interage com um elétron do meio. Ocorre então a aniquilação do par pósitron-elétron que tem como resultado a produção de raios gama, porém sem energia suficiente para produzir radiação Cherenkov.

O nêutron produzido no decaimento β Inverso, sofre múltiplos espalhamentos com as moléculas da solução de água e cloreto de gadolínio (99,7 + 0,3)% até se termalizar e ser capturado pelo gadolínio. O gadolínio fica no estado excitado e durante o processo de desexcitação emite uma cascata de raios gama com energia média de 8 MeV [13]. Os fótons, emitidos na desexcitação do gadolínio, interagem com a matéria sofrendo espalhamento Compton. Estes fótons ao transferir a energia para os elétrons do meio são capazes de arrancá-los de seus átomos. Estes são acelerados com energia acima do limiar de Cherenkov, produzindo novamente ondas de choque de radiação que são detectadas pelos tubos fotomultiplicadores. Este sinal é caracterizado como um Sinal Atrasado pelo sistema de aquisição de dados do Experimento. Na seção 3.6, serão descritas as principais características como ganho, eficiência quântica e o princípio de funcionamento dos tubos fotomultiplicadores utilizados no Experimento Neutrinos Angra.

3.6 Tubos fotomultiplicadores

Os tubos fotomultiplicadores (PMT's), ou simplesmente as fotomultiplicadoras, são os olhos do detector de partículas do Experimento Neutrinos Angra. São largamente usadas em física nuclear de altas energias. Seu princípio de funcionamento é baseado no Efeito Fotoelétrico proposto por Einstein em 1905. Este efeito estabelece as relações entre energia, a frequência da radiação eletromagnética e a função trabalho do material que sofre a incidência desta radiação. A emissão de eletrônica ocorre quando a energia devido à incidência de radiação eletromagnética é maior que função trabalho Φ do material. A energia do elétron é independente da intensidade da radiação ν eletromagnética, porém é função da frequência da radiação e do tipo de material $E = h\nu - \Phi$.

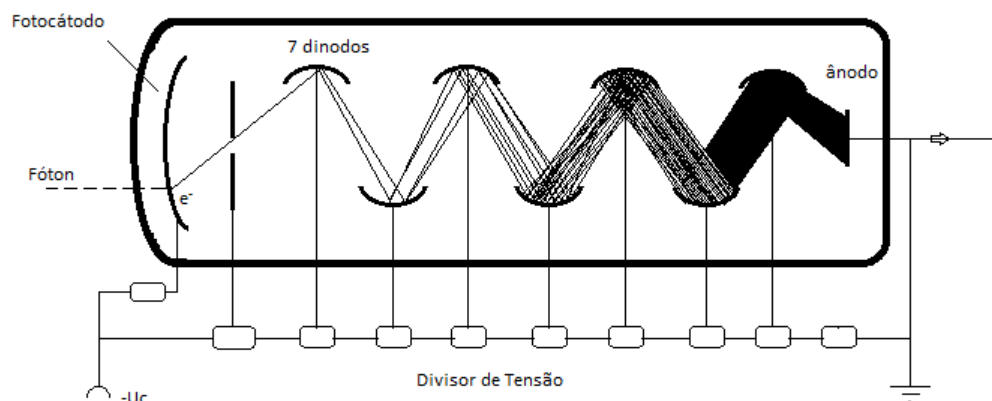
Construtivamente, as PMT's basicamente são compostas de um cátodo revestido de material fotossensível, uma sequência de dinodos (responsável pela multiplicação dos elétrons) e um ânodo. Este arranjo é encapsulado à vácuo por um tubo de vidro conforme ilustra a figura 6. Durante sua operação, é aplicada uma diferença de potencial cátodo-ânodo tipicamente da ordem de 1,5 kV a 2 kV em corrente contínua. Especificamente, as PMT's utilizadas no Neutrinos Angra (fabricante Hamamatsu modelo R5912), tem tensão ânodo-cátodo declarada de 1800 Vdc e tensão entre o ânodo e o último dinodo de 300 Vdc. Estes dispositivos convertem a energia eletromagnética em elétrica, atuando portanto, como uma lâmpada ao contrário.

Os fótons oriundos da radiação Cherenkov, ao interagirem com energia suficiente para ocorrer o Efeito Fotoelétrico, arrancam elétrons do material fotossensível das PMT's. Devido à diferença de potencial entre o cátodo e o primeiro dinodo. Este fotoelétron é acelerado e interage com o dinodo, arrancando mais fotoelétrons. Esta amplificação eletrônica ou ganho (G), é a relação entre a carga Q e a carga elementar e ($G = Q/e$). Este efeito em cascata ocorre até o ânodo conforme elucidado na figura 5.

Como evidenciado na figura 7, o ganho é linearmente proporcional à diferença de potencial ânodo-catodo. Para a PMT R5912, o fabricante sugere um ganho aproximado de 10^7 para uma diferença de potencial típica de 1500 Vdc [14]. Outra característica importante num fotomultiplicador, é sua eficiência quântica. A eficiência quântica depende da sensibilidade espectral do material do fotocátodo e do comprimento de onda da radiação eletromagnética. A resposta espectral à radiação eletromagnética é quantificada em termos da sensibilidade à radiação em ampère por watt [A/W] e da sua eficiência quântica. A eficiência quântica é definida

como a relação entre o número de fotoelétrons expelidos pelo fotocátodo devido ao efeito fotoelétrico e o número de fótons que interagiram com ele. No processo de transferência de energia dos fótons que atingem o fotocátodo da PMT, nem todos tem energia para retirar o elétron da sua banda de valência e, portanto, não produzem o Efeito Fotoelétrico. A eficiência quântica é portanto, caracterizada por um processo probabilístico. Para as PMT's utilizadas no Neutrinos Angra, o fabricante propõe que o pico da sensibilidade da radiação ($\sim 70\%$) e da eficiência quântica ($\sim 27\%$), situam-se na região dos 400 nanômetros de comprimento de onda. De maneira mais precisa, entre o ultravioleta (385 nm) e o azul (430 nm) do espectro eletromagnético [14]. Em outras palavras, uma eficiência quântica de aproximadamente 27% é equivalente a dizer que, em média, 73% dos fótons que interagem com o fotocátodo não produzem fotoelétrons, logo não são detectados.

Figura 5 – Ilustração do princípio de funcionamento de um tubo fotomultiplicador à vácuo (efeito cascata).



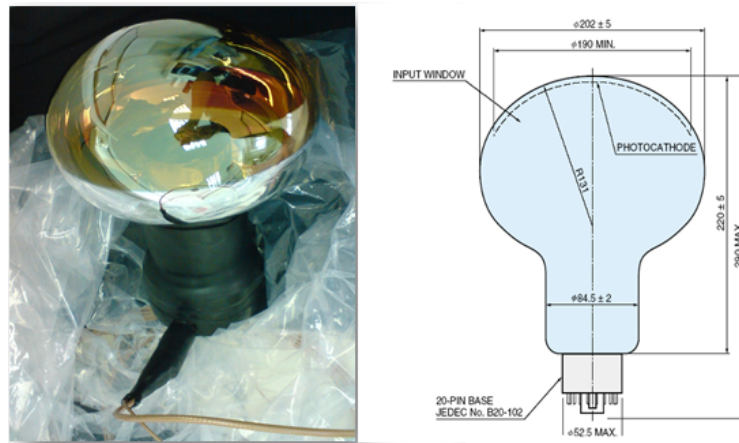
Fonte: Do autor.

3.7 Circuito de *front-end* e sistema de aquisição de dados de neutrinos - NDAQ

Nesta seção, será discutido em linhas gerais, sobre o caminho do sinal amplificado e condicionado nos fotomultiplicadores até o processamento final no sistema de aquisição de dados do detector.

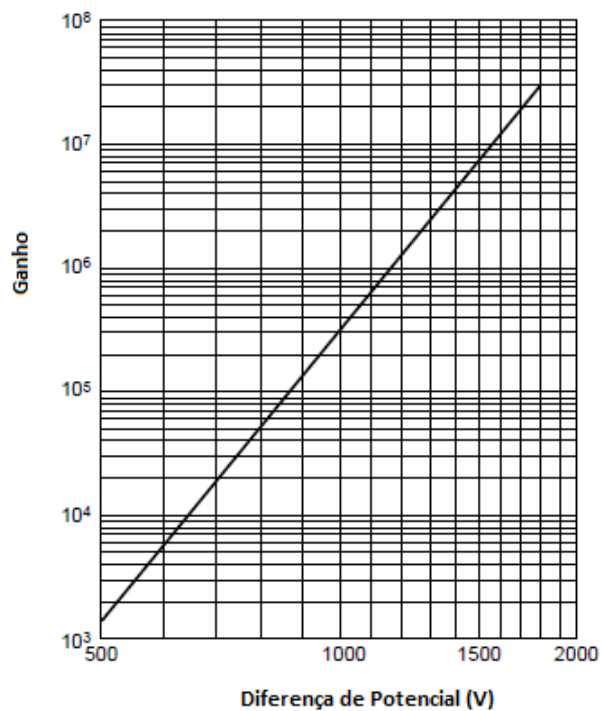
O Experimento Neutrinos Angra, possui um detector central com 32 fotomultiplicadores e os sistemas de veto (inferior de superior) com 4 PMT's cada. Conforme descrito na seção 3.6,

Figura 6 – Tubo Fotomultiplicador do fabricante Hamamatsu modelo R5912.



Fonte: [14]

Figura 7 – Ganho típico da PMT declarado pelo fabricante Hamamatsu modelo R5912.



Fonte: [14]

apesar do ganho da ordem de 10^7 de fotoelétrons no interior das PMT's, o sinal da corrente eletrônica oriunda do efeito fotoelétrico, ainda necessita de amplificação para ser mensurável em equipamentos comerciais de medidas elétricas como um osciloscópio por exemplo. Neste sentido, foi desenvolvido pela equipe do Experimento Angra, um Sistema de Aquisição de Dados de Neutrinos (NDAQ). Trata-se de uma placa eletrônica baseada no padrão VME64 para armazenar

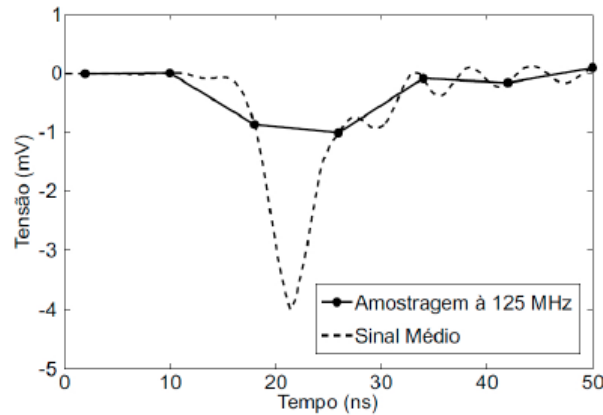
e processar os eventos físicos no interior do detector e sistema de veto. A parte analógica é constituída basicamente por amplificadores operacionais, capacitores e resistores. O módulo de aquisição da parte digital é composto de conversores ADC's (conversores analógicos-digitais) e TDC's (conversores tempo-digitais). A taxa de amostragem de 125 MHz do ADC não é suficiente para aquisição de dados do sinal da PMT que tem um sinal de até 150 MHz. Ou seja, não é possível com esta frequência de 125 MHz, a digitalização do sinal sem a perda do evento de interesse conforme mostra a figura 8. De acordo com [15], o Teorema da Amostragem de Nyquist, afirma que, para a reconstrução de um sinal sem perdas, a frequência de amostragem deve ser maior do que duas vezes a frequência máxima ocupada pelo espectro do sinal. Em vez de substituir o ADC de 125 MHz por um de 300 MHz, que inviabilizaria financeiramente o Experimento, foram desenvolvidos pela Colaboração do Experimento Neutrinos Angra, oito módulos de *Front-end* para suprir toda a eletrônica do Experimento para ajustar o pulso às condições e características do sistema de aquisição de dados. O *Front-end* deve ter uma relação entre sinal de interesse e *background* que possibilite a identificação do fóton único, além de reproduzir com fidelidade a amplitude do pulso proporcional ao número de fótons (vide figura 16) e ajustar adequadamente o sinal de modo à minimizar empilhamento de eventos (figura 17). Sintetizando, o circuito de *Front-end* tem dois objetivos principais:

1. Parte Analógica: confirmar os sinais provenientes das PMT's com a precisão exigida e definida pelo escopo do Experimento. O esquemático está representado pelas figuras 9 e 10.
2. Parte Digital: mensurar o tempo de chegada do sinal de saída do circuito de *Front-end* e entregar este sinais tratados para o computador local.

Cada módulo do NDAQ possui oito canais. Cada canal é composto por um circuito do tipo ASD (amplificador-*shape*-discriminador) tipificados por três ganhos diferentes: Ganho A, B e C.

Para caracterizar o sinal analógico de corrente eletrônica das PMT's no domínio digital, é necessário que o impulso seja ajustado às condições do experimento. Para desempenhar esta importante tarefa, a Colaboração do Angra desenvolveu o projeto do circuito de *Front-end* das figuras 9 e 10 que pode ser subdividido em 4 estágios, a saber:

Figura 8 – Gráfico de tensão elétrica por tempo de um sinal médio proveniente da PMT, aproximado por uma Gaussiana, evidenciando a perda da informação quando o sistema de aquisição de dados tem frequência de 125 MHz e largura à meia altura (FWHM) de 4 ns.



Fonte: [2]

1. Primeiro Estágio: é o principal estágio de amplificação e responsável por receber o sinal da PMT via cabo coaxial de aproximadamente 52Ω (R_{520R}). O resistor R_{12} de 51Ω foi conectado em paralelo ao capacitor C_{14} de 510 pF à entrada não inversora, para realizar o casamento de impedância. Para um amplificador operacional de entrada não inversora e alta impedância de entrada, o ganho pode ser aproximado por $G_1 = 1 + \left(\frac{R_3}{R_5}\right)$. Neste caso, o ganho do amplificador operacional é de aproximadamente 19. O capacitor C_1 de $1 \mu\text{F}$ e o resistor R_5 de 549Ω propiciam a frequência de corte inferior próxima a 300 Hz. A frequência de corte inferior para o filtro passa-baixa LC- π pode ser calculada por [15]: $f_{baixa} = (2\pi R_5 C_8)^{-1} = 289,98 \text{ Hz}$. O detalhe deste estágio está explicitado na figura 11.
2. Segundo Estágio: foi implementado para que o pulso se torne mais lento e com isso manter o pulso bem comportado quando o sinal satura (sinais da PMT com mais de 50 fotoelétrons). Esta prática faz com a amplitude do sinal também seja reduzida (de aproximadamente -12 mV pico para $-3,5 \text{ mV}$ pico). De acordo com [15], as frequências de corte inferior e superior podem ser determinadas por 3.19 e 3.20 respectivamente. O diagrama elétrico deste estágio pode ser observado na figura 12.

$$f_{2inferior} = \left(\frac{1}{2\pi R_{10} C_{10}} \right) = 159,15 \text{ Hz} \quad (3.19)$$

$$f_{2superior} = \left[\frac{1}{2\pi (R_8 + R_{10}) C_{15}} \right] = 6,57 \text{ MHz} \quad (3.20)$$

3. Terceiro Estágio: O amplificador operacional não-inversor deste estágio introduz um ganho de aproximadamente $G_3 \simeq 3,7$. Neste estágio recupera-se a amplitude e o tempo de subida do pulso é dilatado. O esquema elétrico está representado na figura 13.
4. Quarto Estágio: Este estágio ajusta a amplitude do sinal de saída para o Sistema de Aquisição de Neutrinos (NDAQ) para uma frequência de corte de 19 MHz de modo a otimizar a relação sinal-ruído. Como no primeiro estágio, existe um cabo coaxial de aproximadamente 50Ω , que interliga o *Front-end* ao NDAQ. Portanto, para evitar reflexões, é necessário realizar o casamento de impedâncias, função realizada pelo resistor R_9 . Este resistor conectado em série com circuito de saída também desempenha uma proteção contra curto-circuito na recepção do sinal. O amplificador operacional do quarto estágio é do tipo inversor. O ganho do amplificador operacional inversor com alta impedância de entrada pode ser aproximado por $G_4 = -\left(\frac{R_2}{R_7}\right) = -2,73$. O sinal negativo significa que polaridade da amplitude de saída do amplificador operacional será invertida com relação à de entrada. A figura 14, representa o circuito do quarto estágio.

A análise gráfica da figura 15, auxilia na compreensão das funções básicas do circuito de *Front-end*. Percebe-se o sucessivo alargamento do tempo e a diminuição da amplitude do sinal ao longo dos três primeiros estágios. No último estágio fica caracterizada a inversão da amplitude e dilatação temporal do sinal que será processado pelo NDAQ.

Figura 9 – Esquema Eletrônico do Sistema de Aquisição de Dados Analógico - Parte 1.

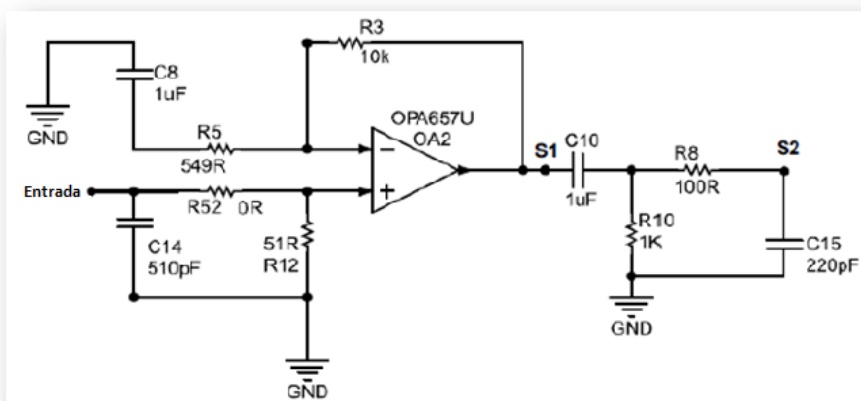
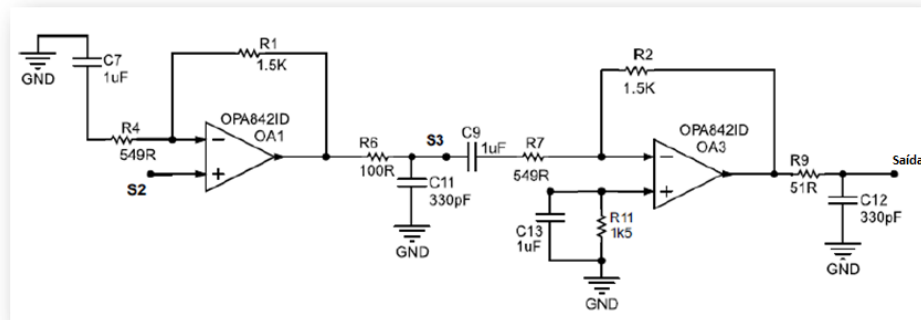
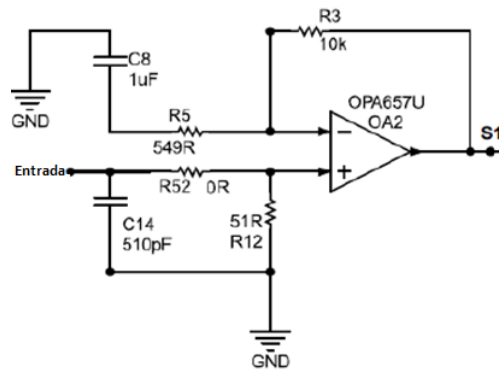


Figura 10 – Esquema Eletrônico do Sistema de Aquisição de Dados Analógico - Parte 2.



Fonte: [2]

Figura 11 – Primeiro estágio do circuito de *Front-end*.

Fonte: Adaptado de [2]

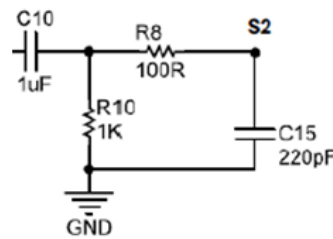
3.8 Composição e evolução do combustível em reatores nucleares

Segundo [1], um detector preciso pode medir a energia e reconstruir a forma do espectro dos antineutrinos com detalhes suficientes para determinar as contribuições de cada isótopo presente no combustível. No ciclo de queima do combustível nuclear podem ser formados outros isótopos como o plutônio, porém suas contribuições para o fluxo de antineutrinos são menores que 0,1%. Um exemplo dos principais isótopos e sua composição média percentual no combustível nuclear estão dispostos na tabela 1.

O monitoramento do reator através da medida do fluxo de antineutrinos tem como metas principais:

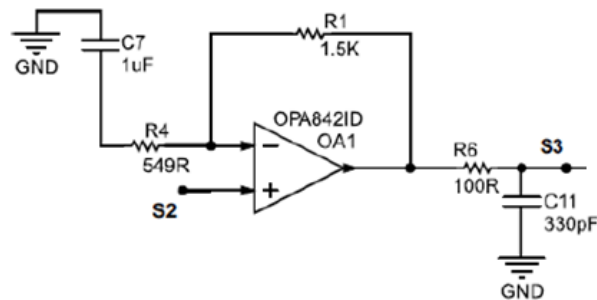
- Validação de metodologia: oferecer um método alternativo e independente do operador

Figura 12 – Segundo estágio do circuito de *Front-end*.



Fonte: Adaptado de [2]

Figura 13 – Terceiro estágio do circuito de *Front-end*.



Fonte: Adaptado de [2]

Tabela 1 – Exemplo de composição média percentual no combustível nuclear.

Isótopo	Fração (%)
^{235}U	55,6
^{239}Pu	32,6
^{238}U	7,1
^{241}Pu	4,7

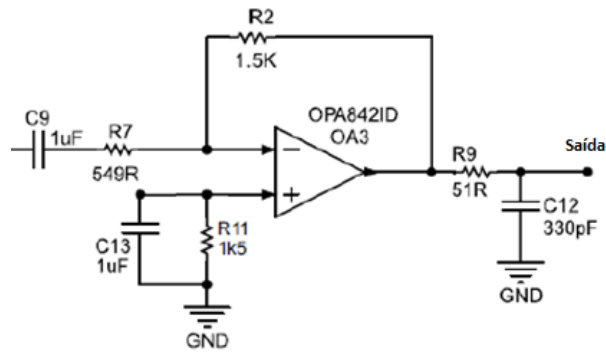
Fonte: [16].

para medir o estado e a potência térmica do reator;

- Estimar a composição isotópica do combustível nuclear no final do ciclo de combustível;

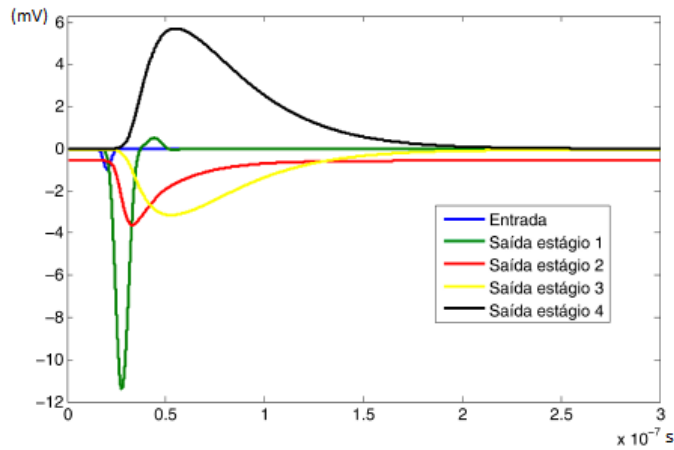
O combustível nuclear novo é composto principalmente de urânio ^{235}U . Uma vez iniciado os processos de fissão, o ^{235}U utilizado como matéria-prima para produção de energia térmica e por conseguinte energia elétrica, é consumido gradualmente ao longo de sua vida útil. Os processos de fissão alteram a contribuição de cada um dos elementos físseis na produção de

Figura 14 – Quarto estágio do circuito de *Front-end*.



Fonte: Adaptado de [2]

Figura 15 – Mix dos estágios do circuito de *Front-end*.



Fonte: [15]

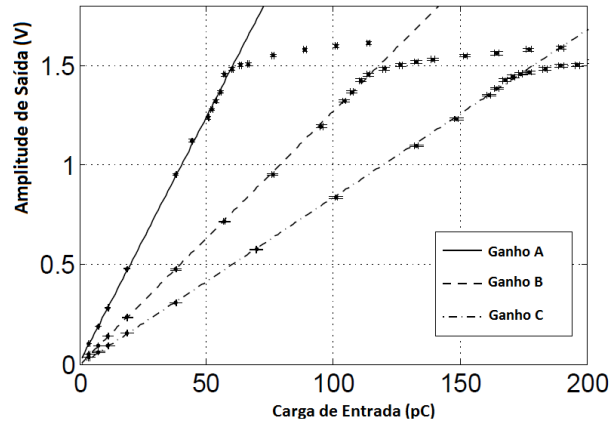
energia nas usinas nucleares. O ^{238}U é consumido em dois processos: na fissão de seu núcleo e para a produção de ^{239}Pu . O ^{239}Pu pode absorver nêutrons produzindo ^{240}Pu que também absorve nêutrons produzindo ^{241}Pu . Este processo é chamado de *burn-up*.

3.9 Relação do combustível nuclear com o espectro de neutrinos

Mikaelyan [9], propôs que a taxa de detecção de antineutrinos do reator de uma usina nuclear fornece uma medida da energia produzida pelo reator, devido a proporcionalidade entre o número de antineutrinos e o número de fissões.

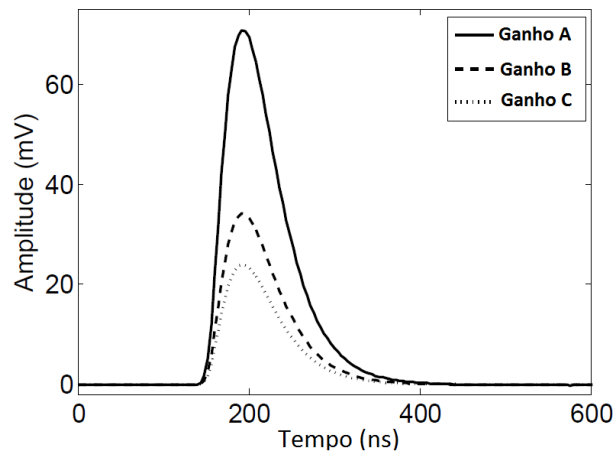
$$N_{\nu} \propto N_{fis} \tag{3.21}$$

Figura 16 – Carga de entrada em função do pico da amplitude medida para três ganhos diferentes.



Fonte: Adaptado de [2]

Figura 17 – Carga de entrada em função do pico da amplitude medida para três ganhos diferentes.



Fonte: Adaptado de [2]

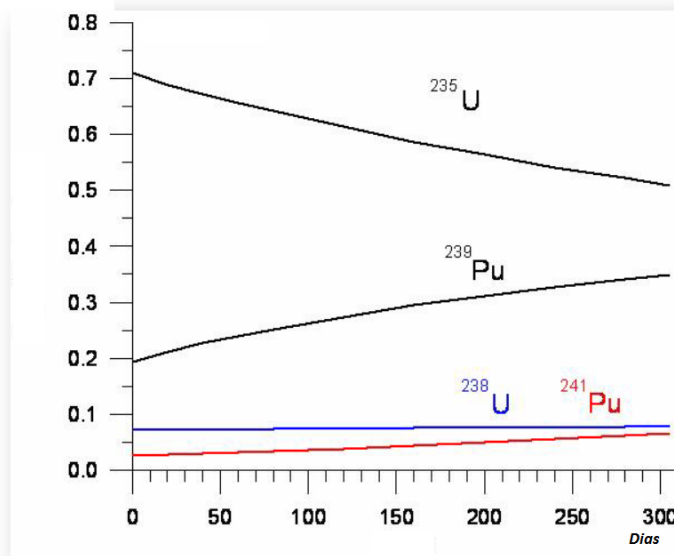
O número de fissões $N_{\text{fissões}}$ é definido pela relação entre a potência térmica P_{ter} desenvolvida pelo reator e a energia média liberada por fissão \bar{E}_f . No caso específico do reator nuclear da Usina de Angra II com $P_{\text{ter}} = 4 \text{ GW}$ e $\bar{E}_f = 203,78 \text{ MeV}$, temos:

$$N_{\text{fissões}} = \frac{P_{\text{ter}}}{\bar{E}_f} = \frac{4 \times 10^9}{203,78 \times 10^6 \times 1,6 \times 10^{-19}} = 1,23 \times 10^{20} \text{ Hz} \quad (3.22)$$

Podemos escrever [11] a relação entre a energia liberada por fissão e o número de eventos no detector conforme 3.23:

$$N_v = \frac{1}{4\pi R^2} \frac{P_{\text{ter}}}{\bar{E}_f 1,6 \times 10^{-19}} n_p \epsilon \bar{\sigma}_f \quad (3.23)$$

Figura 18 – Gráfico ilustra um exemplo da parcela de cada elemento físsil durante processo de queima gradual de um combustível nuclear ao longo do tempo.



Fonte: [1]

Onde:

$$\bar{E}_f = \sum_i \alpha_i E_i \quad (3.24)$$

$$\bar{\sigma}_f = \sum_i \alpha_i \sigma_i \quad (3.25)$$

A análise dimensional do segundo quociente da equação 3.23 nos fornece a informação sobre a taxa de atividade do reator nuclear em [Hz] ou [s^{-1}]. A energia média por fissão e a seção de choque média descritas nas 3.24 e 3.25 respectivamente, mostram a dependência das suas magnitudes com a composição isotópica do combustível nuclear. Expandindo o somatório das expressões 3.24 e 3.25 e substituindo o resultado em 3.23, obtemos uma relação direta e linear entre o número de eventos de antineutrinos e sua dependência com a potência térmica do reator e com a composição isotópica do combustível nuclear. Esta última, por sua vez, tem uma dependência temporal (*burn up* do combustível). Finalmente, a relação entre o combustível nuclear e potência térmica do reator com o espectro de antineutrinos pode ser sintetizado pela expressão 3.26. O desenvolvimento matemático está detalhado no apêndice A.

$$N_{\nu} = \Gamma[1 + k(t)]P_{ter} \quad (3.26)$$

Nota-se explicitamente pela equação 3.26, que o número de antineutrinos provenientes do decaimento β no interior do reator durante o processo de fissão nuclear, tem dependência temporal por sofrerem alterações pelos efeitos da queima do combustível nuclear. Isto evidencia e torna mensurável como cada isótopo contribui com o espectro de antineutrinos. A estimativa mais otimista para o número de eventos detectados com as características do Experimento Neutrinos, é que sejam previstos aproximadamente 5070 antineutrinos por dia, em média 1 evento de antineutrino a cada 17 segundos.

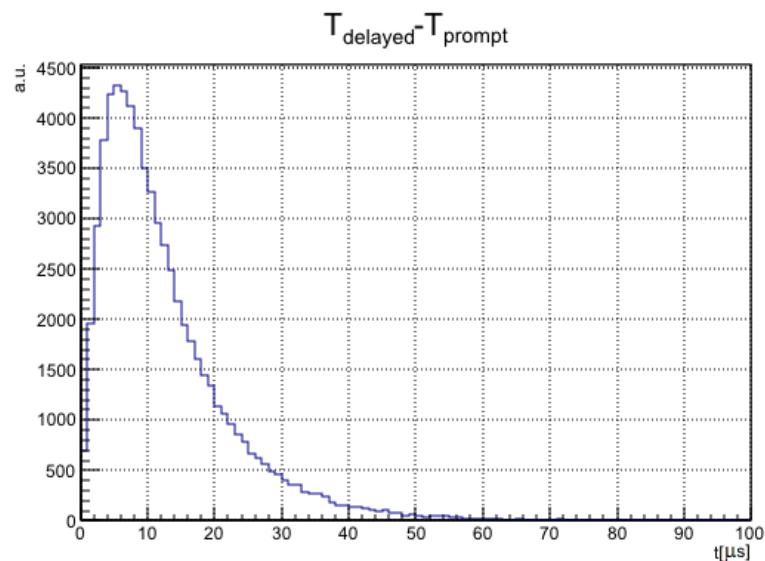
3.10 Regras de seleção

3.10.1 Caracterização do sinal e *background*

Por se tratar de um detector de superfície, o experimento Neutrinos Angra está sujeito à alta taxa de radiação cósmica de fundo da ordem de 10^3 eventos por segundo. Além disso, mesmo para completa escuridão no interior do detector, o fabricante da PMT Hamamatsu R5912 descreve em seu catálogo, que os fotomultiplicadores estão sujeitas a disparos de radiação típicos de 5×10^3 contagens por segundo. Estes disparos são devidos à sua corrente de escuro. A corrente de escuro é caracterizada por disparos aleatórios e acidentais de radiação eletromagnética relacionados principalmente à uma pequena quantidade do material radioativo de Césio presente na composição das fotomultiplicadoras. Estes disparos produzem um sinal na saída do fotocátodo mesmo sem ter sido sensibilizado. Em geral, estes disparos tem energia menores que 5 fotoelétrons, contribuindo ainda mais para os eventos falsos. Em contrapartida, como será demonstrado pela equação A.8, o evento de interesse ocorre apenas a cada 17 segundos em média. Logo, o sinal do circuito de *front-end* deve possuir algumas características para que o evento de interesse - a assinatura do antineutrino -, seja fisicamente tratado de maneira adequada. O sistema de aquisição deve ter a faculdade de identificar um único fóton e ter uma faixa de comportamento linear de operação até 50 fótons. Os eventos com número de fótons superiores a 50, tem grande probabilidade de serem originários de raios cósmicos. Entretanto, o circuito deve apresentar a saturação bem comportada neste panorama. Um alargamento desmedido na largura do pulso pode provocar o empilhamento dos eventos. Como foi descrito na seção 3.5, a duração de dois pulsos consecutivos que caracterizam a assinatura do antineutrino $\bar{\nu}_e$ (sinal

imediatamente e atrasado), tem grande probabilidade de ocorrer no intervalo de tempo de $50 \mu\text{s}$ para uma concentração de 0,3% em massa de sal de gadolínio. A figura 19 ilustra a diferença de tempo entre o sinal imediato e atrasado. Nesta figura também podemos observar que o intervalo mais provável está na casa dos $10 \mu\text{s}$. Portanto, temos uma janela de tempo entre os dois Cherenkovs *-prompt-delayed*, de 5 vezes o tempo mais provável. Espera-se que mais de 99% do fenômeno ocorra neste intervalo. O intervalo de tempo mais provável foi obtido por engenharia reversa, ou seja, desejou-se descobrir qual a concentração de sal de gadolínio seria necessária para que este tempo fosse próximo a $10 \mu\text{s}$. Portanto, o circuito de *front-end* deve ser capaz de identificar e caracterizar um pulso menor que poucos μs reduzindo assim o empilhamento dos eventos no detector [15].

Figura 19 – Diferença de tempo entre o sinal imediato e atrasado. Temos uma probabilidade de 95% de encontrar um evento de neutrino para uma concentração de 0,3% de sal de gadolínio (ou seja, 99,7% do alvo é composto por água e 0,3% em massa de sal de gadolínio) entre 0 e $30 \mu\text{s}$. No entanto, pode ser considerado um intervalo de tempo de até $50 \mu\text{s}$ sem prejudicar a identificação do evento.



Fonte: [15]

3.10.2 Otimização do sinal

Nesta seção será discutido como os critérios de seleção de tempo e energia são aplicados para identificação do sinal de interesse e caracterização do ruído de fundo (*background*), ou seja, a separação do sinal-ruído através da análise da forma e distribuição das partículas primárias. Entende-se como primárias, as partículas carregadas com velocidade acima do limiar de Cherenkov e que portanto, estão aptas para serem identificadas pelas PMT's que chegam ao detector. O sistema de aquisição de dados possui uma resolução de 8 ns. Entretanto, são adquiridas 64

amostras antes que o tratamento do sinal seja iniciado pela linha de base do circuito. Ocorrerá então uma integração amostral totalizando uma janela temporal de 512 ns. Todos os fotoelétrons gerados neste intervalo temporal, serão avaliados com um pulso único ou sinais em coincidência [8]. A forma de onda que identifica um fóton na eletrônica de *front-end* tem um intervalo de tempo de aproximadamente 100 ns. Para uma janela de 512 ns do NDAQ, temos portanto no mínimo de 5 fotoelétrons. Neste sentido, podemos inferir o **veto de ordem zero em energia** dos critérios de seleção. Portanto, os fótons com energia inferiores a 5 p.e. devem ser excluídos da contagem dos eventos de antineutrinos.

Considerando que cada uma das 32 PMT's contribui com uma taxa 5 kHz de disparos aleatórios devido à sua corrente de escuro, o detector central está sujeito a um ruído global de aproximadamente 160 kHz. O veto de ordem zero contribui no sentido de reduzir quantidade de disparos a um nível aceitável, a partir do conhecimento prévio número de p.e. em coincidência requerido. Por exemplo, se for exigido pelo menos 5 p.e. em coincidência, usando a equação 3.27, reduzimos a taxa de ruído em mais de quatro ordens de grandeza, de 160 kHz para pouco menos de 10 Hz[8]!

$$R_{coin} \simeq R_{ruído}^n \Delta T^{(n-1)} \simeq (160 \text{ kHz})^5 (512 \text{ ns})^4 \simeq 7,21 \text{ Hz} \quad (3.27)$$

Onde R_{coin} representa a taxa de coincidências desejada, $R_{ruído}$ diz respeito à taxa contagem do ruído das partículas, ΔT a janela de tempo e n o número de fótons considerados na janela de coincidência. Desta forma, a contribuição da taxa de ruído devido à corrente de escuro fica bem abaixo da contribuição da taxa de *background* devido às outras fontes de ruído como as de partículas eletromagnéticas, múons e hádrons. Para concentração de 0,3% de gadolínio, foi extraído o gráfico da figura 19. Nele, nota-se que 99% dos eventos que caracterizam a assinatura do antineutrino, ou seja, a dupla coincidência entre pósitron e a termalização do nêutron, está no intervalo de tempo entre 0 e 50 μ s. Podemos extrair das figuras 22 e 23 que a grande maioria dos sinais oriundos do pósitron e do nêutron situam-se no *range* de energia até 200 p.e. De posse dessas informações, foram desenvolvidas regras de seleção de tempo e energia para filtrar o evento de interesse. A seleção física dos eventos, que trata da diferença de tempo entre os sinais *prompt* e *delayed*, ademais chamadas de *TimeSelection1* e *TimeSelection2*, serão de 0 a 50 μ s e de 5 a 50 μ s, respectivamente. O corte em energia, deve ser definido entre um intervalo mínimo de forma a excluir os disparos aleatórios e acidentais das PMT's e máximo de energia que caracterizam os múons da radiação cósmica. Neste sentido, foram elaboradas regras de

seleção em energia denominadas de *Selection1* e *Selection2* com intervalos entre 10 e 200 p.e. e 20 a 150 p.e., respectivamente. Para ambas seleções de energia e tempo, serão vetados os eventos com energia superiores a 5 p.e. fora do alvo. A referência [8] descreve a sistemática das estratégias de separação do sinal de interesse e do ruído pelo método de Monte Carlo. Nela, o autor desenvolve uma macro computacional em linguagem C++ batizada de *Mixer*. Esta macro tem como objetivo principal, dar uma distribuição temporal da mistura das contribuições sinal e ruído. Esta estratégia é a que mais se aproxima da situação real do detector de partículas após ser instalado próximo ao reator nuclear de Angra II. Utilizando a simulação pelo método Monte Carlo, foram coletadas durante o período de 24 horas, duas amostras de antineutrinos mais *background* (sinal + BG). A primeira amostra selecionou 204.334 eventos candidatos. Este é o total de eventos coletados em 24h com o detector à uma distância de 30 metros do reator nuclear ($N_{\bar{\nu}_e+BG}$). Simulando a coleta de eventos em 24h com reator desligado ou à uma distância grande, obtém-se o número de eventos de *background*, N_{BG} . O número de líquido de eventos de $\bar{\nu}_e$ será dado pela diferença expressa na equação 3.28:

$$N_{\bar{\nu}_e} = N_{\bar{\nu}_e+BG} - N_{BG} \quad (3.28)$$

Aplicando a regra $S1 = Selection1 + TimeSelection1$, o resultado foi: $2747\bar{\nu}_e + 201587BG$. A eficiência foi de $(61 \pm 1)\%$, considerando apenas incertezas estatísticas de Poisson. Ou seja, 61% de um total de aproximadamente 4500 eventos previstos para o período utilizando os cortes e seleções de tempo e energia de $S1$ por Monte Carlo. A relação sinal-ruído foi $S/\sqrt{BG} = 6,1 \pm 0,2$. Repetindo o processo para a estratégia $S2 = Selection2 + TimeSelection2$, o total de candidatos foram $71110 = 1946\bar{\nu}_e + 69164 BG$. A eficiência foi de $(43 \pm 1)\%$ e a relação sinal-ruído de $S/\sqrt{BG} = 7,4 \pm 0,5$. Os resultados sem o *Mixer* ($S1$ e $S2$) e com (*Mixer* para $S1$ e *Mixer* para $S2$) estão sintetizados na tabela 2.

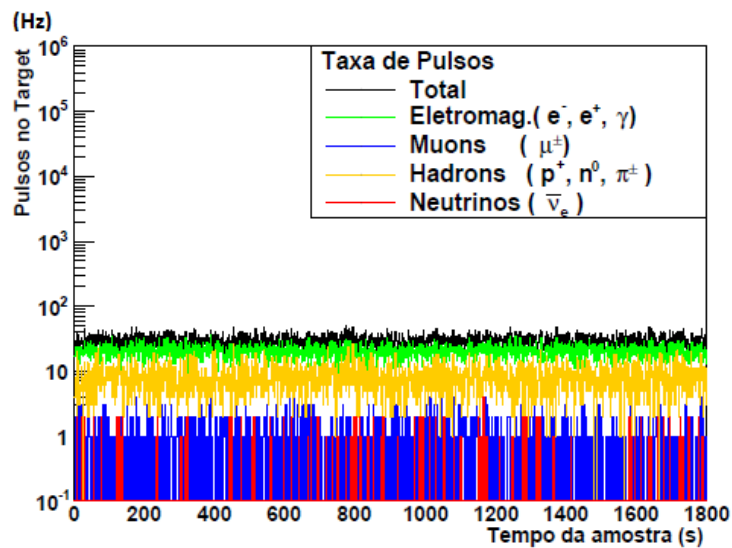
Tabela 2 – Análise comparativa entre as estratégias para determinação do Sinal-Ruído para 24 horas de aquisição de dados. $S1 = Selection1 + TimeSelection1$ e $S2 = Selection2 + TimeSelection2$.

Estratégia	$\bar{\nu}_e$ /dia	Eficiência	Sinal/Ruído (S/\sqrt{BG})
S1	~ 4000	79%	38
S2	~ 2000	54%	29
Mixer para S1	$(2,75 \pm 0,45) \times 10^3$	$(61 \pm 1)\%$	$(6,1 \pm 0,2)$
Mixer para S2	$(1,95 \pm 0,27) \times 10^3$	$(43 \pm 1)\%$	$(7,4 \pm 0,5)$

Fonte: Do autor.

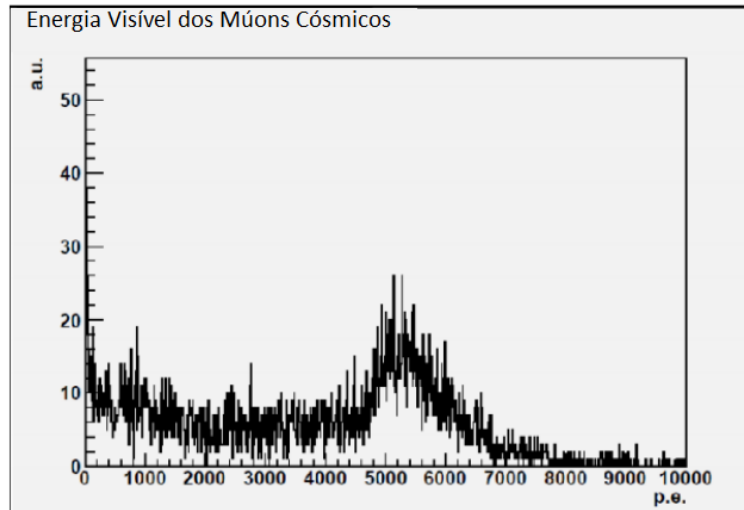
Os resultados comparados com os obtidos na avaliação pré-*Mixer* evidenciam uma discrepância nos valores de eficiência e na relação sinal-ruído. Isto pode ser atribuído ao fato de que, as estratégias pré-*Mixer* utilizam um critério de seleção que remove o evento como um todo. Enquanto que, a seleção com o *Mixer*, elimina os pulsos individualmente. Nesta perspectiva, podemos inferir que o resultado pré-*Mixer* superestima a quantidade de sinais de interesse filtrados pelas regras de seleção.

Figura 20 – Sinal Background após aplicação da regra S1 = Selection1 + TimeSelection1. Estão representadas as frequência de pulsos de p.e. (em janelas de 512 ns) de *Background* e $\bar{\nu}_e$ no alvo do detector. A taxa média total de 1,5 kHz caiu para 36 Hz. S1 foi mais eficiente para filtrar a componente de *background* relacionada aos múons.



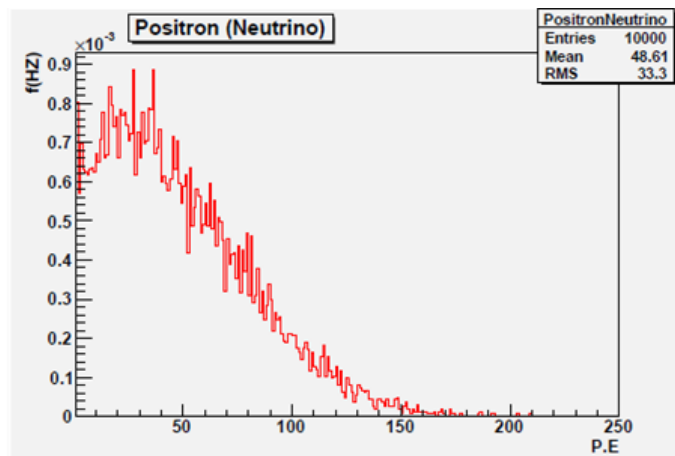
Fonte: [15]

Figura 21 – Quantidade de fotoelétrons produzidos por múons cósmicos.



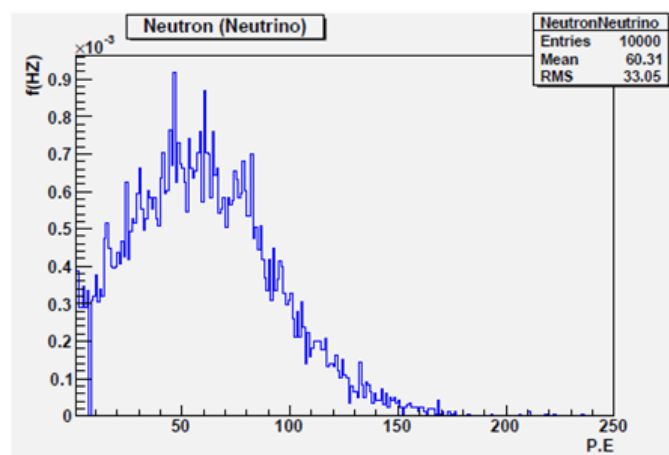
Fonte: [15]

Figura 22 – Distribuição de fotoelétrons produzidos por um pósitron. Sinal de Energia Imediato. Nota-se que a grande maioria dos sinais oriundos do pósitron e do nêutron situam-se no range de energia até 200 p.e.



Fonte: [15]

Figura 23 – Distribuição de fotoelétrons produzidos por um nêutron. Sinal de Energia Atrasado. Nota-se que a grande maioria dos sinais oriundos do pósitron e do nêutron situam-se no *range* de energia até 200 p.e.



Fonte: [15]

4 ATUALIZAÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO COMPUTACIONAL

4.1 GDML: *Geometry description markup language*

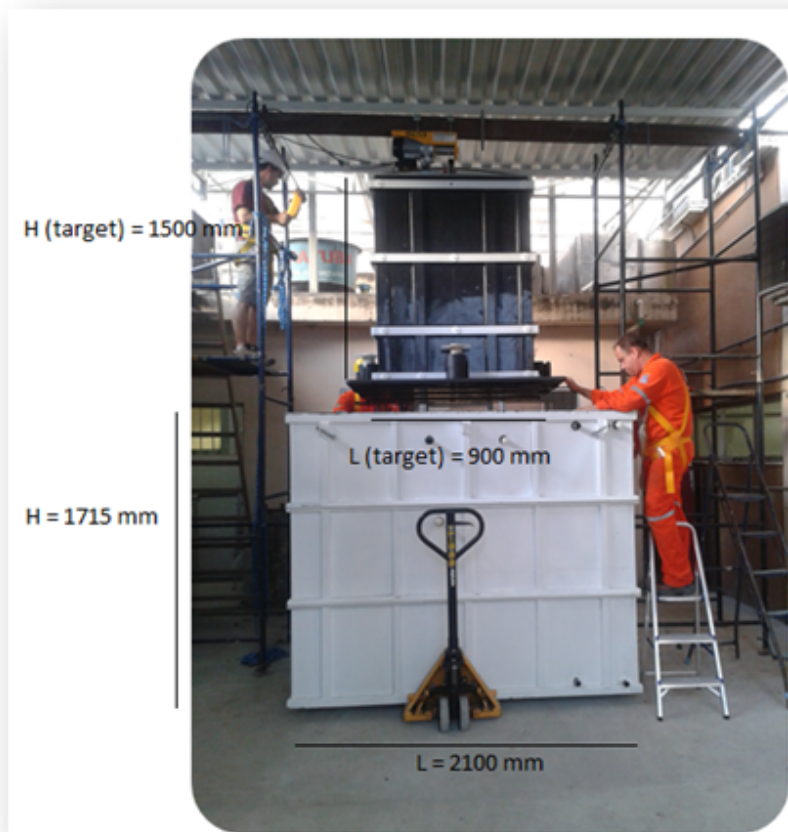
4.1.1 Por que atualizar a geometria do detector?

Da concepção inicial do experimento até a montagem final, o detector passou por modificações físicas, dimensionais e estruturais. Com este trabalho, pretende-se atualizar o modelo geométrico do detector do Experimento Neutrinos Angra, além de validar esta nova geometria via simulação computacional. A simulação tem como objetivo reproduzir, de forma mais fidedigna possível, a realidade do funcionamento do detector após sua instalação ao lado reator da Usina Nuclear de Angra II. Para tanto, para construir o novo modelo geométrico computacional, o autor desta tese compareceu ao Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas CBPF-RJ, onde o detector estava sendo submetido aos testes finais, para dentre outras atividades, coletar as dimensões e materiais utilizados no detector, em vez de valores idealizados de projeto utilizado nas simulações anteriores.

Para atualizar a geometria do detector, foi utilizado o formato de arquivo *Geometry Description Markup Language*, o GDML. A principal motivação em usar o GDML foi a tentativa de criar uma descrição para geometria de detectores única para diversas linguagens. O GDML é baseado na estrutura hierárquica XML (*eXtensible Markup Language*). O XML, além de ser um formato de arquivo aberto, tem como característica uma estrutura de escrita simples e pode ser adaptado para descrever diversos tipo de dados.

Como as simulações são imprescindíveis em todos os experimentos, esta flexibilidade confere ao GDML amplas possibilidades, tornando-o uma poderosa ferramenta para ser utilizada em física de partículas de altas energias. Um exemplo mundialmente conhecido da aplicação do formato XML é a extensão atual do pacote Office[©] da Microsoft. As extensões .doc, .xls e .ppt, passaram a ser denominadas .docx, .xlsx e .pptx. O motivo do acréscimo do "x": terem sido reformuladas na estrutura do formato XML. Utilizando a mesma ideia, um grupo de pesquisadores criaram um formato de arquivo, tomando por base o XML para descrever geometria. Eles sintetizaram o que era necessário para as simulações de geometria, adaptando e aliando estas

Figura 24 – Algumas dimensões do detector de antineutrinos do Experimento Neutrinos Angra tiradas no CBPF-RJ.



Fonte: Do autor.

informações aos recursos e ferramentas do XML. A partir daí, criaram o que hoje é conhecido como formato de arquivo GDML.

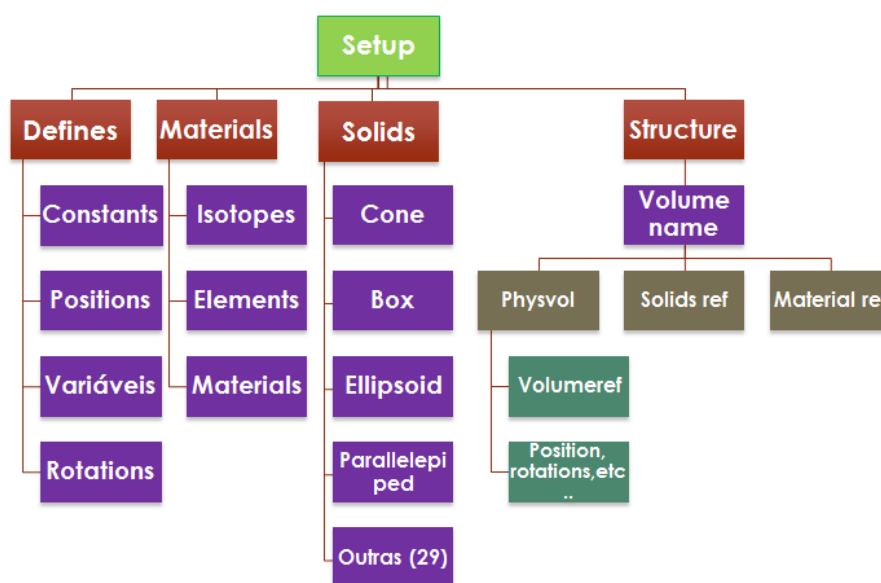
4.1.2 Estrutura do GDML

Os pacotes de simulação utilizados no Root, Geant4 e outros, possuem classes de C++ utilizadas para criar na memória o que seria equivalente ao modelo geométrico dos detectores e suas medidas físicas. Geralmente essas classes são utilizadas, dentre outras funções, para criar união, subtração e intersecção de sólidos. Antes de existir a opção do formato em GDML, as classes de C++ eram declaradas pelo programador e as bibliotecas que seriam utilizadas dependiam do tipo de sistema, como por exemplo, o Root e o Geant4. Apesar do objetivo ser o mesmo, o de construir na memória o correspondente ao modelo geométrico do detector, cada uma tem sua forma específica e peculiar de fazer.

Anteriormente à utilização do GDML, para construir um modelo geométrico de detectores como o do Experimento Neutrinos Angra, o programador organizava as classes para criar a geometria. Atualmente, apesar das classes ainda existirem, o que se faz é passar uma lista de comandos onde a própria biblioteca se baseia para organizar as classes de geometria e criar o detector na memória. O principal ganho com este deslocamento de função é que temos agora uma única linguagem de geometria que pode ser simulada entre diferentes sistemas.

Sintetizando, o GDML é utilizado para descrever a geometria de detectores e suas medidas físicas. Seu formato de arquivo é flexível, isto é, permite o intercâmbio da mesma geometria em diferentes aplicações. Sua estrutura geral é organizada pela hierarquia tipo árvore e pode ser dividido em cinco blocos: *<define>*, *<materials>*, *<solids>*, *<structure>*, *<setup>*. Cada um guardando diferentes tipos de dados [17]. Um organograma expandido da estrutura geral do GDML é ilustrada na figura 25.

Figura 25 – Estrutura geral do GDML.



Fonte: Do autor.

4.1.3 Exemplo de Aplicação: Construindo uma PMT

Nesta seção, descreve-se uma aplicação simples da sintaxe para a construção de uma das 48 fotomultiplicadores utilizadas no detector. O arquivo completo em formato GDML está descrito no apêndice B.

1. Bloco 1 **<define>**: Neste bloco são definidos os valores numéricos das constantes, posições

e rotações. A PMT é posicionada no ponto -842 mm da coordenada x em relação ao centro do detector. Foi rotacionada de 90 graus em relação ao eixo x.

```

1 <define>
2 <constant name="BowlInVetoX-U-1" value="-842." />
3 <position name="posBowl" unit="mm" x="0" y="0" z="0"/>
4 <rotation name="rotateXP90" unit="deg" x="90" y="0" z="0"/>
5 </define>

```

2. Bloco 2 **<materials>**: Neste bloco são definidos os materiais utilizados na geometria e suas propriedades. A PMT é feita de vidro, que por sua vez, é composto de outros materiais conforme descrito nas frações indicadas.

```

1 <material>
2 <material name="Glass">
3 <D value="2.74351" unit="g/cm3"/>
4 <fraction n="0.600" ref="SiO2"/>
5 <fraction n="0.118" ref="Al2O3"/>
6 <fraction n="0.001" ref="Fe2O3"/>
7 <fraction n="0.224" ref="CaO"/>
8 <fraction n="0.034" ref="MgO"/>
9 <fraction n="0.010" ref="Na2O"/>
10 <fraction n="0.013" ref="TiO2"/>
11 </material>

```

3. Bloco 3 **<solids>**: Neste bloco são definidos os sólidos utilizados na geometria. Para construir a abóboda da PMT (elipsoide), foi utilizado um recurso denominado sólidos booleano. Este artifício foi necessário para subtrair um elipsoide de vácuo do elipsoide maciço de vidro.

```

1 <solids>
2 <ellipsoidname="ellipBowl" ax="PmtR" by="PmtR" cz="PmtH" zcut1="0"/>
3 <ellipsoidname="ellipVacuum" ax="PmtR-PmtT" by="PmtR-PmtT" cz="PmtH
   -PmtT" zcut1="0"/>
4 <subtraction name="pmtBowlTargetIn">
5 <first ref="ellipBowl"/>
6 <second ref="ellipVacuum"/>

```

```
7 <position name="pospmtBowl" unit="mm" x="0" y="0" z="-eD" />
8 </subtraction>
9 </solids>
```

4. Bloco 4 **<structure>**: Neste bloco são definidos os volumes referenciando-os aos sólidos e materiais previamente descritos.

```
1 <structure>
2 <volume name="volPMTTargetIn">
3 <materialref ref="Glass" />
4 <solidref ref="pmtBowlTargetIn" />
5 </volume>
6 </structure>
```

5. Bloco 5 **<setup>**: Neste bloco são definidos os volumes principais. O volume volWorld representa a convergência de todos os volumes filhos que foram definidos nos blocos anteriores.

```
1 <setup name="Default" version="1.0">
2 <world ref="volWorld" />
3 </setup>
```

4.2 O detector de partículas!

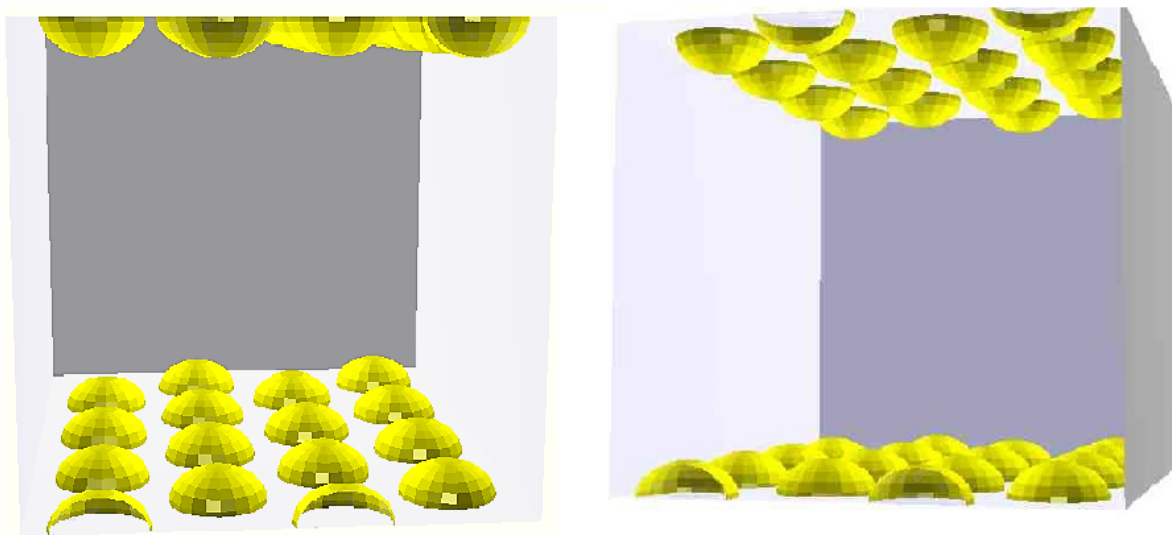
Esta seção exibe o resultado da atualização do modelo geométrico computacional do detector. Como foi mencionado, o modelo foi construído em formato GDML. A visualização da geometria foi realizada em Geant4 utilizando o arquivo especial em ambiente Root *geovis.C*. O Root trata-se de um *framework* de análise de dados, isto é, um conjunto de bibliotecas em C++. As bibliotecas foram desenvolvidas pelo CERN (*European Organization for Nuclear Research*), exclusivamente para a análise de dados e simulação. A linguagem de programação C++ contém a estrutura da linguagem C e incrementa um novo paradigma de orientação a objetos.

4.2.1 O Alvo Central

O alvo central ou simplesmente *target* é o coração do detector. Possui um total de 32 PMT's, sendo 16 instaladas na base inferior e 16 na superior, conforme indicado nas figuras 26 e

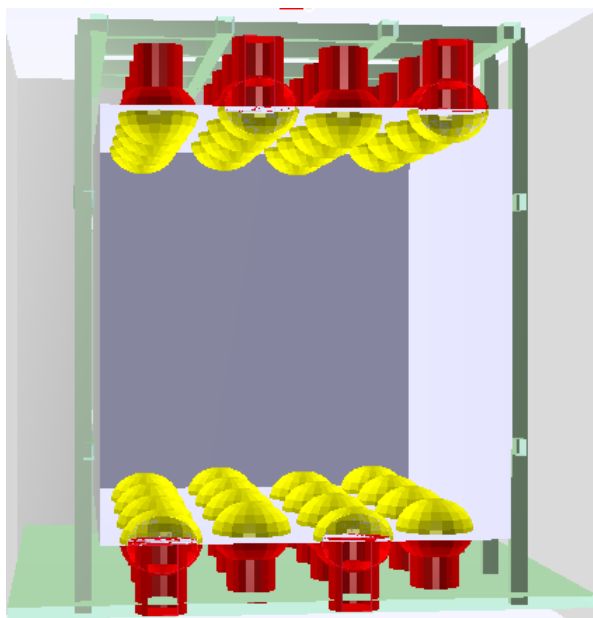
27. O *box* do alvo central é feito de polipropileno e armazena uma solução de aproximadamente 1000 kg de água a uma concentração de 0,3% de cloreto de gadolínio.

Figura 26 – PMT's do alvo central do detector. Para efeito de simulação computacional, apenas compõem o alvo central, as abóbodas dos hemisférios superiores das PMT's.



Fonte: Do autor.

Figura 27 – Alvo central do detector construído a base de polipropileno, em verde. As abóbodas inferiores e as bases das PMT's são destacadas em vermelho.

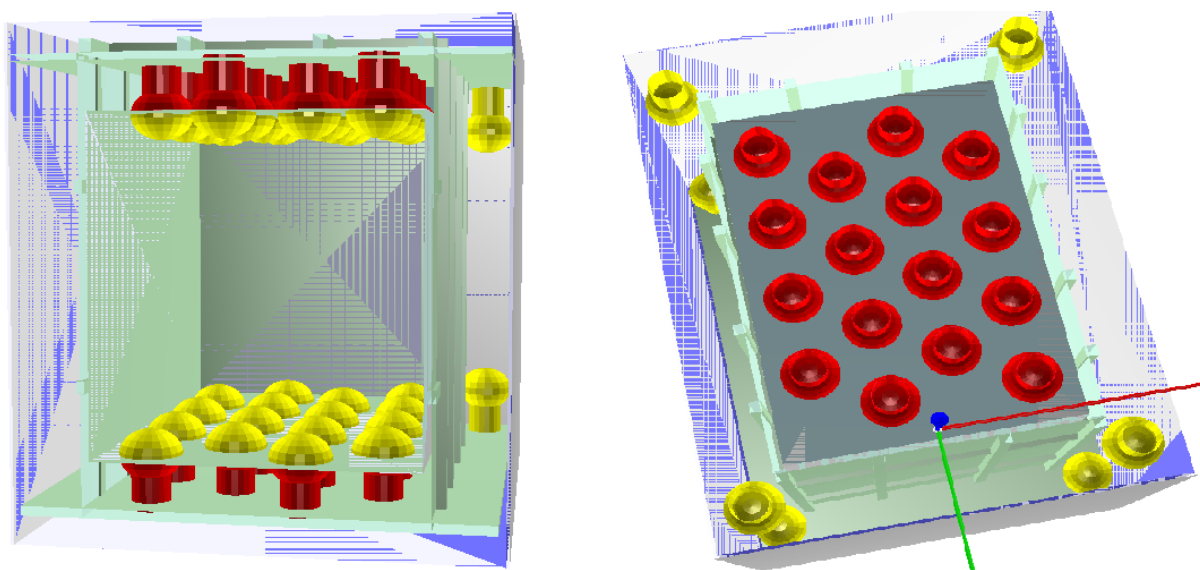


Fonte: Do autor.

4.2.2 O Sistema de Veto

Por ser instalado para operar na superfície, o detector estará sujeito a uma taxa de ruído, devido principalmente aos múons da radiação cósmica de fundo. Estes eventos espúrios são quatro ordens de grandeza superiores ao evento de interesse oriunda do decaimento beta inverso. Enquanto a taxa de ruído de fundo é de 350 Hz, a assinatura do antineutrino no alvo central ocorre com frequência média de 60 mHz. Para que o Experimento tenha êxito, faz-se necessário reduzir drasticamente o número de múons cósmicos que chegam no alvo central. Neste sentido, foi instalado em torno do alvo, um sistema de blindagem interna e externa, incluindo os vetos inferior e superior de maneira a minimizar os eventos falsos.

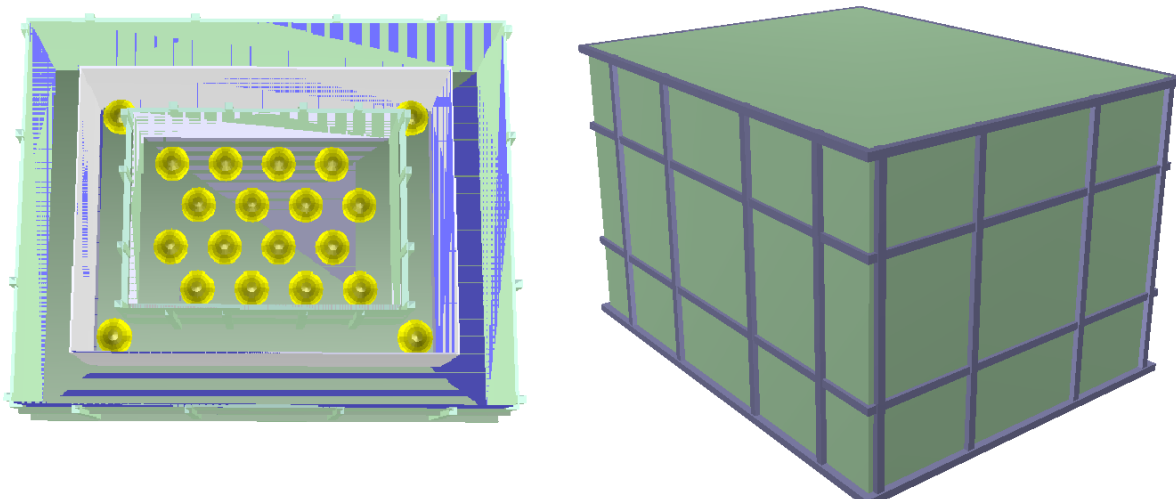
Figura 28 – O sistema de veto interno possui 8 PMT's, confeccionado em polipropileno e preenchido com água destilada. Diminuir o ruído de fundo, especialmente de nêutrons cósmicos, é a principal função desta blindagem interna que reveste o alvo.



Fonte: Do autor.

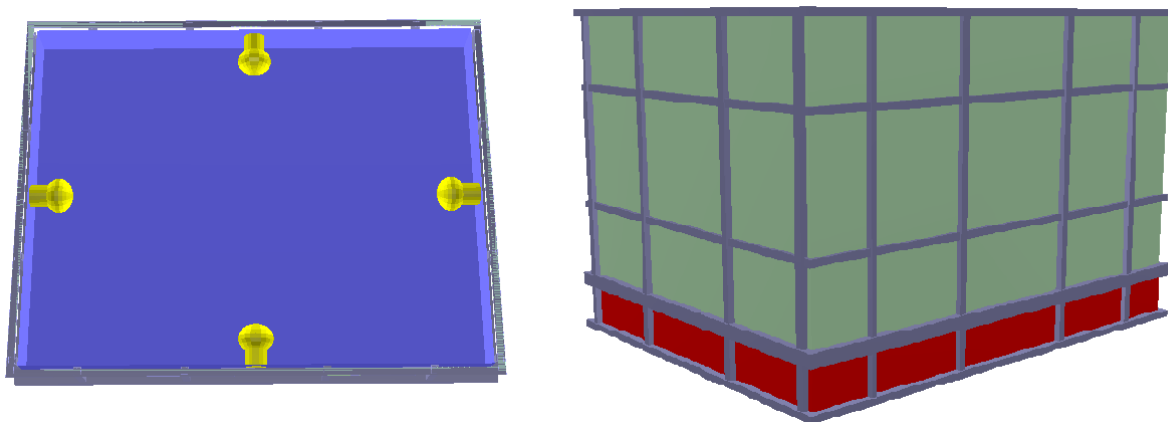
Esta estrutura física, aliada aos métodos de seleção e cortes em energia e tempo descritos na seção 3.10 são utilizadas para filtrar o evento de antineutrino dos que ocorrem fora das características do fenômeno de interesse.

Figura 29 – O sistema de blindagem externa ou *shield* não possui PMT's. Ele é construído de polipropileno revestido com um reforço mecânico em aço e preenchido com água. A principal função desta blindagem externa é auxiliar a blindagem interna a diminuir o ruído de fundo e também vetar ruído de baixa energia como a radiação natural.



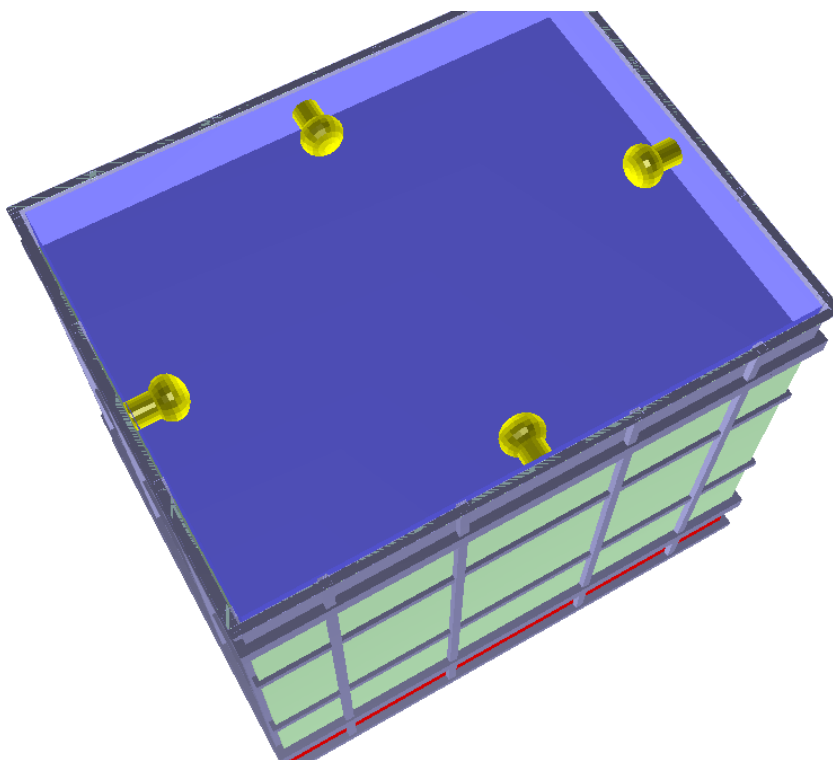
Fonte: Do autor.

Figura 30 – O veto inferior destacado em vermelho possui 4 PMT's localizadas no centro de cada lado. Como o *Shield*, os vetos são construído a base de polipropileno, revestidos com um reforço mecânico em aço e preenchidos com água. O sistema auxilia na exclusão de eventos falsos.



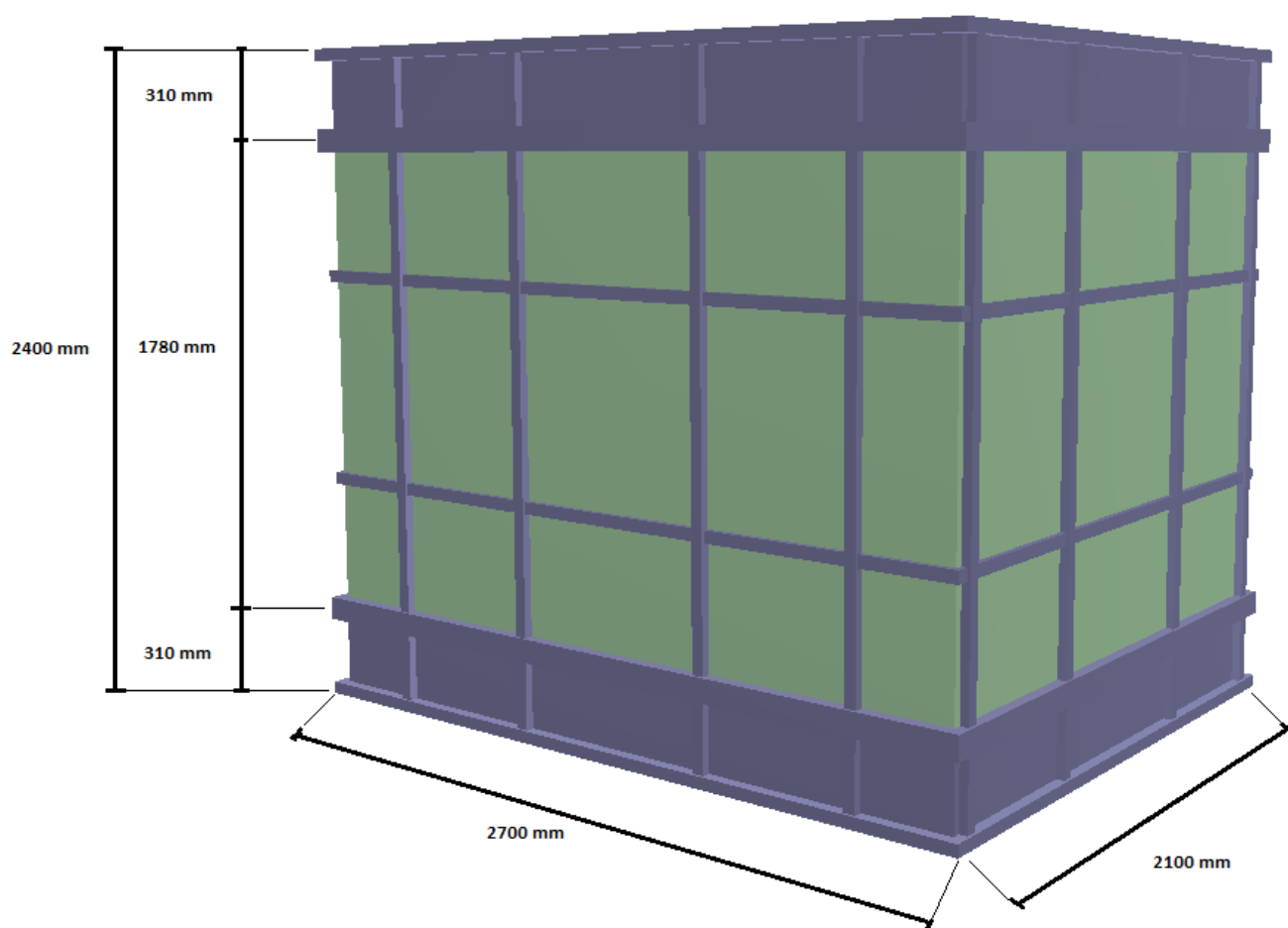
Fonte: Do autor.

Figura 31 – O veto superior possui 4 PMT's localizadas no centro de cada lado do tanque. É construído de polipropileno revestido com um reforço mecânico em aço e preenchido com água. Analogamente aos demais sistemas de veto, auxilia na separação entre o ruído e do evento de interesse.



Fonte: Do autor.

Figura 32 – Detector de partículas do Experimento Neutrinos Angra.



Fonte: Do autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Critérios e definições

A estrutura hierárquica da nova geometria do detector foi construída a partir da definição dos materiais, elementos e substâncias químicas. Suas principais propriedades físicas (densidade e número de átomos) e propriedades ópticas (reflexão e opacidade), também foram levadas em consideração. Em seguida, foram implementados os volumes dos sólidos. A estrutura do detector foi utilizada como um todo na simulação computacional, de modo que o modelo virtual retratasse fidedignamente a realidade do detector. As dimensões utilizadas foram aferidas diretamente através de medidas *in loco*, em vez de valores idealizados utilizados nas simulações anteriores. A nova versão da geometria do detector Neutrino Angra, retratada no capítulo 4, é tão próxima da realidade quanto se possa desejar. O próximo passo lógico é validar esta geometria. Neste contexto, validar a geometria do detector significa confirmar e dar sustentação ao que se espera, do ponto de vista da física da interação de antineutrinos com o detector.

A validação do modelo geométrico foi realizada via simulação computacional por Método de Monte Carlo para o transporte de radiação pela matéria, através do Geant4. Como critério de validação, o leitor deve ter em mente que nossa análise consiste em verificar se os resultados obtidos nas simulações: i) tem as características de um evento de antineutrino e ii) apresentam resultados condizentes com as simulações anteriores. O primeiro ponto vem do estudo da diferença de tempo entre os sinais *prompt* e *delayed*, a qual deve revelar se a física de Cherenkov e de captura de neutrons é realista, incluindo os efeitos do gadolínio. Já o segundo vem da aplicação dos critérios de seleção discutidos anteriormente na seção 3.10 e sua comparação com os resultados alí descritos. Para chegar neste ponto, é preciso compreender a estrutura da informação de saída da simulação.

Dentre as etapas da simulação, a última tem a função de codificar as informações da física virtual e apresentá-las da mesma forma que o sistema de aquisição de dados irá registrar os sinais no detector real. Uma nova nomenclatura se faz necessária, a qual é apresentada a seguir.

- **Evento:** são as interações no interior do detector. Pode ser uma interação de antineutrino devido ao decaimento beta inverso ou uma interação de raio cósmico/(*background*).

- **Fotoelétron:** é o evento físico que ocorre quando um elétron é arrancado do material da fotomultiplicadora (PMT) por um fóton com energia suficiente produzido pela radiação Cherenkov.
- **Hit:** em suma um *hit* ou um sinal, representa como o sistema de aquisição de dados (NDAQ) observa um antineutrino. Isto é, quando o pósitron oriundo do decaimento beta produz radiação Cherenkov no detector, existe a probabilidade (dada pela eficiência quântica), deste fóton produzir um fotoelétron na interação com o material da PMT. Este provável fotoelétron é amplificado pelo circuito analógico das PMT's e digitalizado em um pulso pelo circuito da eletrônica de *front-end*. Resumindo, um *hit* é um fotoelétron que passou pelo filtro da eficiência quântica da PMT e foi reconstruído pelo circuito digitalizador do detector.
- **Pulso:** é a coleção de todos os *hits* correspondente a um evento. Ele é adquirido a partir do primeiro *hit* de uma PMT a partir do qual se abre uma janela tempo de aquisição de 150 μ s que se registra todos os *hits* em todas PMT's durante este intervalo. Após esse tempo, a janela se fecha e o pulsos se encerra.
- **Seleção 1:** serão contabilizados apenas os eventos entre 10 e 150 *hits*.
- **Seleção 2:** serão contabilizados apenas os eventos entre 15 e 200 *hits*.
- **Estratégia 1:** serão contabilizados apenas os eventos entre 10 e 150 *hits* e a diferença de tempo entre o sinal *prompt* e *delayed* entre 0 e 50 μ s.
- **Estratégia 2:** serão contabilizados apenas os eventos entre 15 e 200 *hits* e diferença de tempo entre o sinal *prompt* e *delayed* entre 5 e 50 μ s.
- **Veto de ordem zero em energia:** pulsos com menos de 5 *hits* são excluídos da contagem de eventos.

5.2 Descrição do *RUN*

Um *RUN* é equivalente ao conjunto de dados produzidos com determinada configuração do detector. Nosso *RUN* consiste de 70 mil eventos de decaimentos beta inverso, simulando a interação dos antineutrinos, gerados no interior do volume do *target*. Deste total, foram registrados 67430 pulsos. Esta primeira discrepância é atribuída majoritariamente às interações

que estão abaixo do limiar de energia da interação, de 0,78 MeV (conforme deduzido na equação 3.5). Uma contribuição secundária vem dos eventos que ocorrem muito próximo às paredes, produzindo um número de fótons insuficiente para detecção, sendo estes absorvidos pelas paredes ou rejeitados pela eficiência quântica das PMT's. Vale ressaltar que, por motivos de tempo de computação, não foram simuladas as componentes do *background*. Entretanto, para validação da geometria, basta o estudo dos eventos de antineutrinos.

5.3 Avaliação do sinal no tempo

Em cada interação de decaimento beta inverso, temos o sinal *prompt* ou imediato, e o sinal *delayed* ou atrasado. O primeiro é resultado do Cherenkov produzido pelo pósitron movendo-se pelo *target*, enquanto o segundo é resultado da cascata nuclear causada pela captura do nêutron pelo gadolínio. Infelizmente, não temos acesso a toda extensão temporal do evento *prompt*, uma vez que este acontece em poucos nanossegundos, enquanto a resolução da aquisição de dados é de 512 ns (cerca de 0,5 μ s). Devido aos efeitos da resolução temporal, o instante em que os dois sinais ocorrem é estimado olhando apenas para os tempos registrados para o primeiro *hit*, a partir do qual abre-se uma janela de aquisição de 150 μ s, e o último *hit* nesta janela. A figura 33 mostra um histograma de todos os pulsos registrados no RUN, contendo ambos os tempos. Enquanto é esperado que a grande maioria dos pulsos tenham seu evento *prompt* totalmente contido dentro da primeira coluna, tendo ocorrido em menos de 1 μ s, observa-se também que pouco mais de 2 mil eventos têm seu tempo final neste mesmo intervalo. Isto porque o nêutron acaba saindo do *target* e é capturado fora, não gerando sinal algum. Desta forma, o pulso registra o tempo inicial e final apenas do Cherenkov o que, na grande maioria dos casos, acaba sendo o mesmo. Por outro lado, alguns pulsos têm seu tempo inicial distribuídos em um intervalo maior após a interação, inclusive com alguns pulsos identificados após 10 ms. De forma similar ao excesso de pulsos contidos em 1 μ s, estes representam eventos em que o sinal *prompt* não foi registrado, de forma que o tempo inicial e final coincidem, porém com o valor que normalmente seria atribuído ao tempo final de um evento completamente contido no *target*. O próximo passo é abrir cada pulso e observar seu número de *hits*, sinais registrados em qualquer uma das 32 PMTs do alvo. O leitor deve ter em mente que o número de *hits* representa o número de fotoelétrons e portanto tem forte correlação com a energia do evento. As figuras 34 e 35 mostram a concentração de pulsos quando classificados não só no tempo mas também no número de hits. Na figura 34, temos o tempo inicial, onde observa-se que a maioria dos pulsos produziu entre 10 e 100 *hits*,

contidos em menos de $1 \mu\text{s}$. Já a figura 35 ilustra a mesma distribuição, para o tempo final. Se descartarmos os eventos que não estavam totalmente contidos no target, vemos uma correlação entre o número de *hits* e o tempo final. Este resultado faz sentido uma vez que eventos com maior energia produzem nêutrons que levarão mais tempo para termalizarem e serem capturados. Entretanto nenhum destes dois tempos corresponde a um observável físico, mas sim ao que se denomina de verdade de Monte Carlo, ou seja, um valor inerente à simulação e que não pode ser medido no seu correspondente natural. Considerando que a janela de aquisição é aberta com o primeiro hit, o que se mede é o intervalo de tempo entre este e o último hit, desde que seja menor do que $150 \mu\text{s}$. A figura 36 mostra a classificação dos pulsos de acordo com sua duração, em intervalos de $0,5 \mu\text{s}$. Aqui vemos a esperada distribuição devido a captura do nêutron, com tempo médio de $(9,80 \pm 0,02) \mu\text{s}$. A figura 37 mostra, a partir de estudos anteriores, que este tempo corresponde à concentração de 0,3% de gadolínio programada na geometria.

5.4 Avaliação dos critérios de seleção

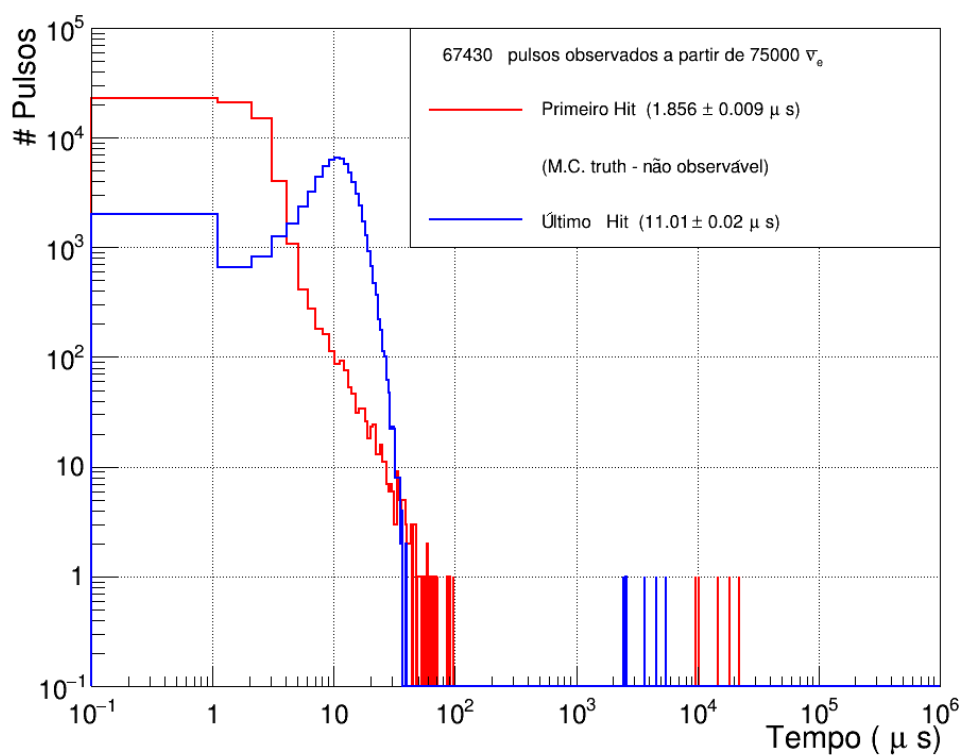
Nesta etapa, serão aplicados os critérios já discutidos anteriormente, apresentados aqui para facilitar o referenciamento:

- **Seleção 1:** serão contabilizados apenas os eventos entre 10 e 150 *hits*.
- **Seleção 2:** serão contabilizados apenas os eventos entre 15 e 200 *hits*.
- **Estratégia 1:** serão contabilizados apenas os eventos entre 10 e 150 *hits* e a diferença de tempo entre o sinal *prompt* e *delayed* entre 0 e $50 \mu\text{s}$.
- **Estratégia 2:** serão contabilizados apenas os eventos entre 15 e 200 *hits* e diferença de tempo entre o sinal *prompt* e *delayed* entre 5 e $50 \mu\text{s}$.
- **Veto de ordem zero em energia:** pulsos com menos de 5 *hits* são excluídos da contagem de eventos.

A figura 38 mostra os cortes no número de *hits* (relativos à energia do evento) aplicados à distribuição temporal dos pulsos da figura 36. Ao compararmos os cortes propostos com a figura 34, é possível compreender porque o corte no limite inferior de 15 *hits* é mais invasivo do que em 10, uma vez que há maior concentração de pulso que produzem entre 10 e 15 *hits*

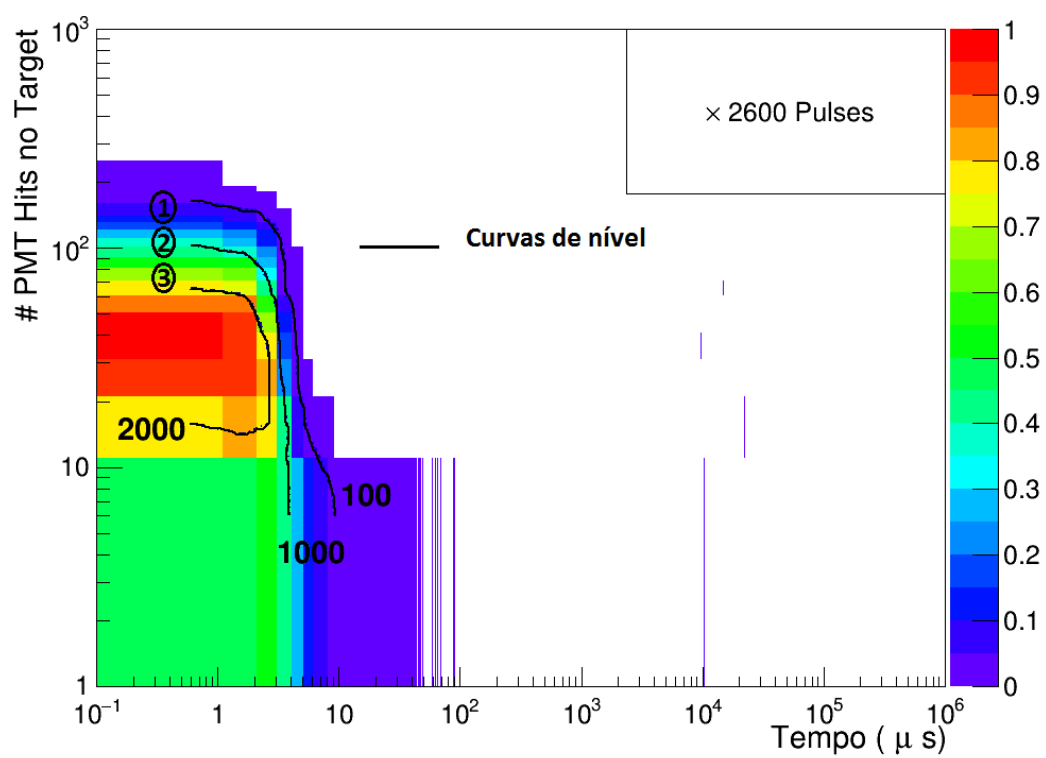
do que entre 150 e 200, o limite superior dos cortes. Assim, selecionar eventos que produzem entre 10 e 150 *hits* permite que 88,6% dos eventos sobrevivam ao corte, enquanto entre 15 e 200 este número cai para 83,8%. O gráfico da figura 39 representa a distribuição do número de fotoelétrons em função da energia referente ao gráfico da figura 38. Vale ressaltar que a constante de normalização e a resolução são as mesmas: 3165 pulsos e 0,5 μ s, respectivamente. As figuras 40 e 41 comparam cada caso com a distribuição original de forma independente, por questões de clareza. Em seguida, observamos os efeitos da combinação dos cortes de tempo e *hits* sobre a distribuição de *hits*. As estratégias 1 e 2 são apresentadas nas figuras 42 e 43, respectivamente. A primeira (Strategy 1, ou S1), permite que 79,5% dos eventos sobrevivam ao corte, enquanto a segunda (Strategy 2, ou S2) reduz este número para 77,0%. Como foi discutido na seção 3.10.2, com resultados resumidos na tabela 2, S1 permite separar uma média de 79% por eventos de neutrinos do background, enquanto para S2 este número cai para 54%. Entretanto, apesar da maior eficiência, o que leva a maior precisão na determinação do fluxo de antineutrinos, S2 oferece maior separação sinal-ruído, o que é fundamental para a observação da variação temporal do fluxo.

Figura 33 – Este gráfico representa a contagem de 67430 pulsos observados a partir da simulação de 70 mil antineutrinos. A linha vermelha é o tempo do primeiro *hit*. A linha azul representa o tempo do último *hit*. O primeiro *hit* é uma boa aproximação do tempo que ocorre o sinal *prompt* produzido pelo pósitron e o último *hit* é uma aproximação do sinal *delayed*. Na média, o intervalo de tempo entre os dois sinais foi de $(9,154 \pm 0,022) \mu\text{s}$.



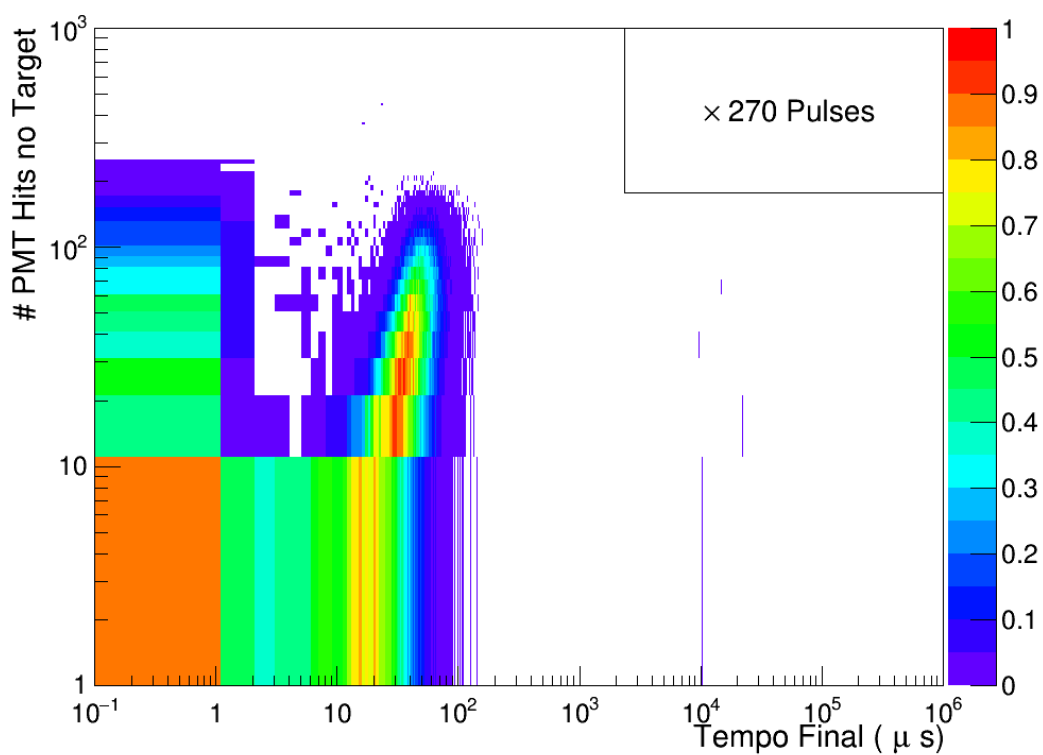
Fonte: Do autor.

Figura 34 – Gráfico de 3 curvas de nível do números total de *hits* contabilizados pelas PMT's do alvo em função do tempo.



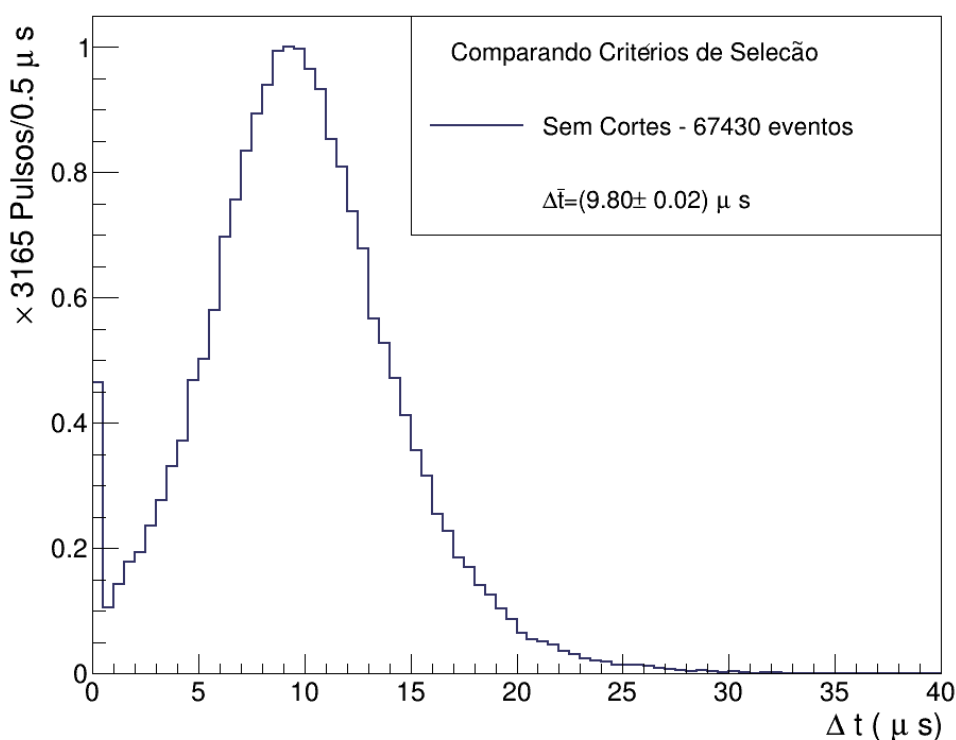
Fonte: Do autor.

Figura 35 – Este gráfico separa em grupos, os últimos fótons em função do tempo final com que estes acontecem. Como exemplo, vamos tomar o retângulo de cor laranja na origem do gráfico. Ele nos mostra que a aproximadamente $0,9 \times 270$ pulsos de um total de 67430 eventos com tempo final menores que $1 \mu\text{s}$ produziram em torno de 10 hits nas PMT's do alvo.



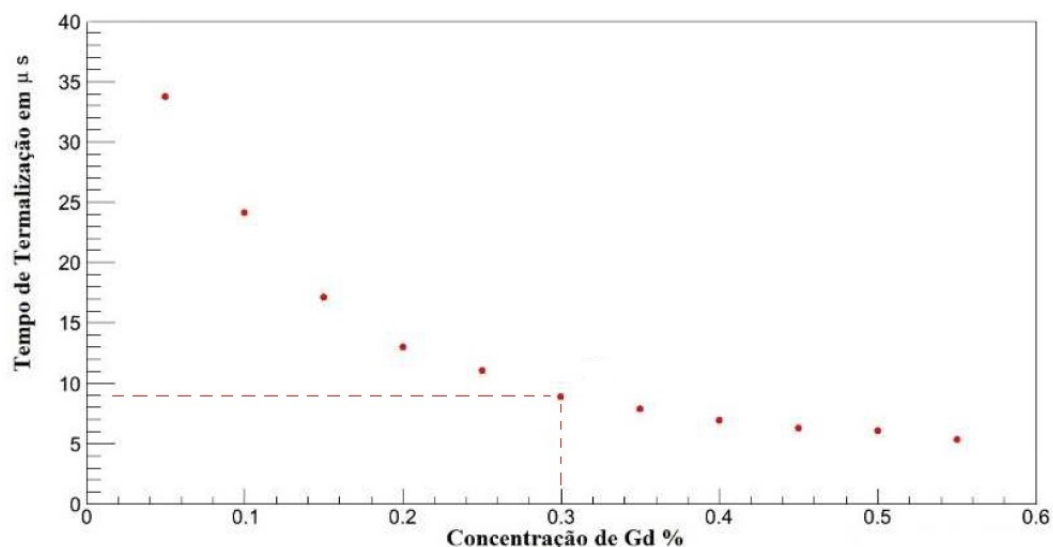
Fonte: Do autor.

Figura 36 – Histograma de eventos sem cortes de eventos no alvo do detector de antineutrinos em função do tempo para uma concentração de 0,3% de cloreto de gadolínio. A constante de normalização é de 3165 pulsos ou eventos de antineutrinos e a resolução é de $0,5 \mu\text{s}$ para um total de 67430 eventos observados. Por exemplo, o número total de pulsos no intervalo de de $9,5$ e $10 \mu\text{s}$ (pico do histograma) é de 3165. O número total de pulsos de 67430 pulsos é dado pela somatória dos produtos da áreas dos retângulos formados no histograma. A base de cada retângulo é igual a uma resolução de $0,5 \mu\text{s}$ e a altura igual a quantidade de pulsos correspondente. A diferença de tempo média entre os sinais *prompt* e *delayed* é de $(9,80 \pm 0,02) \mu\text{s}$.



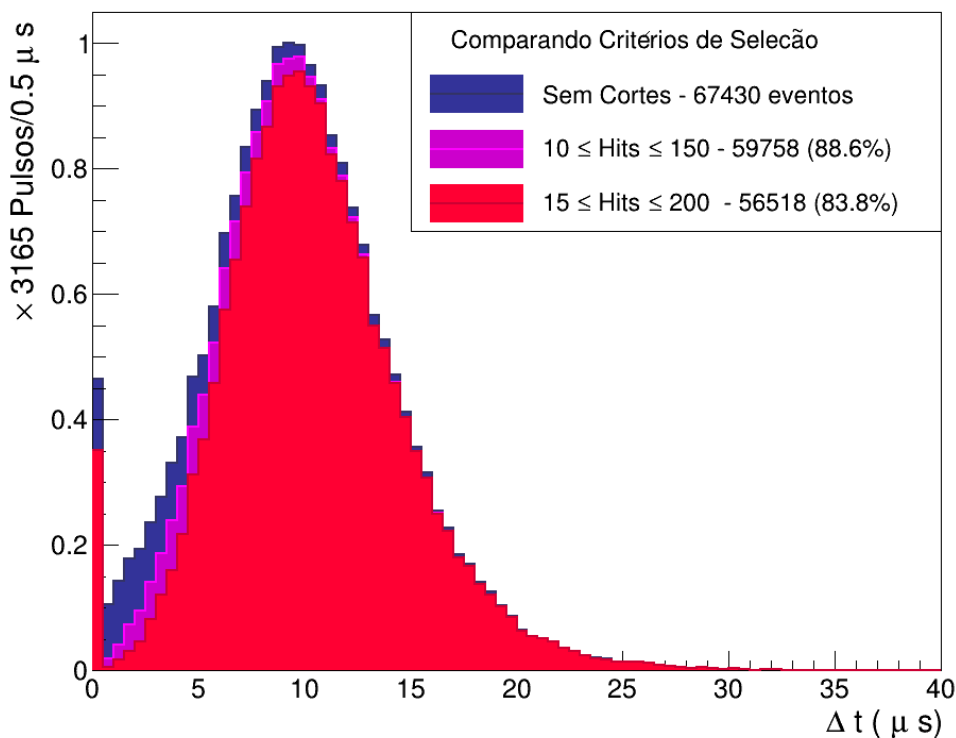
Fonte: Do autor.

Figura 37 – Simulação do tempo de termalização dos nêutrons no processo de decaimento β Inverso em função da concentração percentual de cloreto de gadolínio no alvo do detector de antineutrinos. Para a concentração de 0,3% em massa de cloreto de gadolínio, o tempo médio de captura é de aproximadamente $9 \mu\text{s}$.



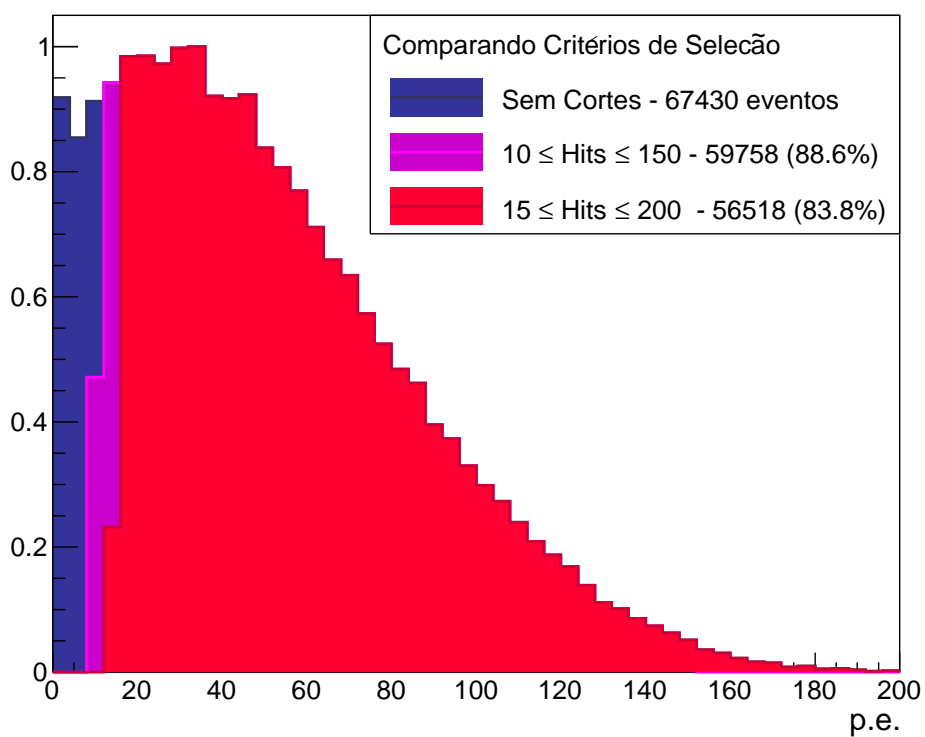
Fonte: Adaptado de [8].

Figura 38 – O histograma representa uma comparativo entre a eficiência de cada critério de seleção de eventos em função do tempo de termalização do nêutron e captura pelo cloreto de gadolínio. Selecionando os eventos entre 10 e 150 hits temos uma eficiência de 88,6% e entre 15 e 200 hits a eficiência cai para 83,8%.



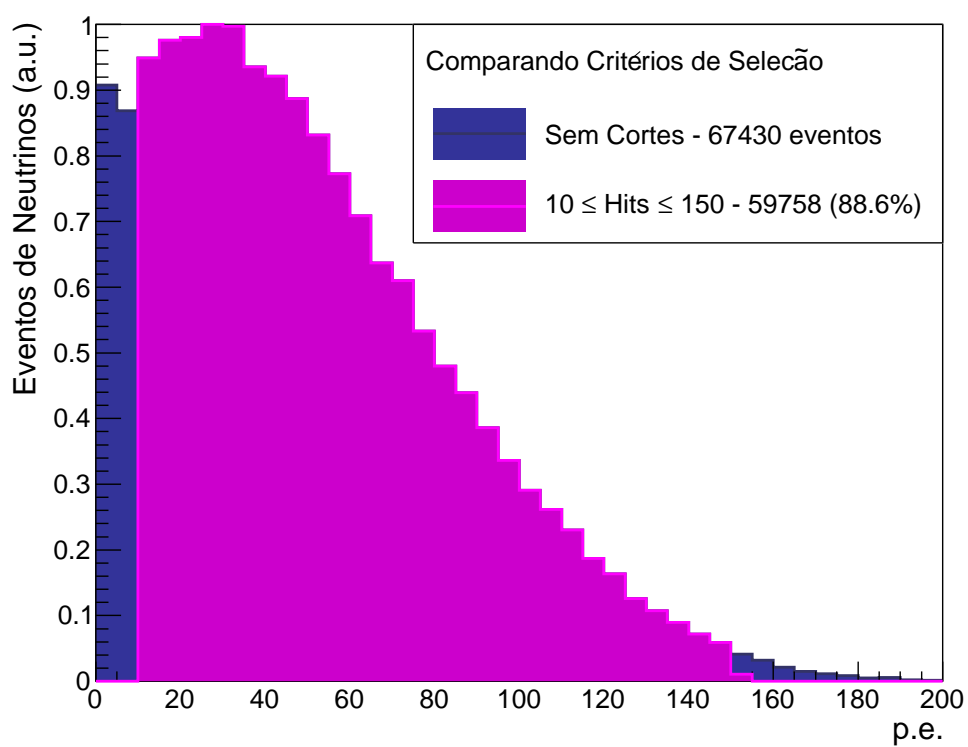
Fonte: Do autor.

Figura 39 – O gráfico representa a distribuição do número de fotoelétrons em função da energia referente ao gráfico da figura 38. Vale ressaltar que a constante de normalização e a resolução são as mesmas: 3165 pulsos e $0,5 \mu\text{s}$, respectivamente.



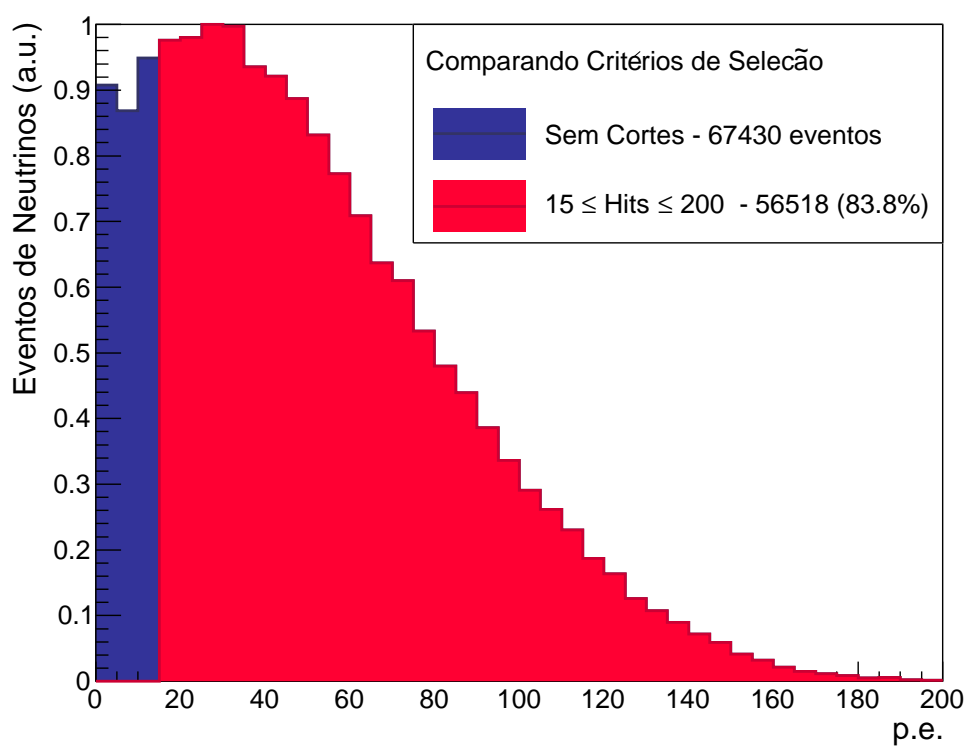
Fonte: Do autor.

Figura 40 – O gráfico mostra a distribuição de eventos de antineutrinos em função do número de *hits*. Aplicando a seleção 1, temos uma eficiência de 88,6%.



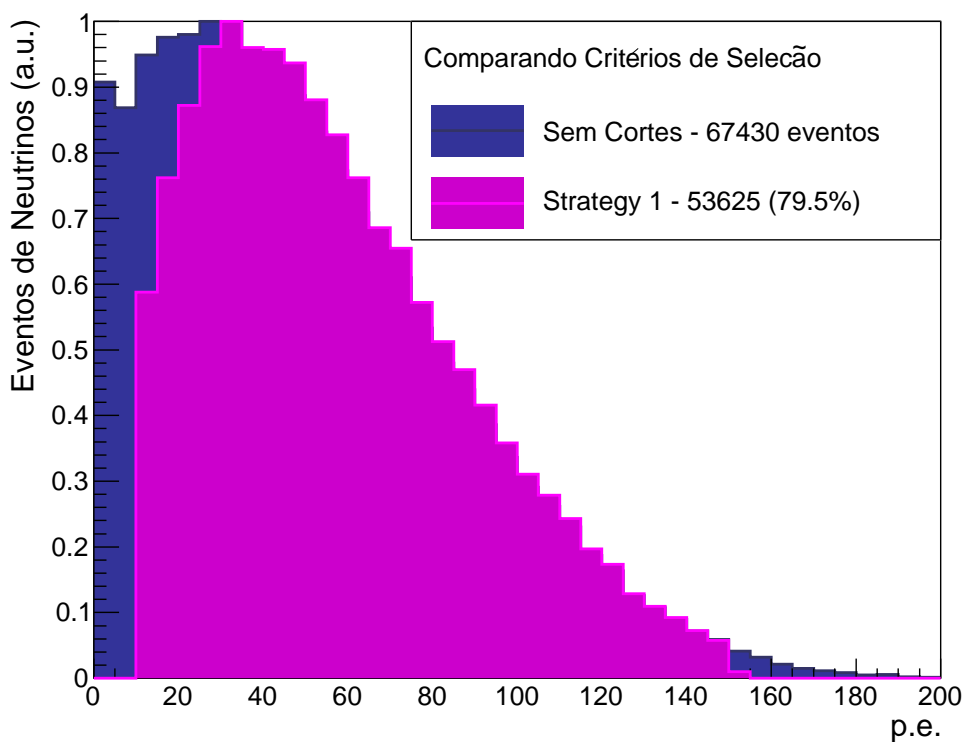
Fonte: Do autor.

Figura 41 – O gráfico mostra a distribuição de eventos de antineutrinos em função do número de *hits*. Aplicando a Seleção 2, temos uma eficiência de 83,8%.



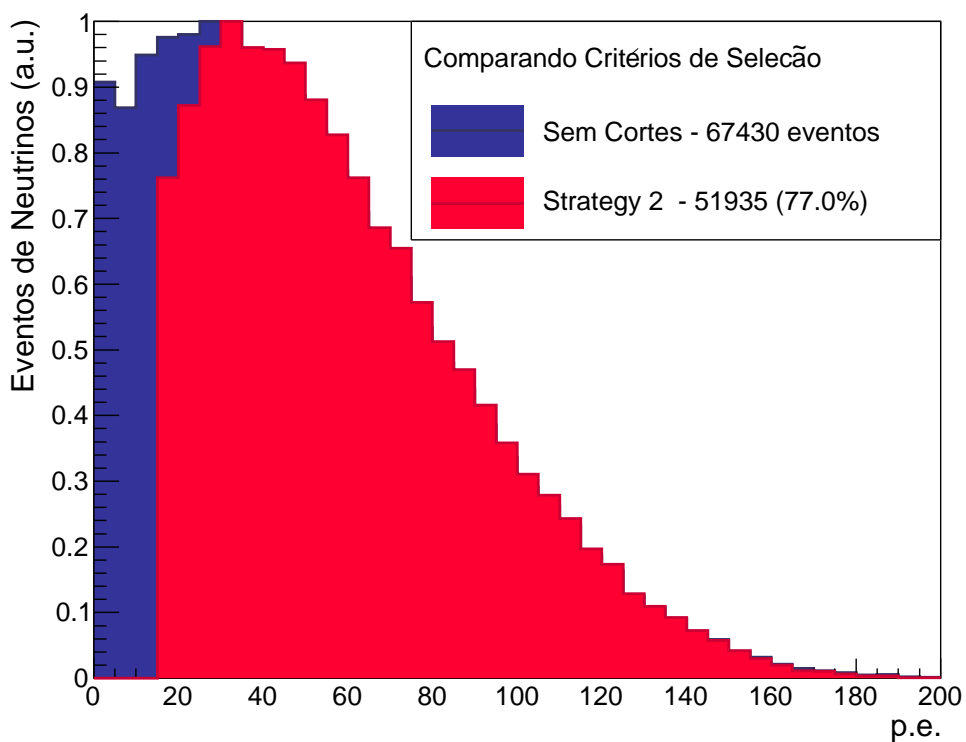
Fonte: Do autor.

Figura 42 – O gráfico compara o número de eventos de antineutrinos quando é aplicada a Estratégia 1 e o número de eventos sem cortes. Aplicando esta estratégia, são excluídos da contagem 13805 eventos. A eficiência do corte é de 79,5%.



Fonte: Do autor.

Figura 43 – O gráfico compara o número de eventos de antineutrinos quando é aplicada a Estratégia 2 e o número de eventos sem cortes. Aplicando esta estratégia, são excluídos da contagem 13805 eventos. A eficiência do corte é de 77,0%.



Fonte: Do autor.

6 CONCLUSÕES

O Experimento Neutrinos Angra da forma como está concebido atualmente, passou por modificações estruturais e de objetivos. Inicialmente, o Angra foi idealizado com o objetivo de determinar o ângulo de mistura [θ_{13}] da oscilação de neutrinos e detector deveria ser instalado em um laboratório subterrâneo. Hoje, o Experimento conta com o primeiro detector de antineutrinos preparado para operar na superfície com objetivo principal de salvaguarda nuclear. A salvaguarda, por sua vez, é monitorada pela relação entre a contagem de eventos de antineutrinos em função da composição das frações isotópicas do combustível e da potência térmica de reatores nucleares. O modelo geométrico físico e computacional do detector de antineutrinos utilizado no Experimento também sofreu alterações até chegar ao modelo atual robusto e compacto que ficou conhecido como detector Cherenkov *Water Box*.

Para subsidiar a construção e validação do novo modelo geométrico computacional, objetivo maior deste trabalho, o autor passou uma semana no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas CBPF-RJ, onde o detector de antineutrinos estava submetido aos testes finais antes da sua instalação definitiva na Usina de Angra II. Nesta visita, foram coletadas todas informações dimensionais e de materiais utilizados na construção do detector, imprescindíveis para modelar e desenvolver a nova geometria. O novo modelo geométrico do detector foi desenvolvido em formato de arquivo GDML, que é baseado na estrutura hierárquica da linguagem XML. Este formato foi escolhido com o intuito de criar uma descrição única para geometria do detector de antineutrinos para diversas linguagens. Com este deslocamento de função, o Experimento Neutrinos Angra conta agora com uma única linguagem de geometria que pode ser simulada entre diferentes sistemas. Este ganho de funcionalidade com o novo modelo é a principal contribuição deste trabalho ao Experimento. Isto devido ao fato de que, as simulações realizadas a partir desta nova geometria, evidenciaram que os resultados obtidos, além de condizentes com os de simulações anteriores, também estão de acordo com que se espera do ponto de vista da física da interação dos antineutrinos com o detector. Portanto, o objetivo geral desta dissertação foi cumprido.

A análise dos pulsos produzidos pela simulação de sinais de interações do tipo decaimento beta inverso, mostraram que tanto a distribuição temporal do sinal, quanto os resultados dos critérios de seleção, indicam que a nova geometria foi reconhecida pela simulação e tanto suas

dimensões quanto materiais tiveram efeitos produziram efeitos condizentes com resultados anteriores.

Uma vez validada a nova geometria, o próximo passo da Colaboração Neutrinos Angra passa a ser usar a geometria para realizar simulações de forma completa de todas as componentes de *background* e interações com antineutrinos com altíssima estatística, ou seja, com grande número de eventos.

Uma avaliação importante a ser considerada é sobre os resultados obtidos via simulação na tese de doutorado da referência [8]. Nela, a simulação é baseada na concepção do projeto do detector, antes de ser construído. Depois da construção propriamente dita, o detector sofreu algumas alterações nas dimensões que ficaram levemente diferentes. Estruturalmente a alteração foi devida a um incrementado de material metálico em torno do detector para fins de reforço. A Colaboração do Experimento pode então utilizar esta nova geometria aliada ao *Mixer* para reconstrução do sinal e verificar se os resultados dos cortes discutidos na revisão bibliográfica sofreram ou não algum tipo de alteração devido à atualização das dimensões e da estrutura física do detector.

REFERÊNCIAS

- 1 BEZERRA, T. J. de C. *Estudo da sensibilidade do detector de neutrinos do projeto Angra aos efeitos da queima do combustível nuclear*. 66 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Unicamp, Campinas-SP, Setembro 2009. Citado 4 vezes nas páginas 18, 27, 41 e 45.
- 2 ANJOS, J. Using neutrinos to monitor nuclear reactors: the angra neutrino experiment, simulation and detector status. *ScienceDirect - ELSEVIER*, Supplement 00(2015) 1-8, n. 1, p. 8, 2015. Citado 7 vezes nas páginas 18, 39, 40, 41, 42, 43 e 44.
- 3 NUNES, M. G. *Estimativa das contribuições do sinal de antineutrinos e ruído cósmico no experimento neutrinos Angra*. 79 p. Dissertação (Mestrado) — Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF, Rio de Janeiro-RJ, Dezembro 2011. Citado na página 21.
- 4 COWAN C. REINES, F. The neutrino. *Nature, California USA*, v. 178, p. 446–449, 1956. Citado na página 22.
- 5 LEVADA, C.L. Oitenta anos da hipótese do neutrino. *Caderno de Física da UEFS - Feira de Santana BA*, v. 1, n. 08, p. 75 – 80, 2010. Citado na página 22.
- 6 VALDIVIESSO, G. *Notas de aula da disciplina de Física de Partículas de Altas Energias*. Brasil, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 24.
- 7 BACHELARD, G. A filosofia do não. *São Paulo: Editora Presença*, v. 1, n. 1, p. 386, 1991. Citado na página 24.
- 8 SOUZA, M. J. N. *Análise de Monte Carlo e detecção de antineutrinos no experimento neutrinos Angra*. 136 p. Tese (Doutorado) — Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF, Rio de Janeiro-RJ, 2014. Citado 8 vezes nas páginas 25, 26, 28, 31, 48, 49, 72 e 79.
- 9 MIKAELIAN, L. Proc. international conference. *Neutrino-77*, v. 2, n. 1, p. 386, 1977. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 43.
- 10 FERMI, E. An attempt of a theory of beta radiation. *Nuovo Cimento, Itália*, v. 1, n. Ano XI, p. 21, 1934. Citado na página 27.
- 11 OLIVEIRA, A. *Detecção de antineutrinos para monitoramento de reatores nucleares: simulação da reconstrução de eventos e separação sinal/ruído*. 98 p. Dissertação (Mestrado) — CBPF, Rio de Janeiro-RJ, Dezembro 2010. Citado 3 vezes nas páginas 27, 32 e 44.
- 12 FURUTA, H. A study of reactor neutrino monitoring at experimental fast reactor joyo. *Science Direct*, v. 1, n. 1, p. 12, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- 13 KNOLL, G. F. *Radiation detection and measurement*. [S.l.]: John Wiley and Sons, Inc., 2010. Citado na página 34.
- 14 HAMAMATSU. *Photomultiplier Tube R5912: Applications for High Energy Physics*. EUA, 1998. Citado 3 vezes nas páginas 35, 36 e 37.

-
- 15 COSTA, J. A. *Eletrônica de front-end do experimento neutrinos Angra*. 72 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF, Juiz de Fora, 2014. Citado 7 vezes nas páginas 38, 39, 43, 47, 50, 51 e 52.
- 16 LIMA, R. da M. *Simulação da geometria e do desempenho do detector de antineutrinos do projeto Angra*. 71 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do ABC, UFABC, São Bernardo do Campo, 2009. Citado na página 42.
- 17 CHYTRACEK, R. Geometry description markup language for physics simulation and analysis applications. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, v. 53, n. 5, p. 5, 2006. Citado na página 55.

APÊNDICE A – RELAÇÃO DE MIKAELYAN DO COMBUSTÍVEL NU- CLEAR COM O ESPECTRO DE NEUTRINOS

O desenvolvimento matemático da equação 3.21 tem como premissa a proporcionalidade entre o número de eventos de neutrinos e o número de fissões nucleares. Como vimos, as equações 3.24 e 3.25 possuem uma dependência com a composição isotópica do combustível nuclear, como por exemplo o descrito na tabela 1. Esta dependência é representada por α_i nas equações. Por simplicidade, o índice i será o último algarismo que representa o número de massa atômica de cada isótopo. Neste sentido, o ^{235}U terá o índice $i = 5$ e assim por diante. Escrevendo explicitamente as equações 3.24 e 3.25, obtemos:

$$\bar{E}_f = \sum_i \alpha_i E_i = E_5 + E_5 \sum_i \alpha_i \left(\frac{E_i}{E_5} - 1 \right) = E_5 \left[1 + \sum_i \alpha_i \left(\frac{E_i}{E_5} - 1 \right) \right] \quad (\text{A.1})$$

$$\bar{\sigma}_f = \sum_i \alpha_i \sigma_i = \sigma_5 + \sigma_5 \sum_i \alpha_i \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_5} - 1 \right) = \sigma_5 \left[1 + \sum_i \alpha_i \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_5} - 1 \right) \right] \quad (\text{A.2})$$

Reagrupando A.1 e A.2 e introduzindo a constante γ e a componente com dependência temporal $[1 + k(t)]$, chegamos finalmente à expressão 3.26, de tal forma que:

$$N_v = \frac{n_p \varepsilon}{4\pi R^2 1,6 \times 10^{-19}} \frac{\sigma_5}{E_5} \left[\frac{1 + \sum_i \alpha_i \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_5} - 1 \right)}{1 + \sum_i \alpha_i \left(\frac{E_i}{E_5} - 1 \right)} \right] P_{ter} = \Gamma [1 + k(t)] P_{ter} \quad (\text{A.3})$$

Onde:

$$[1 + k(t)] = \left[\frac{1 + \sum_i \alpha_i \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_5} - 1 \right)}{1 + \sum_i \alpha_i \left(\frac{E_i}{E_5} - 1 \right)} \right] \quad (\text{A.4})$$

$$\Gamma = \frac{n_p \varepsilon}{4\pi R^2} \frac{\sigma_5}{1,6 \times 10^{-19} E_5} \quad (\text{A.5})$$

A estimativa do número de eventos de antineutrinos foi obtida diretamente da aplicação da 3.23, considerando os valores de projeto do Angra para eficiência unitária, quais sejam:

- Potência térmica $P_{ter} = 4$ GW;
- Energia média por fissão $\overline{E}_f = 203,78$ MeV;
- Seção de choque média para composição combustível nuclear descrita na tabela 1, $\overline{\sigma}_f = 5,8 \cdot 10^{-47} \text{ m}^2$;
- Número de prótons-alvo do detector para 1 tonelada de água $n_p = 6,68 \times 10^{28}$;
- Distância reator-detector $R = 30$ m.

$$N_\nu = \frac{1}{4\pi R^2} \frac{P_{ter}}{\overline{E}_f} \frac{n_p \varepsilon \overline{\sigma}_f}{1,6 \cdot 10^{-19}} \quad (\text{A.6})$$

$$N_\nu = \frac{1}{4\pi 30^2} \frac{4 \cdot 10^9}{203,78 \cdot 10^6} \frac{6,68 \cdot 10^{28} \cdot 5,8 \cdot 10^{-47}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \quad (\text{A.7})$$

$$N_\nu = 5070 \bar{\nu}_e/\text{dia} = 59 \text{ mHz} = 1 \bar{\nu}_e / 17 \text{ s} \quad (\text{A.8})$$

APÊNDICE B – ARQUIVO GDML DA ATUALIZAÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO COMPUTACIONAL

```
1
2 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
3 <gdml xmlns:gdml="http://cern.ch/2001/Schemas/GDML"
4 xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
5 xsi:noNamespaceSchemaLocation="GDMLSchema/gdml.xsd">
6
7 <!--Atualizacao do Modelo Geometrico Computacional do Experimento
8     Neutrinos Angra
9 Arquivo GDML com a descricao de:
10
11 - Materiais
12 - Dimensoes
13 - Geometria
14
15 Manual GDML Manual em: http://gdml.web.cern.ch/GDML/doc/GDMLmanual.pdf
16
17 versao 1.0 desenvolvida por: mribeiro@furnas.com.br -->
18
19
20 <!--Definicoes Globais -->
21
22 <define>
```

```
23 <constant name="eD" value="1e-5"/>
24 <constant name="ExpHall" value="10000" />
25 <constant name="Inner_X" value="2000." />
26 <constant name="Inner_Y" value="1570." />
27 <constant name="Inner_Z" value="1480." />
28 <constant name="Inner_T" value="20." />
29 <constant name="Inner_Y_Offset" value="-30." />
30 <constant name="veto_X" value="2580." />
31 <constant name="veto_Y" value="280." />
32 <constant name="veto_Z" value="1990." />
33 <constant name="veto_T" value="20." />
34 <constant name="veto_Xe" value="veto_X+2*veto_T"/>
35 <constant name="veto_Ye" value="veto_Y+2*veto_T"/>
36 <constant name="veto_Ze" value="veto_Z+2*veto_T"/>
37 <constant name="shield_X" value="2580." />
38 <constant name="shield_Y" value="1670." />
39 <constant name="shield_Z" value="1990." />
40 <constant name="shield_T" value="20." />
41 <constant name="shield_steel" value="1." />
42 <constant name="shield_Xe" value="shield_X+2*shield_T" />
43 <constant name="shield_Ye" value="shield_Y+2*shield_T" />
44 <constant name="shield_Ze" value="shield_Z+2*shield_T" />
45 <constant name="Target_X" value="1421." />
46 <constant name="Target_Y" value="1046." />
47 <constant name="Target_Z" value="1000." />
48 <constant name="Target_TX" value="40." />
49 <constant name="Target_TY" value="40." />
50 <constant name="Target_TZ" value="25." />
51 <constant name="Target_Space" value="132." />
52 <constant name="Target_Xe" value="Target_X+2*Target_TX" />
53 <constant name="Target_Ye" value="Target_Y+2*(Target_TY+Target_Space)
    " />
54 <constant name="Target_Ze" value="Target_Z+2*Target_TZ" />
55 <constant name="GridTargetV_X" value="Target_Xe+2*Target_TZ" />
```

```
56 <constant name="GridTargetV_Y" value="Target_Y" />
57 <constant name="GridTargetV_Z" value="Target_TZ" />
58 <constant name="Reforco_X" value="300." />
59 <constant name="Reforco_Z" value="200." />
60 <constant name="GridTargetH_X" value="Target_Xe+2*Target_TZ" />
61 <constant name="GridTargetH_Y" value="Target_Ye+2*Target_TZ" />
62 <constant name="GridTargetH_Z" value="Target_Ze+2*Target_TZ" />
63 <constant name="Reforco_Y" value="300." />
64 <constant name="BaseTarget_Xe" value="1930." />
65 <constant name="BaseTarget_Ye" value="30." />
66 <constant name="BaseTarget_Ze" value="1435." />
67 <constant name="GridshieldV_X" value="shield_Xe+2*shield_T" />
68 <constant name="GridshieldV_Y" value="shield_T" />
69 <constant name="GridshieldV_Z" value="shield_T" />
70 <constant name="Reforco_X" value="300." />
71 <constant name="Reforco_Z" value="200." />
72 <constant name="Reforco_XS" value="Reforco_X*(shield_Xe/Target_Xe)" />
73 <constant name="Reforco_ZS" value="Reforco_Z*(shield_Ze/Target_Ze)" />
74 <constant name="GridshieldH_X" value="shield_Xe+2*shield_T" />
75 <constant name="GridshieldH_Y" value="shield_Ye+2*shield_T" />
76 <constant name="GridshieldH_Z" value="shield_Ze+2*shield_T" />
77 <constant name="Reforco_Y" value="300." />
78 <constant name="Reforco_YS" value="Reforco_Y*(shield_Ye/Target_Ye)" />
79 <constant name="BowlInVetoX_U_1" value="-842." />
80 <constant name="BowlInVetoY_U_1" value="500." />
81 <constant name="BowlInVetoZ_U_1" value="616." />
82 <constant name="BowlInVetoX_U_2" value="842." />
83 <constant name="BowlInVetoY_U_2" value="500." />
84 <constant name="BowlInVetoZ_U_2" value="616." />
85 <constant name="BowlInVetoX_U_3" value="842." />
86 <constant name="BowlInVetoY_U_3" value="500." />
87 <constant name="BowlInVetoZ_U_3" value="-616." />
88 <constant name="BowlInVetoX_U_4" value="-842." />
89 <constant name="BowlInVetoY_U_4" value="500." />
```



```
90 <constant name="BowlInVetoZ_U_4" value="-616." />
91 <constant name="BowlInVetoX_D_1" value="-842." />
92 <constant name="BowlInVetoY_D_1" value="-500." />
93 <constant name="BowlInVetoZ_D_1" value="616." />
94 <constant name="BowlInVetoX_D_2" value="842." />
95 <constant name="BowlInVetoY_D_2" value="-500." />
96 <constant name="BowlInVetoZ_D_2" value="616." />
97 <constant name="BowlInVetoX_D_3" value="842." />
98 <constant name="BowlInVetoY_D_3" value="-500." />
99 <constant name="BowlInVetoZ_D_3" value="-616." />
100 <constant name="BowlInVetoX_D_4" value="-842." />
101 <constant name="BowlInVetoY_D_4" value="-500." />
102 <constant name="BowlInVetoZ_D_4" value="-616." />
103 <constant name="BowlVetoX_S_1" value="(shield_X/2)-162." />
104 <constant name="BowlVetoY_S_1" value="(shield_Ye+veto_Y)/2" />
105 <constant name="BowlVetoZ_S_1" value="0." />
106 <constant name="BowlVetoX_S_2" value="-(shield_X/2-162.)" />
107 <constant name="BowlVetoY_S_2" value="(shield_Ye+veto_Y)/2" />
108 <constant name="BowlVetoZ_S_2" value="0." />
109 <constant name="BowlVetoX_S_3" value="0." />
110 <constant name="BowlVetoY_S_3" value="(shield_Ye+veto_Y)/2" />
111 <constant name="BowlVetoZ_S_3" value="(shield_Z/2-162.)" />
112 <constant name="BowlVetoX_S_4" value="0." />
113 <constant name="BowlVetoY_S_4" value="(shield_Ye+veto_Y)/2" />
114 <constant name="BowlVetoZ_S_4" value="-(shield_Z/2-162.)" />
115 <constant name="BowlVetoX_I_1" value="(shield_X/2)-162." />
116 <constant name="BowlVetoY_I_1" value="-(shield_Ye+veto_Y)/2" />
117 <constant name="BowlVetoZ_I_1" value="0." />
118 <constant name="BowlVetoX_I_2" value="-(shield_X/2-162.)" />
119 <constant name="BowlVetoY_I_2" value="-(shield_Ye+veto_Y)/2" />
120 <constant name="BowlVetoZ_I_2" value="0." />
121 <constant name="BowlVetoX_I_3" value="0." />
122 <constant name="BowlVetoY_I_3" value="-(shield_Ye+veto_Y)/2" />
123 <constant name="BowlVetoZ_I_3" value="(shield_Z/2-162.)" />
```

```
124 <constant name="BowlVetoX_I_4" value="0." />
125 <constant name="BowlVetoY_I_4" value="-(shield_Y+veto_Y)/2" />
126 <constant name="BowlVetoZ_I_4" value="-(shield_Z/2-162.)" />
127 <constant name="pmtPlaneY" value="Target_Y/2." />
128 <constant name="pmtRegua1Z" value="351.26" />
129 <constant name="pmtRegua2Z" value="117.09" />
130 <constant name="pmtRegua13X" value="-536.75" />
131 <constant name="pmtRegua24X" value="-383.25" />
132 <constant name="pmtDistX" value="307" />
133 <constant name="BowlX_U_1" value="pmtRegua13X" />
134 <constant name="BowlY_U_1" value="pmtPlaneY" />
135 <constant name="BowlZ_U_1" value="pmtRegua1Z" />
136 <constant name="BowlX_U_2" value="pmtRegua13X+pmtDistX" />
137 <constant name="BowlY_U_2" value="pmtPlaneY" />
138 <constant name="BowlZ_U_2" value="pmtRegua1Z" />
139 <constant name="BowlX_U_3" value="pmtRegua13X+2*pmtDistX" />
140 <constant name="BowlY_U_3" value="pmtPlaneY" />
141 <constant name="BowlZ_U_3" value="pmtRegua1Z" />
142 <constant name="BowlX_U_4" value="pmtRegua13X+3*pmtDistX" />
143 <constant name="BowlY_U_4" value="pmtPlaneY" />
144 <constant name="BowlZ_U_4" value="pmtRegua1Z" />
145 <constant name="BowlX_U_5" value="pmtRegua24X" />
146 <constant name="BowlY_U_5" value="pmtPlaneY" />
147 <constant name="BowlZ_U_5" value="pmtRegua2Z" />
148 <constant name="BowlX_U_6" value="pmtRegua24X+pmtDistX" />
149 <constant name="BowlY_U_6" value="pmtPlaneY" />
150 <constant name="BowlZ_U_6" value="pmtRegua2Z" />
151 <constant name="BowlX_U_7" value="pmtRegua24X+2*pmtDistX" />
152 <constant name="BowlY_U_7" value="pmtPlaneY" />
153 <constant name="BowlZ_U_7" value="pmtRegua2Z" />
154 <constant name="BowlX_U_8" value="pmtRegua24X+3*pmtDistX" />
155 <constant name="BowlY_U_8" value="pmtPlaneY" />
156 <constant name="BowlZ_U_8" value="pmtRegua2Z" />
157 <constant name="BowlX_U_9" value="pmtRegua13X" />
```

```
158 <constant name="BowlY_U_9" value="pmtPlaneY" />
159 <constant name="BowlZ_U_9" value="-pmtRegua2Z" />
160 <constant name="BowlX_U_10" value="pmtRegua13X+pmtDistX" />
161 <constant name="BowlY_U_10" value="pmtPlaneY" />
162 <constant name="BowlZ_U_10" value="-pmtRegua2Z" />
163 <constant name="BowlX_U_11" value="pmtRegua13X+2*pmtDistX" />
164 <constant name="BowlY_U_11" value="pmtPlaneY" />
165 <constant name="BowlZ_U_11" value="-pmtRegua2Z" />
166 <constant name="BowlX_U_12" value="pmtRegua13X+3*pmtDistX" />
167 <constant name="BowlY_U_12" value="pmtPlaneY" />
168 <constant name="BowlZ_U_12" value="-pmtRegua2Z" />
169 <constant name="BowlX_U_13" value="pmtRegua24X" />
170 <constant name="BowlY_U_13" value="pmtPlaneY" />
171 <constant name="BowlZ_U_13" value="-pmtRegua1Z" />
172 <constant name="BowlX_U_14" value="pmtRegua24X+pmtDistX" />
173 <constant name="BowlY_U_14" value="pmtPlaneY" />
174 <constant name="BowlZ_U_14" value="-pmtRegua1Z" />
175 <constant name="BowlX_U_15" value="pmtRegua24X+2*pmtDistX" />
176 <constant name="BowlY_U_15" value="pmtPlaneY" />
177 <constant name="BowlZ_U_15" value="-pmtRegua1Z" />
178 <constant name="BowlX_U_16" value="pmtRegua24X+3*pmtDistX" />
179 <constant name="BowlY_U_16" value="pmtPlaneY" />
180 <constant name="BowlZ_U_16" value="-pmtRegua1Z" />
181 <constant name="BowlX_D_1" value="pmtRegua24X" />
182 <constant name="BowlY_D_1" value="-pmtPlaneY" />
183 <constant name="BowlZ_D_1" value="pmtRegua1Z" />
184 <constant name="BowlX_D_2" value="pmtRegua24X+pmtDistX" />
185 <constant name="BowlY_D_2" value="-pmtPlaneY" />
186 <constant name="BowlZ_D_2" value="pmtRegua1Z" />
187 <constant name="BowlX_D_3" value="pmtRegua24X+2*pmtDistX" />
188 <constant name="BowlY_D_3" value="-pmtPlaneY" />
189 <constant name="BowlZ_D_3" value="pmtRegua1Z" />
190 <constant name="BowlX_D_4" value="pmtRegua24X+3*pmtDistX" />
191 <constant name="BowlY_D_4" value="-pmtPlaneY" />
```

```
192 <constant name="BowlZ_D_4" value="pmtRegua1Z" />
193 <constant name="BowlX_D_5" value="pmtRegua13X" />
194 <constant name="BowlY_D_5" value="-pmtPlaneY" />
195 <constant name="BowlZ_D_5" value="pmtRegua2Z" />
196 <constant name="BowlX_D_6" value="pmtRegua13X+pmtDistX" />
197 <constant name="BowlY_D_6" value="-pmtPlaneY" />
198 <constant name="BowlZ_D_6" value="pmtRegua2Z" />
199 <constant name="BowlX_D_7" value="pmtRegua13X+2*pmtDistX" />
200 <constant name="BowlY_D_7" value="-pmtPlaneY" />
201 <constant name="BowlZ_D_7" value="pmtRegua2Z" />
202 <constant name="BowlX_D_8" value="pmtRegua13X+3*pmtDistX" />
203 <constant name="BowlY_D_8" value="-pmtPlaneY" />
204 <constant name="BowlZ_D_8" value="pmtRegua2Z" />
205 <constant name="BowlX_D_9" value="pmtRegua24X" />
206 <constant name="BowlY_D_9" value="-pmtPlaneY" />
207 <constant name="BowlZ_D_9" value="-pmtRegua2Z" />
208 <constant name="BowlX_D_10" value="pmtRegua24X+pmtDistX" />
209 <constant name="BowlY_D_10" value="-pmtPlaneY" />
210 <constant name="BowlZ_D_10" value="-pmtRegua2Z" />
211 <constant name="BowlX_D_11" value="pmtRegua24X+2*pmtDistX" />
212 <constant name="BowlY_D_11" value="-pmtPlaneY" />
213 <constant name="BowlZ_D_11" value="-pmtRegua2Z" />
214 <constant name="BowlX_D_12" value="pmtRegua24X+3*pmtDistX" />
215 <constant name="BowlY_D_12" value="-pmtPlaneY" />
216 <constant name="BowlZ_D_12" value="-pmtRegua2Z" />
217 <constant name="BowlX_D_13" value="pmtRegua13X" />
218 <constant name="BowlY_D_13" value="-pmtPlaneY" />
219 <constant name="BowlZ_D_13" value="-pmtRegua1Z" />
220 <constant name="BowlX_D_14" value="pmtRegua13X+pmtDistX" />
221 <constant name="BowlY_D_14" value="-pmtPlaneY" />
222 <constant name="BowlZ_D_14" value="-pmtRegua1Z" />
223 <constant name="BowlX_D_15" value="pmtRegua13X+2*pmtDistX" />
224 <constant name="BowlY_D_15" value="-pmtPlaneY" />
225 <constant name="BowlZ_D_15" value="-pmtRegua1Z" />
```

```
226 <constant name="BowlX_D_16" value="pmtRegual3X+3*pmtDistX" />
227 <constant name="BowlY_D_16" value="-pmtPlaneY" />
228 <constant name="BowlZ_D_16" value="-pmtRegualZ" />
229 <constant name="Pmt_R" value="100." />
230 <constant name="Pmt_H" value="80." />
231 <constant name="Pmt_T" value="1." />
232 <constant name="pmtBaseX" value="62." />
233 <constant name="pmtBaseY" value="62." />
234 <constant name="pmtBaseZ" value="84.5" />
235 <position name="posTarget_e" unit="mm" x="0" y="0" z="0"/>
236 <position name="posTarget" unit="mm" x="0" y="0" z="0"/>
237 <position name="posInner" unit="mm" x="0" y="0" z="0"/>
238 <position name="posVeto" unit="mm" x="0" y="0" z="0"/>
239 <position name="posShield" unit="mm" x="0" y="0" z="0"/>
240 <position name="posGridTargetV1" unit="mm" x="(Target_Xe+Target_TZ)/2"
    y="0." z="Reforco_Z"/>
241 <position name="posGridTargetV2" unit="mm" x="-(Target_Xe+Target_TZ)/2"
    y="0." z="Reforco_Z"/>
242 <position name="posGridTargetV3" unit="mm" x="(Target_Xe+Target_TZ)/2"
    y="0." z="-Reforco_Z"/>
243 <position name="posGridTargetV4" unit="mm" x="-(Target_Xe+Target_TZ)/2"
    y="0." z="-Reforco_Z"/>
244 <position name="posGridTargetV5" unit="mm" x="(Target_Xe+Target_TZ)/2"
    y="0." z="2.5*Reforco_Z"/>
245 <position name="posGridTargetV6" unit="mm" x="-(Target_Xe+Target_TZ)/2"
    y="0." z="2.5*Reforco_Z"/>
246 <position name="posGridTargetV7" unit="mm" x="(Target_Xe+Target_TZ)/2"
    y="0." z="-2.5*Reforco_Z"/>
247 <position name="posGridTargetV8" unit="mm" x="-(Target_Xe+Target_TZ)/2"
    y="0." z="-2.5*Reforco_Z"/>
248 <position name="posGridTargetV9" unit="mm" x="Reforco_Z" y="0." z="(
    Target_Ze+Target_TZ)/2"/>
249 <position name="posGridTargetV10" unit="mm" x="Reforco_Z" y="0." z="-(
    Target_Ze+Target_TZ)/2"/>
```

```
250 <position name="posGridTargetV11"unit="mm" x="-Reforco_Z" y="0." z="(
      Target_Ze+Target_TZ)/2"/>
251 <position name="posGridTargetV12"unit="mm" x="-Reforco_Z" y="0." z="
      -(Target_Ze+Target_TZ)/2"/>
252 <position name="posGridTargetV13"unit="mm" x="2.5*Reforco_Z" y="0." z
      ="(Target_Ze+Target_TZ)/2"/>
253 <position name="posGridTargetV14"unit="mm" x="2.5*Reforco_Z" y="0." z
      ="-(Target_Ze+Target_TZ)/2"/>
254 <position name="posGridTargetV15"unit="mm" x="-2.5*Reforco_Z" y="0."
      z="(Target_Ze+Target_TZ)/2"/>
255 <position name="posGridTargetV16"unit="mm" x="-2.5*Reforco_Z" y="0."
      z="-(Target_Ze+Target_TZ)/2"/>
256 <position name="posGridTargetH1"unit="mm" x="0." y="Reforco_Y" z="
      Target_Ze/2"/>
257 <position name="posGridTargetH2"unit="mm" x="0." y="Reforco_Y" z="-
      Target_Ze/2"/>
258 <position name="posGridTargetH3"unit="mm" x="0." y="-Reforco_Y" z="
      Target_Ze/2"/>
259 <position name="posGridTargetH4"unit="mm" x="0." y="-Reforco_Y" z="-
      Target_Ze/2"/>
260 <position name="posGridTargetH5"unit="mm" x="Target_Xe/2" y="
      Reforco_Y" z="0."/>
261 <position name="posGridTargetH6"unit="mm" x="Target_Xe/2" y="-
      Reforco_Y" z="0."/>
262 <position name="posGridTargetH7"unit="mm" x="-Target_Xe/2" y="
      Reforco_Y" z="0."/>
263 <position name="posGridTargetH8"unit="mm" x="-Target_Xe/2" y="-
      Reforco_Y" z="0."/>
264 <position name="posGridTargetH9"unit="mm" x="0." y="Target_Ye/2+
      Target_TY/2" z="Target_Ze/2-Target_TZ"/>
265 <position name="posGridTargetH10"unit="mm" x="0." y="Target_Ye/2+
      Target_TY/2" z="-(Target_Ze/2-Target_TZ)/2"/>
266 <position name="posGridTargetH11"unit="mm" x="0." y="Target_Ye/2+
      Target_TY/2" z="Reforco_Z"/>
```

```
267 <position name="posGridTargetH12" unit="mm" x="0." y="Target_Ye/2+
      Target_TY/2" z="-Reforco_Z"/>
268 <position name="posGridTargetH13" unit="mm" x="Reforco_Z" y="Target_Ye
      /2+Target_TY/2" z="0."/>
269 <position name="posGridTargetH14" unit="mm" x="-Reforco_Z" y="
      Target_Ye/2+Target_TY/2" z="0."/>
270 <position name="posGridTargetH15" unit="mm" x="2.5*Reforco_Z" y="
      Target_Ye/2+Target_TY/2" z="0."/>
271 <position name="posGridTargetH16" unit="mm" x="-2.5*Reforco_Z" y="
      Target_Ye/2+Target_TY/2" z="0."/>
272 <position name="posBaseTarget_e" unit="mm" x="0." y="-530+5*
      Inner_Y_Offset" z="0."/>
273 <position name="posGridshieldV1" unit="mm" x="(shield_Xe+2*shield_T)
      /2" y="0." z="Reforco_ZS"/>
274 <position name="posGridshieldV2" unit="mm" x="-(shield_Xe+shield_T)/2
      " y="0." z="Reforco_ZS"/>
275 <position name="posGridshieldV3" unit="mm" x="(shield_Xe+shield_T)/2"
      y="0." z="-Reforco_ZS"/>
276 <position name="posGridshieldV4" unit="mm" x="-(shield_Xe+shield_T)/2
      " y="0." z="-Reforco_ZS"/>
277 <position name="posGridshieldV5" unit="mm" x="(shield_Xe+shield_T)/2"
      y="0." z="2.5*Reforco_ZS"/>
278 <position name="posGridshieldV6" unit="mm" x="-(shield_Xe+shield_T)/2
      " y="0." z="2.5*Reforco_ZS"/>
279 <position name="posGridshieldV7" unit="mm" x="(shield_Xe+shield_T)/2"
      y="0." z="-2.5*Reforco_ZS"/>
280 <position name="posGridshieldV8" unit="mm" x="-(shield_Xe+shield_T)/2
      " y="0." z="-2.5*Reforco_ZS"/>
281 <position name="posGridshieldV9" unit="mm" x="Reforco_ZS" y="0." z="(
      shield_Ze+shield_T)/2"/>
282 <position name="posGridshieldV10" unit="mm" x="Reforco_ZS" y="0." z="
      -(shield_Ze+shield_T)/2"/>
283 <position name="posGridshieldV11" unit="mm" x="-Reforco_ZS" y="0." z="
      (shield_Ze+shield_T)/2"/>
```

```
284 <position name="posGridshieldV12"unit="mm" x="-Reforco_ZS" y="0." z="
      -(shield_Ze+shield_T)/2"/>
285 <position name="posGridshieldV13"unit="mm" x="2.5*Reforco_ZS" y="0."
      z="(shield_Ze+shield_T)/2"/>
286 <position name="posGridshieldV14"unit="mm" x="2.5*Reforco_ZS" y="0."
      z="-(shield_Ze+shield_T)/2"/>
287 <position name="posGridshieldV15"unit="mm" x="-2.5*Reforco_ZS" y="0."
      z="(shield_Ze+shield_T)/2"/>
288 <position name="posGridshieldV16"unit="mm" x="-2.5*Reforco_ZS" y="0."
      z="-(shield_Ze+shield_T)/2"/>
289 <position name="posGridshieldV17"unit="mm" x="(shield_Xe+shield_T)/2"
      y="shield_Ye/2+3*Target_TY" z="Reforco_ZS"/>
290 <position name="posGridshieldV18"unit="mm" x="-(shield_Xe+shield_T)/2
      " y="shield_Ye/2+3*Target_TY" z="Reforco_ZS"/>
291 <position name="posGridshieldV19"unit="mm" x="(shield_Xe+shield_T)/2"
      y="shield_Ye/2+3*Target_TY" z="-Reforco_ZS"/>
292 <position name="posGridshieldV20"unit="mm" x="-(shield_Xe+shield_T)/2
      " y="shield_Ye/2+3*Target_TY" z="-Reforco_ZS"/>
293 <position name="posGridshieldV21"unit="mm" x="(shield_Xe+shield_T)/2"
      y="shield_Ye/2+3*Target_TY" z="2.5*Reforco_ZS"/>
294 <position name="posGridshieldV22"unit="mm" x="-(shield_Xe+shield_T)/2
      " y="shield_Ye/2+3*Target_TY" z="2.5*Reforco_ZS"/>
295 <position name="posGridshieldV23"unit="mm" x="(shield_Xe+shield_T)/2"
      y="shield_Ye/2+3*Target_TY" z="-2.5*Reforco_ZS"/>
296 <position name="posGridshieldV24"unit="mm" x="-(shield_Xe+shield_T)/2
      " y="shield_Ye/2+3*Target_TY" z="-2.5*Reforco_ZS"/>
297 <position name="posGridshieldV25"unit="mm" x="Reforco_ZS" y="
      shield_Ye/2+3*Target_TY" z="(shield_Ze+shield_T)/2"/>
298 <position name="posGridshieldV26"unit="mm" x="Reforco_ZS" y="
      shield_Ye/2+3*Target_TY" z="-(shield_Ze+shield_T)/2"/>
299 <position name="posGridshieldV27"unit="mm" x="-Reforco_ZS" y="
      shield_Ye/2+3*Target_TY" z="(shield_Ze+shield_T)/2"/>
300 <position name="posGridshieldV28"unit="mm" x="-Reforco_ZS" y="
      shield_Ye/2+3*Target_TY" z="-(shield_Ze+shield_T)/2"/>
```



```
301 <position name="posGridshieldV29"unit="mm" x="2.5*Reforco_ZS" y="
      shield_Ye/2+3*Target_TY" z="(shield_Ze+shield_T)/2"/>
302 <position name="posGridshieldV30"unit="mm" x="2.5*Reforco_ZS" y="
      shield_Ye/2+3*Target_TY" z="-(shield_Ze+shield_T)/2"/>
303 <position name="posGridshieldV31"unit="mm" x="-2.5*Reforco_ZS" y="
      shield_Ye/2+3*Target_TY" z="(shield_Ze+shield_T)/2"/>
304 <position name="posGridshieldV32"unit="mm" x="-2.5*Reforco_ZS" y="
      shield_Ye/2+3*Target_TY" z="-(shield_Ze+shield_T)/2"/>
305 <position name="posGridshieldV33"unit="mm" x="(shield_Xe+shield_T)/2"
      y="-(shield_Ye/2+3*Target_TY)" z="Reforco_ZS"/>
306 <position name="posGridshieldV34"unit="mm" x="-(shield_Xe+shield_T)/2
      " y="-(shield_Ye/2+3*Target_TY)" z="Reforco_ZS"/>
307 <position name="posGridshieldV35"unit="mm" x="(shield_Xe+shield_T)/2"
      y="-(shield_Ye/2+3*Target_TY)" z="-Reforco_ZS"/>
308 <position name="posGridshieldV36"unit="mm" x="-(shield_Xe+shield_T)/2
      " y="-(shield_Ye/2+3*Target_TY)" z="-Reforco_ZS"/>
309 <position name="posGridshieldV37"unit="mm" x="(shield_Xe+shield_T)/2"
      y="-(shield_Ye/2+3*Target_TY)" z="2.5*Reforco_ZS"/>
310 <position name="posGridshieldV38"unit="mm" x="-(shield_Xe+shield_T)/2
      " y="-(shield_Ye/2+3*Target_TY)" z="2.5*Reforco_ZS"/>
311 <position name="posGridshieldV39"unit="mm" x="(shield_Xe+shield_T)/2"
      y="-(shield_Ye/2+3*Target_TY)" z="-2.5*Reforco_ZS"/>
312 <position name="posGridshieldV40"unit="mm" x="-(shield_Xe+shield_T)/2
      " y="-(shield_Ye/2+3*Target_TY)" z="-2.5*Reforco_ZS"/>
313 <position name="posGridshieldV41"unit="mm" x="Reforco_ZS" y="-(
      shield_Ye/2+3*Target_TY)" z="(shield_Ze+shield_T)/2"/>
314 <position name="posGridshieldV42"unit="mm" x="Reforco_ZS" y="-(
      shield_Ye/2+3*Target_TY)" z="-(shield_Ze+shield_T)/2"/>
315 <position name="posGridshieldV43"unit="mm" x="-Reforco_ZS" y="-(
      shield_Ye/2+3*Target_TY)" z="(shield_Ze+shield_T)/2"/>
316 <position name="posGridshieldV44"unit="mm" x="-Reforco_ZS" y="-(
      shield_Ye/2+3*Target_TY)" z="-(shield_Ze+shield_T)/2"/>
317 <position name="posGridshieldV45"unit="mm" x="2.5*Reforco_ZS" y="-(
      shield_Ye/2+3*Target_TY)" z="(shield_Ze+shield_T)/2"/>
```

```
318 <position name="posGridshieldV46" unit="mm" x="2.5*Reforco_ZS" y="-(  
    shield_Ye/2+3*Target_TY)" z="-(shield_Ze+shield_T)/2"/>  
319 <position name="posGridshieldV47" unit="mm" x="-2.5*Reforco_ZS" y="-(  
    shield_Ye/2+3*Target_TY)" z="(shield_Ze+shield_T)/2"/>  
320 <position name="posGridshieldV48" unit="mm" x="-2.5*Reforco_ZS" y="-(  
    shield_Ye/2+3*Target_TY)" z="-(shield_Ze+shield_T)/2"/>  
321 <position name="posGridshieldH1" unit="mm" x="0." y="Reforco_YS" z="  
    shield_Ze/2"/>  
322 <position name="posGridshieldH2" unit="mm" x="0." y="Reforco_YS" z="-  
    shield_Ze/2"/>  
323 <position name="posGridshieldH3" unit="mm" x="0." y="-Reforco_YS" z="  
    shield_Ze/2"/>  
324 <position name="posGridshieldH4" unit="mm" x="0." y="-Reforco_YS" z="  
    -shield_Ze/2"/>  
325 <position name="posGridshieldH5" unit="mm" x="shield_Xe/2" y="  
    Reforco_YS" z="0."/>  
326 <position name="posGridshieldH6" unit="mm" x="shield_Xe/2" y="-  
    Reforco_YS" z="0."/>  
327 <position name="posGridshieldH7" unit="mm" x="-shield_Xe/2" y="  
    Reforco_YS" z="0."/>  
328 <position name="posGridshieldH8" unit="mm" x="-shield_Xe/2" y="-  
    Reforco_YS" z="0."/>  
329 <position name="posGridshieldH9" unit="mm" x="0." y="shield_Ye/2+  
    shield_T/2" z="shield_Ze/2-shield_T"/>  
330 <position name="posGridshieldH10" unit="mm" x="0." y="shield_Ye/2+  
    shield_T/2" z="-(shield_Ze/2-shield_T)/2"/>  
331 <position name="posGridshieldH11" unit="mm" x="0." y="shield_Ye/2+  
    shield_T/2" z="Reforco_ZS"/>  
332 <position name="posGridshieldH12" unit="mm" x="0." y="shield_Ye/2+  
    shield_T/2" z="-Reforco_ZS"/>  
333 <position name="posGridshieldH13" unit="mm" x="Reforco_ZS" y="  
    shield_Ye/2+shield_T/2" z="0."/>  
334 <position name="posGridshieldH14" unit="mm" x="-Reforco_ZS" y="  
    shield_Ye/2+shield_T/2" z="0."/>
```

```
335 <position name="posGridshieldH15"unit="mm" x="2.5*Reforco_ZS" y="
      shield_Ye/2+shield_T/2" z="0."/>
336 <position name="posGridshieldH16"unit="mm" x="-2.5*Reforco_ZS" y="
      shield_Ye/2+shield_T/2" z="0."/>
337 <position name="posGridshieldH17"unit="mm" x="shield_Xe/2+shield_T" y
      ="shield_Ye/2-shield_T" z="0."/>
338 <position name="posGridshieldH18"unit="mm" x="-(shield_Xe/2+shield_T)
      " y="shield_Ye/2-shield_T" z="0."/>
339 <position name="posGridshieldH19"unit="mm" x="shield_Xe/2+shield_T" y
      ="-(shield_Ye/2-shield_T)" z="0."/>
340 <position name="posGridshieldH20"unit="mm" x="-(shield_Xe/2+shield_T)
      " y="-(shield_Ye/2-shield_T)" z="0."/>
341 <position name="posGridshieldH21"unit="mm" x="0." y="shield_Ye/2-
      shield_T" z="shield_Ze/2+shield_T"/>
342 <position name="posGridshieldH22"unit="mm" x="0." y="shield_Ye/2-
      shield_T" z="-(shield_Ze/2+shield_T)"/>
343 <position name="posGridshieldH23"unit="mm" x="0." y="-(shield_Ye/2-
      shield_T)" z="shield_Ze/2+shield_T"/>
344 <position name="posGridshieldH24"unit="mm" x="0." y="-(shield_Ye/2-
      shield_T)" z="-(shield_Ze/2+shield_T)"/>
345 <position name="posGridshieldH25"unit="mm" x="0." y="shield_Ye/2+
      shield_T" z="shield_Ze/2+shield_T"/>
346 <position name="posGridshieldH26"unit="mm" x="0." y="shield_Ye/2+
      shield_T" z="-(shield_Ze/2+shield_T)"/>
347 <position name="posGridshieldH27"unit="mm" x="0." y="(shield_Ye/2+
      shield_T+veto_Y)" z="shield_Ze/2+shield_T"/>
348 <position name="posGridshieldH28"unit="mm" x="0." y="(shield_Ye/2+
      shield_T+veto_Y)" z="-(shield_Ze/2+shield_T)"/>
349 <position name="posGridshieldH29"unit="mm" x="shield_Xe/2+shield_T" y
      ="shield_Ye/2+shield_T" z="0."/>
350 <position name="posGridshieldH30"unit="mm" x="-(shield_Xe/2+shield_T)
      " y="shield_Ye/2+shield_T" z="0."/>
351 <position name="posGridshieldH31"unit="mm" x="shield_Xe/2+shield_T" y
      ="(shield_Ye/2+shield_T+veto_Y)" z="0."/>
```

```
352 <position name="posGridshieldH32"unit="mm" x="- (shield_Xe/2+shield_T)
      " y="(shield_Ye/2+shield_T+veto_Y)" z="0." />
353 <position name="posGridshieldH33"unit="mm" x="0." y="- (shield_Ye/2+
      shield_T)" z="shield_Ze/2+shield_T" />
354 <position name="posGridshieldH34"unit="mm" x="0." y="- (shield_Ye/2+
      shield_T)" z="- (shield_Ze/2+shield_T)" />
355 <position name="posGridshieldH35"unit="mm" x="0." y="- (shield_Ye/2+
      shield_T+veto_Y)" z="shield_Ze/2+shield_T" />
356 <position name="posGridshieldH36"unit="mm" x="0." y="- (shield_Ye/2+
      shield_T+veto_Y)" z="- (shield_Ze/2+shield_T)" />
357 <position name="posGridshieldH37"unit="mm" x="shield_Xe/2+shield_T" y
      ="- (shield_Ye/2+shield_T)" z="0." />
358 <position name="posGridshieldH38"unit="mm" x="- (shield_Xe/2+shield_T)
      " y="- (shield_Ye/2+shield_T)" z="0." />
359 <position name="posGridshieldH39"unit="mm" x="shield_Xe/2+shield_T" y
      ="- (shield_Ye/2+shield_T+veto_Y)" z="0." />
360 <position name="posGridshieldH40"unit="mm" x="- (shield_Xe/2+shield_T)
      " y="- (shield_Ye/2+shield_T+veto_Y)" z="0." />
361 <position name="posBowl"unit="mm" x="0" y="0" z="0" />
362 <rotation name="rotateXP90"unit="deg" x="90" y="0" z="0" />
363 <rotation name="rotateXN90"unit="deg" x="-90" y="0" z="0" />
364 <rotation name="rotateXP180"unit="deg" x="180" y="0" z="0" />
365 <rotation name="rotateXN180"unit="deg" x="-180" y="0" z="0" />
366 <rotation name="rotateYP90" unit="deg" x="0" y="90" z="0" />
367 <rotation name="rotateYN90" unit="deg" x="0" y="-90" z="0" />
368 <rotation name="rotateZP90" unit="deg" x="0" y="0" z="90" />
369 <rotation name="rotateZN90" unit="deg" x="0" y="0" z="-90" />
370 </define>
371
372 <!--Definicoes dos Materiais-->
373
374 <materials>
375 <element name="hydrogen"formula="H" Z="1"><atom value="1.0079"/></
      element>
```

```
376 <element name="nitrogen" formula="N" Z="7"><atom value="14.0067"/></  
    element>  
377 <element name="oxygen" formula="O" Z="8"><atom value="15.999"/></  
    element>  
378 <element name="argon" formula="Ar" Z="18"> <atom value="39.9480"/> </  
    element>  
379 <element name="carbon" formula="C" Z="6"> <atom value="12.0107"/> </  
    element>  
380 <element name="silicio" formula="Si" Z="14"><atom value="28.0855"/> </  
    element>  
381 <element name="chlorine" formula="Cl" Z="17"><atom value="35.453"/> <  
    /element>  
382 <element name="gadolinium" formula="Gd" Z="64"><atom value="157.25"/>  
    </element>  
383 <element name="chromium" formula="Cr" Z="24"> <atom value="51.9961"/>  
    </element>  
384 <element name="iron" formula="Fe" Z="26"> <atom value="55.8450"/> </  
    element>  
385 <element name="nickel" formula="Ni" Z="28"><atom value="58.6934"/> </  
    element>  
386 <element name="sodium" formula="Na" Z="11"><atom value="22.989769"/></  
    element>  
387 <element name="magnesium" formula="Mg" Z="12"><atom value="24.305"/> <  
    /element>  
388 <element name="aluminum" formula="Al" Z="13"> <atom value="26.981539"/  
    ></element>  
389 <element name="phosphorous" formula="P" Z="15"> <atom value="30.974"/  
    > </element>  
390 <element name="sulfur" formula="S" Z="16"> <atom value="32.06"/></  
    element>  
391 <element name="argon" formula="Ar" Z="18"> <atom value="39.948"/></  
    element>  
392 <element name="potassium" formula="K" Z="19"><atom value="39.0983"/>  
    </element>
```

```
393 <element name="calcium" formula="Ca" Z="20"> <atom value="40.078"/> <
      /element>
394 <element name="titanium" formula="Ti" Z="22"> <atom value="47.867"/> <
      /element>
395 <element name="vanadium" formula="V" Z="23"> <atom value="50.9415"/><
      /element>
396 <element name="manganese" formula="Mn" Z="25"><atom value="54.938"/> <
      /element>
397 <element name="copper" formula="Cu" Z="29"> <atom value="63.546"/> </
      element>
398 <element name="bromine" formula="Br" Z="35"><atom value="79.904"/> </
      element>
399 <element name="niobium" formula="Nb" Z="41"><atom value="92.906"/> </
      element>
400 <element name="molybdenum" formula="Mo" Z="42"> <atom value="95.95"/>
      </element>
401
402
403 <material Z="1" formula=" " name="Vacuum">
404 <D value="1.e-25" unit="g/cm3"/>
405 <atom value="1.0079"/>
406 </material>
407
408 <material name="Glass">
409 <D value="2.74351" unit="g/cm3"/>
410 <fraction n="0.600" ref="SiO2"/>
411 <fraction n="0.118" ref="Al2O3"/>
412 <fraction n="0.001" ref="Fe2O3"/>
413 <fraction n="0.224" ref="CaO"/>
414 <fraction n="0.034" ref="MgO"/>
415 <fraction n="0.010" ref="Na2O"/>
416 <fraction n="0.013" ref="TiO2"/>
417 </material>
418
```

```
419 <material formula=" " name="Air">
420 <D value="0.001205" unit="g/cm3"/>
421 <fraction n="0.781154" ref="nitrogen"/>
422 <fraction n="0.209476" ref="oxygen"/>
423 <fraction n="0.00937" ref="argon"/>
424 </material>
425
426 <material formula="H2O" name="Water">
427 <D value="1.0" unit="g/cm3"/>
428 <composite n="2" ref="hydrogen"/>
429 <composite n="1" ref="oxygen"/>
430 </material>
431
432 <material formula="GdCl3" name="Gd">
433 <D value="1.0" unit="g/cm3"/>
434 <composite n="1" ref="gadolinium"/>
435 <composite n="3" ref="chlorine"/>
436 </material>
437
438 <material formula="GdW" name="GdW">
439 <D value="1.0" unit="g/cm3"/>
440 <fraction n="0.997" ref="Water"/>
441 <fraction n="0.003" ref="Gd"/>
442 </material>
443
444 <material name="Polypropylene">
445 <D value="0.946" unit="g/cm3"/>
446 <fraction n="0.333333" ref="hydrogen"/>
447 <fraction n="0.666667" ref="carbon"/>
448 </material>
449
450 <material name="STEEL_STAINLESS_Fe7Cr2Ni" formula="
STEEL_STAINLESS_Fe7Cr2Ni">
451 <D value="7.9300" unit="g/cm3"/>
```

```
452 <fraction n="0.0010"      ref="carbon"/>
453 <fraction n="0.1792"      ref="chromium"/>
454 <fraction n="0.7298"      ref="iron"/>
455 <fraction n="0.0900"      ref="nickel"/>
456 </material>
457
458 <material name="STEEL_STRUCTURAL_S460L" formula="S460L">
459 <D value="3.8321"        unit="g/cm3"/>
460 <fraction n="0.95380"    ref="iron"/>
461 <fraction n="0.01700"    ref="manganese"/>
462 <fraction n="0.00800"    ref="nickel"/>
463 <fraction n="0.00600"    ref="silicon"/>
464 <fraction n="0.00550"    ref="copper"/>
465 <fraction n="0.00300"    ref="chromium"/>
466 <fraction n="0.00200"    ref="molybdenum"/>
467 <fraction n="0.00160"    ref="carbon"/>
468 <fraction n="0.00120"    ref="vanadium"/>
469 <fraction n="0.00050"    ref="niobium"/>
470 <fraction n="0.00050"    ref="titanium"/>
471 <fraction n="0.00025"    ref="phosphorous"/>
472 <fraction n="0.00025"    ref="nitrogen"/>
473 <fraction n="0.00020"    ref="sulfur"/>
474 <fraction n="0.00020"    ref="aluminum"/>
475 </material>
476
477 </materials>
478
479 <!-- Alvo do Detector -->
480
481 <solids>
482 <box name="boxWorld" lunit="mm" x="ExpHall" y="ExpHall" z="ExpHall"/>
483 <box name="boxTarget" lunit="mm" x="Target_X" y="Target_Y" z="Target_Z
    "/>
484 <box name="boxBaseTarget" lunit="mm" x="BaseTarget_Xe" y="
```



```
    BaseTarget_Ye" z="BaseTarget_Ze"/>
485 <box name="boxGridTargetV" lunit="mm" x="Target_TX" y="Target_Ye" z="
    Target_TX"/>
486 <box name="boxGridTargetH" lunit="mm" x="Target_Xe" y="Target_TY" z="
    Target_TZ"/>
487 <box name="boxGridTargetH1" lunit="mm" x="Target_TX" y="Target_TY" z="
    Target_Ze"/>
488 <box name="boxGridTargetH2" lunit="mm" x="Target_Xe+2*Target_TX" y="
    Target_TY" z="Target_TY"/>
489 <box name="boxGridTargetH3" lunit="mm" x="Target_TY" y="Target_TY" z="
    Target_Ze+2*Target_TZ"/>
490 <box name="boxTarget_e" lunit="mm" x="Target_Xe" y="Target_Ye" z="
    Target_Ze"/>
491
492 <subtraction name="Alvo">
493 <first ref="boxTarget_e" />
494 <second ref="boxTarget" />
495 <position name="posAlvo" unit="mm" x="0" y="0" z="0" />
496 </subtraction>
497
498 <ellipsoid name="ellipBowl" ax="Pmt_R" by="Pmt_R" cz="Pmt_H" zcut1="
    0." />
499 <ellipsoid name="ellipVacuum" ax="Pmt_R-Pmt_T" by="Pmt_R-Pmt_T" cz="
    Pmt_H-Pmt_T" zcut1="0." />
500 <subtraction name="pmtBowlTargetIn">
501 <first ref="ellipBowl" />
502 <second ref="ellipVacuum" />
503 <position name="pospmtBowl" unit="mm" x="0" y="0" z="-eD" />
504 </subtraction>
505
506 <subtraction name="pmtBowlTargetIn">
507 <first ref="ellipBowl" />
508 <second ref="ellipVacuum" />
509 <position name="pospmtBowl" unit="mm" x="0" y="0" z="-eD" />
```

```
510 </subtraction>
511
512 <ellipsoid name="ellipBowlinf" ax="Pmt_R" by="Pmt_R" cz="Pmt_H"
      zcut2="0." />
513 <ellipsoid name="ellipVacuuminf" ax="Pmt_R-Pmt_T" by="Pmt_R-Pmt_T" cz=
      "Pmt_H-Pmt_T" zcut2="0." />
514 <subtraction name="pmtBowl_inf">
515 <first ref="ellipBowlinf" />
516 <second ref="ellipVacuuminf" />
517 <position name="posVaccumPMT" unit="mm" x="0" y="0" z="-eD" />
518 </subtraction>
519
520 <eltube name="BasePMT_full" dx="pmtBaseX" dy="pmtBaseY" dz="pmtBaseZ"
      lunit="mm"/>
521 <eltube name="eltubeVacuum" dx="pmtBaseX-Pmt_T" dy="pmtBaseY-Pmt_T" dz
      ="pmtBaseZ-Pmt_T" lunit="mm"/>
522
523 <subtraction name="BasePMT">
524 <first ref="BasePMT_full" />
525 <second ref="eltubeVacuum" />
526 <position name="posVaccumPMT" unit="mm" x="0" y="0" z="0" />
527 </subtraction>
528 <union name="pmtBowlTargetOut">
529 <first ref="pmtBowl_inf"/>
530 <second ref="BasePMT"/>
531 <position name="posBaseBowl_inf" unit="mm" x="0" y="0" z="-84.5" />
532 </union>
533
534 <box name="boxVetoExternal" lunit="mm" x="Inner_X+Inner_T" y="Inner_Y"
      z="Inner_Z+Inner_T"/>
535 <box name="boxVetoVoid" lunit="mm" x="Inner_X" y="Inner_Y" z="Inner_Z
      "/>
536 <subtraction name="boxInnerVeto">
537 <first ref="boxVetoExternal"/>
```

```
538 <second ref="boxVetoVoid"/>
539 <position name="posInner"          unit="mm" x="0" y="0" z="0"/>
540 </subtraction>
541 </solids>
542
543 <structure>
544
545 <volume name="volInnerVeto">
546 <materialref ref="Polypropylene"/>
547 <solidref ref="boxInnerVeto"/>
548 </volume>
549
550 <volume name="volWaterTarget">
551 <materialref ref="GdW"/>
552 <solidref ref="boxTarget"/>
553 </volume>
554
555 <volume name="volPMTTargetIn" >
556 <materialref ref="Glass"/>
557 <solidref ref="pmtBowlTargetIn"/>
558 </volume>
559
560 <volume name="volPMTTargetOut" >
561 <materialref ref="Glass"/>
562 <solidref ref="pmtBowlTargetOut"/>
563 </volume>
564
565 <volume name="volPMTVacuum" >
566 <materialref ref="Vacuum"/>
567 <solidref ref="ellipVacuum"/>
568 </volume>
569
570 <volume name="volTargetWall" >
571 <materialref ref="Polypropylene"/>
```

```
572 <solidref ref="Alvo"/>
573 <physvol name="spaceUnderTarget" >
574 <volumeref ref="volTargetSpace"/>
575 <position name="posTargetSpace_1" unit="mm" x="0." y="0" z="0." />
576 </physvol>
577 </volume>
578
579 <volume name="volAlvo" >
580 <materialref ref="Polypropylene"/>
581 <solidref ref="Alvo"/>
582 <physvol>
583 <volumeref ref="volTargetWall"/>
584 <positionref ref="posTarget_e"/>
585 </physvol>
586
587 </volume>
588
589 <volume name="volGridTargetV">
590 <materialref ref="Polypropylene"/>
591 <solidref ref="boxGridTargetV"/>
592 </volume>
593
594 <volume name="volGridTargetH">
595 <materialref ref="Polypropylene"/>
596 <solidref ref="boxGridTargetH"/>
597 </volume>
598
599 <volume name="volGridTargetH1">
600 <materialref ref="Polypropylene"/>
601 <solidref ref="boxGridTargetH1"/>
602 </volume>
603
604 <volume name="volGridTargetH2">
605 <materialref ref="Polypropylene"/>
```

```
606 <solidref ref="boxGridTargetH2" />
607 </volume>
608
609 <volume name="volGridTargetH3">
610 <materialref ref="Polypropylene" />
611 <solidref ref="boxGridTargetH3" />
612 </volume>
613
614 <volume name="volBaseTarget" >
615 <materialref ref="Polypropylene" />
616 <solidref ref="boxBaseTarget" />
617 </volume>
618
619 <volume name="volTargetOut" >
620 <materialref ref="Water" />
621 <solidref ref="boxTarget" />
622
623 <physvol>
624 <volumeref ref="volPMTTargetOut" />
625 <position name="posPMT_D_1" unit="mm" x="BowlX_D_1" y="BowlY_D_1" z="
        BowlZ_D_1" />
626 <rotationref ref="rotateXP90" />
627 </physvol>
628 <physvol>
629 <volumeref ref="volPMTVacuum" />
630 <positionref ref="posPMT_D_1" />
631 <rotationref ref="rotateXP90" />
632 </physvol>
633
634 <physvol>
635 <volumeref ref="volPMTTargetOut" />
636 <position name="posPMT_D_2" unit="mm" x="BowlX_D_2" y="BowlY_D_2" z="
        BowlZ_D_2" />
637 <rotationref ref="rotateXP90" />
```

```
638 </physvol>
639 <physvol>
640 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
641 <positionref ref="posPMT_D_2"/>
642 <rotationref ref="rotateXP90"/>
643 </physvol>
644
645 <physvol>
646 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
647 <position name="posPMT_D_3" unit="mm" x="BowlX_D_3" y="BowlY_D_3" z="
        BowlZ_D_3"/>
648 <rotationref ref="rotateXP90"/>
649 </physvol>
650
651 <physvol>
652 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
653 <positionref ref="posPMT_D_3"/>
654 <rotationref ref="rotateXP90"/>
655 </physvol>
656
657 <physvol>
658 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
659 <position name="posPMT_D_4" unit="mm" x="BowlX_D_4" y="BowlY_D_4" z="
        BowlZ_D_4"/>
660 <rotationref ref="rotateXP90"/>
661 </physvol>
662
663 <physvol>
664 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
665 <positionref ref="posPMT_D_4"/>
666 <rotationref ref="rotateXP90"/>
667 </physvol>
668
669 <physvol>
```

```
670 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
671 <position name="posPMT_D_5" unit="mm" x="BowlX_D_5" y="BowlY_D_5" z="
      BowlZ_D_5"/>
672 <rotationref ref="rotateXP90"/>
673 </physvol>
674
675 <physvol>
676 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
677 <positionref ref="posPMT_D_5"/>
678 <rotationref ref="rotateXP90"/>
679 </physvol>
680
681 <physvol>
682 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
683 <position name="posPMT_D_6" unit="mm" x="BowlX_D_6" y="BowlY_D_6" z="
      BowlZ_D_6"/>
684 <rotationref ref="rotateXP90"/>
685 </physvol>
686
687 <physvol>
688 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
689 <positionref ref="posPMT_D_6"/>
690 <rotationref ref="rotateXP90"/>
691 </physvol>
692
693 <physvol>
694 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
695 <position name="posPMT_D_7" unit="mm" x="BowlX_D_7" y="BowlY_D_7" z="
      BowlZ_D_7"/>
696 <rotationref ref="rotateXP90"/>
697 </physvol>
698
699 <physvol>
700 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
```

```
701 <positionref ref="posPMT_D_7"/>
702 <rotationref ref="rotateXP90"/>
703 </physvol>
704
705 <physvol>
706 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
707 <position name="posPMT_D_8" unit="mm" x="BowlX_D_8" y="BowlY_D_8" z="
      BowlZ_D_8"/>
708 <rotationref ref="rotateXP90"/>
709 </physvol>
710
711 <physvol>
712 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
713 <positionref ref="posPMT_D_8"/>
714 <rotationref ref="rotateXP90"/>
715 </physvol>
716
717 <physvol>
718 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
719 <position name="posPMT_D_9" unit="mm" x="BowlX_D_9" y="BowlY_D_9" z="
      BowlZ_D_9"/>
720 <rotationref ref="rotateXP90"/>
721 </physvol>
722
723 <physvol>
724 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
725 <positionref ref="posPMT_D_9"/>
726 <rotationref ref="rotateXP90"/>
727 </physvol>
728
729 <physvol>
730 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
731 <position name="posPMT_D_10" unit="mm" x="BowlX_D_10" y="BowlY_D_10"
      z="BowlZ_D_10"/>
```



```
732 <rotationref ref="rotateXP90"/>
733 </physvol>
734
735 <physvol>
736 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
737 <positionref ref="posPMT_D_10"/>
738 <rotationref ref="rotateXP90"/>
739 </physvol>
740
741 <physvol>
742 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
743 <position name="posPMT_D_11" unit="mm" x="BowlX_D_11" y="BowlY_D_11"
       z="BowlZ_D_11"/>
744 <rotationref ref="rotateXP90"/>
745 </physvol>
746
747 <physvol>
748 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
749 <positionref ref="posPMT_D_11"/>
750 <rotationref ref="rotateXP90"/>
751 </physvol>
752
753 <physvol>
754 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
755 <position name="posPMT_D_12" unit="mm" x="BowlX_D_12" y="BowlY_D_12"
       z="BowlZ_D_12"/>
756 <rotationref ref="rotateXP90"/>
757 </physvol>
758
759 <physvol>
760 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
761 <positionref ref="posPMT_D_12"/>
762 <rotationref ref="rotateXP90"/>
763 </physvol>
```

```
764
765 <physvol>
766 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
767 <position name="posPMT_D_13" unit="mm" x="BowlX_D_13" y="BowlY_D_13"
       z="BowlZ_D_13"/>
768 <rotationref ref="rotateXP90"/>
769 </physvol>
770
771 <physvol>
772 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
773 <positionref ref="posPMT_D_13"/>
774 <rotationref ref="rotateXP90"/>
775 </physvol>
776
777
778 <physvol>
779 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
780 <position name="posPMT_D_14" unit="mm" x="BowlX_D_14" y="BowlY_D_14"
       z="BowlZ_D_14"/>
781 <rotationref ref="rotateXP90"/>
782 </physvol>
783
784 <physvol>
785 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
786 <positionref ref="posPMT_D_14"/>
787 <rotationref ref="rotateXP90"/>
788 </physvol>
789
790 <physvol>
791 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
792 <position name="posPMT_D_15" unit="mm" x="BowlX_D_15" y="BowlY_D_15"
       z="BowlZ_D_15"/>
793 <rotationref ref="rotateXP90"/>
794 </physvol>
```

```
795
796 <physvol>
797 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
798 <positionref ref="posPMT_D_15"/>
799 <rotationref ref="rotateXP90"/>
800 </physvol>
801
802 <physvol>
803 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
804 <position name="posPMT_D_16" unit="mm" x="BowlX_D_16" y="BowlY_D_16"
      z="BowlZ_D_16"/>
805 <rotationref ref="rotateXP90"/>
806 </physvol>
807
808 <physvol>
809 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
810 <positionref ref="posPMT_D_16"/>
811 <rotationref ref="rotateXP90"/>
812 </physvol>
813
814 <physvol>
815 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
816 <position name="posPMT_U_1" unit="mm" x="BowlX_U_1" y="BowlY_U_1" z="
      BowlZ_U_1"/>
817 <rotationref ref="rotateXN90"/>
818 </physvol>
819
820 <physvol>
821 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
822 <positionref ref="posPMT_U_1"/>
823 <rotationref ref="rotateXN90"/>
824 </physvol>
825
826 <physvol>
```

```
827 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
828 <position name="posPMT_U_2" unit="mm" x="BowlX_U_2" y="BowlY_U_2" z="
      BowlZ_U_2"/>
829 <rotationref ref="rotateXN90"/>
830 </physvol>
831
832 <physvol>
833 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
834 <positionref ref="posPMT_U_2"/>
835 <rotationref ref="rotateXN90"/>
836 </physvol>
837
838 <physvol>
839 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
840 <position name="posPMT_U_3" unit="mm" x="BowlX_U_3" y="BowlY_U_3" z="
      BowlZ_U_3"/>
841 <rotationref ref="rotateXN90"/>
842 </physvol>
843
844 <physvol>
845 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
846 <positionref ref="posPMT_U_3"/>
847 <rotationref ref="rotateXN90"/>
848 </physvol>
849 <physvol>
850 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
851 <position name="posPMT_U_4" unit="mm" x="BowlX_U_4" y="BowlY_U_4" z="
      BowlZ_U_4"/>
852 <rotationref ref="rotateXN90"/>
853 </physvol>
854
855 <physvol>
856 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
857 <positionref ref="posPMT_U_4"/>
```

```
858 <rotationref ref="rotateXN90"/>
859 </physvol>
860
861 <physvol>
862 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
863 <position name="posPMT_U_5" unit="mm" x="BowlX_U_5" y="BowlY_U_5" z="
      BowlZ_U_5"/>
864 <rotationref ref="rotateXN90"/>
865 </physvol>
866
867 <physvol>
868 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
869 <positionref ref="posPMT_U_5"/>
870 <rotationref ref="rotateXN90"/>
871 </physvol>
872
873 <physvol>
874 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
875 <position name="posPMT_U_6" unit="mm" x="BowlX_U_6" y="BowlY_U_6" z="
      BowlZ_U_6"/>
876 <rotationref ref="rotateXN90"/>
877 </physvol>
878
879 <physvol>
880 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
881 <positionref ref="posPMT_U_6"/>
882 <rotationref ref="rotateXN90"/>
883 </physvol>
884
885 <physvol>
886 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
887 <position name="posPMT_U_7" unit="mm" x="BowlX_U_7" y="BowlY_U_7" z="
      BowlZ_U_7"/>
888 <rotationref ref="rotateXN90"/>
```

```
889 </physvol>
890
891 <physvol>
892 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
893 <positionref ref="posPMT_U_7"/>
894 <rotationref ref="rotateXN90"/>
895 </physvol>
896
897 <physvol>
898 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
899 <position name="posPMT_U_8" unit="mm" x="BowlX_U_8" y="BowlY_U_8" z="
      BowlZ_U_8"/>
900 <rotationref ref="rotateXN90"/>
901 </physvol>
902
903 <physvol>
904 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
905 <positionref ref="posPMT_U_8"/>
906 <rotationref ref="rotateXN90"/>
907 </physvol>
908
909 <physvol>
910 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
911 <position name="posPMT_U_9" unit="mm" x="BowlX_U_9" y="BowlY_U_9" z="
      BowlZ_U_9"/>
912 <rotationref ref="rotateXN90"/>
913 </physvol>
914
915 <physvol>
916 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
917 <positionref ref="posPMT_U_9"/>
918 <rotationref ref="rotateXN90"/>
919 </physvol>
920
```

```
921 <physvol>
922 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
923 <position name="posPMT_U_10" unit="mm" x="BowlX_U_10" y="BowlY_U_10"
      z="BowlZ_U_10"/>
924 <rotationref ref="rotateXN90"/>
925 </physvol>
926
927 <physvol>
928 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
929 <positionref ref="posPMT_U_10"/>
930 <rotationref ref="rotateXN90"/>
931 </physvol>
932
933 <physvol>
934 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
935 <position name="posPMT_U_11" unit="mm" x="BowlX_U_11" y="BowlY_U_11"
      z="BowlZ_U_11"/>
936 <rotationref ref="rotateXN90"/>
937 </physvol>
938
939 <physvol>
940 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
941 <positionref ref="posPMT_U_11"/>
942 <rotationref ref="rotateXN90"/>
943 </physvol>
944
945 <physvol>
946 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
947 <position name="posPMT_U_12" unit="mm" x="BowlX_U_12" y="BowlY_U_12"
      z="BowlZ_U_12"/>
948 <rotationref ref="rotateXN90"/>
949 </physvol>
950
951 <physvol>
```

```
952 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
953 <positionref ref="posPMT_U_12"/>
954 <rotationref ref="rotateXN90"/>
955 </physvol>
956
957 <physvol>
958 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
959 <position name="posPMT_U_13" unit="mm" x="BowlX_U_13" y="BowlY_U_13"
      z="BowlZ_U_13"/>
960 <rotationref ref="rotateXN90"/>
961 </physvol>
962
963 <physvol>
964 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
965 <positionref ref="posPMT_U_13"/>
966 <rotationref ref="rotateXN90"/>
967 </physvol>
968
969 <physvol>
970 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
971 <position name="posPMT_U_14" unit="mm" x="BowlX_U_14" y="BowlY_U_14"
      z="BowlZ_U_14"/>
972 <rotationref ref="rotateXN90"/>
973 </physvol>
974
975 <physvol>
976 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
977 <positionref ref="posPMT_U_14"/>
978 <rotationref ref="rotateXN90"/>
979 </physvol>
980
981 <physvol>
982 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
983 <position name="posPMT_U_15" unit="mm" x="BowlX_U_15" y="BowlY_U_15"
```



```
        z="BowlZ_U_15"/>
984 <rotationref ref="rotateXN90"/>
985 </physvol>
986
987 <physvol>
988 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
989 <positionref ref="posPMT_U_15"/>
990 <rotationref ref="rotateXN90"/>
991 </physvol>
992
993 <physvol>
994 <volumeref ref="volPMTTargetOut"/>
995 <position name="posPMT_U_16" unit="mm" x="BowlX_U_16" y="BowlY_U_16"
        z="BowlZ_U_16"/>
996 <rotationref ref="rotateXN90"/>
997 </physvol>
998
999 <physvol>
1000 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1001 <positionref ref="posPMT_U_16"/>
1002 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1003 </physvol>
1004
1005 <physvol>
1006 <volumeref ref="volGridTargetH"/>
1007 <positionref ref="posGridTargetH1" />
1008 </physvol>
1009
1010 <physvol>
1011 <volumeref ref="volGridTargetH"/>
1012 <positionref ref="posGridTargetH2" />
1013 </physvol>
1014
1015 <physvol>
```

```
1016 <volumeref ref="volGridTargetH" />
1017 <positionref ref="posGridTargetH3" />
1018 </physvol>
1019
1020 <physvol>
1021 <volumeref ref="volGridTargetH" />
1022 <positionref ref="posGridTargetH4" />
1023 </physvol>
1024
1025 <physvol>
1026 <volumeref ref="volGridTargetH1" />
1027 <positionref ref="posGridTargetH5" />
1028 </physvol>
1029
1030 <physvol>
1031 <volumeref ref="volGridTargetH1" />
1032 <positionref ref="posGridTargetH6" />
1033 </physvol>
1034
1035 <physvol>
1036 <volumeref ref="volGridTargetH1" />
1037 <positionref ref="posGridTargetH7" />
1038 </physvol>
1039
1040 <physvol>
1041 <volumeref ref="volGridTargetH1" />
1042 <positionref ref="posGridTargetH8" />
1043 </physvol>
1044
1045 <physvol>
1046 <volumeref ref="volGridTargetH2" />
1047 <positionref ref="posGridTargetH9" />
1048 </physvol>
1049
```

```
1050 <physvol>
1051 <volumeref ref="volGridTargetH2"/>
1052 <positionref ref="posGridTargetH10" />
1053 </physvol>
1054
1055 <physvol>
1056 <volumeref ref="volGridTargetH2"/>
1057 <positionref ref="posGridTargetH11" />
1058 </physvol>
1059
1060 <physvol>
1061 <volumeref ref="volGridTargetH2"/>
1062 <positionref ref="posGridTargetH12" />
1063 </physvol>
1064
1065 <physvol>
1066 <volumeref ref="volGridTargetH3"/>
1067 <positionref ref="posGridTargetH13" />
1068 </physvol>
1069
1070 <physvol>
1071 <volumeref ref="volGridTargetH3"/>
1072 <positionref ref="posGridTargetH14" />
1073 </physvol>
1074
1075 <physvol>
1076 <volumeref ref="volGridTargetH3"/>
1077 <positionref ref="posGridTargetH15" />
1078 </physvol>
1079
1080 <physvol>
1081 <volumeref ref="volGridTargetH3"/>
1082 <positionref ref="posGridTargetH16" />
1083 </physvol>
```

```
1084
1085 <physvol>
1086 <volumeref ref="volGridTargetV"/>
1087 <positionref ref="posGridTargetV1" />
1088 </physvol>
1089
1090 <physvol>
1091 <volumeref ref="volGridTargetV"/>
1092 <positionref ref="posGridTargetV2" />
1093 </physvol>
1094
1095 <physvol>
1096 <volumeref ref="volGridTargetV"/>
1097 <positionref ref="posGridTargetV3" />
1098 </physvol>
1099
1100 <physvol>
1101 <volumeref ref="volGridTargetV"/>
1102 <positionref ref="posGridTargetV4" />
1103 </physvol>
1104
1105 <physvol>
1106 <volumeref ref="volGridTargetV"/>
1107 <positionref ref="posGridTargetV5" />
1108 </physvol>
1109
1110 <physvol>
1111 <volumeref ref="volGridTargetV"/>
1112 <positionref ref="posGridTargetV6" />
1113 </physvol>
1114
1115 <physvol>
1116 <volumeref ref="volGridTargetV"/>
1117 <positionref ref="posGridTargetV7" />
```

```
1118 </physvol>
1119
1120 <physvol>
1121 <volumeref ref="volGridTargetV"/>
1122 <positionref ref="posGridTargetV8" />
1123 </physvol>
1124
1125 <physvol>
1126 <volumeref ref="volGridTargetV"/>
1127 <positionref ref="posGridTargetV9" />
1128 </physvol>
1129
1130 <physvol>
1131 <volumeref ref="volGridTargetV"/>
1132 <positionref ref="posGridTargetV10" />
1133 </physvol>
1134
1135 <physvol>
1136 <volumeref ref="volGridTargetV"/>
1137 <positionref ref="posGridTargetV11" />
1138 </physvol>
1139
1140 <physvol>
1141 <volumeref ref="volGridTargetV"/>
1142 <positionref ref="posGridTargetV12" />
1143 </physvol>
1144
1145 <physvol>
1146 <volumeref ref="volGridTargetV"/>
1147 <positionref ref="posGridTargetV13" />
1148 </physvol>
1149
1150 <physvol>
1151 <volumeref ref="volGridTargetV"/>
```

```
1152 <positionref ref="posGridTargetV14" />
1153 </physvol>
1154
1155 <physvol>
1156 <volumeref ref="volGridTargetV"/>
1157 <positionref ref="posGridTargetV15" />
1158 </physvol>
1159
1160 <physvol>
1161 <volumeref ref="volGridTargetV"/>
1162 <positionref ref="posGridTargetV16" />
1163 </physvol>
1164
1165 <physvol>
1166 <volumeref ref="volBaseTarget"/>
1167 <positionref ref="posBaseTarget_e" unit="mm" x="BaseTarget_Xe" y="
      BaseTarget_Ye" z="BaseTarget_Ze"/>
1168 </physvol>
1169
1170 <physvol>
1171 <volumeref ref="volInnerVeto"/>
1172 <positionref ref="posInner"/>
1173 </physvol>
1174 </volume>
1175
1176 <volume name="volTargetIn" >
1177 <materialref ref="Water"/>
1178 <solidref ref="boxTarget"/>
1179 <physvol>
1180 <volumeref ref="volWaterTarget"/>
1181 <positionref ref="posAlvo"/>
1182 </physvol>
1183
1184 <physvol>
```

```
1185 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1186 <position name="posPMT_D_1" unit="mm" x="BowlX_D_1" y="BowlY_D_1" z="
      BowlZ_D_1"/>
1187 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1188 </physvol>
1189
1190 <physvol>
1191 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1192 <positionref ref="posPMT_D_1"/>
1193 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1194 </physvol>
1195
1196 <physvol>
1197 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1198 <position name="posPMT_D_2" unit="mm" x="BowlX_D_2" y="BowlY_D_2" z="
      BowlZ_D_2"/>
1199 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1200 </physvol>
1201
1202 <physvol>
1203 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1204 <positionref ref="posPMT_D_2"/>
1205 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1206 </physvol>
1207
1208 <physvol>
1209 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1210 <position name="posPMT_D_3" unit="mm" x="BowlX_D_3" y="BowlY_D_3" z="
      BowlZ_D_3"/>
1211 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1212 </physvol>
1213
1214 <physvol>
1215 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
```

```
1216 <positionref ref="posPMT_D_3"/>
1217 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1218 </physvol>
1219
1220 <physvol>
1221 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1222 <position name="posPMT_D_4" unit="mm" x="BowlX_D_4" y="BowlY_D_4" z="
      BowlZ_D_4"/>
1223 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1224 </physvol>
1225
1226 <physvol>
1227 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1228 <positionref ref="posPMT_D_4"/>
1229 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1230 </physvol>
1231
1232 <physvol>
1233 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1234 <position name="posPMT_D_5" unit="mm" x="BowlX_D_5" y="BowlY_D_5" z="
      BowlZ_D_5"/>
1235 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1236 </physvol>
1237
1238 <physvol>
1239 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1240 <positionref ref="posPMT_D_5"/>
1241 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1242 </physvol>
1243
1244 <physvol>
1245 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1246 <position name="posPMT_D_6" unit="mm" x="BowlX_D_6" y="BowlY_D_6" z="
      BowlZ_D_6"/>
```



```
1247 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1248 </physvol>
1249
1250 <physvol>
1251 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1252 <positionref ref="posPMT_D_6"/>
1253 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1254 </physvol>
1255
1256 <physvol>
1257 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1258 <position name="posPMT_D_7" unit="mm" x="BowlX_D_7" y="BowlY_D_7" z="
    BowlZ_D_7"/>
1259 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1260 </physvol>
1261
1262 <physvol>
1263 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1264 <positionref ref="posPMT_D_7"/>
1265 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1266 </physvol>
1267
1268 <physvol>
1269 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1270 <position name="posPMT_D_8" unit="mm" x="BowlX_D_8" y="BowlY_D_8" z="
    BowlZ_D_8"/>
1271 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1272 </physvol>
1273
1274 <physvol>
1275 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1276 <positionref ref="posPMT_D_8"/>
1277 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1278 </physvol>
```

```
1279
1280 <physvol>
1281 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1282 <position name="posPMT_D_9" unit="mm" x="BowlX_D_9" y="BowlY_D_9" z="
      BowlZ_D_9"/>
1283 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1284 </physvol>
1285
1286 <physvol>
1287 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1288 <positionref ref="posPMT_D_9"/>
1289 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1290 </physvol>
1291
1292 <physvol>
1293 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1294 <position name="posPMT_D_10" unit="mm" x="BowlX_D_10" y="BowlY_D_10"
      z="BowlZ_D_10"/>
1295 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1296 </physvol>
1297
1298 <physvol>
1299 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1300 <positionref ref="posPMT_D_10"/>
1301 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1302 </physvol>
1303
1304 <physvol>
1305 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1306 <position name="posPMT_D_11" unit="mm" x="BowlX_D_11" y="BowlY_D_11"
      z="BowlZ_D_11"/>
1307 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1308 </physvol>
1309
```

```
1310 <physvol>
1311 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1312 <positionref ref="posPMT_D_11"/>
1313 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1314 </physvol>
1315
1316 <physvol>
1317 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1318 <position name="posPMT_D_12" unit="mm" x="BowlX_D_12" y="BowlY_D_12"
      z="BowlZ_D_12"/>
1319 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1320 </physvol>
1321
1322 <physvol>
1323 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1324 <positionref ref="posPMT_D_12"/>
1325 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1326 </physvol>
1327
1328 <physvol>
1329 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1330 <position name="posPMT_D_13" unit="mm" x="BowlX_D_13" y="BowlY_D_13"
      z="BowlZ_D_13"/>
1331 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1332 </physvol>
1333
1334 <physvol>
1335 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1336 <positionref ref="posPMT_D_13"/>
1337 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1338 </physvol>
1339
1340 <physvol>
1341 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
```

```
1342 <position name="posPMT_D_14" unit="mm" x="BowlX_D_14" y="BowlY_D_14"
      z="BowlZ_D_14"/>
1343 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1344 </physvol>
1345
1346 <physvol>
1347 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1348 <positionref ref="posPMT_D_14"/>
1349 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1350 </physvol>
1351
1352 <physvol>
1353 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1354 <position name="posPMT_D_15" unit="mm" x="BowlX_D_15" y="BowlY_D_15"
      z="BowlZ_D_15"/>
1355 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1356 </physvol>
1357
1358 <physvol>
1359 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1360 <positionref ref="posPMT_D_15"/>
1361 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1362 </physvol>
1363
1364 <physvol>
1365 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1366 <position name="posPMT_D_16" unit="mm" x="BowlX_D_16" y="BowlY_D_16"
      z="BowlZ_D_16"/>
1367 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1368 </physvol>
1369
1370 <physvol>
1371 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1372 <positionref ref="posPMT_D_16"/>
```

```
1373 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1374 </physvol>
1375
1376 <physvol>
1377 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1378 <position name="posPMT_U_1" unit="mm" x="BowlX_U_1" y="BowlY_U_1" z="
      BowlZ_U_1"/>
1379 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1380 </physvol>
1381
1382 <physvol>
1383 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1384 <positionref ref="posPMT_U_1"/>
1385 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1386 </physvol>
1387
1388 <physvol>
1389 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1390 <position name="posPMT_U_2" unit="mm" x="BowlX_U_2" y="BowlY_U_2" z="
      BowlZ_U_2"/>
1391 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1392 </physvol>
1393
1394 <physvol>
1395 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1396 <positionref ref="posPMT_U_2"/>
1397 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1398 </physvol>
1399
1400 <physvol>
1401 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1402 <position name="posPMT_U_3" unit="mm" x="BowlX_U_3" y="BowlY_U_3" z="
      BowlZ_U_3"/>
1403 <rotationref ref="rotateXN90"/>
```

```
1404 </physvol>
1405
1406 <physvol>
1407 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1408 <positionref ref="posPMT_U_3"/>
1409 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1410 </physvol>
1411
1412 <physvol>
1413 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1414 <position name="posPMT_U_4" unit="mm" x="BowlX_U_4" y="BowlY_U_4" z="
      BowlZ_U_4"/>
1415 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1416 </physvol>
1417
1418 <physvol>
1419 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1420 <positionref ref="posPMT_U_4"/>
1421 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1422 </physvol>
1423
1424 <physvol>
1425 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1426 <position name="posPMT_U_5" unit="mm" x="BowlX_U_5" y="BowlY_U_5" z="
      BowlZ_U_5"/>
1427 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1428 </physvol>
1429
1430 <physvol>
1431 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1432 <positionref ref="posPMT_U_5"/>
1433 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1434 </physvol>
1435
```

```
1436 <physvol>
1437 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1438 <position name="posPMT_U_6" unit="mm" x="BowlX_U_6" y="BowlY_U_6" z="
      BowlZ_U_6"/>
1439 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1440 </physvol>
1441
1442 <physvol>
1443 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1444 <positionref ref="posPMT_U_6"/>
1445 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1446 </physvol>
1447
1448 <physvol>
1449 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1450 <position name="posPMT_U_7" unit="mm" x="BowlX_U_7" y="BowlY_U_7" z="
      BowlZ_U_7"/>
1451 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1452 </physvol>
1453
1454 <physvol>
1455 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1456 <positionref ref="posPMT_U_7"/>
1457 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1458 </physvol>
1459
1460 <physvol>
1461 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1462 <position name="posPMT_U_8" unit="mm" x="BowlX_U_8" y="BowlY_U_8" z="
      BowlZ_U_8"/>
1463 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1464 </physvol>
1465
1466 <physvol>
```

```
1467 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1468 <positionref ref="posPMT_U_8"/>
1469 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1470 </physvol>
1471
1472 <physvol>
1473 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1474 <position name="posPMT_U_9" unit="mm" x="BowlX_U_9" y="BowlY_U_9" z="
      BowlZ_U_9"/>
1475 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1476 </physvol>
1477
1478 <physvol>
1479 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1480 <positionref ref="posPMT_U_9"/>
1481 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1482 </physvol>
1483
1484 <physvol>
1485 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1486 <position name="posPMT_U_10" unit="mm" x="BowlX_U_10" y="BowlY_U_10"
      z="BowlZ_U_10"/>
1487 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1488 </physvol>
1489
1490 <physvol>
1491 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1492 <positionref ref="posPMT_U_10"/>
1493 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1494 </physvol>
1495
1496 <physvol>
1497 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1498 <position name="posPMT_U_11" unit="mm" x="BowlX_U_11" y="BowlY_U_11"
```



```
        z="BowlZ_U_11"/>
1499 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1500 </physvol>
1501
1502 <physvol>
1503 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1504 <positionref ref="posPMT_U_11"/>
1505 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1506 </physvol>
1507
1508 <physvol>
1509 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1510 <position name="posPMT_U_12" unit="mm" x="BowlX_U_12" y="BowlY_U_12"
        z="BowlZ_U_12"/>
1511 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1512 </physvol>
1513
1514 <physvol>
1515 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1516 <positionref ref="posPMT_U_12"/>
1517 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1518 </physvol>
1519
1520 <physvol>
1521 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1522 <position name="posPMT_U_13" unit="mm" x="BowlX_U_13" y="BowlY_U_13"
        z="BowlZ_U_13"/>
1523 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1524 </physvol>
1525
1526 <physvol>
1527 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1528 <positionref ref="posPMT_U_13"/>
1529 <rotationref ref="rotateXN90"/>
```

```
1530 </physvol>
1531
1532 <physvol>
1533 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1534 <position name="posPMT_U_14" unit="mm" x="BowlX_U_14" y="BowlY_U_14"
      z="BowlZ_U_14"/>
1535 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1536 </physvol>
1537
1538 <physvol>
1539 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1540 <positionref ref="posPMT_U_14"/>
1541 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1542 </physvol>
1543
1544 <physvol>
1545 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1546 <position name="posPMT_U_15" unit="mm" x="BowlX_U_15" y="BowlY_U_15"
      z="BowlZ_U_15"/>
1547 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1548 </physvol>
1549
1550 <physvol>
1551 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1552 <positionref ref="posPMT_U_15"/>
1553 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1554 </physvol>
1555
1556 <physvol>
1557 <volumeref ref="volPMTTargetIn"/>
1558 <position name="posPMT_U_16" unit="mm" x="BowlX_U_16" y="BowlY_U_16"
      z="BowlZ_U_16"/>
1559 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1560 </physvol>
```

```
1561
1562 <physvol>
1563 <volumeref ref="volPMTVacuum"/>
1564 <positionref ref="posPMT_U_16"/>
1565 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1566 </physvol>
1567
1568 </volume>
1569
1570 </structure>
1571
1572 <!--Veto Interno do Detector (Inner Veto)-->
1573
1574 <solids>
1575
1576 <box name="boxInner" lunit="mm" x="Inner_X" y="Inner_Y" z="Inner_Z"/>
1577 <box name="boxVetoExternal" lunit="mm" x="Inner_X+Inner_T" y="Inner_Y"
1578     z="Inner_Z+Inner_T"/>
1579 <box name="boxVetoVoid" lunit="mm" x="Inner_X" y="Inner_Y" z="Inner_Z
1580     "/>
1581 <box name="boxFixacaoPMTInnerUpfull" lunit="mm" x="Inner_X" y="
1582     Inner_T" z="Inner_Z"/>
1583 <box name="boxFixacaoPMTInnerUpVoid" lunit="mm" x="Target_Xe" y="
1584     Inner_T" z="Target_Ze"/>
1585
1586 <subtraction name="boxInnerVeto">
1587 <first ref="boxVetoExternal"/>
1588 <second ref="boxVetoVoid"/>
1589 <position name="posInner" unit="mm" x="0" y="0" z="0"/>
1590 </subtraction>
1591
1592 <box name="boxShieldExternal" lunit="mm" x="shield_X+2*shield_T" y="
1593     "shield_Y+2*shield_T" z="shield_Z+2*shield_T"/>
1594 <box name="boxShieldVoid" lunit="mm" x="shield_X" y="shield_Y+
```

```
    eD" z="shield_Z"/>
1590 <subtraction name="boxShield">
1591 <first ref="boxShieldExternal"/>
1592 <second ref="boxShieldVoid"/>
1593 <position name="posShield" unit="mm" x="0" y="0." z="0"/>
1594 </subtraction>
1595
1596 <ellipsoid name="ellipBowl" ax="Pmt_R" by="Pmt_R" cz="Pmt_H" />
1597 <ellipsoid name="ellipVacuum" ax="Pmt_R-Pmt_T" by="Pmt_R-Pmt_T" cz="
    Pmt_H-Pmt_T" />
1598 <eltube name="BasePMT_full" dx="pmtBaseX" dy="pmtBaseY" dz="pmtBaseZ"
    lunit="mm"/>
1599 <eltube name="eltubeVacuum" dx="pmtBaseX-Pmt_T" dy="pmtBaseY-Pmt_T"
    dz="pmtBaseZ-Pmt_T" lunit="mm"/>
1600
1601 <subtraction name="pmtBowl_inf">
1602 <first ref="ellipBowl" />
1603 <second ref="ellipVacuum" />
1604 <position name="posVaccumPMT" unit="mm" x="0" y="0" z="-eD" />
1605 </subtraction>
1606 <union name="pmtBowl_full">
1607 <first ref="pmtBowl_inf"/>
1608 <second ref="BasePMT"/>
1609 <position name="posBaseBowl_inf" unit="mm" x="0" y="0" z="-84.5" />
1610 </union>
1611 <subtraction name="pmtBowl">
1612 <first ref="pmtBowl_full" />
1613 <second ref="ellipVacuum" />
1614 <position name="pospmtBowl" unit="mm" x="0" y="0" z="-eD" />
1615 </subtraction>
1616
1617 <box name="boxTarget_e" lunit="mm" x="Target_Xe" y="Target_Ye" z="
    Target_Ze"/>
1618 <subtraction name="Alvo">
```

```
1619 <first ref="boxTarget_e" />
1620 <second ref="boxTarget" />
1621 <position name="posAlvo" unit="mm" x="0" y="0" z="0" />
1622 </subtraction>
1623
1624 <subtraction name="boxFixacaoPMTInnerUp">
1625 <first ref="boxFixacaoPMTInnerUpfull" />
1626 <second ref="boxFixacaoPMTInnerUpVoid" />
1627 <position name="posAlvo" unit="mm" x="0" y="0" z="0" />
1628 </subtraction>
1629
1630 </solids>
1631
1632 <!--Veto Externo do Detector (Shield)-->
1633
1634 <structure>
1635
1636 <volume name="volFixacaoPMTInnerUp">
1637 <materialref ref="Polypropylene"/>
1638 <solidref ref="boxFixacaoPMTInnerUp"/>
1639 </volume>
1640
1641 <volume name="volWaterInner">
1642 <materialref ref="Water"/>
1643 <solidref ref="boxInner"/>
1644 </volume>
1645
1646 <volume name="volPMTBowl" >
1647 <materialref ref="Glass"/>
1648 <solidref ref="pmtBowl"/>
1649 </volume>
1650
1651 <volume name="volPMTVacuum" >
1652 <materialref ref="Vacuum"/>
```

```
1653 <solidref ref="ellipVacuum"/>
1654 </volume>
1655
1656 <volume name="volInnerVeto">
1657 <materialref ref="Polypropylene"/>
1658 <solidref ref="boxInnerVeto"/>
1659
1660 <physvol>
1661 <volumeref ref="volFixacaoPMTInnerUp"/>
1662 <position name="posFixacaoPMTInnerUP" unit="mm" x="0." y="
      BowlInVetoY_U_1+Inner_T+162." z="0."/>
1663 </physvol>
1664
1665 <physvol>
1666 <volumeref ref="volWaterInner"/>
1667 <position name="posInner"/>
1668 </physvol>
1669
1670 <physvol>
1671 <volumeref ref="volPMTBowl"/>
1672 <position name="posBowlInVeto_D_1" unit="mm" x="BowlInVetoX_D_1" y="
      BowlInVetoY_D_1" z="BowlInVetoZ_D_1"/>
1673 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1674 </physvol>
1675
1676 <physvol>
1677 <volumeref ref="volPMTBowl"/>
1678 <position name="posBowlInVeto_D_2" unit="mm" x="BowlInVetoX_D_2" y="
      BowlInVetoY_D_2" z="BowlInVetoZ_D_2"/>
1679 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1680 </physvol>
1681
1682 <physvol>
1683 <volumeref ref="volPMTBowl"/>
```

```
1684 <position name="posBowlInVeto_D_3" unit="mm" x="BowlInVetoX_D_3" y="
      BowlInVetoY_D_3" z="BowlInVetoZ_D_3"/>
1685 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1686 </physvol>
1687
1688 <physvol>
1689 <volumeref ref="volPMTBowl"/>
1690 <position name="posBowlInVeto_D_4" unit="mm" x="BowlInVetoX_D_4" y="
      BowlInVetoY_D_4" z="BowlInVetoZ_D_4"/>
1691 <rotationref ref="rotateXP90"/>
1692 </physvol>
1693
1694 <physvol>
1695 <volumeref ref="volPMTBowl"/>
1696 <position name="posBowlInVeto_U_1" unit="mm" x="BowlInVetoX_U_1" y="
      BowlInVetoY_U_1" z="BowlInVetoZ_U_1"/>
1697 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1698 </physvol>
1699
1700 <physvol>
1701 <volumeref ref="volPMTBowl"/>
1702 <position name="posBowlInVeto_U_2" unit="mm" x="BowlInVetoX_U_2" y="
      BowlInVetoY_U_2" z="BowlInVetoZ_U_2"/>
1703 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1704 </physvol>
1705
1706 <physvol>
1707 <volumeref ref="volPMTBowl"/>
1708 <position name="posBowlInVeto_U_3" unit="mm" x="BowlInVetoX_U_3" y="
      BowlInVetoY_U_3" z="BowlInVetoZ_U_3"/>
1709 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1710 </physvol>
1711
1712 <physvol>
```

```
1713 <volumeref ref="volPMTBowl"/>
1714 <position name="posBowlInVeto_U_4" unit="mm" x="BowlInVetoX_U_4" y="
      BowlInVetoY_U_4" z="BowlInVetoZ_U_4"/>
1715 <rotationref ref="rotateXN90"/>
1716 </physvol>
1717
1718 </volume>
1719
1720 </structure>
1721
1722 <solids>
1723
1724 <box name="boxGridvetoVsteelf" lunit="mm" x="2*veto_T+2*shield_steel"
      y="veto_Ye+2*veto_T+2*shield_steel" z="2*veto_T+2*shield_steel"/>
1725 <box name="boxGridvetoV" lunit="mm" x="2*veto_T" y="veto_Ye+2*veto_T"
      z="2*veto_T"/>
1726 <box name="boxGridshieldV" lunit="mm" x="2*shield_T" y="shield_Ye" z="
      2*shield_T"/>
1727 <box name="boxGridshieldH" lunit="mm" x="shield_Xe+2*shield_T" y="2*
      shield_T" z="2*shield_T"/>
1728 <box name="boxGridshieldH1" lunit="mm" x="2*shield_T" y="2*shield_T" z
      ="shield_Ze+2*shield_T"/>
1729 <box name="boxGridshieldH2" lunit="mm" x="shield_Xe+2*Target_TX" y="2*
      shield_T" z="2*shield_T"/>
1730 <box name="boxGridshieldH3" lunit="mm" x="2*shield_T" y="2*shield_T" z
      ="shield_Ze+2*shield_T"/>
1731
1732 <box name="boxGridshieldVsteelf" lunit="mm" x="2*(shield_T+
      shield_steel)" y="shield_Ye+2*shield_steel" z="2*(shield_T+
      shield_steel)"/>
1733 <box name="boxGridshieldHsteelf" lunit="mm" x="shield_Xe+2*(
      shield_T+shield_steel)" y="2*(shield_T+shield_steel)" z="2*shield_T+
      shield_steel"/>
1734 <box name="boxGridshieldH1steelf" lunit="mm" x="2*(shield_T+
```



```
        shield_steel) "y="2*(shield_T+shield_steel) "z="shield_Ze+2*(
        shield_T+shield_steel) "/>
1735 <box name="boxGridshieldH2steelf" lunit="mm" x="shield_Xe+2*(
        Target_TX+shield_steel) " y="2*(shield_T+shield_steel) " z="2*(
        shield_T+shield_steel) "/>
1736 <box name="boxGridshieldH3steelf" lunit="mm" x="2*(shield_T+
        shield_steel) " y="2*(shield_T+shield_steel) " z="shield_Ze+2*(
        shield_T+shield_steel) "/>
1737
1738 <subtraction name="boxGridshieldVsteel">
1739 <first ref="boxGridshieldVsteelf"/>
1740 <second ref="boxGridshieldV"/>
1741 <position name="posShield" unit="mm" x="0" y="0." z="0"/>
1742 </subtraction>
1743
1744 <subtraction name="boxGridvetoVsteel">
1745 <first ref="boxGridvetoVsteelf"/>
1746 <second ref="boxGridvetoV"/>
1747 <position name="posShield" unit="mm" x="0" y="0." z="0"/>
1748 </subtraction>
1749
1750 <subtraction name="boxGridshieldHsteel">
1751 <first ref="boxGridshieldHsteelf"/>
1752 <second ref="boxGridshieldH"/>
1753 <position name="posShield" unit="mm" x="0" y="0." z="0"/>
1754 </subtraction>
1755
1756 <subtraction name="boxGridshieldH1steel">
1757 <first ref="boxGridshieldH1steelf"/>
1758 <second ref="boxGridshieldH1"/>
1759 <position name="posShield" unit="mm" x="0" y="0." z="0"/>
1760 </subtraction>
1761
1762 <subtraction name="boxGridshieldH2steel">
```

```
1763 <first ref="boxGridshieldH2steelf"/>
1764 <second ref="boxGridshieldH2"/>
1765 <position name="posShield" unit="mm" x="0" y="0." z="0"/>
1766 </subtraction>
1767
1768 <subtraction name="boxGridshieldH3steel">
1769 <first ref="boxGridshieldH3steelf"/>
1770 <second ref="boxGridshieldH3"/>
1771 <position name="posShield" unit="mm" x="0" y="0." z="0"/>
1772 </subtraction>
1773
1774 <box name="boxShieldExternal" lunit="mm" x="shield_Xe" y="shield_Ye" z
    ="shield_Ze"/>
1775 <box name="boxShieldVoid" lunit="mm" x="shield_X" y="shield_Y+eD" z="
    shield_Z"/>
1776 <subtraction name="boxShield">
1777 <first ref="boxShieldExternal"/>
1778 <second ref="boxShieldVoid"/>
1779 <position name="posShield" unit="mm" x="0" y="0." z="0"/>
1780 </subtraction>
1781 <box name="boxShieldSteelFrame" lunit="mm" x="shield_Xe+2*
    shield_steel" y="shield_Ye+2*shield_steel" z="shield_Ze+2*
    shield_steel"/>
1782 <box name="boxShieldExternal" lunit="mm" x="shield_Xe" y="shield_Ye
    " z="shield_Ze"/>
1783 <subtraction name="boxShieldSteel">
1784 <first ref="boxShieldSteelFrame"/>
1785 <second ref="boxShieldExternal"/>
1786 <position name="posShieldSteel" unit="mm" x="0" y="0." z="0"/>
1787 </subtraction>
1788
1789 </solids>
1790
1791 <structure>
```

```
1792
1793 <volume name="volShieldSteel">
1794 <materialref ref="STEEL_STRUCTURAL_S460L"/>
1795 <solidref ref="boxShieldSteel"/>
1796 </volume>
1797
1798 <volume name="volGridshieldVsteel">
1799 <materialref ref="STEEL_STRUCTURAL_S460L"/>
1800 <solidref ref="boxGridshieldVsteel"/>
1801 </volume>
1802
1803 <volume name="volGridvetoVsteel">
1804 <materialref ref="STEEL_STRUCTURAL_S460L"/>
1805 <solidref ref="boxGridvetoVsteel"/>
1806 </volume>
1807
1808 <volume name="volGridshieldHsteel">
1809 <materialref ref="STEEL_STRUCTURAL_S460L"/>
1810 <solidref ref="boxGridshieldHsteel"/>
1811 </volume>
1812
1813 <volume name="volGridshieldH1steel">
1814 <materialref ref="STEEL_STRUCTURAL_S460L"/>
1815 <solidref ref="boxGridshieldH1steel"/>
1816 </volume>
1817
1818 <volume name="volGridshieldH2steel">
1819 <materialref ref="STEEL_STRUCTURAL_S460L"/>
1820 <solidref ref="boxGridshieldH2steel"/>
1821 </volume>
1822
1823 <volume name="volGridshieldH3steel">
1824 <materialref ref="STEEL_STRUCTURAL_S460L"/>
1825 <solidref ref="boxGridshieldH3steel"/>
```

```
1826 </volume>
1827
1828 <volume name="volWaterShield">
1829 <materialref ref="Water"/>
1830 <solidref ref="boxShieldVoid"/>
1831 </volume>
1832
1833 <volume name="volGridshieldV">
1834 <materialref ref="Polypropylene"/>
1835 <solidref ref="boxGridshieldV"/>
1836 </volume>
1837
1838 <volume name="volGridvetoV">
1839 <materialref ref="STEEL_STRUCTURAL_S460L"/>
1840 <solidref ref="boxGridvetoV"/>
1841 </volume>
1842
1843 <volume name="volGridshieldH">
1844 <materialref ref="Polypropylene"/>
1845 <solidref ref="boxGridshieldH"/>
1846 </volume>
1847
1848 <volume name="volGridshieldH1">
1849 <materialref ref="Polypropylene"/>
1850 <solidref ref="boxGridshieldH1"/>
1851 </volume>
1852
1853 <volume name="volGridshieldH2">
1854 <materialref ref="Polypropylene"/>
1855 <solidref ref="boxGridshieldH2"/>
1856 </volume>
1857
1858 <volume name="volGridshieldH3">
1859 <materialref ref="Polypropylene"/>
```

```
1860 <solidref ref="boxGridshieldH3" />
1861
1862 </volume>
1863
1864 <volume name="volShieldStruc">
1865 <materialref ref="Polypropylene" />
1866 <solidref ref="boxShield" />
1867 </volume>
1868
1869 <volume name="volShield">
1870 <materialref ref="Polypropylene" />
1871 <solidref ref="boxShield" />
1872
1873 <physvol>
1874 <volumeref ref="volWaterShield" />
1875 <positionref ref="posShield" />
1876 </physvol>
1877
1878 <physvol>
1879 <volumeref ref="volShieldStruc" />
1880 <positionref ref="posShield" />
1881 </physvol>
1882
1883 <physvol>
1884 <volumeref ref="volGridshieldV" />
1885 <positionref ref="posGridshieldV1" />
1886 </physvol>
1887
1888 <physvol>
1889 <volumeref ref="volGridshieldV" />
1890 <positionref ref="posGridshieldV2" />
1891 </physvol>
1892
1893 <physvol>
```

```
1894 <volumeref ref="volGridshieldV"/>
1895 <positionref ref="posGridshieldV3" />
1896 </physvol>
1897
1898 <physvol>
1899 <volumeref ref="volGridshieldV"/>
1900 <positionref ref="posGridshieldV4" />
1901 </physvol>
1902
1903 <physvol>
1904 <volumeref ref="volGridshieldV"/>
1905 <positionref ref="posGridshieldV5" />
1906 </physvol>
1907
1908 <physvol>
1909 <volumeref ref="volGridshieldV"/>
1910 <positionref ref="posGridshieldV6" />
1911 </physvol>
1912
1913 <physvol>
1914 <volumeref ref="volGridshieldV"/>
1915 <positionref ref="posGridshieldV7" />
1916 </physvol>
1917
1918 <physvol>
1919 <volumeref ref="volGridshieldV"/>
1920 <positionref ref="posGridshieldV8" />
1921 </physvol>
1922
1923 <physvol>
1924 <volumeref ref="volGridshieldV"/>
1925 <positionref ref="posGridshieldV9" />
1926 </physvol>
1927
```

```
1928 <physvol>
1929 <volumeref ref="volGridshieldV"/>
1930 <positionref ref="posGridshieldV10" />
1931 </physvol>
1932
1933 <physvol>
1934 <volumeref ref="volGridshieldV"/>
1935 <positionref ref="posGridshieldV11" />
1936 </physvol>
1937
1938 <physvol>
1939 <volumeref ref="volGridshieldV"/>
1940 <positionref ref="posGridshieldV12" />
1941 </physvol>
1942
1943 <physvol>
1944 <volumeref ref="volGridshieldV"/>
1945 <positionref ref="posGridshieldV13" />
1946 </physvol>
1947
1948 <physvol>
1949 <volumeref ref="volGridshieldV"/>
1950 <positionref ref="posGridshieldV14" />
1951 </physvol>
1952
1953 <physvol>
1954 <volumeref ref="volGridshieldV"/>
1955 <positionref ref="posGridshieldV15" />
1956 </physvol>
1957
1958 <physvol>
1959 <volumeref ref="volGridshieldV"/>
1960 <positionref ref="posGridshieldV16" />
1961 </physvol>
```

```
1962
1963
1964 <physvol>
1965 <volumeref ref="volGridshieldH"/>
1966 <positionref ref="posGridshieldH1" />
1967 </physvol>
1968
1969 <physvol>
1970 <volumeref ref="volGridshieldH"/>
1971 <positionref ref="posGridshieldH2" />
1972 </physvol>
1973
1974 <physvol>
1975 <volumeref ref="volGridshieldH"/>
1976 <positionref ref="posGridshieldH3" />
1977 </physvol>
1978
1979 <physvol>
1980 <volumeref ref="volGridshieldH"/>
1981 <positionref ref="posGridshieldH4" />
1982 </physvol>
1983
1984 <physvol>
1985 <volumeref ref="volGridshieldH1"/>
1986 <positionref ref="posGridshieldH5" />
1987 </physvol>
1988
1989 <physvol>
1990 <volumeref ref="volGridshieldH1"/>
1991 <positionref ref="posGridshieldH6" />
1992 </physvol>
1993
1994 <physvol>
1995 <volumeref ref="volGridshieldH1"/>
```



```
1996 <positionref ref="posGridshieldH7" />
1997 </physvol>
1998
1999 <physvol>
2000 <volumeref ref="volGridshieldH1"/>
2001 <positionref ref="posGridshieldH8" />
2002 </physvol>
2003
2004
2005 <physvol>
2006 <volumeref ref="volGridshieldH3"/>
2007 <positionref ref="posGridshieldH17" />
2008 </physvol>
2009
2010 <physvol>
2011 <volumeref ref="volGridshieldH3"/>
2012 <positionref ref="posGridshieldH18" />
2013 </physvol>
2014
2015 <physvol>
2016 <volumeref ref="volGridshieldH3"/>
2017 <positionref ref="posGridshieldH19" />
2018 </physvol>
2019
2020 <physvol>
2021 <volumeref ref="volGridshieldH3"/>
2022 <positionref ref="posGridshieldH20" />
2023 </physvol>
2024
2025 <physvol>
2026 <volumeref ref="volGridshieldH2"/>
2027 <positionref ref="posGridshieldH21" />
2028 </physvol>
2029
```

```
2030 <physvol>
2031 <volumeref ref="volGridshieldH2"/>
2032 <positionref ref="posGridshieldH22" />
2033 </physvol>
2034
2035 <physvol>
2036 <volumeref ref="volGridshieldH2"/>
2037 <positionref ref="posGridshieldH23" />
2038 </physvol>
2039
2040 <physvol>
2041 <volumeref ref="volGridshieldH2"/>
2042 <positionref ref="posGridshieldH24" />
2043 </physvol>
2044
2045 </volume>
2046
2047 <volume name="volShieldSteel">
2048 <materialref ref="STEEL_STRUCTURAL_S460L"/>
2049 <solidref ref="boxShieldSteel"/>
2050
2051 <physvol>
2052 <volumeref ref="volGridshieldVsteel"/>
2053 <positionref ref="posGridshieldV1" />
2054 </physvol>
2055
2056 <physvol>
2057 <volumeref ref="volGridshieldVsteel"/>
2058 <positionref ref="posGridshieldV2" />
2059 </physvol>
2060
2061 <physvol>
2062 <volumeref ref="volGridshieldVsteel"/>
2063 <positionref ref="posGridshieldV3" />
```

```
2064 </physvol>
2065
2066 <physvol>
2067 <volumeref ref="volGridshieldVsteel"/>
2068 <positionref ref="posGridshieldV4" />
2069 </physvol>
2070
2071 <physvol>
2072 <volumeref ref="volGridshieldVsteel"/>
2073 <positionref ref="posGridshieldV5" />
2074 </physvol>
2075
2076 <physvol>
2077 <volumeref ref="volGridshieldVsteel"/>
2078 <positionref ref="posGridshieldV6" />
2079 </physvol>
2080
2081 <physvol>
2082 <volumeref ref="volGridshieldVsteel"/>
2083 <positionref ref="posGridshieldV7" />
2084 </physvol>
2085
2086 <physvol>
2087 <volumeref ref="volGridshieldVsteel"/>
2088 <positionref ref="posGridshieldV8" />
2089 </physvol>
2090
2091 <physvol>
2092 <volumeref ref="volGridshieldVsteel"/>
2093 <positionref ref="posGridshieldV9" />
2094 </physvol>
2095
2096 <physvol>
2097 <volumeref ref="volGridshieldVsteel"/>
```

```
2098 <positionref ref="posGridshieldV10" />
2099 </physvol>
2100
2101 <physvol>
2102 <volumeref ref="volGridshieldVsteel"/>
2103 <positionref ref="posGridshieldV11" />
2104 </physvol>
2105
2106 <physvol>
2107 <volumeref ref="volGridshieldVsteel"/>
2108 <positionref ref="posGridshieldV12" />
2109 </physvol>
2110
2111 <physvol>
2112 <volumeref ref="volGridshieldVsteel"/>
2113 <positionref ref="posGridshieldV13" />
2114 </physvol>
2115
2116 <physvol>
2117 <volumeref ref="volGridshieldVsteel"/>
2118 <positionref ref="posGridshieldV14" />
2119 </physvol>
2120
2121 <physvol>
2122 <volumeref ref="volGridshieldVsteel"/>
2123 <positionref ref="posGridshieldV15" />
2124 </physvol>
2125
2126 <physvol>
2127 <volumeref ref="volGridshieldVsteel"/>
2128 <positionref ref="posGridshieldV16" />
2129 </physvol>
2130
2131 <physvol>
```

```
2132 <volumeref ref="volGridshieldHsteel"/>
2133 <positionref ref="posGridshieldH1" />
2134 </physvol>
2135
2136 <physvol>
2137 <volumeref ref="volGridshieldHsteel"/>
2138 <positionref ref="posGridshieldH2" />
2139 </physvol>
2140
2141 <physvol>
2142 <volumeref ref="volGridshieldHsteel"/>
2143 <positionref ref="posGridshieldH3" />
2144 </physvol>
2145
2146 <physvol>
2147 <volumeref ref="volGridshieldHsteel"/>
2148 <positionref ref="posGridshieldH4" />
2149 </physvol>
2150
2151 <physvol>
2152 <volumeref ref="volGridshieldH1steel"/>
2153 <positionref ref="posGridshieldH5" />
2154 </physvol>
2155
2156 <physvol>
2157 <volumeref ref="volGridshieldH1steel"/>
2158 <positionref ref="posGridshieldH6" />
2159 </physvol>
2160
2161 <physvol>
2162 <volumeref ref="volGridshieldH1steel"/>
2163 <positionref ref="posGridshieldH7" />
2164 </physvol>
2165
```

```
2166 <physvol>
2167 <volumeref ref="volGridshieldH1steel"/>
2168 <positionref ref="posGridshieldH8" />
2169 </physvol>
2170
2171 <physvol>
2172 <volumeref ref="volGridshieldH3steel"/>
2173 <positionref ref="posGridshieldH17" />
2174 </physvol>
2175
2176 <physvol>
2177 <volumeref ref="volGridshieldH3steel"/>
2178 <positionref ref="posGridshieldH18" />
2179 </physvol>
2180
2181 <physvol>
2182 <volumeref ref="volGridshieldH3steel"/>
2183 <positionref ref="posGridshieldH19" />
2184 </physvol>
2185
2186 <physvol>
2187 <volumeref ref="volGridshieldH3steel"/>
2188 <positionref ref="posGridshieldH20" />
2189 </physvol>
2190
2191 <physvol>
2192 <volumeref ref="volGridshieldH2steel"/>
2193 <positionref ref="posGridshieldH21" />
2194 </physvol>
2195
2196 <physvol>
2197 <volumeref ref="volGridshieldH2steel"/>
2198 <positionref ref="posGridshieldH22" />
2199 </physvol>
```

```
2200
2201 <physvol>
2202 <volumeref ref="volGridshieldH2steel"/>
2203 <positionref ref="posGridshieldH23" />
2204 </physvol>
2205
2206 <physvol>
2207 <volumeref ref="volGridshieldH2steel"/>
2208 <positionref ref="posGridshieldH24" />
2209 </physvol>
2210 </volume>
2211
2212 </structure>
2213
2214 <!--Veto Inferior do Detector-->
2215
2216 <solids>
2217
2218 <box name="boxGridvetoVsteel" lunit="mm" x="2*veto_T+2*shield_steel"
      y="veto_Ye+2*veto_T+2*shield_steel" z="2*veto_T+2*shield_steel"/>
2219 <box name="boxGridvetoV" lunit="mm" x="2*veto_T" y="veto_Ye+2*veto_T"
      z="2*veto_T"/>
2220 <box name="boxVetoInferior" lunit="mm" x="veto_X+2*veto_T" y="veto_Y
      +2*veto_T" z="veto_Z+2*veto_T"/>
2221 <box name="boxVetoInferiorSteel" lunit="mm" x="veto_X+2*(veto_T+
      shield_steel)" y="veto_Y+2*(veto_T+shield_steel)" z="veto_Z+2*(
      veto_T+shield_steel)"/>
2222 <box name="boxVetoVoid" lunit="mm" x="veto_X" y="veto_Y+eD" z="veto_Z
      "/>
2223 <subtraction name="boxVeto">
2224 <first ref="boxVetoInferior"/>
2225 <second ref="boxVetoVoid"/>
2226 <position name="posVetoInferior" unit="mm" x="0" y="-(shield_Ye/2+8*
      shield_T)" z="0"/>
```

```
2227 </subtraction>
2228
2229 <subtraction name="boxVetoInferiorSteel">
2230 <first ref="boxVetoInferiorSteelf"/>
2231 <second ref="boxVetoInferior"/>
2232 <position name="posShield" unit="mm" x="0" y="0." z="0"/>
2233 </subtraction>
2234 <ellipsoid name="ellipBowl" ax="Pmt_R" by="Pmt_R" cz="Pmt_H" />
2235 <ellipsoid name="ellipVacuum" ax="Pmt_R-Pmt_T" by="Pmt_R-Pmt_T" cz="
    Pmt_H-Pmt_T" />
2236 <eltube name="BasePMT_full" dx="pmtBaseX" dy="pmtBaseY" dz="pmtBaseZ"
    lunit="mm"/>
2237 <eltube name="eltubeVacuum" dx="pmtBaseX-Pmt_T" dy="pmtBaseY-Pmt_T"
    dz="pmtBaseZ-Pmt_T" lunit="mm"/>
2238
2239 <subtraction name="pmtBowl_inf">
2240 <first ref="ellipBowl" />
2241 <second ref="ellipVacuum" />
2242 <position name="posVaccumPMT" unit="mm" x="0" y="0" z="-eD" />
2243 </subtraction>
2244 <union name="pmtBowl_full">
2245 <first ref="pmtBowl_inf"/>
2246 <second ref="BasePMT"/>
2247 <position name="posBaseBowl_inf" unit="mm" x="0" y="0" z="-84.5" />
2248 </union>
2249 <subtraction name="pmtBowl">
2250 <first ref="pmtBowl_full" />
2251 <second ref="ellipVacuum" />
2252 <position name="pospmtBowl" unit="mm" x="0" y="0" z="-eD" />
2253 </subtraction>
2254 </solids>
2255
2256 <structure>
2257
```



```
2258 <volume name="volWaterVetoInferior">
2259 <materialref ref="Water"/>
2260 <solidref ref="boxVetoVoid"/>
2261 </volume>
2262
2263 <volume name="volGridvetoV">
2264 <materialref ref="STEEL_STRUCTURAL_S460L"/>
2265 <solidref ref="boxGridvetoV"/>
2266 </volume>
2267
2268 <volume name="volGridshieldH1">
2269 <materialref ref="Polypropylene"/>
2270 <solidref ref="boxGridshieldH1"/>
2271 </volume>
2272
2273 <volume name="volGridshieldH2">
2274 <materialref ref="Polypropylene"/>
2275 <solidref ref="boxGridshieldH2"/>
2276 </volume>
2277
2278 <volume name="volVetoInferiorSteel">
2279 <materialref ref="STEEL_STRUCTURAL_S460L"/>
2280 <solidref ref="boxVetoInferiorSteel"/>
2281 </volume>
2282
2283 <volume name="volVetoInferior">
2284 <materialref ref="Polypropylene"/>
2285 <solidref ref="boxVetoInferior"/>
2286
2287 <physvol>
2288 <volumeref ref="volWaterVetoInferior"/>
2289 <positionref ref="posVetoInferior" />
2290 </physvol>
2291
```

```
2292 <physvol>
2293 <volumeref ref="volGridshieldH2"/>
2294 <positionref ref="posGridshieldH33" />
2295 </physvol>
2296
2297 <physvol>
2298 <volumeref ref="volGridshieldH2"/>
2299 <positionref ref="posGridshieldH34" />
2300 </physvol>
2301
2302 <physvol>
2303 <volumeref ref="volGridshieldH2"/>
2304 <positionref ref="posGridshieldH35" />
2305 </physvol>
2306
2307 <physvol>
2308 <volumeref ref="volGridshieldH2"/>
2309 <positionref ref="posGridshieldH36" />
2310 </physvol>
2311
2312 <physvol>
2313 <volumeref ref="volGridshieldH1"/>
2314 <positionref ref="posGridshieldH37" />
2315 </physvol>
2316
2317 <physvol>
2318 <volumeref ref="volGridshieldH1"/>
2319 <positionref ref="posGridshieldH38" />
2320 </physvol>
2321
2322 <physvol>
2323 <volumeref ref="volGridshieldH1"/>
2324 <positionref ref="posGridshieldH39" />
2325 </physvol>
```

```
2326
2327 <physvol>
2328 <volumeref ref="volGridshieldH1"/>
2329 <positionref ref="posGridshieldH40" />
2330 </physvol>
2331
2332 <physvol>
2333 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2334 <positionref ref="posGridshieldV33" />
2335 </physvol>
2336
2337 <physvol>
2338 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2339 <positionref ref="posGridshieldV34" />
2340 </physvol>
2341
2342 <physvol>
2343 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2344 <positionref ref="posGridshieldV35" />
2345 </physvol>
2346
2347 <physvol>
2348 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2349 <positionref ref="posGridshieldV36" />
2350 </physvol>
2351
2352 <physvol>
2353 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2354 <positionref ref="posGridshieldV37" />
2355 </physvol>
2356
2357 <physvol>
2358 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2359 <positionref ref="posGridshieldV38" />
```

```
2360 </physvol>
2361
2362 <physvol>
2363 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2364 <positionref ref="posGridshieldV39" />
2365 </physvol>
2366
2367 <physvol>
2368 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2369 <positionref ref="posGridshieldV40" />
2370 </physvol>
2371
2372 <physvol>
2373 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2374 <positionref ref="posGridshieldV41" />
2375 </physvol>
2376
2377 <physvol>
2378 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2379 <positionref ref="posGridshieldV42" />
2380 </physvol>
2381
2382 <physvol>
2383 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2384 <positionref ref="posGridshieldV43" />
2385 </physvol>
2386
2387 <physvol>
2388 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2389 <positionref ref="posGridshieldV44" />
2390 </physvol>
2391
2392 <physvol>
2393 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
```

```
2394 <positionref ref="posGridshieldV45" />
2395 </physvol>
2396
2397 <physvol>
2398 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2399 <positionref ref="posGridshieldV46" />
2400 </physvol>
2401
2402 <physvol>
2403 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2404 <positionref ref="posGridshieldV47" />
2405 </physvol>
2406
2407 <physvol>
2408 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2409 <positionref ref="posGridshieldV48" />
2410 </physvol>
2411
2412 <physvol>
2413 <volumeref ref="volPMTBowl"/>
2414 <position name="posBowlVeto_I_1" unit="mm" x="BowlVetoX_I_1" y="
      BowlVetoY_I_1" z="BowlVetoZ_I_1"/>
2415 <rotationref ref="rotateYP90"/>
2416 </physvol>
2417
2418 <physvol>
2419 <volumeref ref="volPMTBowl"/>
2420 <position name="posBowlVeto_I_2" unit="mm" x="BowlVetoX_I_2" y="
      BowlVetoY_I_2" z="BowlVetoZ_I_2"/>
2421 <rotationref ref="rotateYN90"/>
2422 </physvol>
2423
2424 <physvol>
2425 <volumeref ref="volPMTBowl"/>
```

```
2426 <position name="posBowlVeto_I_3" unit="mm" x="BowlVetoX_I_3" y="
      BowlVetoY_I_3" z="BowlVetoZ_I_3"/>
2427 <rotationref ref="rotateXP180"/>
2428 </physvol>
2429
2430 <physvol>
2431 <volumeref ref="volPMTBowl"/>
2432 <position name="posBowlVeto_I_4" unit="mm" x="BowlVetoX_I_4" y="
      BowlVetoY_I_4" z="BowlVetoZ_I_4"/>
2433 <rotationref ref="rotateZN90"/>
2434 </physvol>
2435
2436 <physvol>
2437 <volumeref ref="volGridshieldH2steel"/>
2438 <positionref ref="posGridshieldH33" />
2439 </physvol>
2440
2441 <physvol>
2442 <volumeref ref="volGridshieldH2steel"/>
2443 <positionref ref="posGridshieldH34" />
2444 </physvol>
2445
2446 <physvol>
2447 <volumeref ref="volGridshieldH2steel"/>
2448 <positionref ref="posGridshieldH35" />
2449 </physvol>
2450
2451 <physvol>
2452 <volumeref ref="volGridshieldH2steel"/>
2453 <positionref ref="posGridshieldH36" />
2454 </physvol>
2455
2456 <physvol>
2457 <volumeref ref="volGridshieldH1steel"/>
```

```
2458 <positionref ref="posGridshieldH37" />
2459 </physvol>
2460
2461 <physvol>
2462 <volumeref ref="volGridshieldH1steel"/>
2463 <positionref ref="posGridshieldH38" />
2464 </physvol>
2465
2466 <physvol>
2467 <volumeref ref="volGridshieldH1steel"/>
2468 <positionref ref="posGridshieldH39" />
2469 </physvol>
2470
2471 <physvol>
2472 <volumeref ref="volGridshieldH1steel"/>
2473 <positionref ref="posGridshieldH40" />
2474 </physvol>
2475
2476 <physvol>
2477 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2478 <positionref ref="posGridshieldV33" />
2479 </physvol>
2480
2481 <physvol>
2482 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2483 <positionref ref="posGridshieldV34" />
2484 </physvol>
2485
2486 <physvol>
2487 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2488 <positionref ref="posGridshieldV35" />
2489 </physvol>
2490
2491 <physvol>
```

```
2492 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2493 <positionref ref="posGridshieldV36" />
2494 </physvol>
2495
2496 <physvol>
2497 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2498 <positionref ref="posGridshieldV37" />
2499 </physvol>
2500
2501 <physvol>
2502 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2503 <positionref ref="posGridshieldV38" />
2504 </physvol>
2505
2506 <physvol>
2507 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2508 <positionref ref="posGridshieldV39" />
2509 </physvol>
2510
2511 <physvol>
2512 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2513 <positionref ref="posGridshieldV40" />
2514 </physvol>
2515
2516 <physvol>
2517 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2518 <positionref ref="posGridshieldV41" />
2519 </physvol>
2520
2521 <physvol>
2522 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2523 <positionref ref="posGridshieldV42" />
2524 </physvol>
2525
```



```
2526 <physvol>
2527 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2528 <positionref ref="posGridshieldV43" />
2529 </physvol>
2530
2531 <physvol>
2532 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2533 <positionref ref="posGridshieldV44" />
2534 </physvol>
2535
2536 <physvol>
2537 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2538 <positionref ref="posGridshieldV45" />
2539 </physvol>
2540
2541 <physvol>
2542 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2543 <positionref ref="posGridshieldV46" />
2544 </physvol>
2545
2546 <physvol>
2547 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2548 <positionref ref="posGridshieldV47" />
2549 </physvol>
2550
2551 <physvol>
2552 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2553 <positionref ref="posGridshieldV48" />
2554 </physvol>
2555 </volume>
2556
2557 </structure>
2558
2559 <!--Veto Superior do Detector-->
```

```
2560
2561 <solids>
2562
2563 <box name="boxGridvetoVsteelf" lunit="mm" x="2*veto_T+2*
      shield_steel" y="veto_Ye+2*veto_T+2*shield_steel" z="2*veto_T+2*
      shield_steel"/>
2564 <box name="boxGridvetoV" lunit="mm" x="2*veto_T" y="veto_Ye
      +2*veto_T" z="2*veto_T"/>
2565 <box name="boxVetoSuperior" lunit="mm" x="veto_X+2*veto_T" y="
      veto_Y+2*veto_T" z="veto_Z+2*veto_T"/>
2566 <box name="boxVetoSuperiorSteelf" lunit="mm" x="veto_X+2*(veto_T+
      shield_steel)" y="veto_Y+2*(veto_T+shield_steel)" z="veto_Z+2*(
      veto_T+shield_steel)"/>
2567 <box name="boxVetoVoid" lunit="mm" x="veto_X" y="veto_Y+eD"
      z="veto_Z"/>
2568 <subtraction name="boxVeto">
2569 <first ref="boxVetoSuperior"/>
2570 <second ref="boxVetoVoid"/>
2571 <position name="posVetoSuperior" unit="mm" x="0" y="(shield_Ye/2+8*
      shield_T)" z="0"/>
2572 </subtraction>
2573
2574 <subtraction name="boxVetoSuperiorSteel">
2575 <first ref="boxVetoSuperiorSteelf"/>
2576 <second ref="boxVetoSuperior"/>
2577 <position name="posShield" unit="mm" x="0" y="0." z="0"/>
2578 </subtraction>
2579
2580 <ellipsoid name="ellipBowl" ax="Pmt_R" by="Pmt_R" cz="Pmt_H" />
2581 <ellipsoid name="ellipVacuum" ax="Pmt_R-Pmt_T" by="Pmt_R-Pmt_T" cz="
      Pmt_H-Pmt_T" />
2582 <eltube name="BasePMT_full" dx="pmtBaseX" dy="pmtBaseY" dz="pmtBaseZ"
      lunit="mm"/>
2583 <eltube name="eltubeVacuum" dx="pmtBaseX-Pmt_T" dy="pmtBaseY-Pmt_T"
```

```
dz="pmtBaseZ-Pmt_T" lunit="mm"/>
2584
2585 <subtraction name="pmtBowl_inf">
2586 <first ref="ellipBowl" />
2587 <second ref="ellipVacuum" />
2588 <position name="posVaccumPMT" unit="mm" x="0" y="0" z="-eD" />
2589 </subtraction>
2590 <union name="pmtBowl_full">
2591 <first ref="pmtBowl_inf"/>
2592 <second ref="BasePMT"/>
2593 <position name="posBaseBowl_inf" unit="mm" x="0" y="0" z="-84.5" />
2594 </union>
2595 <subtraction name="pmtBowl">
2596 <first ref="pmtBowl_full" />
2597 <second ref="ellipVacuum" />
2598 <position name="pospmtBowl" unit="mm" x="0" y="0" z="-eD" />
2599 </subtraction>
2600
2601 <subtraction name="boxGridvetoVsteel">
2602 <first ref="boxGridvetoVsteelf"/>
2603 <second ref="boxGridvetoV"/>
2604 <position name="posShield" unit="mm" x="0" y="0." z="0"/>
2605 </subtraction>
2606
2607 <subtraction name="boxGridshieldH1steel">
2608 <first ref="boxGridshieldH1steelf"/>
2609 <second ref="boxGridshieldH1"/>
2610 <position name="posShield" unit="mm" x="0" y="0." z="0"/>
2611 </subtraction>
2612
2613 <subtraction name="boxGridshieldH2steel">
2614 <first ref="boxGridshieldH2steelf"/>
2615 <second ref="boxGridshieldH2"/>
2616 <position name="posShield" unit="mm" x="0" y="0." z="0"/>
```

```
2617 </subtraction>
2618 </solids>
2619
2620 <structure>
2621
2622 <volume name="volWaterVetoSuperior">
2623 <materialref ref="Water"/>
2624 <solidref ref="boxVetoVoid"/>
2625 </volume>
2626
2627 <volume name="volGridvetoV">
2628 <materialref ref="STEEL_STRUCTURAL_S460L"/>
2629 <solidref ref="boxGridvetoV"/>
2630 </volume>
2631
2632 <volume name="volGridshieldH1">
2633 <materialref ref="Polypropylene"/>
2634 <solidref ref="boxGridshieldH1"/>
2635 </volume>
2636
2637 <volume name="volGridshieldH2">
2638 <materialref ref="Polypropylene"/>
2639 <solidref ref="boxGridshieldH2"/>
2640 </volume>
2641
2642
2643 <volume name="volVetoSuperiorSteel">
2644 <materialref ref="STEEL_STRUCTURAL_S460L"/>
2645 <solidref ref="boxVetoSuperiorSteel"/>
2646 </volume>
2647
2648 <volume name="volVetoSuperior">
2649 <materialref ref="Polypropylene"/>
2650 <solidref ref="boxVetoSuperior"/>
```

```
2651
2652 <physvol>
2653 <volumeref ref="volVetoSuperiorSteel"/>
2654 <positionref ref="posVetoSuperior" />
2655
2656 </physvol>
2657
2658 <physvol>
2659 <volumeref ref="volWaterVetoSuperior"/>
2660 <positionref ref="posVetoSuperior" />
2661
2662 </physvol>
2663
2664 <physvol>
2665 <volumeref ref="volGridshieldH2"/>
2666 <positionref ref="posGridshieldH25" />
2667
2668 </physvol>
2669
2670 <physvol>
2671 <volumeref ref="volGridshieldH2"/>
2672 <positionref ref="posGridshieldH26" />
2673
2674 </physvol>
2675
2676 <physvol>
2677 <volumeref ref="volGridshieldH2"/>
2678 <positionref ref="posGridshieldH27" />
2679
2680 </physvol>
2681
2682 <physvol>
2683 <volumeref ref="volGridshieldH2"/>
2684 <positionref ref="posGridshieldH28" />
```

```
2685
2686 </physvol>
2687
2688 <physvol>
2689 <volumeref ref="volGridshieldH1"/>
2690 <positionref ref="posGridshieldH29" />
2691
2692 </physvol>
2693
2694 <physvol>
2695 <volumeref ref="volGridshieldH1"/>
2696 <positionref ref="posGridshieldH30" />
2697
2698 </physvol>
2699
2700 <physvol>
2701 <volumeref ref="volGridshieldH1"/>
2702 <positionref ref="posGridshieldH31" />
2703
2704 </physvol>
2705
2706 <physvol>
2707 <volumeref ref="volGridshieldH1"/>
2708 <positionref ref="posGridshieldH32" />
2709
2710 </physvol>
2711
2712 <physvol>
2713 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2714 <positionref ref="posGridshieldV33" />
2715
2716 </physvol>
2717
2718 <physvol>
```

```
2719 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2720 <positionref ref="posGridshieldV34" />
2721
2722 </physvol>
2723
2724 <physvol>
2725 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2726 <positionref ref="posGridshieldV35" />
2727
2728 </physvol>
2729
2730 <physvol>
2731 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2732 <positionref ref="posGridshieldV36" />
2733
2734 </physvol>
2735
2736 <physvol>
2737 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2738 <positionref ref="posGridshieldV17" />
2739
2740 </physvol>
2741
2742 <physvol>
2743 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2744 <positionref ref="posGridshieldV18" />
2745
2746 </physvol>
2747
2748 <physvol>
2749 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2750 <positionref ref="posGridshieldV19" />
2751
2752 </physvol>
```

```
2753
2754 <physvol>
2755 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2756 <positionref ref="posGridshieldV20" />
2757
2758 </physvol>
2759
2760 <physvol>
2761 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2762 <positionref ref="posGridshieldV21" />
2763
2764 </physvol>
2765
2766 <physvol>
2767 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2768 <positionref ref="posGridshieldV22" />
2769
2770 </physvol>
2771
2772 <physvol>
2773 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2774 <positionref ref="posGridshieldV23" />
2775
2776 </physvol>
2777
2778 <physvol>
2779 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2780 <positionref ref="posGridshieldV24" />
2781
2782 </physvol>
2783
2784
2785 <physvol>
2786 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
```



```
2787 <positionref ref="posGridshieldV25" />
2788
2789 </physvol>
2790
2791 <physvol>
2792 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2793 <positionref ref="posGridshieldV26" />
2794 </physvol>
2795
2796 <physvol>
2797 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2798 <positionref ref="posGridshieldV27" />
2799 </physvol>
2800
2801 <physvol>
2802 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2803 <positionref ref="posGridshieldV28" />
2804 </physvol>
2805
2806 <physvol>
2807 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2808 <positionref ref="posGridshieldV29" />
2809 </physvol>
2810
2811 <physvol>
2812 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2813 <positionref ref="posGridshieldV30" />
2814 </physvol>
2815
2816 <physvol>
2817 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2818 <positionref ref="posGridshieldV31" />
2819 </physvol>
2820
```

```
2821 <physvol>
2822 <volumeref ref="volGridvetoV"/>
2823 <positionref ref="posGridshieldV32" />
2824 </physvol>
2825
2826 <physvol>
2827 <volumeref ref="volPMTBowl"/>
2828 <position name="posBowlVeto_S_1" unit="mm" x="BowlVetoX_S_1" y="
      BowlVetoY_S_1" z="BowlVetoZ_S_1"/>
2829 <rotationref ref="rotateYP90"/>
2830 </physvol>
2831
2832 <physvol>
2833 <volumeref ref="volPMTBowl"/>
2834 <position name="posBowlVeto_S_2" unit="mm" x="BowlVetoX_S_2" y="
      BowlVetoY_S_2" z="BowlVetoZ_S_2"/>
2835 <rotationref ref="rotateYN90"/>
2836 </physvol>
2837
2838 <physvol>
2839 <volumeref ref="volPMTBowl"/>
2840 <position name="posBowlVeto_S_3" unit="mm" x="BowlVetoX_S_3" y="
      BowlVetoY_S_3" z="BowlVetoZ_S_3"/>
2841 <rotationref ref="rotateXP180"/>
2842 </physvol>
2843
2844 <physvol>
2845 <volumeref ref="volPMTBowl"/>
2846 <position name="posBowlVeto_S_4" unit="mm" x="BowlVetoX_S_4" y="
      BowlVetoY_S_4" z="BowlVetoZ_S_4"/>
2847 <rotationref ref="rotateZN90"/>
2848 </physvol>
2849
2850 <physvol>
```

```
2851 <volumeref ref="volGridshieldH2steel"/>
2852 <positionref ref="posGridshieldH25" />
2853 </physvol>
2854
2855 <physvol>
2856 <volumeref ref="volGridshieldH2steel"/>
2857 <positionref ref="posGridshieldH26" />
2858 </physvol>
2859
2860 <physvol>
2861 <volumeref ref="volGridshieldH2steel"/>
2862 <positionref ref="posGridshieldH27" />
2863 </physvol>
2864
2865 <physvol>
2866 <volumeref ref="volGridshieldH2steel"/>
2867 <positionref ref="posGridshieldH28" />
2868 </physvol>
2869
2870 <physvol>
2871 <volumeref ref="volGridshieldH1steel"/>
2872 <positionref ref="posGridshieldH29" />
2873 </physvol>
2874
2875 <physvol>
2876 <volumeref ref="volGridshieldH1steel"/>
2877 <positionref ref="posGridshieldH30" />
2878 </physvol>
2879
2880 <physvol>
2881 <volumeref ref="volGridshieldH1steel"/>
2882 <positionref ref="posGridshieldH31" />
2883 </physvol>
2884
```

```
2885 <physvol>
2886 <volumeref ref="volGridshieldH1steel"/>
2887 <positionref ref="posGridshieldH32" />
2888 </physvol>
2889
2890 <physvol>
2891 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2892 <positionref ref="posGridshieldV17" />
2893 </physvol>
2894
2895 <physvol>
2896 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2897 <positionref ref="posGridshieldV18" />
2898 </physvol>
2899
2900 <physvol>
2901 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2902 <positionref ref="posGridshieldV19" />
2903 </physvol>
2904
2905 <physvol>
2906 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2907 <positionref ref="posGridshieldV20" />
2908 </physvol>
2909
2910 <physvol>
2911 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2912 <positionref ref="posGridshieldV21" />
2913 </physvol>
2914
2915 <physvol>
2916 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2917 <positionref ref="posGridshieldV22" />
2918 </physvol>
```

```
2919
2920 <physvol>
2921 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2922 <positionref ref="posGridshieldV23" />
2923 </physvol>
2924
2925 <physvol>
2926 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2927 <positionref ref="posGridshieldV24" />
2928 </physvol>
2929
2930 <physvol>
2931 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2932 <positionref ref="posGridshieldV25" />
2933 </physvol>
2934
2935 <physvol>
2936 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2937 <positionref ref="posGridshieldV26" />
2938 </physvol>
2939
2940 <physvol>
2941 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2942 <positionref ref="posGridshieldV27" />
2943 </physvol>
2944
2945 <physvol>
2946 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2947 <positionref ref="posGridshieldV28" />
2948 </physvol>
2949
2950 <physvol>
2951 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2952 <positionref ref="posGridshieldV29" />
```

```
2953 </physvol>
2954
2955 <physvol>
2956 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2957 <positionref ref="posGridshieldV30" />
2958 </physvol>
2959
2960 <physvol>
2961 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2962 <positionref ref="posGridshieldV31" />
2963 </physvol>
2964
2965 <physvol>
2966 <volumeref ref="volGridvetoVsteel"/>
2967 <positionref ref="posGridshieldV32" />
2968 </physvol>
2969
2970 </volume>
2971
2972 </structure>
2973
2974 <structure>
2975
2976 <volume name="volWorld" >
2977 <materialref ref="Air"/>
2978 <solidref ref="boxWorld"/>
2979 <physvol>
2980 <volumeref ref="volTargetIn"/>
2981 <positionref ref="posAlvo"/>
2982 </physvol>
2983
2984 <physvol>
2985 <volumeref ref="volTargetOut"/>
2986 <positionref ref="posAlvo"/>
```

```
2987 </physvol>
2988
2989 <physvol>
2990 <volumeref ref="volAlvo"/>
2991 <positionref ref="posAlvo"/>
2992 </physvol>
2993
2994 <physvol>
2995 <volumeref ref="volInnerVeto"/>
2996 <positionref ref="posInner"/>
2997 </physvol>
2998
2999 <physvol>
3000 <volumeref ref="volShield"/>
3001 <positionref ref="posShield"/>
3002 </physvol>
3003
3004 <physvol>
3005 <volumeref ref="volShieldSteel"/>
3006 <positionref ref="posShieldSteel"/>
3007 </physvol>
3008
3009 <physvol>
3010 <volumeref ref="volVetoInferior"/>
3011 <positionref ref="posShield"/>
3012 </physvol>
3013
3014 <physvol>
3015 <volumeref ref="volVetoInferiorSteel"/>
3016 <positionref ref="posVetoInferior"/>
3017 </physvol>
3018
3019 <physvol>
3020 <volumeref ref="volVetoSuperior"/>
```

```
3021 <positionref ref="posShield"/>
3022 </physvol>
3023
3024 <physvol>
3025 <volumeref ref="volVetoSuperiorSteel"/>
3026 <positionref ref="posVetoInferior"/>
3027 </physvol>
3028
3029 </volume>
3030
3031 </structure>
3032
3033 <setup name="Default" version="1.0">
3034 <world ref="volWorld" />
3035 </setup>
3036 </gdml>
```