



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica



ESTUDO PARAMÉTRICO E OTIMIZACIONAL DE ALVOS DE ESPALHAMENTO PARA O REATOR MYRRHA UTILIZANDO SIMULAÇÕES EM MCNPX E REDE NEURAI

André Luiz Pereira Rebello Junior

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: Aquilino Senra Martinez e
Alessandro da Cruz Gonçalves

Rio de Janeiro
Março de 2016

ESTUDO PARAMÉTRICO E OTIMIZACIONAL DE ALVOS
DE ESPALHAMENTO PARA O REATOR MYRRHA
UTILIZANDO SIMULAÇÕES EM MCNPX E REDE
NEURAIIS

André Luiz Pereira Rebello Junior

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.

Aprovado por:

Dr. Daniel Arthur Pinheiro Palma, D. Sc.

Dr. Zelmo Rodrigues de Lima, D. Sc.

Orientado por:

Prof. Aquilino Senra Martinez, D. Sc.

Prof. Alessandro da Cruz Gonçalves, D. Sc.

Rio de Janeiro

Março de 2016

Pereira Rebello Junior, André Luiz.

Estudo Paramétrico e Otimizacional de Alvos de Espalhamento para o Reator MYRRHA utilizando simulações em MCNPX e Redes Neurais / André Luiz Pereira Rebello Junior. - Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2016.

IX, 37 p.: il.; 29,7 cm

Orientadores: Aquilino Senra Martinez e Alessandro da Cruz Gonçalves.

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Engenharia Nuclear, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 36-39.

1. Fontes de Espalhamento. 2. Reatores ADS. 3. MCNPX. 4. Projeto de Graduação. I. Aquilino Senra Martinez e Alessandro da Cruz Gonçalves. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Nuclear. III. Estudo Paramétrico e Otimizacional de Alvos de Espalhamento para o Reator MYRRHA utilizando simulações em MCNPX e Redes Neurais.

O autor agradece aos professores Aquilino e Alessandro pela orientação neste projeto, ao colega de laboratório Thiago pelo auxílio com as redes neurais e ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro.

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

ESTUDO PARAMÉTRICO E OTIMIZACIONAL DE ALVOS DE
ESPALHAMENTO PARA O REATOR MYRRHA UTILIZANDO SIMULAÇÕES
EM MCNPX E REDE NEURAI

André Luiz Pereira Rebello Junior

Março/2016

Orientadores: Aquilino Senra Martinez e Alessandro da Cruz Gonçalves

Curso: Engenharia Nuclear

Neste projeto foi desenvolvido um estudo acerca dos alvos de espalhamento em reatores subcríticos, em especial no caso do reator MYRRHA, visando à determinação do comportamento destes conforme se varia seus parâmetros e, ainda, a obtenção de configurações ideais. Os dois tipos de alvos propostos para o reator MYRRHA foram comparados a partir de simulações com MCNPX. Limites de saturação na produção de nêutrons, conforme se variam o comprimento e o diâmetro de um alvo cilíndrico, foram encontrados utilizando uma rede neural. Por meio do conceito de custo de nêutrons, a energia ótima dos prótons incidentes foi encontrada. Por fim, pode-se concluir que o estudo feito pôde otimizar um alvo de espalhamento, no que concerne a produção de nêutrons. Obtendo, assim, as condições ideais do alvo. O estudo também mostrou que ambos os projetos de alvos propostos para o MYRRHA são viáveis, de acordo com a taxa de produção de nêutrons.

Palavras-chave: Alvo de espalhamento, Reatores ADS, MCNPX, redes neurais, reator MYRRHA

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

PARAMETRIC AND OPTIMIZATIONAL STUDY OF SPALLATION TARGET
FOR THE MYRRHA REACTOR USING MCNPX SIMULATIONS AND NEURAL
NETWORKS

André Luiz Pereira Rebello Junior

March/2016

Advisors: Aquilino Senra Martinez and Alessandro da Cruz Gonçalves

Major: Nuclear Engineering

In this project it was developed a study of the spallation targets in subcritical reactor, especially for the case of the MYRRHA reactor, in order to determine the behavior of them as their parameters are changed and also to obtain the ideal configurations. The two designs of target proposed for the MYRRHA reactor were compared based on MCNPX simulations. Saturation boundaries on the neutron production, as the length and the diameter of a target are varied, were found using a neural network. Using the concept of neutron cost, the optimum incident proton energy was determined. Finally, it can be concluded that the study was able to optimize a spallation target concerning the neutron production. Thus we got the ideal conditions of the target. The study also showed that both target designs proposed for the MYRRHA reactor are viable, concerning the rate of neutron production.

Key-words: Spallation target; ADS reactors; MCNPX; Neural Networks; MYRRHA reactor.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| LISTA DE FIGURAS..... | 8 |
| LISTA DE TABELAS | 9 |
| 1 – INTRODUÇÃO | 10 |
| 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 14 |
| 3 – ALVOS DE ESPALHAMENTO | 18 |
| 4 – REDES NEURAS..... | 20 |
| 5 – CÓDIGO MCNPX..... | 22 |
| 6 – APLICAÇÕES..... | 25 |
| 7 – RESULTADOS | 28 |
| 8 – CONCLUSÕES..... | 34 |
| 9 – PRODUÇÃO CIENTÍFICA | 35 |
| 10 – REFERÊNCIAS | 36 |
| APÊNDICE A – EXEMPLO DE INPUT DO MCNPX | 40 |
| APÊNDICE B – REDE NEURAL IMPLEMENTADA EM MATLAB..... | 41 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Ilustração conceitual do projeto do reator multipropósito MYRRHA [4] | 11 |
| Figura 2: Abordagem passo-a-passo da validação do conceito do ADS [8] | 14 |
| Figura 3: Seção transversal do núcleo crítico proposto para o reator MYRRHA [23] .. | 18 |
| Figura 4: Modelo básico dos dois projetos de alvo de espalhamento | 19 |
| Figura 5: Mecanismo de espalhamento [29]..... | 23 |
| Figura 6: Função densidade de probabilidade do próton incidente por raio da fonte | 25 |
| Figura 7: Esquema da rede neural implemetada..... | 26 |
| Figura 8: Multiplicidade de nêutrons para alvos de diferentes materiais | 28 |
| Figura 9: Alvo com janela para um feixe de prótons de 350MeV | 29 |
| Figura 10: Alvo sem janela para um feixe de prótons de 350MeV | 29 |
| Figura 11: Alvo com janela para um feixe de prótons de 600MeV | 30 |
| Figura 12: Alvo sem janela para um feixe de prótons de 600MeV | 31 |
| Figura 13: Multiplicidade de nêutrons como função da energia do próton incidente para um alvo com janela..... | 32 |
| Figura 14: Multiplicidade de nêutrons como função da energia do próton incidente para um alvo sem janela | 32 |
| Figura 15: Valor do nêutron para um alvo com janela | 33 |
| Figura 16: Valor do nêutron para um alvo sem janela | 33 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Limites de saturação para um feixe de prótons de 350MeV | 30 |
| Tabela 2: Limites de saturação para um feixe de prótons de 600MeV | 31 |

1 – INTRODUÇÃO

A produção de energia, em suas diferentes formas, tem sempre sido uma grande preocupação da humanidade e se tornou uma das pedras fundamentais do desenvolvimento social. De fato, o crescimento tecnológico exponencial que ocorreu durante o século XX teve como grande causa o desenvolvimento do uso do petróleo.

Contudo, essa evolução tecnológica teve o seu custo. A pressão sobre os recursos naturais do planeta e o efeito do grande crescimento econômico passou para o meio ambiente um enorme fardo na forma de emissões de gases do efeito estufa, emissões de particulados e mudanças climáticas.

A energia nuclear é um agente crucial na busca da superação desses problemas com a garantia de suprimento energético no futuro. E ainda, essa importância tende a crescer conforme a disponibilidade de recursos fósseis diminui. Tal fato é reconhecido por diversos intelectuais e cientistas no mundo, inclusive pelo britânico James Lovelock, um dos pais do Movimento Verde, que diz:

“Energia nuclear é, de longe, o meio mais efetivo de reduzir a emissão de dióxido de carbono, mas não é esse o motivo mais importante para que rivalizemos com a França e passemos a produzir eletricidade a partir do urânio. O importante é que as cidades exigem um fornecimento constante e econômico de eletricidade que até recentemente veio do carvão e do gás, mas esses recursos estão agora em declínio e não deixam nenhuma alternativa além da energia nuclear.” [1]

Contudo, ainda que a tecnologia de geração de energia pela fissão nuclear seja bem consolidada, diversos programas nucleares no mundo enfrentam grande oposição. Visando lidar com essa oposição, a quarta geração de reatores nucleares foi proposta para solucionar os principais entraves da energia nuclear para a produção de eletricidade. Tal proposta foi feita com os seguintes objetivos em mente [2]:

- Competitividade econômica.
- Aumento de segurança.

- Minimização da geração de rejeitos radioativos.
- Melhora na resistência à proliferação.

Dentre os projetos de reatores de quarta geração, um dos que ganha mais destaque é o projeto concebido pelo Professor Carlo Rubbia [3], pesquisador italiano laureado com o Nobel de Física de 1984. Tal projeto consiste de um sistema subcrítico do tipo Acelerador-Driven System (ADS). O reator ADS é um reator inovador e muito promissor, não apenas para a geração de energia, como também para a transmutação de elementos pesados e de larga meia-vida, reduzindo, assim, o inventário de material radioativo.

O conceito de ADS consiste basicamente de um acelerador de prótons acoplado a um núcleo subcrítico por um alvo de espalhamento ('spallation target'). O feixe de prótons colide com o alvo de espalhamento produzindo nêutrons que impulsionam o núcleo subcrítico. Devido ao seu núcleo ser subcrítico, a reação nuclear não se auto-sustenta, o que torna esse modelo de reator intrinsecamente mais seguro, já que acidentes de criticalidade são impossíveis de ocorrer. O conceito de tal reator é exemplificado na **Figura 1** que é o modelo do reator MYRRHA.

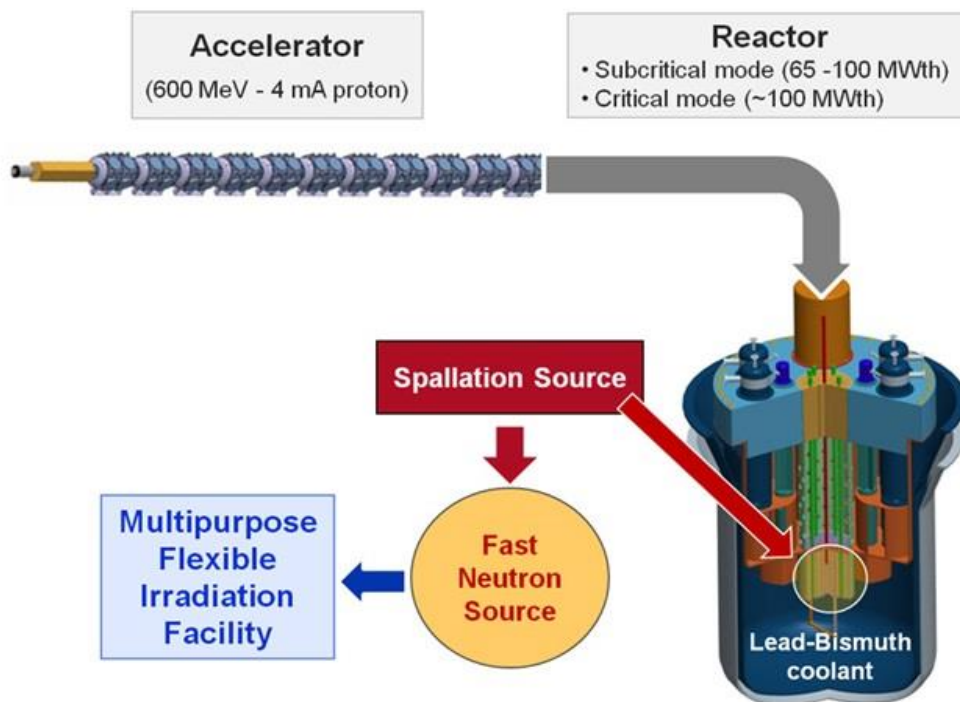


Figura 1: Ilustração conceitual do projeto do reator multipropósito MYRRHA [4]

O reator MYRRHA [5] é um reator ADS a ser construído no SCK-CEN (Studiecentrum voor Kernenergie – Centre d'Étude de l'énergie Nucléaire), na Bélgica, e que é esperado para estar operacional em 2025. Neste contexto, o reator MYRRHA é extremamente importante, pois é um protótipo de ADS que tem a intenção de demonstrar a sua viabilidade, sendo assim um centro de pesquisa. Além disso, ele será utilizado para produzir radioisótopos para a medicina nuclear.

No projeto MYRRHA, o alvo de espalhamento será feito de um metal fundido que vai funcionar ao mesmo tempo como refrigerante primário. O material escolhido para ser o material do alvo é a liga eutética de chumbo e bismuto (LBE), devido à sua alta taxa de produção de nêutrons, a remoção de calor eficaz e uma quantidade muito pequena de propriedades de danos de radiação.

A multiplicidade de nêutrons, que é a taxa de produção nêutrons por próton incidente no alvo de espalhamento, é um ponto crucial a ser estudado. Tal importância se deve ao fato de que o alvo deve produzir o maior fluxo de nêutrons nas suas imediações sendo tão compacto quanto possível. Além disso, saber como o alvo produz nêutrons é obviamente relevante, pois sua produção vai impactar toda a física do reator, especialmente as Equações da Cinética Pontual [6], que descrevem o comportamento temporal da densidade de nêutrons e, conseqüentemente, a criticalidade em reatores nucleares.

As equações da Cinética Pontual para reatores subcríticos propostas por Gandini e Salvatores [7] são mostradas nas **Equações 1 e 2**.

$$\Lambda \frac{dN(t)}{dt} = (\rho(t) - \sum_{i=1}^n \beta_i) N(t) + \sum_{i=1}^n \lambda_i C_i(t) + Q(t) + \zeta [1 - N(t)] \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \beta_i N(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (2)$$

$$i = 1, \dots, n$$

Tal formulação se diferencia das formulações anteriores por inserir o termo ζ , que é o índice de subcriticalidade. Este representa a reatividade da fonte externa de nêutrons e é dado pela **Equação 3**.

$$\zeta = \frac{1 - K_{Sub}}{K_{Sub}} \quad (3)$$

Nesta formulação das equações da cinética pontual, o número de nêutrons produzidos por próton incidente impactará diretamente o termo $Q(t)$, que é a fonte externa de nêutrons. Isso se deve ao fato de que o valor da fonte externa de nêutrons devido ao alvo de espalhamento pode ser obtido pelo produto entre a multiplicidade de nêutrons e o fluxo de prótons vindo do acelerador dividido pelo volume do reator.

O capítulo 2 abordará os alvos de espalhamento. Assim, serão apresentados os projetos propostos para alvo do reator MYRRHA.

O Monte Carlo N-Particle Transport Code System (MCNPX) foi o código utilizado para simular os alvos de espalhamento. Tal código será discutido no capítulo 3, abordando o que ele representa e, brevemente, sua base teórica.

Parte da análise de dados para otimização foi feita utilizando redes neurais. O capítulo 4 consistirá na discussão dos conceitos envolvidos nelas e as suas capacidades.

No capítulo 5 será exposto como a metodologia, discutida nos capítulos 3 e 4, foi aplicada neste estudo. Serão apresentadas ainda as considerações feitas durante o desenvolvimento do mesmo.

No capítulo 6 os resultados obtidos serão expostos e discutidos. Comparações entre o comportamento dos dois modelos de alvos serão feitas e limites de saturação encontrados.

Por fim, o capítulo 7 será dedicado às considerações finais e propostas de futuros trabalhos.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Por todo o mundo têm-se observado esforços científicos voltados no estudo de alvos de espalhamento como fontes de nêutrons para serem usados em sistemas subcríticos do tipo ADS. Tal estudo tem ocorrido tanto por meio de experimentos, quanto por simulação computacional.

Conforme explicitado por BAUER et al. [8] na **Figura 2**, a validação e demonstração do conceito do ADS tem sido feita por meio de um método passo-a-passo. Com apenas um acelerador de partículas de alta intensidade irradiando um alvo, tem-se uma fonte de espalhamento. Se este alvo de espalhamento estiver contido em um meio multiplicador com combustível convencional, tem-se a demonstração experimental de um ADS. Já se o meio multiplicador for com combustível dedicado, ou seja, com combustível mais fértil, demonstra-se o conceito de um Accelerator Transmutation of Waste (ATW), que foca apenas na transmutação dos elementos de longa-vida e não visa à geração de energia.

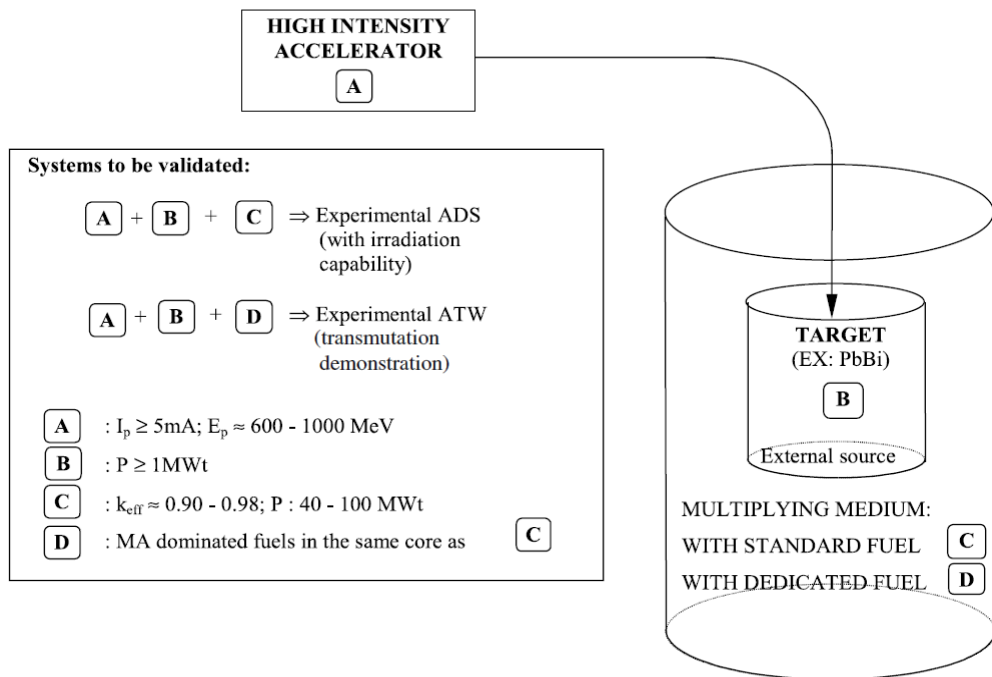


Figura 2: Abordagem passo-a-passo da validação do conceito do ADS [8]

G.S. Bauer fez parte do grupo de pesquisa do MEGAPIE (Megawatt Pilot Target Experiment) no PSI (Paul Scherrer Institut) na Suíça [8]. Este foi um projeto para demonstrar a viabilidade de alvos feitos da liga eutética de Chumbo e Bismuto para aplicações em reatores ADS de alta potência. O MEGAPIE operou em 2006 com uma corrente de 1.3mA de feixe de prótons de 590 MeV, correspondendo a uma potência de 0.77 MW. Neste mesmo projeto, WAGNER et al. [9] compararam o desempenho na produção de nêutrons do alvo e obteve resultados que mostravam 80% mais nêutrons que em alvos de chumbo previamente operados.

BAUER et al. também fizeram uma revisão nos conceitos de alvos de espalhamento e os problemas materiais relacionados a eles [10]. Tais problemas advêm do alto fluxo de radiação associado ao alvo e da alta deposição de calor instantânea a qual os alvos são submetidos. Bauer fez uma análise de diversos materiais e tipos de alvo, como o em prato, em vareta, líquido e em rotação.

Diversos experimentos têm sido realizados utilizando os aceleradores do JINR (Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia). O experimento Phasotron é um exemplo destes experimentos. Ele consistiu de um alvo de chumbo irradiado por prótons relativísticos. Neste experimento, MAJERLE et al. [11] utilizaram um conjunto de detectores por ativação na forma de filmes finos para medir o feixe de prótons e o campo de nêutrons produzidos. Amostras de iodo foram inseridas no campo de nêutrons para estudar as possibilidades de transmutação do iodo. Taxas de produção dos elementos obtidas experimentalmente foram comparadas com valores calculados pelo MCNPX [12].

Também no JINR, atualmente tem-se desenvolvido outro projeto de grande relevância que é o Subcritical Assembly at Dubna (SAD) [13]. Este projeto tem por objetivo construir um alvo de espalhamento substituível (Pb, W) com um blanket subcrítico de MOX (UO₂ + PuO₂), utilizando também o acelerador Phasotron. A motivação é estudar a produção de nêutrons nesse setup, a liberação de energia, as taxas de fissão para actínídeos de grande meia vida, e as taxas de transmutação dos produtos de fissão.

Adicionalmente, diversas fórmulas semi-empíricas têm sido desenvolvidas para a multiplicidade de nêutrons. CUGNON et al. [14] realizaram um estudo com modelos de Cascata Intra-Molecular (INC) e de Evaporação para formular a multiplicidade de

nêutrons como função da energia do feixe e o número de massa do material do alvo. Tal estudo foi feito tanto para prótons, quanto para nêutrons e deutério. A formulação semi-empírica encontrada para o feixe de prótons apresentou divergências de até 10% com os valores reais.

Similarmente, vários estudos formularam de maneira semi-empírica a dependência da produção de nêutrons apenas pela energia do próton incidente considerando um alvo de chumbo de 10 cm de raio e 60 cm de comprimento. VASSIL'KOV et al. [15] apresentaram uma fórmula empírica deste tipo baseada em experimentos com prótons de 1 a 8.1 GeV utilizando o método de moderação. Já NIKOLAEV et al. [16] desenvolveram sua formulação empírica baseado em irradiações com prótons de 1 a 3.7 GeV utilizando o método de Limite de detectores de nêutrons (“Threshold neutron detectors”).

BARROS et al. [17] realizaram um estudo sobre a aplicação do código MCNPX 2.6 na simulação de alvos de espalhamento para reatores ADS. Para um alvo de geometria fixa e um feixe de prótons de 1 GeV, alvos de diversos materiais com suas composições naturais são avaliados com relação a multiplicidade de nêutrons. Também é feita uma análise comparativa dos diversos modelos existentes no MCNPX. Um mesmo caso é simulado com diferentes métodos e selecionando as partículas a serem transportadas, e os resultados da multiplicidade de nêutrons e de tempo de computação são comparados.

KRÁSA realiza um amplo estudo sobre reatores ADS em seu livro [18]. A reação de espalhamento é discutida, considerando os métodos computacionais e experimentais disponíveis para seu estudo. Também é feita uma revisão dos principais experimentos existentes na literatura relacionados a reatores ADS e a fontes de espalhamento. É realizada ainda uma ampla comparação de resultados entre experimentos, simulações computacionais e fórmulas semi-empíricas.

Os alvos de espalhamento têm sido estudados por outras abordagens além de pelo ponto de vista da neutrônica. SATYAMURTHY et al., do BARC (Bhabha Atomic Research Centre, Índia), estudou alvos de espalhamento com janela do ponto de vista da termo-hidráulica [19]. Este estudo considerou todo o sistema onde o alvo de espalhamento está inserido, com downcomers, risers, trocadores de calor, guias de fluxo, etc. Um modelo unidimensional de fluidos unifásicos e bifásicos foi

implementado no estudo de alvos para sistemas ADS em LB, com um poder térmico de 100 MW na zona rápida. Análise paramétrica foi feita considerando diferentes taxas de vazão de LBE, feixes de diferentes correntes e diferentes geometrias.

Já o estudo realizado por CHO et al. [20] se focou apenas no alvo de espalhamento com janela para realizar também um estudo de termo-hidráulica. Definiu-se critérios de design para a temperatura máxima do LBE, a temperatura máxima da janela do feixe, a velocidade máxima do LBE e o stress máximo ao qual que a janela pode ser submetida. O perfil do feixe foi otimizado considerando a taxa de geração de calor e a temperatura da janela. Também se aperfeiçoou a espessura e o diâmetro da janela, o diâmetro do feixe, a corrente máxima do feixe e a velocidade máxima do LBE.

Do mesmo modo, BATTA et al. realizaram um estudo otimizador de termo-hidráulica de alvos de espalhamento sem janela [21]. Utilizando-se do código Star-CD Computational Fluid Dynamics (CFD), diversos parâmetros geométricos próximos à superfície livre do alvo foram variados e resultados numéricos, analisados. Este estudo teve por objetivo reduzir a zona de recirculação de LBE e prevenir deslocamento de fluido para as paredes da janela.

Outro aspecto a ser estudado são as reações químicas que ocorrem com o líquido que exerce a função, na maioria dos projetos de reatores ADS, de tanto ser o alvo de espalhamento quanto o refrigerante. No caso da liga eutética de Chumbo e Bismuto (LBE), deve-se estudar as reações de corrosão deste composto com outros materiais. KIKUCHI et al. realizaram um estudo de compatibilidade do LBE com outros materiais dentro do conceito do ADS [22]. Tal estudo considerou um alvo com janela e realizou tanto simulações computacionais quanto análises experimentais termo-hidráulicas e de corrosão. Diversos aços foram analisados no estudo de corrosão com o LBE. Adicionalmente, o estudo também desenvolveu técnicas de limpeza para remover LBE de materiais.

3 – ALVOS DE ESPALHAMENTO

A **Figura 3** mostra a seção transversal do núcleo crítico proposto para o reator MYRRHA. No projeto atual, o núcleo do reator é composto de combustível MOX e ele tem 37 posições disponíveis para serem ocupadas por seções empilhadas de teste (“In-Pile test Sections” – IPS), pelo alvo de espalhamento e por barras de controle e de desligamento. Na configuração subcrítica, a posição central do núcleo é ocupada pelo alvo de espalhamento.

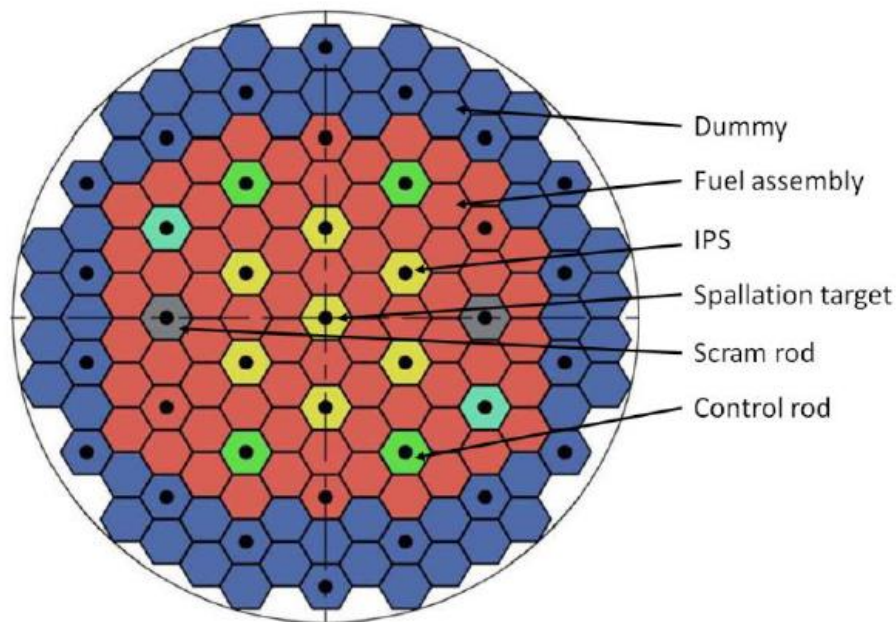


Figura 3: Seção transversal do núcleo crítico proposto para o reator MYRRHA [23]

Duas opções foram consideradas para o alvo de espalhamento no reator MYRRHA: alvos com janela e sem janela (tradução livre para ‘windowless’ e ‘windows target’). Como pode ser visto nos modelos da **Figura 4**, a principal diferença entre estes dois projetos é a interface entre o feixe de prótons e o material do alvo de espalhamento. Enquanto no alvo sem janela, o feixe interage diretamente com o alvo, para o alvo com janela a linha de vácuo do feixe vindo do acelerador é separado do material líquido do alvo por uma janela semi-esférica metálica.

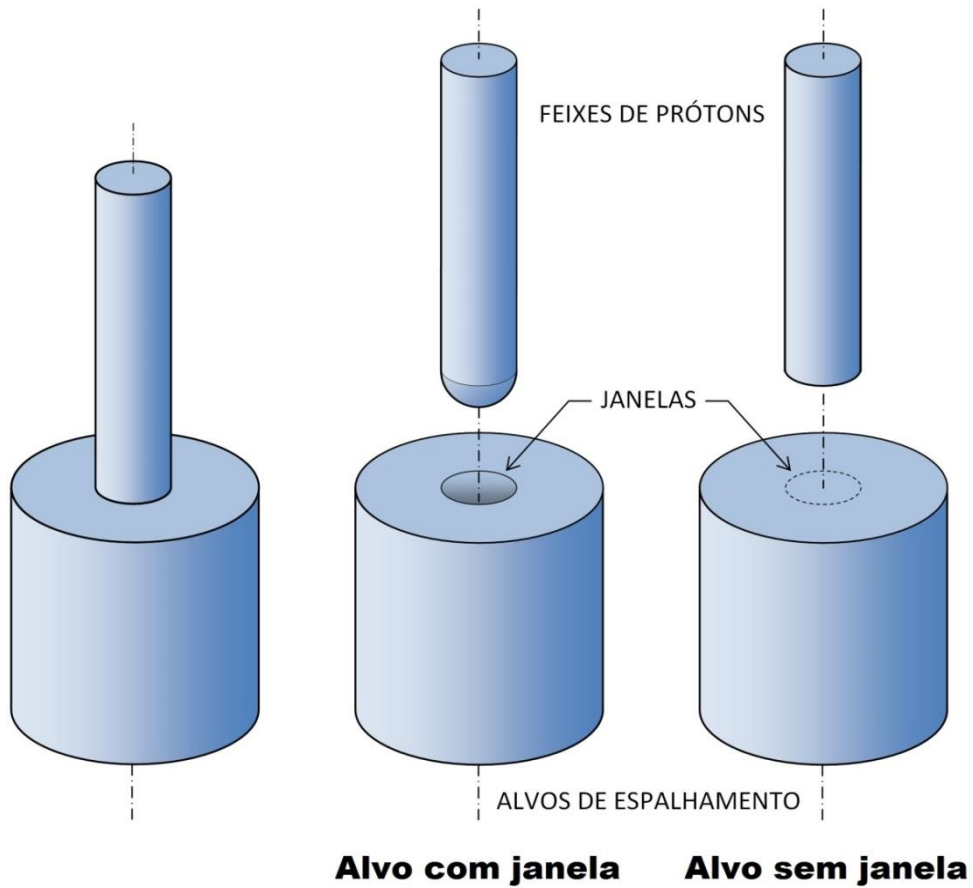


Figura 4: Modelo básico dos dois projetos de alvo de espalhamento

A principal desvantagem do projeto com janela é a possibilidade de ruptura da mesma devido à colisão dos prótons de alta energia do feixe. Assim, a janela do feixe deve ser de fácil substituição.

Por outro lado, o alvo sem janela requer uma tecnologia muito complexa, haja vista que a linha do feixe e a zona do alvo compartilham um vácuo comum [5].

4 – REDES NEURAIS

As redes neurais artificiais são modelos inspirados biologicamente que são capazes de reconhecer padrões. Sendo assim, elas são um método de solucionar problemas de inteligência artificial, construindo um sistema que tenha circuitos que simulem o cérebro humano, inclusive seu comportamento, ou seja, aprendendo, errando e fazendo descobertas. As redes neurais (NN) consistem basicamente em elementos de processamento, com conexões entre eles e algoritmos de treinamento [24].

A rede neural artificial é um sistema de neurônios ligados por conexões sinápticas e que podem ser divididos em camadas. A forma de arranjar em multicamadas foi concebida para resolver problemas mais complexos, linearmente não separáveis.

Geralmente, classificam-se as camadas em três grupos:

- Camada de entrada: onde os padrões são apresentados à rede. Nela, o número de nós é equivalente ao número de sinais de entrada da rede.
- Camadas intermediárias ou ocultas: onde é feita a maior parte do processamento, através de conexões ponderadas. Elas podem ser consideradas como extratoras de características.
- Camada de saída: onde o resultado final é concluído e apresentado. Ela tem a quantidade de neurônios igual à quantidade de sinais de saída.

Os neurônios internos são extremamente importantes na rede neural, pois se provou que sem estes se torna impossível a resolução de problemas linearmente não separáveis. Pode-se dizer que uma rede é composta por várias unidades de processamento, cujo funcionamento é bastante simples. Canais de comunicação que estão associados a determinado peso conectam tais unidades. As unidades fazem operações apenas sobre seus dados locais, que são entradas recebidas pelas suas conexões. O comportamento inteligente de uma rede neural artificial vem das interações entre as unidades de processamento da rede.

Com as redes neurais, o procedimento usual para a resolução de problemas é começar com uma fase de aprendizagem. Nesta fase, um grupo de exemplos é dado para a rede, que extrai as informações necessárias, ou padrões, de modo que ela pode

representar os dados apresentados, generalizando-o. A cada exemplo, a rede neural ajusta de acordo com os padrões apresentados os pesos de suas conexões, que são elementos livres. A fase seguinte é a utilização destes padrões para gerar respostas para o problema.

Dentre todos os tipos de redes neurais, foi utilizado o tipo 'feed-forward'. Esta escolha de tipo de rede foi feita por causa de sua ampla utilização e devido ao fato de que ele é considerado um aproximador universal de funções, não apenas para funções lineares, mas também para as não-lineares [25] [26]. Este tipo de NN é caracterizado pelo fato de que a informação se move em uma única direção, para frente, sem ciclos. Em outras palavras, as saídas de um dado neurônio só podem ser usadas como entradas para os neurônios da camada seguinte.

Neste tipo de rede, o treinamento é feito com uma função de backpropagation. Nela, são conhecidos os valores de saída esperados da rede para uma dada entrada. Compara-se, então, a saída obtida pela rede com a saída desejada e, se não estiver correta, o erro é calculado. Assim, o treinamento busca diminuir o erro corrigindo os pesos de todas as camadas, partindo da saída até a entrada.

5 – CÓDIGO MCNPX

O Monte Carlo é um método de simulação estatística que utiliza uma sequência de números aleatórios para simular sistemas físicos, e é particularmente interessante na resolução de problemas para os quais não são indicados os métodos determinísticos. Nele, eventos probabilísticos individuais que compõem um processo são simulados sequencialmente.

Entre suas múltiplas aplicações, o método estocástico de Monte Carlo vem sendo aplicado no transporte de partículas para reproduzir os processos estatísticos de interação atômica e/ou nuclear, gerando aleatoriamente cada uma das muitas partículas primárias e secundárias, a partir de uma fonte radioativa dentro de um sistema. Esses códigos simulam computacionalmente a emissão e detecção de partículas, empregando números aleatórios para determinar a posição de geração das partículas e sua direção de emissão. Eles computam todos os eventos, tais como absorção da radiação, espalhamento Compton, radiação de Bremsstrahlung, produção de raios X, entre outros, e reportam os resultados juntamente com seus erros estatísticos. Em outras palavras, segue-se cada uma de muitas partículas geradas por uma fonte desde a criação até a sua energia limiar final, sendo suas interações estabelecidas de forma aleatória.

As simulações de Monte Carlo foram realizadas com a versão 2.6.0 do código de simulação MCNPX [27]. Tal escolha foi feita devido à capacidade deste código de simular também o transporte de prótons, o que não é possível com o MCNP. Este código de simulação tem sido extensivamente testado e comparado com dados experimentais, mostrando-se muito eficiente para prever o comportamento da multiplicidade de nêutrons em alvos de espalhamento [28] [12].

Em MCNPX, a simulação da reação de espalhamento basicamente é dada por três etapas: a Cascata Intra-Nuclear (INC), em que um estágio de Pré-Equilíbrio ocorre, e a Desexcitação, que pode ser feito por meio de evaporação ou de fissão. O mecanismo da reação de espalhamento é ilustrado na **Figura 5** [29]. Cada estágio individual da reação de espalhamento pode ser descrito por diferentes modelos na simulação em MCNPX.

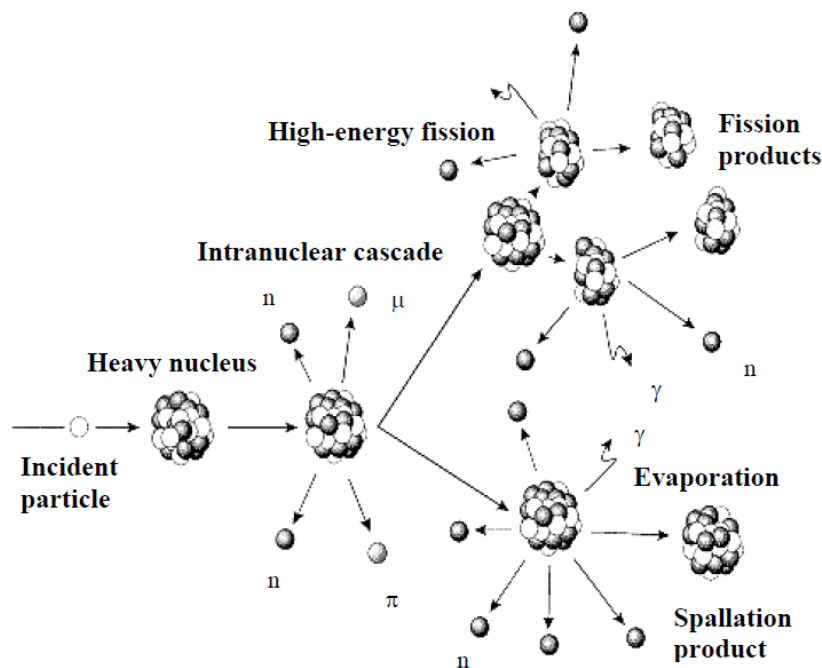


Figura 5: Mecanismo de espalhamento [29]

Modelos de INC descrevem as interações entre a partícula incidente e os núcleos do alvo a durante a Cascata Intra-Nuclear como uma sequência de colisões binárias separadas no espaço e tempo [18]. Isto é válido se o comprimento de onda da partícula é menor que a distância média entre núcleos do alvo. A trajetória entre núcleos é assumida linear. Todas as partículas que são espalhadas ou produzidas durante a cascata são tratadas no campo da mecânica clássica, ou seja, o projétil compartilha a sua energia cinética com os núcleos do alvo por meio de colisões elásticas e a cascata de colisões núcleo-núcleo ocorre em seguida. Tais colisões continuam até que um certo critério de equilíbrio seja atingido. Para o modelo de Cugnon (INCL4) [30], por exemplo, este critério é um tempo de equilíbrio empírico. Já nos modelos do tipo Bertini [31] (Bertini, Isabel), o critério de equilíbrio é deduzido por uma energia de corte (“Bertini cut-off energy”. Abaixo desta energia, a cascata intra-nuclear cessa.

Modelos de Pré-Equilíbrio descrevem a evolução do sistema nuclear resultante dos modelos dinâmicos descritos acima. Eles são responsáveis por descrever a emissão de prótons, nêutrons e íons leves enquanto o sistema ainda não atingiu o equilíbrio. As

energias das partículas no estágio de pré-equilíbrio são maiores que as energias das partículas emitidas no durante o decaimento [18].

No entanto, os modelos de desexcitação, descrevem os processos que ocorrem quando o sistema já se encontra em equilíbrio [32]. Eles descrevem o decaimento de equilíbrio de um núcleo com a energia de excitação atingida no fim da etapa de Pré-Equilíbrio. O núcleo pode perder essa energia por meio da evaporação de nêutrons ou partículas leves carregadas, onde as partículas são emitidas isotropicamente. Outro meio de se perder a energia em excesso é por fissão em dois fragmentos de número atômico similar. Os produtos de fissão resultantes podem ainda sofrer evaporação, dependendo da sua energia de excitação.

Em nossas simulações, foram usadas as opções padrões para tais modelos, ou seja, o chamado modelo Bertini-Dresner [31] [33]. Esta escolha foi feita por causa de sua eficiência extensivamente testada, quando aplicada aos alvos de espalhamento, e pelo seu tempo de execução reduzido [18].

A produção de nêutrons líquida é registrada implicitamente no MCNPX.

Além disso, para avaliar o custo de funcionamento do acelerador de prótons, foi utilizado o conceito de valor de nêutrons (tradução livre para “neutron cost” [18]; também referido na literatura como “neutron value” [17] [34]). Este é dado pelo número de nêutrons produzidos normalizados por partícula incidente e pela energia do feixe, como mostrado na **Equação 4**.

$$Custo = \frac{(\#neutrons)}{(\#prótons).(Energia\ dos\ prótons)} \quad (4)$$

6 – APLICAÇÕES

Foi utilizado um feixe de prótons com uma seção reta de diâmetro de 7,2 centímetros e com um perfil espacial parabólico, descrita na **Figura 6**. As simulações foram feitas utilizando feixes de prótons de 350MeV e de 600MeV, uma vez que este é, de acordo com a literatura, a faixa de energia operacional para o MYRRHA [5]. Apêndice A mostra como exemplo um dos inputs utilizados no MCNPX.

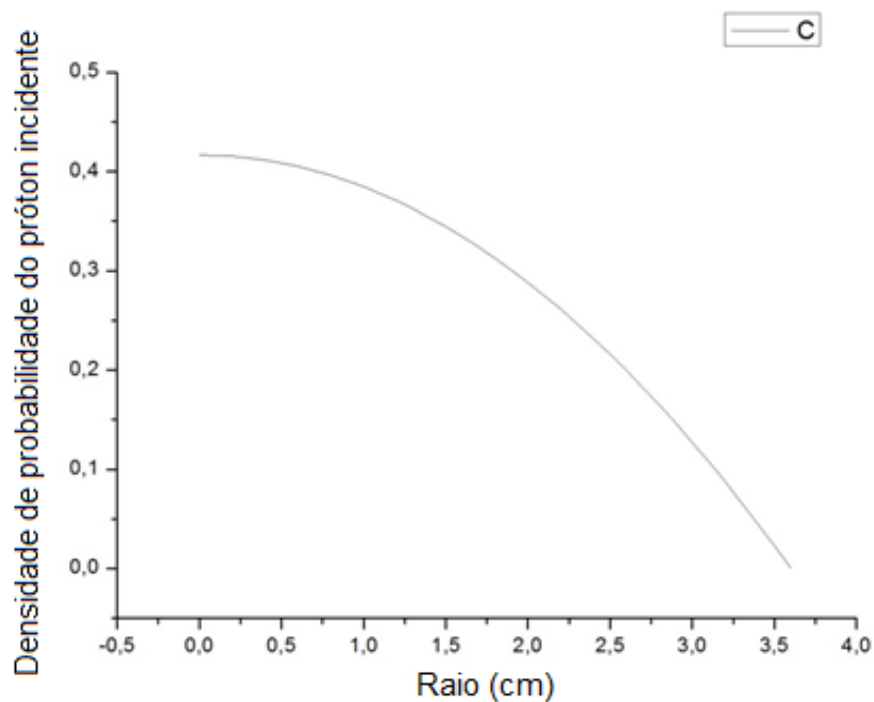


Figura 6: Função densidade de probabilidade do próton incidente por raio da fonte

Para o material da janela do feixe, foi adotada o ${}^9\text{Cr-2WVTa}$ devido ao seu comportamento bem conhecidos na temperatura de operação do MYRRHA e também à sua resistência à corrosão com o LBE [20]. Considerou-se uma janela de espessura de 2 milímetros.

O alvo simulado tem uma geometria cilíndrica e seus parâmetros geométricos, raio e comprimento, bem como a energia do feixe de prótons, foram variados a fim de encontrar limites de saturação na produção de nêutrons.

Para verificar a preferência do LBE como o material do alvo, também foi variado o material do alvo, utilizando outros metais que são líquidos à temperatura de funcionamento do MYRRHA e materiais que já tenham sido usados como um refrigerante em um reator nuclear, tais como NaK eutético e Hg.

A rede neural feedforward foi implementada usando o software MATLAB. O código implementado é mostrado no Apêndice B. A rede neural implementada é formada por três camadas [35]: uma camada de entrada, uma camada oculta e uma camada de saída.

Na camada escondida, foram utilizados dezoito neurônios e na camada de saída, um. A primeira função de transferência usada era do uma tangente hiperbólica sigmóide e a segunda função de transferência foi uma função de limite rígido (tradução livre para ‘hard limit function’). Um diagrama básico da rede neural utilizada pode ser visto na

Figura 7.

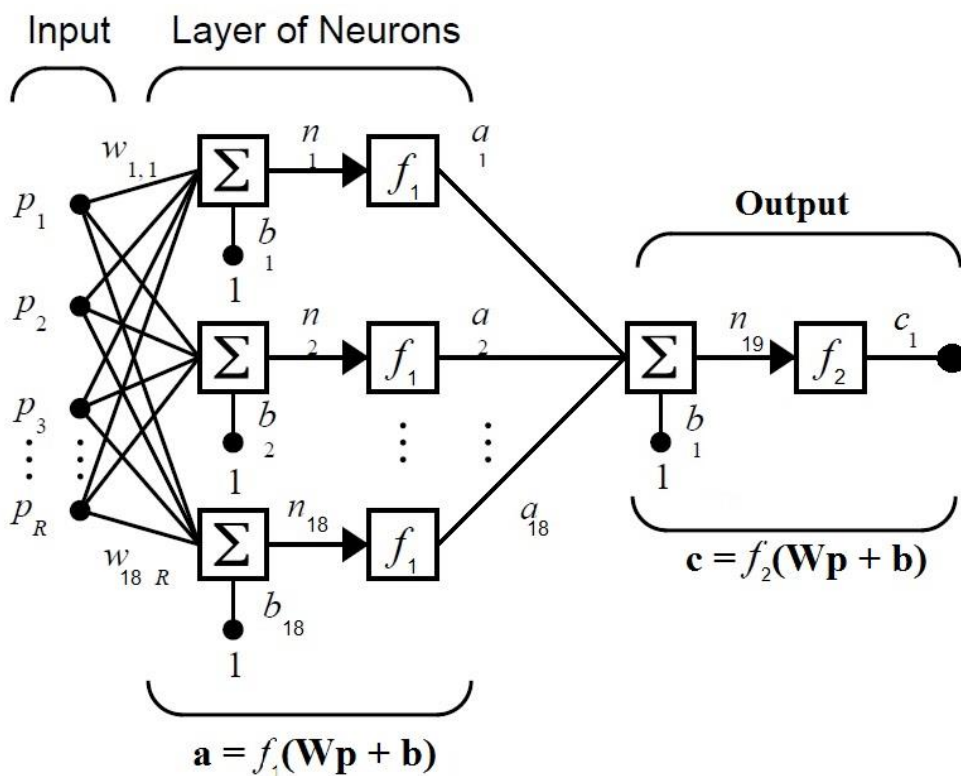


Figura 7: Esquema da rede neural implementada

Todos os 312 pontos simulados em MCNPX para cada tipo de alvo de spallation a uma dada energia de prótons foram utilizados como dados de treinamento e de teste para a rede neural. O treinamento foi feito com um total de 1000 épocas. Além disso, uma grade com 1 mm de espaçamento foi criada cobrindo todos os pontos simulados, para cada energia, e a rede neural gerou valores para a multiplicidade de nêutrons para a grade.

O algoritmo usado para a identificação de limites de saturação foi definir que um limite de saturação que é atingido em um ponto quando este ponto é comparado com o ponto com o diâmetro 5 mm maior e com o ponto com um comprimento 5 mm maior e ambas as diferenças são menores do que uma determinada variação máxima $\Delta_{\max}(n/p)$. Vários valores diferentes foram assumidos para esta variação máxima.

7 – RESULTADOS

Ao variar o material do alvo, observou-se que as maiores taxas ocorrem, respectivamente, para o Hg, Pb, LBE e Bi. Como o mercúrio tem várias desvantagens, incluindo toxicidade elevada e relativamente baixa condutividade térmica, a escolha do LBE como o material do alvo é realmente a melhor opção [5]. As produções de nêutrons para diferentes materiais de alvo considerando um alvo sem janela e que tenha um diâmetro de 10 centímetros e um comprimento de 40 cm são comparadas na **Figura 8**.

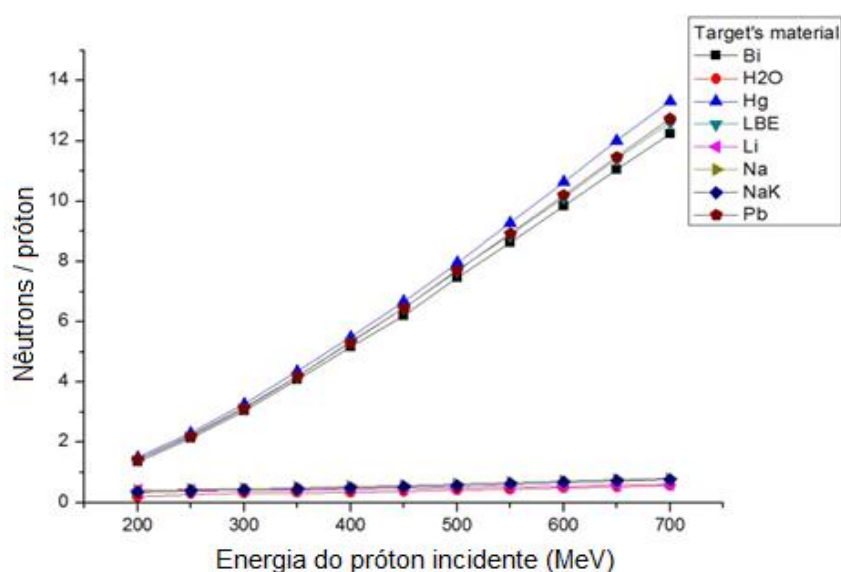


Figura 8: Multiplicidade de nêutrons para alvos de diferentes materiais

Figura 9 mostra a produção de nêutrons para um alvo com uma janela de dois milímetros de espessura e um feixe de prótons 350MeV, ao variar o comprimento do alvo (l) e o seu diâmetro. **Figura 10** mostra a produção de nêutrons para um alvo sem janelas e as mesmas variações. Como pode ser visto nestas duas figuras, o rendimento de nêutrons nestes tipos de alvo majoritariamente difere em alvos com comprimentos pequenos, até 20 cm comprimento. Para comprimentos maiores, os rendimentos de nêutrons são quase os mesmos, com os alvos sem janela sendo ligeiramente mais produtivo (menos do que 0,05 n / p de diferença). Além disso, a diferença entre eles decai com o aumento do diâmetro do alvo. **Figura 9 e Figura 10** também mostram que

a multiplicidade de nêutrons evidentemente estabiliza, mostrando que há um ponto além do qual não é rentável adotar parâmetros maiores, como nenhum aumento relevante é observado.

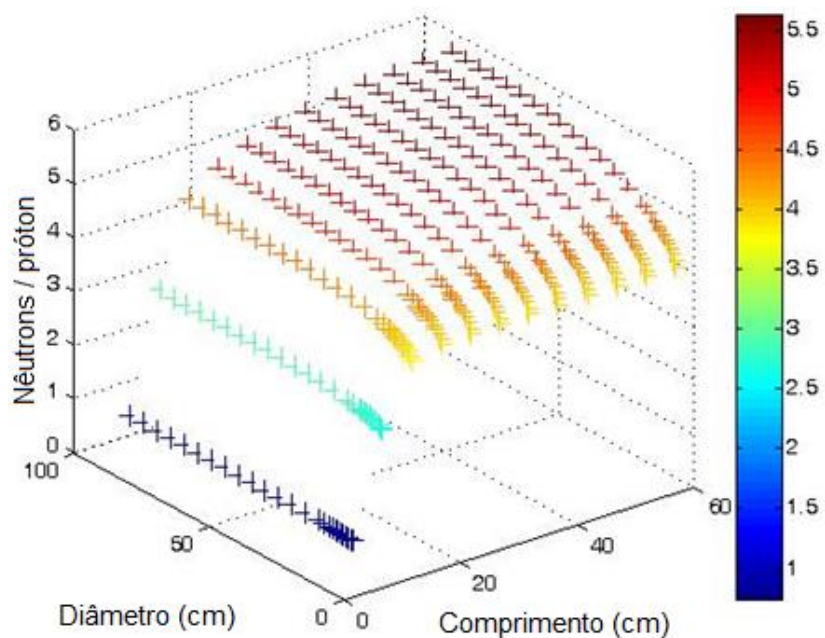


Figura 9: Alvo com janela para um feixe de prótons de 350MeV

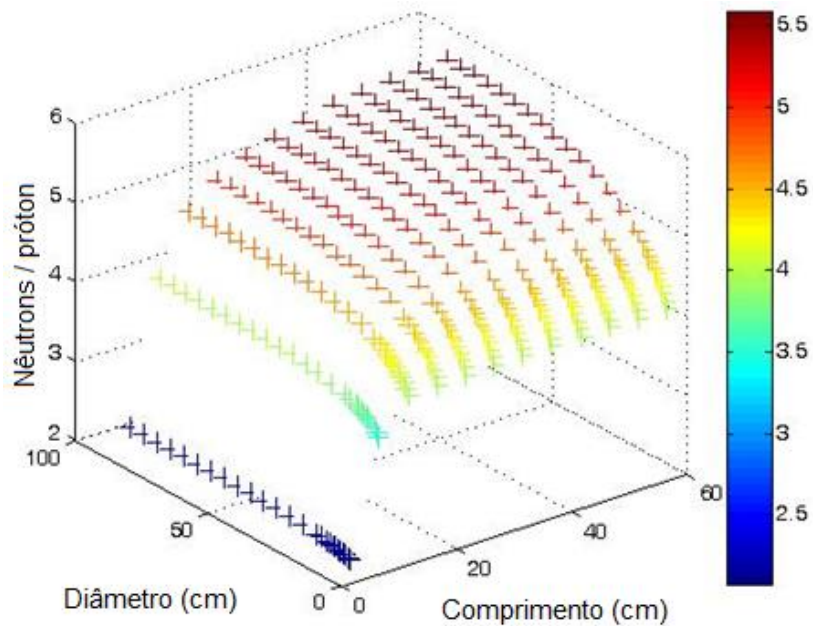


Figura 10: Alvo sem janela para um feixe de prótons de 350MeV

Com os pontos mostrados nas **Figura 9 e Figura 10**, a rede neural foi capaz de encontrar os limites de saturação para diferentes valores de variação máxima. Os parâmetros associados a cada valor encontrado pela rede são mostrados na **Tabela 1**. **Tabela 1** também mostra o erro médio de NN durante o treinamento. Este erro é calculado como o erro entre a generalização da rede neural e os dados reais.

| | Alvo sem janela 350MeV | | | Alvo com janela 350MeV | | |
|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------|---------------------------|---------------------|---------------|
| Erro | 0.0046 | | | 0.0049 | | |
| $\Delta_{max}(n/p)$ | Diâmetro (cm) | Comprimento (cm) | $\frac{n}{p}$ | Diâmetro (cm) | Comprimento (cm) | $\frac{n}{p}$ |
| 0.0010 | 55.90 | 46.20 | 5.3733 | - | - | - |
| 0.0025 | 51.80 | 42.80 | 5.3178 | 68.80 | 52.50 | 5.4996 |
| 0.0050 | 43.20 | 35.70 | 5.1673 | 48.20 | 39.50 | 5.2558 |
| 0.0100 | 24.40 | 20.30 | 4.6530 | 27.90 | 24.80 | 4.7479 |
| 0.0250 | 9.10 | 13.50 | 3.9987 | 9.20 | 15.70 | 3.9259 |
| 0.0500 | 7.20 | 6.60 | 3.1605 | 7.20 | 14.10 | 3.6756 |

Tabela 1: Limites de saturação para um feixe de prótons de 350MeV

Além disso, considerando-se um feixe de prótons de 600MeV, o mesmo comportamento é observado, como é mostrado nas **Figura 11 e Figura 12**. As maiores diferenças de novo acontecem em alvos com pequenos comprimentos, até 20cm. Os limites de saturação encontrados para alguns valores de variações máximas são mostrados na **Tabela 2**.

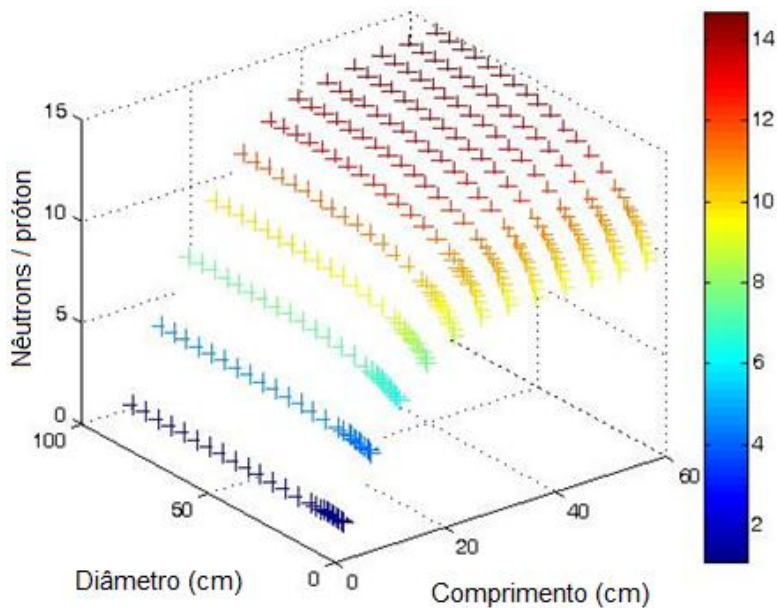


Figura 11: Alvo com janela para um feixe de prótons de 600MeV

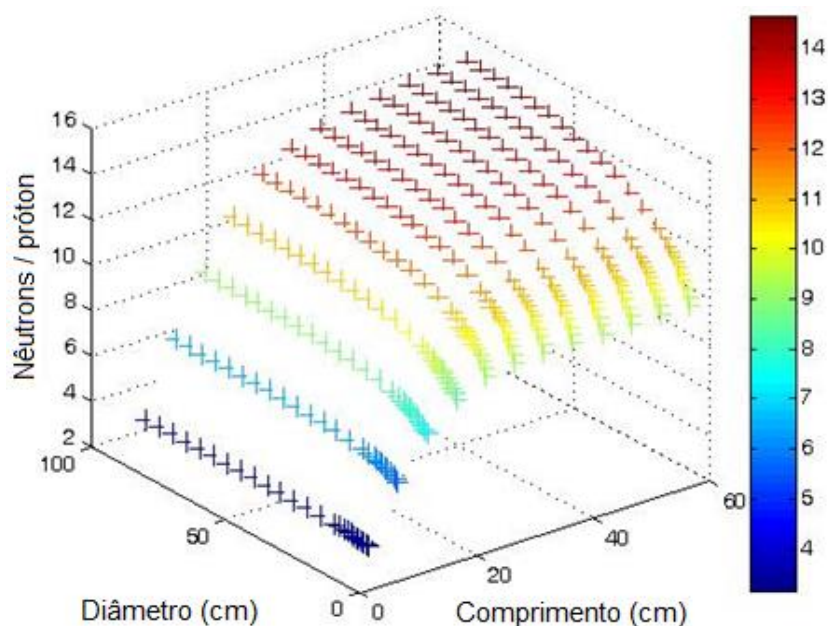


Figura 12: Alvo sem janela para um feixe de prótons de 600MeV

| | Alvo sem janela 600MeV | | | Alvo com janela 600MeV | | |
|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------|---------------------------|---------------------|---------------|
| Erro | 0.0212 | | | 0.0118 | | |
| $\Delta_{max}(n/p)$ | Diâmetro (cm) | Comprimento (cm) | $\frac{n}{p}$ | Diâmetro (cm) | Comprimento (cm) | $\frac{n}{p}$ |
| 0.0050 | 73.40 | 59.20 | 14.4771 | - | - | - |
| 0.0075 | 69.60 | 58.80 | 14.4258 | 76.40 | 58.30 | 14.5046 |
| 0.0100 | 66.20 | 57.90 | 14.3575 | 66.40 | 53.20 | 14.2385 |
| 0.0175 | 42.30 | 57.80 | 13.5732 | 47.20 | 42.00 | 13.4292 |
| 0.0250 | 34.40 | 32.00 | 12.5445 | 35.30 | 35.70 | 12.6577 |
| 0.0500 | 16.60 | 26.80 | 10.9009 | 18.60 | 29.50 | 11.0564 |
| 0.0750 | 10.80 | 22.70 | 9.5716 | 11.70 | 26.80 | 9.8494 |
| 0.1000 | 7.90 | 19.10 | 8.4135 | 8.50 | 22.50 | 8.4662 |

Tabela 2: Limites de saturação para um feixe de prótons de 600MeV

Ao variar a energia do próton incidente, observou-se que, para ambos os modelos de alvo, a multiplicidade de nêutrons varia de forma quase linear, não apresentando, portanto, quaisquer limites de saturação. As produções de nêutrons como uma função da energia do próton incidente para um alvo com janela e sem janela, que tem um diâmetro de 10 centímetros e um comprimento de 40 cm, são mostradas nas **Figura 13 e Figura 14**, respectivamente.

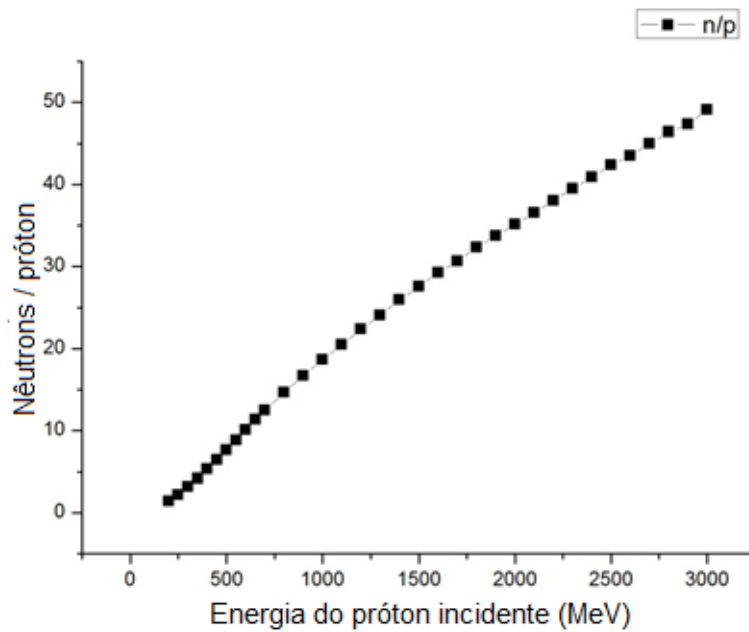


Figura 13: Multiplicidade de nêutrons como função da energia do próton incidente para um alvo com janela

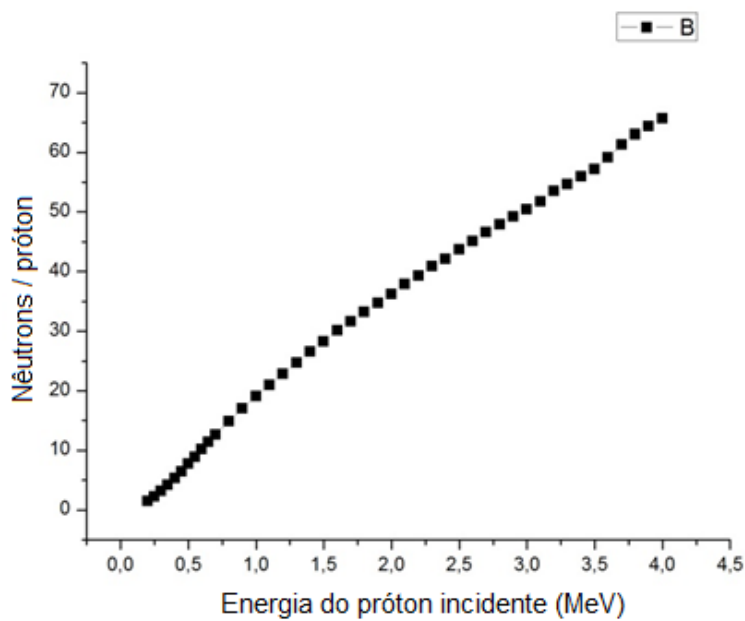


Figura 14: Multiplicidade de nêutrons como função da energia do próton incidente para um alvo sem janela

Observou-se um máximo no custo de nêutrons para prótons de cerca de 1,1 GeV, para os dois modelos de alvo de espalhamento, como é mostrado nas **Figura 15 e Figura**

16. Adequando um polinômio de grau 5 aos gráficos dos pontos simulados e calculando a derivada deste polinômio, concluiu-se que o valor máximo para a alvo com janela ocorre em 1.088,90 MeV e, para o alvo sem janela, em 1.125,16 MeV. Estas energias definem as condições ótimas de trabalho do acelerador do sistema ADS, em relação à economia.

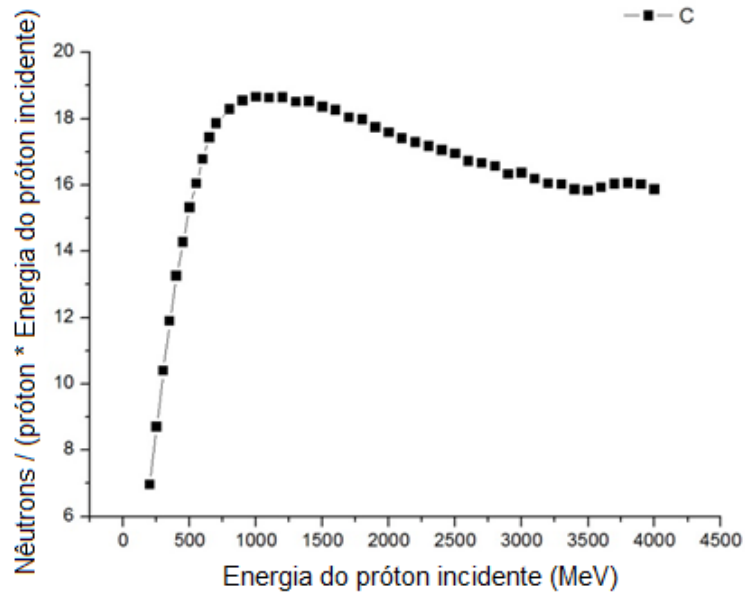


Figura 15: Custo de nêutrons para um alvo com janela

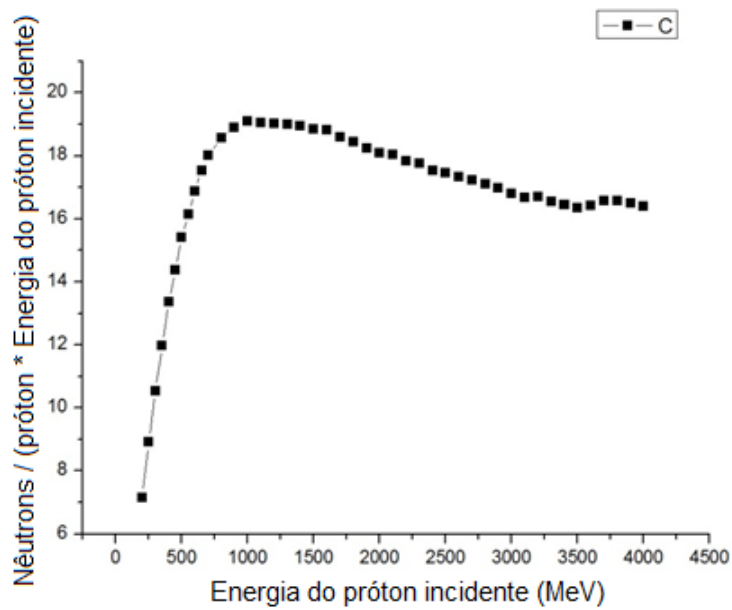


Figura 16: Custo de nêutrons para um alvo sem janela

8 – CONCLUSÕES

Neste projeto de Graduação, simulações com o MCNPX foram feitas a fim de encontrar os limites de saturação na produção de nêutrons e comparar o comportamento da multiplicidade de nêutrons em dois modelos diferentes de alvo de espalhamento: alvos com e sem janela. A rede neural criada ajustou bem os dados, já que os erros obtidos foram pequenos em todos os casos. Finalmente, pode-se concluir que há limites de saturação na multiplicidade de nêutrons ao variar o comprimento e diâmetro do alvo. Por outro lado, não foram encontrados limites de saturação quando se variou a energia do próton incidente. Além disso, pode concluir-se que, em relação à multiplicidade de nêutrons, o alvo com janela é tão viável quanto o sem. Isso mostra que, embora o alvo com janela seja sugerido para o reator MYRRHA, devido à dificuldade acarretada pelo compartilhamento do vácuo, alvos sem janela podem vir a serem utilizados em projetos futuros.

Para futuros trabalhos, propõe-se incorporar à rede neural a energia do próton incidente. Deste modo, a rede poderia ser um modelo de predição on-line da taxa de nêutrons produzidos por próton, haja vista que na operação normal do reator, a energia do feixe de prótons pode variar e a geometria do alvo, não se altera. Também se sugere que outros tipos de rede sejam aplicados (rede neural de base radial, por exemplo), e que seus comportamentos sejam comparados com o neste trabalho encontrado.

Propõe-se ainda que futuramente seja feito um estudo do comportamento de reatores subcríticos de modo a se obter outros parâmetros associados ao seu funcionamento, a partir de uma simulação do reator utilizando o Método de Monte Carlo. Tais parâmetros poderiam ser utilizados para se validar a formulação da Equação da Cinética Pontual encontrada no projeto de iniciação anterior. Deve-se ressaltar que atualmente ainda não existe nenhum reator deste tipo em operação comercial, e o primeiro protótipo de pesquisas está ainda em projeto na Bélgica (MYRRHA). Assim sendo, o comportamento neutrônico desses reatores deve ser simulado até que algum reator desse tipo entre em operação.

9 – PRODUÇÃO CIENTÍFICA

[1] REBELLO JUNIOR, A. L. P. , MARTINEZ, A. S. , GONCALVES, A. C. (2013) Parametric study of spallation targets for the MYRRHA reactor using MCNPX simulations and neural networks, Eleventh International Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerators - AccApp 2013, Bruges, Bélgica (Apresentação de Trabalho em Congresso Internacional com publicação de anais)

[2] REBELLO JUNIOR, A. L. P. , MARTINEZ, A. S. , GONCALVES, A. C. (2013) Parametric Study of Spallation Targets for The MYRRHA Reactor Using MCPNX Simulationa, Terceira Semana de Engenharia Nuclear da UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil (Apresentação de Trabalho em Congresso Nacional)

[3] REBELLO JUNIOR, A. L. P. , MARTINEZ, A. S. , GONCALVES, A. C. (2013) Estudo paramétrico de alvos de espalhamento para o reator MYRRHA usando simulações em MCNPX, Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Artística e Cultural, Rio de Janeiro, Brasil (Apresentação de Trabalho em Congresso Nacional)

[4] REBELLO JUNIOR, A. L. P. , MARTINEZ, A. S. , GONCALVES, A. C. (2013) Geometric optimization of spallation targets for the MYRRHA reactor using MCNPX simulations, International Nuclear Atlantic Conference - INAC, Pernambuco, Brasil (Apresentação de Trabalho em Congresso Internacional – Segundo lugar na sessão Poster Junior)

10 – REFERÊNCIAS

1. LOVELOCK, J. **Gaia: Alerta Final** (Título Original: "The vanishing face of Gaia: a final warning"). Rio de Janeiro: Intrínseca, 2009. 36 p.
2. U.S. DOE NUCLEAR ENERGY RESEARCH ADVISORY COMMITTEE AND THE GENERATION IV INTERNATIONAL FORUM. **GIF-002-00: A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems**. [S.l.]. 2002.
3. RUBBIA, C. **A High Gain Energy Amplifier Operated with fast Neutrons**. AIP Conf. Proc. 346, 44. Las Vegas: [s.n.]. 1995.
4. MYRRHA: an Accelerator Driven System (ADS). Disponível em: <<http://myrrha.sckcen.be/en/MYRRHA/ADS>>. Acesso em: 15 fev. 2016.
5. ABDERRAHIM, H. A.; AL, E. MYRRHA: A multipurpose accelerator driven system for research & development. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research** **463**, p. 487-494, 2001.
6. REBELLO JUNIOR, A. L. P.; MARTINEZ, A. S.; GONÇALVES, A. D. C. Analytical solution of modified point kinetics equations for linear reactivity variation in subcritical nuclear reactors adopting an incomplete gamma function approximation. **Natural Science**, v. 4, p. 919-923, 2012.
7. GANDINI, A.; SALVATORES, M. The Physics of Subcritical Multiplying Systems. **Journal of Nuclear Science and Technology**, v. 39, n. 6, p. 673-686, 2002.
8. BAUER, G. S.; SALVATORES, M.; HEUSENER, G. MEGAPIE, a 1 MW pilot experiment for a liquid metal spallation target. **Journal of Nuclear Materials**, v. 296, p. 17-22, 2001.
9. WAGNER, W. et al. MEGAPIE at SINQ – The first liquid metal target driven by a megawatt class proton beam. **Journal of Nuclear Materials**, v. 377, n. 1, p. 12-16, 2008.
10. BAUER, G. S. Overview on spallation target design concepts and related materials issues. **Journal of Nuclear Materials**, v. 398, p. 19-27, 2010.
11. MAJERLE, M. et al. Experimental studies and simulations of spallation neutron production on a thick lead target. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 41, p.

- 331-339, 2006.
12. MAJERLE, M. **Monte Carlo methods in spallation experiments**. [S.l.]: Lambert Academic Publishing, 2010.
 13. SHVETSOV, N. et al. **The subcritical assembly at DUBNA (SAD): coupling all major components of an accelerator driven system (ADS) for nuclear waste incineration**. IAEA-CN-115. Dubrovnik, Croatia: [s.n.]. 2005.
 14. CUGNON, J.; VOLANT, C.; VUILLIER, S. Nucleon and deuteron induced spallation reactions. **Nuclear Physics A**, v. 625, n. 4, p. 729-757, 1997.
 15. VASSIL'KOV, R. G.; YUREVICH, V. I. **Neutron emission from an extended lead target under the action of light ions in the GeV region**. Proceedings of the 11th Meeting of International Collaboration on Advanced Neutron Sources ICANS-11. Tsukuba, Japan: [s.n.]. 1990.
 16. NIKOLAEV, V. A.; YUREVICH, V. I.; YAKOVLEV, R. M. **Neutron Production in Thick Lead Target by 1-3.7 GeV Protons and Deuterons**. ICANS-XI International Collaboration on Advanced Neutrons Sources. KEK, Tsukuba, Japan: [s.n.]. 1990.
 17. BARROS, P. G. et al. Neutron production evaluation from a ADS target utilizing the MCNPX 2.6.0 code. **Braz. J. Phys.**, v. 40, n. 4, Dezembro 2010.
 18. KRÁSA, A. **Energy plus Transmutation Project: Neutron production in spallation reactions and their usage**. [S.l.]: Lambert Academic Publishing, 2010.
 19. SATYAMURTHY, P.; BISWAS, K. **Design of a LBE spallation target for fast-thermal accelerator-driven sub-critical system (Ads)**. Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA): Organisation for Economic Co-Operation and Development - Nuclear Energy Agency. [S.l.]: [s.n.]. 2003.
 20. CHO, C. H. Numerical design of a 20MW lead-bismuth spallation target for an accelerator-driven system. **Nuclear Engineering and Design**, v. 229, p. 317-327, 2004.
 21. BATTA, A.; CLASS, A. **Numerical Investigations on Geometrical Designs of the Windowless XT ADS Spallation Target**. Proceedings of ICAPP. Nice, France: [s.n.]. 2007.

22. KIKUCHI, K. et al. Lead-Bismuth Eutectic Compatibility with Materials in the Concept of Spallation Target for ADS. **JSME International Journal Series B**, v. 47, n. 2, p. 332-339, 2004.
23. DE BRUYN, D. et al. The MYRRHA ADS Project in Belgium Enters the Front End Engineering Phase. **Physics Procedia** **66**, 2015. 75-84.
24. KROSE, B.; VAN DER SMAGT, P. **An introduction to Neural Networks**. [S.l.]: University of Amsterdam, 1996.
25. JUNCAL, T. S. **Method to identification of control rod drops in PWR reactor**. Dissertação de mestrado: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.
26. CANEDO, J. A. C. **Particle swarm as optimization tool in complex nuclear engineering problems**. Tese de Doutorado: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
27. PELOWITZ, D. B. **MCNPX Users Manual**. Version 2,6. 2007.
28. KRIZEK, F. The study of spallation reactions, neutron production, and transport in a thick lead target and a uranium blanket during 1.5 GeV proton irradiation. **Czechoslovak Journal of Physics**, v. 56, n. 3, p. 243-252, 2006.
29. ZEMAN, J. **Reactor Physics I (Título original: "Reaktorová fyzika I")**. [S.l.]: ČVUT, 2003.
30. BOUDARD, A. et al. Intranuclear cascade model for a comprehensive description of spallation reaction data. **Phys. Rev. C** **044615**, v. 66, n. 4, 2002.
31. BERTINI, H. W. Low-energy Intranuclear Cascade Calculation. **Phys. Rev.**, v. 131, p. 1801-1821, 1963.
32. BURIGO, L. N. **Hadronterapia: Simulações da contribuição de processos nucleares para o tratamento de tumores**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Física: Dissertação de Mestrado, 2011.
33. DRESNER, L. **EVAP: A FORTRAN program for calculating the evaporation of various particles from excited compound nuclei**. Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA. 1962.
34. ROSSI, P. C. R.; MAIORINO, J. R. **The utilization of MCNPX 2.5 for ADS**

target calculation. 2007 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2007.
Santos, SP, Brasil: [s.n.]. 2007.

35. SVOZIL, D. Introduction to multi-layer feed-forward neural networks.

Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, v. 39, n. 1, p. 43-62, 1997.

APÊNDICE A – Exemplo de input do MCNPX

O exemplo mostrado abaixo é um input que simula um alvo sem janela de 10cm de comprimento e 6.5cm de raio. O alvo neste exemplo está sendo bombardeado por um feixe de prótons de 350MeV de energia.

```
1 C Alvo (Metal)
2 1 1 -10.5 -1 2 -3 imp:n,h=1
3 C Universo Interior (Ar)
4 2 2 -0.125 -4 5 -6 #1 imp:n,h=0
5 C Universo Exterior (Vácuo)
6 3 0 4 -5 6 imp:n,h=0
7
8 C Alvo
9 1 CZ 6.5 $Raio do alvo
10 2 PZ 0
11 3 PZ 10 $Comprimento do Alvo
12 C Universo
13 4 CZ 50 $Raio
14 5 PZ -30
15 6 PZ 100 $Comprimento
16
17 mode h n
18 PHYS:H 1100 0.000001 -1 J 0
19 SDEF POS=0 0 0 AXS=0 0 1 EXT=0 RAD=D1 PAR=9 ERG=350 VEC=0 0 1 DIR=1
20 sil a 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 1.1 1.2 1.3 &
21 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2.0 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 2.7 &
22 2.8 2.9 3.0 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6
23 sp1 12.96 12.95 12.92 12.87 12.8 12.71 12.6 12.47 12.32 12.15 11.96 &
24 11.75 11.52 11.27 11.0 10.71 10.4 10.07 9.72 9.35 8.96 8.55 8.12 7.67 &
25 7.2 6.71 6.2 5.67 5.12 4.55 3.96 3.35 2.72 2.07 1.4 0.71 0.0
26 nps 30000
27 print 110
28 F2:n 3 T
29 *F1:n 2 T
30 m1 82206.66c -0.1137 &
31 82207.66c -0.0985 &
32 82208.66c -0.2328 &
33 83209.24c -0.5550
34 m2 7014.42c -0.755 & $ar
35 8016.21c -0.235 &
36 18000.42c -0.01
```


APÊNDICE B – Rede Neural implementada em MATLAB

Abaixo se encontra o código da rede neural implementada em MATLAB. Nele, foi dada a opção de se utilizar dois tipos de rede neural: rede Feed-Forward e rede de Base Radial. Entretanto, apenas a rede feed-forward foi utilizada na execução deste trabalho.

```
1 %*****
2 % Method - Produção de Nêutrons por Prótons
3 %*****
4 function [] = RedesNeuraisProducaoNeutrons ()
5
6     clc , clear all , close all
7
8     %*****
9     % Variáveis de Entrada - Comprimento - Diâmetro -
10    %*****
11
12    Comprimento = [5:5:60];
13    Diametro     = [7.2, 8.16 , 18, 20:5:90 ];
14
15    %*****
16    % Targets - Produção de Nêutrons por Prótons - Windowless 350 Mev
17    %*****
18
19    Rendimento = [
20
21    2.07858 3.49647 3.9099 3.93855 3.94736 3.95258 3.95608 3.95878 3.95938 3.96048 3.96038 3.96038;
22    2.08584 3.55024 3.98084 4.01491 4.02393 4.03104 4.03395 4.03635 4.03815 4.03825 4.03825 4.03835;
23    2.0996 3.59514 4.04714 4.08934 4.08934 4.11221 4.11551 4.11742 4.12142 4.12192 4.12232 4.12252;
24    2.10997 3.62885 4.10162 4.15516 4.17101 4.18263 4.18634 4.18935 4.19335 4.19395 4.19476 4.19536;
25    2.12073 3.65976 4.15066 4.21065 4.23191 4.24704 4.24955 4.25476 4.25816 4.25986 4.26106 4.26177;
26    2.12748 3.68545 4.19265 4.25788 4.28837 4.30331 4.31072 4.31523 4.31844 4.31984 4.32144 4.32214;
27    2.13564 3.70303 4.21181 4.29088 4.32901 4.34577 4.35559 4.3608 4.36321 4.36452 4.36642 4.36722;
28    2.14448 3.72821 4.25701 4.34615 4.3857 4.40728 4.4193 4.42472 4.42933 4.43103 4.43303 4.43433;
29    2.14932 3.75049 4.2909 4.38472 4.429 4.45441 4.46874 4.47496 4.48058 4.48229 4.48349 4.4859;
30    2.15536 3.76324 4.32042 4.43019 4.48151 4.50797 4.52371 4.53304 4.53896 4.54086 4.54277 4.54497;
31    2.16951 3.79915 4.36673 4.48698 4.54612 4.57492 4.59609 4.60373 4.61187 4.61678 4.61879 4.62059;
32    2.17247 3.81248 4.39843 4.53706 4.60824 4.64738 4.67256 4.68662 4.69647 4.7053 4.70791 4.71162;
33    2.19257 3.86607 4.51267 4.65605 4.73457 4.78145 4.8206 4.83884 4.85496 4.86594 4.87229 4.87521;
34    2.20814 3.90566 4.5687 4.73478 4.8407 4.90175 4.9431 4.97072 4.9859 4.99661 5.00246 5.00822;
35    2.21528 3.93118 4.59276 4.80016 4.89812 4.9735 5.02703 5.0556 5.0848 5.1028 5.11112 5.12076;
36    2.2232 3.95796 4.63541 4.85343 4.97694 5.05923 5.12574 5.16246 5.1908 5.20638 5.2184 5.23306;
37    2.22565 3.96466 4.65903 4.87354 5.01877 5.09736 5.16416 5.21119 5.23659 5.25359 5.26452 5.28165;
38    2.22936 3.97923 4.67992 4.91576 5.06125 5.14529 5.20812 5.26033 5.29751 5.32721 5.33447 5.34171;
39    2.23067 3.98954 4.69666 4.93311 5.08349 5.19472 5.26458 5.31556 5.35745 5.3814 5.39602 5.41211;
40    2.23368 3.9881 4.69691 4.95611 5.10794 5.20571 5.30199 5.35597 5.39151 5.42211 5.43174 5.44655;
41    2.23328 3.98727 4.713 4.9724 5.12706 5.24699 5.31136 5.37188 5.41145 5.43824 5.46587 5.49197;
42    2.23249 3.98983 4.71572 4.97888 5.13479 5.2671 5.33493 5.40508 5.42767 5.46833 5.48901 5.52133;
43    2.23299 3.99697 4.72257 4.99439 5.15087 5.26778 5.34165 5.4136 5.45273 5.46968 5.5019 5.53188;
44    2.23269 3.99908 4.72788 4.99393 5.1631 5.28723 5.37831 5.43679 5.4809 5.50723 5.53919 5.57352;
45    2.23289 4.0007 4.73168 4.99322 5.15808 5.28277 5.37377 5.43584 5.4828 5.52691 5.5469 5.57226;
46    2.23279 4.00321 4.73948 4.99908 5.17003 5.29373 5.39155 5.46919 5.50488 5.5417 5.55869 5.58794];
47
48    %*****
49    % Targets - Produção de Nêutrons por Prótons - Windows 350 Mev
50    %*****
51
52    Rendimento = [
53
54    0.74434 2.62767 3.74186 3.86644 3.88917 3.90008 3.90579 3.90729 3.90889 3.91039 3.91069 3.91059;
55    0.74464 2.66401 3.81229 3.94981 3.97556 3.98997 3.99718 4.00049 4.00289 4.00389 4.00409 4.00479;
56    0.74973 2.69487 3.8745 4.02219 4.05316 4.07358 4.0819 4.0861 4.08931 4.09151 4.09151 4.09241;
57    0.75157 2.71821 3.92067 4.08462 4.12572 4.14726 4.15648 4.16098 4.16349 4.16589 4.16599 4.16709;
58    0.75567 2.73013 3.96165 4.13688 4.18451 4.20646 4.21759 4.2243 4.22911 4.23341 4.23351 4.23501;
59    0.75779 2.74777 3.99275 4.18598 4.23203 4.25959 4.27343 4.27954 4.28525 4.28875 4.28906 4.29026;
60    0.75975 2.76762 4.02954 4.22423 4.28103 4.31182 4.32646 4.33337 4.34009 4.34279 4.3432 4.3452;
61    0.76389 2.77773 4.0568 4.27461 4.33947 4.37248 4.39032 4.39866 4.40588 4.40989 4.41019 4.41289;
62    0.76482 2.78544 4.07743 4.29576 4.36556 4.4044 4.42316 4.436 4.44552 4.45124 4.45304 4.45425;
63    0.76542 2.79146 4.1033 4.3271 4.40621 4.45118 4.47456 4.48903 4.49816 4.50397 4.50668 4.50889;
64    0.77275 2.82107 4.14701 4.40717 4.49012 4.53641 4.56404 4.58293 4.59107 4.59648 4.59989 4.6029;
65    0.77516 2.84055 4.18259 4.444 4.54268 4.60923 4.6336 4.65552 4.66849 4.67581 4.68162 4.68343;
66    0.77922 2.87953 4.26035 4.56375 4.69105 4.76656 4.80875 4.83419 4.85333 4.86072 4.86925 4.87268;
67    0.78088 2.89965 4.3219 4.65502 4.78415 4.86927 4.925 4.95525 4.98341 4.99314 5.00422 5.00768;
68    0.78205 2.91845 4.33246 4.70246 4.86605 4.96016 5.02426 5.06412 5.09563 5.10968 5.11874 5.12829;
69    0.78636 2.92682 4.36567 4.73739 4.93659 5.02429 5.10116 5.14972 5.18539 5.20624 5.21408 5.22152;
70    0.78996 2.93959 4.40789 4.77669 4.99127 5.09453 5.1676 5.22475 5.26444 5.28821 5.30451 5.31206;
71    0.79022 2.94339 4.41706 4.80998 5.01398 5.12985 5.2217 5.29603 5.32736 5.35031 5.3783 5.3844;
72    0.79048 2.94355 4.41813 4.82392 5.0115 5.16195 5.25259 5.33165 5.37432 5.40791 5.42915 5.4464;
```

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|---|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|
| 73 | % | 0.79094 | 2.94381 | 4.43202 | 4.82423 | 5.03595 | 5.17873 | 5.27532 | 5.34376 | 5.39277 | 5.41867 | 5.44147 | 5.45722; |
| 74 | % | 0.79069 | 2.95034 | 4.43557 | 4.83741 | 5.0625 | 5.20233 | 5.30396 | 5.37681 | 5.4428 | 5.46682 | 5.49297 | 5.52034; |
| 75 | % | 0.79055 | 2.95516 | 4.44648 | 4.84113 | 5.07641 | 5.22069 | 5.31263 | 5.40462 | 5.46185 | 5.49513 | 5.51764 | 5.53889; |
| 76 | % | 0.79111 | 2.9576 | 4.45214 | 4.84381 | 5.09015 | 5.23913 | 5.3435 | 5.42157 | 5.48968 | 5.50558 | 5.53536 | 5.55258; |
| 77 | % | 0.79162 | 2.96061 | 4.46645 | 4.8536 | 5.10767 | 5.25385 | 5.35337 | 5.43501 | 5.49419 | 5.53782 | 5.56241 | 5.5784; |
| 78 | % | 0.79172 | 2.96022 | 4.46243 | 4.85744 | 5.11574 | 5.26734 | 5.3739 | 5.46184 | 5.51984 | 5.55143 | 5.57663 | 5.599; |
| 79 | % | 0.79175 | 2.96214 | 4.46873 | 4.86536 | 5.12389 | 5.27328 | 5.39148 | 5.48074 | 5.54416 | 5.57099 | 5.59478 | 5.61855]; |
| 80 | % | | | | | | | | | | | | |
| 81 | % | §***** | | | | | | | | | | | |
| 82 | % | § Targets - Produção de Nêutrons por Prótons - Windowless 600 Mev | | | | | | | | | | | |
| 83 | % | §***** | | | | | | | | | | | |
| 84 | % | | | | | | | | | | | | |
| 85 | % | Rendimento = [| | | | | | | | | | | |
| 86 | % | | | | | | | | | | | | |
| 87 | % | | | | | | | | | | | | |
| 88 | % | 3.16187 | 5.60669 | 7.28142 | 8.38657 | 9.00271 | 9.21676 | 9.241 | 9.24761 | 9.25162 | 9.25312 | 9.25502 | 9.25582; |
| 89 | % | 3.18777 | 5.69147 | 7.42283 | 8.61623 | 9.29827 | 9.54088 | 9.57033 | 9.58045 | 9.58766 | 9.59036 | 9.59376 | 9.59497; |
| 90 | % | 3.20856 | 5.75055 | 7.5457 | 8.79489 | 9.52142 | 9.79729 | 9.83257 | 9.8454 | 9.85401 | 9.85971 | 9.86462 | 9.86632; |
| 91 | % | 3.23616 | 5.81474 | 7.66463 | 8.96175 | 9.75461 | 10.06727 | 10.10937 | 10.12841 | 10.14143 | 10.14844 | 10.15344 | 10.15545; |
| 92 | % | 3.24944 | 5.88866 | 7.77007 | 9.12665 | 9.94446 | 10.28929 | 10.35244 | 10.37852 | 10.39555 | 10.40656 | 10.41257 | 10.41557; |
| 93 | % | 3.2631 | 5.94024 | 7.8765 | 9.26803 | 10.12472 | 10.48224 | 10.55243 | 10.58053 | 10.60056 | 10.61158 | 10.61859 | 10.62159; |
| 94 | % | 3.27176 | 5.98381 | 7.94243 | 9.3604 | 10.26564 | 10.6353 | 10.70255 | 10.73566 | 10.76371 | 10.77573 | 10.78274 | 10.78875; |
| 95 | % | 3.28893 | 6.02598 | 8.01547 | 9.45471 | 10.3735 | 10.78031 | 10.83556 | 10.87768 | 10.90274 | 10.91777 | 10.9308 | 10.93482; |
| 96 | % | 3.30309 | 6.06065 | 8.09038 | 9.55868 | 10.50354 | 10.91637 | 11.00173 | 11.0459 | 11.07399 | 11.09503 | 11.11005 | 11.11407; |
| 97 | % | 3.31096 | 6.0913 | 8.13957 | 9.65912 | 10.62451 | 11.06655 | 11.14698 | 11.19118 | 11.22729 | 11.24733 | 11.26136 | 11.26738; |
| 98 | % | 3.32976 | 6.14892 | 8.25112 | 9.78888 | 10.81643 | 11.26471 | 11.37631 | 11.45061 | 11.49178 | 11.51585 | 11.5289 | 11.53994; |
| 99 | % | 3.34125 | 6.20662 | 8.3712 | 9.9488 | 10.99448 | 11.50008 | 11.61594 | 11.69231 | 11.74756 | 11.7687 | 11.78779 | 11.80283; |
| 100 | % | 3.37832 | 6.29872 | 8.54379 | 10.21447 | 11.33053 | 11.90531 | 12.07977 | 12.18756 | 12.25499 | 12.30932 | 12.33251 | 12.35663; |
| 101 | % | 3.40555 | 6.37859 | 8.68461 | 10.45812 | 11.64463 | 12.22255 | 12.44699 | 12.5706 | 12.66047 | 12.72408 | 12.75146 | 12.77774; |
| 102 | % | 3.41142 | 6.42971 | 8.78281 | 10.59822 | 11.85743 | 12.49174 | 12.73615 | 12.92068 | 13.01619 | 13.07824 | 13.13094 | 13.15337; |
| 103 | % | 3.42037 | 6.45589 | 8.85525 | 10.71488 | 12.00578 | 12.6568 | 12.93353 | 13.12508 | 13.23534 | 13.31402 | 13.36825 | 13.40609; |
| 104 | % | 3.4256 | 6.49614 | 8.89479 | 10.79826 | 12.08986 | 12.84888 | 13.14422 | 13.3159 | 13.49441 | 13.58065 | 13.63637 | 13.66268; |
| 105 | % | 3.43162 | 6.5223 | 8.91993 | 10.88743 | 12.21239 | 12.90675 | 13.22365 | 13.45895 | 13.63765 | 13.73187 | 13.81434 | 13.86008; |
| 106 | % | 3.43554 | 6.54372 | 8.96125 | 10.93314 | 12.33066 | 13.02971 | 13.35929 | 13.61307 | 13.79905 | 13.90039 | 13.97394 | 14.03653; |
| 107 | % | 3.43735 | 6.55525 | 9.0014 | 10.98483 | 12.38459 | 13.08325 | 13.45965 | 13.72072 | 13.93038 | 14.06746 | 14.14365 | 14.21502; |
| 108 | % | 3.43906 | 6.56365 | 9.0144 | 11.01205 | 12.41297 | 13.16519 | 13.5685 | 13.81216 | 13.99541 | 14.15161 | 14.22282 | 14.2822; |
| 109 | % | 3.44056 | 6.57005 | 9.02738 | 11.055 | 12.49338 | 13.20578 | 13.62482 | 13.88913 | 14.10451 | 14.26169 | 14.35658 | 14.4209; |
| 110 | % | 3.44357 | 6.56098 | 9.04255 | 11.06491 | 12.48519 | 13.24193 | 13.68132 | 13.98766 | 14.17475 | 14.3183 | 14.44151 | 14.50324; |
| 111 | % | 3.44567 | 6.56702 | 9.05721 | 11.08081 | 12.49468 | 13.26858 | 13.6944 | 14.00861 | 14.21771 | 14.34218 | 14.43609 | 14.5437; |
| 112 | % | 3.44527 | 6.56006 | 9.06909 | 11.1074 | 12.54094 | 13.296 | 13.74703 | 14.05471 | 14.28397 | 14.44068 | 14.51932 | 14.61149; |
| 113 | % | 3.44637 | 6.56778 | 9.08456 | 11.12484 | 12.55004 | 13.3072 | 13.77758 | 14.10756 | 14.28798 | 14.44807 | 14.556 | 14.66767]; |
| 114 | % | | | | | | | | | | | | |
| 115 | % | §***** | | | | | | | | | | | |
| 116 | % | § Targets - Produção de Nêutrons por Prótons - Windows 600 Mev | | | | | | | | | | | |
| 117 | % | §***** | | | | | | | | | | | |
| 118 | % | | | | | | | | | | | | |
| 119 | % | Rendimento = [| | | | | | | | | | | |
| 120 | % | | | | | | | | | | | | |
| 121 | % | 1.10261 | 4.07591 | 6.20891 | 7.64465 | 8.56097 | 9.03274 | 9.14583 | 9.16496 | 9.17608 | 9.18008 | 9.18218 | 9.18338; |
| 122 | % | 1.10774 | 4.12831 | 6.33751 | 7.84528 | 8.80781 | 9.33696 | 9.46279 | 9.48413 | 9.49254 | 9.50105 | 9.50565 | 9.50825; |
| 123 | % | 1.12016 | 4.17396 | 6.44963 | 8.02432 | 9.06858 | 9.65184 | 9.79033 | 9.81919 | 9.83111 | 9.83962 | 9.84482 | 9.84913; |
| 124 | % | 1.12339 | 4.20615 | 6.51896 | 8.14657 | 9.25411 | 9.8759 | 10.02623 | 10.0663 | 10.08534 | 10.09835 | 10.10337 | 10.10837; |
| 125 | % | 1.12902 | 4.24004 | 6.61165 | 8.28053 | 9.43609 | 10.07898 | 10.26026 | 10.31436 | 10.33441 | 10.34543 | 10.35243 | 10.35944; |
| 126 | % | 1.13624 | 4.28216 | 6.68623 | 8.3905 | 9.57907 | 10.28099 | 10.47433 | 10.52247 | 10.54953 | 10.56255 | 10.57156 | 10.57858; |
| 127 | % | 1.14026 | 4.31485 | 6.71876 | 8.45253 | 9.6782 | 10.39897 | 10.61344 | 10.66259 | 10.69668 | 10.71572 | 10.72473 | 10.73675; |
| 128 | % | 1.14709 | 4.33235 | 6.79003 | 8.55566 | 9.80944 | 10.54804 | 10.77859 | 10.83381 | 10.86392 | 10.88496 | 10.89698 | 10.908; |
| 129 | % | 1.15011 | 4.36164 | 6.84523 | 8.63412 | 9.94955 | 10.70814 | 10.94779 | 11.01609 | 11.04521 | 11.07627 | 11.0913 | 11.09631; |
| 130 | % | 1.15424 | 4.37455 | 6.9055 | 8.71914 | 10.04281 | 10.8303 | 11.06907 | 11.15337 | 11.18754 | 11.21464 | 11.23466 | 11.24169; |
| 131 | % | 1.15658 | 4.40446 | 6.96764 | 8.86799 | 10.23874 | 11.06564 | 11.31861 | 11.42405 | 11.4743 | 11.50544 | 11.52953 | 11.53557; |
| 132 | % | 1.15811 | 4.4462 | 7.0526 | 8.98598 | 10.36854 | 11.24592 | 11.54217 | 11.64188 | 11.70515 | 11.74533 | 11.77045 | 11.78751; |
| 133 | % | 1.16535 | 4.52257 | 7.21326 | 9.25156 | 10.7118 | 11.60824 | 12.0015 | 12.15078 | 12.24148 | 12.28587 | 12.32922 | 12.35335; |
| 134 | % | 1.17278 | 4.54203 | 7.32758 | 9.42597 | 10.95856 | 11.94472 | 12.31717 | 12.51228 | 12.61755 | 12.69027 | 12.72678 | 12.75909; |
| 135 | % | 1.178 | 4.58445 | 7.39803 | 9.54472 | 11.1303 | 12.15399 | 12.58886 | 12.8201 | 12.94827 | 13.05274 | 13.08957 | 13.12809; |
| 136 | % | 1.17991 | 4.61526 | 7.46275 | 9.64847 | 11.31393 | 12.38043 | 12.82675 | 13.07549 | 13.23343 | 13.32254 | 13.374 | 13.40686; |
| 137 | % | 1.18192 | 4.63211 | 7.5197 | 9.72563 | 11.41992 | 12.50341 | 13.0226 | 13.28574 | 13.42688 | 13.55899 | 13.64322 | 13.70507; |
| 138 | % | 1.18514 | 4.64075 | 7.54934 | 9.76697 | 11.46522 | 12.64473 | 13.16711 | 13.43221 | 13.61403 | 13.76571 | 13.83438 | 13.93588; |
| 139 | % | 1.18585 | 4.65196 | 7.59252 | 9.81853 | 11.53144 | 12.71468 | 13.23457 | 13.55317 | 13.75347 | 13.90798 | 13.9977 | 14.06296; |
| 140 | % | 1.18705 | 4.65765 | 7.59642 | 9.87133 | 11.58427 | 12.79011 | 13.33172 | 13.6685 | 13.88727 | 14.04602 | 14.17001 | 14.24691; |
| 141 | % | 1.18825 | 4.6666 | 7.60936 | 9.8854 | 11.67482 | 12.87936 | 13.41914 | 13.74531 | 13.97775 | 14.09812 | 14.26115 | 14.31159; |
| 142 | % | 1.18785 | 4.66806 | 7.61797 | 9.90009 | 11.66061 | 12.89059 | 13.46541 | 13.80773 | 14.06584 | 14.2239 | 14.32869 | 14.39869; |
| 143 | % | 1.18816 | 4.66882 | 7.63329 | 9.91519 | 11.69246 | 12.99742 | 13.53457 | 13.90528 | 14.14767 | 14.29878 | 14.3972 | 14.52131; |
| 144 | % | 1.18856 | 4.66575 | 7.63436 | 9.92737 | 11.75225 | 13.00022 | 13.57999 | 13.89937 | 14.16555 | 14.37332 | 14.46392 | 14.59268; |

```

145 % 1.18926 4.67267 7.644 9.94403 11.77157 12.99935 13.60365 13.92751 14.2478 14.40183 14.56243 14.65796;
146 % 1.18996 4.6773 7.65249 9.96892 11.78653 12.99542 13.62368 13.98379 14.27509 14.44271 14.60492 14.68805];
147
148 %*****
149 % Montagem de Vetores e Matrizes
150 %*****
151
152 xC = Comprimento;
153 yD = Diametro;
154 nC = size(xC,2);
155 nD = size(yD,2);
156
157 [xxC, yyD] = meshgrid(xC,yD);
158 zzR = Rendimento;
159
160 %*****
161 % Dados de Treinamento da Rede Neural
162 %*****
163 % nP = Numero Total de Elementos da Matriz
164 % P1 = Conjunto de dados de Treinamento
165 % T1 = Target da Rede
166 %*****
167
168 nP = nC * nD;
169 P1 = [reshape(xxC,nP,1), reshape(yyD,nP,1)]'; % em linha
170 T1 = reshape(zzR,nP,1)'; % em linha
171
172 %*****
173 % Dados de Teste da Rede Neural
174 %*****
175 % P2 = Conjunto de Dados para a Rede já treinada
176 %*****
177
178 Comprimentol = [ 5:0.1:60 ]; % Malha da Rede (Comprimento)
179 Diametrol = [ 7.2:0.1:90 ]; % Malha da Rede (Diametro)
180
181 xC1 = Comprimentol;
182 yD1 = Diametrol;
183 nC1 = size(xC1,2);
184 nD1 = size(yD1,2);
185
186 [xxC1, yyD1] = meshgrid(xC1,yD1);
187
188 nP1 = nC1 * nD1;
189 P2 = [reshape(xxC1,nP1,1), reshape(yyD1,nP1,1)]'; % em linha
190
191 %*****
192 % Opcoes - de Redes
193 %*****
194 % Rede de Base Radial
195 %*****
196
197 flag.NewRBE = 0;
198 if flag.NewRBE == 1
199 [ Y1 , E1 ,Y2 ] = Rede_NEWRBE(P1, T1 ,P2 );
200 end
201
202 %*****
203 % Rede Feed Forward
204 %*****
205
206 flag.NewFF = 0;
207 if flag.NewFF == 1
208 [ Y1 , E1 ] = Rede_NEWFF (P1, T1 );
209 end
210
211 load Rede_NEWFF
212
213 Y2 = sim(net,P2);
214
215 %*****

```

```

216 % Plotagem de Figuras
217 %*****
218 %*****
219 % 1 - Figuras de Pontos de Treinamento
220 % 2 - Superfície de Dados de treinamento
221 % 3 - Diferença entre a Resposta da Rede e o Target
222 % 4 - Superfícies de Respostas da Rede
223 %*****
224
225 zzY1 = reshape(Y1',nD,nC);
226
227 zzY2 = reshape(Y2',nD1,nC1);
228
229 figure1 = figure('Name','Windoless 350 Mev','Color',[1 1 1]);
230
231 subplot(2,2,1), mesh(xC,yD,zzR,'MarkerSize',10,'Marker','+','LineStyle','none'), grid('on');
232 title('Pontos da Rede')
233 xlabel('Comprimento'), ylabel('Diametro'), zlabel('Nêutrons /Protons'), colorbar
234
235 subplot(2,2,2), surf(xC,yD,zzR), grid('on');
236 title('Pontos da Rede')
237 xlabel('Comprimento'), ylabel('Diametro'), zlabel('Nêutrons /Protons'), colorbar
238
239 subplot(2,2,3), surf(xC,yD,zzR-zzY1), grid('on');
240 title('Diferença entre Resposta da Rede e Dados')
241 xlabel('Comprimento'), ylabel('Diametro'), zlabel('Nêutrons /Protons'), colorbar
242
243 subplot(2,2,4), surf(xC1,yD1,zzY2), grid('on');
244 title('Generalização da Rede')
245 xlabel('Comprimento'), ylabel('Diametro'), zlabel('Nêutrons /Protons'), colorbar
246
247 %*****
248 % Plotagem da Curva Generalizada
249 %*****
250
251 figura2 = figure('Name','Windoless 350 Mev - Rede Neural','Color',[1 1 1]);
252
253 surf(xnC1,yD1,zzY2),grid('on');
254 title('Pontos da Rede Neural')
255 xlabel('Comprimento'), ylabel('Diametro'),zlabel('Nêutrons /Protons'), colorbar, hold on
256
257 mesh(xC,yD,zzR,'MarkerSize',10,'Marker','+','LineStyle','none','FaceLighting','none','FaceColor','none','EdgeColor',[1 1 1]), grid('on');
258
259 T1 = T1;
260 Y1 = Y1;
261 E1 = E1;
262 pontol = [1:length(T1)];
263
264
265 disp('-----')
266 disp('                      Y1 - T1 - Treinamento          ')
267 disp('-----')
268 disp('  PONTOS      T1      Y1      E1      ')
269 disp('-----')
270 disp([' pontol;          T1; Y1;  E1          '])
271 disp('-----')
272
273
274 %*****
275 % Cálculo da Média dos Erros
276 %*****
277
278 Erro = 0;
279 for k = pontol
280     Erro = Erro + abs (E1(k));
281 end
282
283 MediaErro = Erro / length(pontol)
284
285 [ D , C ] = Pt_Satura( zzY2 , Diametro1 , Comprimento1 );
286
287 return

```

```

288
289 %*****
290 % Rotina para pesquisa de ponto de saturação
291 %*****
292 % Delta : Limite para a variação de produção de Nêutrons
293 %*****
294
295 function [ D , C ] = Pt_Satura( zzY2 , Diametro1 , Comprimento1 )
296
297     Delta = 0.005;
298
299     for i = 1:length(Diametro1)-5
300         for j = 1:length(Comprimento1)-5
301
302             if abs( zzY2(i,j) - zzY2(i,j+5)) <= Delta && abs( zzY2(i,j) - zzY2(i+5,j)) <= Delta
303
304                 D = Diametro1(i) ;C = Comprimento1(j) ; Producao = zzY2(i,j);
305
306                 disp('-----')
307                 disp('                Ponto de Saturação                ')
308                 disp('-----')
309                 disp('   Diametro   Comprimento   Neutrons/Proton   ')
310                 disp('-----')
311                 disp([ D;                C;                Producao                ])
312                 disp('-----')
313
314                 return
315             end
316         end
317     end
318
319     return
320
321 %*****
322 % Rede_NEWRBE
323 %*****
324 function [Y1,E1, Y2 ] = Rede_NEWRBE (P1, T1 , P2 )
325
326 %*****
327 % P1 - Dados de Treino - Input
328 % T1 - Dados de Treino - Targets
329 % P2 - Dados de Teste - Input
330 %*****
331 % net - Rede de Funcoes de Base Radial
332 %*****
333
334 sig = 0.5;
335 rand('state',0)
336 net = newrbe(P1,T1, sig);
337
338 %*****
339 % Y1 - Resposta da rede treinada aos dados de treinamento
340 % Y2 - Resposta da rede treinada aos dados de teste
341 %*****
342
343 Y1 = sim(net,P1);
344 Y2 = sim(net,P2);
345
346 %*****
347 % Listar erros E1 = Y1 - T1 de Treinamento
348 %*****
349
350 E1 = Y1-T1;
351
352
353 return
354
355 %*****
356 % Method - Rede_NEWFF
357 %*****
358 function [Y1 , E1 ] = Rede_NEWFF (P1, T1 )
359

```

```

360 %*****
361 % P1 - Dados de Treino - Input
362 % T1 - Dados de Treino - Targets
363 % P2 - Dados de Teste - Input
364 %*****
365
366 PR = [min(P1,[1,2]), max(P1,[1,2])];
367
368 %*****
369 % Rede Feed Forward
370 %*****
371
372 rand('state',0)
373
374 S1 = 18; S2 =1;
375 TF1 = 'tansig';
376 TF2 = 'purelin';
377
378 net = newff(PR,[S1 S2],[TF1, TF2]);
379
380 %*****
381 % Realizando o treinamento da rede com o Input e o Targets
382 %*****
383
384 net.trainParam.epochs = 1000;
385 net.trainParam.goal = 0.0;
386 net.trainParam.show = 50;
387 net = train(net,P1,T1);
388
389 % set(gcf, 'Color', 'White'), grid on
390
391 %*****
392 % Y1 - Resposta da rede treinada aos dados de treinamento
393 % Y2 - Resposta da rede treinada aos dados de teste
394 %*****
395
396 Y1 = sim(net,P1);
397 % Y2 = sim(net,P2);
398
399 E1 = Y1-T1;
400
401 save Rede_NEWFF
402
403 return
404 %*****

```