



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica



Engenharia Nuclear
UFRJ

DETERMINAÇÃO DE FATORES DE CORREÇÃO PARA O ESTUDO DO IMPACTO RADIOLÓGICO NO ENTORNO DA UNIDADE DE ARMAZENAMENTO COMPLEMENTAR A SECO (UAS)

Giovanna Silveira Franco

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Nuclear da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso
e Melo
Antônio Sérgio De Martin Alves

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Agosto de 2019

DETERMINAÇÃO DE FATORES DE CORREÇÃO PARA O ESTUDO
DO IMPACTO RADIOLÓGICO NO ENTORNO DA UNIDADE DE
ARMAZENAMENTO COMPLEMENTAR A SECO (UAS)

Giovanna Silveira Franco

Projeto de Graduação submetido ao Corpo Docente do Departamento de Engenharia Nuclear da Escola Politécnica / UFRJ, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenharia Nuclear.

Examinado por:

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D. Sc.

Dr. Antônio Sérgio De Martin Alves, D. Sc.

Prof. Antônio Carlos Marques Alvim, Ph.D.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Agosto de 2019

Silveira Franco, Giovanna.

Determinação de Fatores de Correção para o Estudo do Impacto Radiológico no Entorno da Unidade de Armazenamento Complementar a Seco (UAS) / Giovanna Silveira Franco. - Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2019.

XIII, 63 p.: il.; 29,7 cm

Orientadores: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo.
Antônio Sérgio De Martin Alves.

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Engenharia Nuclear, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 53-54.

1. Unidade de Armazenamento Complementar a Seco. 2. Determinação de Fatores de Correção. I. Ferreira Frutuoso e Melo, Paulo Fernando et al. De Martin Alves, Antônio Sérgio. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Nuclear. III. Determinação de Fatores de Correção para o Estudo do Impacto Radiológico no Entorno da Unidade de Armazenamento Complementar a Seco (UAS).

Agradecimentos

Agradeço a minha mãe, Vera Lucia, por todos os ensinamentos, por ser o exemplo de mulher forte, inteligente e independente que sigo com muito orgulho e por sempre acreditar no meu potencial, até quando eu mesma duvidava.

Agradeço a todos os professores e funcionários do Programa de Engenharia Nuclear da Universidade Federal do Rio de Janeiro, por seu trabalho na formação de excelentes profissionais. Agradeço ao professor Paulo Fernando Frutuoso pela orientação neste trabalho de conclusão de curso.

Agradeço aos engenheiros Antônio Sérgio De Martin Alves, Carlos Eduardo Brügger e João Calixto por tornarem, todos os dias, o ambiente de trabalho na Eletronuclear respeitoso, desafiador e saudável. Em especial, agradeço ao Dr. Antônio Sérgio De Martin Alves pela paciência e dedicação para me ajudar e orientar no presente trabalho.

Por fim, agradeço aos meus amigos de curso da Engenharia Nuclear com os quais compartilhei experiências, aprendizados e obstáculos fundamentais no desenvolvimento do meu caráter. Em particular, agradeço aos meus amigos Rodrigo Diniz e Luis Felipe Meira, por estarem comigo em momentos bons e ruins durante essa etapa da minha vida.

Gostaria de dedicar este momento à mulher mais importante da minha vida.

Obrigada por todo seu esforço e paciência para me criar, me ensinar e aprender comigo. Se hoje sou essa mulher forte, grande parte, é por sua causa.

Continuo essa minha caminhada para que sempre se orgulhe de mim como me orgulho de ser sua filha.

Dedico este momento a você, mãe!

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Nuclear.

DETERMINAÇÃO DE FATORES DE CORREÇÃO PARA O ESTUDO DO
IMPACTO RADIOLÓGICO NO ENTORNO DA UNIDADE DE
ARMAZENAMENTO COMPLEMENTAR A SECO (UAS)

Giovanna Silveira Franco

Agosto/2019

Orientadores: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Antônio Sérgio De Martin Alves

Curso: Engenharia Nuclear

O objetivo deste trabalho é determinar fatores de correção para o código QAD-CGGP com o auxílio do código MCNP5 para o estudo do impacto radiológico no entorno da Unidade de Armazenamento Complementar a Seco (UAS). Estes fatores corrigem os valores de taxa de dose obtidos com o código QAD-CGGP para que se aproximem dos resultados calculados pela empresa Holtec International com o código MCNP5. A estratégia utilizada neste trabalho consiste em determinar, inicialmente, valores de taxa de dose para a radiação gama com o código QAD-CGGP e, depois, estimar as contribuições devido a nêutrons e aos raios gama provenientes do ^{60}Co , os produzidos na captura neutrônica e os gerados pelo veneno queimável, utilizando funções de proporcionalidade. Todas essas contribuições foram utilizadas na determinação de uma taxa de dose total atribuída ao código QAD-CGGP, para os arranjos de 1 (Angra 1 e 2), 15 e 72 cascos de armazenamento. Utilizando este código juntamente com os referidos fatores de correção, obtêm-se valores de taxa de dose para arranjos intermediários aos apresentados pela Holtec. Uma aplicação prática da presente metodologia é apresentada e o resultado obtido é coerente com os valores fornecidos por esta empresa.

Keywords: Armazenamento, Casco, MCNP5, QAD-CGGP, Taxa de dose, UAS.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Nuclear Engineer.

DETERMINATION OF CORRECTION FACTORS FOR THE STUDY OF THE
RADIOLOGICAL IMPACT IN SURROUNDING OF THE COMPLEMENTARY
DRY STORAGE UNIT (UAS)

Giovanna Silveira Franco

August/2019

Advisors: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Antônio Sérgio De Martin Alves

Major: Nuclear Engineering

The objective of this work is to determine correction factors for QAD-CGGP code by using the MCNP5 code for the study of the radiological impact in surrounding the Complementary Dry Storage Unit (UAS). These factors correct the dose rate values obtained with the QAD-CGGP code so that they get closer to the results calculated by the Holtec International Company with the MCNP5 code. The strategy used in this work is to initially determine dose rate values for gamma radiation with the QAD-CGGP code and then to estimate the contributions due to the neutrons and the gammas from ^{60}Co , the produced in neutron capture and the generated by the burnable poison (BPRA), using proportionality functions. All of these contributions were used to determine a total dose rate assigned to the QAD-CGGP code for arrays of 1 (Angra 1 and 2), 15 and 72 storage casks. Using this code with these correction factors, one obtains dose rate values for intermediate arrays to those presented by Holtec. A practical application of the present methodology is presented and the obtained result is consistent with the values provided by this company.

Keywords: *Storage, Cask, MCNP5, QAD-CGGP, Dose rate, UAS.*

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
2. Fundamentos Teóricos	8
2.1. Definição de Alguns Parâmetros Importantes	8
2.2. QAD-CGGP.....	10
2.3. MCNP	10
3. Projeto da Unidade de Armazenamento Complementar a Seco (UAS).....	12
3.1. Geral.....	12
3.2. <i>Multi-Purpose Canisters</i> (MPC).....	16
3.3. <i>HI-STORM FW Overpack</i>	19
4. Metodologia de Cálculo	21
5. Apresentação e Análise dos Resultados	33
6. Aplicação da Metodologia Desenvolvida	48
7. Conclusões e Sugestões.....	49
Referências	53
Apêndice A – Entrada do código QAD-CGGP para um casco carregado com ECIs de Angra 1, $E_m = 0,575$ MeV.	55
Apêndice B – Entrada do código QAD-CGGP para um casco carregado com ECIs de Angra 2, $E_m = 0,575$ MeV.	58
Apêndice C – Entrada do código QAD-CGGP para o casco (4,2) do arranjo de 15 cascos da Figura 16, $E_m = 0,575$ MeV.....	60
Apêndice D – Entrada do código QAD-CGGP para o casco (3,3) do arranjo de 72 cascos da Figura 17, $E_m = 0,575$ MeV.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: (a) Piscina de Combustíveis Usados da Central de Angra 1. (b) Piscina de Combustíveis Usados da Central de Angra 2.	3
Figura 2: Módulos de Armazenamento a seco de ECIs na Usina Nuclear de Vogtle.....	4
Figura 3: Esquema ilustrativo do Módulo de Armazenamento com parte do <i>Canister</i> inserido.	5
Figura 4: Conceito do projeto da UAS.....	12
Figura 5: Algumas dimensões importantes do projeto da Unidade UAS.	13
Figura 6: Representação espacial da instalação UAS.	14
Figura 7: Vista em corte do Módulo de Armazenamento com parte do MPC-37 inserido.	15
Figura 8: Cesto de Combustíveis PWR do MPC-37 (37 células de armazenamento). .	17
Figura 9: Cesto de Combustíveis PWR do MPC-32ML (32 células de armazenamento).	18
Figura 10: Vista esquemática do MPC-37 (<i>Canister</i>).....	19
Figura 11: Vista esquemática de um Módulo de Armazenamento (HI-STORM FW <i>Overpack</i>) com o <i>Canister</i> inserido.....	20
Figura 12: Vista do Corte Transversal do Sistema HI-STORM FW como modelado neste Trabalho.....	23
Figura 13: Vista do corte transversal do HI-STORM FW <i>Overpack</i> com suas medidas.	23
Figura 14: Vista do Corte Transversal de uma Célula do Cesto do MPC-37 como modelado no MCNP5.	24
Figura 15: Esquema ilustrativo para o arranjo com 1 Casco.....	30
Figura 16: Esquema ilustrativo para o arranjo de 15 Cascos.	30
Figura 17: Esquema ilustrativo para o arranjo de 72 Cascos.	31
Figura 18: Gráfico dos valores de taxa de dose em função da distância para arranjos de 1 (de Angra 1 e 2), 15 e 72, obtidos com o código QAD-CGGP.	38
Figura 19: Gráfico dos valores de taxa de dose em função da distância para arranjos de 1 (de Angra 1 e 2), 15 e 72, obtidos com o código MCNP5 pela Holtec.	39
Figura 20: Gráfico dos valores de taxa de dose em função da distância para arranjos de 15 e 72, obtidos com o código MCNP5 pela Holtec para até 100 metros.	40

Figura 21: Gráfico dos valores de taxa de dose em função da distância para o arranjo com 1 casco (Angra 1), comparando os valores obtidos com o código MCNP5 pela Holtec e com o código QAD-CGGP.	41
Figura 22: Gráfico dos valores de taxa de dose em função da distância para o arranjo com 1 casco (Angra 2), comparando os valores obtidos com o código MCNP5 pela Holtec e com o código QAD-CGGP.	41
Figura 23: Gráfico dos valores de taxa de dose em função da distância para o arranjo de 15 cascos, comparando os valores obtidos com o código MCNP5 pela Holtec e com o código QAD-CGGP.....	42
Figura 24: Gráfico dos valores de taxa de dose em função da distância para o arranjo de 72 cascos, comparando os valores obtidos com o código MCNP5 pela Holtec e com o código QAD-CGGP.....	42
Figura 25: Gráfico dos valores do Fator de Correção para o código QAD-CGGP em função da distância para os arranjos de 1 (Angra1 e 2), 15 e 72 cascos.....	45
Figura 26: Gráfico dos valores do Fator de Correção para o QAD-CGGP em função do número de cascos para cada distância.	46
Figura 27: Principais instalações no entorno da UAS.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Capacidade de Armazenamento de elementos combustíveis das PUCs de cada Usina.....	3
Tabela 2: Previsão de esgotamento da capacidade de armazenamento de ECIs da CNAAA.....	4
Tabela 3: Dados dos Diâmetros e Alturas do MPC e HI-STORM.	16
Tabela 4: Magnitude da Fonte para radiação gama calculada por elemento combustível para os ECIs em um MPC-37 de cada usina, em função da energia.	22
Tabela 5: Composição dos Materiais do Sistema HI-STORM FW.	25
Tabela 6: Taxas de dose como função da distância para um único Casco HI-STORM FW carregado com os ECIs pertencentes à Usina Angra 1, calculadas pela Holtec.....	26
Tabela 7: Taxas de dose como função da distância para um único Casco HI-STORM FW carregado com os ECIs pertencentes à Usina Angra 2, calculadas pela Holtec.....	27
Tabela 8: Funções de proporcionalidade para o Casco HI-STORM FW com os ECIs oriundos da Usina Angra 1.	28
Tabela 9: Função de Proporcionalidade para o Casco HI-STORM FW com os ECIs oriundos da Usina Angra 2.	29
Tabela 10: Taxa de dose total em função da distância para Arranjos de 15 e 72 Cascos.	32
Tabela 11: Fatores de conversão Fluxo-Dose em função da energia do fóton.....	33
Tabela 12: Taxas de dose como função da distância para um único Casco HI-STORM FW carregado com os ECIs pertencentes à Usina Angra 1, calculadas com o código QAD-CGGP.	34
Tabela 13: Taxas de dose como função da distância para um único Casco HI-STORM FW carregado com os ECIs pertencentes à Usina Angra 2, calculadas com o código QAD-CGGP.	35
Tabela 14: Taxas de dose como função da distância para o arranjo de 15 Cascos HI-STORM FW carregados, calculadas com o código QAD-CGGP.....	36
Tabela 15: Taxas de dose como função da distância para o arranjo de 72 Cascos HI-STORM FW carregados, calculadas com o código QAD-CGGP.....	37
Tabela 16: Valores do Fator de Correção para o código QAD-CGGP em função da distância para os arranjos de 1 (Angra1 e 2), 15 e 72 cascos.	44

Tabela 17: Correlações do fator de correção para o QAD-CGGP, em função da distância entre o arranjo de cascos e o detector.....	47
Tabela 18: Taxas de dose para o arranjo de 45 Cascos HI-STORM FW carregados, a uma distância igual a 50 metros, calculadas com o código QAD-CGGP.	48

LISTA DE SIGLAS, ACRÔNIMOS E SÍMBOLOS

BPRA - *Burnable Poison Rod Assemblies*

CNAAA - Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CONFAB - Confab Industrial S/A

ECI - Elemento Combustível Irradiado

E_m - Energia Média

ETN - Eletrobrás Termonuclear S.A./Eletronuclear

Holtec - *Holtec International*

MCNP - *Monte Carlo N-Particle*

MCT - Ministério da Ciência e Tecnologia

MCTIC - Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

MME - Ministério de Minas e Energia

MPC - *Multi-Purpose Canister*

PCU - Piscina de Combustíveis Usados

PWR - *Pressurized Water Reactor*

RCC - *Right circular cylinder*

SPMT - *Self-Propelled Modular Transporter*

UAS - Unidade de Armazenamento Complementar a Seco de ECIs da CNAAA

1. Introdução

As atividades nucleares no Brasil ganharam ênfase após a criação, em 1951, do Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq), mais tarde denominado Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, com a finalidade de promover e estimular o desenvolvimento da investigação científica e tecnológica no país [1].

Através da Lei 4.118, em 27 de agosto de 1962, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), criada em 1956, foi instituída como Autarquia Federal [2]. No mesmo ano, foi definida a Política Nacional de Energia Nuclear. Após alguns estudos realizados por organizações nacionais e de outros países, em 1967, o programa de energia nuclear acelerou, através de um projeto integrado ao plano de expansão do parque gerador [1]. A CNEN foi primeiramente vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME) e, mais tarde, transferida para o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), hoje Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC).

Visando a implantação de um programa de geração de energia nuclear no Brasil, em abril de 1968 a CNEN assinou um convênio com a Eletrobras [1]. O programa tinha finalidades comerciais e de integração ao sistema elétrico existente. Como resultado, a Eletrobras assumiu a responsabilidade no projeto, construção e operação de usinas nucleares no país, diretamente ou através de suas subsidiárias, das quais Furnas Centrais Elétricas S.A., era a maior delas.

Furnas foi escolhida, em 1969 pela Eletrobras, para implantar a primeira usina nuclear do Brasil, cujas bases para sua execução haviam sido elaboradas em 1968, num estudo conjunto entre especialistas internacionais e engenheiros da CNEN e da Eletrobras [1].

Em 1971, através de um acordo com os EUA, o país adquiriu uma usina nuclear da Westinghouse, denominada Angra 1, que viria a se tornar a primeira unidade da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAL) [1]. A área escolhida para a implantação da usina foi Itaorna, localizada no município de Angra dos Reis, no Estado do Rio de Janeiro, pelas suas peculiaridades físicas, como proximidade do mar, abundância de água para resfriamento da Usina, facilidade de transporte marítimo e terrestre, local de

baixa densidade demográfica, geologia e sismicidade adequadas e em uma região próxima aos centros de demanda de energia do país.

Com a proximidade da entrada em operação da CNAAA, através de Angra 1, no final da década de 70, a CNEN ainda não possuía um depósito definitivo para o armazenamento de rejeitos radioativos [1]. Após entendimentos entre a CNEN e Furnas Centrais Elétricas, que na época era responsável pelo empreendimento em questão, ficou decidido que seria definida uma área interna à Central, para armazenamento dos rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação gerados pela Usina.

A Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), hoje, é composta de 03 usinas nucleares com a finalidade de geração de energia elétrica: a Usina Angra 1, cuja capacidade de geração é de 640 MWe, com início da sua operação comercial em 1985; a Usina Angra 2, com capacidade de geração de 1.350 MWe e sua operação comercial iniciada em 2001; e a Usina Angra 3, com capacidade de geração de 1.350 MWe, atualmente em construção com início de operação previsto para 2024 [1].

As usinas nucleares utilizam elementos combustíveis para a geração de energia elétrica. Após a queima, estes elementos são armazenados, por pelo menos 10 anos, em piscinas especialmente projetadas e construídas no interior das usinas, denominadas Piscinas de Combustíveis Usados (PCUs), visando o resfriamento e o decaimento desses elementos combustíveis. Mesmo depois de 10 anos, estes elementos ainda possuem uma grande quantidade de materiais reaproveitáveis e calor residual. Os elementos combustíveis irradiados (ECIs) podem ser reprocessados ou armazenados para possibilitar uma futura decisão sobre qual o melhor tratamento para estes materiais.

Atualmente, a estratégia brasileira para o gerenciamento de ECIs não prevê a execução de reprocessamento e reciclagem dos elementos gerados para a produção de energia. Sendo assim, elementos combustíveis são inicialmente armazenados pela Eletronuclear (armazenamento de curto e médio prazo), sendo a deposição (armazenamento de longo prazo) de responsabilidade constitucional da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

O armazenamento inicial em Angra 1 e 2 é realizado em piscinas localizadas nas próprias unidades. A Figura 1 apresenta as piscinas de armazenamento de elementos combustíveis de Angra 1 e Angra 2, respectivamente.

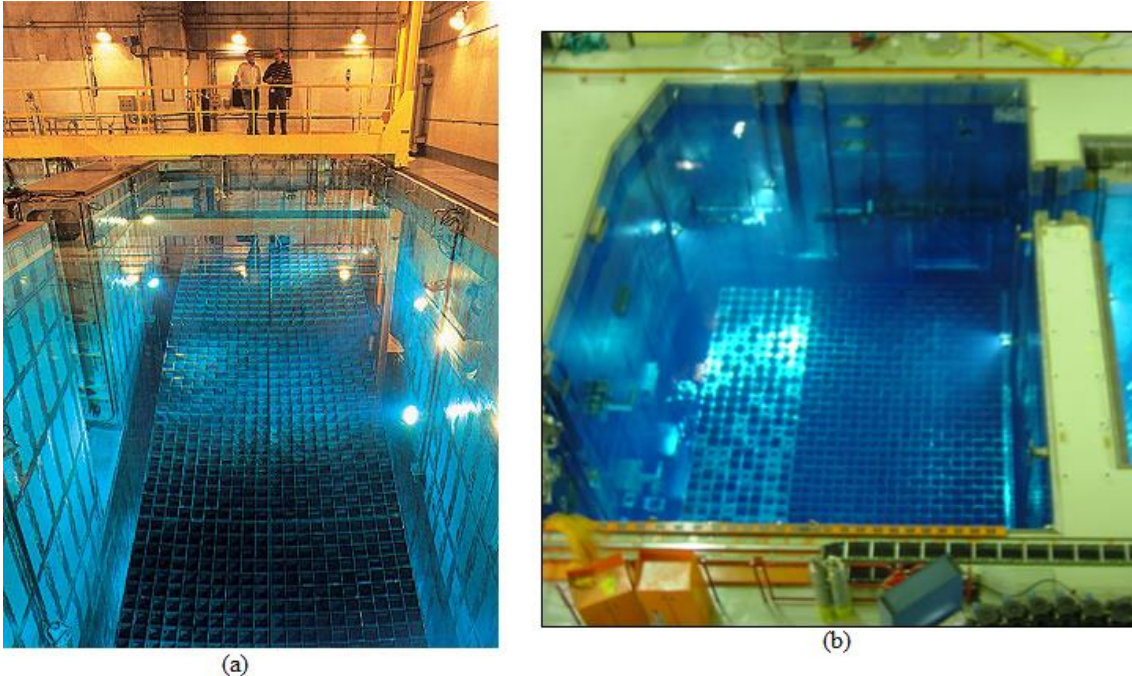


Figura 1: (a) Piscina de Combustíveis Usados da Central de Angra 1. (b) Piscina de Combustíveis Usados da Central de Angra 2. [1]

A capacidade de armazenamento de elementos combustíveis irradiados das piscinas é limitada, e de acordo com a concepção original do projeto dessas usinas os elementos combustíveis estocados há mais tempo devem ser removidos, de modo a dar lugar para o armazenamento de elementos combustíveis recentemente retirados dos núcleos dos reatores. A Tabela 1 apresenta as capacidades de armazenamento inicial de cada uma das usinas.

Tabela 1: Capacidade de Armazenamento de elementos combustíveis das PUCs de cada Usina. [1]

Usina	Capacidade de Armazenamento
Angra 1	1252
Angra 2	1084
Angra 3	1084

Na Tabela 2 são apresentadas as previsões de esgotamento da capacidade de estocagem das piscinas de Angra 1 e 2, com base no número de ciclos e na quantidade de elementos combustíveis novos, trocados nos núcleos dos reatores a cada ciclo.

Tabela 2: Previsão de esgotamento da capacidade de armazenamento de ECIs da CNAAA. [1]

Usina	Data prevista do esgotamento da capacidade de armazenamento das PCUs
Angra 1	12/2021
Angra 2	07/2021

Considerando que o esgotamento da capacidade de estocagem das Piscinas (PCUs) das usinas Angra 1 e 2 poderá paralisar a operação destas unidades geradoras de energia, a solução adotada pelo empreendedor é a construção da Unidade de Armazenamento Complementar a Seco de Combustível Irrradiado da CNAAA (UAS). Dentre as diferentes soluções de armazenamento a seco de ECIs disponíveis no mercado internacional, destaca-se o Sistema de Armazenamento baseado em *Canisters* com Módulo de Armazenamento Vertical (cascos), com parede formada por concreto confinado em estrutura de aço (vide Figura 2).



Figura 2: Módulos de Armazenamento a seco de ECIs na Usina Nuclear de Vogtle. [1]

Os componentes do sistema de armazenamento apresentados na Figura 2 são descritos como:

- *Canister*: É um vaso hermético que fornece confinamento dos ECIs. Contém estrutura reticulada (*basket*) no seu interior para o armazenamento seguro (confinamento) e para evitar a criticalidade dos ECIs. [3] (vide Figura 3)
- Módulo de Armazenamento (*Overpack*): É um casco de armazenamento confeccionado em aço e concreto. Projetado e licenciado para fornecer proteção física, dissipação de calor por convecção e blindagem contra a radiação proveniente dos ECIs presentes no *Canister* durante o período de armazenamento. [3] (vide Figura 3)

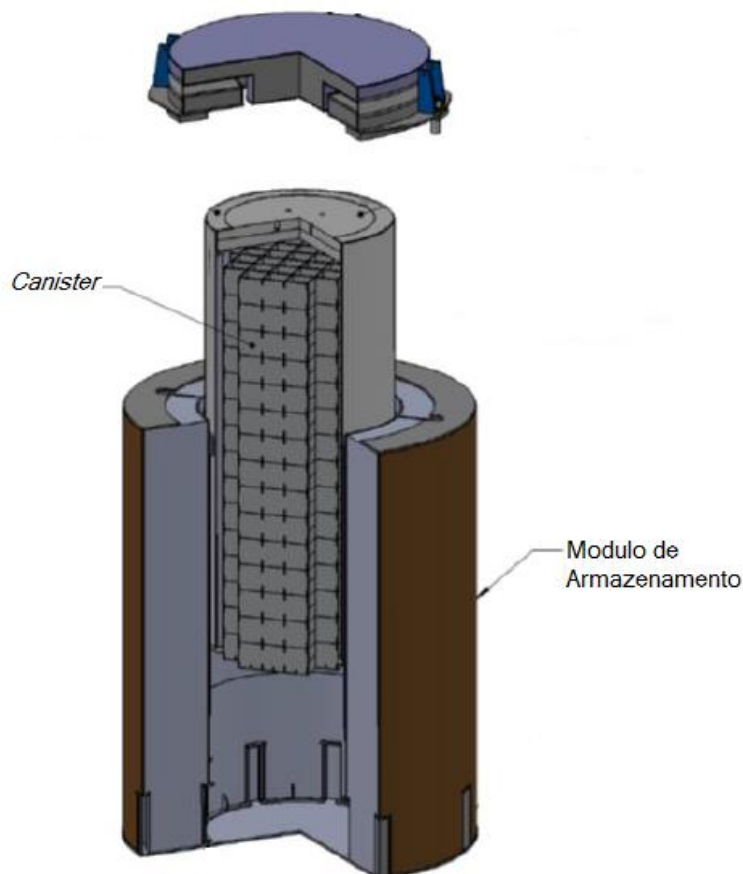


Figura 3: Esquema ilustrativo do Módulo de Armazenamento com parte do *Canister* inserido. [4]

A solução proposta pela Eletronuclear será a implantação de uma unidade desta natureza no sítio da CNAAA, em Itaorna, Angra dos Reis, Rio de Janeiro. A UAS deverá estar em operação a partir do ano de 2020 [1], sendo capaz de receber os primeiros ECIs vindos de Angra 1 e 2. Sua construção e operação será de responsabilidade da Eletrobras Termonuclear S.A. – Eletronuclear (ETN).

A implantação da UAS, com armazenamento de 510 ECIs (15 cascos), sendo 222 ECIs de Angra 1 (6 cascos) e 288 ECIs de Angra 2 (9 cascos), fora das PCUs, permite a continuidade de operação das usinas Angra 1 e 2 no sítio da CNAEA por mais 5 ciclos (que atualmente correspondem a 5 anos), após a data estimada de esgotamento da capacidade de armazenamento das piscinas [1].

Porém, há um interesse da Eletronuclear em aumentar futuramente a capacidade de armazenamento da UAS de 15 (quinze) cascos para 72 (setenta e dois), que já é previsto no desenvolvimento do projeto dessa unidade. Esse aumento permitiria ampliar o tempo de operação das usinas Angra 1 e 2 de 5 para 24 anos. Para atingir este objetivo, é necessária uma análise dos efeitos radiológicos gerados pela instalação. Uma análise para os arranjos de 1, 15 e 72 cascos já foi realizada pela empresa Holtec International, contratada pela Eletronuclear para o desenvolvimento do projeto da UAS e suporte ao licenciamento do mesmo. Os cálculos radiológicos foram realizados, por essa empresa, utilizando o código de computador MCNP5 [5], desenvolvido pelo laboratório de Los Alamos nos Estados Unidos da América, com o método de Monte Carlo.

É importante frisar que, embora a Holtec tenha determinado o impacto radiológico no entorno da instalação UAS para os arranjos de 1, 15 e 72 cascos utilizando o código MCNP5, não pode ser descartada a necessidade do cálculo das taxas de dose para condições de carregamento intermediárias às previamente estabelecidas. Esta alternativa permite que a ETN conheça o impacto radiológico progressivo nas instalações vizinhas e avalie as estratégias necessárias para minimizá-lo. Para esta tarefa, pode-se utilizar o código QAD-CGGP [6], o único código licenciado pela ETN junto à CNEN para esta finalidade.

Deve-se realçar que, mesmo que o código MCNP5 estivesse disponível para ser utilizado neste trabalho, não seria possível realizar os mesmos cálculos apresentados pela Holtec, uma vez que todas as informações necessárias não foram disponibilizadas por esta empresa.

O código QAD-CGGP, desenvolvido pelo laboratório de Oak Ridge nos Estados Unidos da América, aplica o método de *Point Kernel* [7]. Deve-se destacar que este código de computador é mais apropriado para o cálculo de taxa de dose envolvendo a

radiação gama e que, no caso da instalação UAS, deve-se considerar, também, a radiação devido à presença de nêutrons. Diferente do código QAD-CGGP, o código MCNP5 (utilizado pela Holtec) é recomendado para o cálculo de taxa de dose considerando ambas as radiações (gama e de nêutrons).

Então, o presente trabalho busca determinar fatores de correção para o código QAD-CGGP com o auxílio do código MCNP5 para o estudo do impacto radiológico no entorno da instalação UAS. Estes fatores corrigem os valores de taxa de dose obtidos com o código QAD-CGGP para que se aproximem dos resultados calculados com o código MCNP5. A estratégia utilizada neste trabalho consiste em determinar, inicialmente, valores de taxa de dose para a radiação gama proveniente do combustível com o código QAD-CGGP. Depois, estima-se as contribuições devido a nêutrons e aos raios gama provenientes do ^{60}Co , os produzidos na captura neutrônica e os gerados pelo veneno queimável (BPRA), utilizando funções de proporcionalidade. Estas funções são determinadas com base nos resultados previamente obtidos pela Holtec para um casco de armazenamento de ECIs de Angra 1 e 2. Com isso, soma-se os valores de taxa de dose de todas as fontes de radiação mencionadas, determinando um valor de taxa de dose total atribuído ao QAD-CGGP. Os fatores de correção são determinados comparando os resultados calculados com o MCNP5 com os atribuídos ao QAD-CGGP. Esta metodologia é usada para o cálculo de taxa de dose para arranjos de 1 (Angra 1 e 2), 15 e 72 cascos. Com os valores do fator de correção, obtidos para cada arranjo, são determinadas curvas para esses fatores em função do número de cascos, com isso, é possível obter fatores de correção para o QAD-CGGP para arranjos com números intermediários de cascos.

Este trabalho é organizado de maneira que no Capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos necessários para a compreensão deste texto. No Capítulo 3 é apresentado o projeto da Unidade de Armazenamento Complementar a Seco (UAS). Já a metodologia de cálculo consta no Capítulo 4. O Capítulo 5 consiste na apresentação e análise dos resultados obtidos neste trabalho. A aplicação da metodologia desenvolvida consta no Capítulo 6. As conclusões e recomendações compõem o Capítulo 7. Nos apêndices de A a D são apresentadas algumas entradas (*inputs*) do código QAD-CGGP utilizadas neste trabalho.

2. Fundamentos Teóricos

2.1. Definição de Alguns Parâmetros Importantes

Para a realização deste trabalho, faz-se necessário o conhecimento de alguns parâmetros utilizados nos cálculos. Estes parâmetros são definidos a seguir.

2.1.1. Atividade

De acordo com a Norma da CNEN-NN-3.01 [8], a atividade (de uma quantidade de radionuclídeo, em um determinado estado de energia e instante de tempo), A , é uma grandeza que pode ser representada pela seguinte equação:

$$A = dN/dt$$

onde dN é o valor médio esperado do número de transições nucleares daquele estado de energia no intervalo de tempo dt .

No Sistema Internacional (SI) utiliza-se o Becquerel (Bq) como unidade de atividade. Fisicamente, ele representa uma desintegração por segundo; também pode ser encontrado na literatura especializada o Curie (Ci) que é aproximadamente igual a $3,7 \times 10^{10}$ Bq.

2.1.2. Magnitude da Fonte

Define-se, neste trabalho, a magnitude da fonte (*source strength*), M , como o número de fótons que é emitido por uma fonte radioativa por unidade de tempo. Ela é determinada pelo produto da probabilidade de emissão de cada raio gama, p_i , por sua atividade correspondente, A_i , ou seja:

$$M = \sum_{i=1}^n p_i \cdot A_i$$

desta forma, os valores desta grandeza são fornecidos em fótons por segundo (fótons/s), onde n é o número de raios gama.

2.1.3. Dose Absorvida

A dose absorvida, D , é uma grandeza dosimétrica fundamental expressa pela razão entre a energia média, $d\varepsilon$, depositada pela radiação em um volume elementar de matéria de massa dm [8]. Ela pode ser representada pela seguinte equação:

$$D = d\varepsilon/dm$$

A unidade no SI é o joule por quilograma (J/kg), denominada gray (Gy) [8].

2.1.4. Dose Equivalente

A dose equivalente, H_T , é o produto da dose absorvida média, D , no órgão ou tecido pelo fator de ponderação da radiação, w_R , ou seja:

$$H_T = D \cdot w_R$$

A unidade no SI é o joule por quilograma (J/kg), denominada sievert (Sv) [8].

2.1.5. Dose Efetiva

A dose efetiva, E , é a soma das doses equivalentes ponderadas nos diversos órgãos e tecidos, representada pela equação:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T$$

onde H_T é a dose equivalente no tecido ou órgão e w_T é o fator de ponderação de órgão ou tecido. A unidade no SI é o joule por quilograma (J/kg), denominada sievert (Sv) [8].

2.1.6. Taxa de Dose

A taxa de dose, \dot{D} , representa a variação da dose radiológica, dD , em função do tempo, dt . Assim:

$$\dot{D} = dD/dt$$

A unidade no SI é o sievert por segundo (Sv/s) [8].

2.2. QAD-CGGP

O QAD-CG é um código que utiliza o método de *point kernel* e foi desenvolvido pelo laboratório de Oak Ridge (EUA), para o cálculo da interação de nêutrons rápidos e raios gama com diversas configurações possíveis de blindagens radiológicas definidas por geometria combinatória (CG) [9].

Já o método de *point-kernel* é uma relação matemática que fornece uma resposta hipotética de um detector localizado a uma dada distância de uma fonte pontual isotrópica em um meio infinito e homogêneo. De fato, a definição de *point-kernel* baseia-se no pressuposto de que qualquer fonte de radiação pode ser vista como consistindo de fontes pontuais isotrópicas diferenciais. O efeito global da radiação é dado pela integração (ou soma) das contribuições de cada fonte diferencial individual na qual a região de interesse foi dividida [7].

De acordo com a referência [7], o principal problema do método *point-kernel* é contabilizar a radiação espalhada que geralmente é implementada através da aproximação semi-empírica do fator de *buildup*. Este fator deve ser introduzido como um multiplicador para a dose atenuada. A determinação apropriada do fator de *buildup* pode ser bastante complexa, uma vez que depende da energia, da espessura e do tipo de material. As incertezas na determinação do fator de *buildup* limitam essencialmente a acurácia do método de *point-kernel*.

A versão QAD-CGGP, utilizada no presente trabalho, faz uso da Progressão Geométrica (GP) como função de ajuste para determinação do fator de *build up* de raios gama [9].

2.3. MCNP

O código MCNP (*Monte Carlo N-Particle*), desenvolvido pelo *Los Alamos National Laboratory – LANL* (EUA), é reconhecido internacionalmente como código eficiente para análise de transporte de diversos tipos de radiações a partir do Método de Monte Carlo [10]. Sua capacidade de tratamento de geometrias complexas em três dimensões, o transporte de diferentes tipos de partículas e fótons, o estudo em vários grupos de

energia, a vasta biblioteca de seções de choque e a variedade de opções para dados de entrada fazem deste código uma ferramenta poderosa no campo de pesquisa em física médica, proteção radiológica, detectores e blindagens da radiação, modelagem de instalações radioativas e nucleares [10].

O Método de Monte Carlo é uma ferramenta matemática comumente utilizada para representar teoricamente um processo estatístico, como a interação da radiação com a matéria, por exemplo. Esse método utiliza uma sequência de números aleatórios para a realização da simulação matemática do fenômeno físico. No transporte da radiação, o método consiste em acompanhar cada partícula desde o seu nascimento até sua morte (fuga, absorção, reflexão, etc.). O comportamento médio das partículas é descrito em termos de fluxo ou densidade de partículas dos quais derivam grandezas específicas como energia depositada ou dose [10].

O código MCNP5 é a versão usada pela Holtec para os cálculos de taxa de dose no entorno da instalação UAS.

3. Projeto da Unidade de Armazenamento Complementar a Seco (UAS)

3.1. Geral

Conforme mencionado anteriormente, a instalação UAS é projetada para armazenar os ECIs gerados pelas usinas Angra 1 e 2. Inicialmente, a Eletronuclear está licenciando junto à CNEN um projeto de instalação para a alocação de 15 cascos com capacidade de armazenamento de 510 ECIs, sendo 222 ECIs de Angra 1 (6 cascos) e 288 ECIs de Angra 2 (9 cascos), sobre uma base de concreto, denominado *Pad*. Embora tenha sido requerido pela ETN um licenciamento para 15 cascos primeiramente, o *Pad* já está sendo licenciado para ser construído com dimensões suficientes para receber 72 cascos.

A Figura 4 apresenta o conceito do projeto da instalação UAS, desenvolvido pela Holtec, (*UAS Design Concept*) onde é possível ver os 15 cascos de armazenamento (*overpacks*) e todo o equipamento de apoio pertinente. As principais instalações, mostradas nessa figura, são a Guarita (*Access Control Cabin*) e o Almojarifado (*Auxiliary Building*) da instalação UAS. São também mostrados na Figura 4 o veículo de transferência (SPMT - *Self-Propelled Modular Transporter*) e o guindaste de pórtico (*Gantry Crane*). [11]

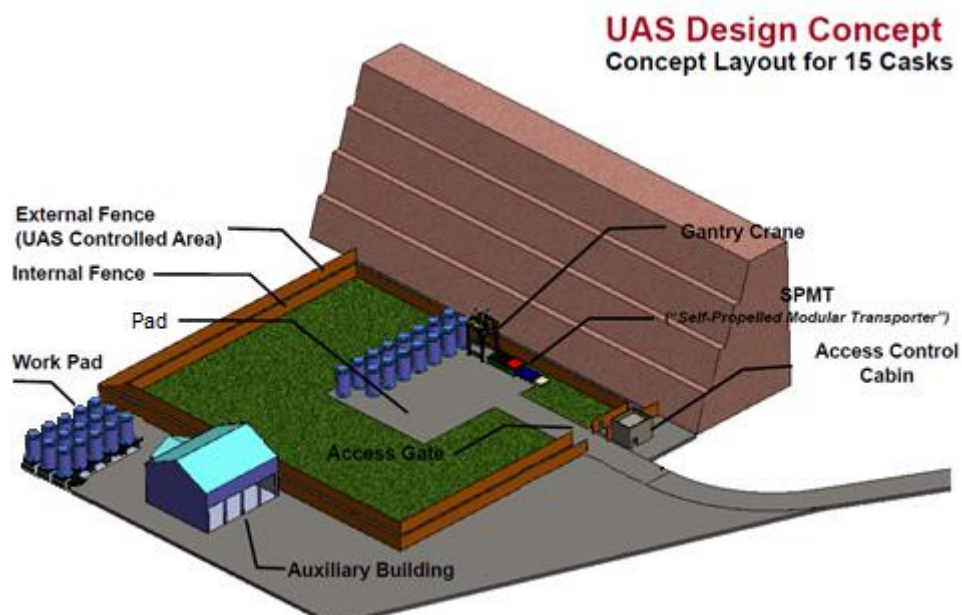


Figura 4: Conceito do projeto da UAS [11]

São ainda mostrados na Figura 4 a cerca dupla para a proteção física do depósito (*Internal and external fences*) delimitando a fronteira da área controlada da instalação UAS, o local para a estocagem de cascos de armazenamento vazios (*Work Pad*), a base de concreto para o armazenamento dos cascos com ECIs (*Pad*) e o portão de acesso da instalação (*Access Gate*).

Na Figura 5 são apresentadas algumas dimensões importantes do projeto da instalação UAS. Observa-se, com o auxílio dessa figura, que a base de concreto de armazenamento de cascos (*Pad*) possui geometria retangular com dimensões iguais a 35,4 m x 44,2 m. A área controlada, por sua vez, também possui geometria retangular (limitada pela cerca externa da instalação) com dimensões iguais a 87,8 m x 103,8 m. Observa-se ainda que, para o arranjo de 15 cascos, a menor distância entre um casco de armazenamento e a cerca externa do depósito é igual a 40 metros. A distância de centro a centro entre embalados (*pitch*) é igual a 5,2 metros (vide Figura 5) e este valor é mantido neste trabalho para os arranjos de 15 e 72 cascos.

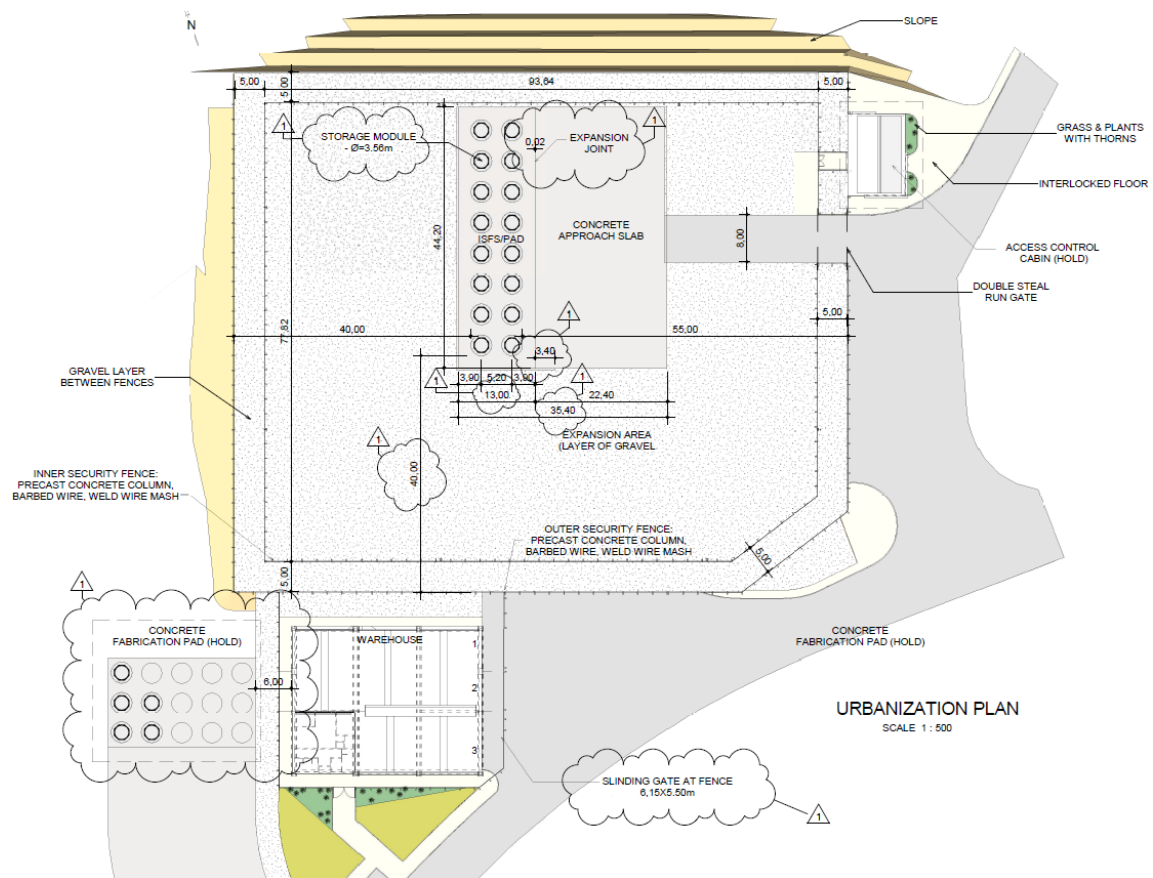


Figura 5: Algumas dimensões importantes do projeto da instalação UAS. [11]

Na Figura 6, é apresentada a vista espacial da instalação UAS mostrando o almoxarifado, a guarita, o *Pad* (base de concreto), a cerca dupla, os cascos carregados com ECIs e os cascos vazios.

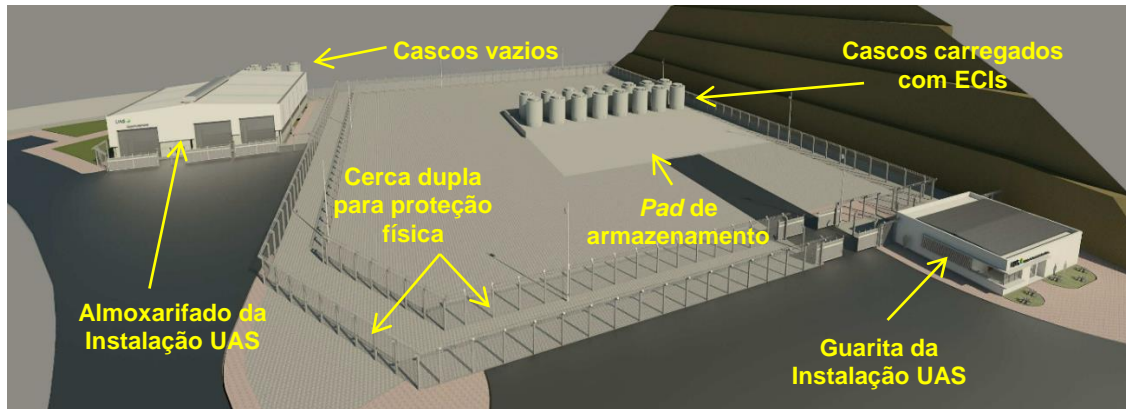


Figura 6: Representação espacial da instalação UAS. [11]

O componente mais importante da instalação UAS é o sistema de armazenamento HI-STORM FW (vide Figura 7), projetado para armazenar os ECIs retirados das PCUs de Angra 1 e 2, e futuramente de Angra 3, depois de terem seus limites de armazenamento alcançados. O sistema HI-STORM FW consiste em um *Casnister* que é um recipiente metálico selado (*Multi-Purpose Canister - MPC*) contido dentro de um módulo de armazenamento (HI-STORM FW *Overpack*), construído de concreto e aço [4].

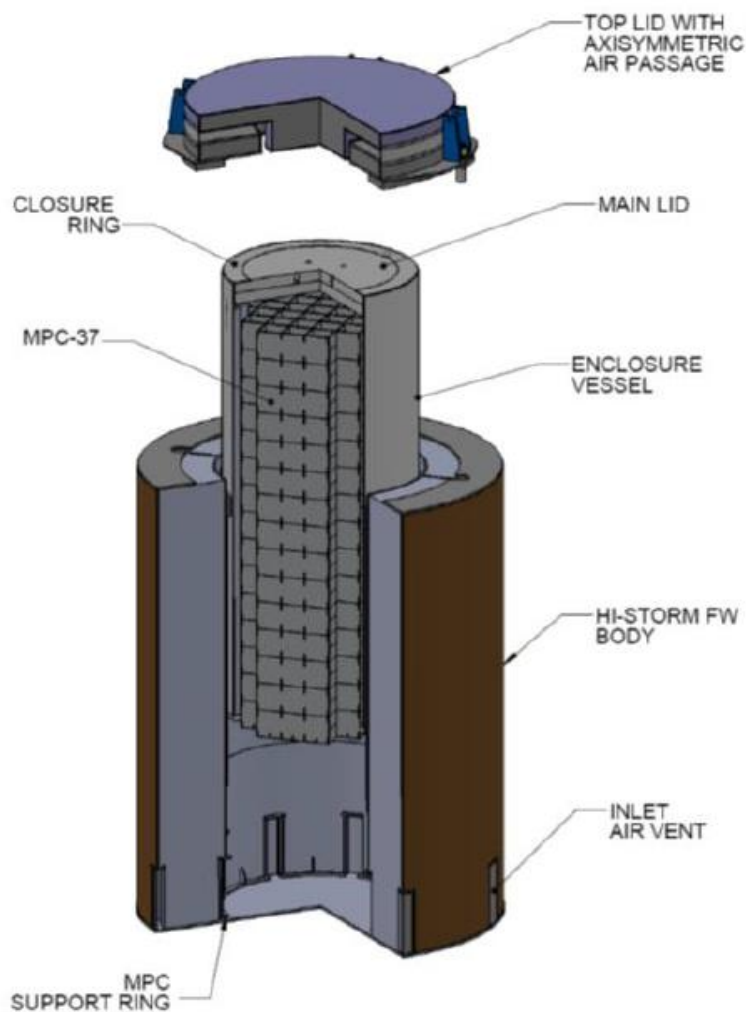


Figura 7: Vista em corte do Módulo de Armazenamento com parte do MPC-37 inserido. [4]

A Figura 7 mostra o sistema HI-STORM FW com dois de seus principais constituintes, o MPC e o HI-STORM FW *Overpack*, em uma visão de corte. O MPC, mostrado parcialmente inserido no HI-STORM FW *Overpack*, define a região de confinamento para os conjuntos de ECIs armazenados. O HI-STORM FW *Overpack* fornece proteção estrutural, resfriamento e blindagem radiológica para o MPC. Uma descrição de cada um dos componentes é fornecida nesta seção.

O sistema HI-STORM FW se destina a fornecer proteção máxima contra a radiação ionizante e minimizar a dose limite do local, além de simplificar e facilitar o manuseio dos ECIs. Este sistema pode armazenar com segurança conjuntos de combustível PWR das usinas Angra 1 e 2 da CNAEA, no MPC-37 ou MPC-32ML, respectivamente. O MPC (*Canister*) é identificado pelo número máximo de combustíveis que pode conter

no cesto (*basket*) de combustível. Os diâmetros do MPC são idênticos para permitir o uso de um único projeto de módulo de armazenamento. Na Tabela 3 são apresentados os diâmetros e as alturas para o MPC e HI-STORM FW *Overpack*.

Tabela 3: Dados dos Diâmetros e Alturas do MPC e HI-STORM FW. [12]

Componente	Medida
Diâmetro interno dos MPC-37 & MPC-32ML	74,75" (189,865 cm)
Diâmetro externo dos MPC-37 & MPC-32ML	75,75" (192,405 cm)
Diâmetro interno do HI-STORM FW <i>Overpack</i>	81" (205,74 cm)
Diâmetro externo do HI-STORM FW <i>Overpack</i>	139" (353,06 cm)
Altura da Cavidade dos MPC-37 & MPC-32ML	198" (502,92 cm)
Altura total dos MPC-37 & MPC-32ML	210" (533,4 cm)
Altura da cavidade do HI-STORM FW	213 1/2" (542,29 cm)
Altura do HI-STORM FW	217 1/2" (552,45 cm)
Altura total do HI-STORM FW (colocado sobre o <i>Pad</i>)	237 3/4" (603,885 cm)

3.2. *Multi-Purpose Canisters (MPC)*

Como já explicitado, o MPC é parte integrante do sistema HI-STORM FW. Ele mantém a configuração e evita a criticalidade dos ECIs, além de delimitar a região de confinamento entre os mesmos e o ambiente. O *Canister* é denominado multi-propósito porque, além das tarefas já mencionadas anteriormente, ele é utilizado tanto na transferência quanto no armazenamento de ECIs.

Os *Canisters* (MPCs) são cilindros de aço carbono e são projetados de maneira que cada MPC é um conjunto contendo um cesto alveolar de combustível, uma placa de base, uma parede externa (envoltório cilíndrico), uma tampa e um anel de fechamento [4]. Nas Figuras 8, 9 e 10, é possível ter uma visão dos detalhes da estrutura do componente *Canister*.



Figura 8: Cesto de Combustíveis PWR do MPC-37 (37 células de armazenamento). [4]

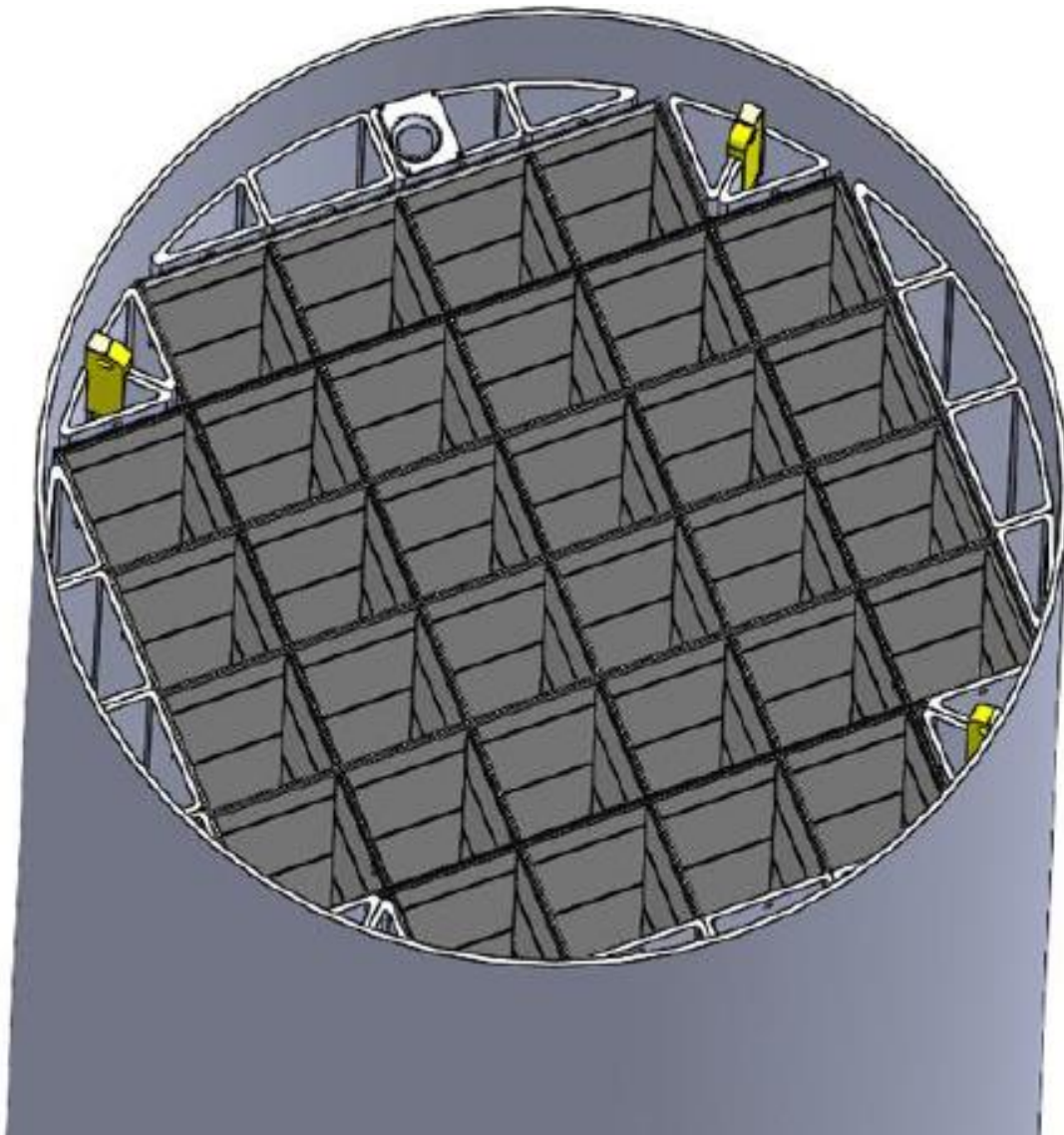


Figura 9: Cesto de Combustíveis PWR do MPC-32ML (32 células de armazenamento).

[4]

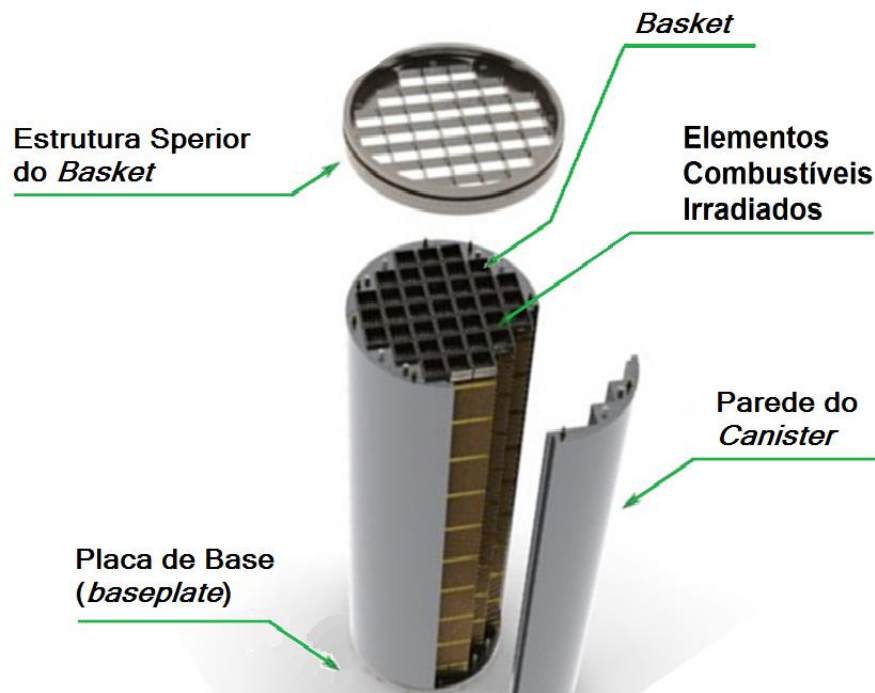


Figura 10: Vista esquemática do MPC-37 (*Canister*). [3]

Independentemente da quantidade de células de armazenamento, a composição do MPC é a mesma, ou seja, o cesto (*basket*) possui uma configuração semelhante à de um favo de mel e é posicionada dentro de um envoltório cilíndrico circunscrito de aço carbono. O número de células de armazenamento de ECIs em um MPC depende do tipo de conjunto de combustível a ser armazenado, diferindo entre o MPC-37 e o MPC-32ML:

- MPC-37 contém 37 células de armazenamento para abrigar um conjunto de 37 ECIs provenientes da usina Angra 1 (Figura 8);
- MPC-32ML contém 32 células de armazenamento para abrigar um conjunto de 32 ECIs provenientes da usina Angra 2 (Figura 9).

Para garantir a compatibilidade com o HW-STORM FW *Overpack*, o MPC-37 e o MPC-32ML possuem diâmetros idênticos [4].

3.3. HI-STORM FW *Overpack*

O HI-STORM FW *Overpack* é um módulo vertical (casco) projetado para ser totalmente compatível com os MPCs (vide Figura 11). Este módulo consiste basicamente em um cilindro vazado de concreto de alta densidade fechado com uma

tampa também de concreto. O cilindro possui, em suas partes interna e externa, uma camada de aço carbono (*Inner Shell* e *Outer Shell*, respectivamente). A função estrutural do *Overpack* é fornecida pelo aço carbono, e a função de blindagem radiológica é fornecida pelo concreto de alta densidade [4]. Tanto a tampa quanto o corpo do HI-STORM FW *Overpack* fornecem proteção contra radiação de nêutrons e gama [4].

A cavidade cilíndrica interna do referido casco possui altura e diâmetro suficientes para alojar um MPC, com um espaço anular entre este e o *Overpack*. O espaço anular, juntamente com canais de ventilação interligados no interior do *Overpack*, possibilitam a manutenção de uma vazão de ar ao longo da superfície externa do MPC. Desta forma, é estabelecido um regime de escoamento por convecção natural, que impede o superaquecimento dos ECIs armazenados no interior do MPC.

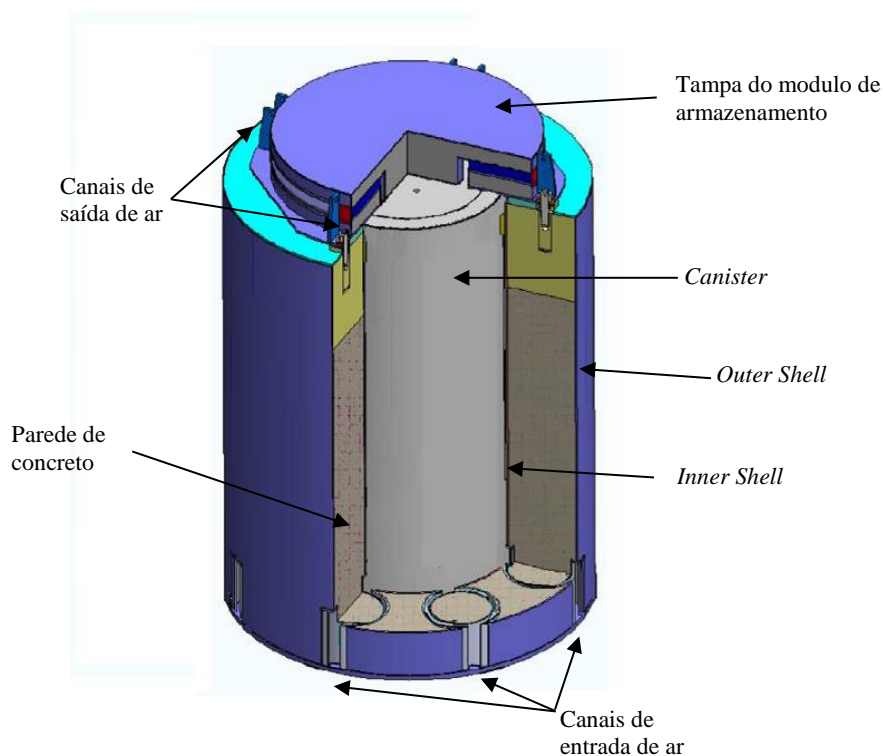


Figura 11: Vista esquemática de um Módulo de Armazenamento (HI-STORM FW *Overpack*) com o *Canister* inserido. [1]

4. Metodologia de Cálculo

A metodologia de cálculo empregada neste trabalho busca determinar fatores de correção para o código QAD-CGGP, descrito na Seção 2.2, com o auxílio do código MCNP5, descrito na Seção 2.3, para a determinação da taxa de dose no entorno da instalação UAS, devido à radiação proveniente dos cascos de armazenamento desta unidade. Estes fatores corrigem os valores de taxa de dose obtidos com o código QAD-CGGP para que se aproximem dos resultados calculados com o código MCNP5.

O código QAD-CGGP foi utilizado diretamente na determinação da taxa de dose provocada pela radiação gama dos ECIs. Já as contribuições de taxa de dose resultantes das radiações devido a nêutrons e aos raios gama provenientes do ^{60}Co , os produzidos na captura neutrônica e os gerados pelo veneno queimável (BPRA), foram determinadas com a utilização de funções de proporcionalidade. Estas funções são determinadas com base nos resultados previamente obtidos pela Holtec para um casco de armazenamento de ECIs de Angra 1 e 2.

Os cálculos de taxa de dose são realizados considerando a utilização do MPC-37 (37 ECIs) para a modelagem, tanto para ECIs provenientes de Angra 1 quanto de Angra 2. Esta mesma premissa foi utilizada pela Holtec. Para a realização dos cálculos, foi necessária a utilização dos valores da Magnitude da Fonte (fótons/s) para cada faixa de energia e as correspondentes energias médias por ECI, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Magnitude da Fonte para radiação gama calculada por elemento combustível para os ECIs em um MPC-37 de cada usina, em função da energia. [13]

Energia Média	Menor Energia	Maior Energia	Angra 1	Angra 2
(MeV)	(MeV)	(MeV)	(Fótons/s)	(Fótons/s)
0,575	0,45	0,7	1,92E+15	2,90E+15
0,85	0,7	1,0	1,45E+14	2,66E+14
1,25	1,0	1,5	4,14E+13	7,19E+13
1,75	1,5	2,0	2,16E+12	3,63E+12
2,25	2,0	2,5	5,24E+10	6,46E+10
2,75	2,5	3,0	2,99E+09	4,54E+09
Total			2,11E+15	3,24E+15

Para a utilização do código QAD-CGGP, são utilizadas as seguintes regiões (vide Figuras 12 e 13):

- Região da fonte: Região com raio igual a 94,9325 cm [12] formada pela mistura dos 37 ECIs com as grades espaçadoras do MPC e vazio;
- Parede do MPC: Região de aço com espessura de 1,27 cm [12];
- Vazio: Região de vazio com espessura de 6,67 cm [12];
- Casca Interna (*Inner Shell*): Região de aço com espessura de 1,905 cm [13];
- Região de Blindagem: Região de concreto de alta densidade com espessura de 69,85 cm [13];
- Casca Externa (*Outer Shell*): Região de aço com espessura de 1,905 cm [13].

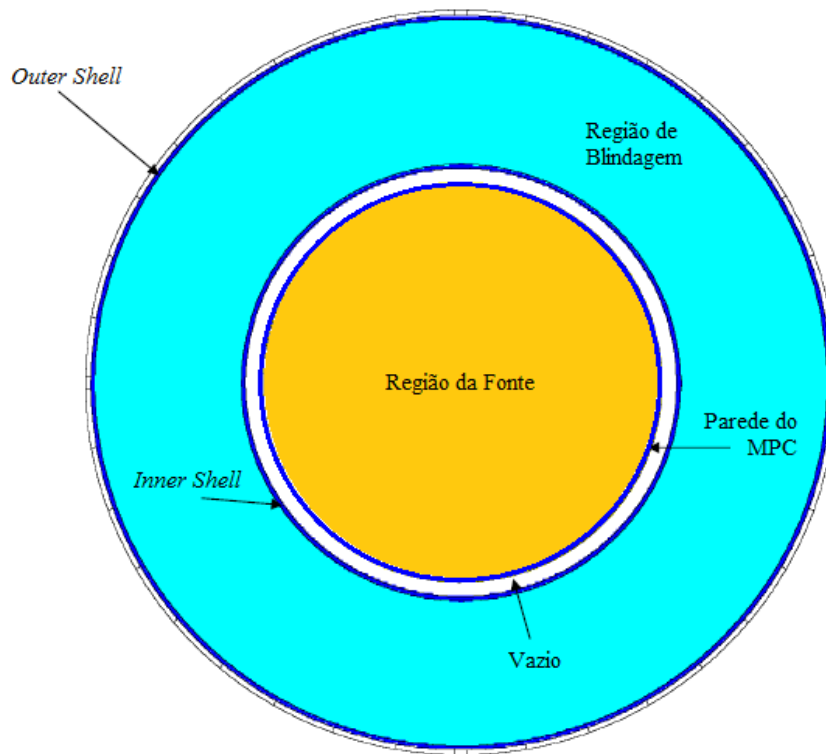


Figura 12: Vista do Corte Transversal do Sistema HI-STORM FW como modelado neste Trabalho.

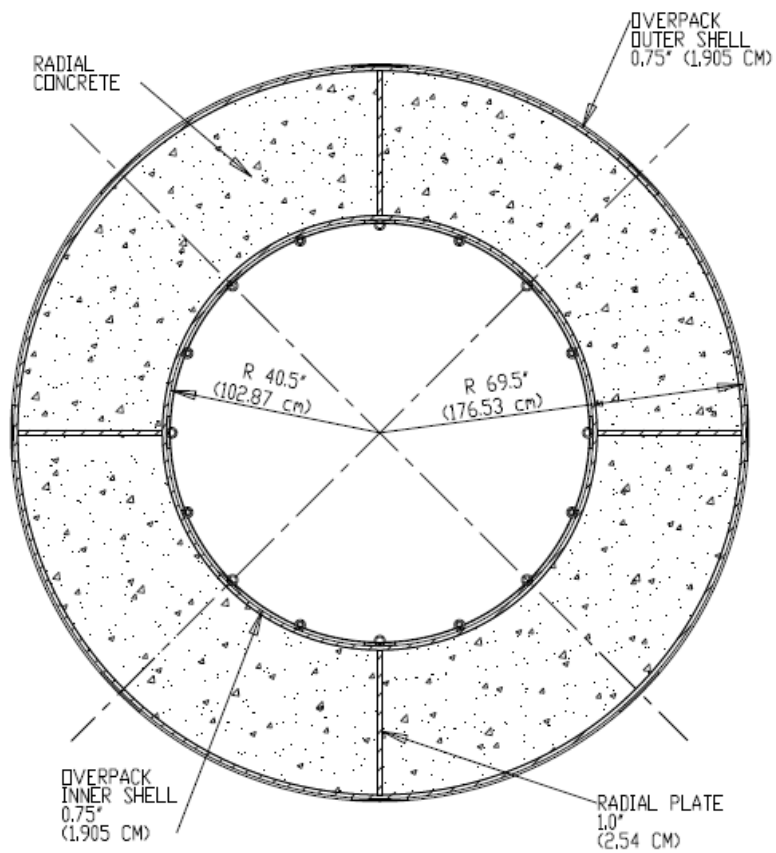


Figura 13: Vista do corte transversal do HI-STORM FW *Overpack* com suas medidas.

[13]

A região da fonte é composta pelos materiais dos 37 ECIs, do cesto (*basket*) e pelo ar (tratado como vazio nesta modelagem). Uma célula unitária desta região é mostrada na Figura 14. Para os cálculos foi determinada uma densidade média para a região da fonte igual a $2,259 \text{ g/cm}^3$, utilizando-se os valores de densidade do aço e da região de combustível PWR, os quais podem ser vistos na Tabela 5. As demais regiões são compostas de aço (já mencionado anteriormente) ou concreto cuja densidade é também apresentada na Tabela 5.

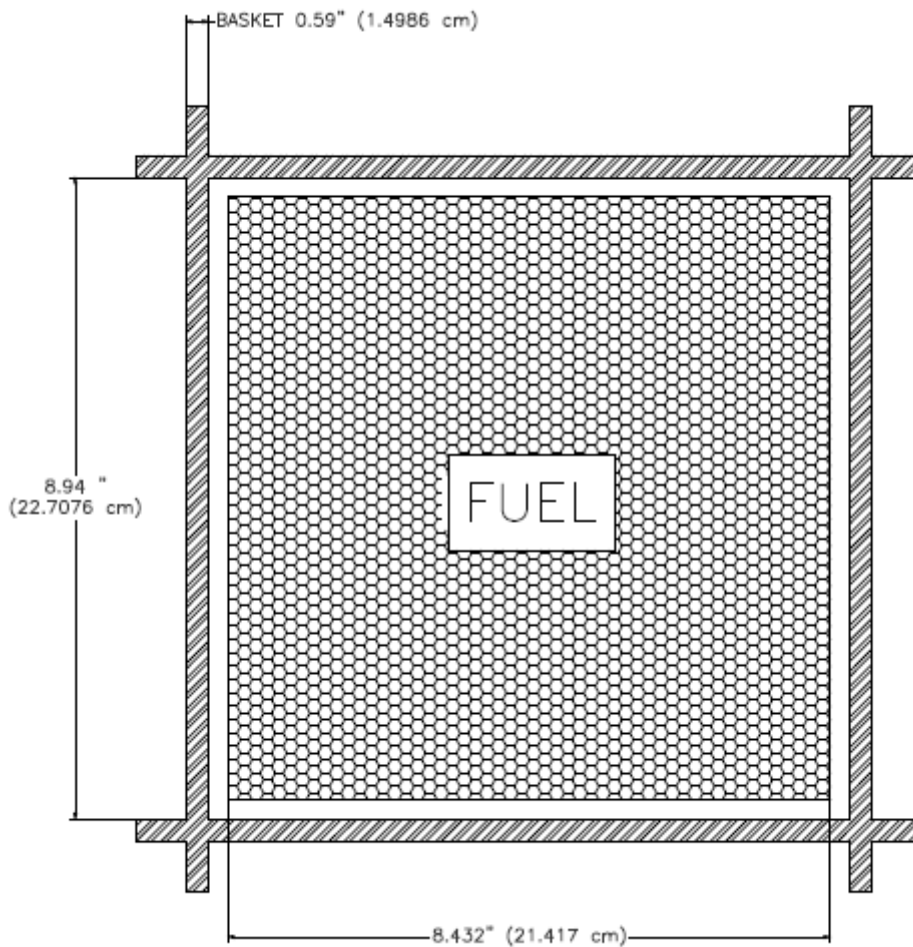


Figura 14: Vista do Corte Transversal de uma Célula do Cesto do MPC-37 como modelado no MCNP5. [13]

Tabela 5: Composição dos Materiais do Sistema HI-STORM FW. [13]

Componente	Densidade (g/cm ³)	Elemento	Fração mássica (%)
Aço Carbono	7,82	C	1,0
		Fe	99,0
Região do Combustível PWR	3,769	²³⁵ U	3,709
		²³⁸ U	70,474
		O	9,972
		Zr	15,565
		Cr	0,016
		Fe	0,033
		Sn	0,230
Concreto de Alta Densidade	3,68	H	0,68
		O	32,91
		Na	0,01
		Mg	0,61
		Al	1,61
		Si	2,84
		S	0,13
		Cl	0,01
		K	0,05
		Ca	5,11
		Fe	56,06

Neste trabalho utiliza a hipótese de que as taxas de dose devido as diversas fontes de radiação, mencionadas neste trabalho, são diretamente proporcionais as taxas de dose devido aos raios gama provenientes do combustível. Consequentemente, as contribuições de taxa de dose resultantes das radiações devido a nêutrons e aos raios gama provenientes do ⁶⁰Co, os produzidos na captura neutrônica e os gerados pelo veneno queimável (BPRA), foram determinadas com a utilização de funções de proporcionalidade. Essas funções são obtidas pela razão entre as taxas de dose geradas por estas radiações e a taxa de dose dos raios gama provenientes do combustível. Para isso, foram utilizados os valores de taxa de dose apresentados nas Tabelas 6 e 7 para um casco de Angra 1 e outro de Angra 2, respectivamente.

Tabela 6: Taxas de dose como função da distância para um único Casco HI-STORM FW carregado com os ECIs pertencentes à Usina Angra 1, calculadas pela Holtec. [13]

Distância	Nêutrons	Gama do ^{60}Co	Gama do Combustível	Gama da Captura (n, γ)	Gama do BPRA	Taxa de Dose Total
(m)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)
10	7,53E-02	6,48E-02	4,62E-01	2,45E-02	1,52E-02	6,42E-01
25	1,64E-02	1,44E-02	8,59E-02	4,62E-03	6,64E-03	1,28E-01
50	4,75E-03	5,44E-03	2,26E-02	1,13E-03	4,41E-03	3,83E-02
75	1,97E-03	2,66E-03	9,77E-03	4,99E-04	2,38E-03	1,73E-02
100	1,03E-03	1,34E-03	4,89E-03	2,66E-04	1,20E-03	8,73E-03
150	3,76E-04	3,90E-04	1,52E-03	1,06E-04	3,26E-04	2,72E-03
200	1,70E-04	1,41E-04	6,60E-04	5,28E-05	1,08E-04	1,13E-03
250	8,42E-05	6,17E-05	2,90E-04	2,93E-05	4,45E-05	5,10E-04
300	4,65E-05	2,87E-05	1,45E-04	1,73E-05	1,87E-05	2,56E-04
350	2,62E-05	1,44E-05	7,79E-05	1,08E-05	9,06E-06	1,38E-04
400	1,53E-05	7,76E-06	4,36E-05	7,15E-06	4,55E-06	7,84E-05
450	9,16E-06	4,22E-06	2,40E-05	4,59E-06	2,31E-06	4,43E-05
500	5,82E-06	2,41E-06	1,40E-05	3,28E-06	1,25E-06	2,68E-05
600	2,43E-06	7,90E-07	4,81E-06	1,79E-06	3,30E-07	1,02E-05
700	1,03E-06	3,00E-07	1,91E-06	1,07E-06	1,10E-07	4,42E-06
800	4,80E-07	1,20E-07	7,50E-07	6,00E-07	1,00E-08	2,00E-06
900	2,20E-07	1,00E-08	3,30E-07	3,70E-07	1,00E-08	1,00E-06
1000	1,00E-07	1,00E-08	1,50E-07	2,40E-07	1,00E-08	5,30E-07

Tabela 7: Taxas de dose como função da distância para um único Casco HI-STORM FW carregado com os ECIs pertencentes à Usina Angra 2, calculadas pela Holtec. [13]

Distância	Nêutrons	Gama do ^{60}Co	Gama do Combustível	Gama da Captura (n, γ)	Gama do BPRA	Taxa de Dose Total
(m)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)
10	3,84E-01	9,38E-02	6,53E-01	1,25E-01	1,52E-02	1,27E+00
25	8,35E-02	2,08E-02	1,22E-01	2,36E-02	6,64E-03	2,57E-01
50	2,42E-02	7,87E-03	3,22E-02	5,76E-03	4,41E-03	7,44E-02
75	1,00E-02	3,85E-03	1,40E-02	2,54E-03	2,38E-03	3,28E-02
100	5,26E-03	1,94E-03	6,99E-03	1,36E-03	1,20E-03	1,68E-02
150	1,91E-03	5,65E-04	2,17E-03	5,38E-04	3,26E-04	5,51E-03
200	8,66E-04	2,04E-04	9,30E-04	2,69E-04	1,08E-04	2,38E-03
250	4,29E-04	8,92E-05	4,10E-04	1,49E-04	4,45E-05	1,12E-03
300	2,37E-04	4,15E-05	2,04E-04	8,79E-05	1,87E-05	5,89E-04
350	1,34E-04	2,08E-05	1,09E-04	5,51E-05	9,06E-06	3,28E-04
400	7,80E-05	1,12E-05	6,08E-05	3,65E-05	4,55E-06	1,91E-04
450	4,66E-05	6,09E-06	3,36E-05	2,34E-05	2,31E-06	1,12E-04
500	2,96E-05	3,48E-06	1,95E-05	1,67E-05	1,25E-06	7,05E-05
600	1,24E-05	1,15E-06	6,74E-06	9,10E-06	3,30E-07	2,97E-05
700	5,28E-06	4,50E-07	2,68E-06	5,43E-06	1,10E-07	1,40E-05
800	2,45E-06	1,80E-07	1,07E-06	3,03E-06	1,00E-08	6,76E-06
900	1,14E-06	1,00E-08	4,80E-07	1,89E-06	1,00E-08	3,60E-06
1000	5,40E-07	1,00E-08	2,20E-07	1,21E-06	1,00E-08	2,01E-06

As funções de proporcionalidade para os cascos de ECIs provenientes de Angra 1 e 2, obtidos com os valores de taxa de dose extraídos das Tabelas 6 e 7, são apresentados nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8: Funções de proporcionalidade para o Casco HI-STORM FW com os ECIs oriundos da Usina Angra 1.

Distância	Nêutrons	⁶⁰ Co	Captura (n,γ)	BPRA
(m)	-	-	-	-
10	0,163	0,140	0,053	0,033
25	0,191	0,168	0,054	0,077
50	0,210	0,241	0,050	0,195
75	0,202	0,272	0,051	0,244
100	0,211	0,274	0,054	0,245
150	0,247	0,257	0,070	0,214
200	0,258	0,214	0,080	0,164
250	0,290	0,213	0,101	0,153
300	0,321	0,198	0,119	0,129
350	0,336	0,185	0,139	0,116
400	0,351	0,178	0,164	0,104
450	0,382	0,176	0,191	0,096
500	0,416	0,172	0,234	0,089
600	0,505	0,164	0,372	0,069
700	0,539	0,157	0,560	0,058
800	0,640	0,160	0,800	0,013
900	0,667	0,030	1,121	0,003
1000	0,667	0,007	1,600	0,001

Tabela 9: Função de Proporcionalidade para o Casco HI-STORM FW com os ECIs oriundos da Usina Angra 2.

Distância	Nêutrons	⁶⁰ Co	Captura (n,γ)	BPRA
(m)	-	-	-	-
10	0,588	0,144	0,191	0,023
25	0,684	0,170	0,193	0,054
50	0,752	0,244	0,179	0,137
75	0,714	0,275	0,181	0,170
100	0,753	0,278	0,195	0,172
150	0,880	0,260	0,248	0,150
200	0,931	0,219	0,289	0,116
250	1,046	0,218	0,363	0,109
300	1,162	0,203	0,431	0,092
350	1,229	0,191	0,506	0,083
400	1,283	0,184	0,600	0,075
450	1,387	0,181	0,696	0,069
500	1,518	0,178	0,856	0,064
600	1,840	0,171	1,350	0,049
700	1,970	0,168	2,026	0,041
800	2,290	0,168	2,832	0,009
900	2,375	0,021	3,938	0,002
1000	2,455	0,005	5,500	0,000

Foi mencionado, no início desta seção, que o objetivo deste trabalho é determinar fatores de correção para o código QAD-CGGP com o auxílio do código MCNP5, para a determinação da taxa de dose no entorno da instalação UAS, devido à radiação proveniente dos cascos de armazenamento desta unidade.

Inicialmente são calculados, com o código QAD-CGGP, os valores de taxa de dose produzidos pela radiação gama proveniente do combustível. E, com auxílio das funções de proporcionalidade, são determinados os valores de taxa de dose resultantes das radiações devido a nêutrons e aos raios gama provenientes do ⁶⁰Co, os produzidos na captura neutrônica e os gerados pelo veneno queimável (BPRA). Com isso, obtém-se o

valor de taxa de dose total atribuído ao QAD-CGGP. Este cálculo é realizado para os arranjos de 1, 15 e 72 cascos (vide Figuras 15, 16 e 17). Para todas estas situações o detector se encontra a meia altura dos cascos, conforme mostrado na Figura 15.

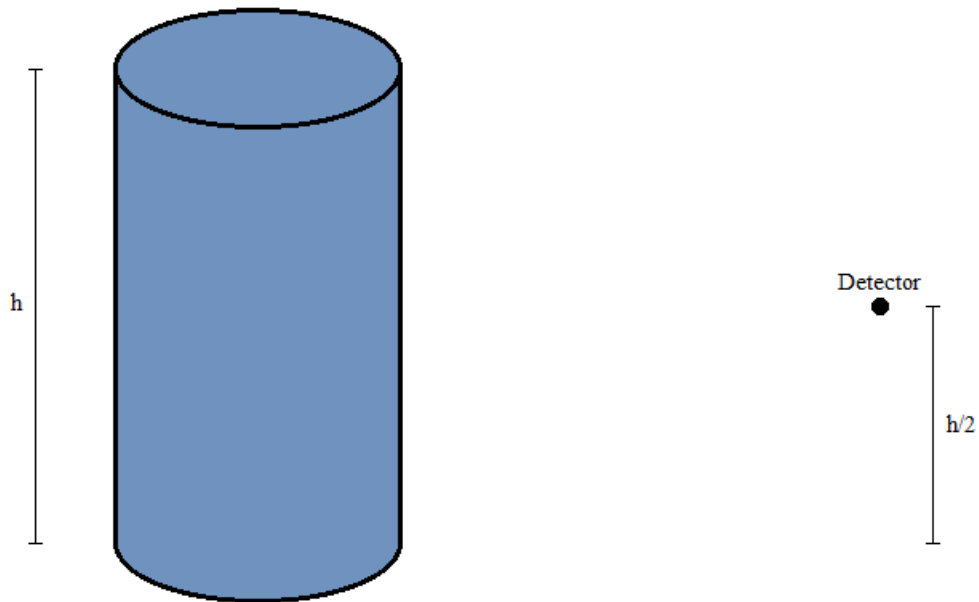


Figura 15: Esquema ilustrativo para o arranjo com 1 Casco.

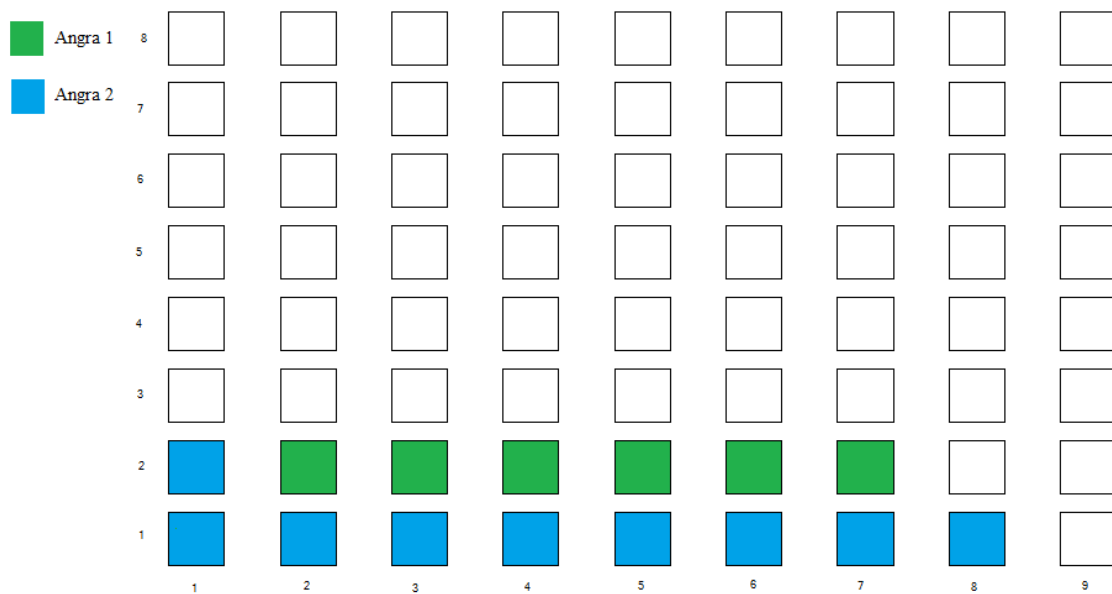


Figura 16: Esquema ilustrativo para o arranjo de 15 Cascos.

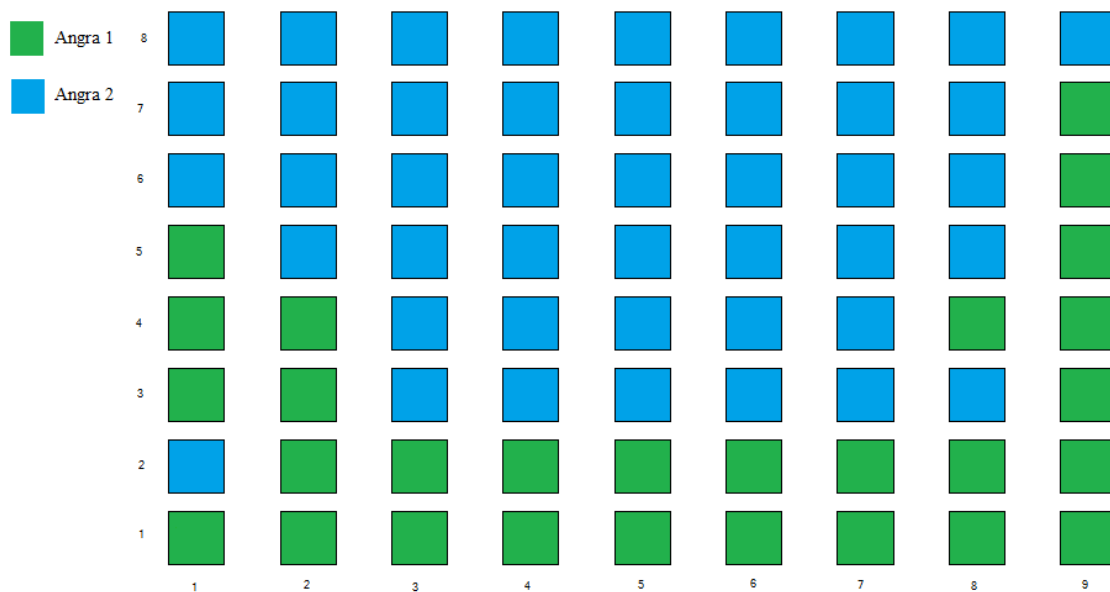


Figura 17: Esquema ilustrativo para o arranjo de 72 Cascos. [13]

Para o arranjo com 1 casco, foram determinados os valores de taxa de dose para 1 casco carregado com ECIs provenientes de Angra 1 e para 1 casco com ECIs de Angra 2. Já para o arranjo de 15 cascos, como a Holtec não menciona a configuração utilizada em [13], considerou-se de forma conservadora que os cascos mais próximos ao detector são os carregados com ECIs de Angra 2, cuja atividade é a maior (vide Figura 16). No arranjo de 72 cascos, foi utilizada a mesma configuração usada pela Holtec [13], conforme apresentado na Figura 17.

Os resultados de taxa de dose obtidos pela Holtec com o código MCNP5 para esses arranjos de cascos são apresentados nas Tabelas 6, 7 e 10.

Tabela 10: Taxa de dose total em função da distância para Arranjos de 15 e 72 Cascos.

[13]

Distância (m)	Taxa de Dose Total ($\mu\text{Sv/h}$)	
	15 Cascos	72 Cascos
10	5,66E+00	4,35E+00
15	3,66E+00	3,05E+00
20	2,39E+00	2,26E+00
25	1,73E+00	1,76E+00
50	5,98E-01	6,86E-01
75	2,61E-01	3,25E-01
100	1,33E-01	1,75E-01
150	4,45E-02	6,23E-02
200	1,88E-02	2,74E-02
250	9,24E-03	1,36E-02
300	4,62E-03	6,97E-03
350	2,58E-03	3,93E-03
400	1,50E-03	2,30E-03
450	9,01E-04	1,41E-03
500	5,72E-04	8,91E-04
600	2,26E-04	3,58E-04
700	1,05E-04	1,69E-04
800	5,29E-05	8,49E-05
900	2,78E-05	4,47E-05
1000	1,51E-05	2,47E-05

Os fatores de correção para o código QAD-CGGP são obtidos pela razão entre as taxas de dose calculadas com o código MCNP5 e as calculadas com o código QAD-CGGP, que serão apresentadas na Seção 5.

5. Apresentação e Análise dos Resultados

Utilizando as informações fornecidas na Seção 4, juntamente com os dados da Tabela 11 [13], obtêm-se os valores de taxa de dose no entorno da instalação UAS para os arranjos de 1 (para Angra 1 e Angra 2), 15 e 72 cascos, calculados com o uso do código QAD-CGGP, que são apresentados nas Tabelas 12, 13, 14 e 15, respectivamente.

Tabela 11: Fatores de conversão Fluxo-Dose em função da energia do fóton. [13]

Energia do fóton (MeV)	(mSv/h)/ (photon/cm ² -s)
0,4	8,57E-06
0,5	1,06E-05
0,6	1,24E-05
0,8	1,58E-05
1,0	1,87E-05
1,5	2,48E-05
2,0	3,10E-05
3,0	4,00E-05

Tabela 12: Taxas de dose como função da distância para um único Casco HI-STORM FW carregado com os ECIs pertencentes à Usina Angra 1, calculadas com o código QAD-CGGP.

Distância	Nêutrons	Gama do ⁶⁰ Co	Gama do Combustível	Gama da Captura (n,γ)	Gama do BPRa	Taxa de Dose Total
(m)	(μSv/h)	(μSv/h)	(μSv/h)	(μSv/h)	(μSv/h)	(μSv/h)
10	8,26E-02	7,11E-02	5,07E-01	2,69E-02	1,67E-02	7,04E-01
25	1,93E-02	1,70E-02	1,01E-01	5,44E-03	7,82E-03	1,51E-01
50	5,67E-03	6,49E-03	2,70E-02	1,35E-03	5,26E-03	4,58E-02
75	2,47E-03	3,33E-03	1,22E-02	6,25E-04	2,98E-03	2,16E-02
100	1,46E-03	1,90E-03	6,95E-03	3,78E-04	1,71E-03	1,24E-02
150	7,72E-04	8,00E-04	3,12E-03	2,18E-04	6,69E-04	5,58E-03
200	4,54E-04	3,77E-04	1,76E-03	1,41E-04	2,88E-04	3,02E-03
250	3,28E-04	2,41E-04	1,13E-03	1,14E-04	1,74E-04	1,99E-03
300	2,52E-04	1,56E-04	7,87E-04	9,39E-05	1,02E-04	1,39E-03
350	1,95E-04	1,07E-04	5,79E-04	8,03E-05	6,73E-05	1,03E-03
400	1,56E-04	7,90E-05	4,44E-04	7,28E-05	4,63E-05	7,98E-04
450	1,34E-04	6,17E-05	3,51E-04	6,71E-05	3,38E-05	6,47E-04
500	1,18E-04	4,90E-05	2,84E-04	6,66E-05	2,54E-05	5,44E-04
600	9,99E-05	3,25E-05	1,98E-04	7,36E-05	1,36E-05	4,17E-04
700	7,84E-05	2,28E-05	1,45E-04	8,14E-05	8,37E-06	3,36E-04
800	7,13E-05	1,78E-05	1,11E-04	8,91E-05	1,48E-06	2,91E-04
900	5,87E-05	2,67E-06	8,80E-05	9,87E-05	2,67E-07	2,48E-04
1000	4,75E-05	4,75E-07	7,13E-05	1,14E-04	4,75E-08	2,33E-04

Tabela 13: Taxas de dose como função da distância para um único Casco HI-STORM FW carregado com os ECIs pertencentes à Usina Angra 2, calculadas com o código QAD-CGGP.

Distância	Nêutrons	Gama do ^{60}Co	Gama do Combustível	Gama da Captura (n, γ)	Gama do BPRA	Taxa de Dose Total
(m)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)
10	4,68E-01	1,14E-01	7,96E-01	1,52E-01	1,85E-02	1,55E+00
25	1,09E-01	2,71E-02	1,59E-01	3,07E-02	8,65E-03	3,34E-01
50	3,18E-02	1,04E-02	4,24E-02	7,58E-03	5,80E-03	9,79E-02
75	1,37E-02	5,28E-03	1,92E-02	3,49E-03	3,27E-03	4,50E-02
100	8,21E-03	3,03E-03	1,09E-02	2,12E-03	1,87E-03	2,62E-02
150	4,31E-03	1,28E-03	4,90E-03	1,21E-03	7,36E-04	1,24E-02
200	2,58E-03	6,07E-04	2,77E-03	8,01E-04	3,21E-04	7,07E-03
250	1,86E-03	3,87E-04	1,78E-03	6,46E-04	1,93E-04	4,86E-03
300	1,44E-03	2,51E-04	1,24E-03	5,33E-04	1,13E-04	3,57E-03
350	1,12E-03	1,74E-04	9,09E-04	4,60E-04	7,56E-05	2,74E-03
400	8,94E-04	1,28E-04	6,97E-04	4,18E-04	5,22E-05	2,19E-03
450	7,64E-04	9,99E-05	5,51E-04	3,84E-04	3,79E-05	1,84E-03
500	6,78E-04	7,97E-05	4,47E-04	3,83E-04	2,86E-05	1,62E-03
600	5,71E-04	5,30E-05	3,10E-04	4,19E-04	1,52E-05	1,37E-03
700	4,50E-04	3,83E-05	2,28E-04	4,62E-04	9,37E-06	1,19E-03
800	4,00E-04	2,94E-05	1,75E-04	4,95E-04	1,63E-06	1,10E-03
900	3,28E-04	2,88E-06	1,38E-04	5,44E-04	2,88E-07	1,01E-03
1000	2,75E-04	5,09E-07	1,12E-04	6,16E-04	5,09E-08	1,00E-03

Tabela 14: Taxas de dose como função da distância para o arranjo de 15 Cascos HI-STORM FW carregados, calculadas com o código QAD-CGGP.

Distância	Nêutrons	Gama do ^{60}Co	Gama do Combustível	Gama da Captura (n, γ)	Gama do BPR	Taxa de Dose Total
(m)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)
10	1,86E+00	4,87E-01	3,40E+00	6,07E-01	8,22E-02	6,44E+00
25	6,26E-01	1,65E-01	9,67E-01	1,77E-01	5,43E-02	1,99E+00
50	1,93E-01	6,28E-02	2,57E-01	4,59E-02	3,52E-02	5,94E-01
75	8,34E-02	3,21E-02	1,17E-01	2,12E-02	1,99E-02	2,73E-01
100	5,03E-02	1,86E-02	6,69E-02	1,30E-02	1,15E-02	1,60E-01
150	2,66E-02	7,87E-03	3,02E-02	7,49E-03	4,54E-03	7,67E-02
200	1,59E-02	3,75E-03	1,71E-02	4,95E-03	1,99E-03	4,37E-02
250	1,15E-02	2,39E-03	1,10E-02	4,00E-03	1,19E-03	3,01E-02
300	8,89E-03	1,56E-03	7,66E-03	3,30E-03	7,02E-04	2,21E-02
350	6,93E-03	1,08E-03	5,63E-03	2,85E-03	4,68E-04	1,70E-02
400	5,54E-03	7,96E-04	4,32E-03	2,59E-03	3,23E-04	1,36E-02
450	4,74E-03	6,19E-04	3,42E-03	2,38E-03	2,35E-04	1,14E-02
500	4,20E-03	4,94E-04	2,77E-03	2,37E-03	1,77E-04	1,00E-02
600	3,54E-03	3,28E-04	1,92E-03	2,60E-03	9,42E-05	8,49E-03
700	2,79E-03	2,38E-04	1,42E-03	2,87E-03	5,81E-05	7,37E-03
800	2,48E-03	1,82E-04	1,08E-03	3,07E-03	1,01E-05	6,83E-03
900	2,04E-03	1,79E-05	8,57E-04	3,37E-03	1,79E-06	6,29E-03
1000	1,70E-03	3,16E-06	6,94E-04	3,82E-03	3,16E-07	6,22E-03

Tabela 15: Taxas de dose como função da distância para o arranjo de 72 Cascos HI-STORM FW carregados, calculadas com o código QAD-CGGP.

Distância	Nêutrons	Gama do ^{60}Co	Gama do Combustível	Gama da Captura (n, γ)	Gama do BPRÁ	Taxa de Dose Total
(m)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)
10	3,72E-01	3,19E-01	2,28E+00	1,21E-01	7,49E-02	3,16E+00
25	1,56E-01	1,24E-01	7,41E-01	4,40E-02	5,66E-02	1,12E+00
50	5,02E-02	4,93E-02	2,05E-01	1,19E-02	3,92E-02	3,55E-01
75	1,71E-02	2,28E-02	8,39E-02	4,33E-03	2,04E-02	1,48E-01
100	1,01E-02	1,31E-02	4,78E-02	2,60E-03	1,17E-02	8,53E-02
150	5,35E-03	5,55E-03	2,16E-02	1,51E-03	4,64E-03	3,86E-02
200	3,16E-03	2,62E-03	1,23E-02	9,80E-04	2,00E-03	2,10E-02
250	2,29E-03	1,68E-03	7,87E-03	7,96E-04	1,21E-03	1,38E-02
300	1,76E-03	1,09E-03	5,48E-03	6,54E-04	7,07E-04	9,69E-03
350	1,36E-03	7,46E-04	4,04E-03	5,59E-04	4,69E-04	7,17E-03
400	1,09E-03	5,51E-04	3,09E-03	5,07E-04	3,23E-04	5,56E-03
450	9,34E-04	4,30E-04	2,45E-03	4,68E-04	2,36E-04	4,51E-03
500	8,25E-04	3,41E-04	1,98E-03	4,65E-04	1,77E-04	3,79E-03
600	6,97E-04	2,26E-04	1,38E-03	5,13E-04	9,46E-05	2,91E-03
700	5,47E-04	1,59E-04	1,01E-03	5,68E-04	5,84E-05	2,35E-03
800	4,97E-04	1,24E-04	7,77E-04	6,21E-04	1,04E-05	2,03E-03
900	4,09E-04	1,86E-05	6,14E-04	6,88E-04	1,86E-06	1,73E-03
1000	3,32E-04	3,32E-06	4,98E-04	7,96E-04	3,32E-07	1,63E-03

Os valores de taxa de dose apresentados nas Tabelas 12, 13, 14, e 15 são mostrados em forma de gráfico na Figura 18.

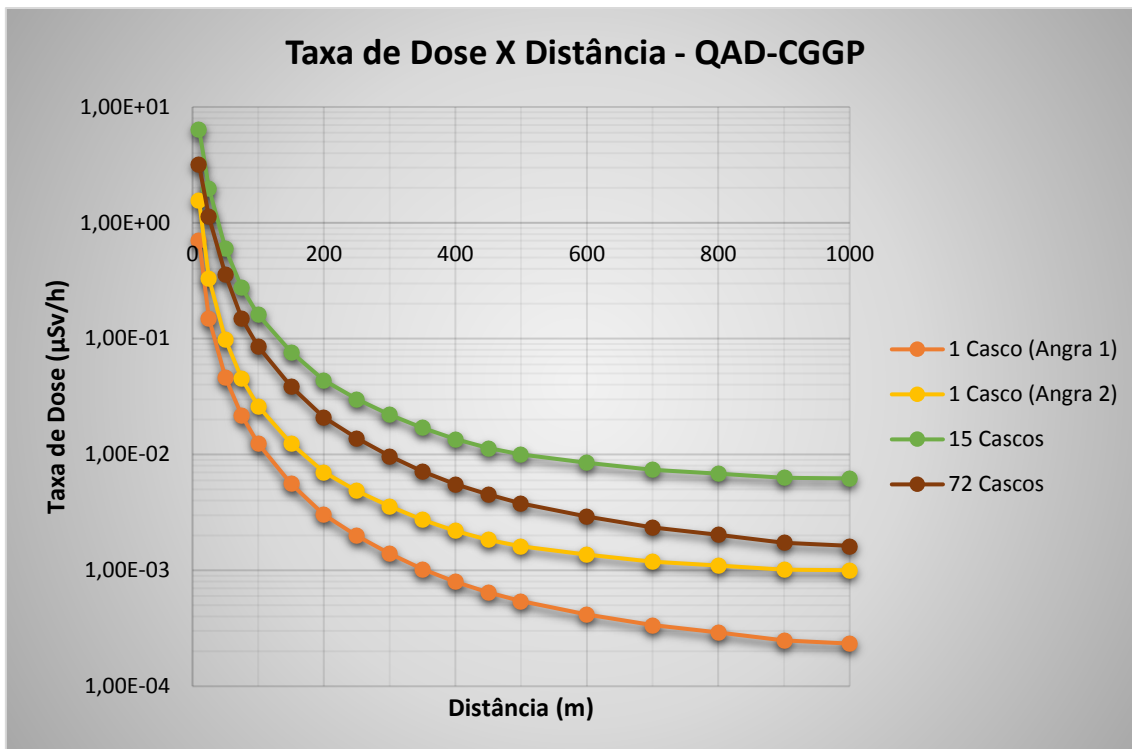


Figura 18: Gráfico dos valores de taxa de dose em função da distância para arranjos de 1 (de Angra 1 e 2), 15 e 72, obtidos com o código QAD-CGGP.

Observa-se, com auxílio da Figura 18, que os maiores valores de taxa de dose foram obtidos para os arranjos de cascos com 15, 72 e 1 (Angra 2 e Angra 1), nesta ordem. Nota-se que o arranjo de 15 cascos gerou valores de taxa de dose superiores aos do arranjo de 72 cascos. Este fato pode ser atribuído às estratégias de armazenamento apresentadas nas Figuras 16 e 17, evidenciando, na primeira fileira do arranjo de 15 cascos, a presença destes carregados com ECIs de Angra 2, que possuem maior atividade. Enquanto que no arranjo de 72 cascos estas posições são preenchidas com cascos contendo ECIs de Angra 1.

Os resultados do estudo similar realizado pela Holtec, apresentados nas Tabelas 6, 7 e 10, são mostrados na forma de gráfico na Figura 19.

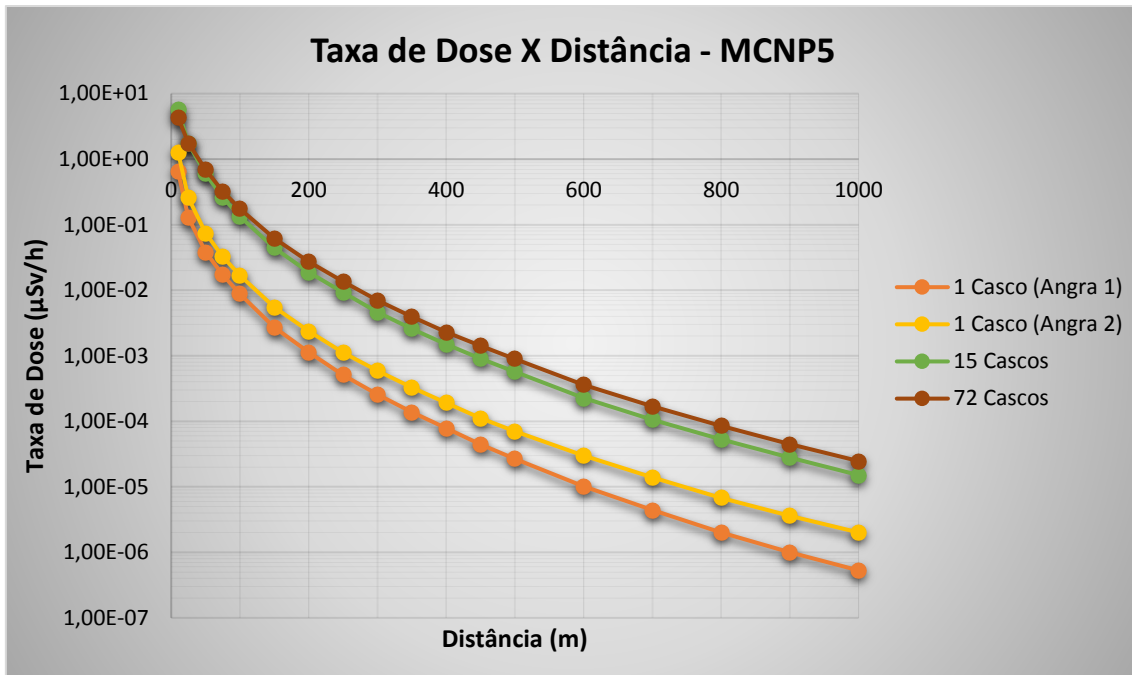


Figura 19: Gráfico dos valores de taxa de dose em função da distância para arranjos de 1 (de Angra 1 e 2), 15 e 72, obtidos com o código MCNP5 pela Holtec.

De maneira similar ao que ocorreu com o uso do código QAD-CGGP, observa-se, com auxílio da Figura 19, que os valores de taxa de dose no entorno de 1 casco carregado com ECIs de Angra 2 são sempre superiores aos valores produzidos por 1 casco com ECIs de Angra 1. Este resultado pode ser atribuído ao fato de que os ECIs de Angra 2 possuem maior atividade do que os de Angra 1.

Analisando os valores de taxa de dose para os arranjos de 15 e 72 cascos (vide Figuras 19 e 20), observa-se que esses valores são maiores para o arranjo de 15 cascos até uma distância inferior a 25 metros do arranjo. Este comportamento é atribuído à utilização de cascos carregados com ECIs de maior atividade neste arranjo, por possuírem menor tempo de decaimento (10 anos) [13]. É importante frisar que, na periferia do arranjo de 72 cascos, foram utilizados ECIs com maior tempo de decaimento (25-30 anos) [13], conseqüentemente com menor atividade.

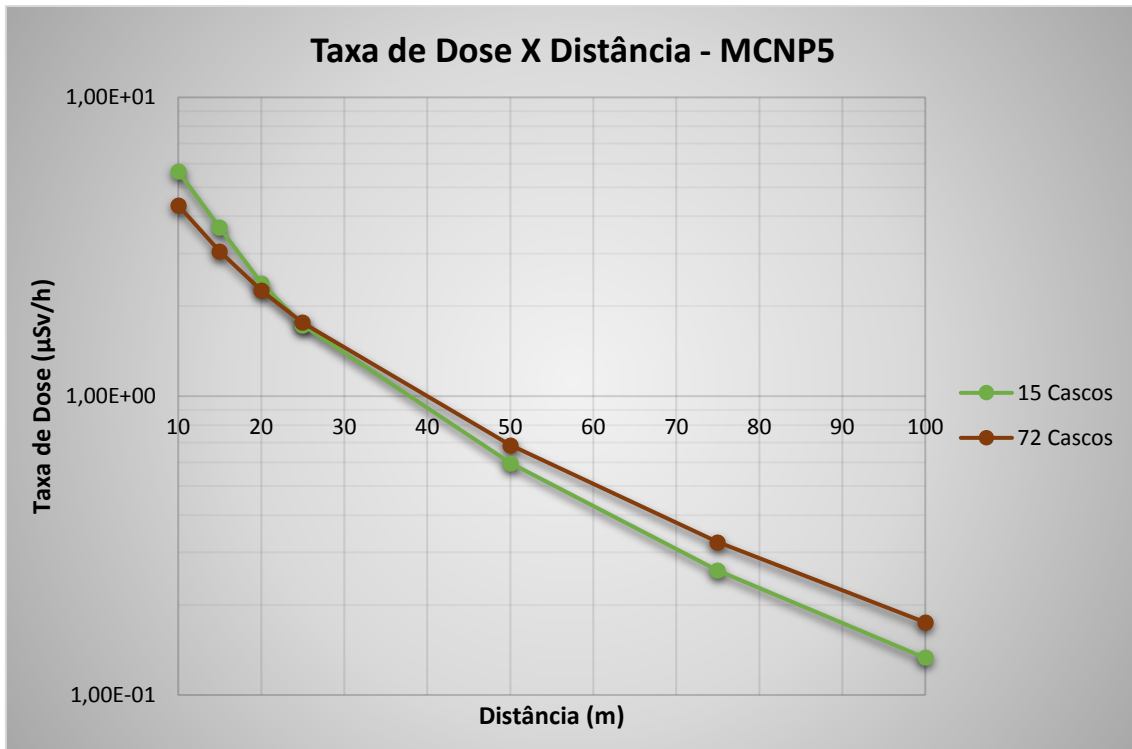


Figura 20: Gráfico dos valores de taxa de dose em função da distância para arranjos de 15 e 72, obtidos com o código MCNP5 pela Holtec para até 100 metros.

O comportamento mencionado anteriormente se altera à medida que o detector se afasta dos cascos, ou seja, o arranjo de 72 cascos começa a apresentar valores de taxa de dose superiores aos gerados pelo arranjo de 15, a partir de uma determinada distância. Este fato ocorre porque, a curtas distâncias do arranjo de cascos, os valores de taxa de dose são influenciados majoritariamente pela primeira fileira, que, além disso, funciona como blindagem para a radiação direta e refletida oriunda dos demais cascos. Porém, à medida que a referida distância é incrementada, aumenta-se a contribuição da radiação refletida no valor da taxa de dose, que para o caso do arranjo de 72 cascos é bem maior do que para o arranjo de 15, por possuir um maior número de cascos. Este efeito pode ser constatado com a utilização de um código que utiliza a teoria de transporte, como é o caso do MCNP5 (vide Figuras 19 e 20). Isto não ocorre com o uso do código QAD-CGGP que utiliza o método de *Point Kernel* (vide Figura 18).

Comparações entre os valores de taxa de dose obtidos com os códigos MCPNP5 e QAD-CGGP para os arranjos de 1 (Angra 1 e 2), 15 e 72 cascos são apresentadas nas Figuras 21, 22, 23 e 24, respectivamente.

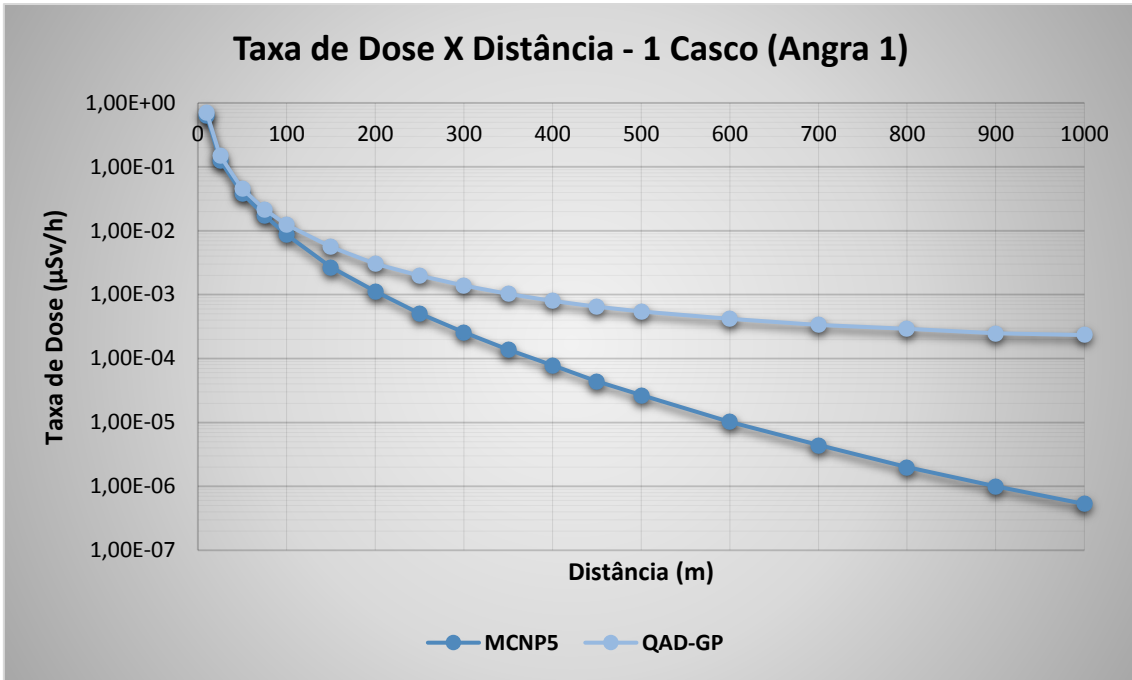


Figura 21: Gráfico dos valores de taxa de dose em função da distância para o arranjo com 1 casco (Angra 1), comparando os valores obtidos com o código MCNP5 pela Holtec e com o código QAD-CGPP.

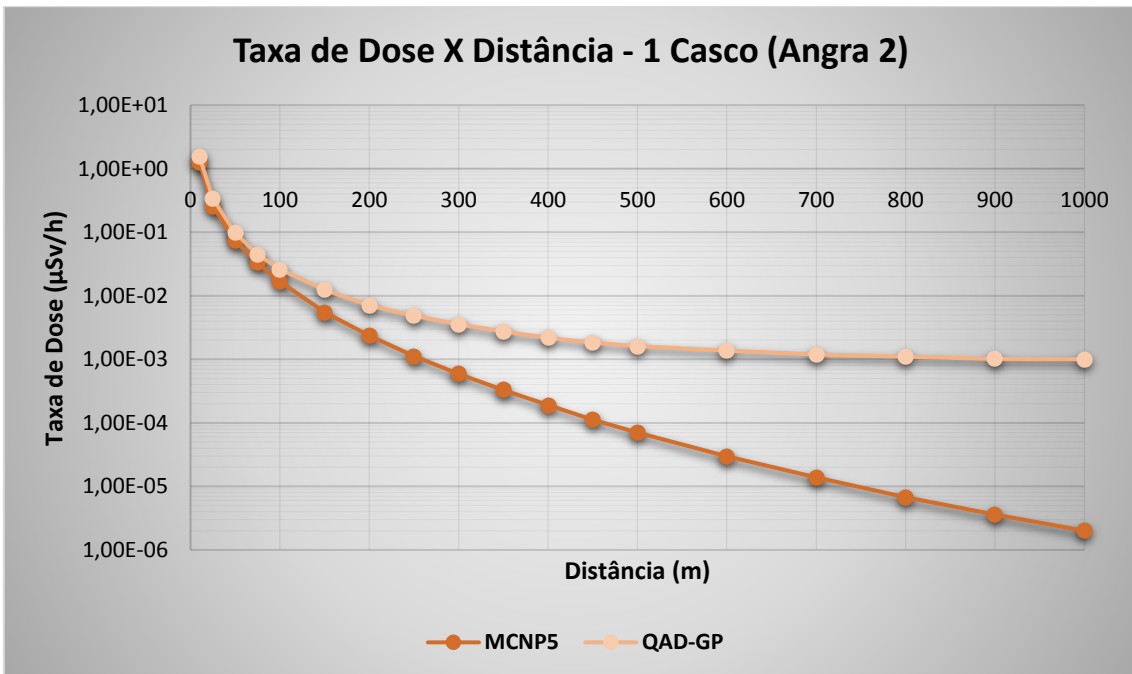


Figura 22: Gráfico dos valores de taxa de dose em função da distância para o arranjo com 1 casco (Angra 2), comparando os valores obtidos com o código MCNP5 pela Holtec e com o código QAD-CGPP.

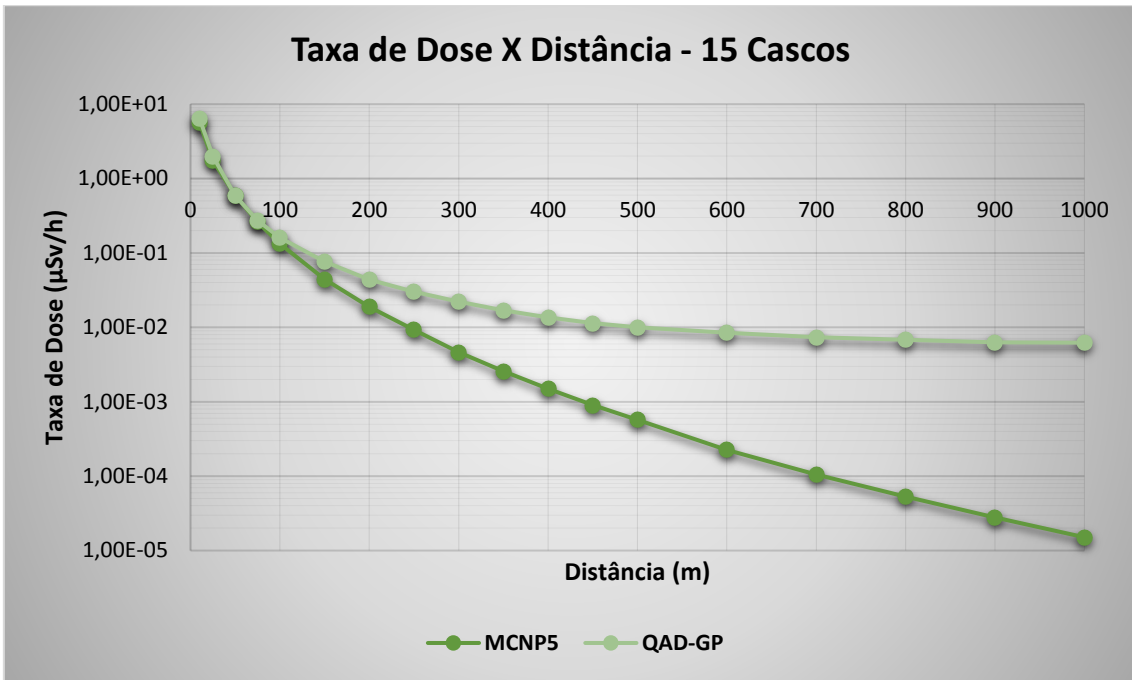


Figura 23: Gráfico dos valores de taxa de dose em função da distância para o arranjo de 15 cascos, comparando os valores obtidos com o código MCNP5 pela Holtec e com o código QAD-CGPP.

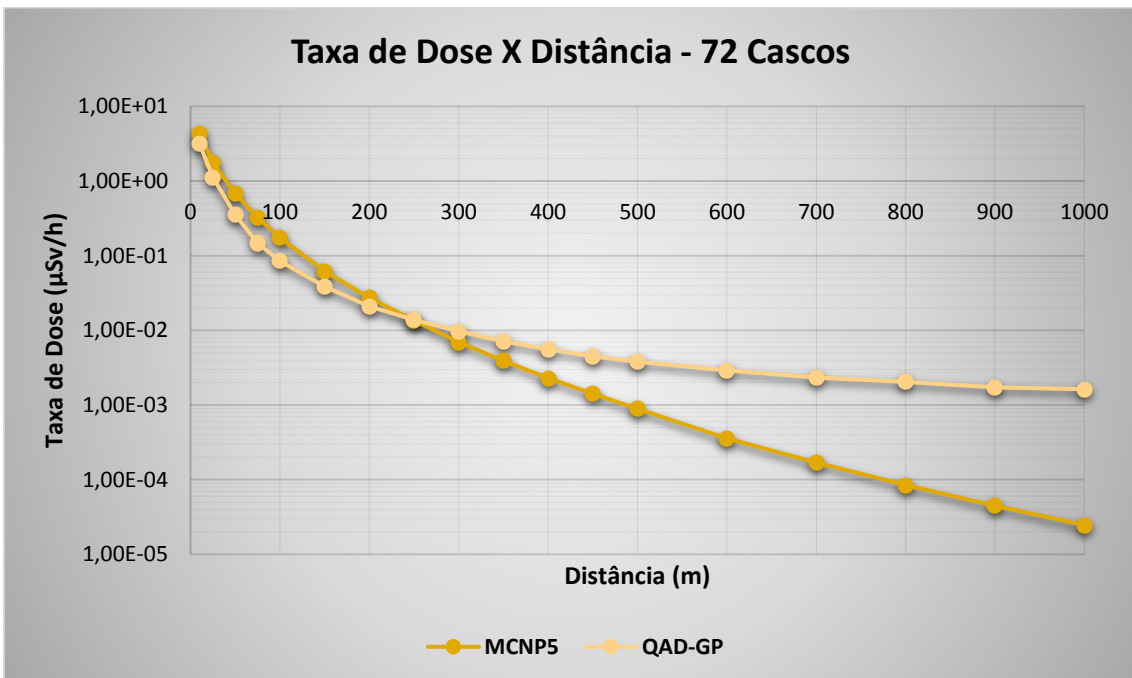


Figura 24: Gráfico dos valores de taxa de dose em função da distância para o arranjo de 72 cascos, comparando os valores obtidos com o código MCNP5 pela Holtec e com o código QAD-CGPP.

Quando se utiliza apenas 1 casco, os efeitos da reflexão da radiação não têm grande impacto no valor da taxa de dose. Isto pode ser confirmado com o auxílio das Figuras 21 e 22. Adicionalmente, observa-se que o código QAD-CGGP é sempre mais conservador do que o código MCNP5 para o caso de 1 casco (Angra 1 e 2). Nota-se, também, que os valores de taxa de dose obtidos com o código QAD-CGGP se aproximam dos valores obtidos com o MCNP5 para pequenas distâncias em relação ao casco e se afastam progressivamente à medida em que essa distância é incrementada. Este efeito pode ser atribuído ao fato de que o QAD-CGGP utiliza, na posição do detector, o valor do fator de *build up* da última blindagem radiológica, que neste caso é o concreto. Assim, para distâncias do detector próximas ao arranjo de cascos (próximo à blindagem), o valor do fator de *build up* utilizado é mais apropriado, produzindo melhores resultados de taxa de dose. Consequentemente, em posições mais afastadas da blindagem radiológica, onde a região é composta por ar, é provocado um acréscimo substancial e gradativo na diferença entre os valores de taxa de dose obtidos pelos referidos códigos.

O efeito de reflexão da radiação já começa a ser percebido na determinação da taxa de dose para um arranjo com 15 cascos com a utilização do código MCNP5. Embora não possa ser vista no gráfico da Figura 23, uma evidência desse fenômeno é apresentada nas Tabelas 10 e 14 para uma distância igual a 50 m, cujo valor de taxa de dose obtido com o código MCNP5 é 0,7% maior do que o valor obtido com o QAD-CGGP para a mesma distância. Este comportamento não seria o esperado, já que o código QAD-CGGP é mais conservador que MCNP5 para a radiação direta, porém, com o acréscimo do número de cascos, ocorre uma maior influência do efeito de reflexão da radiação no valor da taxa de dose.

No arranjo de 72 cascos, o efeito de reflexão da radiação se torna mais intenso, como mencionado anteriormente, e os valores de taxa de dose determinados com o código MCNP5 são superiores aos obtidos com o QAD-CGGP para distâncias inferiores a aproximadamente 250 metros, conforme mostrado na Figura 24 e nas Tabelas 10 e 15. Para distâncias a partir de 250 metros (aproximadamente), os valores de taxa de dose obtidos com o código QAD-CGGP superam os valores obtidos com o MCNP5, isto ocorre porque o efeito causado pelo fator de *build up*, já mencionado anteriormente, tem

uma maior influência sobre o valor de taxa de dose para maiores distâncias, comparado com o efeito da reflexão que passa a ser menor com o acréscimo da distância.

Conforme mencionado anteriormente, o objetivo deste trabalho é determinar fatores de correção para o código QAD-CGGP com o auxílio do código MCNP5 para a determinação da taxa de dose no entorno da instalação UAS, devido à radiação proveniente dos cascos de armazenamento desta unidade. Estes fatores corrigem os valores de taxa de dose obtidos com o código QAD-CGGP para que se aproximem dos resultados calculados com o código MCNP5. Os valores determinados para este fator de correção são apresentados na Tabela 16 e no gráfico da Figura 25 para os arranjos de 1 (Angra 1 e 2), 15 e 72 cascos em função da distância entre a fonte e o detector.

Tabela 16: Valores do Fator de Correção para o código QAD-CGGP em função da distância para os arranjos de 1 (Angra1 e 2), 15 e 72 cascos.

Distância (m)	Fator de Correção			
	Angra 1	Angra 2	15 Cascos	72 cascos
10	0,911	0,820	0,879	1,375
25	0,849	0,768	0,870	1,569
50	0,838	0,760	1,007	1,932
75	0,799	0,729	0,955	2,189
100	0,704	0,640	0,830	2,053
150	0,487	0,443	0,580	1,612
200	0,374	0,336	0,430	1,304
250	0,256	0,231	0,307	0,983
300	0,184	0,165	0,209	0,719
350	0,135	0,120	0,152	0,548
400	0,098	0,087	0,111	0,414
450	0,068	0,061	0,079	0,312
500	0,049	0,044	0,057	0,235
600	0,024	0,022	0,027	0,123
700	0,013	0,012	0,014	0,072
800	0,007	0,006	0,008	0,042
900	0,004	0,004	0,004	0,026
1000	0,002	0,002	0,002	0,015

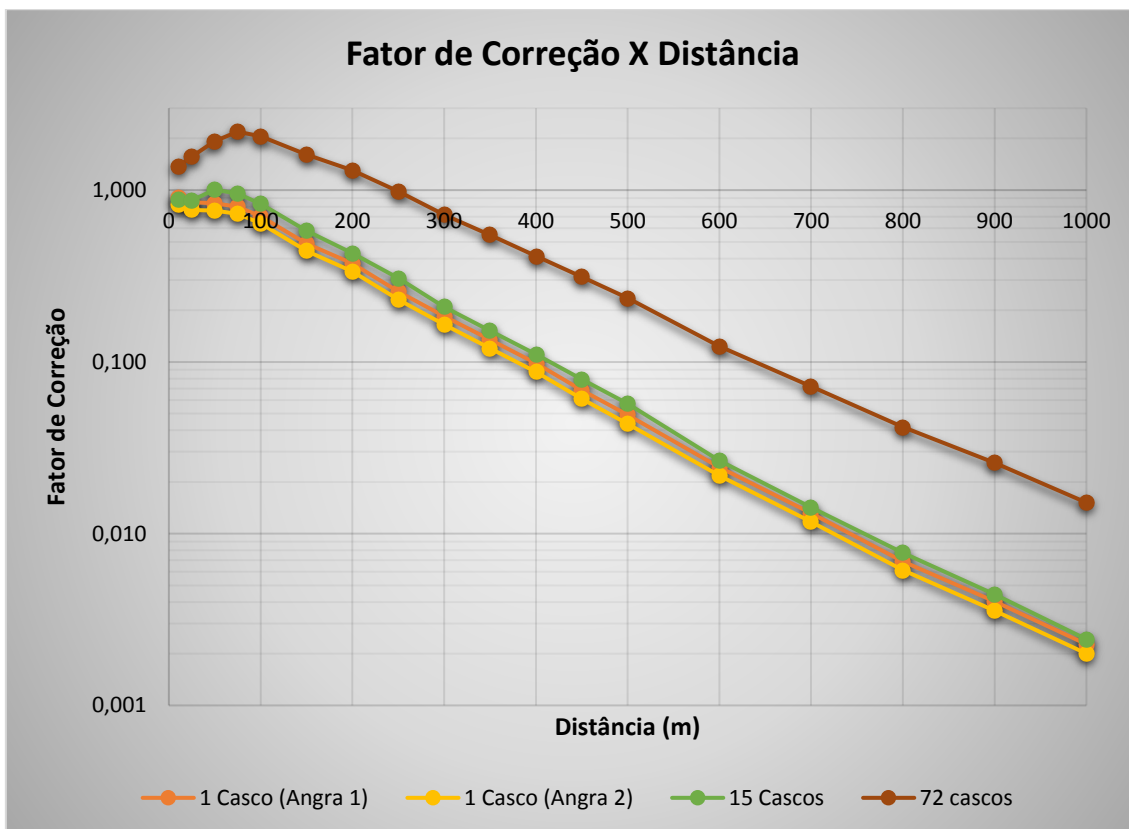


Figura 25: Gráfico dos valores do Fator de Correção para o código QAD-CGGP em função da distância para os arranjos de 1 (Angra1 e 2), 15 e 72 cascos.

Com os valores do fator de correção obtidos para os referidos arranjos de cascos, são determinadas curvas para esses fatores em função do número de cascos para cada distância entre a fonte e o detector, conforme mostrado na Figura 26. As curvas que melhor se ajustam aos referidos pontos são as determinadas por interpolação polinomial de ordem 2. Com isso, é possível obter fatores de correção para o QAD-CGGP para números intermediários de cascos (entre 1 e 72). As correlações que representam esses fatores são apresentadas na Tabela 17. É importante realçar que nesta tabela as letras y e x representam o fator de correção para o QAD-CGGP e o número de cascos, respectivamente.

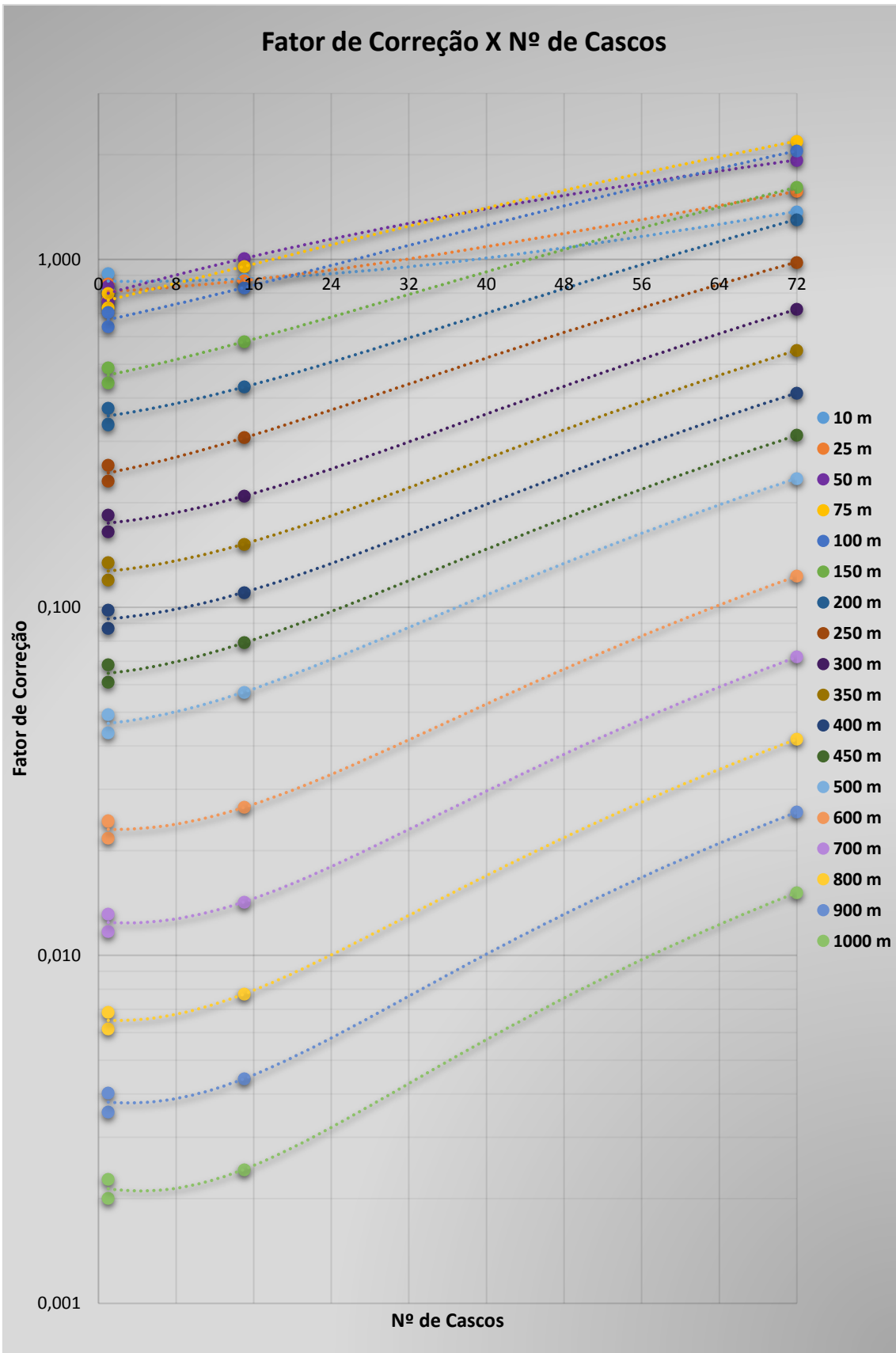


Figura 26: Gráfico dos valores do Fator de Correção para o QAD-CGGP em função do número de cascos para cada distância

Tabela 17: Correlações do fator de correção para o QAD-CGGP, em função da distância entre o arranjo de cascos e o detector.

Distância (m)	Correlação
10	$y = 1E-04x^2 - 0,0008x + 0,8664$
25	$y = 1E-04x^2 + 0,0026x + 0,8058$
50	$y = 2E-05x^2 + 0,0145x + 0,7843$
75	$y = 1E-04x^2 + 0,0119x + 0,7516$
100	$y = 1E-04x^2 + 0,009x + 0,6629$
150	$y = 1E-04x^2 + 0,006x + 0,4591$
200	$y = 1E-04x^2 + 0,0031x + 0,352$
250	$y = 1E-04x^2 + 0,0029x + 0,2406$
300	$y = 9E-05x^2 + 0,001x + 0,1735$
350	$y = 7E-05x^2 + 0,0006x + 0,1265$
400	$y = 6E-05x^2 + 0,0004x + 0,0923$
450	$y = 4E-05x^2 + 0,0003x + 0,0643$
500	$y = 3E-05x^2 + 0,0002x + 0,0462$
600	$y = 2E-05x^2 - 7E-05x + 0,0231$
700	$y = 1E-05x^2 - 7E-05x + 0,0125$
800	$y = 7E-06x^2 - 3E-05x + 0,0065$
900	$y = 5E-06x^2 - 3E-05x + 0,0038$
1000	$y = 3E-06x^2 - 2E-05x + 0,0022$

Um exemplo de aplicação da metodologia desenvolvida neste trabalho é apresentado na Seção 6.

6. Aplicação da Metodologia Desenvolvida

Caso fosse necessário determinar a taxa de dose a 50 metros de um arranjo de 45 cascos carregados com ECIs, segundo a configuração adotada para a instalação UAS e apresentada na Figura 17, devem-se realizar os seguintes passos.

Primeiramente, calcula-se, com o código QAD-CGGP, o valor da taxa de dose dos raios gama provenientes do combustível para cada um dos 45 cascos a uma distância entre o arranjo e o detector igual a 50 metros. O valor desta taxa de dose encontrado para os 45 cascos somados é igual a $2,05E-01 \mu\text{Sv/h}$. E, com isso, usando as funções de proporcionalidade presentes nas Tabelas 8 e 9, são determinadas as contribuições de taxa de dose resultantes das radiações devido a nêutrons e aos raios gama provenientes do ^{60}Co , os produzidos na captura neutrônica e os gerados pelo veneno queimável (BPRA), para cada casco. Os resultados são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: Taxas de dose para o arranjo de 45 Cascos HI-STORM FW carregados, a uma distância igual a 50 metros, calculadas com o uso do código QAD-CGGP.

Distância	Nêutrons	Gama do ^{60}Co	Gama do Combustível	Gama da Captura (n, γ)	Gama do BPRA	Taxa de Dose Total
(m)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)
50	5,02E-02	4,93E-02	2,05E-01	1,19E-02	3,92E-02	3,55E-01

Observa-se, com o auxílio da Tabela 18, que o valor da taxa de dose total atribuída ao QAD-CGGP é igual a $3,55E-01 \mu\text{Sv/h}$.

Os valores do fator de correção para o QAD-CGGP podem ser obtidos utilizando as correlações apresentadas na Tabela 17. Assim, para uma distância igual a 50 metros de um arranjo de 45 cascos, obtém-se um valor igual a 1,477 para este fator. Logo, multiplicando este valor pela taxa de dose atribuída ao QAD-CGGP, conclui-se que o valor corrigido da taxa de dose é igual a $5,25E-01 \mu\text{Sv/h}$.

O valor encontrado é compatível com o resultado apresentado em [13] para uma distância igual a 50 metros de um arranjo de 72 cascos, cujo valor encontrado pela Holtec para a taxa de dose é igual a $6,86E-01 \mu\text{Sv/h}$.

7. Conclusões e Sugestões

O principal objetivo deste trabalho foi a determinação de fatores de correção para o código QAD-CGGP, usando como base os resultados de taxa de dose apresentados pela Holtec no projeto da instalação UAS, obtidos com a utilização do código MCNP5.

Para alcançar esta meta, foi desenvolvida a metodologia apresentada na Seção 4, a qual se baseia, inicialmente, na utilização do código QAD-CGGP para a determinação da taxa de dose para radiação gama proveniente do combustível.

Posteriormente, foram criadas as funções de proporcionalidade a partir da razão entre as taxas de dose geradas por diversos tipos de radiação e a taxa de dose dos raios gama provenientes do combustível, obtidas pela Holtec com o código MCNP5 para 1 casco carregado com ECIs provenientes de Angra 1 e para outro com ECIs de Angra 2. Os diversos tipos de radiação, mencionados anteriormente, são devido aos nêutrons e aos raios gama provenientes do ^{60}Co , os produzidos na captura neutrônica e os gerados pelo veneno queimável (BPRA).

Estas funções foram utilizadas para determinar as contribuições dessas radiações, tomando-se como base a taxa de dose dos raios gama do combustível, calculada com o código QAD-CGGP. Todas essas contribuições foram utilizadas na determinação de uma taxa de dose total atribuída ao código QAD-CGGP, para os arranjos de 1 (Angra 1 e 2), 15 e 72 cascos.

Com base nos resultados dos valores de taxa de dose calculados com o código QAD-CGGP, apresentados na Seção 5, observa-se que o arranjo de 15 cascos gerou valores de taxa de dose superiores aos do arranjo de 72 cascos (vide Figura 18). Conclui-se que este fato pode ser atribuído às estratégias de armazenamento que utiliza cascos com maior atividade na periferia do arranjo de 15 cascos, ao contrário do que ocorre no arranjo de 72 cascos.

É importante observar que os ECIs de Angra 2 possuem maior atividade que os de Angra 1. Assim, coerentemente, os valores de taxa de dose obtidos com os códigos

QAD-CGGP e MCNP5 para 1 casco carregado com ECIs provenientes de Angra 2 são maiores do que o casco carregado com ECIs de Angra 1 (vide Figuras 18 e 19).

Para o código MCNP5, nas proximidades do arranjo de cascos, a taxa de dose sofre maior influência da atividade dos cascos colocados na periferia do arranjo. Este fato é melhor observado na Figura 20, onde os valores de taxa de dose, para distâncias inferiores a 25 metros, são maiores para o arranjo de 15 cascos. Entretanto, para distâncias superiores, a contribuição da radiação refletida aumenta com o número de cascos do arranjo e, conseqüentemente, o valor da taxa de dose se torna maior para o arranjo de 72 cascos (vide Figuras 19 e 20).

Comparando os resultados dos códigos, conclui-se que a influência da radiação refletida no valor da taxa de dose pode ser desprezada nos arranjos com apenas 1 casco. Nesta condição, o código QAD-CGGP produz resultados conservadores em relação ao MCNP5 (vide Figuras 21 e 22). Observa-se, com o auxílio destas figuras, que os valores de taxa de dose obtidos com o código QAD-CGGP se aproximam dos valores obtidos com o MCNP5 para pequenas distâncias em relação ao casco e se afastam progressivamente à medida que essa distância é incrementada. Este fato ocorre porque o código QAD-CGGP utiliza, na posição do detector, o fator de *build up* da última blindagem (que, no presente caso, é o concreto). Conseqüentemente, em distâncias próximas ao arranjo de cascos (próximo à blindagem), o valor do fator de *build up* utilizado é mais apropriado do que em posições mais afastadas da blindagem radiológica, onde a região é composta por ar.

O efeito da reflexão da radiação é levemente percebido no arranjo de 15 cascos e é mais marcante no arranjo de 72, como é mostrado nas Figuras 23 e 24. Assim, os valores de taxa de dose calculados com o código MCNP5, para uma faixa de distâncias, são maiores que os calculados com o QAD-CGGP. Desta forma, conclui-se que o efeito da reflexão da radiação aumenta com o acréscimo do número de cascos no arranjo. A partir de certa distância, os valores de taxa de dose obtidos com o código QAD-CGGP superam os valores obtidos com o MCNP5, e isto ocorre porque o efeito causado pelo fator de *build up*, já mencionado anteriormente, tem uma maior influência sobre o valor de taxa de dose para maiores distâncias, comparado com o efeito da reflexão que passa a ser menor quando a referida distância é incrementada.

O objetivo deste trabalho foi alcançado com a obtenção dos fatores de correção para o código QAD-CGGP, apresentados na Seção 5, os quais são determinados pela razão entre as taxas de dose calculadas com o código MCNP5 e as atribuídas ao QAD-CGGP.

Uma evidência prática da utilidade do presente trabalho é mostrada na Seção 6, onde foi calculada a taxa de dose a 50 metros de um arranjo de 45 cascos, segundo uma configuração de armazenamento compatível com a apresentada na Figura 17. Utilizando a metodologia apresentada na Seção 4, obtém-se primeiramente, para este arranjo, um valor da taxa de dose total atribuída ao QAD-CGGP igual a $3,55E-01 \mu\text{Sv/h}$. Em sequência, corrige-se este valor de taxa de dose multiplicando-o pelo o fator de correção para o QAD-CGGP, cujo valor é igual a 1,477. Assim, determina-se um valor final igual a $5,25E-01 \mu\text{Sv/h}$ para o problema proposto. Esse resultado é compatível com o valor da taxa de dose igual a $6,86E-01 \mu\text{Sv/h}$ [13] para uma distância igual a 50 metros de um arranjo de 72 cascos.

O estudo realizado neste trabalho teve como foco o cálculo de taxa de dose no entorno da instalação UAS no plano horizontal. A metodologia apresentada pode ser aplicada às instalações vizinhas localizadas no mesmo plano desta unidade, tais como o galpão da CONFAB, o escritório do almoxarifado de Angra 3, o almoxarifado de Angra 3 e o galpão provisório (tenda), como evidenciadas na Figura 27.

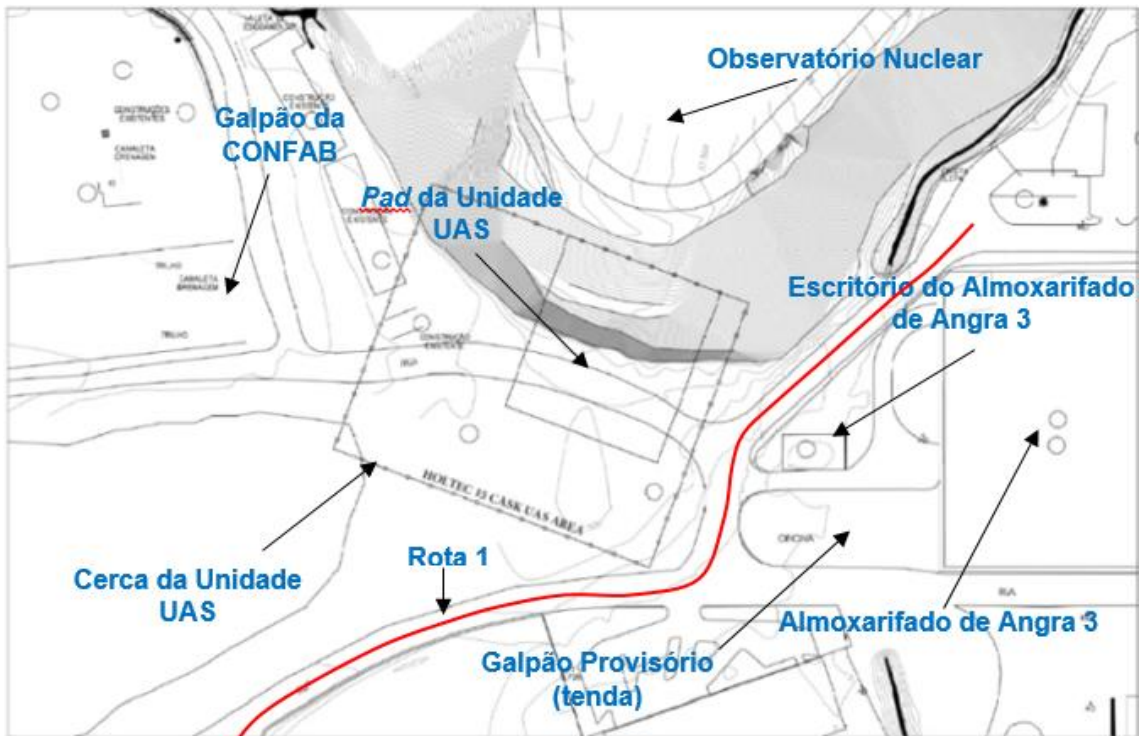


Figura 27: Principais instalações no entorno da UAS. [11]

Entretanto, o Observatório Nuclear da CNAEA (vide Figura 27), uma instalação muito importante que inclusive é aberta à visitação pública, se encontra, aproximadamente, a 30 metros acima do plano da UAS [11] e, portanto, a taxa de dose neste local não pode ser determinada com os fatores de correção, obtidos neste trabalho, para o código QAD-CGGP.

Sugere-se, como trabalho futuro, a determinação de novos fatores de correção para o QAD-CGGP para a aplicação da metodologia no cálculo da taxa de dose no Observatório Nuclear.

Referências

- [1] ELETRONUCLEAR, Relatório Ambiental Simplificado (RAS) da Unidade de Armazenamento Complementar a Seco de Elementos Combustíveis Irradiados da CNAAA (UAS), Rev. 1, Rio de Janeiro, Brasil, 2017.
- [2] CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear, Quem Somos, Disponível em <<http://www.cnen.gov.br/quem-somos>>. Acesso em 02/08/2019, 09:28:15.
- [3] ELETRONUCLEAR, Relatório do Local da Unidade de Armazenamento Complementar a Seco de Elementos Combustíveis Irradiados da CNAAA (UAS), Rio de Janeiro, Brasil, 2017.
- [4] ELETRONUCLEAR, Relatório Preliminar de Análise de Segurança (RPAS) da Unidade de Armazenamento Complementar a Seco de Elementos Combustíveis Irradiados da CNAAA (UAS), Capítulo 1, Rev. 1, Rio de Janeiro, Brasil, 2019.
- [5] Los Alamos National Laboratory, MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, USA, 2008.
- [6] TERRY, QAD-CG Description and Use (incl. of auxiliary program PICTURE), KWU Technical Report, R361, Erlangen, Germany, 1982.
- [7] Prokhorets I.M., Prokhorets S.I., Khazhmuradov M.A., Rudychev E.V., Fedorchenko D.V., Point-kernel Method for Radiation Fields Simulation, National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology", 61108, Kharkov, Ukraine, 2007.
- [8] Norma CNEN-NN-3.01, Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- [9] NEA – Nuclear Energy Agency, CCC-0493 QAD-CGGP, Disponível em <<http://www.oecd-nea.org/tools/abstract/detail/CCC-0493/>>. Acesso em 15/05/2019, 08:52:20.
- [10] LINS BRAGA, K., Estudo, Utilizando o Código MCNPX, da Radiação Espalhada e Produzida pelas Paredes de Salas de Radioterapia e seus Efeitos sobre Doses Equivalentes, Doses Efetivas e Fatores de Risco para Carcinogênese Radioinduzida nos Pacientes, Dissertação de Mestrado do Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, Brasil, 2016.

- [11] FRUTUOSO E MELO, P.F., Levantamento do Número de Pessoas, Frequência e Duração de Circulação e Análise Radiológica entorno da Unidade de Armazenamento Complementar a Seco para Elementos Combustíveis Irradiados da CNAAA, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2018.
- [12] ELETRONUCLEAR, Relatório Preliminar de Análise de Segurança (RPAS) da Unidade de Armazenamento Complementar a Seco de Elementos Combustíveis Irradiados da CNAAA (UAS), Capítulo 5, Rev. 1, Rio de Janeiro, Brasil, 2019.
- [13] ELETRONUCLEAR, Relatório Preliminar de Análise de Segurança (RPAS) da Unidade de Armazenamento Complementar a Seco de Elementos Combustíveis Irradiados da CNAAA (UAS), Capítulo 7, Rev. 1, Rio de Janeiro, Brasil, 2019.

Apêndice A – Entrada do código QAD-CGGP para um casco carregado com ECIs de Angra 1, $E_m = 0,575$ MeV.

40 GWD/MTU, 10-Year Cooling, 0.575 MeV															
24	24	25	17	4	9	1	0	0	2	1	0	600	2100	600	0

A primeira linha é o título do problema. Os três números seguintes são o número de incrementos de divisão ao longo do eixo de um cilindro circular (RCC) que especificam a divisão do volume da fonte. Dezessete é o número de elementos químicos usados neste problema. Quatro é o número de composição do material. Nove é apenas um número positivo qualquer. 1 é o número de grupos de energia de raios gama. O primeiro zero é para indicação de que a translação da fonte não é empregada e a segundo é para a geometria da fonte, ou seja, o cilindro circular direito (RCC). Dois é para indicar a região de origem mais provável, isto é, na seção de geometria, a fonte está contida no RCC que é o corpo número 2. Um é para indicação de que a fonte distribuída por cosseno é usada. O zero é para indicação de que o cálculo de fótons será feito. Os três números seguintes são relacionados a impressão dos dados. E o último zero é para indicar que não haverá efeito no número de cálculos adicionais a serem feitos.

7.104+16	0	0	0	0	0	0
----------	---	---	---	---	---	---

7.104E + 16 é a magnitude total da fonte em fótons por segundo. O resto dos zeros são para as constantes da função de distribuição da fonte em coordenadas cilíndricas.

0.00	15.00	30.00	40.00	50.00	60.00	65.00	70.00
73.00	76.00	79.00	82.00	84.00	86.00	88.00	90.00
91.00	92.00	93.00	93.50	94.00	94.50	94.90	94.93
94.9325							

Isto indica as coordenadas das divisões do volume da fonte ao longo do eixo radial.

0.00	40.00	80.00	110.00	135.00	155.00	170.00	180.00
185.00	190.00	192.00	194.00	195.00	196.00	198.00	200.00
205.00	210.00	220.00	235.00	255.00	280.00	310.00	350.00
390.00							

Isto indica as coordenadas das divisões do volume da fonte ao longo do eixo axial.

.0000	.0044	.0087	.0175	.0349	.0524	.0873	.1745
.2618	.4363	.6981	1.047	1.571	4.712	5.236	5.585
5.847	6.021	6.108	6.196	6.231	6.248	6.265	6.274
6.279	6.283						

Isto indica as coordenadas das divisões do volume da fonte ao longo do eixo angular.

0	0	QAD-CGGP UM CASCO DA UAS					CGA
RPP	-100200.	100200.	-100200.	100200.	-10000.	10000.	CGB
RCC	0	0	0	0	0	390.00	CGB
	94.9325						
RCC	0	0	0	0	0	390.00	CGB
	96.2025						
RCC	0	0	0	0	0	390.00	CGB
	102.87						
RCC	0	0	0	0	0	390.00	CGB
	104.775						
RCC	0	0	-61.595	0	0	542.29	CGB
	174.625						
RCC	0	0	-61.595	0	0	542.29	CGB
	176.53						
END							

Esta seção é uma geometria combinatória e tem um formato fixo. A primeira linha é o título da geometria. Também é definido o tipo de corpo geométrico e os dados reais das dimensões da fonte e da blindagem.

1176.53	195.00	0.0	0	0	0	0
2676.53	195.00	0.0	0	0	0	0
5176.53	195.00	0.0	0	0	0	0
7676.53	195.00	0.0	0	0	0	0
10176.53	195.00	0.0	0	0	0	0
15176.53	195.00	0.0	0	0	0	0
20176.53	195.00	0.0	0	0	0	0
25176.53	195.00	0.0	0	0	0	0
30176.53	195.00	0.0	0	0	0	0
35176.53	195.00	0.0	0	0	0	0
40176.53	195.00	0.0	0	0	0	0
45176.53	195.00	0.0	0	0	0	0
50176.53	195.00	0.0	0	0	0	0
60176.53	195.00	0.0	0	0	0	0
70176.53	195.00	0.0	0	0	0	0
80176.53	195.00	0.0	0	0	0	0
90176.53	195.00	0.0	0	0	0	0
100176.53	195.00	0.0	0	0	0	0

Estas são as coordenadas do detector com a indicação se é em coordenada cilíndrica (0), cartesiana (1) ou esférica (2).

.0	0.0	0.	-1	0	0	0	X
----	-----	----	----	---	---	---	---

Esta parte é para terminar a execução do programa, isto é, os cartões de detectores são lidos até que um negativo seja encontrado.

Apêndice B – Entrada do código QAD-CGGP para um casco carregado com ECIs de Angra 2, $E_m = 0,575$ MeV.

```

60 GWD/MTU, 10-Year Cooling, 0.575 Mev
24 24 25 17 4 9 1 0 0 2 1 0 600 2100 600 0
1.073+17 0 0 0 0 0 0
0.00 15.00 30.00 40.00 50.00 60.00 65.00 70.00
73.00 76.00 79.00 82.00 84.00 86.00 88.00 90.00
91.00 92.00 93.00 93.50 94.00 94.50 94.90 94.93
94.9325
0.00 40.00 80.00 110.00 135.00 155.00 170.00 180.00
185.00 190.00 192.00 194.00 195.00 196.00 198.00 200.00
205.00 210.00 220.00 235.00 255.00 280.00 310.00 350.00
390.00
.0000 .0044 .0087 .0175 .0349 .0524 .0873 .1745
.2618 .4363 .6981 1.047 1.571 4.712 5.236 5.585
5.847 6.021 6.108 6.196 6.231 6.248 6.265 6.274
6.279 6.283
0 0 QAD-CGGP UM CASCO DA UAS
RPP -100200. 100200. -100200. 100200. -10000. 10000. CGA
RCC 0 0 0 0 0 390.00 CGB
94.9325
RCC 0 0 0 0 0 390.00 CGB
96.2025
RCC 0 0 0 0 0 390.00 CGB
102.87
RCC 0 0 0 0 0 390.00 CGB
104.775
RCC 0 0 -61.595 0 0 542.29 CGB
174.625
RCC 0 0 -61.595 0 0 542.29 CGB
176.53
END
100 2 2 CGC
110 2 3 -2
120 2 4 -3
130 2 5 -4
140 2 6 -5
150 2 7 -6
160 2 1 -7 CGC
END
1 1 1 1 1 1 CGD
1 2 1000 2 3 2 1000 CGE
6 1 6 8 11 12 13 14 15 16 17 19 20 24
26 40 50 92 M
.0000 .0000 .2253 .0000 .0000 .0000 .0000 .0000
.0000 .0000 .0000 .0000 .0004 .0007 .3516 .0052
1.6758 RN
.0000 .0782 .0000 .0000 .0000 .0000 .0000 .0000
.0000 .0000 .0000 .0000 .0000 7.7418 .0000 .0000
.0000 RN
.0250 .0000 1.211 .0004 .0224 .0592 .1045 .0000
.0048 .0004 .0018 .1880 .0000 2.063 .0000 .0000
.0000 RN
0.575 O
0.575 P
1.195-03 Q
1.0 R
0.45-0.7 S
0.45-0.7 T
mev/cm*2-sec mrem/hr w/g
1176.53 195.00 0.0 0 0 0 0
2676.53 195.00 0.0 0 0 0 0
5176.53 195.00 0.0 0 0 0 0
7676.53 195.00 0.0 0 0 0 0
10176.53 195.00 0.0 0 0 0 0
15176.53 195.00 0.0 0 0 0 0
20176.53 195.00 0.0 0 0 0 0
25176.53 195.00 0.0 0 0 0 0
30176.53 195.00 0.0 0 0 0 0
35176.53 195.00 0.0 0 0 0 0
40176.53 195.00 0.0 0 0 0 0
45176.53 195.00 0.0 0 0 0 0
50176.53 195.00 0.0 0 0 0 0
60176.53 195.00 0.0 0 0 0 0

```

70176.53	195.00	0.0	0	0	0	0
80176.53	195.00	0.0	0	0	0	0
90176.53	195.00	0.0	0	0	0	0
100176.53	195.00	0.0	0	0	0	0
.0	0.0	0.	-1	0	0	0

x

Apêndice C – Entrada do código QAD-CGGP para o casco (4,2) do arranjo de 15 cascos da Figura 16, $E_m = 0,575$ MeV.

```

40 GWD/MTU. 10-Year Cooling. 0.575 MeV
24 24 24 17 5 9 1 0 0 2 1 0 600 2100 600 0
7.104+16 0 0 0 0 0 0
0.00 15.00 30.00 40.00 50.00 60.00 65.00 70.00
73.00 76.00 79.00 82.00 84.00 86.00 88.00 90.00
91.00 92.00 93.00 93.50 94.00 94.50 94.90 94.93
94.9325
0.00 40.00 80.00 110.00 135.00 155.00 170.00 180.00
185.00 190.00 192.00 194.00 195.00 196.00 198.00 200.00
205.00 210.00 220.00 235.00 255.00 280.00 310.00 350.00
390.00
0 .162 .3236 .585 1.0472 1.31 1.5708 1.83
2.094 2.36 2.618 2.88 3.1416 3.4 3.665 3.93
4.188 4.46 4.712 4.97 5.36 5.79 6.00 6.11
6.283
0 0 QAD-CGGP UM CASCO DA UAS CGA
RPP -100800. 100800. -100800. 100800. -10000. 10000. CGB
RCC 0 0 0 0 0 390.00 CGB
94.9325
RCC 0 0 0 0 0 390.00 CGB
96.2025
RCC 0 0 0 0 0 390.00 CGB
102.87
RCC 0 0 0 0 0 390.00 CGB
104.775
RCC 0 0 -61.595 0 0 542.29 CGB
174.625
RCC 0 0 -61.595 0 0 542.29 CGB
176.53
RCC 520. -1560. -61.595 0 0 542.29 CGB
176.53
RCC 520. -1040. -61.595 0 0 542.29 CGB
176.53
RCC 520. -520. -61.595 0 0 542.29 CGB
176.53
RCC 520. 0 -61.595 0 0 542.29 CGB
176.53
END
100 2 2 CGC
110 2 3 -2
120 2 4 -3
130 2 5 -4
140 2 6 -5
150 2 7 -6
160 2 8
170 2 9
180 2 10
190 2 11
200 2 1 -7 -8 -9 -10 -11 CGC
END
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 CGD
1 2 1000 2 3 2 4 4 4 4 1000 CGE
6 1 6 8 11 12 13 14 15 16 17 19 20 24
26 40 50 92
.0000 .0000 .2253 .0000 .0000 .0000 .0000 .0000
.0000 .0000 .0000 .0000 .0004 .0007 .3516 .0052
1.6758
.0000 .0782 .0000 .0000 .0000 .0000 .0000 .0000
.0000 .0000 .0000 .0000 .0000 7.7418 .0000 .0000
.0000
.0250 .0000 1.211 .0004 .0224 .0592 .1045 .0000
.0048 .0004 .0018 .1880 .0000 2.063 .0000 .0000
.0000
.0054 .0009 .1311 .0004 .0011 .0155 .0212 .0009
.0019 .0001 .0011 .0671 .0000 .5810 .0291 .0004
.1385
0.575 RN
0.575 O
1.195-03 P
1.0 Q
0.45-0.7 R
0.45-0.7 S
T

```

mev/cm*2-sec			mrem/hr				w/g	U
1696.53	195.00	260.	1	0	0	0		
3196.53	195.00	260.	1	0	0	0		
5696.53	195.00	260.	1	0	0	0		
8196.53	195.00	260.	1	0	0	0		
10696.53	195.00	260.	1	0	0	0		
15696.53	195.00	260.	1	0	0	0		
20696.53	195.00	260.	1	0	0	0		
25696.53	195.00	260.	1	0	0	0		
30696.53	195.00	260.	1	0	0	0		
35696.53	195.00	260.	1	0	0	0		
40696.53	195.00	260.	1	0	0	0		
45696.53	195.00	260.	1	0	0	0		
50696.53	195.00	260.	1	0	0	0		
60696.53	195.00	260.	1	0	0	0		
70696.53	195.00	260.	1	0	0	0		
80696.53	195.00	260.	1	0	0	0		
90696.53	195.00	260.	1	0	0	0		
100696.53	195.00	260.	1	0	0	0		
.0	0.0	0.	-1	0	0	0	X	

Apêndice D – Entrada do código QAD-CGGP para o casco (3,3) do arranjo de 72 cascos da Figura 17, $E_m = 0,575$ MeV.

```

60 GWD/MTU. 10-Year Cooling. 0.575 MeV
24 24 24 17 5 9 1 0 0 2 1 0 600 2100 600 0
1.073+17 0 0 0 0 0 0
0.00 15.00 30.00 40.00 50.00 60.00 65.00 70.00
73.00 76.00 79.00 82.00 84.00 86.00 88.00 90.00
91.00 92.00 93.00 93.50 94.00 94.50 94.90 94.93
94.9325
0.00 40.00 80.00 110.00 135.00 155.00 170.00 180.00
185.00 190.00 192.00 194.00 195.00 196.00 198.00 200.00
205.00 210.00 220.00 235.00 255.00 280.00 310.00 350.00
390.00
0 .162 .3236 .585 1.0472 1.31 1.5708 1.83
2.094 2.36 2.618 2.88 3.1416 3.4 3.665 3.93
4.188 4.46 4.712 4.97 5.36 5.79 6.00 6.11
6.283
0 0 QAD-CGGP UM CASCO DA UAS CGA
RPP -101300. 101300. -101300. 101300. -10000. 10000. CGB
RCC 0 0 0 0 0 390.00 CGB
94.9325
RCC 0 0 0 0 0 390.00 CGB
96.2025
RCC 0 0 0 0 0 390.00 CGB
102.87
RCC 0 0 0 0 0 390.00 CGB
104.775
RCC 0 0 -61.595 0 0 542.29 CGB
174.625
RCC 0 0 -61.595 0 0 542.29 CGB
176.53
RCC 520. -1040. -61.595 0 0 542.29 CGB
176.53
RCC 520. -520. -61.595 0 0 542.29 CGB
176.53
RCC 520. 0 -61.595 0 0 542.29 CGB
176.53
RCC 520. 520. -61.595 0 0 542.29 CGB
176.53
RCC 520. 1040. -61.595 0 0 542.29 CGB
176.53
RCC 1040. -1040. -61.595 0 0 542.29 CGB
176.53
RCC 1040. -520. -61.595 0 0 542.29 CGB
176.53
RCC 1040. 0 -61.595 0 0 542.29 CGB
176.53
RCC 1040. 520. -61.595 0 0 542.29 CGB
176.53
RCC 1040. 1040. -61.595 0 0 542.29 CGB
176.53
END
100 2 2 CGC
110 2 3 -2
120 2 4 -3
130 2 5 -4
140 2 6 -5
150 2 7 -6
160 2 8
170 2 9
180 2 10
190 2 11
200 2 12
210 2 13
220 2 14
230 2 15
240 2 16
250 2 17
260 2 1 -7 -8 -9 -10 -11 -12 -13
-14 -15 -16 -17 CGC
END
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 CGD
1 1 1
1 2 1000 2 3 2 4 4 4 4 4 4 4

```

4	4	1000	8	11	12	13	14	15	16	17	19	20	24	CGE
6	1	6	50	92										M
.0000	.0000	.0000	.2253	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	
.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0004	.0007	.3516	.0052					
1.6758														RN
.0000	.0782	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	
.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	7.7418	.0000	.0000					RN
.0000														
.0250	.0000	1.211	.0004	.0224	.0592	.1045	.0000	.0000	.0000					
.0048	.0004	.0018	.1880	.0000	2.063	.0000	.0000	.0000	.0000					
.0000														RN
.0054	.0009	.1311	.0004	.0011	.0155	.0212	.0000	.0000	.0000					
.0019	.0001	.0011	.0671	.0000	.5810	.0291	.0004	.0004	.0004					
.1385														RN
0.575														O
0.575														P
1.195-03														Q
1.0														R
0.45-0.7														S
0.45-0.7														T
mev/cm*2-sec														U
2216.53	195.00	1040.	1	0	0	0								
3716.53	195.00	1040.	1	0	0	0								
6216.53	195.00	1040.	1	0	0	0								
8716.53	195.00	1040.	1	0	0	0								
11216.53	195.00	1040.	1	0	0	0								
16216.53	195.00	1040.	1	0	0	0								
21216.53	195.00	1040.	1	0	0	0								
26216.53	195.00	1040.	1	0	0	0								
31216.53	195.00	1040.	1	0	0	0								
36216.53	195.00	1040.	1	0	0	0								
41216.53	195.00	1040.	1	0	0	0								
46216.53	195.00	1040.	1	0	0	0								
51216.53	195.00	1040.	1	0	0	0								
61216.53	195.00	1040.	1	0	0	0								
71216.53	195.00	1040.	1	0	0	0								
81216.53	195.00	1040.	1	0	0	0								
91216.53	195.00	1040.	1	0	0	0								
101216.53	195.00	1040.	1	0	0	0								
.0	0.0	0.	-1	0	0	0								X