

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E  
NUCLEARES (PROTEN)**

**DECONVOLUÇÃO DE ESPECTROS NEUTRÔNICOS OBTIDOS COM O  
SISTEMA EB-TLD UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS**

Joelan Angelo de Lucena Santos

Recife  
Setembro de 2011

**Deconvolução de espectros neutrônicos obtidos com o sistema EB-TLD  
utilizando algoritmos genéticos**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

Joelan Angelo de Lucena Santos

**DECONVOLUÇÃO DE ESPECTROS NEUTRÔNICOS OBTIDOS COM  
O SISTEMA EB-TLD UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS**

*Trabalho apresentado ao PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES (PROTEN), do DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR, da UNIVERSIDADE FEDERAL de PERNAMBUCO, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de Concentração: Dosimetria e Instrumentação Nuclear.*

Orientador: Prof. Dr. Êudice Correia Vilela

Co-orientador: Prof. Dr. Evaldo Simões da Fonseca

Recife  
Setembro de 2011

Catálogo na fonte  
Bibliotecário Marcos Aurélio Soares da Silva, CRB-4 / 1175

S237d Santos, Joelan Angelo de Lucena.  
Deconvolução de espectros neutrônicos obtidos com o sistema EB-TLD utilizando algoritmos genéticos / Joelan Angelo de Lucena Santos. - Recife: O Autor, 2011.  
123 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Êudice Correia Vilela.  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco.  
CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2011.

Inclui Referências e Apêndices.

1. Dosimetria. 2. Espectrometria de Nêutons. 3. Detectores Termoluminescentes. 4. Algoritmos Genéticos. I. Vilela, Êudice Correia. (Orientador). II. Título.

612.01448 CDD (22. ed.)

UFPE  
BCTG/2011- 270



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**AVALIAÇÃO DE SUSTENTABILIDADE EM EDIFÍCIOS:  
UM ESTUDO DE INDICADORES DE ÁGUA E ENERGIA  
NA UNIDADE DA FIOCRUZ DE PERNAMBUCO**

defendida por

Patrícia Martins Torres de Macedo

Considera a candidata APROVADA

Recife, 10 de outubro de 2011

---

Jose Jeferson do Rêgo Silva – UFPE  
(orientador)

---

Arnaldo Cardim de Carvalho Filho – UPE  
(examinador externo)

---

Jaime Joaquim da Silva-Pereira Cabral – UFPE  
(examinador interno)

*Aos meus pais, irmãos e  
especialmente à minha esposa  
Isabel e minha filha Giovana, pelas  
minhas constantes ausências.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo que aconteceu em minha vida e por aquilo que ainda vai acontecer;

À minha família;

Aos meus amigos, cujos nomes não caberiam nesta folha;

Ao meu orientador Prof. Dr. *Éudice Vilela* (CNEN/CRCN-NE), pela imensa paciência ao longo dos mais de 10 anos de convivência. Pelas cobranças, as quais me motivaram a continuar caminhando, bem como na influência decisiva na minha formação acadêmica, ética e profissional;

Ao meu co-orientador Prof. Dr. *Evaldo Simões* (CNEN/IRD-RJ), pelas discussões, motivação e suporte;

Ao Prof. Dr. *Tiago Ferreira* (DEInfo/UFRPE), pela imensa colaboração neste trabalho, inspirador de metas futuras e pela certeza de uma nova amizade;

Ao Prof. Dr. *Fernando de Andrade Lima* (CNEN/CRCN-NE), pelo apoio sempre prestado durante minha formação acadêmica e apontamentos durante a realização deste trabalho;

Ao Prof. Dr. *Carlos Brayner* (UFPE/DEN), pelo apoio e apontamentos durante a realização deste trabalho;

Ao Prof. Dr. *Ricardo de Andrade Lima* (CNEN/CRCN-NE), pelo apoio sempre prestado para a minha formação acadêmica desde a antiga sede do CRCN-NE;

Ao Físico *Everton Rodrigues*, amigo e colaborador e sem o qual não seria possível a realização deste sonho;

Aos grandes amigos e colaboradores de todas as horas, *George Paiva* e *Marcelo Santana* pelo incentivo, ajuda nos momentos críticos e pelo suporte

computacional, Linux, Cluster, entre outros;

Aos amigos e alunos do CRCN-NE, pelos momentos de descontração, de trabalho e de apoio nos momentos mais difíceis durante esses longos anos;

Aos colegas e professores do programa de pós-graduação;

Ao CNPq e a CAPES pelo apoio financeiro;

À Universidade Federal do Pernambuco;

Ao Departamento de Energia Nuclear.

# DECONVOLUÇÃO DE ESPECTROS NEUTRÔNICOS OBTIDOS COM O SISTEMA EB-TLD UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO

Autor: Joelan Angelo de Lucena Santos

Orientador: Prof. Dr. Êudice Correia Vilela

Co-orientador: Prof. Dr. Evaldo Simões da Fonseca

## RESUMO

A variabilidade do espectro neutrônico dentro de um mesmo ambiente torna necessária a caracterização da distribuição espectral em função da energia e para a realização de tal tarefa, a espectrometria neutrônica exerce papel fundamental para a determinação do fluxo de nêutrons ( $\Phi_E(E)$ ). Uma informação precisa permite que sejam estabelecidas grandezas radiológicas relacionadas àquele espectro investigado, sendo necessário, no entanto, uma série de medidas com um sistema espectrométrico que permita cobrir um amplo intervalo de energia e cuja resposta seja preferencialmente isotrópica, sendo um dos sistemas mais utilizados para a realização dessa tarefa, o sistema espectrométrico de esferas de Bonner. Um dos maiores problemas relacionados à espectrometria neutrônica é o processo de análise dos dados, conhecido como deconvolução. A maioria dos trabalhos desenvolvidos na implementação de novas técnicas desse processo, utiliza os dados obtidos com o cintilador de  ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ . No entanto, características relacionadas ao tempo morto deste instrumento fazem com que o mesmo não seja tão eficiente quando utilizado em campos neutrônicos de alto fluxo. Uma alternativa para solução deste problema é a utilização de detectores termoluminescentes (TLD), porém os códigos mais utilizados não disponibilizam uma matriz resposta específica para deconvoluir a informação obtida por esses materiais, o que torna o desenvolvimento de uma matriz resposta específica importante para caracterizar adequadamente a resposta obtida pelos mesmos, o que torna o desenvolvimento de uma matriz resposta fundamental para caracterizar o espectro obtido por esses detectores. Este trabalho utiliza uma técnica de Inteligência Artificial (IA) denominada de Algoritmo Genético (AG), que utiliza modelos matemáticos bio-inspirados a fim de induzir um processo evolutivo da resposta, e por meio da implementação de uma matriz específica para deconvoluir os dados obtidos da combinação de TLDs inseridos no sistema de esferas de Bonner, como detectores de nêutrons térmicos, com o objetivo de caracterizar o espectro neutrônico em função da energia. Os resultados obtidos com esse método se mostraram concordantes com o código BUNKI/UTA, utilizado para comparação. Tal fato viabiliza a utilização de algoritmos genéticos em processos de deconvolução do espectro neutrônico quando se utiliza TLD.

Palavras Chaves: Espectrometria de Nêutrons; Detectores Termoluminescentes; Algoritmos Genéticos

# UNFOLDING NEUTRON SPECTRA OBTAINED FROM THE BS-TLD SYSTEM USING GENETIC ALGORITHM

Author: Joelan Angelo de Lucena Santos

Adviser: Prof. Dr. Êudice Correia Vilela

Co-adviser: Prof. Dr. Evaldo Simões da Fonseca

## ABSTRACT

The variability of neutron spectrum within the same environment, it is essential that the spectral distribution as a function of energy to be characterized. To perform this task, the neutron spectrometer has a primary role in determining the neutron flux ( $\Phi_E(E)$ ). Precise information allows radiological quantities establishment related to that spectrum but it is necessary, however, a series of steps with a spectrometric system that can cover a whole wide range of energy and whose answer is rather isotropic. The most widely used for accomplishing this task is the spectrometric Bonner spheres system. One of the biggest problems related to neutron spectrometry is the process of data analysis, known as unfolding. Most of the work undertaken to implement new techniques of this process, using data obtained with the scintillator  $^6\text{LiI}(I)$ . However, characteristics related to the dead time of this instrument make it not be so effective when used in high flow neutron fields. An alternative to this problem is the use of passive detectors such as thermoluminescent detectors (TLD), but the codes used do not provide a more specific response matrix to unfolding the information obtained through these materials, which makes the development of a specific response matrix important to adequately characterize the response by them, which makes the development of a fundamental matrix to characterize the response spectra obtained by these detectors. This paper use a technique of Artificial Intelligence (AI) called Genetic Algorithm (GA), which uses bio-inspired mathematical models in order to induce an evolutionary process of response, and through the implementation of a specific matrix to unfolding data obtained from a combination of TLDs embedded in a system of Bonner spheres, such as thermal neutron detectors, to characterize the neutron spectrum as a function of energy. The results obtained with this method were in accordance with another code of unfolding used for comparison. This fact enables the use of genetic algorithms in the process of neutron spectrum unfolding when using TLDs.

Keywords: Neutron Spectrometry; Thermoluminescent Detectors; Genetic Algorithms

## LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1: Diagrama de fluxo de um algoritmo evolutivo (adaptado de EINBEN <i>et al.</i> , 2003) .....	8
Figura 2: Mapa 3D da função de Schwefel (HEDAR, 2010) .....	9
Figura 3: Cada indivíduo é associado a uma porção da roleta proporcional ao valor de seu fitness .....	16
Figura 4: Seleção por torneio com tamanho $k=3$ . À esquerda, indivíduos com sua respectiva avaliação. À direita, elementos sorteados para cada torneio, destacando o vencedor do mesmo (LIDEN, 2006) .....	18
Figura 5: Representação do crossover de um ponto (representação binária) .....	20
Figura 6: Representação da 1ª geração após o crossover (representação binária) .....	20
Figura 7: Intervalo de energia coberto por diferentes sistemas espectrométricos (Adaptado de KNOLL, 2000 e ATTIX, 2004) .....	28
Figura 8: Esquema simplificado de algumas possíveis interações do nêutron nas esferas do sistema EB (ALEVRA & THOMAS; 2003) .....	32
Figura 9: Apresentação do conjunto de esferas de polietileno do sistema EB utilizado neste trabalho .....	33
Figura 10: Curva de emissão TL típica do LiF (CAMPOS, 1998) .....	35
Figura 11: Representação do esquema utilizado na simulação com o código MCNP5 .....	48
Figura 12: Corte transversal de uma esfera de Bonner, destacando-se o volume sensível onde estão inseridos os TLDs .....	48
Figura 13: Apresentação do código AGLN .....	58

Figura 14: Apresentação da convergência do AG implementado para a deconvolução do espectro neutrônico .....	58
Figura 15: Modelagem computacional do Laboratório de Nêutrons utilizando o código MCNP5. Sendo o ponto 26 a representação do posicionamento da fonte $^{241}\text{AmBe}$ e dos pontos 34 a 48, a representação dos posicionamentos consecutivos do detector proporcional de $\text{BF}_3$ e os outros pontos delimitam a região da sala de irradiação. ....	64
Figura 16: Aparato experimental utilizado no Laboratório de Nêutrons (LN/CRCN-NE/CNEN) .....	68
Figura 17: Aparato experimental montado no interior do bunker do cíclotron no CDTN-MG .....	70
Figura 18: Resposta do contador proporcional $\text{BF}_3$ em função da distância fonte-detector. Fonte posicionada em 2 m .....	72
Figura 19: Resposta do contador proporcional $\text{BF}_3$ em função da distância fonte-detector. Fonte posicionada em 2,5 m .....	72
Figura 20: Comparação entre os dados obtidos com o $\text{BF}_3$ , o código MCNP5 e os dados teóricos em função da distância fonte-detector.....	73
Figura 21: Espectro neutrônico da fonte $^{241}\text{AmBe}$ obtido no LN do CRCN/NE deconvoluido com o código AGLN e o código BUNKI. ....	76
Figura 22: Comparação entre o espectro da fonte $^{241}\text{AmBe}$ obtido com o AGLN e o espectro de referência ISO (ISO 8529, 1989) .....	78
Figura 23: Espectro neutrônico obtido no <i>bunker</i> do cíclotron (CDTN-MG) deconvoluido com o código AGLN e o código BUNKI .....	79
Figura 24: Espectro neutrônico disponibilizado no TRS N0 403. Acelerador cíclotron de 35 MeV. Universidade de Tohoko. Japão (IAEA, 2001) .....	81

## LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1: Exemplo de atuação do operador de mutação sobre os genes .....	21
Tabela 2: Concentração dos elementos do ar, fração por massa .....	63
Tabela 3: Concentração dos elementos que compõe o concreto, fração por massa .....	63
Tabela 4: Comparação dos dados obtidos no processo de deconvolução utilizando os códigos BUNKI/UTA e o Algoritmo Genético (AGLN) desenvolvido e implementado para deconvolução dos dados obtidos com os conjuntos EB-TLD....	75
Tabela 5: Apresentação da diferença percentual entre os valores experimentais e os valores calculados por cada código de deconvolução ( $\eta\%$ ). Valores observados para fonte de $^{241}\text{AmBe}$ .....	77
Tabela 6: Comparação dos dados obtidos com a fonte $^{241}\text{AmBe}$ . Sendo apresentada a diferença percentual observada entre os códigos AGNL e o código BUNKI.....	77
Tabela 7: Comparação dos dados obtidos no bunker do ciclotron. Sendo apresentada a diferença percentual observada entre os códigos AGNL e o código BUNKI.....	79
Tabela 8: Apresentação da diferença percentual entre os valores experimentais e os valores calculados por cada código de deconvolução ( $\eta\%$ ). Valores observados para o espectro obtido no interior do bunker .....	80

## SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	2
2.1 Inteligência Artificial .....	2
2.2 Computação Evolutiva .....	5
2.3 Algoritmos Genéticos .....	9
2.3.1 População .....	12
2.3.2 Indivíduos .....	13
2.3.3 Função de Avaliação ( <i>Fitness</i> ) .....	14
2.3.4 Seleção .....	15
2.4 Operadores Genéticos .....	18
2.4.1 Cruzamento ( <i>Crossover</i> ) .....	19
2.4.2 Mutação .....	21
2.5 Considerações .....	22
2.5.1 Fundamentos Matemáticos .....	22
2.5.1.1 Ordem .....	22
2.5.1.2 Comprimento .....	23
2.5.1.3 Fitness .....	23
2.6 Funcionamento do AG .....	25
2.6.1 Diversidade Populacional .....	25
2.6.1.1 Paralelismo Implícito .....	25
2.6.2 Pressão Seletiva .....	26
3. ESPECTROMETRIA NEUTRÔNICA .....	27
3.1 Intervalo de Energia .....	28

3.2 Resolução Energética .....	29
3.3 Eficiência.....	29
3.4 Sensibilidade.....	30
3.5 Reprodutibilidade .....	30
3.6 Sistemas Espectrométricos .....	30
3.6.1 Sistema Espectrométrico de Esferas de Bonner .....	31
3.6.1.1 Princípio de funcionamento do sistema EB .....	31
3.6.3 Detectores Termoluminescentes (TLD).....	34
4. DECONVOLUÇÃO DO ESPECTRO NEUTRÔNICO .....	38
4.1 Processo de Deconvolução.....	38
4.2 Códigos de Deconvolução .....	41
4.2.1 MAXED .....	41
4.2.2 BONDI-97 .....	42
4.2.3 BUNKI .....	43
5. MATERIAIS E MÉTODOS .....	45
5.1 Simulação dos espectros neutrônicos com o código MCNP5.....	45
5.2 Desenvolvimento e implementação do Algoritmo Genético.....	50
5.2.1 Codificação .....	50
5.2.2 População.....	51
5.2.3 Seleção .....	52
5.2.4 Operadores Genéticos .....	52
5.2.4.1 <i>Crossover</i> .....	52
5.2.4.2 Mutação .....	53
5.2.5 <i>Fitness</i> .....	55
5.2.6 Condição de Parada.....	56
5.2.7 Apresentação do AGLN .....	56
5.2.8 Arquivo de Saída.....	59

5.3 Verificação experimental .....	59
5.3.1 Medidas realizadas em campos neutrônicos conhecidos .....	59
5.3.1.1 Determinação do fator de espalhamento de nêutrons .....	60
5.3.1.1.1 Método do Ajuste Polinomial .....	62
5.3.2 Verificação do espectro neutrônico utilizando a fonte de $^{241}\text{AmBe}$ .....	65
5.3.3 Obtenção do espectro neutrônico no interior do <i>bunker</i> do acelerador cíclotron .....	69
6. RESULTADOS.....	71
6.1 Avaliação do fator de espalhamento da sala de irradiação pelo Método do Ajuste Polinomial .....	71
6.2 Simulação dos espectros neutrônicos com o código MCNP5 para a obtenção da matriz resposta .....	74
6.3 Desenvolvimento e implementação do Algoritmo Genético.....	74
6.4 Verificação das Incertezas .....	81
7. CONCLUSÕES .....	83
8. PERSPECTIVAS FUTURAS.....	84
REFERÊNCIAS .....	85
APÊNDICE A – Nêutrons: Uma breve introdução .....	93
APÊNDICE B – Arquivo de entrada do código MCNP5 – Laboratório de Nêutrons CRCN-NE .....	111
APÊNDICE C – Arquivo de entrada do código MCNP5 – Conjunto Esfera-Detector – 8” .....	115
APÊNDICE D – Matriz resposta obtida com o conjunto EB-TLD.....	118

## 1. INTRODUÇÃO

A descoberta do nêutron por James Chadwick em 1932 (CHADWICK, 1935) inaugurou uma nova era do estudo de partículas. As características físicas dos nêutrons e suas formas de interação com a matéria viabilizaram a descoberta não só de outros elementos, mas também de novos métodos de geração de energia.

É sabido que os nêutrons podem apresentar uma grande variação de energia dentro de um mesmo ambiente e alguns métodos experimentais foram desenvolvidos para determinar a sua distribuição espectral em função desta energia. Para a realização de tal tarefa, a espectrometria neutrônica exerce papel fundamental para a determinação do fluxo de nêutrons ( $\Phi_E(E)$ ).

A informação precisa do espectro neutrônico permite o estabelecimento de outras grandezas radiológicas, tais como o equivalente de dose ambiental [ $H^*(10)$ ] e o fator de conversão fluência para equivalente de dose [ $h^*(10)$ ]; no entanto, o fluxo de nêutrons em um ambiente somente é obtido através de um espectrômetro cuja resposta seja idealmente isotrópica.

Entre os vários modelos de sistemas espectrométricos desenvolvidos para nêutrons, merece destaque o proposto por Bramblett e seus colaboradores em 1960 (BRAMBLETT *et al*, 1960), o sistema de espectrometria de multiesferas de Bonner, mais conhecido como sistema de Esferas de Bonner (EB).

Esse sistema é composto por um conjunto de esferas moderadoras de polietileno, com diâmetros variados, onde no centro de cada esfera é possível acomodar um detector de nêutrons térmicos, que por meio de um processo de deconvolução adequado de seus dados, permite a obtenção do espectro em energia e grandezas como fluência e dose.

Porém, um dos maiores problemas quando se realiza espectrometria neutrônica é o processo de análise dos dados, conhecido como deconvolução. Este processo não é algo trivial, e ao longo dos anos vários métodos matemáticos têm sido utilizados para realização de tal tarefa com maior precisão. Os métodos mais utilizados para este fim são: o método dos mínimos quadrados, métodos iterativos ou método Monte Carlo.

Os trabalhos desenvolvidos para implementação de novas técnicas do processo de deconvolução do espectro neutrônico utilizam, em sua grande maioria, os dados obtidos com o cintilador de  ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ . No entanto, características relacionadas ao tempo morto<sup>1</sup> deste instrumento fazem com que o mesmo não seja tão eficiente quando utilizado em campos neutrônicos de alto fluxo. Uma alternativa para solução deste problema é a utilização de detectores passivos, tais como os detectores termoluminescentes (TLD).

A baixa sensibilidade desses detectores permite que os mesmos sejam submetidos a exposições mais longas sem o comprometimento da informação; a sua mobilidade também possibilita que os mesmos sejam aplicados na realização de espectrometria neutrônica em ambientes como a vizinhança de aceleradores de partículas (ciclotrons), ou, por exemplo, em cabines de aviões, sem que seja necessária a utilização de equipamentos eletrônicos associados.

Contudo, sabe-se que não existe atualmente nos códigos mais utilizados para realização de deconvolução do espectro neutrônico, uma matriz resposta específica para deconvoluir a informação obtida por dosímetros termoluminescentes, sendo utilizadas outras matrizes, como no caso do código de deconvolução BUNKI (LOWRY; JOHNSON, 1984), que disponibiliza entre outras, a matriz UTA4, para realização de deconvolução (VEGA-CARRILO, 2002; SANTOS, 2006).

A busca pelo desenvolvimento de novas técnicas que permitam a correta deconvolução do espectro neutrônico, de maneira rápida e precisa, torna-se de grande relevância quando se deseja caracterizar o espectro neutrônico.

Alternativas aos métodos comumente utilizados no processo de deconvolução do espectro neutrônico têm sido apresentadas com a utilização de redes neurais artificiais (RNA) (FEHENBACHER *et al*, 1999; AVDIC *et al*, 2006; VEGA-CARRILLO *et al*, 2006); ou algoritmos genéticos (AG) (FREEMAN *et al*, 1999; MUKHERJEE, 1999). Ambos os métodos são técnicas de Inteligência Artificial (IA) que utilizam modelos matemáticos inspirados na biologia, como estruturas neurais biológicas e processos baseados em seleção natural, que induzem um processo evolutivo.

A alternativa de se utilizar um AG como ferramenta computacional para realização do processo de deconvolução deve-se aos seguintes pontos: os algoritmos genéticos são naturalmente paralelos, o que lhes permite o uso em

---

<sup>1</sup> Tempo morto é a capacidade de um detector operar em campos de alto fluxo sem a perda significativa da informação registrada.

configurações de cluster de processamento paralelo mais facilmente que outros códigos; podem ser aplicados na solução de um amplo espectro de problemas não lineares, descontínuos e discretos, que são características da Equação de Fredholm e procuram solucionar problemas complexos de otimização que envolve um grande número de variáveis ou parâmetros.

Assim exposto, este trabalho tem como objetivo principal a implementação de um Algoritmo Genético (AG) para a realização do processo de deconvolução do espectro neutrônico obtido através da combinação de dosímetros termoluminescentes de fluoreto de lítio, mais especificamente o TLD600 e o TLD700, ambos inseridos no sistema de esferas de Bonner, como detectores de nêutrons térmicos, através de uma matriz resposta específica para esses detectores.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Inteligência Artificial

O homem sempre buscou inspiração na natureza para criação de objetos que o ajudasse nas mais diversas tarefas. Essas observações permitiram o desenvolvimento dos mais distintos artefatos. O sonho de construir máquinas capazes de realizar tarefas ditas “inteligentes” é muito antigo, sendo desenvolvidas em épocas distintas, máquinas como o ábaco e calculadoras mecânicas, baseadas em rodas dentadas (ARTERO, 2009).

Partindo da observação da natureza, em 1956 foi proposto o uso da expressão “Inteligência Artificial” (RUSSEL; NURVIG, 2004) para descrever os computadores que tivessem a capacidade de imitar ou replicar as funções do cérebro humano ou qualquer atividade que requeressem inteligência para ser realizada. O objetivo principal da inteligência computacional é o entendimento dos princípios que induzem o comportamento inteligente em sistemas naturais e artificiais. Em outras palavras, busca através de técnicas inspiradas na natureza, o desenvolvimento de sistemas inteligentes que imitam aspectos do comportamento humano, tais como: aprendizado, percepção, raciocínio, evolução e adaptação (MAN *et al*, 1996).

As técnicas de inteligência computacional têm sido utilizadas no desenvolvimento de sistemas inteligentes de previsão, suporte à decisão, controle, otimização, modelagem, classificação e reconhecimento de padrões em geral, aplicados também em setores como energia, indústria, economia, síntese de circuitos, meio ambiente, entre outros (CASTRO *et al*, 2006). Para Russel e Nurvig (2004), a inteligência computacional pode ser classificada em quatro categorias:

*IA Simbólica:* inspira-se no modelo simbólico da mente, que parte do princípio de que a atividade cognitiva resume-se à manipulação de símbolos. Tais sistemas são compostos por símbolos e regras explícitas que os operam;

*IA Cognitiva:* Estabeleceu-se um paralelismo entre as funções do cérebro humano e os conceitos presentes nos computadores, tais como: codificação,

armazenamento, reparação e memorização.

*IA Probabilística:* A abordagem admite o aprendizado a partir da experiência e combina o melhor da IA clássica e das redes neurais.

*IA Evolutiva:* é um dos mais consolidados ramos da inteligência computacional. Nesta classe, os princípios e teorias sobre a natureza e desenvolvimento de modelos permitiram que pesquisadores percebessem a potencialidade na implementação de sistemas computacionais para resolver problemas com alta complexidade (MITCHELL, 1997). Podem ser citados, entre outros modelos bio-inspirados, os seguintes temas:

- Computação Evolutiva
- Inteligência Coletiva
- Redes Neurais Artificiais
- Sistemas Imunológicos Artificiais

## **2.2 Computação Evolutiva**

A computação evolutiva (CE) é um ramo da inteligência artificial que vem sendo empregada nas mais distintas áreas tais como: telecomunicações, robótica móvel, processamento de imagens, reconhecimento de faces, processamento de sinais, configuração de hardware, entre outros. Sua ideia fundamental surgiu na década de 50, e compreende um conjunto de técnicas de busca e otimização inspirada no processo de evolução natural como paradigma na solução de problemas de otimização, para os quais outras técnicas são ineficazes ou não aplicáveis (COELHO, 2003).

A CE é inspirada no neodarwinismo ou teoria moderna da evolução, que combina o teorema da evolução de Darwin, a genética de Mendel (SNUSTAD, GARDNER; 1987) e o selecionismo de Weismann (MARTINS, 2003). Este

paradigma afirma que a vida, em sua ampla maioria, acontece por meio de poucos processos estatísticos sobre populações e espécies, e está sedimentada em quatro processos principais: reprodução, mutação, competição e seleção. A evolução é o resultado da interação desses processos estatísticos que agem sobre a população, geração a geração, e que podem ser simulados computacionalmente.

Nos sistemas biológicos, indivíduos e espécies podem ser vistos como uma dualidade entre o seu código genético (genótipo) e suas características comportamentais, fisiológicas e morfológicas (fenótipo). Em CE, no entanto, a representação genotípica é dada pela codificação dos candidatos à solução de um problema, da qual um subconjunto irá compor a população a cada geração. Já a representação fenotípica é a interpretação do código e da potencial solução do problema, podendo ser gerada por vários genótipos (FOGEL, 1997; VONK *et al*, 1997).

Na natureza, é possível observar que indivíduos de uma mesma população competem entre si, buscando principalmente a sobrevivência, seja pela busca de recursos como alimento ou objetivando sua reprodução. Probabilisticamente, os indivíduos mais aptos nesta competição terão um número maior de descendentes, ao contrário dos indivíduos menos aptos.

Os algoritmos que utilizam este método, conhecidos como Algoritmos Evolutivos (AE), compartilham uma base conceitual comum para a evolução de estruturas individuais. Os pontos do espaço de busca<sup>2</sup> são modelados através de indivíduos que interagem em um ambiente artificial. Um conjunto de soluções (população) é manipulado a cada interação, enquanto que em outros métodos de otimização uma única solução é utilizada para o problema.

Aos indivíduos são aplicados operadores genéticos, sendo mais utilizados os operadores de cruzamento (*crossover*) e de mutação, a fim de simular a sobrevivência do mais apto (LINDEN, 2006). Cada indivíduo da população recebe um peso que exprime sua qualidade como solução de um determinado problema denominado de *fitness*.

A função dos operadores genéticos é buscar pela solução ótima do problema, criando novas soluções candidatas, baseadas na população atual de soluções. Os

---

<sup>2</sup> Espaço que possui como elementos todos os candidatos à solução do problema. Cada ponto desse espaço representa uma solução para a qual pode ser atribuído um valor de qualidade ou aptidão.

operadores genéticos diversificam a população, ao mesmo tempo em que mantêm as características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores, a fim de conduzir o algoritmo a bons resultados.

De uma forma simplificada, cada indivíduo da população é selecionado por meio de uma avaliação de aptidão que corresponde a sua aptidão no ambiente. Os descendentes são gerados por meio de operadores genéticos (cruzamentos e/ou mutações) onde características das soluções escolhidas são recombinadas. Os indivíduos criados são inseridos na população e caso o critério de parada seja obtido, o melhor candidato é apresentado como solução do problema, caso o critério de parada não seja obtido, retorna-se a etapa de avaliação reiniciando o processo, ou seja, uma nova geração é avaliada.

Historicamente, as primeiras iniciativas na área de CE foram dadas por biólogos e geneticistas interessados em simular os processos vitais em computador, o que recebeu na época o nome de “processos genéticos”. Na década de 60, John Holland e colaboradores (PILA, 2006) desenvolveram estudos sobre sistemas adaptativos, que foram modelados como sistemas de aprendizagem de máquina.

O algoritmo elaborado por Holland conseguia resolver problemas complexos de forma relativamente simples, pois assim como na natureza, o algoritmo não tinha conhecimento do problema em si. Uma função de aptidão fazia o papel de mediador da adaptação dos indivíduos (cromossomos) ao ambiente (solução desejada). Desta forma, os indivíduos com melhor adaptação (indicada pela função) tinham uma probabilidade maior de se reproduzirem do que aqueles com uma má adaptação.

A população inicial de indivíduos é gerada randomicamente e é manipulada a cada interação, enquanto que em outros métodos de otimização apenas uma solução é utilizada. A chance de que um indivíduo da população seja selecionado na próxima geração depende da função de avaliação do indivíduo, que consiste geralmente de uma função objetivo.

Tais modelos implementavam populações de indivíduos contendo um genótipo, formado por cromossomos (que neste modelo eram representados por cadeias de bits) aos quais se aplicavam operadores de seleção, recombinação e mutação. Ainda que Holland tenha proposto um quarto operador (a inversão), este não chegou a ser utilizado.

É apresentado na Figura 1 um esquema simplificado e generalizado dos algoritmos evolutivos.

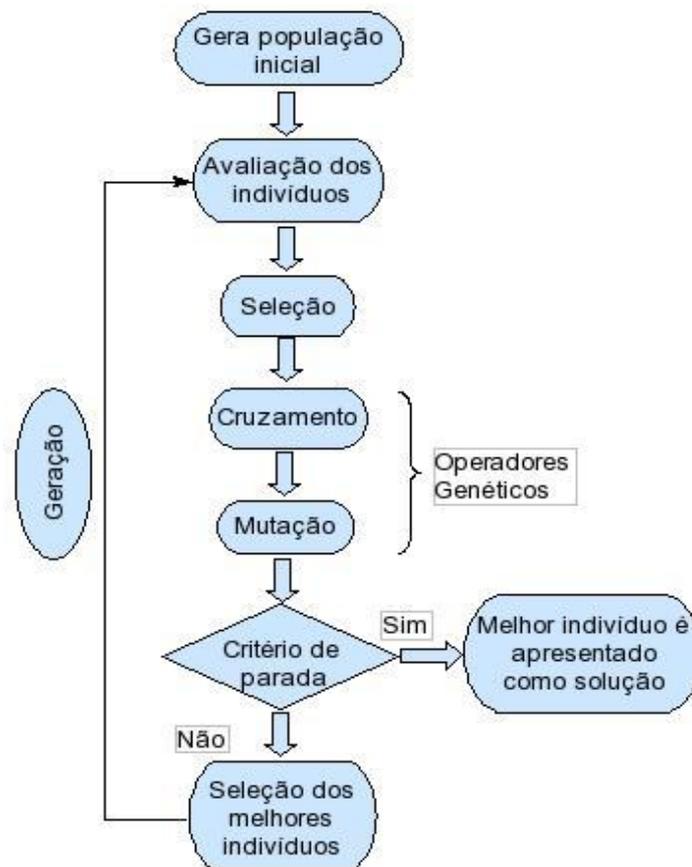


Figura 1: Diagrama de fluxo de um algoritmo evolutivo (adaptado de EIBEN & SMITH, 2003).

Outro ramo descendente dos algoritmos genéticos é a *Programação Genética (PG)*, desenvolvida por Koza e colaboradores (KOZA, 1992). Os indivíduos da população são agora programas de computador armazenados na forma de árvores sintáticas. Tais programas são os candidatos à solução do problema proposto. Convencionalmente, a programação genética utiliza o operador de mutação adaptado à estrutura de árvores e a recombinação se dá pela troca de subárvores entre dois indivíduos candidatos à solução.

A Programação Evolutiva (PE), elaborada por Fogel em 1960 (FOGEL, 1997), que também descende da CE, tem por fim prever o comportamento de máquinas de estado finito. Nela apenas dois operadores são usados: a seleção e a mutação, não realizando assim, operações de *crossover*.

Finalmente, outro ramo é a *Estratégia Evolutiva (EE)*, proposta nos anos 60 por Rechenberg e Schwefel na Alemanha (BÄCK *et al*, 1997). A ênfase aqui é na auto-adaptação. O papel da recombinação é aceito, mas como operador secundário.

Embora tenham origens bastante diversas, todas essas abordagens têm em comum o modelo conceitual – a evolução natural, e o mesmo objetivo final – a solução de problemas complexos. Embora apresentem características comuns, esses algoritmos se diferenciam basicamente no método de seleção dos indivíduos, nas funções que geram esses indivíduos e na estrutura de dados que os representam.

As técnicas da CE são comumente aplicadas em tarefas de otimização global, onde os métodos determinísticos podem levar a soluções de mínimos ou máximos locais (Figura 2). Conseqüentemente, a CE pode ser aplicada na solução de um amplo espectro de problemas não lineares, descontínuos e discretos, entre outros.

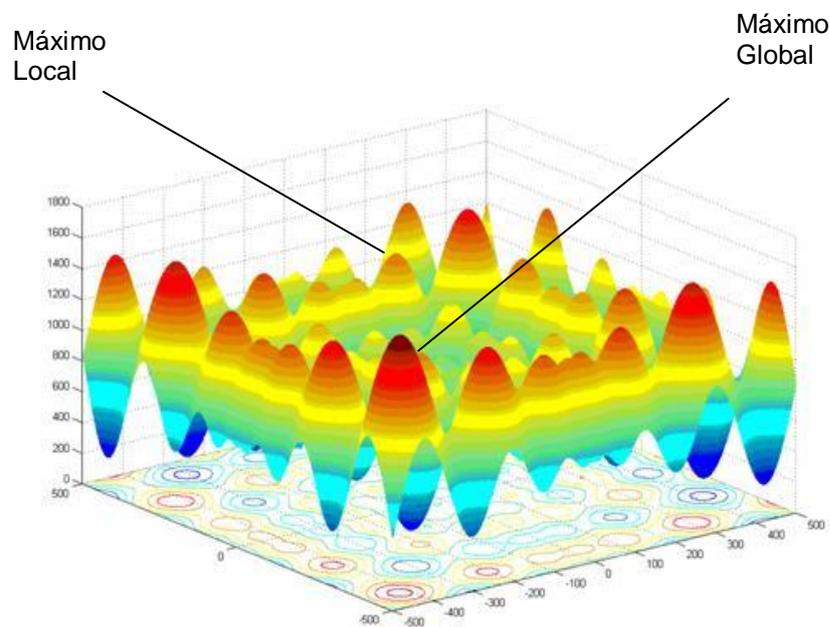


Figura 2: Mapa 3D da função de Schwefel (HEDAR, 2010).

### 2.3 Algoritmos Genéticos

A técnica dos algoritmos genéticos (AG) foi inicialmente proposta por Jonh H. Holland (HOLLAND, 1994) com o objetivo principal de formalizar matematicamente os processos de adaptação em sistemas naturais e desenvolver, através de simulação computacional, sistemas artificiais que retenham os mecanismos originais

encontrados na natureza, tais como a sobrevivência e a reprodução das populações em seu processo evolutivo.

Seguindo o princípio da seleção natural, com as informações genéticas sendo transmitidas de geração a geração, ocorre probabilisticamente que as melhores características dos seus progenitores sejam transmitidas e tornem os indivíduos das gerações seguintes tão ou melhores adaptados que os primeiros e, desta forma, pela convergência das seguidas gerações, todos os indivíduos tendem a possuir características comuns.

As principais características de um algoritmo genético são descritas a seguir (COSTA *et al*, 2005):

- São técnicas probabilísticas;
- Trabalham com uma grande quantidade de pontos em um espaço de soluções, no entanto, não procuram solucionar o problema verificando todos os pontos e sim, um subconjunto dos mesmos;
- Direcionam sua busca através do mecanismo de seleção equivalente ao processo natural;
- São capazes de solucionar funções discretas e contínuas;
- Apresentam simplicidade conceitual.

A ideia fundamental dos AG consiste em tratar as possíveis soluções de um dado problema como “indivíduos” de uma “população”, que imitando o processo da evolução natural das espécies, irão “evoluir” a cada iteração com outros indivíduos na mesma população, procurando por meio de operações genéticas, gerar indivíduos mais aptos, ou seja, encontrar uma solução ótima (FILHO *et al*, 1994).

O algoritmo proposto por Holland é conhecido na literatura como *Simple Genetic Algorithm* ou **SGA**. Descreve-se resumidamente este algoritmo pelos seguintes passos:

1. Inicialize a população de cromossomos gerados aleatoriamente e cujo tamanho seja  $N$ ;
2. Avalie cada cromossomo desta população;
3. Selecione os pais;
4. Aplique os operadores de cruzamento e mutação aos pais selecionados e gere novos indivíduos;
5. Elimine os membros selecionados (pais) da antiga população;
6. Avalie os novos indivíduos gerados e insira-os na população;
7. Se a solução ideal for encontrada, ou se o número máximo de gerações for alcançado, retorne o cromossomo com a melhor avaliação. Caso contrário, volte ao passo 3.

Embora aparentemente simples, a solução adequada de um determinado problema utilizando AG parte basicamente da escolha de alguns pontos, sendo eles: a representação dos indivíduos, o tamanho da população, a definição da função de avaliação, que deverá avaliar satisfatoriamente o grau de adequação de cada indivíduo como solução do problema em questão, e finalmente, a definição de uma condição de parada. Uma condição de parada ideal seria aquela na qual o algoritmo para sempre quando a solução ótima é alcançada, podendo ser utilizado também um número máximo de gerações ou um limite de tempo de processamento.

Para que isso seja alcançado efetivamente, é necessária a construção de um modelo evolutivo onde cada indivíduo possa ser considerado como a possível solução de um determinado problema. Pode-se, de forma simplificada, apresentar os principais elementos de um AG como segue:

- Geração: diz respeito ao número de vezes pelas quais a população passou pelo processo de seleção, reprodução, mutação e atualização;

- População: conjunto de indivíduos;
- Indivíduo: definido por seus cromossomos (solução tentativa), unidade fundamental do AG;
- Cromossomo: conjunto de genes (codificação da solução tentativa);
- Gene: codificação de um traço/característica podendo tomar diferentes valores (parâmetro da solução);
- *Fitness*: mede a qualidade do indivíduo (ou adaptação);
- *Crossover*: permite a troca de material genético entre os indivíduos da população (de pai para filho);
- Mutação: inserção do material genético novo nos indivíduos.

### 2.3.1 População

A população de um algoritmo genético pode ser definida como um conjunto de indivíduos que são cogitados como solução de um dado problema e poderão ser utilizados para criar um novo conjunto de indivíduos para análise.

A escolha da população inicial pode afetar a qualidade da solução e o número de gerações necessárias para encontrar uma boa solução. Isto ocorre porque as características das soluções candidatas que pertencem a população inicial são transferidas para seus descendentes nas gerações subsequentes (MIASAKI; ROMERO, 2007).

Pode-se afirmar que em populações pequenas ocorre uma grande probabilidade de que seja perdida a diversidade<sup>3</sup> necessária para que o algoritmo convirja a uma boa solução. No entanto, se a população tiver muitos indivíduos, o algoritmo poderá perder parte de sua eficiência, devido à demora em avaliar a

---

<sup>3</sup> A diversidade mede o grau de variação entre os genótipos presentes na população. Tal característica é fundamental para a amplitude da busca e seu decréscimo está vinculado ao fenômeno de convergência prematura.

função de aptidão de todo o conjunto a cada iteração, além de ser necessário trabalhar com mais recursos computacionais.

### 2.3.2 Indivíduos

Para que um algoritmo genético seja utilizado na solução de problemas é necessário que o mesmo represente adequadamente as possíveis soluções do problema. Uma das principais formas para realizar tal tarefa é representar cada atributo da solução como uma sequência de bits, e o indivíduo como a união de todas as sequências de bits de todos os atributos. Geralmente, a solução de um problema está associada a um cromossomo  $\vec{p}$  representado por um vetor com  $m$  posições, tal que  $\vec{p} = \langle x_1, x_2, \dots, x_m \rangle$ , onde cada componente  $x_i$  representa um gene, ou seja, uma variável da solução (WHITLEY, 1994). Os tipos mais comuns de representação para os cromossomos são:

- Representação Binária (Cadeia de Bits): foi a primeira representação do cromossomo, onde o mesmo é representado por uma cadeia de bits (0 ou 1). Cada sequência de bits é mapeada para uma solução do espaço de busca facilmente manipulável através dos operadores de busca.

Ex:  $S_1 = 100101101011010000111$  na base 10 seria igual a 1.234.567.

- Vetores de Reais: Utilizados geralmente para a otimização de parâmetros contínuos quando a representação binária torna-se inadequada, por exemplo, quando são necessários muitos bits para a obtenção de uma boa precisão numérica. Nessa representação de indivíduos, os parâmetros numéricos podem ser codificados diretamente nos cromossomos.

Ex:  $S_2 = 0,637197$

Outras representações, tais como representações por vetores inteiros ou por símbolos também podem ser utilizadas, dependendo exclusivamente do problema em questão.

### 2.3.3 Função de Avaliação (*Fitness*)

Esta função determina quão próximo um indivíduo está da solução desejada ou ainda quão boa é esta solução. Tal função deve refletir os objetivos a serem alcançados na resolução de um determinado problema.

Geralmente a aptidão do indivíduo é determinada através do cálculo da função objetivo, que depende das especificações de projeto. Cada indivíduo é uma entrada para uma ferramenta de análise de desempenho, cuja saída fornece medidas que permitem ao algoritmo genético o cálculo da aptidão do indivíduo.

Intuitivamente, quando se pensa em *fitness* deseja-se uma maximização da avaliação do indivíduo, ou seja, quanto maior o *fitness* melhor o indivíduo. A Equação 1 representa um exemplo desta função, onde  $f$  é a função de avaliação, que neste caso estaria normalizada entre  $[0,1]$  e  $\epsilon$  seria um erro associado ao problema investigado. É importante citar que essa não é a única forma de avaliar um indivíduo, pode-se também considerar que quanto menor o valor do *fitness* melhor o indivíduo.

$$f = \frac{1}{1 + \epsilon} \quad (1)$$

Como o valor atribuído a um indivíduo pode variar de acordo com o problema, é comum utilizar a função *fitness* para normalizar a função objetivo a um intervalo conveniente entre 0 e 1 (GOLDBERG, 1989). O valor ajustado da função objetivo é a medida de avaliação do indivíduo, o qual é utilizado pelo mecanismo de seleção para avaliar os indivíduos da população.

Independentemente da representação do *fitness*, é fundamental que esta função seja capaz de diferenciar na proporção correta as más soluções das boas. Se houver pouca precisão na avaliação durante o processamento do algoritmo, uma ótima solução pode ser posta de lado durante sua execução, além de gastar mais tempo explorando soluções pouco promissoras.

### 2.3.4 Seleção

O objetivo principal do operador de seleção é oferecer aos melhores indivíduos da população corrente, preferência para o processo de reprodução, permitindo que estes indivíduos possam passar as suas características de forma probabilística às próximas gerações, e isso é obtido com a simulação do processo de reprodução (SRINIVAS; PATNAIK, 1994).

Em outras palavras, o operador de seleção classifica as soluções relativamente aptas de uma população, a fim de garantir o nível ideal de pressão seletiva. Contudo, uma convergência genética pode reduzir a diversidade da população impossibilitando que todo espaço de pesquisa de soluções seja devidamente explorado.

Com o objetivo de garantir a diversidade da população, é necessário permitir que os indivíduos pouco adaptados também possam ser selecionados, pois os mesmos podem apresentar características que não estão presentes em nenhum cromossomo da população.

Existem vários métodos para selecionar os indivíduos sobre os quais serão aplicados os operadores genéticos, sendo os mais utilizados: o método de seleção por roleta (*roulette wheel*), o método de seleção por ranking (*rank selection*) e o método de seleção por torneio (*tournament selection*) (LINDEN, 2006).

- Seleção por Roleta (*roulette wheel*)

Este método de seleção atribui a cada indivíduo de uma população uma probabilidade de passar para a próxima geração proporcional ao seu *fitness* medido, em relação ao valor total das aptidões encontradas. Desta forma, para indivíduos que possuem o maior *fitness* é dada uma porção maior da roleta, e conseqüentemente, apresentam uma maior probabilidade de passarem para a próxima geração, enquanto aos indivíduos que apresentam um *fitness* menor, é dada uma porção relativamente menor. A cada rodada da roleta, um novo subconjunto é formado (Figura 3).

Indivíduo	Avaliação ( <i>Fitness</i> )	% da roleta
A	60	20
B	120	40
C	45	15
D	75	25
Total	300	100

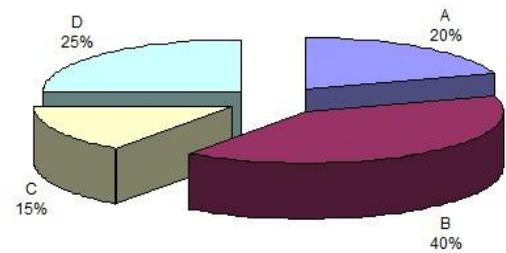


Figura 3: Cada indivíduo é associado a uma porção da roleta proporcional ao valor de seu *fitness*.

O maior problema deste método é que há uma alta chance de ocorrer uma convergência prematura, ou seja, um indivíduo ser substancialmente superior aos outros e dominar a população; uma possível solução para este problema seria o aumento da taxa de mutação.

- Seleção por Ranking (*rank selection*)

Com o objetivo de evitar a convergência prematura e a dominância de um super indivíduo pode-se utilizar o método de seleção por *ranking* (MAN *et al*; 1996). Neste método os indivíduos da população são ordenados crescentemente entre 0 e N, de acordo com o *fitness*, para que seja estabelecido um *ranking*. Depois de estabelecido este *ranking*, deverá ser feito um mapeamento de acordo com uma dada função de avaliação.

Para que seja definida a avaliação de cada elemento é utilizado o método linear, de forma que cada indivíduo recebe uma avaliação igual ao descrito na Equação 2 (LINDEN, 2006):

$$E(i, t) = Min + (Max - Min) \cdot \frac{rank(i, t) - 1}{N - 1} \quad (2)$$

onde:

$E(i,t)$  é o valor esperado do indivíduo  $i$  no tempo  $t$ ;

$Min$  é o valor esperado do indivíduo de ordem 1 (pior colocado no *ranking*);

$Max$  é o valor esperado do indivíduo de ordem  $N$  (melhor colocado no *ranking*);

$rank(i,t)$  é o *ranking* do indivíduo na população mantida pelo AG na geração  $t$ ;

$N$  é o número de indivíduos da população;

Por manter a pressão seletiva constante da primeira à última geração, ocorre a probabilidade de que indivíduos cujos *fitness* sejam ruins se proliferem. Uma alternativa para evitar este problema seria a utilização da seleção por ranqueamento exponencial.

O ranqueamento exponencial difere-se do linear basicamente no fato das probabilidades do valor esperado (VE) serem ponderadas. Quanto mais próximo de  $N$ , menor é a probabilidade de seleção, ou seja, quanto maior o *ranking*, menor o valor de  $e^{-i}$  e conseqüentemente, maior o valor de  $E(i)$ , como descrito matematicamente na Equação 3. O parâmetro probabilístico  $c$  é considerado com valores entre 0 e 1 e é utilizado como base.

$$E(i) = \frac{1 - e^{-i}}{c} \quad (3)$$

- Seleção por Torneio (*tournament selection*)

Neste método um número de  $n$  indivíduos é escolhido aleatoriamente para que seja formada uma subpopulação temporária. O grupo toma parte de um torneio, onde o indivíduo vencedor é escolhido deterministicamente de acordo com o valor do *fitness*.

<i>Indivíduo</i>	<i>Fitness</i>		<i>Torneio</i>		
A	60		A	C	<b>B</b>
B	120		C	<b>D</b>	C
C	45		C	A	<b>D</b>
D	75		D	A	<b>B</b>

Figura 4: Seleção por torneio com tamanho  $k=3$ . À esquerda, indivíduos com sua respectiva avaliação. À direita elementos sorteados para cada torneio, destacando o vencedor do mesmo (LINDEN, 2006).

- Elitismo (*elitism*)

Muitas vezes citado na literatura como um método de seleção consiste em um método onde os melhores indivíduos da população, são inseridos diretamente nas gerações seguintes do algoritmo. O elitismo é utilizado para melhorar a convergência do algoritmo genético e pode aumentar o seu desempenho, pois previne a perda da melhor solução já encontrada (EIBEN; SMITH, 2003). No entanto, os métodos de seleção acima citados podem ou não operar com esse artifício.

## 2.4 Operadores Genéticos

Consistem em aproximações computacionais de fenômenos observados na natureza, tais como a reprodução sexuada, mutação genética, entre outros. Esses operadores são os responsáveis por manipular as informações genéticas presentes nos cromossomos.

O objetivo dos operadores genéticos é transformar a população através de sucessivas gerações, estendendo a busca até chegar a um resultado satisfatório. Os operadores genéticos mais difundidos são: cruzamento e mutação (HOLLAND, 1994).

### 2.4.1 Cruzamento (Crossover)

O processo de cruzamento ou recombinação é o processo que, partindo de dois ou mais indivíduos selecionados (pais) e de um ou mais pontos de cruzamento, podem originar uma ou mais novas soluções (filhos).

Essa “mistura” de elementos é feita tentando “imitar” a reprodução de genes em células, sendo a escolha dessas divisões cromossômicas aleatória. O objetivo deste operador é basicamente trocar informações entre diferentes soluções candidatas. Pode-se afirmar que o operador de cruzamento permite a troca de informações entre dois indivíduos (pais) com o objetivo de gerar uma nova geração de indivíduos.

Essa troca de informações pode ser descrita matematicamente por meio de relações algébricas simples, as quais podem envolver os indivíduos-pais selecionados ( $p_1$  e  $p_2$ ), desde que a codificação dos indivíduos utilizada seja representada por números reais, como apresentadas nas Equações 4 a 7 a seguir (FERREIRA *et al*, 2008):

$$C_1 = \frac{p_1 + p_2}{2} \quad (4)$$

$$C_2 = p_{max}(1 - w) + \max(p_1, p_2) w \quad (5)$$

$$C_3 = p_{min}(1 - w) + \min(p_1, p_2) w \quad (6)$$

$$C_4 = \frac{(p_{max} + p_{min})(1 - w) + (p_1 + p_2)w}{2} \quad (7)$$

onde  $w = [0, 1]$  e representa um peso a ser atribuído pelo usuário,  $\max(p_1, p_2)$  e  $\min(p_1, p_2)$  representa o vetor com os valores máximo e mínimo do elemento correspondente  $p_1$  e  $p_2$ .

O operador de cruzamento pode ser aplicado a qualquer representação de indivíduo, porém, foi historicamente elaborado para a representação binária (sendo esta a forma mais usual para a compreensão deste operador).

O método mais simples de utilizar este operador é o *crossover* de um ponto, onde se escolhe aleatoriamente um ponto de corte de forma que o material além deste ponto seja trocado entre os indivíduos (pais), formando os indivíduos filhos, como pode ser observado nas Figuras 5 e 6.

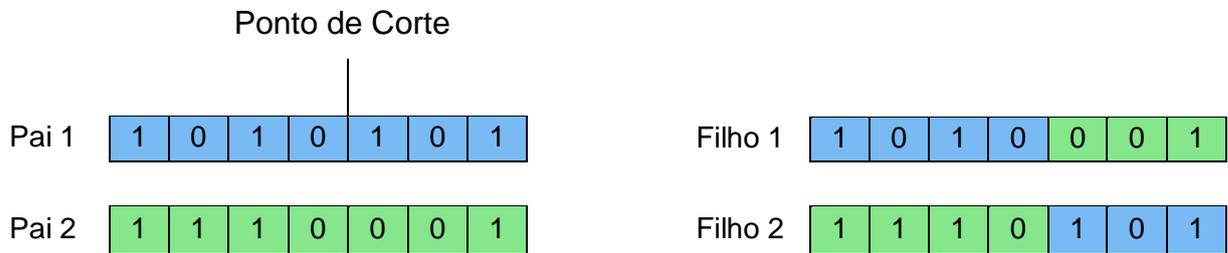


Figura 5: Representação do *crossover* de um ponto (representação binária).

Figura 6: Representação da 1ª geração após o *crossover* (representação binária).

Outros tipos de *crossover* são propostos na literatura, podendo ser destacados entre eles:

- Cruzamento de Multipontos: neste tipo de operador são sorteados um número fixo  $n$  de pontos de corte.
- Cruzamento Segmentado: funciona de forma semelhante ao multiponto, com a diferença de que sorteia-se o número de pontos de corte toda vez que é executado.
- Cruzamento Uniforme: para cada gene a ser preenchido nos cromossomos filhos, o operador sorteia de qual dos pais este deve ser gerado.

Deve-se buscar um equilíbrio quanto à taxa de cruzamentos em um algoritmo, pois quanto maior forem os números de cruzamentos, mais rápido novas estruturas serão introduzidas na população, podendo ocorrer que estruturas com boas aptidões sejam retiradas e uma parte da população seja substituída, diminuindo por sua vez a diversidade da população.

### 2.4.2 Mutação

Este operador tem como finalidade modificar, aleatoriamente, a característica do indivíduo sobre o qual é aplicada, garantindo desta forma a diversidade das características dos indivíduos da população e conseqüentemente, permitindo que sejam introduzidas informações que não estiverem presentes em nenhum dos indivíduos ou que aparecerem em pequena quantidade na população.

O operador de mutação pode ser aplicado indistintamente, antes ou depois do operador de crossover, podendo inclusive operar em mais de um gene do indivíduo (VON ZUBEN, 2008).

Este operador de mutação é importante para a introdução e manutenção da diversidade genética da população, assegurando desta forma, a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de busca com resultado não nulo ou para prevenir a convergência antecipada para ótimos locais (DIMOPOULOS; ZALZALA, 2000).

Uma baixa taxa de mutação previne que uma posição fique estagnada em um valor, além de possibilitar que se chegue a qualquer ponto do espaço de busca. Já uma taxa alta de mutação, a busca se torna essencialmente aleatória (VON ZUBEN, 2008).

O operador de mutação percorre todos os bits do cromossomo, e para cada bit, gera um evento com uma probabilidade  $p_m$  (probabilidade de mutação), se o evento ocorrer, o valor do bit é alterado. Geralmente a ocorrência de probabilidade de mutação mais utilizada um valor compreendido entre 0,5% e 1% (LINDEN, 2006), no entanto, esse valor pode ser variado de acordo com o interesse do programador.

Um exemplo de aplicação do operador de mutação é apresentado na Tabela 1, onde se observa a alteração em um único bit quando o  $p_m = 0,05$ .

*Tabela 1: Exemplo de atuação do operador de mutação sobre os genes.*

Indivíduos	Números Aleatórios	Novos Indivíduos
0 1 0 1	0.15; 0.80; 0.50; 0.92	0 1 0 1
1 1 1 0	0.46; 0.72; 0.52; <b>0.05</b>	1 1 1 1

## 2.5 Considerações

### 2.5.1 Fundamentos Matemáticos

A convergência dos AG pode ser compreendida a partir do estudo da Teoria dos Esquemas idealizada por Holland (1994), em que um esquema é definido como um modelo capaz de gerar um conjunto de cadeias de caracteres de comprimento  $L$ , que apresentam similaridades em determinadas posições.

Um esquema é um modelo de cromossomo que representa um conjunto de cromossomos. Pode-se afirmar que um esquema é um gabarito (*template*) representando os indivíduos de uma população.

O esquema é construído pela introdução do símbolo asterisco  $\{ * \}$  (*don't care = tanto faz*), representando que naquela posição pode ser atribuído qualquer símbolo, adotando desta forma uma base ternária  $\{ 1 0 * \}$ .

Por exemplo, o esquema  $[1 * 0 1]$  representa os cromossomos  $[1 1 0 1]$  e  $[1 0 0 1]$ , já o esquema  $[1 0 0 1]$  representa um único esquema e o esquema  $[ * * * * ]$  representa todos os cromossomos de comprimento 4 (WHITLEY, 1994).

A viabilidade de um esquema será tanto maior quanto maior for o número de boas combinações de bits que ele contenha, pois essas combinações conferem às cadeias de caracteres onde estão presentes maior aptidão e indicam que aquele esquema é uma boa solução para o problema.

Os esquemas, representados pela letra  $H$ , possuem algumas propriedades importantes, sendo apresentados neste trabalho alguns conceitos defendidos por Holland, tais como ordem, comprimento e *fitness* de um esquema (SOARES, 1997; FALCONE, 2004).

#### 2.5.1.1 Ordem

Define-se como a ordem do esquema representado por  $O(H)$ , o que se refere ao número de posições ocupadas por zero (0) ou um (1) dentro do esquema. Trata-se, portanto, do número de posições fixas do esquema exceto o símbolo  $*$ .

A ordem de um esquema define sua especificidade, de modo que quanto maior a ordem, mais específico é o esquema. São apresentados os seguintes esquemas

abaixo como exemplo:

$$H_1 = ( * 1 * * )$$

$$H_2 = ( 1 0 * * )$$

$$H_3 = ( * 1 0 1 )$$

sendo obtidas as seguintes ordens:

$$O(H_1) = 1; O(H_2) = 2; e O(H_3) = 3.$$

O conceito de ordem de um esquema é utilizado para calcular a probabilidade de sobrevivência do esquema com relação ao operador de mutação.

### 2.5.1.2 Comprimento

A segunda propriedade é o comprimento do esquema  $H$  representado por  $\delta(H)$ , sendo o mesmo definido como a distância entre a primeira e a última posição fixas do esquema. Este conceito permite de certo modo compreender a compatibilidade da informação contida em um esquema. Considerando os mesmos esquemas anteriormente apresentados, têm-se:

$$\delta(H_1) = 2 - 2 = 0; \delta(H_2) = 2 - 1 = 1, e \delta(H_3) = 4 - 2 = 2$$

### 2.5.1.3 Fitness

Uma característica do esquema é a sua avaliação na geração  $t$ . Denota-se por  $\bar{f}(H, t)$  o valor médio do *fitness*, no instante  $t$ , de todos os indivíduos  $m(H)$  que representem o esquema  $H$  sobre uma dada população  $n$ . Logo a aptidão média da população no instante  $t$  será expressa pela Equação 8:

$$\bar{f} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i(t)}{n} \quad (8)$$

onde  $f_i(t)$  é o valor do fitness do  $i$ -ésimo indivíduo.

Considerando que a probabilidade de seleção do número de indivíduos ( $p_{sel}$ ) do esquema  $H$  é proporcionada pelo desempenho  $f_i$  perante todos os desempenhos encontrados na população, ou de acordo com a Equação 9 têm-se:

$$P_{sel} = \frac{f(H)}{\sum f} \quad (9)$$

Na geração seguinte, ou seja,  $m(H, t+1)$ , outros indivíduos também são escolhidos e copiados de acordo com sua avaliação (*fitness*), pode-se afirmar que o número de representantes na geração  $(t+1)$  é expresso matematicamente pela Equação 10:

$$m(H, t + 1) = m(H, t) \cdot \frac{f(H)}{\bar{f}(t)} \quad (10)$$

onde:

$m(H, t+1)$  é o número de representantes do esquema  $H$  na geração  $t+1$ ;

$\bar{f}(H)$  é o desempenho médio dos indivíduos do esquema  $H$ .

Considerando os eventuais efeitos negativos de recombinação e mutação, e usando uma desigualdade para permitir a criação de novas instâncias de  $H$  pelos operadores de variação, a proporção de indivíduos que representam o esquema  $H$  no momento subsequente,  $m(H, t + 1)$  é dada de acordo com a Equação 11 (EIBEN; SMITH, 2003):

$$m(H, t + 1) \geq m(H, t) \cdot \frac{f(H)}{\bar{f}(t)} \left[ 1 - p_c \cdot \frac{\delta(H)}{l - 1} - p_m \cdot O(H) \right] \quad (11)$$

onde:

$p_c$ : Probabilidade de cruzamento;

$p_m$ : Probabilidade de mutação;

$l$ : o número de *bits* em um *string*.

Com esse resultado, pode-se finalmente formular os efeitos da seleção, cruzamento e mutação sobre o número de esquemas esperados para a próxima geração.

De acordo com Srinivas e Patnaik (1994), para esquemas curtos, de baixa ordem e com uma adaptação acima da adaptação média, espera-se que à medida que o algoritmo evolua, obtenha-se um aumento exponencial do número de indivíduos que se associam com os mesmos, ou seja, é provável que o melhor indivíduo se prolifere na população.

## 2.6 Funcionamento do AG

### 2.6.1 Diversidade Populacional

A diversidade populacional está relacionada à variabilidade genética da população, ou seja, quanto maior é a diferença entre os cromossomos, maior será a possibilidade que todas as possíveis soluções sejam testadas. A diversidade populacional determina o paralelismo implícito em um AG, isso porque ele trabalha com pontos geralmente distintos.

#### 2.6.1.1 Paralelismo Implícito

Paralelismo é uma estratégia utilizada em computação para obter-se, mais rapidamente, resultados de tarefas grandes e complexas. Segundo essa estratégia,

uma tarefa grande pode ser dividida em várias tarefas pequenas, que serão distribuídas entre vários processadores e executadas simultaneamente (SILVA, 2005).

Um algoritmo genético ao realizar uma busca por populações, a evolução de um determinado algoritmo tende a favorecer indivíduos que compartilham determinadas características, sendo capaz de avaliar implicitamente determinadas combinações ou esquemas como mais ou menos desejáveis, efetuando uma busca de hiperplanos de natureza paralela (GOLDBERG, 1989).

### **2.6.2 Pressão Seletiva**

Assim como a diversidade populacional, a pressão seletiva é um importante conceito para a compreensão do mecanismo de busca em um AG, visto que pode tendenciar o grau de privilégio de alguns indivíduos para sobreviver e reproduzir em detrimento dos outros. Assim, a pressão seletiva indica não só a velocidade como também a direção que o AG seguirá no espaço de busca.

Quanto maior a “pressão” ou quanto mais o método de seleção considera a avaliação dos indivíduos, maior a tendência à exploração das soluções já existentes e maior a velocidade de convergência. Por outro lado, esquemas de seleção que pouco consideram o valor de avaliação das soluções, tendem a pesquisar melhor o espaço de busca, aumentando a confiabilidade da solução indicada como ótima (BENTO, KAGAN; 2008).

Observa-se que a pressão seletiva contribui consideravelmente para a convergência do algoritmo genético em um resultado satisfatório. A escolha de um reduzido número de indivíduos para sobreviver e reproduzir pode causar a perda de diversidade populacional, no entanto, pode-se dizer que a pressão seletiva opera de forma antagônica à diversidade populacional e ambas são importantes na dinâmica do processo de busca e convergência do algoritmo genético (VON ZUBEN; 2008).

### 3. ESPECTROMETRIA NEUTRÔNICA

A monitoração da dose em campos neutrônicos é geralmente realizada com sistemas de detecção passivos (ver Apêndice A), tais como os detectores de traço, sistemas Albedo ou filmes dosimétricos com filtros específicos.

Esses sistemas possuem uma resposta que os tornam fortemente dependentes da energia do nêutron, derivando daí a importância da realização de espectrometria a fim de caracterizar o campo de referência para calibração e desta forma possibilitar que a informação obtida desse espectro possa ser utilizada para gerar fatores de correção mais próximos do ambiente aos quais os indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) estão sujeitos.

No caso dos nêutrons, o intervalo de energia pode se estender desde alguns eV até centenas de MeV e esta dependência energética pode ser observada no tipo de dosímetro que o IOE esteja utilizando. Para baixas energias, por exemplo, o sistema Albedo possui uma boa resposta enquanto que os detectores de traço possuem uma boa eficiência para nêutrons rápidos.

Em áreas em que o campo neutrônico apresenta uma grande variabilidade, a espectrometria neutrônica é o único método utilizado para compreender o comportamento dos dispositivos de medição e desta forma possibilitar a avaliação correta das grandezas dosimétricas de interesse.

Os detectores usados para a realização de espectrometria neutrônica em campos mistos geralmente indicam uma superposição de leituras, que é devido ao fato que o campo possui duas componentes de radiação, nêutrons e gama. No caso de detectores isotrópicos, a leitura  $C_i$  de um  $i$ -ésimo conjunto de  $M$  detectores ou a leitura  $C_i$ , em um  $i$ -ésimo canal de um detector multicanal pode ser escrito como (MATZKE, 2002):

$$C_i = \int dE_\gamma R_i^\gamma(E_\gamma) \Phi_i^\gamma(E_\gamma) + \int dE_n R_i^n(E_n) \Phi_i^n(E_n) \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (12)$$

onde  $R_i^\gamma(E_\gamma)$  e  $R_i^n(E_n)$  são as funções respostas do  $i$ -ésimo detector para irradiações com campos mistos em relação à energia do fóton ( $E_\gamma$ ) e à energia do nêutron

incidente ( $E_n$ ), e  $\Phi_i(E_n)$  é a fluência observada no  $i$ -ésimo detector.

Existem alguns fatores que evidenciam a utilização de um determinado instrumento para a realização de espectrometria neutrônica. Sendo os principais, o intervalo de energia em que ele poderá detectar os nêutrons, sua sensibilidade, a capacidade de discriminar outras radiações quando inserido em campos mistos, sua resolução energética, precisão e confiabilidade, bem como sua operacionalidade.

### 3.1 Intervalo de Energia

Idealmente, um instrumento a ser utilizado para a realização de espectrometria neutrônica para a área dosimétrica, deve cobrir todo o espectro em energia, ou seja, deve abranger o intervalo compreendido entre os nêutrons de baixa energia até os nêutrons rápidos.

É apresentado na Figura 7, o comportamento aproximado dos diferentes tipos de instrumentos que podem ser utilizados para a realização de espectrometria neutrônica.

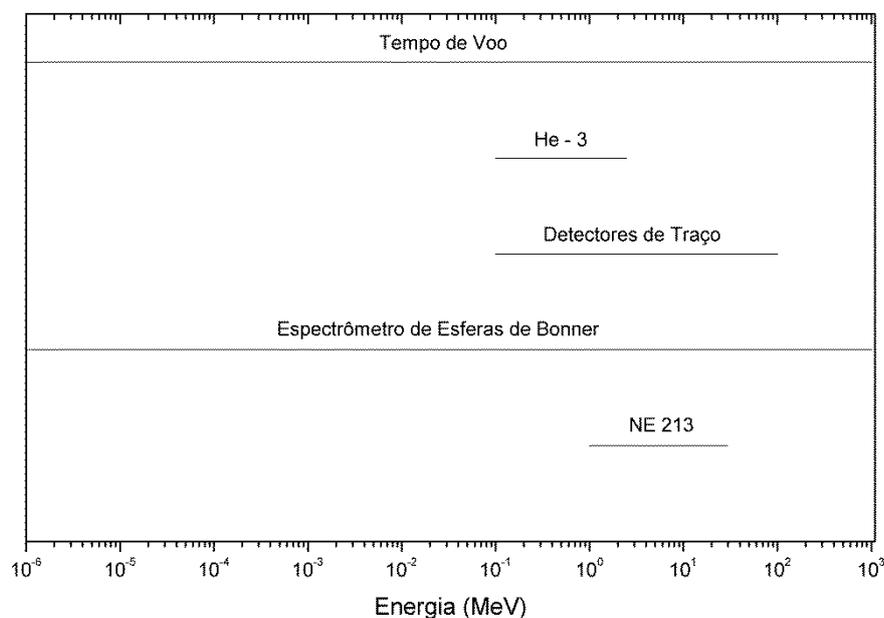


Figura 7: Intervalo de energia coberto por diferentes sistemas espectrométricos (Adaptado de KNOLL, 2000 e ATTIX, 2004).

Através da figura é possível constatar que os únicos sistemas espectrométricos que cobrem tão largo intervalo energético, são aqueles que utilizam a técnica do tempo de voo e o sistema de esferas de Bonner.

### 3.2 Resolução Energética

Essa característica é definida como a largura do espectro à meia altura da variação da resposta dos nêutrons monoenergéticos em função da energia (FWHM, de “*full-width at half-maximum*”), expressa comumente em percentual da energia do nêutron. A resolução energética do espectrômetro varia em função da energia dos nêutrons incidentes em seu volume sensível.

### 3.3 Eficiência

A eficiência intrínseca de um instrumento de detecção é geralmente definida pela probabilidade de detectar a radiação que interage no seu volume sensível (KNOLL, 2000). A eficiência dos instrumentos utilizados na detecção dos nêutrons depende consideravelmente da energia do nêutron incidente e pode variar desde alguns décimos percentuais, para nêutrons com alta energia (nêutrons rápidos) a quase 100% para nêutrons lentos. Essa variação influencia no tempo de aquisição dos mesmos.

Sendo uma grandeza adimensional, a eficiência ( $\varepsilon$ ) é expressa matematicamente como a razão entre o sinal de saída do instrumento ( $\Theta$ ), geralmente considerada como a taxa de contagem e o produto entre a fluência neutrônica ( $\Phi$ ) e  $A$  é a área da seção transversal do instrumento (BARTLETT *et al*, 2003).

$$\varepsilon = \frac{\Theta}{\Phi \cdot A} \quad (13)$$

A grande maioria dos sistemas de espectrometria possui uma baixa eficiência de detecção, como exceção do sistema de esferas de Bonner (EB) e dos cintiladores orgânicos (BAKALI, 2001).

### **3.4 Sensibilidade**

A sensibilidade de um sistema espectrométrico é definida como a razão entre a variação da resposta obtida pelo instrumento e a correspondente variação da grandeza considerada (BARTLETT *et al*, 2003).

### **3.5 Reprodutibilidade**

A reprodutibilidade se refere à probabilidade que a deconvolução realizada com os dados obtidos por um sistema espectrométrico, possa representar um espectro neutrônico com razoável aceitabilidade, o que torna necessário que alguns espectros sejam conhecidos quando se irradia com fontes devidamente calibradas, pois os mesmos tornam-se uma referência para qualquer discordância de operacionalidade do equipamento ou no processo de deconvolução.

Outras características tais como tamanho, portabilidade, sensibilidade a variações de temperatura, pressão ou ruído, também devem ser consideradas na seleção de um sistema espectrométrico mais adequado.

### **3.6 Sistemas Espectrométricos**

Diferentes sistemas foram desenvolvidos para realizar espectrometria neutrônica, sendo os mais utilizados detectores limiares (ativação ou fissão), os contadores proporcionais de  $^3\text{He}$ , cintiladores de LiI, detectores de prótons de recuo e o método do tempo de voo.

Utilizado para fins de radioproteção, particularmente em ambientes que trabalhadores estejam ocupacionalmente expostos a esse tipo de radiação, o sistema de esferas de Bonner ou simplesmente sistema EB é o espectrômetro mais utilizado.

### 3.6.1 Sistema Espectrométrico de Esferas de Bonner

Elementos que possuem uma alta eficiência para detecção de nêutrons térmicos tais como o  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{10}\text{B}$  ou  ${}^3\text{He}$ , podem ser cobertos com materiais moderadores ricos em hidrogênio a fim de torná-los sensíveis a nêutrons com alta energia.

O sistema de espectrometria de Multiesferas de Bonner, também conhecido como espectrômetro de Bonner, foi proposto inicialmente por Bramblett, Ewing e Bonner em 1960 (BRAMBLETT *et al*, 1960) e consiste de um conjunto de esferas construídas geralmente em polietileno  $(\text{C}_2\text{H}_4)_n$ , em diferentes diâmetros onde no centro de cada esfera é acomodado um detector de nêutrons térmicos.

O detector descoberto (detector sem esfera atenuadora) mede somente os nêutrons térmicos do espectro, já as esferas de polietileno agem como moderadoras para “frear” a alta energia dos nêutrons incidentes para a região de baixas energias.

A combinação de um sensor de nêutrons térmicos com as esferas moderadoras de diferentes diâmetros permite que esse sistema seja utilizado para uma ampla faixa energética compreendida desde nêutrons térmicos (25 meV) até nêutrons rápidos (aproximadamente 20 MeV). Devidamente modificado, esse sistema pode ser utilizado para realização de espectrometria de nêutrons de alta energia ( $E_n > 50 \text{ MeV}$ ) (ALEVRA; THOMAS, 2003).

No entanto, a sensibilidade de cada esfera a um intervalo de energia particular depende consideravelmente do diâmetro da esfera utilizada.

#### 3.6.1.1 Princípio de funcionamento do sistema EB

Na Figura 8 são apresentadas as mais comuns formas de interações dos nêutrons em uma esfera moderadora do sistema EB ao sofrer uma exposição a uma fonte neutrônica. A região central da esfera é denominada de volume sensível, onde estará localizado o detector de nêutrons térmicos.

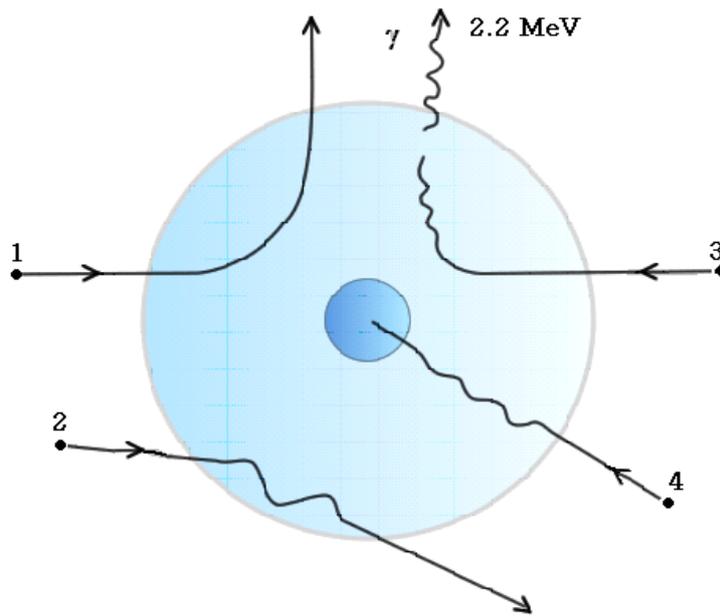


Figura 8: Esquema simplificado das possíveis interações do nêutron nas esferas do sistema EB (ALEVRA & THOMAS, 2003).

Pode ser observado na Figura 8 que no caso do nêutron 1, o mesmo escapa da esfera após sofrer uma interação, normalmente provocada por uma colisão elástica com um núcleo de carbono ou átomo de hidrogênio.

O nêutron 2 também escapa da esfera moderadora, provavelmente termalizado após sofrer algumas interações com os átomos do polietileno.

O nêutron 3 sofre várias interações com o polietileno até ser finalmente termalizado. Mas, antes de conseguir chegar ao volume sensível, é capturado por um núcleo de hidrogênio, o que em alguns casos resulta em uma emissão  $\gamma$  com energia próxima de 2,2 MeV.

Finalmente no caso do nêutron 4, esse é termalizado e consegue entrar na região onde está localizado o detector de nêutrons térmicos (ALEVRA, 1999; ALEVRA; THOMAS, 2003).

É importante salientar que a probabilidade de ocorrência dos quatro tipos de interações apresentados depende da energia do nêutron incidente e do diâmetro de cada esfera. Consequentemente é possível afirmar que para as esferas menores, nêutrons de baixa energia podem sofrer os quatro tipos de interações apresentadas, e um número bastante expressivo consegue alcançar a região do detector de nêutrons térmicos e são então detectados, enquanto que nêutrons de alta energia

conseguem escapar facilmente.

Já para as esferas com dimensões maiores, ocorre naturalmente muito mais moderação. Para os nêutrons de baixa energia que não conseguem escapar, a probabilidade destes serem capturados e ocorrer à emissão de um raio gama com energia bem definida é alta, o que leva a uma resposta consideravelmente baixa no detector. Já os nêutrons com alta energia são, em sua maioria, termalizados e detectados. Na Figura 9, é apresentado o conjunto de esferas de Bonner utilizado na realização deste trabalho.



*Figura 9: Apresentação do conjunto de esferas de polietileno do sistema EB utilizado neste trabalho.*

Esse sistema permite que em seu interior seja acomodado um detector de nêutrons térmicos, comercialmente adquirido com um cintilador de  ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$  (ver Apêndice A), no entanto, outros tipos de detectores podem ser adaptados como a combinação de detectores termoluminescentes (TLD600 e TLD700).

### 3.6.3 Detectores Termoluminescentes (TLD)

Alguns materiais termoluminescentes consistem em cristais, aos quais uma pequena concentração de impureza é adicionada como um ativador (como no  $^N\text{LiF:Mg,Ti}$ , onde o manganês e o titânio são os elementos ativadores).

Qualitativamente, o fenômeno de termoluminescência pode ser explicado com a utilização do modelo de bandas para os níveis de energia dos elétrons nos sólidos. Os materiais termoluminescentes são em geral, policristais iônicos, nos quais a banda de valência se encontra repleta de elétrons e a banda de condução vazia, ambas separadas por uma larga faixa de estados energéticos não permitidos aos elétrons, a denominada banda proibida (McKEEVER *et al*, 1995).

Quando o policristal é exposto à radiação ionizante, são produzidos pares de elétrons e lacunas; os elétrons migram através do mesmo até se recombinarem ou até que sejam capturados em estados metaestáveis de energia, localizados na banda proibida e denominados armadilhas. Essas armadilhas são, no caso de alguns fósforos, capazes de reter os elétrons e as lacunas por longos períodos em temperatura ambiente.

Aquecendo-se posteriormente a amostra, os elétrons e/ou lacunas conforme os tipos de armadilha absorvem energia térmica suficiente para escapar das armadilhas, permitindo que os elétrons migrem para a banda de condução e as lacunas sejam direcionadas para a banda de valência.

Os elétrons que migram para a banda de condução podem se movimentar livremente no cristal até a recombinação com as lacunas armadilhadas nesta banda, ocorrendo desta forma a probabilidade de um fóton ser emitido. No caso das armadilhas de lacunas serem mais rasas, estas são liberadas antes dos elétrons, seguem para a banda de valência e podem movimentar-se com liberdade pelo cristal até se recombinarem com os elétrons armadilhados. Isso ocorrendo poderá também haver a probabilidade de emissão de fótons (ROSA, 1978).

A formação de um pico de emissão TL está relacionada com a probabilidade de escape do elétron da armadilha correspondente, ou seja, quando a temperatura do material é menor que a do pico considerado, poucos portadores de carga são liberados, e a luz emitida é fraca. Aquecendo-se o cristal, a probabilidade de escape aumenta, causando um aumento da emissão, que é máxima na temperatura do pico.

Pode-se afirmar que o processo termoluminescente envolve basicamente dois estágios: primeiro, o material é exposto à radiação e armazena a energia incidente. No segundo estágio, o material é aquecido e a energia armazenada é liberada em forma de luz.

Muitos fósforos apresentam um número grande de armadilhas com diferentes profundidades e suas curvas de emissão podem apresentar numerosos picos. A curva de termoluminescência é característica de cada material e exibirá diferentes picos de acordo com o material dopante existente em sua composição.

A intensidade da luminescência em função da temperatura é chamada curva de emissão luminescente termo-estimulada ou termoluminescente (TL) ou ainda curva de luminescência. É apresentada na Figura 10 uma curva de emissão TL típica do fluoreto de lítio natural ( $^{\text{N}}\text{LiF:Mg,Ti}$ ).

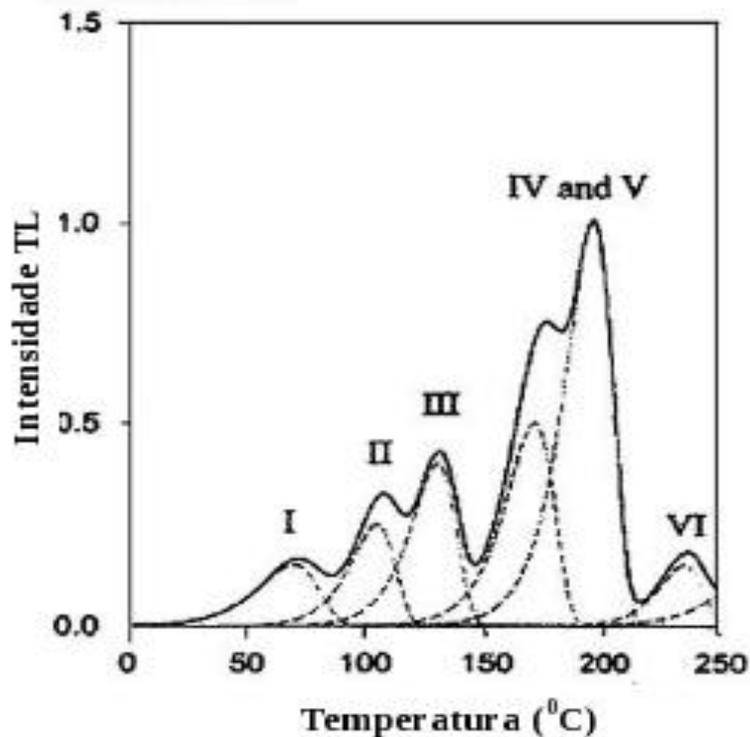


Figura 10: Curva de emissão TL típica do LiF (CAMPOS, 1998).

Os detectores termoluminescentes (TLDs) são encontrados comercialmente em uma grande variedade de formas físicas incluindo cristais, cilindros, “chips”, pó ou discos com base de PTFE (Teflon®), sendo a forma mais popular o chip de pastilhas prensadas.

Uma vantagem significativa no uso dos materiais termoluminescentes é o fato dos mesmos poderem ser reutilizados inúmeras vezes, sem que isso implique na perda de suas propriedades dosimétricas. Para que isso ocorra de forma adequada, são indicados tratamentos térmicos específicos para cada tipo de material, de forma que sejam restauradas suas propriedades originais (CAMPOS, 1998).

Os detectores termoluminescentes que são mais utilizados para a realização de espectrometria neutrônica são os cintiladores de fluoretos de lítio (LiF), valendo-se para isso da combinação de fluoretos de lítio (a combinação do  ${}^6\text{LiF:Mg,Ti}$  com o  ${}^7\text{LiF:Mg,Ti}$ , ou ainda o  ${}^6\text{LiF:Mg,Ti}$  com o  ${}^{\text{N}}\text{LiF:Mg,Ti}$ , também conhecidos como TLD600, TLD700 e TLD100, respectivamente).

Os cintiladores de LiF, por suas características intrínsecas, não apresentam uma boa resposta para nêutrons rápidos, desta forma, para que este material seja utilizado como um detector de nêutrons é necessário que os nêutrons incidentes sejam devidamente termalizados, valendo-se para isso, de materiais hidrogenados como o polietileno ou parafina.

Isso pode ser explicado valendo-se da consideração que os nêutrons rápidos perdem energia rapidamente através de colisões elásticas com materiais de baixo número atômico, e que a probabilidade de captura neutrônica aumenta quando esses alcançam a região térmica.

Sabe-se que devido à seção de choque do  ${}^6\text{Li}$  para nêutrons térmicos (~ 945 barns), o TLD600 torna-se sensível tanto a fótons quanto a nêutrons. Já o TLD700, por possuir uma reduzida seção de choque para os nêutrons térmicos (~0,04 barns) devido à presença do  ${}^7\text{Li}$ , é sensível praticamente apenas a fótons.

Essa grande diferença na seção de choque leva a uma diferença também similar na sensibilidade dos TLD600 e TLD700 como detectores de nêutrons térmicos, permitindo que a combinação de ambos seja utilizada na realização de espectrometria de nêutrons com o sistema EB.

Outro fluoreto de lítio que pode ser utilizado na detecção de nêutrons é o  ${}^{\text{N}}\text{LiF}$ , constituído por Li em abundância isotópica natural, possuindo seção de choque para nêutrons térmicos de aproximadamente 71 barns, também conhecido como Li-

natural. Esse fluoreto apresenta em sua composição cerca de 7,4% de  ${}^6\text{Li}$ , o que propicia uma sensibilidade deste material para a detecção de nêutrons térmicos (McKEEVER *et al*, 1995).

Contudo, quando utilizados em campos mistos intensos, recomenda-se a realização de uma correção devido à componente gama (VEGA-CARRILLO, 2002; ATTIX, 2004).

A principal desvantagem desses detectores, de uma maneira geral, é que devido à sua baixa eficiência, o tempo de exposição para que esses cristais apresentem um limite mínimo detectável é maior que outros detectores (McKEEVER *et al*, 1995). Por outro lado, os mesmos podem ser utilizados quando se deseja realizar espectrometria em ambientes de alto fluxo de nêutrons, onde outros detectores saturariam suas respostas com maior rapidez.

## 4. DECONVOLUÇÃO DO ESPECTRO NEUTRÔNICO

### 4.1 Processo de Deconvolução

A determinação da informação espectral por meio de um processo de deconvolução não é uma tarefa trivial e consiste em determinar a fluência neutrônica ( $\Phi_i$ ) para um dado intervalo de energia, em um número limitado de medidas e por meio de uma matriz resposta conveniente. O processo de deconvolução pode ser interpretado como um mapeamento da leitura de um detector em um espaço  $m$ -dimensional em relação ao fluxo de nêutrons em um espaço  $n$ -dimensional (KARDAN *et al*, 2004) (ver Apêndice A).

Em outras palavras, o objetivo do processo de deconvolução é determinar uma solução simples que possibilite aproximar a fluência neutrônica com o espectro em energia. A avaliação do espectro por meio de medidas experimentais implica na solução de um sistema de equações integrais, expressas pela Equação 14:

$$C_i = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \Phi_E(E) \cdot R_i(E) dE \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (14)$$

onde a razão de contagem  $C_i$ , para um dado detector  $i$  posicionado em um campo neutrônico, é obtida pela solução da integral entre o produto da função resposta,  $R_i(E)$ , com a distribuição da fluência espectral,  $\Phi_E(E)$ .

Esse sistema de equações integrais de primeira ordem é conhecido como Equação de Fredholm e não possui solução única, pois devido a um número de medidas discretas, a mesma não pode definir uma função contínua de  $\Phi_E(E)$ .

Embora existam vários métodos para solucionar esse sistema de equações, nenhum desses métodos é aplicável quando a função resposta não é conhecida analiticamente, o que é o caso dos sistemas utilizados em espectrometria neutrônica.

Pode-se afirmar que se a informação espectral sobre um campo neutrônico desconhecido está disponível em um vetor  $\Phi$  com  $N$  elementos, esse vetor é expresso como:  $\Phi^T = \langle \Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_N \rangle$ , onde  $\Phi^T$  é a sua transposta e o componente

$N$  é considerado como o valor da fluência no  $n$ -ésimo intervalo de energia, ou seja, o número de pontos necessários para definir o espectro neutrônico (BARTLETT *et al*, 2003).

Na prática, este problema é solucionado aproximando experimentalmente a função resposta através de uma matriz resposta com valores discretos. Essa aproximação permite que a Equação 14 seja reescrita como um conjunto de  $M$  equações lineares, sendo  $M$  o número de detectores utilizados para caracterizar o espectro. Na forma matricial esta equação pode ser reescrita como apresentada na Equação 15:

$$C = R \cdot \Phi \quad (15)$$

Sendo  $R$  a matriz resposta e  $\Phi$  o vetor fluência, esta relação pode ser ainda representada na forma matricial como:

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_i \\ \vdots \\ C_M \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1i} & \cdots & R_{1N} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2i} & \cdots & R_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{i1} & R_{i2} & \cdots & R_{ij} & \cdots & R_{iN} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{M1} & R_{M2} & \cdots & R_{Mj} & \cdots & R_{MN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \vdots \\ \Phi_j \\ \vdots \\ \Phi_N \end{bmatrix} \quad (16)$$

A solução da equação de Fredholm por ser indeterminada e complexa, pode ser simplificada por aproximação quadrática e reescrita como uma equação linear:

$$C_i = \sum_{j=1}^N \Phi_j \cdot R_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (17)$$

sendo  $\Phi_j$  a fluência neutrônica para o  $j$ -ésimo intervalo de energia e  $R_{ij}$ , a resposta do  $i$ -ésimo detector sobre o  $j$ -ésimo intervalo de energia.

Com o espectro neutrônico conhecido, é possível avaliar outras grandezas como o equivalente de dose ( $H$ ), que é determinado pela integração de uma função de conversão de dose conveniente  $[h(E)]$  e fluxo do espectro neutrônico, como apresentado através da Equação 18:

$$H = \int h_{\Phi} \cdot \Phi_E dE \quad (18)$$

Discretizando numericamente a Equação 18 pode-se obter a seguinte relação abaixo:

$$H = \sum_{i=1}^N h_j \cdot \Phi \quad (19)$$

onde  $H$  é o equivalente de dose,  $h_j$  o fator de conversão conveniente para o  $j$ -ésimo intervalo de energia e  $\Phi$  a fluência neutrônica total.

O desenvolvimento de técnicas que objetive o aprimoramento do processo de deconvolução tem sido alvo de vários pesquisadores ao longo dos anos, principalmente para os dados obtidos com o espectrômetro de esferas de Bonner (ZOIDINS *et al*, 1978; LOWRY; JOHNSON, 1984; PULPÁN; KRÁLÍK, 1993; REGINATTO; GOLDHAGEN, 1999; MATZKE, 2002; WEYRAUCH *et al*, 2002).

A precisão do espectro neutrônico obtida pela deconvolução experimental dos dados obtidos com o espectrômetro de Bonner é parcialmente limitada pela escolha de uma matriz resposta conveniente.

Teoricamente, qualquer detector de nêutrons térmicos pode ser utilizado conjuntamente com o sistema EB, no entanto, sua matriz resposta deve ser conhecida por métodos matemáticos ou por medições experimentais para que seja realizado o processo de deconvolução (VEGA-CARRILLO *et al*; 1999).

## 4.2 Códigos de Deconvolução

Um dos maiores problemas relacionados à realização de espectrometria neutrônica é a necessidade de deconvolução dos dados obtidos com os sistemas espectrométricos.

Como anteriormente citado, a solução da Equação de Fredholm (Equação 15), apresenta um número infinito de soluções, o que torna o processo de deconvolução dos espectros de nêutrons uma tarefa não muito fácil de ser realizada.

Vários métodos já foram utilizados para tornar esta tarefa menos complexa, entre eles podem ser citados: o método dos mínimos quadrados (ZADINS *et al*, 1978); o método Monte Carlo (LINDEMANN, ZECH; 1995), e método da máxima entropia (REGINATTO, GOLDHAGEN; 1999). Esses métodos têm sido utilizados com sucesso para o desdobramento do espectro neutrônico, principalmente quando se utiliza o sistema EB.

Hoje, o desenvolvimento de técnicas que permitam de uma forma rápida e segura, a deconvolução de espectros neutrônicos, é geralmente obtida com a utilização de códigos computacionais desenvolvidos especificamente para este fim.

Esses códigos procuram chegar ao espectro neutrônico do ambiente em estudo a partir de espectros de referência disponibilizados na literatura (ISO, 1989; IAEA, 2001). Entre os vários programas desenvolvidos para realizar a deconvolução do espectro, podem ser citados os seguintes códigos:

### 4.2.1 MAXED

O código MAXED (*MAXimum Entropy Deconvolution*), desenvolvido por Reginatto e Goldhagen (1999), foi escrito na linguagem Fortran especificamente para deconvoluir o espectro neutrônico através dos dados obtidos com o espectrômetro de multiesferas de Bonner.

O conceito de entropia foi introduzido por Ludwig Boltzmann em 1890 (SALINAS, 2008), através de estudos sobre termodinâmica, com o objetivo de caracterizar o grau de desordem de um sistema, seus conceitos foram aplicados nas mais diversas áreas, entre elas a teoria da informação.

A teoria da informação afirma que quanto menor o número de informações sobre um determinado sistema, maior será sua entropia. Isso implica que equações matemáticas para definir entropia usam métodos probabilísticos para serem deduzidas. Ao se utilizar o método da entropia máxima podem-se encontrar valores próximos aos valores reais. A entropia é matematicamente expressa como:

$$S = - \int_{i=1}^n P_i \cdot \ln P_i \quad (20)$$

onde  $n$  é o número total de saídas e  $P_i$  representa a probabilidade de saída  $i$ .

Os valores de  $P_i$  que maximizam  $S$  são submetidos às condições da informação disponíveis, dando como resultado a melhor e mais objetiva solução, de todas as soluções possíveis, dentro do conjunto de informações conhecidas. Basicamente, o método da máxima entropia consiste na determinação de uma solução aproximada mais compatível com os dados observáveis.

O código MAXED utiliza a densidade de probabilidade, definida sobre o espaço de todo espectro para construí-lo. Para tanto é requerido pelo código que parâmetros de entrada como: os dados obtidos com o detector, a função resposta para um dado detector e o número de detectores utilizados sejam conhecidos para que assim seja calculado o parâmetro de saída, através de equações que relacionem essas grandezas (REGINATTO *et al*, 2002).

#### 4.2.2 BONDI-97

O princípio básico na utilização de um algoritmo genético é buscar o melhoramento dos resultados de determinadas operações, pela incorporação de resultados transitórios para que seja obtida uma solução próxima de um resultado esperado. O algoritmo genético é um processo estocástico e adequado para que seja encontrada uma única solução em um espaço complexo e multidimensional da solução (MUKHERJEE, 1999).

Esses algoritmos são baseados nos processos genéticos dos organismos

biológicos que pelos princípios da seleção natural (paradigma da evolução darwiniana) podem ser aplicados para a solução de vários problemas. É um mecanismo probabilístico iniciado através da criação de um elevado número de soluções prováveis (FREEMAN *et al*, 1999).

Como apresentado anteriormente, os AG são muito eficientes para busca de soluções ótimas, ou aproximadamente ótimas, em uma grande variedade de problemas, pois não impõem muitas das limitações encontradas nos métodos de busca tradicionais. Eles introduzem uma solução potencial para um problema específico numa estrutura semelhante à de um cromossomo e aplicam operadores de seleção e cruzamento (*crossover*) a essas estruturas de forma a preservar informações críticas relativas à solução do problema. Este processo, chamado de reprodução, é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada.

O código BONDI-97 que utiliza o princípio dos algoritmos genéticos para deconvoluir o espectro obtido com o espectrômetro de Bonner utilizando o cintilador de  ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$  como detector de nêutrons térmicos foi elaborado por Bhaskar Mukherjee (1999). O método utilizado pelo código vale-se da “indicação” de um número aleatório para cada variável individualmente, que no caso representa um intervalo de fluxo, no processo de teste cada variável é ajustada individualmente e então o código chega à solução ótima do problema através de uma condição de convergência.

#### **4.2.3 BUNKI**

Esse código foi aperfeiçoado por Lowry e Johnson (1984), por sua operacionalidade é ainda um dos códigos mais utilizados no processo de deconvolução do espectro neutrônico pelos laboratórios. Escrito na linguagem Fortran, o código BUNKI permite ao usuário escolher parâmetros que melhor se adequem à sua resposta.

Uma das solicitações de entrada de dados apresentadas pelo programa permite ao usuário escolher a matriz resposta e o algoritmo de deconvolução, este último realiza um ajuste linear distribuindo a fluência neutrônica nos intervalos de energia pré-definidos, o que corresponde a cada coluna de uma matriz denominada de matriz resposta.

Ele permite obter o espectro neutrônico a partir de um ajuste linear utilizando o método dos mínimos quadrados e de modo iterativo recursivo permite que o usuário possa escolher uma matriz resposta que melhor se adeque aos seus propósitos.

O método dos mínimos quadrados é um procedimento que busca o mínimo de uma função de duas variáveis (os coeficientes linear e angular de uma reta) construída a partir da distância entre os pontos experimentais e os pontos de uma reta, ou seja, o método dos mínimos quadrados é uma maneira de se obter a melhor reta que pode ser ajustada aos dados experimentais.

O espectro deconvoluído é apresentado em um arquivo onde são exibidos os parâmetros de entrada utilizados no cálculo da deconvolução e ainda, a fluência integral, o equivalente de dose máximo, a energia média da fluência e a fluência de nêutrons em cada um dos vinte e seis intervalos de energia apresentados pelo código.

O código oferece algumas matrizes respostas utilizadas no processo de deconvolução do espectro obtido com as esferas de Bonner, no entanto, essas não são recomendadas para deconvolução da informação obtida com o conjunto EB-TLD, são elas: MM60, MM65, UT13, SA13, LOGN e BARC.

As matrizes disponíveis pelo código BUNKI e recomendadas pela literatura para serem utilizadas no processamento de deconvolução dos dados obtidos com detectores termoluminescentes são as matrizes UTA4 e SAN4 (SWEEZY *et al*, 1998; VEGA-CARRILLO, 2002; LEMOS JUNIOR, 2004; SANTOS, 2006).

Um fator limitante quanto à utilização do código BUNKI é que este não apresenta uma boa resolução, pois como o mesmo só apresenta em seu arquivo de saída vinte e seis intervalos de energia, compreendidos entre  $4,14 \times 10^{-7}$  MeV e  $1,492 \times 10^1$  MeV, faz com que sua resposta não corresponda tão bem ao espectro de referência (ISO 8529, 1989).

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, o mesmo foi dividido em três etapas, sendo elas:

- Simulação do espectro neutrônico com o código computacional MCNP5 e obtenção de uma matriz resposta específica para detectores termoluminescentes;
- Desenvolvimento e implementação de um algoritmo genético a fim de deconvoluir o espectro neutrônico obtido com esferas de Bonner;
- Validação do processo de deconvolução do espectro neutrônico obtido com detectores termoluminescentes por meio de espectros neutrônicos conhecidos ( $^{241}\text{AmBe}$ ) e desconhecidos (acelerador cíclotron) utilizando algoritmo genético.

### 5.1 Simulação do espectro neutrônico com o código MCNP5

O método Monte Carlo é um método estocástico utilizado em simulações não determinísticas com diversas aplicações em áreas como a física, matemática e biologia. Este método tem sido utilizado há bastante tempo como forma de obter aproximações numéricas de funções complexas. Aplicado em diversas versões (mais conhecido como código MCNP), tem sua origem associada ao Projeto Manhattan por pesquisadores como: Oppenheimer, Fermi, Segrè, Bohr, Feynman, entre outros, durante a Segunda Guerra Mundial.

O código MCNP é uma ferramenta computacional amplamente utilizada em situações em que medidas físicas são inconvenientes, cujo objetivo principal é estudar as interações e transporte de nêutrons, fótons e elétrons na matéria, permitindo também a análise de sistemas mistos envolvendo fótons e elétrons ou nêutrons e fótons.

Particularmente útil para solução de problemas complexos que não podem ser modelados por outros códigos computacionais que utilizam métodos determinísticos, permite ainda a modelagem de geometrias complexas com a utilização de

superfícies pré-definidas.

No código MCNP, de uma forma geral, os eventos probabilísticos individuais que compreendem um processo de transporte são simulados sequencialmente e as distribuições de probabilidade que governam esses eventos são determinadas estatisticamente para descrever o fenômeno total. O processo estatístico da amostragem é baseado na seleção dos números aleatórios, análogos aos dados jogados em cassinos, daí o nome Monte Carlo (BRIEMEISTER, 2001).

Cada uma das partículas criadas é acompanhada individualmente, sendo gerado um histórico desde seu surgimento até seu desaparecimento (por absorção ou por escape do meio investigado), com o emprego de técnicas probabilísticas e verificando a eventual interação da partícula com os diferentes materiais existentes em sua trajetória.

É sabido que devido às dificuldades que envolvem a utilização de nêutrons, como a não disponibilidade de feixes monoenergéticos, a utilização desses códigos é de extrema importância para investigação preliminar da interação dessas partículas com a matéria e para a elaboração de arranjos experimentais com fontes neutrônicas.

O código computacional *Monte Carlo N-Particle Transport Code versão 5* (MCNP5) (SWEEZY *et al*, 2005), permite basicamente a análise das seguintes interações:

- *Nêutrons*: reações de espalhamento e geração de fótons;
- *Fótons*: reações de espalhamento, absorção fotoelétrica com a possibilidade de emissão de fótons de fluorescência e criação de pares elétron-pósitron;
- *Elétrons*: reações de espalhamento, *Bremsstrahlung* e aniquilação elétron-pósitron

No MCNP5, os nêutrons podem ser simulados a fim de verificar o transporte em energia em intervalos distribuídos entre  $10^{-11}$  e 20 MeV, ou ainda em feixes monoenergéticos no mesmo intervalo acima citado.

Já para fótons e elétrons este intervalo varia entre 1 keV e 1 GeV. Essas limitações devem-se à falta de dados das seções de choque eficazes para estas

partículas fora desses intervalos.

Para que o código seja executado é necessária a criação de um arquivo do tipo "DATA".TXT, onde é discriminada a geometria utilizada, os materiais que constituem o projeto, a fonte de irradiação e o tipo de informação que se deseja obter no final do processo.

Definidos os parâmetros que configuram a simulação, o código escolhe aleatoriamente, para cada nêutron gerado, as coordenadas de interação em dada célula que compõe a geometria simulada e o tipo de interação com os átomos que a constitui.

Uma vez produzida a primeira interação, os nêutrons desaparecem por reação de captura, e o código determina uma nova direção do nêutron com sua energia, bem como de todas as partículas geradas neste processo. O transporte se realiza para os nêutrons e partículas geradas e finalizando, para o nêutron, quando ocorre a reação de captura.

Quando o transporte de todos os nêutrons for concluído, o código poderá apresentar em um arquivo de saída entre outras possibilidades as seguintes informações:

- Distribuições de fluência (número de nêutrons por  $\text{cm}^2$ ), que atravessam algumas superfícies definidas na geometria e discriminadas no arquivo de entrada;
- Deposição em energia (MeV/g), realizadas pelas mesmas partículas devido à sua interação com as moléculas constituintes das células de interesse informadas no arquivo de entrada.

Em cada uma dessas distribuições é possível selecionar cartões de registros específicos (*tally card*) de acordo com o interesse do operador.

O código MCNP5 foi utilizado para simular sete conjuntos esfera-detector, distanciados em 75 cm de uma fonte pontual<sup>4</sup>. A distância foi considerada entre a fonte e o centro de cada esfera, identificado no problema como volume sensível do

---

<sup>4</sup> Essa distância é a mesma utilizada em procedimentos de irradiação no Laboratório de Nêutrons do CRCN-NE e está em conformidade com a recomendação da norma ISO 10647 (1996) e também consta no relatório CASMIN/IRD (IRD, 1999).

conjunto. Tal configuração pode ser observada na Figura 11.

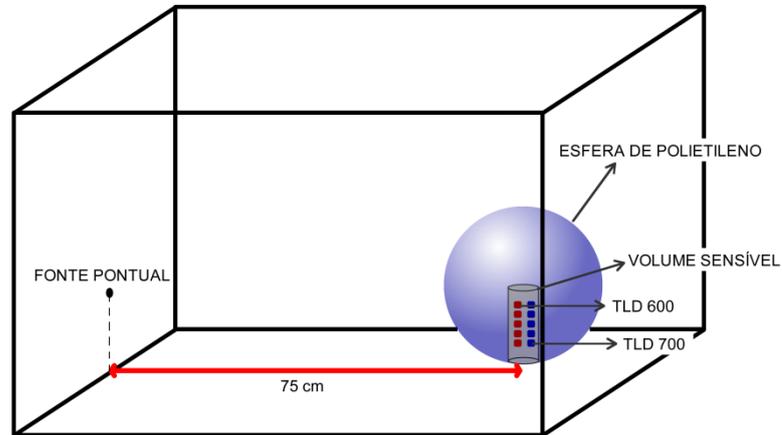


Figura 11: Representação do esquema utilizado na simulação com o código MCNP5.

No volume sensível de cada esfera foram adicionados 5 (cinco) pares de dosímetros termoluminescentes (TLD600 e TLD700) conforme apresentado na Figura 12. Cada TLD foi simulado com as seguintes dimensões 0,3175 cm x 0,3175 cm x 0,0889 cm, densidade 2,635 g/cm<sup>3</sup> e composição em massa de 75,9% de F, 29,90% de <sup>6</sup>Li e 1,2% de <sup>7</sup>Li, de acordo com as indicações do fabricante (BICRON, 1997).

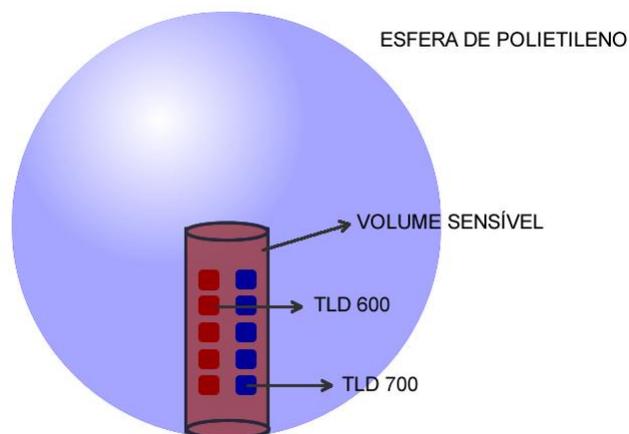


Figura 12: Corte transversal de uma esfera de Bonner, destacando-se o volume sensível onde estão inseridos os TLDs.

Vale salientar que embora os TLDs tenham representação no código de simulação, como apresentado na Figura 12, experimentalmente os mesmos foram adaptados dentro do volume sensível com uma fina folha de alumínio, já que o centro das esferas de polietileno foi projetado para o uso do cintilador de  ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ .

Para a elaboração de uma matriz resposta adequada para o uso de TLD, o espectro em energia foi dividido em 100 intervalos discretos, distribuídos entre  $2 \times 10^{-8}$  e 20 MeV. Considerando então a investigação de 7 conjuntos esfera-detector, foram assim simulados 700 arquivos e analisadas 3500 respostas (considerando que cada arquivo de entrada possui 5 pares de TLDs na saída).

Devido ao grande número de simulações e o custo computacional para a realização dessa tarefa, a mesma se tornou ágil devido à utilização de um conjunto de 8 computadores com processadores de núcleo duplo, agrupados numa configuração em cluster de processamento paralelo. Essa configuração utiliza o sistema operacional DEBIAN/GNU/LINUX (DEBIAN, 2007).

Tal sistema permite que simulações numéricas complexas, que requerem um tempo maior para seu processamento, sejam concluídas mais rapidamente do que em um único computador. Um sistema como esse está instalado no Laboratório de Dosimetria Numérica do Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (LDN/CRCN-NE/CNEN) e foi utilizado na realização deste trabalho.

As simulações foram elaboradas considerando um ambiente limitado por um paralelepípedo de dimensões 31 cm x 91 cm x 33,5 cm, onde foi inserida uma fonte pontual e o conjunto esfera-detector. Este ambiente foi projetado no vácuo a fim de se considerar as interações que ocorrem exclusivamente no conjunto esfera-detector e com instrução de gerar  $1 \times 10^8$  eventos (nps) em cada arquivo de entrada.

O objetivo principal dessa geometria é avaliar a resposta simulada e a magnitude da incerteza estatística correspondente. Esses eventos foram direcionados ao volume sensível da esfera (detector), onde estão posicionados os pares de TLDs.

Devido à variabilidade das dimensões de cada esfera, o tempo de processamento de cada simulação para cada conjunto esfera-detector em um determinado intervalo de energia variou desde 50 min (Detector Descoberto) até 300 min (Esfera 12"). Para a determinação da fluência no volume sensível utilizou-se o *tally card* F2 e para a energia depositada no volume fez-se uso do *tally card* F4.

Os dados obtidos com a simulação com o código MCNP5 permitiram a

elaboração de uma matriz resposta específica para os dosímetros termoluminescentes.

## 5.2 Desenvolvimento e implementação do Algoritmo Genético

Um algoritmo genético pode ser desenvolvido e implementado utilizando-se qualquer linguagem de programação, tais como: C, Java, entre outros, ou em qualquer sistema operacional. Assim, por conveniência, utilizou-se a linguagem C++ para implementação do Algoritmo Genético do Laboratório de Nêutrons do CRCN-NE (AGLN).

No algoritmo implementado foi utilizado um gerador de números inteiros aleatórios (“*random*”) cujos valores podem variar entre zero e um valor máximo. Este valor máximo pode variar dependendo da implementação, mas por padrão é garantido pelo menos o valor numérico de 32.767.

O número aleatório é então gerado por um algoritmo que acessa uma sequência de números inteiros não relacionados cada vez que é acionado sem que exista uma relação com o número anteriormente sorteado. Para garantir um acesso aleatório a essa sequência, foi utilizado o comando “*randomize*” cuja função é justamente inicializar a busca a partir de um ponto aleatório.

No AGLN, cada valor inteiro sorteado aleatoriamente está dentro de um intervalo cujo limite inferior é o valor 1 e o limite superior é numericamente igual à diferença entre o número mínimo e máximo de interações neutrônicas observadas no volume sensível de cada conjunto esfera-detector pelo código MCNP5. Cada valor sorteado corresponde ao valor de um gen de um indivíduo da população.

### 5.2.1 Codificação

A escolha do modelo de representação do indivíduo na elaboração do AG é de suma importância, pois de sua representação depende a qualidade das soluções.

No algoritmo genético é necessário codificar uma configuração candidata, isto é, deve-se fazer a representação de um vetor candidato à solução do problema.

Os indivíduos foram então representados por vetores, sendo cada vetor constituído por cem elementos (gens). Sendo que cada gen pode assumir um valor

compreendido entre o intervalo de 1 e de  $1.10^5$  n/cm<sup>2</sup>.

### 5.2.2 População

O tamanho da população influencia diretamente a velocidade de processamento da informação, devido ao número de gerações necessárias para que seja encontrada uma solução ótima ou quase-ótima do problema. Isso se deve ao fato que as características das soluções candidatas que pertencem à população inicial, são transferidas para os seus descendentes nas gerações subsequentes.

Durante os testes iniciais realizados a fim de se determinar o número ideal para a população do AGLN, ficou evidenciado que um número acima de 300 indivíduos (vetores), por esfera faz com que o código processe os dados de entrada demoradamente, assim foi adotado esse número como o máximo de indivíduos para cada conjunto investigado.

Cada indivíduo da população representa um possível candidato à solução do problema ou o vetor fluência do espectro neutrônico para cada conjunto EB-TLD.

Inicialmente, o código gera randomicamente o primeiro conjunto de indivíduos,  $\Phi_{ij}$ , sendo que cada indivíduo da população (ou cromossomo) é constituído por 100 elementos (gens), o qual pode ser representado pela Equação 21.

$$\overrightarrow{\Phi_{i,j}} = \langle \Phi_{1j}, \Phi_{2j}, \Phi_{3j}, \dots, \Phi_{100j} \rangle \quad (21)$$

de tal forma que o indivíduo  $\Phi_{ij}$  representa o vetor solução da  $i$ -ésima esfera no  $j$ -ésimo intervalo de energia, cujo coeficiente  $j$  varia entre os 100 intervalos de energia estabelecidos no problema e o coeficiente  $i$  pode assumir o índice de um dos 7 conjuntos utilizados pelo sistema espectrométrico.

Cada gen que compõe o indivíduo está correlacionado com um intervalo de energia específico (expresso em MeV). Por exemplo: o gen 1 está relacionado com o intervalo de energia  $[2.10^{-8}; 2,83.10^{-8}]$ ; o gen 2 com o intervalo de energia  $[2,83.10^{-8}; 3,67.10^{-8}]$ , e assim por diante.

Essa correlação tem como objetivo apontar a energia média do espectro

através da fluência significativa para um determinado espectro (gen significativo), assim, o maior gen do indivíduo indica a energia correspondente ao seu intervalo.

### 5.2.3 Seleção

Em cada geração, serão selecionados dois indivíduos, denominados como “pais”, e submetidos ao operador genético de cruzamento a fim de que sejam gerados novos indivíduos, agora denominados como “filhos”.

O método utilizado para que os “pais” sejam selecionados é denominado de torneio. Neste método, dez indivíduos são selecionados aleatoriamente e divididos em dois grupos, *A* e *B*. Ele permite que todos os indivíduos da população tenham a possibilidade de serem selecionados e terem suas características transmitidas aos descendentes da geração seguinte.

Em cada grupo é realizada uma competição onde aquele com maior valor de *fitness* é apontado como vencedor do grupo. Os dois indivíduos vencedores em seus respectivos grupos, terão seus gens cruzados e gerarão um novo indivíduo.

A opção de utilização desse método deve-se à facilidade de implementação bem como ao tempo computacional gasto com a conclusão do processo de seleção.

### 5.2.4 Operadores Genéticos

#### 5.2.4.1 Crossover

O cruzamento dos indivíduos é realizado por meio de uma operação aritmética entre os pais selecionados no processo de seleção. Nesta operação, os pais selecionados pelo método de torneio, cruzam seus gens por meio de uma operação vetorial simples. Os vetores têm seus elementos somados e a média entre os mesmos determinada gerando um novo vetor. A representação aritmética da operação de *crossover* pode ser observada na Equação 22:

$$Filho = \frac{Pai\ 1 + Pai\ 2}{2} \quad (22)$$

Esta operação pode ser também representada como na Equação 23, onde  $\Phi_{\text{filho}}$  é o novo gen do vetor filho,  $\Phi_{ji}$  é o gen do indivíduo Pai 1 na posição  $j$  e o  $\Phi_{j'i}$  é o gen do indivíduo Pai 2 na mesma posição  $j'$  para a mesma esfera  $i$ .

$$\Phi_{\text{filho},i} = \frac{\Phi_{ji} + \Phi_{j'i}}{2} \quad (23)$$

Essa operação minimiza a possibilidade de que os valores dos gens do indivíduo-filho sejam muito diferentes dos gens dos indivíduos-pais, e permite que o algoritmo melhore sua precisão e conseqüente convergência.

O filho gerado como resultado da operação do *crossover* terá verificada a possibilidade de mutação e depois de confirmado se sofrerá ou não mutação, terá seu *fitness* avaliado e comparado com o dos pais. No caso do filho possuir uma avaliação melhor que de pelo menos um dos pais, o mesmo será inserido na população substituindo o pai com avaliação pior, e este por sua vez será descartado da população inicial.

Sendo a avaliação dos pais superior à do filho gerado, o indivíduo-filho será descartado, os pais reinsertos na população, sendo iniciado mais uma geração com a seleção de novos indivíduos para a continuação do processo de cruzamento.

#### 5.2.4.2 Mutação

A mutação está relacionada com a taxa de diversidade da população corrente, sendo estabelecida devido à necessidade do algoritmo, a probabilidade de mutação de 5%. Tal valor está de acordo com as indicações apresentadas na literatura, as quais apontam que os valores de taxa de mutação podem estar compreendidos entre 0,1 e 10% (GUIMARÃES, RAMALHO; 2001).

Assim, para a implementação da mutação com essa probabilidade são seguidos os seguintes passos:

- *Passo 1:* Considerando a aleatoriedade de ocorrência da mutação, foi realizado um sorteio para determinar se haverá ou não mutação, sendo utilizado para tanto um gerador de números aleatórios que retorna valores inteiros no intervalo de 0 a 99. Se o número sorteado estiver entre 0 e 4, haverá mutação, caso seja o número sorteado pertencente a outro intervalo não ocorrerá mutação. Essa condição garante uma probabilidade de 5% de ocorrência de mutação.
- *Passo 2:* Como cada indivíduo é composto por 100 gens e a mutação pode ocorrer em um deles aleatoriamente, a definição de qual gen sofrerá mutação deve ser realizada aleatoriamente, com a mesma probabilidade para cada gen ser escolhido. Para tanto, foi realizado outro sorteio que indica qual dos gens sofrerá mutação.
- *Passo 3:* Definido que ocorrerá mutação e em qual gen ela irá atuar, é realizada uma modificação no valor do gen. Para isso, o valor do gen é acrescido ou subtraído de um percentual do seu próprio valor. Esse percentual é também determinado aleatoriamente; para isso, o algoritmo realiza mais um sorteio para definição do atributo percentual. Os valores a serem sorteados são distribuídos entre números inteiros entre -100 e 100 e o novo gen é gerado a partir da relação abaixo:

$$\text{Novo valor do gen} = \text{valor antigo} \pm (\text{numero sorteado}/100) \times \text{valor antigo}$$

- *Passo 4:* O novo valor do gen substitui o valor antigo e passa a compor o genótipo do indivíduo (filho nascido do cruzamento de dois outros indivíduos), sendo o mesmo reinserido na população a fim de ser avaliado.

Algebricamente pode-se expressar a mutação como na Equação 24 a seguir, onde  $\rho$  é a variação atribuída ao gen do indivíduo que sofre a mutação.

$$-100\% \leq \Phi_{ij} + \rho \leq 100\% \quad (24)$$

### 5.2.5 Fitness

A avaliação do indivíduo candidato à solução do problema é realizada indiretamente. Um indivíduo selecionado randomicamente,  $(\Phi_i)$ , é atribuído como elemento da Equação 25, que por meio de uma operação vetorial com a matriz resposta correspondente  $(R_{ij})$ , determina um valor de resposta para a esfera investigada, essa resposta é denominada de *Contagem Calculada* ( $C_{calc}$ ).

$$C_{calc} = R_{ij} \cdot \Phi_i \quad (25)$$

O atributo *fitness*, por meio de uma relação entre os valores de entrada, denominado de *Contagem Experimental* ( $C_{exp}$ ), que são os valores obtidos experimentalmente com o sistema espectrométrico, e o valor calculado pelo algoritmo ou *Contagem Calculada* ( $C_{calc}$ ), avalia o quão próximo está o valor calculado pelo algoritmo do valor obtido experimentalmente, conforme pode ser observado na Equação 26.

$$f = 100 - \left[ \frac{C_{exp} - C_{calc}}{C_{exp} + C_{calc}} \right]^2 \quad (26)$$

O numeral *100* presente na equação garante que o melhor indivíduo tenha um *fitness* cujo valor pertencerá ao conjunto  $f = \{\mathbb{R}^+ \leq 100\}$ .

Esta avaliação acontecerá para todo indivíduo gerado em cada conjunto esfera-detector, e o valor do melhor indivíduo em cada processo será armazenado a fim de ser apresentado no final do processo de deconvolução, ou seja, o valor da fluência total ( $\Phi_{tot}$ ) do espectro investigado.

Os melhores indivíduos de cada esfera serão também avaliados em relação ao valor experimental obtido pelo conjunto EB-TLD. Denominou-se de fator de qualidade da resposta,  $\eta(\%)$ , a relação que quantifica em termos percentuais a diferença entre a Contagem Calculada ( $C_{calc}$ ) pelo AGLN e os dados obtidos com o conjunto EB-TLD ( $C_{exp}$ ) (FREEMAN *et al*, 1999). Tal relação indica que quanto menor for o valor de  $\eta(\%)$ , melhor é a resposta apresentada pelo o algoritmo.

$$\eta (\%) = \left[ \left( \frac{C_{calc} - C_{exp}}{C_{exp}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (27)$$

### 5.2.6 Condição de Parada

Considerou-se como condição de parada do algoritmo quando o melhor indivíduo fosse determinado ou quando fosse atingido o número máximo de gerações (iterações) previamente estabelecido.

A determinação da condição de parada está relacionada com a dificuldade do problema, ou ao custo computacional para a conclusão de todas as gerações propostas no algoritmo, sabe-se, no entanto que a determinação de tal condição de parada está diretamente relacionada com a realização de testes e avaliação dos resultados obtidos.

Assim, foram testadas algumas possibilidades, tais como 10.000, 15.000, 20.000, 30.000 e 50.000 gerações; no entanto, o número de gerações que apresentaram os valores mais estáveis sem, no entanto aumentar consideravelmente o tempo de processamento foi de 30.000 gerações.

### 5.2.7 Apresentação do Algoritmo Genético do Laboratório de Nêutrons (AGLN)

Ao término do processamento dos dados de entrada, o algoritmo apresenta na interface de saída as seguintes informações: os valores do *fitness* dos melhores indivíduos ( $f$ ) e o fator de qualidade da resposta  $n(\%)^5$ , a fluência total do espectro ( $\Phi_{tot}$ ), que é o somatório de todos os melhores indivíduos obtidos para cada conjunto esfera-detector, representado algebricamente pela Equação 28, e a energia média ( $E_{med}$ ) do espectro investigado, apresentado na Equação 29.

$$\Phi_{tot} = \sum_{i=1}^n \Phi_{ij} \quad (28)$$

---

<sup>5</sup> Tais valores são relativos a cada conjunto esfera-detector selecionado.

Para a determinação da energia média do espectro, o algoritmo indica o gen que influencia a amplitude do espectro em um determinado conjunto esfera-detector. O posicionamento desse gen é então correlacionado com a posição correspondente ao elemento do vetor energia.

$$E_{med} = \frac{\sum_{i=1}^n \Phi_i E_i}{\sum_{i=1}^n \Phi_i} \quad (29)$$

Outra grandeza apontada no fim do processo de deconvolução pelo AGLN é o equivalente de dose ambiental [ $H^*(d)$ ], determinado através da Equação 30.

$$H^*(10) = h^*(10) \cdot \Phi_{tot} \quad (30)$$

onde  $h^*$  é coeficiente de conversão de fluência para equivalente de dose ambiental e  $\Phi_{tot}$  é a fluência total calculada pelo o algoritmo.

O coeficiente de conversão de fluência para equivalente de dose ambiental ( $h^*$ ) possui seus valores disponibilizados na norma ISO 8529 (ISO, 1989).

Também na interface de saída do AGLN é apresentado um gráfico que demonstra a evolução do algoritmo de acordo com as gerações por ele implementadas. Quanto mais próximo do limite máximo, melhor o *fitness* do indivíduo.

São apresentadas nas figuras a seguir, a tela de apresentação ampliada do algoritmo genético (Figura 13) e a apresentação gráfica da convergência do código (*fitness*) (Figura 14).

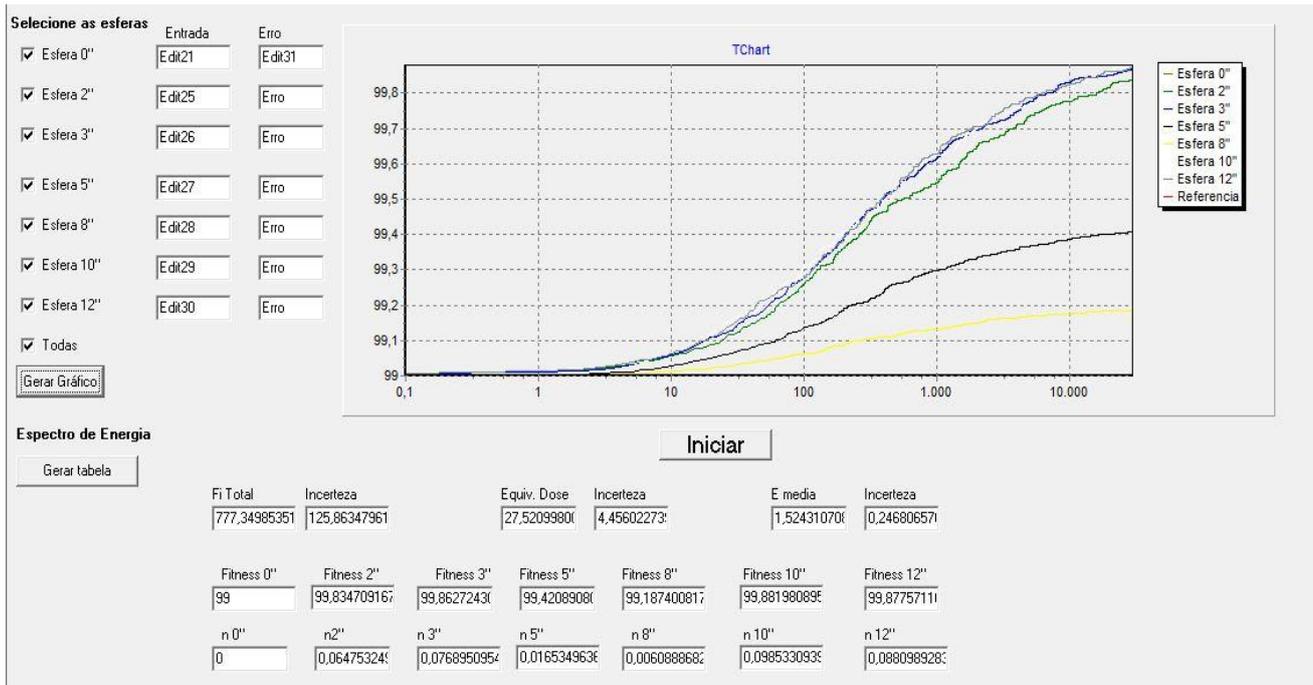


Figura 13: Apresentação do código AGLN.

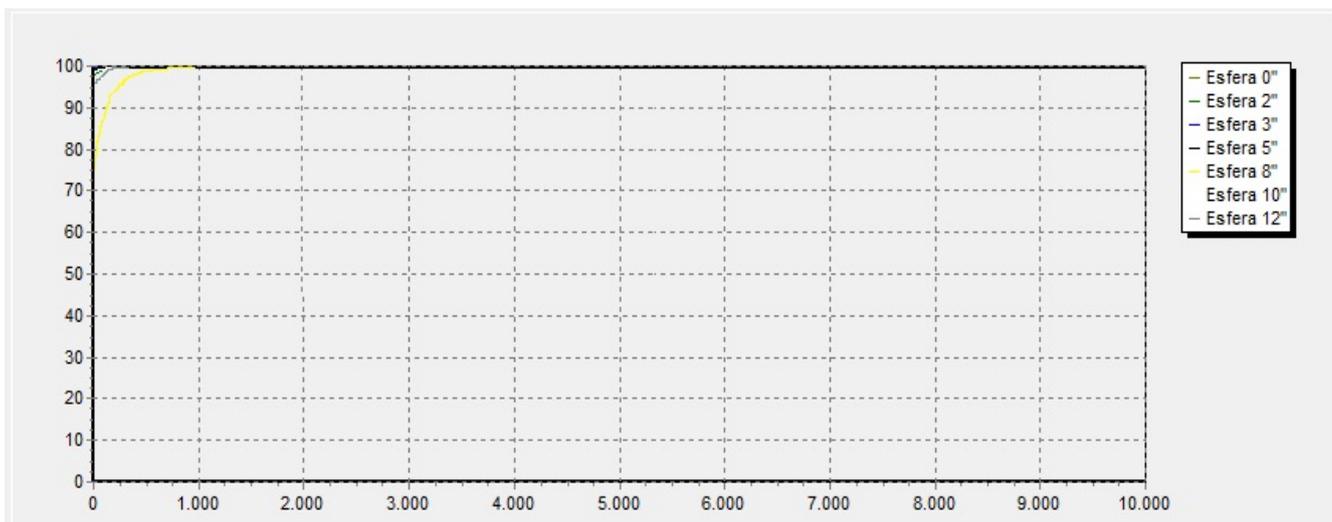


Figura 14: Apresentação da convergência do código AGLN implementado para deconvolução do espectro neutrônico.

### 5.2.8 Arquivo de Saída

O código AGLN permite também a análise do espectro do ambiente investigado, por meio de um arquivo de saída denominado FLUENCIA.TXT, no qual é apresentado o comportamento da fluência ( $n/cm^2$ ) em relação a cada intervalo de energia investigado. Os dados apresentados podem ser plotados em um aplicativo para análise de dados estatísticos, tais como EXCEL, ORIGIN, etc.

Os dados contidos nesse arquivo podem ser convertidos em fluência/letargia<sup>6</sup> ( $n/cm^2/Leth$ ), a fim de melhorar a visualização e conseqüentemente, poderem ser comparados com outros espectros de referência.

## 5.3 Verificação experimental

Com o objetivo de validar a matriz resposta obtida por simulações computacionais, cuja descrição será apresentada no item seguinte, procurou-se realizar um estudo preliminar com uma fonte de espectro conhecido.

Assim, o sistema de espectrometria EB-TLD foi inicialmente exposto a uma fonte de <sup>241</sup>AmBe no Laboratório de Nêutrons do Centro Regional de Ciências Nucleares (LN/CRCN-NE/CNEN).

Outro espectro ao qual o sistema de espectrometria foi exposto foi obtido na Seção de Produção de Radioisótopos (SECPRA/CDTN-MG/CNEN). Este campo, no entanto, possui espectro desconhecido.

### 5.3.1 Medidas realizadas em campos neutrônicos conhecidos

As medidas consistem na obtenção de dados por meio de exposição do sistema espectrométrico em condições precisas e reprodutíveis, de forma a possibilitar a continuidade entre a indicação do sistema para cada esfera e o valor de referência na posição de medida.

Com o objetivo de promover futuras intercomparações com outros laboratórios,

---

<sup>6</sup> Letargia é uma grandeza adimensional, porém conveniente para apresentar as curvas obtidas dos espectros neutrônicos. Expressa a energia do nêutron,  $E$ , em relação a sua energia inicial  $E_0$ , e é expressa como:  $Leth \equiv \ln\left(\frac{E_0}{E}\right)$ .

os resultados das medidas devem depender exclusivamente do instrumento de medida e do espectro neutrônico ao qual o instrumento de medida esteja sujeito.

Para que sejam compatíveis com as condições padrões de irradiação, que são utilizadas para a definição da maioria das grandezas operacionais de radioproteção, o ideal seria efetuar as irradiações em um ambiente completamente vazio, inclusive de paredes e teto, o que na prática é impossível.

O emprego de fontes não pontuais e de salas com dimensões finitas e com paredes difusoras, a presença de ar e o emprego de suportes utilizados para fixar fontes e os detectores, são fatores que contribuem inevitavelmente na medida realizada, o que torna as medidas obtidas em campos neutrônicos muito dependentes dos ambientes em que as mesmas são realizadas.

Para minimizar essa dependência é necessário usar alguns fatores de correção recomendados pela ISO 10647 (ISO, 1996). Entre eles o mais importante é a determinação do fator de correção de espalhamento, apresentado a seguir.

### **5.3.1.1 Determinação do fator de espalhamento de nêutrons**

Ao se utilizar um ambiente para irradiação com fontes neutrônicas, se faz necessária a determinação de alguns fatores, entre um dos mais importantes é o fator de espalhamento.

Nos casos de procedimentos cujos instrumentos de medição estão expostos a fontes neutrônicas, esse instrumento estará sujeito a campos mistos de radiação, podendo responder tanto aos nêutrons emitidos diretamente pela fonte quanto aqueles espalhados dentro da sala pelas paredes, piso e teto ou por outros instrumentos e acessórios que estejam lá alocados, o que torna necessária a determinação de fatores corretivos do ambiente onde serão realizados tais procedimentos (EISENHAUER *et al*, 1987; VEGA-CARRILLO *et al*, 2006).

São os fatores de espalhamento observáveis em uma sala de irradiação com fontes neutrônicas: espalhamento originado pela própria sala (paredes, piso e teto), atenuação dos nêutrons pelo ar; espalhamento devido ao ar existente na sala; espalhamento por equipamentos com compostos hidrogenados e efeitos espectrais. De forma geral, pode-se definir espalhamento como a contribuição na leitura do instrumento a ser calibrado devido à difusão aleatória dos nêutrons por sua

interação com as paredes, ar ou equipamentos que possam existir naquele ambiente.

A maior contribuição de espalhamento é dada pelas paredes e teto da sala de irradiação. Idealmente, uma sala de irradiação com fontes neutrônicas deve ser construída com material pouco espalhador, como o alumínio por exemplo. Contudo, uma sala de irradiação construída em concreto como a utilizada no desenvolvimento desse trabalho, não inviabiliza a sua utilização para procedimentos experimentais e com fins de calibração de instrumentos dosimétricos.

De acordo com as normas ISO 8529-2 e ISO 10647 (ISO, 2000 & 1996), uma sala destinada à irradiação e calibração de instrumentos com fontes neutrônicas deverá apresentar uma contribuição de espalhamento tão baixa quanto possível, porém em nenhum caso poderá causar um acréscimo na leitura no instrumento superior a 40%.

Assim são estabelecidos três diferentes métodos de correção do efeito de espalhamento: o método semi-empírico, o método do cone de sombras e o método do ajuste polinomial. De forma geral, a leitura de um instrumento,  $M_T(r)$ , devido ao campo de radiação (fonte neutrônica mais os nêutrons espalhados) pode ser determinada através da seguinte relação:

$$M_T(r) = \frac{k}{r^2} \cdot F_L [F_1(r) - F_A(r) + F'_2(r) - 1] \quad (31)$$

onde  $r$  é a distância dada entre o centro da fonte e o ponto de referência,  $k$  é uma constante característica para a combinação fonte-detector,  $F_L$  é a correção sobre a linearidade para qualquer desvio de linearidade entre a leitura do instrumento e a razão dose equivalente causada na leitura,  $F_1(r)$  é o fator de correção da geometria,  $F_A(r)$  é o fator de correção sobre a influência da atenuação no ar, e  $F'_2(r)$  é a função de correção que descreve a contribuição adicional de nêutrons não-espalhados.

Assim, para a realização deste trabalho optou-se pelo método do ajuste polinomial, pela possibilidade de realização experimental com um único instrumento.

### 5.3.1.1.1 Método do Ajuste Polinomial

Esse método apresenta poucas limitações, pois possui como características principais, ser um método aritmético cujos pontos são obtidos diretamente e ajustados por polinômios, podendo ser utilizado por instrumentos multidetectores ou dosímetros montados na superfície de um fantoma.

O método do ajuste polinomial permite a utilização de uma fonte neutrônica em posição fixa e um único detector, onde a distância entre eles deve ser variada. O fator de espalhamento pode ser expresso matematicamente através da equação 32:

$$\frac{M_T(r)}{\Phi F_1(r)} = R_\Phi (1 + xr + yr^2) \quad (32)$$

sendo  $M_T(r)$  a contagem total de um instrumento em função da distância  $r$ ,  $\Phi$  a fluência neutrônica em um campo livre,  $F_1$  o fator de correção da geometria utilizada na sala, o fator  $x$  é o componente do espalhamento total no ar, o fator  $y$  é o componente resultante do retroespalhamento da sala e  $R_\Phi$  a resposta da fluência neutrônica obtida no instrumento de medida.

A resposta da fluência pode ser determinada utilizando-se a Equação 33, onde  $M_C$  é a leitura corrigida do instrumento:

$$R_\Phi = \frac{M_C}{\Phi} \quad (33)$$

Segundo a ISO 8529-2 (2000), a Equação 32 pode ser aproximada de acordo como a Equação 34, a fim de melhor avaliar os dados obtidos, de modo que  $Mr^2$  é a resposta do instrumento ( $M$ ) em função do quadrado da distância observada entre a fonte e o detector ( $r^2$ ). Essa aproximação pode ser expressa como:

$$Mr^2 = M_0 (1 + Ar + Sr^2) \quad (34)$$

De modo que  $M_0$  é a resposta do instrumento equivalente à distância de 1 m da fonte,  $A$  é a resposta relativa aos nêutrons refletidos pelo ar existente na sala e  $S$  é a resposta relativa aos nêutrons refletidos pelas paredes da sala.

Para a determinação do fator de espalhamento, a sala de irradiação foi computacionalmente modelada com o código MCNP5, sendo obedecidas para tanto suas dimensões reais (10,30 m de largura, 9,30 de comprimento e 3,00 m de altura).

A estrutura física da sala é composta de concreto comum cuja densidade é  $2,3 \text{ g.cm}^{-3}$  e, a fim de se estimar a contribuição do ar sobre o fator de espalhamento, o ambiente foi preenchido com ar cuja densidade é  $1,205 \times 10^{-3} \text{ g.cm}^{-3}$ , a concentração dos elementos tanto do concreto como do ar são apresentados nas Tabelas 2 e 3 respectivamente.

*Tabela 2: Concentração dos elementos do ar, fração por massa.*

Elemento	Concentração ( $\text{g.cm}^{-3}$ )
C	0,000124
N	0,755267
O	0,231781
Ar	0,012827

*Tabela 3: Concentração dos elementos que compõem o concreto, fração por massa.*

Elemento	Concentração ( $\text{g.cm}^{-3}$ )
H	0,010000
C	0,001000
N	0,529107
Na	0,016000
Mg	0,002000
Al	0,033872
Si	0,337021
K	0,013000
Ca	0,044000
Fe	0,014000

Para a determinação do fator de espalhamento utilizando o método do ajuste polinomial, se faz necessária a realização de um grande número de medidas; assim, ao modelo computacional da sala foram acrescentados em seu interior, além de uma fonte de  $^{241}\text{AmBe}$  com espectro de referência ISO, posicionada diagonalmente em relação às paredes internas, 14 esferas com raio 0,05 m distribuídas nas seguintes distâncias em relação à fonte: 0,50; 0,75; 0,95; 1,15; 1,35; 1,55; 1,95; 2,15; 2,35; 2,55; 2,75; 2,95; 3,15 e 3,35 m. As esferas assim distribuídas representariam o posicionamento dos detectores de nêutrons para a aquisição dos dados experimentais.

É apresentada a seguir, a modelagem computacional do Laboratório de Nêutrons obtida pelo código MCNP5, sendo nela disposta a fonte neutrônica  $^{241}\text{AmBe}$  cujo espectro de referência é fornecido pela ISO 8529 e as esferas (Figura 15). O arquivo de entrada utilizado pelo código MCNP5 é apresentado no Apêndice B.

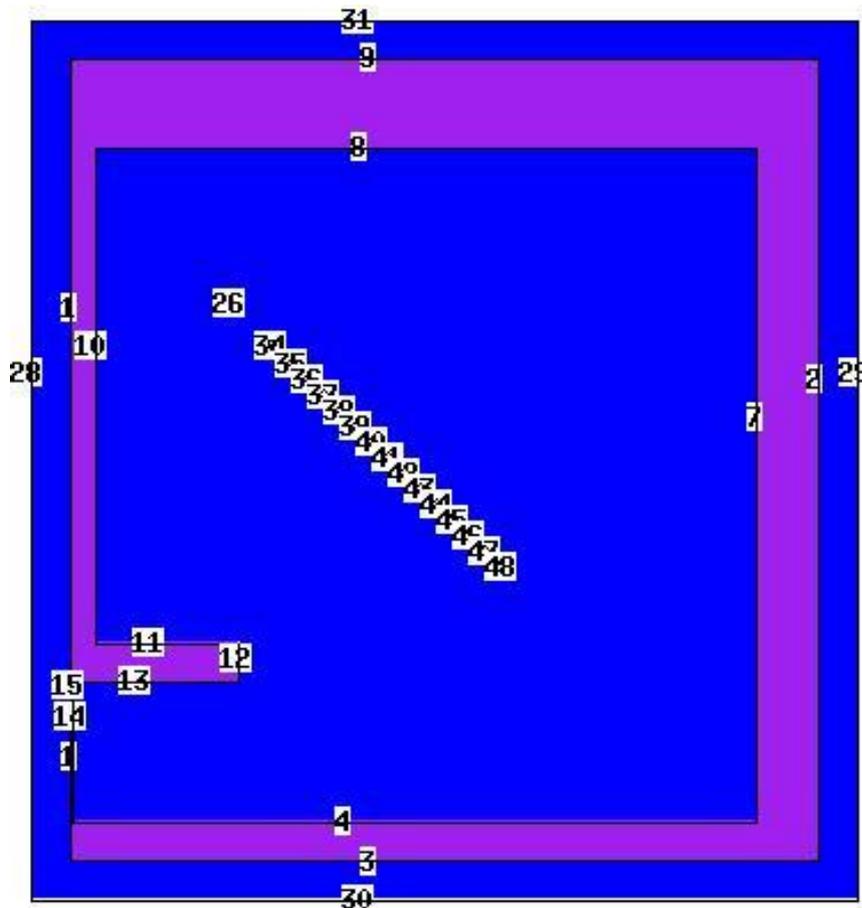


Figura 15: Modelagem computacional do Laboratório de Nêutrons utilizando o código MCNP5. Sendo o ponto 26 a representação do posicionamento da fonte  $^{241}\text{AmBe}$ , os pontos 34 a 48, a representação dos posicionamentos consecutivos do detector proporcional de  $\text{BF}_3$  e os outros pontos delimitam a região da sala de irradiação.

Para a determinação experimental do fator de espalhamento foi utilizada uma fonte de  $^{241}\text{AmBe}$  cuja taxa de emissão era  $(4,46 \pm 0,07) \times 10^6$  n/s em julho de 2005 e posicionada no mesmo ponto definido no modelo computacional.

O detector de nêutrons utilizado foi um detector proporcional de trifluoreto de boro [ $\text{BF}_3$ ] modelo FHT 752 BIOREM, acoplado a um contador digital modelo ESM-FH40G-L, ambos fabricados pela Thermo (THERMO, 1996).

A fonte foi posicionada diagonalmente, conforme modelado computacionalmente nos pontos 2 m e 2,5 m, em relação às paredes do fundo da sala, e sobre um suporte a uma altura de  $(150 \pm 1)$  cm. Inicialmente o detector foi colocado na posição 0,50 m em relação à fonte, variando em 20 cm até a posição 3,55 m.

Em cada posicionamento do detector foram realizadas cinco leituras, sendo duas delas para avaliação do background (BG) do ambiente. O tempo de aquisição dos dados em cada ponto foi devidamente ajustado a fim de que a fluência neutrônica fosse aproximadamente a mesma em todos os pontos medidos.

Os dados obtidos com o  $\text{BF}_3$  foram convertidos da grandeza equivalente de dose ambiental ( $H^*$ ) para fluência de nêutrons ( $\Phi$ ), utilizando a equação 30, sendo considerado o valor de  $h^*_\Phi(10) = 391 \text{ pSv.cm}^2$ .

Para verificação dos dados experimentais foi também determinada a fluência calculada teoricamente, sendo comparados conjuntamente com os dados obtidos com o código MCNP5.

### 5.3.2 Verificação do espectro neutrônico utilizando a fonte de $^{241}\text{AmBe}$

Com o objetivo de obter o espectro neutrônico com o sistema EB-TLD e permitir que seus dados fossem deconvoluídos com o algoritmo genético implementado, o sistema espectrométrico foi exposto a um campo neutrônico de espectro conhecido.

O sistema de espectrometria de Esferas de Bonner utilizado na realização dessa etapa foi o modelo 42-5 fornecido pela LUDLUM Measurements Inc. (LUDLUM, 1989). O sistema EB, como também é denominado, é composto por seis esferas atenuadoras, o que permite a constituição de sete conjuntos esfera-detector

(considerando o detector sem a esfera atenuadora).

As esferas que compõem o modelo 42-7 possuem os seguintes diâmetros: 5,08 cm (2"); 7,62 cm (3"); 12,70 cm (5"); 20,32 cm (8"); 25,40 cm (10") e 30,48 cm (12"), sendo as mesmas construídas em polietileno de alta densidade ( $0,95 \text{ g.cm}^{-3}$ ). No centro de cada esfera é possível acomodar um detector de nêutrons, que no caso do Modelo 42-5, é um cintilador de  ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$  (ver Apêndice A).

No entanto, a fim de validar a matriz resposta obtida por simulação computacional com o código MCNP5, o cintilador de  ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$  foi substituído por cinco pares de detectores termoluminescentes do tipo TLD600 e TLD700, respectivamente, produzidos pela Thermoelectron (1997).

Os pares de TLDs foram selecionados dentro de um lote de 50 pares, por meio de irradiações em uma fonte de  ${}^{137}\text{Cs}$ , cuja taxa de kerma no ar em 11 de janeiro de 2010 era igual a  $(28,76 \pm 0,05) \text{ mGy/h}$ . As 10 irradiações de 5 mGy permitiram avaliar aqueles que possuíam respostas mais constantes sob irradiações consecutivas, sendo os melhores separados e utilizados em todo trabalho.

Após cada irradiação os dosímetros termoluminescentes foram tratados termicamente em um forno PTW-TLDO, fabricado pela BICRON-NE, cujos parâmetros térmicos utilizados para a obtenção das leituras dos dosímetros termoluminescentes pós-irradiação foram:  $100^\circ\text{C}$  por 10 minutos e depois resfriados à temperatura ambiente, sendo o tratamento pré-irradiação em  $400^\circ\text{C}$  por 1 hora e  $100^\circ\text{C}$  por 2 horas.

Os perfis de tempo e temperatura (*Time Temperature Profile* – TTP) específicos para esses materiais e utilizados na leitura dos dosímetros foram:

- Taxa de aquecimento:  $25^\circ\text{C.s}^{-1}$ ;
- Temperatura máxima de aquecimento:  $300^\circ\text{C}$
- Tempo de aquisição:  $(33 + 2/3)\text{s}$ ,

Os TLDs utilizados para a realização de espectrometria de nêutrons em campos mistos geralmente indicam uma sobreposição de leituras, devido ao fato de

que o sistema EB-TLD estar inserido em um campo constituído por dois componentes de radiação, nêutrons e raios gama. É sabido que a exposição desses materiais a campos mistos de radiação, a leitura final dos mesmos pode ser expressa pela equação 35.

$$R_{600}^{n+\gamma} = R_{600}^n + k \cdot R_{700}^{n+\gamma} \quad (35)$$

sendo  $R_{600}^{n+\gamma}$  a leitura total do TLD600,  $R_{600}^n$  a contribuição exclusiva dos nêutrons no TLD600 e  $R_{700}^{n+\gamma}$  a leitura total do TLD700, e  $k$ , um fator de proporcionalidade, que está relacionado com a sensibilidade de ambos os detectores à radiação gama.

Desta forma, devido à sensibilidade dos materiais à radiação gama, foi determinado o fator de correção,  $k$ , devido a sensibilidade a esse tipo de radiação. Essa medida já havia sido realizada em trabalho anterior (SANTOS, 2006), mas como se tratava de uma nova seleção de TLDs, repetiu-se o método.

Assim, o fator de proporcionalidade  $k$  foi determinado por meio de irradiações na mesma fonte de  $^{137}\text{Cs}$ , em taxa de kerma distintas, realizadas no ar e a uma distância fixa de 1 m entre os detectores e a fonte. As taxas de kerma utilizadas foram as mesmas daquelas realizadas em trabalho anterior (SANTOS, 2006) a fim de propiciar uma comparação dos resultados. Assim, os dosímetros foram expostos nas seguintes taxas: 0,2 mGy; 0,5 mGy; 1 mGy; 1,5 mGy; 2 mGy e 3 mGy, e o resultado obtido foi  $k = 1,05 \pm 0,06$  com 95% de confiabilidade.

Os conjuntos EB-TLD foram expostos a uma fonte de  $^{241}\text{AmBe}$ , com atividade de 4 GBq (2 Ci) e cuja taxa de emissão era de  $(4,46 \pm 0,08) \times 10^6$  n/s em 15/03/2006. O centro de cada conjunto foi posicionado a uma altura de  $(150 \pm 1)$  cm do solo, utilizando para isso um suporte de alumínio que acompanha o sistema, devidamente confeccionado para suportar as esferas de polietileno (Figura 17).

Os conjuntos foram mantidos a uma distância de  $(75 \pm 1)$  cm da fonte; essa distância é uma recomendação da norma ISO 10647 <sup>7</sup>, constando também no relatório CASMIN/IRD (IRD, 1999), sendo essa distância recomendada para calibrações de rotina de monitores de nêutrons.

<sup>7</sup> Convém citar que essa norma trata dos procedimentos para calibração e determinação da resposta dos instrumentos de medida de nêutrons utilizados em radioproteção.

Devido à taxa de emissão da fonte,  $(4,46 \pm 0,08) \times 10^6$  n/s, relativamente baixa quando se observa a taxa de emissão de outras fontes neutrônicas, fez com que cada conjunto sofresse uma exposição à mesma por um intervalo de tempo conveniente a fim de possibilitar um limite mínimo de detecção dos TLDs. Por exemplo, a esfera de 5,08 cm (2") de diâmetro foi exposta à fonte radioativa por 67 h enquanto que a esfera de 30,48 cm (12") de diâmetro sofreu uma exposição de aproximadamente 311 h, sendo todas as leituras normalizadas em função do tempo a fim de propiciar uma correta análise dos dados.



*Figura 16: Aparato experimental utilizado no Laboratório de Nêutrons do CRCN-NE (LN/CRCN-NE/CNEN).*

### 5.3.3 Obtenção do espectro neutrônico no interior do *bunker* do acelerador cíclotron

O segundo aparato experimental foi montado no *bunker* de um acelerador cíclotron, situado na Seção de Produção de Radiofármacos do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (SECPRA/CDTN-MG/CNEN).

Neste ambiente está instalado o cíclotron PETtrace-8, fabricado pela General Electric Company, capaz de acelerar íons de hidrogênio de carga negativa ( $H^-$ ) em até 16,5 MeV ou íons negativos de deutério ( $D^-$ ) em até 8,4 MeV, sendo o valor máximo de corrente para produção de isótopos radioativos de 80  $\mu A$  para prótons e 60  $\mu A$  para deutérios. O cíclotron em questão foi projetado para realizar uma irradiação simultânea em até dois alvos de prótons (GE, 2004).

Um acelerador cíclotron utilizado para a produção de radioisótopos pode ser auto-blindado ou sem blindagem. No caso do cíclotron instalado no SECPRA/CDTN, não possui auto-blindagem fato esse que fez com que o mesmo fosse instalado em um *bunker* construído em concreto com controle de acesso, a fim de prevenir a exposição acidental dos trabalhadores.

Devido à aproximação do aparato experimental em relação ao alvo primário do acelerador, bem como a quantidade de material ativo existente naquele ambiente como consequência da radiação espalhada pela colisão do feixe de partículas com o alvo, as irradiações de cada conjunto EB-TLD tiveram duração de 5 min sobre uma corrente de 4  $\mu A$ .

O tempo de irradiação utilizado em cada conjunto também objetivou garantir uma baixa dosimetria devido à radiação de background durante a troca dos conjuntos de esferas na realização do experimento. Outras necessidades de ajustes técnicos do equipamento, e o tempo disponibilizado por aquele laboratório para realização do experimento também foram determinantes para o tempo de exposição de cada conjunto. Verificou-se também que um intervalo maior não acrescentaria tanto nas medidas em relação ao risco das altas taxas de radiação.

O espectro neutrônico desconhecido foi obtido no interior do *bunker* do acelerador cíclotron, sendo cada conjunto posicionado a uma distância de  $(100 \pm 1)$  cm do alvo principal do acelerador, como apresentado na Figura 17.



Figura 17: Aparato experimental montado no interior do bunker do cíclotron no CDTN-MG.

## 6. RESULTADOS

### 6.1 Avaliação do fator de espalhamento da sala de irradiação pelo Método do Ajuste Polinomial

Durante a irradiação do instrumento de medida a fonte  $^{241}\text{AmBe}$  foi posicionada a 2 m da parede da sala, a resposta dos nêutrons refletidos é aproximadamente constante até a distância de 2 m em relação a fonte; após esse ponto os valores obtidos apresentam uma maior dispersão. Tal característica pode ser relacionada com o fator de geometria do volume sensível do instrumento de medida.

À medida que o detector sofre deslocamento de sua posição, pode o centro geométrico do volume sensível ser deslocado em relação ao eixo fonte-detector, e assim influenciar na medida em um determinado ponto.

Segundo Eisenhauer e colaboradores (1987), o fator de espalhamento do ar é extremamente difícil de mensurar diretamente, sendo na maioria das vezes apenas possível de estimar por simulação com o código MCNP. O valor do espalhamento devido às paredes foi estimado por um ajuste linear entre as medidas realizadas na sala e a distância entre a fonte o detector.

Observa-se na Figura 18 que a resposta experimental do instrumento quando a fonte foi posicionada no ponto 2 m, segue a lei do inverso do quadrado da distância ( $1/r^2$ ) sendo o fator de correção de espalhamento devido às paredes, piso e teto (S) igual a 0,031 ou 3,1%.

Foram também verificados os pontos obtidos quando a fonte foi posicionada a 2,5 m de distância da parede da sala. A resposta dos nêutrons refletidos demonstrou ser aproximadamente constante no volume central (entre 1,5 e 2,5 m). O fator de espalhamento devido às paredes, piso e teto (S) é igual a 0,03 ou 3%, quando a fonte estiver posicionada a 2,5 m da parede (Figura 19).

Sendo considerado o fator de espalhamento no laboratório de nêutrons como 3,1%, por ser este o maior valor encontrado.

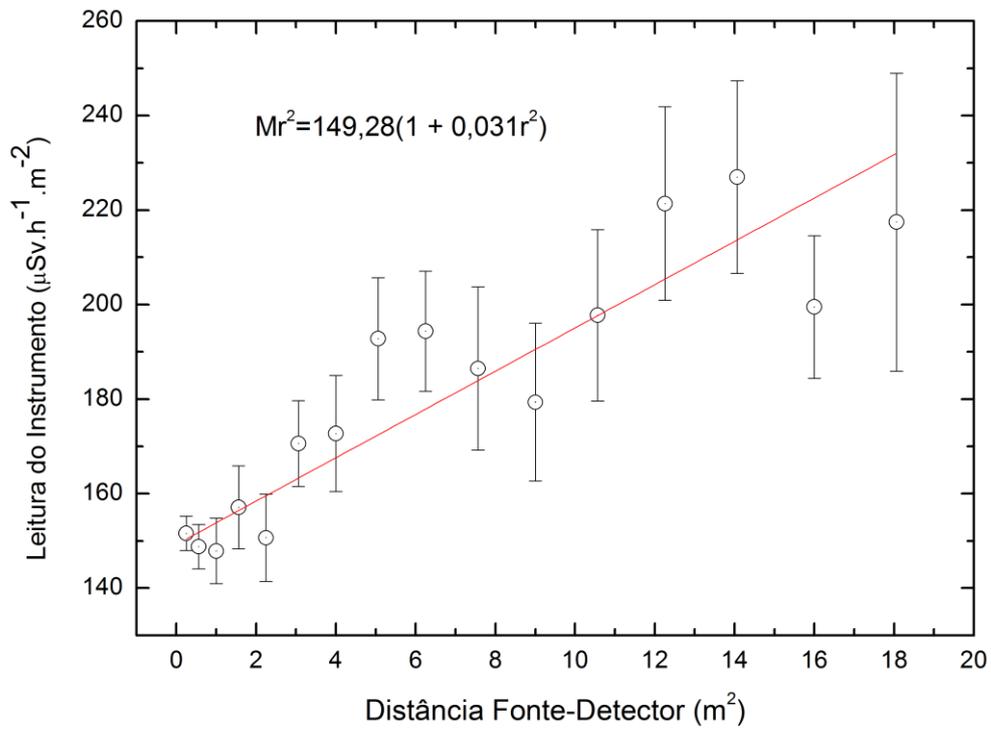


Figura 18: Resposta do contador proporcional  $BF_3$  em função da distância fonte-detector. Fonte posicionada em 2 m.

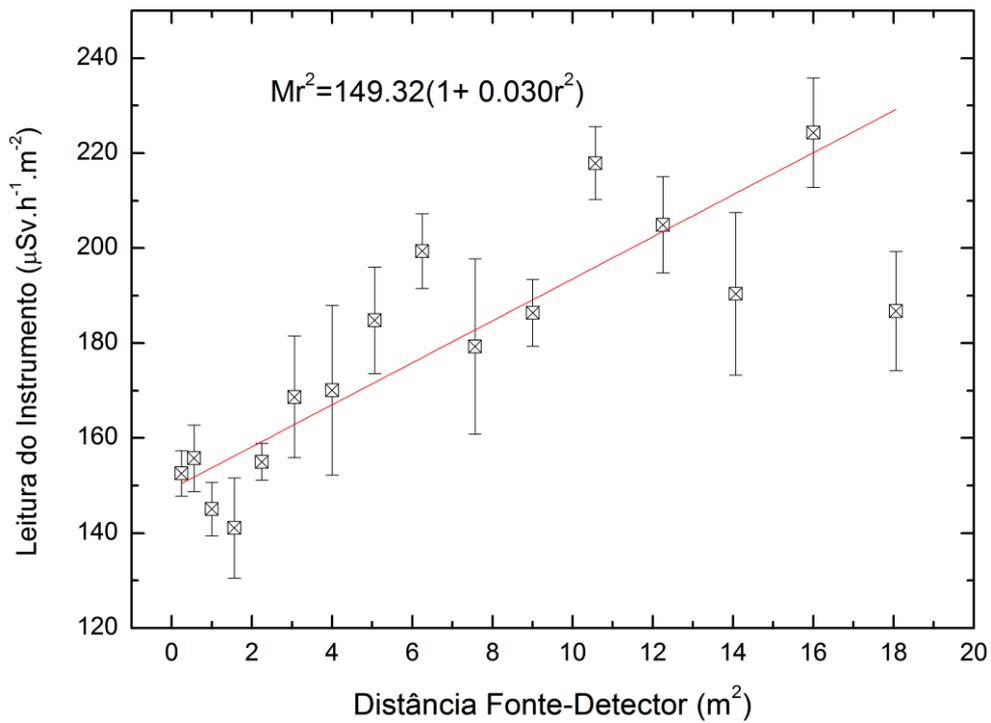


Figura 19: Resposta do contador proporcional  $BF_3$  em função da distância fonte-detector. Fonte posicionada em 2,5 m.

Os resultados experimentais obtidos com o detector proporcional de  $\text{BF}_3$  nos pontos 2 m e 2,5 m foram comparados com aqueles obtidos por simulação com o código MCNP5 e com o valor calculado devido à taxa de emissão da fonte como pode ser observado na Figura 20.

O valor teórico foi determinado considerando um desvio de  $\pm 40\%$ , sendo esse o valor máximo de aceitabilidade do fator de espalhamento, de acordo com a ISO 10647 (1996), para que seja acrescido na leitura no instrumento a ser calibrado naquele ambiente. É observada a concordância entre os dados obtidos em relação à fluência calculada nos pontos investigados.

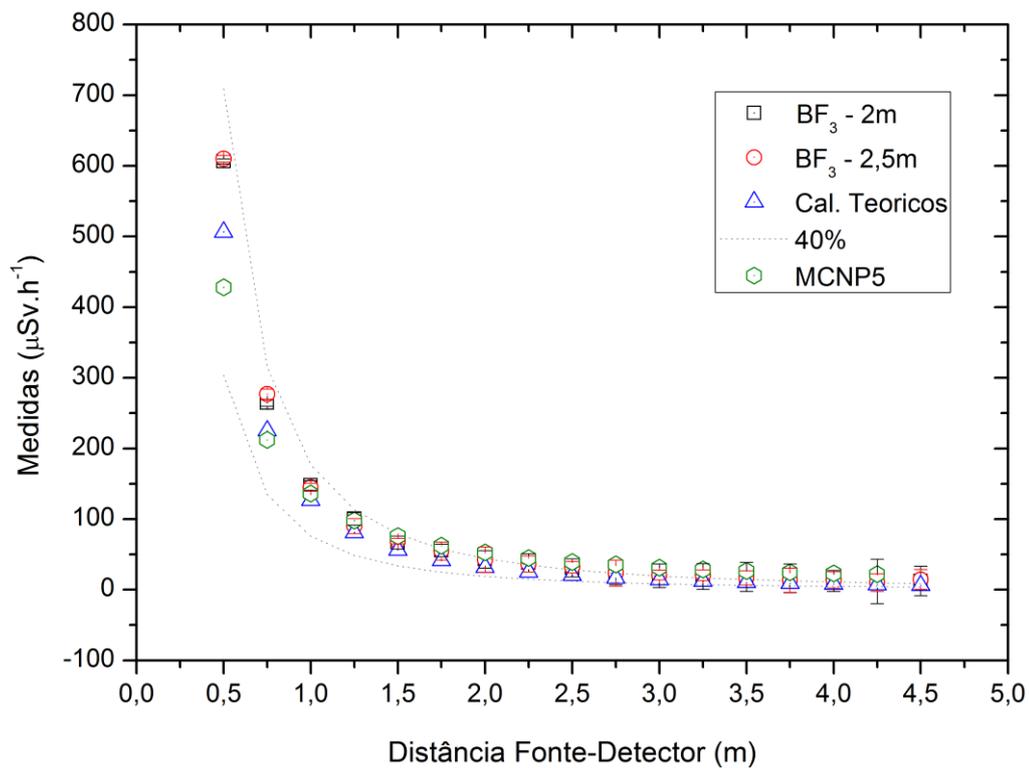


Figura 20: Comparação entre os dados obtidos com o  $\text{BF}_3$ , o código MCNP5 e os dados teóricos em função da distância fonte-detector.

## **6.2 Simulação dos espectros neutrônicos com o código MCNP5 para obtenção da matriz resposta**

As simulações dos sete conjuntos esfera-detector utilizando o código MCNP5, geraram 700 arquivos de entrada, já que o intervalo de energia foi dividido em 100 grupos discretos compreendidos entre 20 meV e 20 MeV. No Apêndice B é apresentado um dos arquivos de entrada implementado com o MCNP5.

Em cada arquivo de saída foram analisados 10 resultados correspondentes aos cinco pares de TLDs (5 TLD600 e 5 TLD700), totalizando 7000 respostas analisadas para a obtenção da matriz resposta e sua implementação no código AGLN.

A utilização do cluster de alto desempenho viabilizou a implementação da matriz resposta devido à minimização do tempo de processamento para conclusão de cada simulação. A conclusão do processamento de cada arquivo variou entre 50 minutos para o detector descoberto e cerca de 300 minutos para o conjunto de 30,48 cm (12”).

A matriz resposta obtida para o conjunto EB-TLD (ver Apêndice C), é correspondente a uma matriz de dimensão 7x100, sendo as sete linhas representando as esferas de Bonner e as 100 colunas os resultados obtidos em cada simulação para cada intervalo de energia compreendido no intervalo de  $2 \cdot 10^{-8}$  e 20 MeV.

## **6.3 Desenvolvimento e implementação do Algoritmo Genético**

O Algoritmo Genético do Laboratório de Nêutrons (AGLN) foi desenvolvido em linguagem C++, utilizando um ambiente visual para o desenvolvimento de aplicações orientado a objetos Borland C++Builder. O algoritmo pode ser compilado em qualquer computador, desde que ele tenha configuração mínima de 128 MB RAM (sendo recomendado 256 MB), HD 550 MB, Intel II 400 MHz ou AMD X2.

Ao ser compilado, o código apresenta uma tela de abertura, onde na mesma é possível selecionar as esferas que serão utilizadas no processo de deconvolução.

Uma vez selecionadas as esferas, basta clicar no botão “INICIAR” para que o código inicie o processamento de dados, apresentando como resultado final os

valores da fluência total ( $\Phi_{\text{tot}}$ ), o equivalente de dose ambiental ( $H^*$ ), a energia média do espectro ( $E_{\text{med}}$ ), com os respectivos desvios e o melhor *fitness* para cada conjunto esfera-detector.

O código também apresenta o fator de qualidade da resposta,  $\eta(\%)$ ; esse termo determina o desvio percentual entre a medida experimental e o valor calculado pelo AGLN no fim da convergência. Assim, é possível determinar o quão próximo o valor da resposta calculada pelo código está dos valores obtidos experimentalmente.

Conforme citado anteriormente, os códigos de deconvolução disponíveis no Laboratório de Nêutrons (LN/CRCN) não possuem uma matriz resposta específica para deconvoluir os dados obtidos com dosímetros termoluminescentes.

A fim de validar as informações apresentadas pelo código AGLN, os mesmos dados experimentais também foram deconvoluídos e comparados com o código BUNKI. Este código foi utilizado por possuir uma matriz resposta (UTA/BUNKI) que vem sendo adotada por se mostrar a que melhor se ajusta aos dados obtidos pelos conjuntos EB-TLD.

Outro código também utilizado para deconvoluir espectros neutrônicos e disponível no LN/CRCN, o código MAXED, não foi recomendado por seu autor para a realização de análise dos dados obtidos pelo conjunto EB-TLD, isso por não dispor de uma matriz resposta adequada para deconvolução dos dados obtidos com este conjunto.

O resultado do processo de deconvolução utilizando o código BUNKI e o AGLN para os espectros testados no LN/CRCN-NE e no SECPRA/CDTN-MG, respectivamente, são apresentados na Tabela 4 abaixo:

*Tabela 4: Comparação dos dados obtidos no processo de deconvolução utilizando os códigos BUNKI/UTA e o Algoritmo Genético (AGLN) desenvolvido e implementado para deconvolução dos dados obtidos com os conjuntos EB-TLD.*

<b>Parâmetros Avaliados</b>	<b>Fonte de <sup>241</sup>AmBe</b>		<b>Cíclotron</b>	
	<b>AGLN</b>	<b>BUNKI/UTA</b>	<b>AGLN</b>	<b>BUNKI/UTA</b>
$\Phi_{\text{tot}}$ ( <b>n.cm<sup>-2</sup></b> )	672,37 ± 108,86	716,90 ± 188,76	(1,10 ± 0,17)x10 <sup>4</sup>	(1,11 ± 0,03)x10 <sup>4</sup>
$E_{\text{med}}$ ( <b>MeV</b> )	1,23 ± 0,19	1,27 ± 0,34	1,74 ± 0,25	1,72 ± 0,04

Em relação ao arquivo de saída FLUENCIA.TXT, os dados apresentados são relativos à fluência por intervalo de energia, e para propiciar uma melhor visualização do espectro, os mesmos devem ser convertidos para a unidade de fluência/letargia ( $\Phi/\text{Ln}[E/E_0]$ ). Observa-se na Figura 21 o comportamento do espectro obtido pelo código BUNKI/UTA e o código AGLN em relação ao espectro conhecido de  $^{241}\text{AmBe}$ .

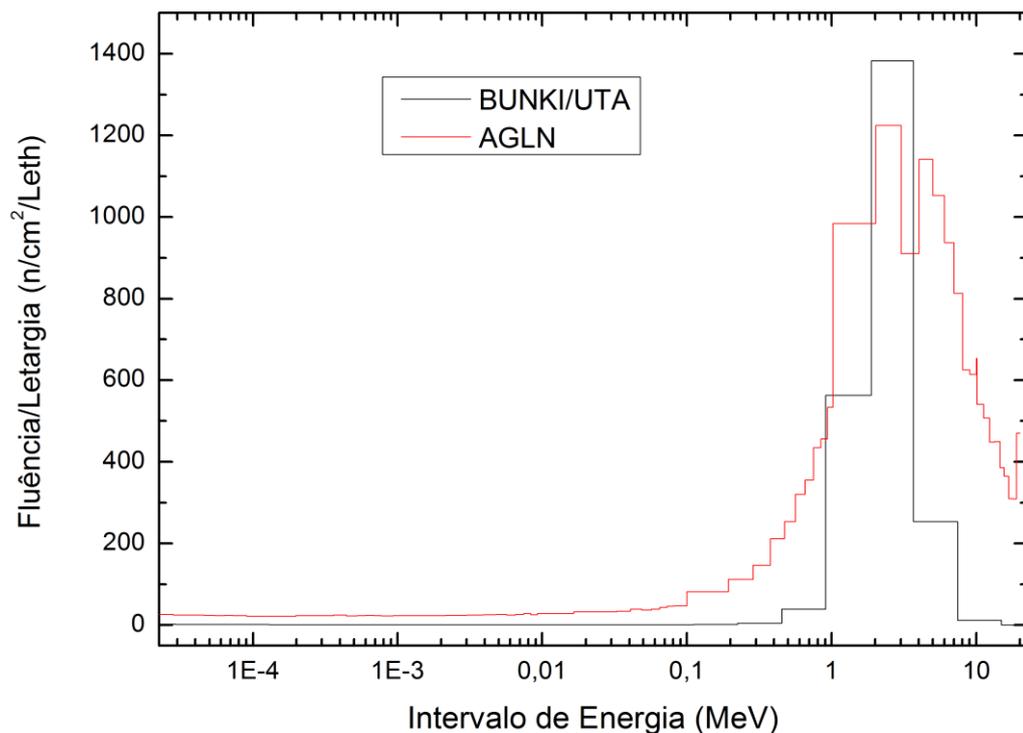


Figura 21: Espectro neutrônico da fonte  $^{241}\text{AmBe}$  obtido no LN do CRCN-NE deconvoluído com o código AGLN e o código BUNKI.

Os espectros se assemelham nas proximidades da energia principal; no entanto, devido aos intervalos de energia utilizados em cada código, fazem com que o código AGLN com 100 intervalos de energia apresente uma melhor resolução do espectro em comparação com o código BUNKI/UTA com os seus 26 intervalos de energia.

O fator de qualidade da resposta ( $\eta\%$ ) foi avaliado entre os códigos de deconvolução, e os valores obtidos são apresentados na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5: Fator de qualidade da resposta. Diferença percentual entre os valores experimentais e os valores calculados por cada código de deconvolução (1%). Valores observados para a fonte de  $^{241}\text{AmBe}$ .

Código	Esferas					
	2"	3"	5"	8"	10"	12"
<b>AGLN</b>	0,0616	0,064	0,014	0,054	0,0878	0,097
<b>BUNKI</b>	-1,362	4,828	14,316	-51,539	35,624	-1,868

Observa-se que os valores apresentados pelo código AGLN são inferiores aqueles obtidos pelo o código BUNKI/UTA, o que demonstra que os valores calculados ( $C_{\text{calc}}$ ) pelo AGLN são mais próximos do valor experimental o que aproxima o espectro apresentado de uma indicação mais real do mesmo para aquele ambiente.

A Tabela 6 abaixo apresenta uma comparação entre as características do pico do espectro  $^{241}\text{AmBe}$  obtido por cada código de deconvolução.

Tabela 6: Comparação dos dados obtidos com a fonte  $^{241}\text{AmBe}$ . Sendo apresentada na última coluna a diferença percentual observada entre os códigos AGLN e o código BUNKI.

Parâmetros do pico do espectro	$^{241}\text{AmBe}$		
	AGLN	BUNKI	Diferença Percentual
<b>Energia (MeV)</b>	3,02	3,679	21,82
<b>Fluência (<math>\text{n}/\text{cm}^2/\text{Leth}</math>)</b>	1224,15	1383	12,98

É apresentado a seguir uma comparação entre o espectro de referência da fonte  $^{241}\text{AmBe}$  (ISO 8529; 1989) e o espectro obtido no Laboratório de Nêutrons e deconvoluído com o código AGLN.

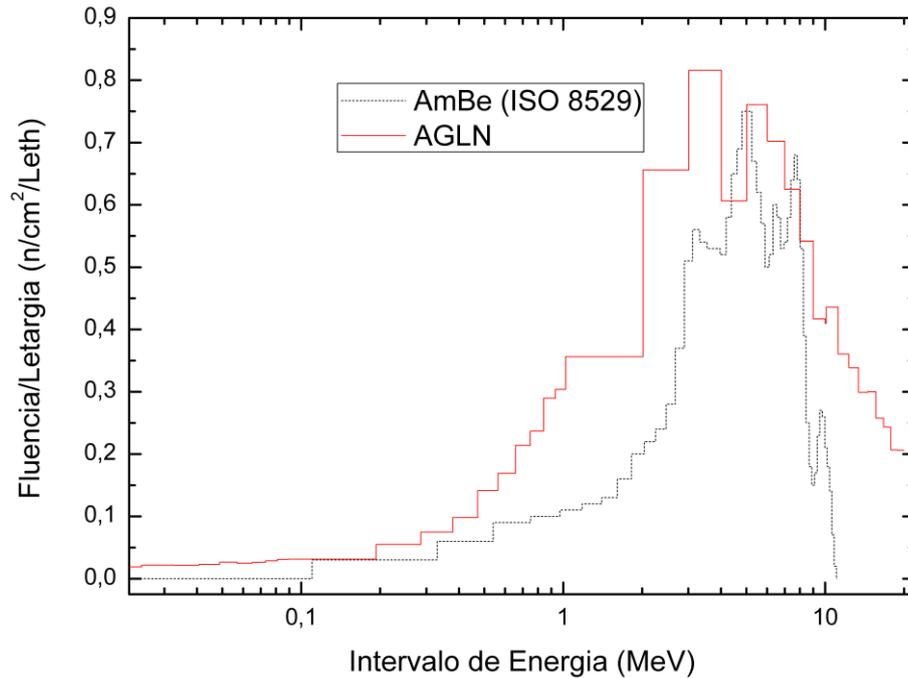


Figura 22: Comparação entre o espectro da fonte  $^{241}\text{AmBe}$  obtido com o AGLN e o espectro de referência ISO (ISO 8529, 1989).

O pico principal do espectro obtido com o sistema EB-TLD e deconvoluido com o código AGLN apresenta energia de 3,02 MeV, embora a energia do pico do espectro de referência seja superior a este intervalo (4,82 MeV), vale citar que as condições para obtenção do espectro de referência são muito próximas do ideal para esse tipo de fonte.

A semelhança observada entre os espectros valida o código AGLN na obtenção de espectros com fontes isotópicas tais como a fonte de  $^{241}\text{AmBe}$ .

Os dados obtidos com o espectro obtido no *bunker* do ciclotron do SEC/PRA/CDTN-MG permitiram a obtenção do espectro apresentado na Figura 23.

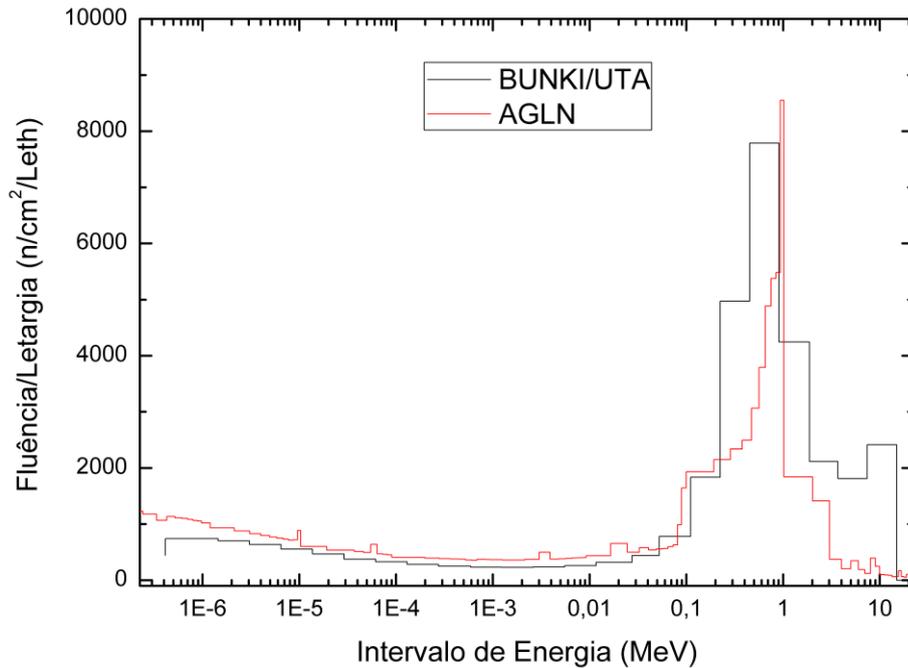


Figura 23: Espectro neutrônico obtido no bunker do ciclotron (CDTN-MG) deconvoluído com o código AGLN e o código BUNKI.

Como são utilizados apenas 26 intervalos de energia pelo código BUNKI para caracterizar o espectro neutrônico, este não apresenta uma boa definição, ao contrário do código AGLN, que devido aos 100 intervalos de energia propostos para realização do processo de deconvolução, permite uma melhor definição do espectro investigado.

A Tabela 7 apresenta uma comparação entre os dados obtidos no *bunker* do acelerador de partículas instalado no SECPRA/CDTN-MG, deconvoluídos com os códigos AGLN e o BUNKI.

Tabela 7: Comparação dos dados obtidos no bunker do ciclotron. Sendo apresentada a diferença percentual observada entre os códigos AGLN e o código BUNKI.

<b>Parâmetros do pico do espectro</b>	<b>Ciclotron</b>		
	<b>AGLN</b>	<b>BUNKI</b>	<b>Diferença Percentual</b>
<b>Energia (MeV)</b>	1,02	0,91	10,78
<b>Fluência (n/cm<sup>2</sup>/Leth)</b>	8167	7328	10,27

A Tabela 8 apresenta os valores de  $\eta\%$  obtidos com o código AGLN. Assim, como foi observado para o espectro da fonte  $^{241}\text{AmBe}$ , os valores do fator de qualidade da resposta são menores que os mesmos apresentados no código BUNKI/UTA, o que confirma a indicação desse código para a deconvolução também de espectros neutrônicos desconhecidos.

*Tabela 8: Apresentação da diferença percentual entre os valores experimentais e os valores calculados por cada código de deconvolução ( $\eta\%$ ). Valores observados para o espectro obtido no interior do bunker.*

<b>Código</b>	<b>Esferas</b>					
	<b>2"</b>	<b>3"</b>	<b>5"</b>	<b>8"</b>	<b>10"</b>	<b>12"</b>
<b>AGLN</b>	0,045	0,041	0,023	0,027	0,068	0,030
<b>BUNKI</b>	-0,094	0,042	0,901	-3,146	3,635	-1,284

Ao contrário do espectro obtido com a fonte de  $^{241}\text{AmBe}$ , a comparação entre o espectro obtido no bunker do acelerador ciclotron e aquele apresentado no TRS N<sup>o</sup> 403 (Figura 24) não é possível devido a alguns fatores, entre eles o fato que o acelerador onde foi montado o setup experimental deste trabalho possui características energéticas diferentes, já que opera com energia máxima de 18 MeV enquanto que o acelerador onde foi obtido o espectro apresentado no TRS possui energia de 35 MeV.

Outro fato relevante é que não são disponibilizadas informações sobre como o mesmo foi obtido, o tipo de detector utilizado nem tão pouco o método de deconvolução aplicado.

Embora como afirmado anteriormente não seja possível comparar diretamente os espectros, observa-se que o espectro obtido pelo AGLN (Figura 23) apresenta semelhança em relação ao pico de energia principal ( $E_n=0,794$  MeV).

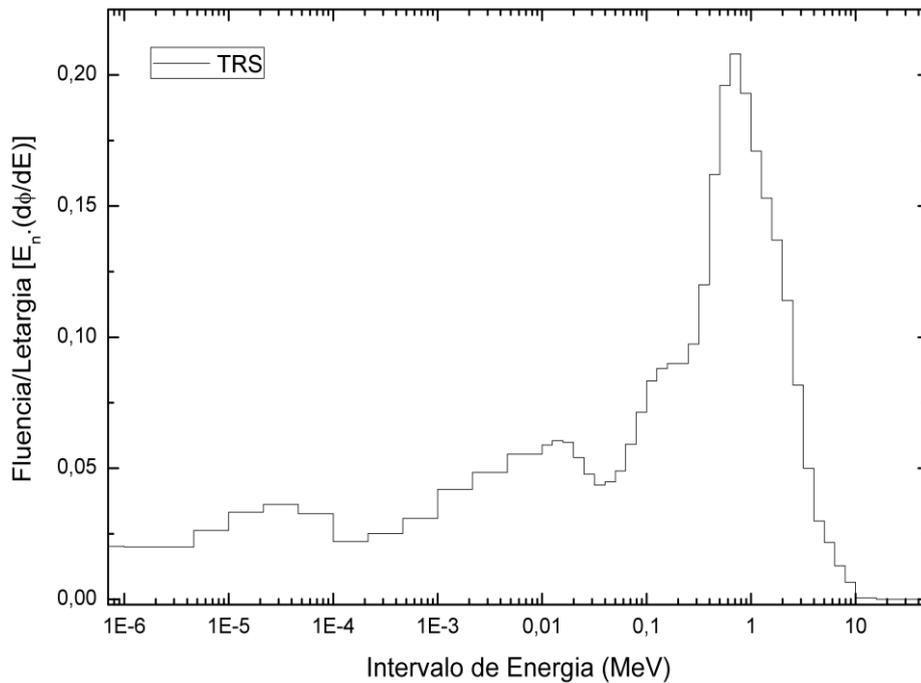


Figura 24: Espectro neutrônico disponibilizado no TRS N° 403. Acelerador cíclotron de 35 MeV. Universidade de Tohoko. Japão (IAEA, 2001).

Nos trabalhos apresentados por Mukherjee (2002) e Freeman (1999), observa-se que os resultados obtidos no processo de deconvolução utilizando algoritmos genéticos para o conjunto EB-Lil(Eu), apresentaram diferenças entre a fluência de 16,67% entre o AG e o código BUNKI, e 68,63% entre o AG e outros códigos. Neste trabalho, as diferenças observadas entre a fluência total calculada pelo AGLN para cada espectro obtido e o código BUNKI são 13% e 10%, respectivamente.

#### 6.4 Verificação das incertezas

A determinação da incerteza das medidas apresentadas no processo de deconvolução está baseada no guia para expressão de incertezas (INMETRO, 1998), de tal forma, que estão considerados o valor da incerteza da matriz resposta e a incerteza da medida experimental.

Segundo Matzke (2002), a incerteza associada às medidas de nêutrons com o código MCNP pode ser estimada entre 15% para valores de energia maiores que

100 keV e 10% para valores abaixo dessa energia, o que de fato foi observado nas simulações realizadas. Sendo assim, foi considerado para fins de determinação da incerteza do código AGLN o valor médio de 10% de incerteza para a matriz resposta.

Todos os valores de incerteza, incluindo o processo de leituras dos TLDs e a repetibilidade experimental fizeram com que a fluência apresentada pelo código de deconvolução tenha uma incerteza de 15,4% para 95% de confiabilidade.

## 7. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com a utilização de algoritmos genéticos no processo de deconvolução de espectros neutrônicos mostraram-se adequados, confirmando a viabilidade do método no processo de deconvolução.

Observa-se que em alguns pontos o código AGLN apresentou comportamento superior ao código BUNKI, tais como melhor definição do espectro devido ao intervalo de energia utilizado, bem como a determinação de suas características já que usa uma matriz específica para o sistema EB-TLD.

Embora somente dois espectros neutrônicos tenham sido testados com o AGLN implementado para o processo de deconvolução dos dados obtidos com os conjuntos EB-TLD, os resultados observados mostraram-se adequados aos espectros de referência o que é um fator importante para um código de deconvolução.

As diferenças observadas entre os picos de cada espectro investigado aponta para uma diferença maior no espectro obtido pela fonte  $^{241}\text{AmBe}$ , o que pode demonstrar que para valores obtidos por fontes cujas taxas de fluência sejam baixas, os valores obtidos pelo método apresentem uma incerteza maior. Tal fato também foi observado em outros códigos.

O trabalho evidenciou a potencialidade do uso de algoritmos genéticos na solução de problemas complexos existentes em processos nucleares, tal como em espectrometria neutrônica.

Outros espectros serão obtidos a fim de confirmar a utilização do código AGLN em processos de deconvolução de espectros neutrônicos.

## 8. PERSPECTIVAS FUTURAS

O trabalho ora apresentado amplia a possibilidade do uso de Inteligência Artificial em aplicações nucleares no Departamento de Energia Nuclear, uso já difundido em outras instituições. O Laboratório de Nêutrons (LN), bem como o Laboratório de Dosimetria Numérica (LDN), ambos instalados no CRCN-NE, possuem um claro potencial para o desenvolvimento de projetos nesta área.

O código AGLN deve ser aprimorado a fim de permitir sua utilização em espectros monoenergéticos, tais como podem ser obtidos no canal de irradiação experimental do acelerador cíclotron da Divisão de Produção de Radiofármacos (DIPRA/CRCN-NE).

Outras técnicas de inteligência artificial podem ser utilizadas no processo de deconvolução do espectro neutrônico tais como, o método de enxame de abelha, redes neurais, entre outros. Essas técnicas podem ser aplicadas com a utilização do cluster de alto desempenho para o processamento de algoritmos e de programas tais como o MCNP5, o GEANT4 entre outros, disponibilizados para o Laboratório de Nêutrons, o que permitirá inclusive aos alunos de outras instituições desenvolverem suas pesquisas neste segmento.

Outro objetivo a ser atingido em parceria com o Laboratório de Nêutrons é a consolidação da automação e dos processos de calibração de equipamentos dosimétricos com nêutrons, e assim, possibilitar que este laboratório, único na região, consiga após um processo de intercomparação com o LN/LNMRI/IRD-RJ, calibrar equipamentos dosimétricos com fontes neutrônicas.

## REFERÊNCIAS

ALEVRA, A.V.; THOMAS, D.J. **Neutron spectrometry in mixed fields: multisphere spectrometers**. Radiation Protection Dosimetry. v 107. p 37 – 72. 2003.

ALEVRA, A.V. **Neutron spectrometry**. Radioprotection. v 34. p 305 – 333. 1999.

ARTERO, A.O. **Inteligência Artificial – Teórica e Prática**. Editora Livraria da Física. 2009.

ATTIX, F.H. Neutron interactions and dosimetry. **In: Introduction to radiological physics and radiation dosimetry**. John Wiley & Sons. 2<sup>nd</sup> Edition. 2004.

AVDIC, S.; POZZI, S.A.; PROTOPOPESCU, V. **Detector response unfolding using artificial neural networks**. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research – A. v 565. p 742 – 752. 2006.

BAKALI, M. **Espectrometria neutrônica em las centrales nucleares mediante um sistema de esferas de Bonner**. Tese de Doutorado. Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). 2001.

BARTLETT, D.T.; CHARTIER, J.L.; MATZKE, M.; RIMPLER, A; THOMAS, D.J. **Concepts and quantities in spectrometry and radiation protection – 2**. Radiation Protection Dosimetry. v 107. n 1 – 3. p 23 – 35. 2003.

BÄCK, T.; HAMMEL, U.; SCHWEFEL, H.P. **Evolutionary computation: Comments on the history and current state**. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. v 1. n<sup>o</sup> 1. p 3 – 17. 1997.

BENTO, E.P.; KAGAN, N. **Algoritmos genéticos e variantes na solução de problemas de configuração de redes de distribuição**. Revista Controle & Automação. v 19. p 302 – 315. 2008.

BICRON-NE. **Model 6600 automated TLD Card Reader Workstations. Operator's Manual**. Saint-Gobain Industrial Ceramics Inc. 1997.

BRAMBLETT, R.L.; EWING, R.I.; BONNER, T.W. **A new type of neutron spectrometer.** Nuclear Instruments and Methods. v 9. p 1 – 12. 1960.

BRIESMEISTER, J. **MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport code, version 4C.** Report LA – 12625-M. E.U.A. Los Alamos, 2001.

CAMPOS, L.L. **Thermoluminescence of materials and its application on radiation dosimetry.** Cerâmica. v 44. p 244 – 251. 1998.

CASTRO, L.N.; CAMPELLO, R.J.G.B.; HRUSCHKA, E.R.; ROSATELLI, M.C. **Computação natural: Uma breve visão geral.** Programa de Mestrado em Informática. Universidade Católica de Santos – UniSantos. 2006.

CHADWICK, J. **The existence of a neutron.** Proc. Roy. Soc. Lond. A, v 136. p 692 – 708. 1935.

COELHO, L.S. **Fundamentos, potencialidades e aplicações de algoritmos evolutivos.** São Carlos – SP. Editora SBMAC. 2003.

COSTA, J.F.S.; WANDERLEY, A.J.M.; CONSENZA, C.A.N. **Utilização de algoritmos genéticos em metodologia multicritério: Uma solução para inconsistência matricial.** Revista Gestão Industrial. v 01. p 519 – 527. 2005.

DEBIAN. Disponível em: <<http://www.debian.org>>. Acesso em: 01/10/2007.

DIMOPOULOS, C.; ZALZALA, A.M.S. **Recent developments in evolutionary computation for manufacturing optimization: Problems, solutions and comparisons.** IEEE Transactions on Evolutionary Computation. v 4. n<sup>o</sup> 2. p 93 – 113. 2000.

EIBEN, A.E.; SMITH, J.E. **Introduction to Evolutionary Computing.** Springer. 2003.

EISENHAUER, C.M.; SCHWARTZ, R.B.; McCALL, R.C. **Effects of fair scatter on calibration of instruments for detection neutrons.** Radiation Protection Dosimetry. v 19. P 77 – 84. 1987.

FALCONE, M.A.G. **Estudo comparativo entre algoritmos genéticos e evolução diferencial para otimização de um modelo de cadeia de suprimento simplificada**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba. 2004.

FEHENBACHER, G.; SCHÜTZ, R; HAHN, K.; SPRUNCK, M.; CORDES, E.; BIRSACK, J. P.; WAHL, W. **Proposal of a new method for neutron dosimetry based on spectral information obtained by applications of artificial neural networks**. Radiation Protection Dosimetry. v 83. n 4. p 293 – 301. 1999.

FERREIRA, T.A.E; VASCONCELOS, G.C.; ADEODATO, P.J.L. **A new intelligent system methodology for times series forecasting with artificial neural networks**. Neural Processing Letters, v. 28, p 113-129, 2008.

FILHO, J.L.R.; TRELEAVEN, P.C.; ALIPPI, C. **Genetic-Algorithm programming environments**. IEEE Computer. v 27. n<sup>o</sup> 6. p 28 – 42. 1994.

FOGEL, B.D. **Evolutionary computation: A new transactions**. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. v 1. n<sup>o</sup> 1. p 1 – 2. 1997.

FREEMAN, D.W.; EDWARDS, D.R.; BOLON, A.E. **Genetic algorithms – a new technique for solving the neutron spectrum unfolding problem**. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research – A. v 425. p 549 – 576. 1999.

GENERAL ELETRIC - TECHNICAL PUBLICATIONS, **PETtrace Production System**. Revision 18. General Electric Company. 2004.

GOLDBERG, D.E. **Genetic algorithms in search, optimization and machine learning**. Addison-Wesley. 1989.

GUIMARÃES, F.G.; RAMALHO, M.C. Implementação de um algoritmo genético. Nota de aula. UFMG. 2001.

HEDAR, A. **Global Optimization Test Problems**. <[www.optima.amp.i.kyoto-u.ac.jp/member/student/hedar/Hedar\\_files/TestGO\\_files/Page2530.htm](http://www.optima.amp.i.kyoto-u.ac.jp/member/student/hedar/Hedar_files/TestGO_files/Page2530.htm)>. 2010.

Acesso em 20 de janeiro de 2010.

HOLLAND, J.H. **Adaptation in natural and artificial systems.** Massachusetts Institute of Technology. Michigan Press. 3<sup>rd</sup> edition. 1994.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). **Guia para a expressão da incerteza de medição.** 2<sup>a</sup> Edição. (1998).

INSTITUTO DE RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA (IRD). **Desempenho de sistemas de monitoração individual para nêutrons – Testes no LN/LNMRI.** Comitê de Avaliação de serviços de Monitoração Individual para Nêutrons (CASMIN). 1999.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation protection purposes. Supplement to Technical Reports Series Nº 318.** Technical Reports Series nº403. Vienna. 2001.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION FOR ORGANIZATION (ISO). ISO 8529. **Neutron reference radiation for calibrating neutron-measuring devices used for radiation protection purposes and for determining their response as a function of neutron energy.** U.K. British Standards Institution, 1989.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION FOR ORGANIZATION (ISO). ISO 8529-2. **Calibration fundamentals of radiation protection devices related to the basic quantities characterizing the radiation field.** U.K. British Standards Institution, 2000.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION FOR ORGANIZATION (ISO). ISO 8529-3. **Calibration of area and personal dosimeters and determination of their response as a function of neutron energy and angle of incidence.** U.K. British Standards Institution, 1998.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION FOR ORGANIZATION (ISO). ISO 10647(E). **Procedures for calibrating and determining the response of neutron-measuring devices used for radiation protection purposes.** U.K. British Standards Institution. 1996.

KARDAN, W. R., KOOHI-FAYEGH, R.; SETAYESHI, S.; GHIASSI-NEJAD, M. **Fast neutron spectra determination by threshold activation detectors using neural networks**. Radiation Measurements. v 38. p 185 -191. 2004.

KNOLL, G.F. **Radiation detection and measurement**. John Wiley & Sons. 3<sup>rd</sup> Edition. 2000.

KOZA, J.R. **Genetic Programming: On the programming of computers by means of natural selection**. Massachusetts Institute of Technology. Michigan Press. 1<sup>st</sup> edition. 1992.

LEMOIS JUNIOR, R. M. **Medidas dos espectros de referências de nêutrons com o espectrômetro de multiesfera de Bonner**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN). 2004.

LINDEMANN, L.; ZECH, G. **Unfolding by weighting Monte Carlo events**. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research – A. v 345. p 516 – 521. 1995.

LINDEN, R. **Algoritmos genéticos: Uma importante ferramenta da inteligência computacional**. Editora Brasport. 2006.

LOWRY, K.A.; JOHNSON, T.L. **Modifications to interactive recursion unfolding algorithms and computer codes to find appropriate neutron spectra**. Naval Research Laboratory. Memorandum Report 5340. U.S.A. 1984.

LUDLUM MODEL 42-5. **Neutron ball cart**, Instruction manual. LUDLUM MEASUREMENTS, INC. Sweetwater, Texas. U.S.A. 1989.

MAN, K.F.; TANG, K.S.; KWONG, S. **Genetic Algorithms: Concepts and applications**. IEEE Transactions on Industrials Electronics, v. 43. n<sup>o</sup> 5. p 519 – 534. 1996.

MATZKE, M. **Propagation of uncertainties in unfolding procedures**. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research – A. v 476. p 230 – 241. 2002.

MARTINS, L.A.P. **August Weismann e evolução: os diferentes níveis de seleção.** Revista da SBHC. nº 1. p 53 – 75. 2003.

McKEEVER, S.W.S.; MOSCOVITCH, M.; TOWNSEND, P.D. **Thermoluminescence dosimetry materials: Properties and uses.** U. K. Nuclear Technology Publishing. 1995.

MIASAKI, C.T.; ROMERO, R. **Algoritmo genético especializado aplicado ao planejamento da expansão do sistema de transmissão com alocação de dispositivos de compensação série.** Revista Controle & Automação. v 18. nº 2. 2007.

MITCHELL, T. M. Genetic algorithms. In: **Machine learning.** WBC McGraw-Hill. 1997.

MUKHERJEE, B. **BONDI-97: a novel neutron energy spectrum unfolding tool using a genetic algorithm.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research – A. v 442. p 305 – 312. 1999.

\_\_\_\_\_. **A high-resolution neutron spectra unfolding method using the genetic algorithm technique.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research – A. v 476. p 247 – 251. 2002.

PILA, A.D. **História e terminologia a respeito da computação evolutiva.** Revista de Ciências Exatas e Tecnologia, Valinhos, SP, v. 1, n. 1, p. 1 – 25. 2006.

PULPÁN, J.; KRÁLÍK, M. **The unfolding of neutron spectra based on the singular value decomposition of the response matrix.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research – A. v 325. p 314 – 318. 1993.

REGINATTO, M.; GOLDHAGEN, P. **Maxed, a computer code for maximum entropy deconvolution of multisphere neutron spectrometer data.** Health Physics. v 77. p 579 – 583 .1999.

REGINATTO, M; GOLDHAGEN, P.; NEUMANN, S. **Spectrum unfolding, sensitivity analysis and propagation of uncertainties with the maximum entropy deconvolution code MAXED**. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research – A. v 476. p 242 – 246. 2002.

ROSA, L.A.R. **Dosimetria termoluminescente: teoria, materiais e aplicações**. Projeto Urânio III. Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD). 1978.

RUSSEL, S.J.; NURVIG, P. **Inteligência Artificial**. 2ª edição. Editora Elsevier. 2004.

SALINAS, S.R.A. Roteiro para uma revisão da termodinâmica. In: **Introdução à física estatística**. Edusp. USP. 2008.

SANTOS, J.A.L. **Espectrometria de nêutrons com o sistema de esferas de Bonner utilizando detectores passivos termoluminescentes**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Energia Nuclear. UFPE. 2006.

SILVA, A.J.M. **Implementação de um algoritmo genético utilizando o modelo de ilhas**. Dissertação de Mestrado. COPPE. UFRJ. 2005.

SOARES, G.L. **Algoritmos genéticos: Estudo, novas técnicas e aplicações**. Monografia (Especialização em Engenharia Elétrica). UFMG. 1997.

SNUSTAD, D.P.; GARDNER, E.J. **Genética**. 7ª Edição. Guanabara Koogan. 1987.

SRINIVAS, M; PATNAIK, L.M. **Genetic algorithms: A survey**. IEEE Computer. v 27. nº 6. p 28 – 42. 1994.

SWEEZY, J. E.; BOOTH, T. BROWN, F.B, BULL, J.S, FORSTER, R.A., GOORLEY, G.T., HUGHES, H.G., MOSTELLER, R.D., PRAEL, R.E., SOOD, A., ZUKAITIS, A., MARTZ, R. **MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport code, version 5**. Report LA – 12625-M. E.U.A. Los Alamos National Laboratory, 2005.

THERMOELECTRON CORPORATION (THERMO). **BIOREM neutron detectors. Technical Manual**. 1996.

THERMOELECTRON CORPORATION (THERMO). **Materials and assemblies for thermoluminescence dosimetry**. 1997.

VEGA-CARRILLO, H.R., DÁVILA, V.M.H. DÁVILA, ACUÑA, E.M., SÁNCHEZ, G.A.M., TORRE, M.P.I., BARQUERO, R., PALACIOS, F., VILLAFANE, R.M., ARTEAGA, T.A., RODRIGUEZ, J.M.O. **Neutron spectrometry using artificial networks**. Radiation Measurements. v 41. p 425 – 431. 2006.

VEGA-CARRILLO, H.R. **TLD pairs, as thermal neutron detectors in neutron multisphere spectrometry**. Radiation Measurements. v 35. p 251 – 254. 2002.

VEGA-CARRILLO, H.R.; WEHRING, B.W.; VEINOT, K.G.; HERTEL, N.E. **Response matrix for a multisphere spectrometer using a  ${}^6\text{LiF}$  thermoluminescence dosimeter**. Radiation Protection Dosimetry. v 81. p 130 – 140. 1999.

VONK, E; JAIN, L.C.; JOHNSON, R.P. Evolutionary computation. In: **Automatic generation of neural network architecture using evolutionary computation**. World Scientific Publishing. 1997.

VON ZUBEN, F.J. Computação Evolutiva: Uma abordagem pragmática. Disponível em: <[http://ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/ia013\\_1s07/tutorialEC.pdf](http://ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/ia013_1s07/tutorialEC.pdf)>. Acesso em: 07/01/2008.

WEYRAUCH, M.; DIETZ, E.; MATZKE, M. **Determination of neutron spectra using programs GNSR and SPECTRIX**. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research – A. v 476. p 208 – 212. 2002.

WHITLEY, D. **A genetic algorithm tutorial**. Statistics and Computing. v 04. n<sup>o</sup> 2. p 65 – 85. 1994.

ZAIDINS, C.S.; MARTIN, J.B.; EDWARDS, F.M. **A last-squares technique for extracting neutron spectra from Bonner sphere data**. Medical Physics. v 5. n 1. 1978.

## APÊNDICE A

### Nêutrons: Uma breve introdução

Os nêutrons são partículas sem carga, cuja massa é aproximadamente a mesma do próton. Inicialmente prevista por Masson e Rutherford em 1920 como uma partícula constituinte do núcleo atômico (EISBERG, 1979), apresentava-se como solução de problemas relacionados ao momento angular intrínseco (spin).

A confirmação desta hipótese tornou-se alvo dos mais importantes laboratórios da época, até que em 1932, James Chadwick, pôde comprovar experimentalmente a existência do nêutron pela determinação da energia cinética dos átomos de hidrogênio deslocados na interação de nêutrons com alvos de parafina. Os prótons de recuo foram detectados em virtude de sua carga elétrica, sendo estimada, com relativa precisão, a massa da partícula incidente (CHADWICK, 1935).

Chadwick admitiu que a massa dessa partícula era aproximadamente 1 u.m.a. e sua carga era nula (BYRNE, 1994); desta forma, o modelo fundamental da estrutura atômica estaria completo. Com os estudos iniciais pôde-se comprovar que por suas características, os nêutrons poderiam percorrer grandes distâncias através da matéria sem sofrer qualquer interação e que campos elétricos ou magnéticos externos não apresentavam efeitos sobre o seu movimento.

Sabe-se atualmente que o nêutron decai pela emissão de um próton, um elétron e um anti-neutrino e que as características físicas conhecidas são (BECKURTS, WIRTZ, 1964; BYRNE, 1994):

- massa:  $m_n = 1,660 \times 10^{-24}$  g (939,565 MeV);
- vida média:  $\tau_n = 886,7 \pm 1,9$  s;
- meia-vida livre:  $T_{1/2} = 11,7$  min;
- carga:  $q_n = (-0,4 \pm 1,1) \times 10^{-21}$  e (teoricamente nula);
- momento magnético:  $\mu_n = -0,966 \times 10^{-26}$  J.T<sup>-1</sup>.

Os nêutrons tiveram importância fundamental para o desenvolvimento das ciências nucleares, tornando-se ferramentas importantes nas mais diversas aplicações científicas e tecnológicas, dentre as quais merecem destaques: a radiografia com nêutrons, a prospecção de petróleo (CASALI *et al*, 1995); o tratamento de tumores usando a técnica denominada BNCT (*Boron Neutron Capture Therapy* - Terapia por Captura de Nêutrons por Boro).

O fato de não possuírem carga elétrica e não produzirem ionização diretamente torna a interação dos nêutrons com a matéria quase que exclusivamente com o núcleo da matéria que atravessa. A eficiência desta interação em um determinado material é explicada quantitativamente pelo conceito de seção de choque.

### A.1 Seção de Choque

As diferentes formas de interação do nêutron com a matéria podem ser explicadas através do conceito de seção de choque, tendo sua representação apresentada na Figura A1.

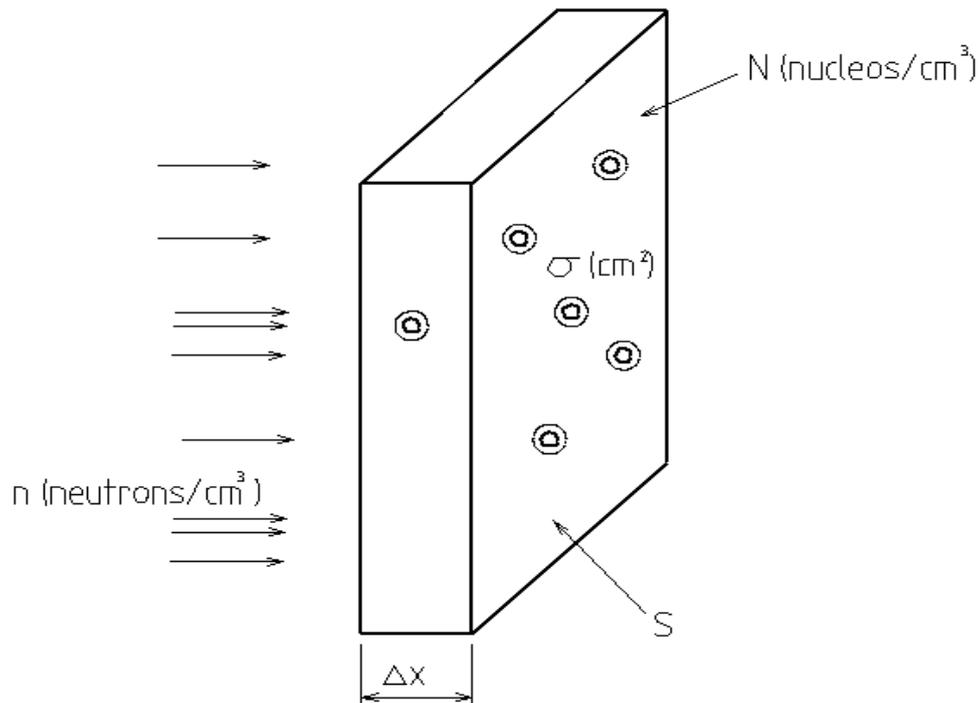


Figura A1: Representação da interação entre um feixe de nêutrons em uma superfície com  $N$  núcleos-alvo.

Considerando que  $n$  nêutrons (projéteis) sejam lançados sobre núcleos-alvos distribuídos em uma fina lâmina (alvo), cuja espessura seja  $\Delta x$  e sua área  $S$ , contendo  $N$  núcleos/cm<sup>3</sup>, o número de núcleos que se apresentam para a reação com o fluxo incidente será dado pelo produto  $N \cdot S \cdot (\Delta x)$ .

Associando o fenômeno da reação com o de colisão, pode-se considerar que a área total suscetível a colisão é expressa por:

$$\sigma \cdot N \cdot S \cdot (\Delta x) \tag{A.1}$$

Onde  $\sigma$  é uma constante de proporcionalidade, que depende da natureza dos núcleos e das energias envolvidas no processo. No caso de colisão,  $\sigma$  seria a área do alvo exposta por cada núcleo para um nêutron incidente, essa relação é denominada como seção de choque microscópica. Como se trata de uma reação nuclear, que nem sempre ocorre mesmo que os núcleos se encontrem, o valor de  $\sigma$  pode ser associado à maior ou menor probabilidade de ocorrência da reação com um único nêutron.

A probabilidade de ocorrência de uma reação é dada então pela relação entre a área de colisão e a área total de incidência do feixe (CONSTANTI, 1981).

$$P = \frac{\sigma \cdot N \cdot S \cdot (\Delta x)}{S} = \sigma \cdot N \cdot (\Delta x) \tag{A.2}$$

A seção de choque microscópica total,  $\Xi_t$ , é igual à soma das seções de choque de absorção,  $\Xi_a$ , e a seção de choque de espalhamento,  $\Xi_e$ , isto é:

$$\Xi_t = \Xi_a + \Xi_e \tag{A.3}$$

Outros processos podem contribuir na determinação da seção de choque de absorção, tais como: seção de choque de espalhamento inelástico,  $\Xi_i$ ; seção de choque de captura,  $\Xi_{cr}$ ; seção de choque de fissão,  $\Xi_f$ , entre outros.

$$\Xi_a = \Xi_i + \Xi_{cr} + \Xi_f + \dots \quad (A.3)$$

Como as seções de choque são geralmente da ordem de  $10^{-22}$  a  $10^{-26}$  cm<sup>2</sup> por núcleo, essa grandeza é expressa na prática em termos de  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup> por núcleo, que é denominada de *barn* (abreviada pela letra *b*).

Do ponto de vista macroscópico, pode-se compreender a interação do nêutron com a matéria, através da atenuação que um feixe sofre ao atravessar um material de espessura  $\Delta x$  e com um coeficiente de atenuação  $\Sigma(v)$ , que representa a probabilidade de ocorrer qualquer tipo de interação por unidade de caminho percorrido para nêutrons com velocidade  $v$ . Este coeficiente é denominado seção de choque total macroscópica e é expresso pela seguinte relação:

$$\Sigma(v) = N \cdot \sigma \quad (A.5)$$

Onde  $N$  é o número de átomos por volume do alvo. Embora  $\Sigma$  seja denominado de seção de choque, não representa uma área, já que é expresso em unidade de cm<sup>-1</sup>, o que permite a interpretação de tal grandeza como um coeficiente de atenuação para nêutrons (BECKURTS, WIRTZ; 1964).

O valor absoluto de uma seção de choque para nêutrons depende consideravelmente da energia cinética dos nêutrons incidentes e das propriedades do nuclídeo alvo, sendo que os isótopos de um dado elemento podem apresentar diferentes seções de choque para nêutrons, especialmente para aqueles de baixas energias (GLASSTONE, SESONSKE; 1994).

## A.2 Classificação dos nêutrons segundo a energia

É possível separar os nêutrons em grupos energéticos com razoável precisão. Essa classificação, em geral, ocorre como resultado de interações peculiares para certos intervalos de energia (CURTISS, 1959). Esse tipo de classificação tornou-se muito conveniente para que fosse melhor compreendido os tipos particulares de interações às quais os nêutrons estão sujeitos.

- Nêutrons Frios:  $10^{-4} \text{ eV} < E_n \leq 10^{-3} \text{ eV}$
- Nêutrons Térmicos:  $E_n \leq 0,025 \text{ eV}$
- Nêutrons Epitérmicos:  $0,025 \text{ eV} < E_n \leq 10 \text{ keV}$
- Nêutrons Lentos:  $10 \text{ keV} < E_n \leq 100 \text{ keV}$
- Nêutrons Rápidos:  $100 \text{ keV} < E_n \leq 10 \text{ MeV}$
- Nêutrons Relativísticos:  $E_n \geq 10 \text{ MeV}$

Para que seja facilitado o estudo em dosimetria neutrônica, os nêutrons são classificados em quatro grupos energéticos (IAEA, 1985). Essa classificação usual leva em consideração a energia de corte do cádmio.

- Nêutrons Térmicos:  $E_n \leq 0,4 \text{ eV}$
- Nêutrons Epitérmicos:  $0,4 \text{ eV} < E_n \leq 200 \text{ keV}$
- Nêutrons Rápidos:  $200 \text{ keV} < E_n \leq 10 \text{ MeV}$
- Nêutrons Relativísticos:  $E_n \geq 10 \text{ MeV}$

### A.2.1 Nêutrons Térmicos

Quando nêutrons rápidos atravessam um material, sua velocidade diminui até que suas velocidades sejam comparáveis à velocidade dos átomos do material que

atravessam, ou seja, aproximadamente 2200 m/s; esses nêutrons são denominados de nêutrons térmicos.

Por suas características, seu comportamento pode ser convenientemente explicado pela distribuição estatística de Maxwell-Boltzmann (CURTISS, 1959; BAKALI, 2000):

$$\frac{dN}{N} = \frac{2\pi^2}{(\pi \cdot k \cdot T)^{3/2}} \cdot e\left(\frac{-E}{kT}\right) \cdot E^{\frac{1}{2}} dE \quad (A.6)$$

onde  $dN$  é o número de nêutrons com energia entre o intervalo compreendido entre  $E$  e  $(E+dE)$ ;  $N$  o número total de nêutrons no sistema,  $k$  a constante de Boltzmann, e  $T$  a temperatura absoluta. Os nêutrons assim classificados apresentam energia média aproximada em 0,0253 eV a 20°C.

### A.2.2 Nêutrons Epitérmicos

Os nêutrons compreendidos dentro deste intervalo de energia são produzidos como resultado de espalhamento elástico com materiais de baixo número atômico.

Para elementos com médio e elevado números atômicos, fenômenos de ressonância são observados em reações tais como  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, \text{fissão})$  e espalhamento inelástico.

### A.2.3 Nêutrons Rápidos

São nêutrons com energia compreendida entre 200 keV e 10 MeV. Nesse intervalo de energia os nêutrons possuem energia suficiente para interagir com a grande maioria dos núcleos através de reações limiares ou espalhamento de núcleos.

#### **A.2.4 Nêutrons Relativísticos**

Nêutrons com energia superior a 10 MeV, denominados como nêutrons relativísticos. Nesta região ocorre o processo de fragmentação de núcleos. São naturalmente produzidos por raios cósmicos.

### **A.3 Interações dos nêutrons com a matéria**

A interação dos nêutrons com a matéria ocorre em um processo diferente ao das partículas carregadas e da radiação eletromagnética. Os nêutrons, por não possuírem carga elétrica e, conseqüentemente, não interagem com os elétrons atômicos durante sua passagem através da matéria, não produzem ionização diretamente, o que os torna bastante penetrantes. E, ao contrário da radiação gama, as radiações secundárias são frequentemente núcleos de recuo, principalmente para materiais hidrogenados.

Os processos mais comuns de interação dos nêutrons com a matéria são: reação de captura, espalhamento elástico, espalhamento inelástico e reações nucleares.

Esses, como outros tipos de interações, dependem consideravelmente da energia cinética inicial do nêutron incidente e da seção de choque do material que ele atravessa.

#### **A.3.1 Reação de Captura**

Esse tipo de reação ocorre com maior probabilidade quando os nêutrons possuem energia média comparável à energia dos átomos do meio em que se encontram. Desta forma, há a probabilidade de que os nêutrons que estão nas proximidades dos núcleos atômicos sejam capturados, formando um núcleo composto de número mássico ( $A + 1$ ) em estado excitado, com energia entre 5 e 10 MeV, o que provoca a emissão de raios gama ou de partículas. Podem ocorrer reações do tipo  $(n, p)$ ,  $(n, 2n)$ ,  $(n, \alpha)$  ou  $(n, \gamma)$ .

### **A.3.2 Espalhamento Elástico**

Em um espalhamento elástico, as leis ordinárias do momento aplicam-se como na colisão elástica de bolas de bilhar. As leis de conservação da quantidade de movimento determinam as relações entre a energia do nêutron incidente e a energia cedida ao núcleo de recuo. Se o núcleo que está sendo bombardeado for pesado este adquire pouca velocidade como resultado da colisão, mas sendo um próton, que possui aproximadamente a mesma massa do nêutron, esse se projeta com uma grande fração da energia inicial do nêutron, em média, 2/3 desta energia é transferida para o próton, mas essa transferência energética pode chegar até 100% (ALEVRA, 1999).

Quando o nêutron interage com o hidrogênio, o núcleo adquire energia suficiente para se deslocar como partícula ionizante, transferindo assim, energia para o meio e permitindo, indiretamente, a detecção dos nêutrons. Este comportamento do hidrogênio o torna interessante para definição de um dosímetro capaz de avaliar a contribuição da dose devida a nêutrons.

### **A.3.3 Espalhamento Inelástico**

Quando um choque inelástico ocorre, a energia cinética do sistema nêutron-alvo não se conserva. Esse tipo de colisão acontece geralmente com núcleos médios ou pesados e envolve nêutrons com energia a partir de 1 MeV. Neste caso, o núcleo atingido é levado a um estado excitado, ocorrendo a probabilidade de emissão de um outro nêutron ou de emissão de raios gama, quando o núcleo permanece em um estado metaestável (IAEA, 1985).

### **A.3.4 Reações Nucleares**

Nesse processo, o nêutron incidente é capturado por um núcleo alvo e partículas, tais como prótons, deutério, partículas alfa, trítio, além do fissionamento do núcleo, raios gama podem ser emitidos (BECKURTS, WIRTZ; 1964).

## **A.4 Fontes Neutrônicas**

As fontes neutrônicas geralmente possuem pequenas dimensões, o que lhe confere a portabilidade necessária para que sejam adaptadas em arranjos experimentais. As várias fontes se diferenciam entre si pela natureza do elemento alvo ou pelo radionuclídeo produzido pela reação nuclear.

As fontes neutrônicas mais importantes são: a fissão espontânea, reatores nucleares, fontes radioisotópicas, fontes de fotonêutrons e aceleradores de partículas. Outra fonte alvo de pesquisas são os nêutrons de origem cósmica, que agem como radiação de fundo.

### **A.4.1 Fissão Espontânea**

Durante o processo de fissão nuclear, entre 2 e 3 nêutrons rápidos podem ser emitidos, possibilitando que uma pequena amostra desses elementos fissionáveis possa ser considerada como potencial fonte neutrônica, no entanto, isso é obtido de forma eficiente com o califórnio-252 ( $^{252}\text{Cf}$ ), cuja meia-vida é de 2,65 anos (KNOLL, 2000).

As fontes de fissão espontânea são geralmente utilizadas como padrões para a calibração de outras fontes neutrônicas, isso devido a suas propriedades inerentes, tais como: pequenas dimensões e alta taxa de produção de nêutrons, o que as tornam praticamente pontuais. Possuem ainda pouca produção de radiação gama residual. Sua maior desvantagem é o custo elevado, o que acarreta na consequente dificuldade de aquisição por alguns laboratórios.

### **A.4.2 Reatores Nucleares**

São instalações que utilizam a reação nuclear de fissão de maneira controlada. Os reatores podem ser divididos em dois grupos: os reatores de potência, usados como propulsores ou para a geração de energia elétrica, e os reatores de pesquisa, utilizados em experimentos e/ou para a produção de radioisótopos utilizados na medicina nuclear.

Um reator nuclear pode gerar feixes neutrônicos com intensidades entre 10 e

100 vezes maiores que as fontes anteriormente citadas, ou seja, na ordem de  $10^{13}$  e  $10^{15}$  n.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>, os nêutrons produzidos por essas fontes são potencialmente térmicos, isso devido ao fato de estarem geralmente imersos em materiais moderadores como a água.

Suas principais desvantagens são: a necessidade de um alto investimento inicial, a falta de mobilidade, bem como a elevada produção de raios gama.

#### A.4.3 Fontes Radioisotópicas ( $\alpha$ , n)

Fontes amplamente utilizadas, elas são obtidas a partir da mistura de um nuclídeo emissor alfa (<sup>226</sup>Ra, <sup>210</sup>Po, <sup>239</sup>Pu, <sup>241</sup>Am) com outros elementos de número atômico menor que são utilizados como alvo (<sup>9</sup>Be, <sup>7</sup>Li, <sup>24</sup>Na, <sup>19</sup>F), sendo o mais utilizado o <sup>9</sup>Be (KNOLL, 2000).

Os nêutrons originários das fontes radioisotópicas são produzidos a partir de uma reação nuclear que ocorre no material alvo, onde o mesmo é bombardeado por partículas alfa emitidas pelo radioisótopo.

São apresentadas a seguir algumas características das fontes radioisotópicas mais utilizadas nos laboratórios:

- *Fontes de <sup>226</sup>RaBe*: emitem nêutrons com energia de cerca de 1 MeV até 13 MeV. Possuem meia-vida longa (1600 anos) o que lhes permitiu ser muito utilizada como uma fonte padrão de emissão de nêutrons, aplicação atualmente em desuso. Possui como uma de suas características a alta taxa de produção de raios gama de fundo (BECKURTS, WIRTZ; 1964; KNOLL, 2000).
- *Fontes de <sup>239</sup>PuBe*: possuem como característica principal meia-vida longa (o plutônio decai com meia-vida aproximada de 24000 anos) e apresentam baixa produção de raios gama de fundo e uma baixa emissão de nêutrons (BECKURTS, WIRTZ; 1964).
- *Fontes de <sup>241</sup>AmBe*: essas fontes emitem nêutrons intensamente e possuem uma meia-vida de 433 anos; possuem espectro contínuo de energia entre 0 e

13 MeV, com energia média aproximada em 5 MeV; têm a desvantagem de possuírem dimensões com volume em torno de algumas dezenas de  $\text{cm}^3$ , o que não lhes permitem serem consideradas pontuais quando utilizadas para calibração de instrumentos dosimétricos. Contudo, devido ao seu baixo custo e à possibilidade de obtenção de altas taxas de emissão de nêutrons, são as mais utilizadas pelos centros de pesquisa e serviços de calibração (BECKURTS; WIRTZ, 1964; KNOLL, 2000).

#### A.4.4 Fontes de Fotonêutrons

Estas fontes são preparadas da mesma forma que as do tipo  $(\alpha, n)$ , porém produzem um fluxo de nêutrons de menor intensidade que as fontes radioisotópicas. Valem-se da reação de um emissor  $\gamma$ , que emite fótons com energia suficientemente alta para induzir uma reação passível de produzir um nêutron.

Os dois núclídeos mais utilizados como alvo são o berílio ( $^9\text{Be}$ ) através da reação  $^9\text{Be}(\gamma, n)^8\text{Be}$  ( $Q = -1,67$  MeV) e o deutério ( $^2\text{H}$ ) com a reação  $^2\text{H}(\gamma, n)^1\text{H}$  ( $Q = -2,23$  MeV). Essas reações são capazes de produzirem fluxo neutrônico homogêneo com energia inferior a 1 MeV. Os emissores gama geralmente utilizados nessas fontes são:  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{72}\text{Ga}$ ,  $^{124}\text{Sb}$  e  $^{140}\text{La}$  (BYRNE, 1994; KNOLL, 2000).

Essas fontes têm como desvantagem a meia-vida curta dos gama emissores e a alta taxa de emissão de raios gama de fundo, tornando os trabalhos com essas fontes requeiram medidas especiais de radioproteção (BECKURTS, WIRTZ; 1964).

#### A.4.5 Aceleradores de Partículas Carregadas

Os campos neutrônicos podem ser produzidos ainda utilizando-se os aceleradores de partículas através do choque das mesmas com átomos de hidrogênio ou seus isótopos e outros núcleos pesados. As reações mais utilizadas são aquelas que utilizam íons positivos, tais como prótons ou deutérios que incidem sobre alvos ou por fotoreações  $(\gamma, n)$  obtidas por aceleradores de elétrons, sendo as reações mais comuns:  $^9\text{Be}(d, n)^{10}\text{B}$ ,  $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ ,  $^3\text{H}(p, n)^3\text{He}$  e  $^2\text{H}(d, n)^3\text{He}$ .

Já as duas mais importantes reações que podem ser utilizadas para produção

de nêutrons quando se faz uso de aceleradores eletrostáticos (geradores de Van de Graaff) ou por aceleradores cíclotron, são:  ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{H}$  ( $Q=3,26$  MeV) e  ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$  ( $Q=17,6$  MeV), essas reações podem produzir campos neutrônicos com fluxos na ordem de  $10^{10}$  n.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> (BYRNE, 1994).

Os nêutrons oriundos dessas fontes são, aproximadamente, monoenergéticos quando as condições experimentais são bem controladas (BAKALI, 2001).

## **A.5 Detecção de Nêutrons**

De uma forma geral, pode-se afirmar que nêutrons só podem ser detectados de forma indireta, ou seja, por meio de partículas geradas em sua passagem pela matéria ou por outro processo secundário que produza radiação ionizante. São apresentados a seguir alguns dos mecanismos utilizados na detecção de nêutrons.

### **A.5.1 Técnicas utilizadas na detecção neutrônica**

As técnicas mais utilizadas para a detecção dos nêutrons podem ser encontradas nas mais diversas referências sobre instrumentação e dosimetria (KNOLL, 2000; ATTIX, 2004) e possuem como princípio fundamental a medida das partículas carregadas ou dos fótons produzidos pela interação dos nêutrons sobre a matéria.

#### **A.5.1.1 Detecção de nêutrons por prótons e partículas $\alpha$**

Neste método a presença do nêutron é determinada pela detecção da partícula produto da reação. As reações mais utilizadas para a detecção de nêutrons são as seguintes:  ${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{H}$ ,  ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ ,  ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ ,  ${}^{12}\text{C}(n, \alpha){}^9\text{Be}$  e  ${}^{28}\text{Si}(n, \alpha){}^{25}\text{Mg}$ .

Essas reações possuem seções de choque elevadas para nêutrons térmicos bem como diminuem em função da velocidade ( $1/v$ ). Esta característica faz com que essas reações sejam utilizadas essencialmente para detecção de nêutrons térmicos.

Entre os detectores que valem-se dessa técnica podem ser citados os detectores proporcionais gasosos preenchidos com hélio-3 ou com o trifluoreto de

boro-10 ( $\text{BF}_3$ ), os cintiladores de iodeto de lítio ou a combinação de detectores termoluminescentes, mais especificamente, o lítio-6 com lítio-7 ( $^6\text{Li}$  e  $^7\text{Li}$ ) ou lítio-6 com lítio-natural ( $^6\text{Li}$  e  $^n\text{Li}$ ).

Outro tipo de detector que utilizam também este princípio são aqueles denominados de detectores de traço. Assim como os outros tipos de detectores anteriormente citados, o princípio de detecção de nêutrons está baseado na observação dos danos causados por partículas carregadas, resultantes das reações do tipo  $(n, \alpha)$  ou  $(n, p)$  em materiais orgânicos como o CR-39 (*Columbia Resin*<sup>®</sup>). Os traços observados em sua superfície são devidamente ampliados por procedimentos químicos de revelação.

Os recentes trabalhos desenvolvidos com detectores de traço buscam aprimorar a caracterização e otimização de sua resposta para nêutrons em função da energia e da direção de incidência (PEURRUNG, 2000).

É possível também detectar nêutrons utilizando esta técnica através de um detector semicondutor tipo “sandwich”, onde um pequeno volume de gás  $^3\text{He}$  ou uma fina camada de material que contenha  $^6\text{Li}$ , são adicionados entre dois detectores de partículas carregadas. Pelo princípio da conservação do momento, os dois produtos da reação seguem em direções opostas e são assim detectados. Sendo toda energia absorvida, nenhum processo de deconvolução torna-se necessária, desde que a eficiência de detecção em função da energia seja conhecida.

Devido à eletrônica associada a esses detectores ser um tanto complexa e a eficiência de detecção ser extremamente baixa, tais dispositivos são ainda inviáveis para aplicações em uso rotineiro.

#### **A.5.1.2 Detecção de nêutrons por fótons e partículas $\beta$**

Outro método também utilizado para a detecção dos nêutrons térmicos é quando o nêutron é absorvido por um núcleo e um fóton é emitido como resultado desta reação.

A absorção do nêutron conduz o núcleo a um estado instável (radioativo) com a possibilidade do mesmo emitir partículas  $\beta$  ou fótons com energia característica.

Um dos métodos que utiliza as características dessas reações é o método denominado Método de Ativação, onde se utiliza folhas de elementos metálicos como o ouro-197 ( $^{197}\text{Au}$ ); disprósio-164 ( $^{164}\text{Dy}$ ), índio-115 ( $^{115}\text{In}$ ), cobalto-59 ( $^{59}\text{Co}$ ), magnésio-55 ( $^{55}\text{Mg}$ ), entre outros; esses materiais emitem fótons com energia característica, e detectados por um espectrômetro gama. As características desses elementos podem ser observadas na Tabela A1 (BYRNE, 1999).

Tabela A1: Reações mais utilizadas no método de ativação neutrônica.

Abundância (%)	Reação Núcleo	$T_{1/2}$	$\sigma$ (barn)
$^{197}\text{Au}$ (100)	$^{197}\text{Au} (n, \gamma) ^{198}\text{Au}$	2,695 dias	$98,65 \pm 0,09$
$^{164}\text{Dy}$ (28,18)	$^{164}\text{Dy} (n, \gamma) ^{165}\text{Dy}$	140 min	$800 \pm 100$
$^{115}\text{In}$ (95,77)	$^{115}\text{In} (n, \gamma) ^{116m}\text{In}$	54,12 min	$160 \pm 2$
$^{59}\text{Co}$ (100)	$^{59}\text{Co} (n, \gamma) ^{60m}\text{Co}$	10,4 min	$37,18 \pm 0,06$
$^{55}\text{Mg}$ (100)	$^{55}\text{Mg} (n, \gamma) ^{56}\text{Mg}$	154,8 min	$13,3 \pm 0,2$

Uma vantagem deste método é que pode ser aplicado para estimar separadamente o fluxo neutrônico na região dos nêutrons térmicos e epitérmicos, utilizando para isso a energia de corte do cádmio.

Isso é possível por que o cádmio ( $^{113}\text{Cd}$ ) possui seção de choque de  $5,7 \times 10^4$  b para nêutrons com energia média de 0,176 eV, o que lhe provê a propriedade de “remover” de forma eficaz, os nêutrons com energia menores que 0,4 eV.

Outras reações de ativação do tipo: (n, p); (n,  $\alpha$ ); (n, n'); (n, 2n), também produzem elementos radioativos emissores de radiação gama e de partículas  $\beta$ , cujas energias estão compreendidas entre 500 keV e dezenas de MeV.

### **A.5.1.3 Métodos de detecção por recuo nuclear**

Considerando um nêutron com energia  $E_n$  colidindo com um próton estacionário, a este poderá ser transferida toda energia cinética do nêutron incidente. A energia do próton de recuo,  $E_p$ , poderá ter então valores compreendidos desde próximos de zero, para o qual o ângulo de incidência é  $0^\circ$  e  $E_n$ , quando o ângulo de incidência é aproximadamente de  $90^\circ$  (BECKURTS, WIRTZ; 1964).

Devido ao fato do espalhamento produzido ser isotrópico no volume sensível do detector, toda energia do próton de recuo entre 0 e  $E_n$  são igualmente prováveis, fazendo com que a grande maioria dos detectores de recuo utilizem materiais hidrogenados.

Esse método de detecção pode ser utilizado para realização de espectrometria neutrônica desde que para um dado espalhamento, a energia do próton  $E_p$  e o ângulo de espalhamento sejam simultaneamente determinados, implicando desta forma, na determinação indireta da energia do nêutron.

## **A.6 Sistemas Espectrométricos**

Diferentes sistemas foram desenvolvidos para realizar espectrometria neutrônica, sendo os mais utilizados detectores limiares (ativação ou fissão), os contadores proporcionais de  $^3\text{He}$ , cintiladores de  $\text{LiI}$ , detectores de prótons de recuo e o método do tempo de voo.

Utilizado para fins de radioproteção, particularmente, em ambientes que trabalhadores estejam ocupacionalmente expostos a esse tipo de radiação, o sistema de esferas de Bonner ou simplesmente sistema EB é o espectrômetro mais utilizado.

### **A.6.1 Contadores Proporcionais**

Detectores preenchidos com gases adequados e operados no modo proporcional podem propiciar a discriminação de fótons que incidem em seu volume sensível. Dois tipos de gases são muito utilizados na detecção de nêutrons, o hélio-3

( $^3\text{He}$ ) e o trifluoreto de boro-10 ( $\text{BF}_3$ ). São apresentados a seguir algumas características desses dois tipos usuais de contadores.

#### **A.6.1.1 Contador Proporcional com $\text{BF}_3$**

Neste tipo de instrumento, o trifluoreto de boro é usado como alvo para converter nêutrons lentos em partículas secundárias. Praticamente a maioria dos contadores de  $\text{BF}_3$  são preenchidos com gás enriquecido com  $^{10}\text{B}$ , já que este isótopo permite um acréscimo de 5 vezes sobre a eficiência de detecção comparando-se com quando o preenchimento é feito com boro natural (KNOLL, 2000).

Outra característica do contador proporcional com  $\text{BF}_3$  é que, favorecido pela reação  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  com o valor de  $Q = 2,8 \text{ MeV}$ , esse instrumento torna-se um bom discriminador da radiação gama, o que viabiliza a sua utilização em campos de alta intensidade.

#### **A.6.2 Detectores de prótons de recuo**

Nêutrons monoenergéticos que colidem com núcleos de hidrogênio podem produzir prótons de recuo através de colisão elástica. A detecção de nêutrons por prótons de recuo infere a energia do nêutron pela energia medida e a direção do próton produzido sobre uma fina camada de material hidrogenado.

Esses detectores possuem uma resposta relativamente alta ( $\sim 0,2 \mu\text{s}$ ) e eficiência em torno de 5% quando o próton é detectado por um cintilador plástico hidrogenado combinado com  $\text{ZnS}(\text{Ag})$ .

Gases proporcionais como  $^2\text{H}$  e  $^4\text{He}$  também podem ser utilizados para produção de prótons de recuo, contudo apresentam uma eficiência menor que 1% (BYRNE, 1994).

### A.6.3 Técnica do Tempo de Voo

Também conhecida como TOF (do inglês “*time-of-flight*”), essa técnica não é utilizada para detecção neutrônica, contudo possibilita determinar a energia do nêutron por medida do tempo de voo em distância preestabelecida. É baseada na simples relação entre velocidade e energia cinética.

O espectrômetro de tempo de voo possui dois elementos principais, o primeiro determina a energia média e a distribuição de energia do pulso gerado por nêutrons, bem como o intervalo de tempo entre dois pulsos consecutivos, e o segundo grava a energia dos nêutrons espalhados por medida de seus tempos de voo sobre uma trajetória conhecida (BYRNE, 1994).

### 3.6.2 Cintilador de LiI(Eu)

Os cintiladores de iodeto de lítio são geralmente utilizados para a detecção de nêutrons lentos, o que condiciona o seu uso, quando se deseja realizar espectrometria em campos intensos.

A interação do nêutron com o cristal cintilador ocorre pela reação  ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$  e possui um alto valor de Q (4,78 MeV), a partícula alfa gerada nesta reação interage com a rede cristalina criando um estado transitório, de forma que para o cristal retornar ao estado fundamental, ocorre a emissão de fótons que são detectados por uma fotomultiplicadora acoplada ao sistema e que resultam em um sinal elétrico conveniente de ser processado por um sistema eletrônico.

A seção de choque do  ${}^6\text{Li}$  (~945 barns para nêutrons térmicos), associada ao seu pequeno volume, torna o detector praticamente insensível aos raios gama incidentes.

Um cintilador de iodeto de lítio enriquecido com európio [ ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ ] foi inicialmente utilizado por Bramblett e seus colaboradores em 1960 como detector de nêutrons térmicos e colocado no interior de um sistema espectrométrico composto por um conjunto de esferas moderadoras de polietileno de alta densidade (BRAMBLETT *et al*, 1960).

O cristal utilizado naquela oportunidade possuía como dimensões 4 mm de

espessura e 4 mm de diâmetro. Encontram-se esses cristais em dimensões maiores que aquela utilizada por Bramblett, porém a subtração da componente gama do detector é conseguida com maior dificuldade.

Detectores higroscópicos como o iodeto de lítio, não podem ser expostos à umidade e para que este problema seja minimizado, os mesmos são hermeticamente selados e conectados a uma fotomultiplicadora via acoplamento óptico. Na Figura A.2 é apresentada uma representação de um sistema de detecção com o cintilador de  ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$  acoplado a uma fotomultiplicadora.

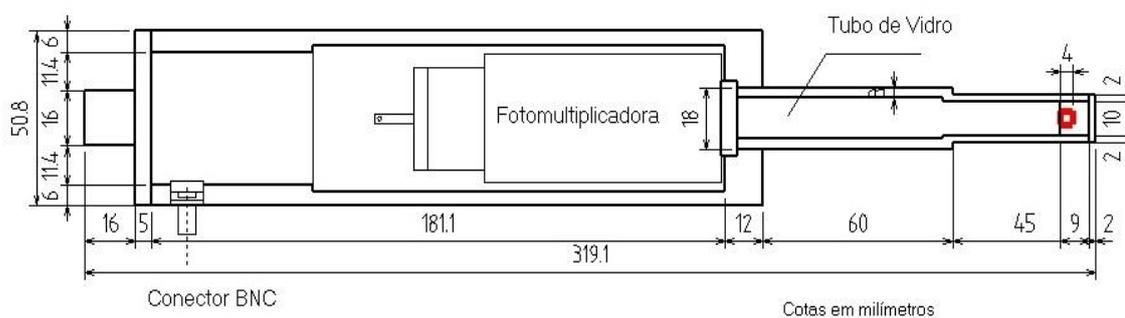


Figura A.2: Corte transversal de um cintilador de iodeto de lítio.

## APÊNDICE B

### Arquivo de entrada do código MCNP5

#### Laboratório de Nêutrons CRCN-NE

Projeto da sala de Irradiação do CRCN

c definição da sala parede externa

1 1 -2.26 (3 -2 -4 1 5 -6):(4 -2 -8 7 5 -6):(8 -2 -9 1 5 -6):(11 -10 -8 1 5 -6):&  
(13 -12 -11 1 5 -6) & (13 -14 -15 1 5 -16):(3 -2 -17 1 6 -18):(17 -2 -20 19 6 -18):&  
(20 -2 -9 1 6 -18):(14 -21 -20 1 6 -18):(3 -2 -9 1 18 -22):(3 -2 -9 1 -5 23) #3

c definição das paredes internas

2 2 -1.248E-3 (4 -7 -13 14 5 -18):(13 -7 -11 12 5 -18):(11 -7 -8 10 5 -18)  
#1#3#4#6#7#8#9#10#11#12#13#14#15#16#17#18#19#20#21

c definição da porta

3 3 -7.86 (1 -14 4 -15 5 -16)

c definição da fonte de 241AmBe

4 0 (25 -26 -27)

c definição de uma área externa(contorno)

5 2 -1.248E-3 (30 -29 -31 28 32 -33)  
#1#2#3#4#6#7#8#9#10#11#12#14#15#16#17#18#19#20#21

c definição dos detectores esféricos

6 2 -1.248E-3 -34

7 2 -1.248E-3 -35

8 2 -1.248E-3 -36

9 2 -1.248E-3 -37

10 2 -1.248E-3 -38

11 2 -1.248E-3 -39

12 2 -1.248E-3 -40

13 2 -1.248E-3 -41

14 2 -1.248E-3 -42

15 2 -1.248E-3 -43

16 2 -1.248E-3 -44

17 2 -1.248E-3 -45

18 2 -1.248E-3 -46

19 2 -1.248E-3 -47

20 2 -1.248E-3 -48

21 2 -1.248E-3 -49

c 22 2 -1.248E-3 -50

c definição da geometria

23 0 #1#2#3#4#5#6#7#8#9#10#11#12#13#14#15#16#17#18#19#20#21

1 px 50  
2 px 980  
3 py 50  
4 py 100  
5 pz 50  
6 pz 350  
7 px 905  
8 py 965  
9 py 1080  
10 px 80  
11 py 330  
12 px 260  
13 py 280  
14 px 54  
15 py 274  
16 pz 270  
17 py 65  
18 pz 515  
19 px 965  
20 py 1065  
21 px 65  
22 pz 533  
23 pz 32  
25 pz 195  
26 c/z 250 765 1  
27 pz 205  
28 px 0  
29 px 1030  
30 py 0  
31 py 1130  
32 pz 0  
33 pz 583  
34 s 300 715 200 5  
35 s 325 690 200 5  
36 s 350 665 200 5  
37 s 375 640 200 5  
38 s 400 615 200 5  
39 s 425 590 200 5  
40 s 450 565 200 5  
41 s 475 540 200 5  
42 s 500 515 200 5  
43 s 525 490 200 5  
44 s 550 465 200 5  
45 s 575 440 200 5  
46 s 600 415 200 5  
47 s 625 390 200 5  
48 s 650 365 200 5  
49 s 675 340 200 5

```

IMP:N 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0
M1 8016 -0.4983 11023 -0.0171 13027 -0.0456 14000 -0.3158 &
  19000 -0.0192 20000 -0.0918 26000 -0.0122 $concreto
M2 6000 -0.0002 7014 -0.7552 8016 -0.2318 18000 -0.0128 $ar
M3 26000 -1.0 $ferro
SDEF ERG=d1 POS=250 765 200
si1 0.000000025 0.000000414 0.11 0.33 0.54 0.75 0.97 1.18 1.4 1.61 &
  1.82 2.04 2.25 2.47 2.68 2.9 3.11 3.24 3.37 3.5 &
  3.63 3.76 3.89 4.02 4.15 4.28 4.41 4.54 4.67 4.8 4.93 5.06 &
  5.19 5.32 5.45 5.58 5.71 5.84 5.97 6.10 6.23 6.36 6.49 6.62 &
  6.75 6.88 7.01 7.14 7.27 7.40 7.53 7.66 7.79 7.92 8.05 8.18 &
  8.31 8.44 8.57 8.70 8.83 8.96 9.09 9.22 9.35 9.48 9.61 9.74 &
  9.87 10.00 10.1 10.3 10.4 10.5 10.7 10.8 10.9 11.0 11.2 11.3 &
  11.4 11.6 11.7 11.8 12.0
sp1 0.0 0.0 0.00191 0.05049 0.10547 0.14217 0.16144 0.18104 0.19266 &
  0.20761 0.26076 0.32388 0.36374 0.40028 0.46339 0.62118 0.8454 &
  0.864 0.976 1.0 0.925 0.815 0.749 0.767 0.775 0.752 0.732 0.728 &
  0.763 0.788 0.772 0.805 0.857 0.841 0.810 0.799 0.78 0.722 0.642 &
  0.617 0.582 0.466 0.394 0.428 0.494 0.523 0.499 0.458 0.424 0.393 &
  0.383 0.42 0.466 0.484 0.491 0.485 0.437 0.366 0.334 0.334 0.305 &
  0.243 0.187 0.152 0.138 0.138 0.142 0.147 0.15 0.154 0.157 0.156 &
  0.147 0.131 0.112 0.0935 0.0752 0.0555 0.0363 0.0228 0.0158 0.0117 &
  0.00779 0.00415 0.00178
E0 1.0000000000000000e-9 1.0000000000000000e-8 2.5300000000000000e-8
  1.0000000000000000e-7 2.0000000000000000e-7 5.0000000000000000e-7
  1.0000000000000000e-6 2.0000000000000000e-6 5.0000000000000000e-6
  1.0000000000000000e-5 2.0000000000000000e-5 5.0000000000000000e-5
  1.0000000000000000e-4 2.0000000000000000e-4 5.0000000000000000e-4
  1.0000000000000000e-3 2.0000000000000000e-3 5.0000000000000000e-3
  1.0000000000000000e-2 2.0000000000000000e-2 3.0000000000000000e-2
  5.0000000000000000e-2 7.0000000000000000e-2 1.0000000000000000e-1
  1.5000000000000000e-1 2.0000000000000000e-1 3.0000000000000000e-1
  5.0000000000000000e-1 7.0000000000000000e-1 9.0000000000000000e-1
  1.0000000000000000e+0 1.2000000000000000e+0 2.0000000000000000e+0
  3.0000000000000000e+0 4.0000000000000000e+0 5.0000000000000000e+0
  6.0000000000000000e+0 7.0000000000000000e+0 8.0000000000000000e+0
  9.0000000000000000e+0 1.0000000000000000e+1 1.2000000000000000e+1
  1.4000000000000000e+1 1.5000000000000000e+1 1.6000000000000000e+1
  1.8000000000000000e+1 2.0000000000000000e+1
c Multiplicar os valores de saida pela taxa de emissao da fonte considerada
c H*(10) em MicroSv.cm2 resultados em Ambient Dose Eq. em microSv
EM0 6.60e-6 9.00e-6 10.60e-6 12.90e-6 3.50e-6 13.6e-6 13.3e-6 12.9e-6
  12.0e-6 11.3e-6 10.6e-6 9.90e-6 9.40e-6 8.90e-6 8.30e-6 7.90e-6
  7.70e-6 8.00e-6 10.5e-6 16.6e-6 23.7e-6 41.1e-6 60.0e-6 88.0e-6
  132e-6 170e-6 233e-6 322e-6 375e-6 400e-6 416e-6 425e-6 420e-6
  412e-6 408e-6 405e-6 400e-6 405e-6 409e-6 420e-6 440e-6 480e-6
  520e-6 540e-6 555e-6 570e-6 600e-6

```

f2:n 34  
sd2 314.1593  
f12:n 35  
sd12 314.1593  
f22:n 36  
sd22 314.1593  
f32:n 37  
sd32 314.1593  
f42:n 38  
sd42 314.1593  
f52:n 39  
sd52 314.1593  
f62:n 40  
sd62 314.1593  
f72:n 41  
sd72 314.1593  
f82:n 42  
sd82 314.1593  
f92:n 43  
sd92 314.1593  
f102:n 44  
sd102 314.1593  
f112:n 45  
sd112 314.1593  
f122:n 46  
sd122 314.1593  
f132:n 47  
sd132 314.1593  
f142:n 48  
sd142 314.1593  
f152:n 49  
sd152 314.1593  
f6:n 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21  
nps 200.000.000

## APÊNDICE C

### Arquivo de entrada do código MCNP5

#### Conjunto Esfera – Detector – 8”

Projeto da Matriz Resposta EB-TLD

c Caixa de vácuo

1 0 (1 -2 3 -4 5 -6) #2#3#4#5#6#7#8#9#10#11#12#13#14

c Definição dos detectores TL600

2 1 -2.635 (8 -9 10 -11 12 -13)

c Definição dos detectores TL600

3 1 -2.635 (8 -9 10 -11 14 -15)

c Definição dos detectores TL600

4 1 -2.635 (8 -9 10 -11 16 -17)

c Definição dos detectores TL600

5 1 -2.635 (8 -9 10 -11 18 -19)

c Definição dos detectores TL600

6 1 -2.635 (8 -9 10 -11 20 -21)

c Definição dos detectores TL600

7 1 -2.635 (8 -9 10 -11 22 -23)

c Definição dos detectores TL700

8 2 -2.64 (24 -25 10 -11 12 -13)

c Definição dos detectores TL700

9 2 -2.64 (24 -25 10 -11 14 -15)

c Definição dos detectores TL700

10 2 -2.64 (24 -25 10 -11 16 -17)

c Definição dos detectores TL700

11 2 -2.64 (24 -25 10 -11 18 -19)

c Definição dos detectores TL700

12 2 -2.64 (24 -25 10 -11 20 -21)

c Definição dos detectores TL700

13 2 -2.64 (24 -25 10 -11 22 -23)

c Definição do volume sensível-cilindro ar

14 3 -1.2048E-3 (26 -27 -28) #2#3#4#5#6#7#8#9#10#11#12#13

c Definição da esfera polietileno A. densidade-8”

15 4 -0.95 -29 #2#3#4#5#6#7#8#9#10#11#12#13#14

c Definição do ambiente externo

16 0 -1:2:-3:4:-5:6

1 px 0

2 px 30.50

3 py 0

4 py 91  
5 pz 0  
6 pz 30.50  
8 px 14.7225  
9 px 15.04  
10 py 74.9111  
11 py 75.0445  
12 pz 13.6315  
13 pz 13.949  
14 pz 14.249  
15 pz 14.5665  
16 pz 14.8665  
17 pz 15.184  
18 pz 15.484  
19 pz 15.8015  
20 pz 16.1015  
21 pz 16.419  
22 pz 16.719  
23 pz 17.0365  
24 px 15.44  
25 px 15.7575  
26 pz 12.96  
27 c/z 15.24 75 0.75  
28 pz 17.5365  
29 s 15.24 75 16.77 10.16

IMP:N 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0  
SDEF ERG=9.5E-8 POS=15.25 0 15.25 VEC=0 1 0 DIR=1 SUR=1  
M1 9019 -0.759 3007 -0.012 3006 -0.229 \$TLD600  
M2 9019 -0.7324 3007 -0.2674 3006 -0.0002 \$TLD700  
M3 6000 -0.0002 7014 -0.7552 8016 -0.2318 18000 -0.0128 \$ar  
M4 6000 -0.856289 1001 -0.143711 \$polietileno alta densidade  
f2:n (8 9 12 13)  
sd2 0.10081  
f12:n (8 9 14 15)  
sd12 0.10081  
f22:n (8 9 16 17)  
sd22 0.10081  
f32:n (8 9 18 19)  
sd32 0.10081  
f42:n (8 9 20 21)  
sd42 0.10081  
f52:n (8 9 22 23)  
sd52 0.10081  
f62:n (24 25 12 13)  
sd62 0.10081  
f72:n (24 25 14 15)  
sd72 0.10081

f82:n (24 25 16 17)  
sd82 0.10081  
f92:n (24 25 18 19)  
sd92 0.10081  
f102:n (24 25 20 21)  
sd102 0.10081  
f112:n (24 25 22 23)  
sd112 0.10081  
nps 700000000

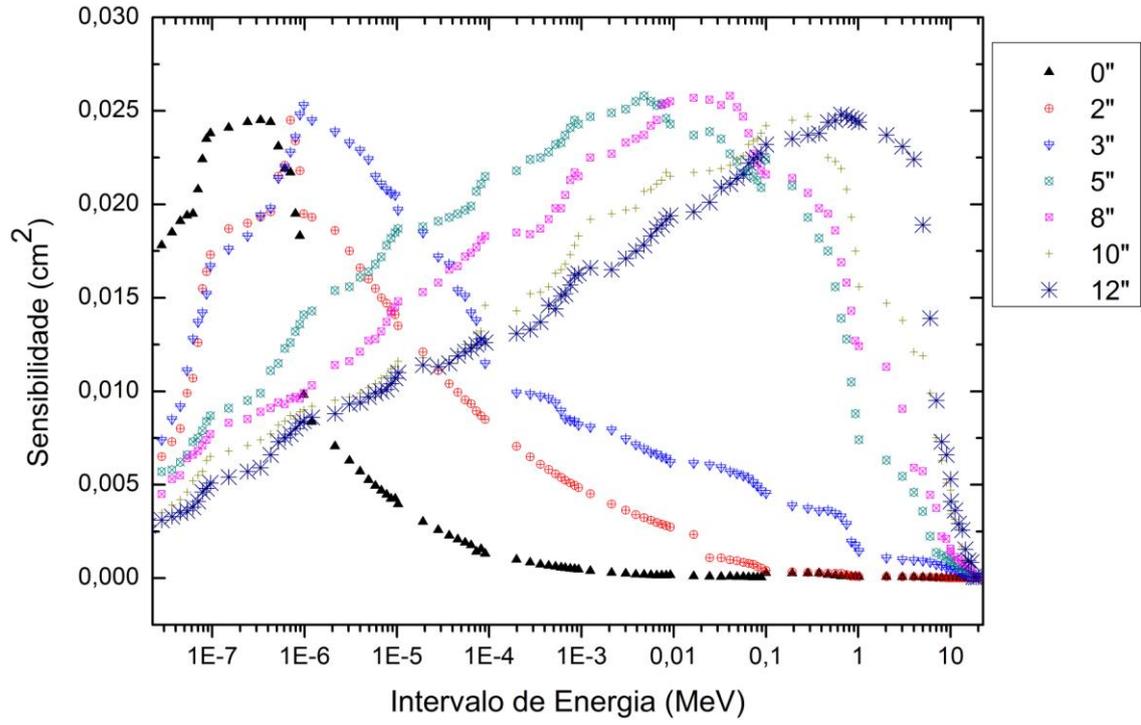
## APÊNDICE D

### Matriz resposta obtida com o conjunto EB – TLD

Intervalo de Energia (MeV)	Sem Esfera (0")	Esfera 2" (5,08 cm)	Esfera 3" (7,62 cm)	Esfera 5" (12,70 cm)	Esfera 8" (20,32 cm)	Esfera 10" (25,40 cm)	Esfera 12" (30,48 cm)
$2,00 \cdot 10^{-8}$	$1,74 \cdot 10^{-2}$	$5,80 \cdot 10^{-3}$	$6,40 \cdot 10^{-3}$	$5,42 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$
$2,83 \cdot 10^{-8}$	$1,78 \cdot 10^{-2}$	$6,51 \cdot 10^{-3}$	$7,42 \cdot 10^{-3}$	$5,70 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$
$3,67 \cdot 10^{-8}$	$1,85 \cdot 10^{-2}$	$7,32 \cdot 10^{-3}$	$8,50 \cdot 10^{-3}$	$5,80 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
$4,50 \cdot 10^{-8}$	$1,91 \cdot 10^{-2}$	$8,00 \cdot 10^{-3}$	$9,21 \cdot 10^{-3}$	$6,21 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$
$5,33 \cdot 10^{-8}$	$1,94 \cdot 10^{-2}$	$9,91 \cdot 10^{-3}$	$1,11 \cdot 10^{-2}$	$6,61 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$
$6,17 \cdot 10^{-8}$	$1,95 \cdot 10^{-2}$	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$1,28 \cdot 10^{-2}$	$7,30 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$
$7,00 \cdot 10^{-8}$	$2,08 \cdot 10^{-2}$	$1,26 \cdot 10^{-2}$	$1,37 \cdot 10^{-2}$	$7,52 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$
$7,83 \cdot 10^{-8}$	$2,24 \cdot 10^{-2}$	$1,55 \cdot 10^{-2}$	$1,42 \cdot 10^{-2}$	$7,90 \cdot 10^{-3}$	$7,1 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$
$8,66 \cdot 10^{-8}$	$2,35 \cdot 10^{-2}$	$1,64 \cdot 10^{-2}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$	$8,41 \cdot 10^{-3}$	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$
$9,50 \cdot 10^{-8}$	$2,38 \cdot 10^{-2}$	$1,73 \cdot 10^{-2}$	$1,67 \cdot 10^{-2}$	$8,72 \cdot 10^{-3}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$
$1,50 \cdot 10^{-7}$	$2,41 \cdot 10^{-2}$	$1,87 \cdot 10^{-2}$	$1,76 \cdot 10^{-2}$	$9,11 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$
$2,42 \cdot 10^{-7}$	$2,44 \cdot 10^{-2}$	$1,90 \cdot 10^{-2}$	$1,83 \cdot 10^{-2}$	$9,51 \cdot 10^{-3}$	$8,5 \cdot 10^{-3}$	$7,1 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$
$3,34 \cdot 10^{-7}$	$2,45 \cdot 10^{-2}$	$1,93 \cdot 10^{-2}$	$1,94 \cdot 10^{-2}$	$9,91 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$
$4,27 \cdot 10^{-7}$	$2,44 \cdot 10^{-2}$	$1,96 \cdot 10^{-2}$	$1,98 \cdot 10^{-2}$	$1,11 \cdot 10^{-2}$	$9,1 \cdot 10^{-3}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$
$5,19 \cdot 10^{-7}$	$2,31 \cdot 10^{-2}$	$2,15 \cdot 10^{-2}$	$2,14 \cdot 10^{-2}$	$1,15 \cdot 10^{-2}$	$9,4 \cdot 10^{-3}$	$8,2 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-3}$
$6,11 \cdot 10^{-7}$	$2,19 \cdot 10^{-2}$	$2,21 \cdot 10^{-2}$	$2,20 \cdot 10^{-2}$	$1,23 \cdot 10^{-2}$	$9,3 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$
$7,03 \cdot 10^{-7}$	$2,17 \cdot 10^{-2}$	$2,45 \cdot 10^{-2}$	$2,28 \cdot 10^{-2}$	$1,26 \cdot 10^{-2}$	$9,6 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-3}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$
$7,95 \cdot 10^{-7}$	$1,95 \cdot 10^{-2}$	$2,34 \cdot 10^{-2}$	$2,36 \cdot 10^{-2}$	$1,32 \cdot 10^{-2}$	$9,7 \cdot 10^{-3}$	$8,5 \cdot 10^{-3}$	$8,1 \cdot 10^{-3}$
$8,88 \cdot 10^{-7}$	$1,83 \cdot 10^{-2}$	$2,18 \cdot 10^{-2}$	$2,48 \cdot 10^{-2}$	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$9,6 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$
$9,80 \cdot 10^{-7}$	$9,81 \cdot 10^{-3}$	$1,95 \cdot 10^{-2}$	$2,53 \cdot 10^{-2}$	$1,41 \cdot 10^{-2}$	$9,9 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-3}$
$1,20 \cdot 10^{-6}$	$8,36 \cdot 10^{-3}$	$1,93 \cdot 10^{-2}$	$2,45 \cdot 10^{-2}$	$1,43 \cdot 10^{-2}$	$1,03 \cdot 10^{-2}$	$9,2 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \cdot 10^{-3}$
$2,13 \cdot 10^{-6}$	$7,05 \cdot 10^{-3}$	$1,86 \cdot 10^{-2}$	$2,39 \cdot 10^{-2}$	$1,54 \cdot 10^{-2}$	$1,14 \cdot 10^{-2}$	$9,5 \cdot 10^{-3}$	$8,8 \cdot 10^{-3}$
$3,07 \cdot 10^{-6}$	$6,28 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$2,33 \cdot 10^{-2}$	$1,56 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{-2}$	$9,7 \cdot 10^{-3}$	$9,3 \cdot 10^{-3}$
$4,00 \cdot 10^{-6}$	$5,70 \cdot 10^{-3}$	$1,66 \cdot 10^{-2}$	$2,29 \cdot 10^{-2}$	$1,61 \cdot 10^{-2}$	$1,21 \cdot 10^{-2}$	$9,9 \cdot 10^{-3}$	$9,4 \cdot 10^{-3}$
$4,93 \cdot 10^{-6}$	$5,25 \cdot 10^{-3}$	$1,61 \cdot 10^{-2}$	$2,24 \cdot 10^{-2}$	$1,64 \cdot 10^{-2}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$1,02 \cdot 10^{-2}$	$9,7 \cdot 10^{-3}$
$5,87 \cdot 10^{-6}$	$4,93 \cdot 10^{-3}$	$1,55 \cdot 10^{-2}$	$2,15 \cdot 10^{-2}$	$1,68 \cdot 10^{-2}$	$1,28 \cdot 10^{-2}$	$1,04 \cdot 10^{-2}$	$9,9 \cdot 10^{-3}$
$6,80 \cdot 10^{-6}$	$4,68 \cdot 10^{-3}$	$1,51 \cdot 10^{-2}$	$2,11 \cdot 10^{-2}$	$1,72 \cdot 10^{-2}$	$1,32 \cdot 10^{-2}$	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
$7,73 \cdot 10^{-6}$	$4,46 \cdot 10^{-3}$	$1,47 \cdot 10^{-2}$	$2,08 \cdot 10^{-2}$	$1,78 \cdot 10^{-2}$	$1,37 \cdot 10^{-2}$	$1,08 \cdot 10^{-2}$	$1,01 \cdot 10^{-2}$
$8,66 \cdot 10^{-6}$	$4,24 \cdot 10^{-3}$	$1,43 \cdot 10^{-2}$	$2,06 \cdot 10^{-2}$	$1,82 \cdot 10^{-2}$	$1,42 \cdot 10^{-2}$	$1,12 \cdot 10^{-2}$	$1,04 \cdot 10^{-2}$

$9,60 \cdot 10^{-6}$	$4,24 \cdot 10^{-3}$	$1,41 \cdot 10^{-2}$	$2,05 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-2}$	$1,45 \cdot 10^{-2}$	$1,13 \cdot 10^{-2}$	$1,07 \cdot 10^{-2}$
$1,03 \cdot 10^{-5}$	$3,95 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^{-2}$	$1,97 \cdot 10^{-2}$	$1,87 \cdot 10^{-2}$	$1,48 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
$1,92 \cdot 10^{-5}$	$3,01 \cdot 10^{-3}$	$1,21 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-2}$	$1,88 \cdot 10^{-2}$	$1,53 \cdot 10^{-2}$	$1,18 \cdot 10^{-2}$	$1,14 \cdot 10^{-2}$
$2,81 \cdot 10^{-5}$	$2,57 \cdot 10^{-3}$	$1,11 \cdot 10^{-2}$	$1,72 \cdot 10^{-2}$	$1,91 \cdot 10^{-2}$	$1,58 \cdot 10^{-2}$	$1,14 \cdot 10^{-2}$	$1,13 \cdot 10^{-2}$
$3,70 \cdot 10^{-5}$	$2,27 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-2}$	$1,68 \cdot 10^{-2}$	$1,93 \cdot 10^{-2}$	$1,65 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$	$1,15 \cdot 10^{-2}$
$4,59 \cdot 10^{-5}$	$2,07 \cdot 10^{-3}$	$9,94 \cdot 10^{-3}$	$1,54 \cdot 10^{-2}$	$1,95 \cdot 10^{-2}$	$1,67 \cdot 10^{-2}$	$1,21 \cdot 10^{-2}$	$1,19 \cdot 10^{-2}$
$5,49 \cdot 10^{-5}$	$1,90 \cdot 10^{-3}$	$9,54 \cdot 10^{-3}$	$1,51 \cdot 10^{-2}$	$1,97 \cdot 10^{-2}$	$1,72 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$	$1,21 \cdot 10^{-2}$
$6,38 \cdot 10^{-5}$	$1,76 \cdot 10^{-3}$	$9,34 \cdot 10^{-3}$	$1,42 \cdot 10^{-2}$	$1,99 \cdot 10^{-2}$	$1,74 \cdot 10^{-2}$	$1,24 \cdot 10^{-2}$	$1,23 \cdot 10^{-2}$
$7,27 \cdot 10^{-5}$	$1,41 \cdot 10^{-3}$	$8,94 \cdot 10^{-3}$	$1,38 \cdot 10^{-2}$	$2,07 \cdot 10^{-2}$	$1,77 \cdot 10^{-2}$	$1,31 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$
$8,16 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-3}$	$8,70 \cdot 10^{-3}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$2,11 \cdot 10^{-2}$	$1,81 \cdot 10^{-2}$	$1,32 \cdot 10^{-2}$	$1,28 \cdot 10^{-2}$
$9,05 \cdot 10^{-5}$	$1,31 \cdot 10^{-3}$	$8,49 \cdot 10^{-3}$	$1,15 \cdot 10^{-2}$	$2,15 \cdot 10^{-2}$	$1,83 \cdot 10^{-2}$	$1,46 \cdot 10^{-2}$	$1,26 \cdot 10^{-2}$
$1,98 \cdot 10^{-4}$	$9,98 \cdot 10^{-4}$	$7,05 \cdot 10^{-3}$	$9,92 \cdot 10^{-3}$	$2,18 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-2}$	$1,43 \cdot 10^{-2}$	$1,31 \cdot 10^{-2}$
$2,79 \cdot 10^{-4}$	$8,33 \cdot 10^{-4}$	$6,49 \cdot 10^{-3}$	$9,85 \cdot 10^{-3}$	$2,24 \cdot 10^{-2}$	$1,84 \cdot 10^{-2}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$	$1,33 \cdot 10^{-2}$
$3,61 \cdot 10^{-4}$	$7,27 \cdot 10^{-4}$	$6,10 \cdot 10^{-3}$	$9,74 \cdot 10^{-3}$	$2,25 \cdot 10^{-2}$	$1,87 \cdot 10^{-2}$	$1,53 \cdot 10^{-2}$	$1,37 \cdot 10^{-2}$
$4,42 \cdot 10^{-4}$	$6,58 \cdot 10^{-4}$	$5,81 \cdot 10^{-3}$	$9,63 \cdot 10^{-3}$	$2,28 \cdot 10^{-2}$	$1,92 \cdot 10^{-2}$	$1,56 \cdot 10^{-2}$	$1,46 \cdot 10^{-2}$
$5,23 \cdot 10^{-4}$	$6,10 \cdot 10^{-4}$	$5,58 \cdot 10^{-3}$	$9,39 \cdot 10^{-3}$	$2,32 \cdot 10^{-2}$	$1,98 \cdot 10^{-2}$	$1,63 \cdot 10^{-2}$	$1,44 \cdot 10^{-2}$
$6,05 \cdot 10^{-4}$	$5,74 \cdot 10^{-4}$	$5,39 \cdot 10^{-3}$	$8,94 \cdot 10^{-3}$	$2,33 \cdot 10^{-2}$	$1,98 \cdot 10^{-2}$	$1,65 \cdot 10^{-2}$	$1,51 \cdot 10^{-2}$
$6,68 \cdot 10^{-4}$	$5,36 \cdot 10^{-4}$	$5,23 \cdot 10^{-3}$	$8,53 \cdot 10^{-3}$	$2,37 \cdot 10^{-2}$	$2,05 \cdot 10^{-2}$	$1,68 \cdot 10^{-2}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$
$7,67 \cdot 10^{-4}$	$5,08 \cdot 10^{-4}$	$5,09 \cdot 10^{-3}$	$8,44 \cdot 10^{-3}$	$2,41 \cdot 10^{-2}$	$2,13 \cdot 10^{-2}$	$1,73 \cdot 10^{-2}$	$1,57 \cdot 10^{-2}$
$8,48 \cdot 10^{-4}$	$4,87 \cdot 10^{-4}$	$4,96 \cdot 10^{-3}$	$8,39 \cdot 10^{-3}$	$2,45 \cdot 10^{-2}$	$2,17 \cdot 10^{-2}$	$1,78 \cdot 10^{-2}$	$1,62 \cdot 10^{-2}$
$9,30 \cdot 10^{-4}$	$4,57 \cdot 10^{-4}$	$4,85 \cdot 10^{-3}$	$8,21 \cdot 10^{-3}$	$2,43 \cdot 10^{-2}$	$2,15 \cdot 10^{-2}$	$1,83 \cdot 10^{-2}$	$1,63 \cdot 10^{-2}$
$1,25 \cdot 10^{-3}$	$3,86 \cdot 10^{-4}$	$4,52 \cdot 10^{-3}$	$8,09 \cdot 10^{-3}$	$2,47 \cdot 10^{-2}$	$2,25 \cdot 10^{-2}$	$1,92 \cdot 10^{-2}$	$1,66 \cdot 10^{-2}$
$2,13 \cdot 10^{-3}$	$2,79 \cdot 10^{-4}$	$3,96 \cdot 10^{-3}$	$7,94 \cdot 10^{-3}$	$2,49 \cdot 10^{-2}$	$2,27 \cdot 10^{-2}$	$1,95 \cdot 10^{-2}$	$1,65 \cdot 10^{-2}$
$3,02 \cdot 10^{-3}$	$2,33 \cdot 10^{-4}$	$3,63 \cdot 10^{-3}$	$7,46 \cdot 10^{-3}$	$2,51 \cdot 10^{-2}$	$2,33 \cdot 10^{-2}$	$1,97 \cdot 10^{-2}$	$1,71 \cdot 10^{-2}$
$3,90 \cdot 10^{-3}$	$1,96 \cdot 10^{-4}$	$3,42 \cdot 10^{-3}$	$7,15 \cdot 10^{-3}$	$2,55 \cdot 10^{-2}$	$2,35 \cdot 10^{-2}$	$1,98 \cdot 10^{-2}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$
$4,79 \cdot 10^{-3}$	$1,82 \cdot 10^{-4}$	$3,23 \cdot 10^{-3}$	$6,93 \cdot 10^{-3}$	$2,58 \cdot 10^{-2}$	$2,37 \cdot 10^{-2}$	$2,07 \cdot 10^{-2}$	$1,78 \cdot 10^{-2}$
$5,67 \cdot 10^{-3}$	$1,59 \cdot 10^{-4}$	$3,10 \cdot 10^{-3}$	$6,72 \cdot 10^{-3}$	$2,55 \cdot 10^{-2}$	$2,42 \cdot 10^{-2}$	$2,08 \cdot 10^{-2}$	$1,83 \cdot 10^{-2}$
$6,55 \cdot 10^{-3}$	$1,51 \cdot 10^{-4}$	$2,98 \cdot 10^{-3}$	$6,64 \cdot 10^{-3}$	$2,53 \cdot 10^{-2}$	$2,45 \cdot 10^{-2}$	$2,11 \cdot 10^{-2}$	$1,87 \cdot 10^{-2}$
$7,44 \cdot 10^{-3}$	$1,52 \cdot 10^{-4}$	$2,89 \cdot 10^{-3}$	$6,50 \cdot 10^{-3}$	$2,54 \cdot 10^{-2}$	$2,53 \cdot 10^{-2}$	$2,13 \cdot 10^{-2}$	$1,89 \cdot 10^{-2}$
$8,32 \cdot 10^{-3}$	$1,42 \cdot 10^{-4}$	$2,81 \cdot 10^{-3}$	$6,42 \cdot 10^{-3}$	$2,46 \cdot 10^{-2}$	$2,54 \cdot 10^{-2}$	$2,17 \cdot 10^{-2}$	$1,92 \cdot 10^{-2}$
$9,21 \cdot 10^{-3}$	$1,61 \cdot 10^{-4}$	$2,73 \cdot 10^{-3}$	$6,21 \cdot 10^{-3}$	$2,43 \cdot 10^{-2}$	$2,55 \cdot 10^{-2}$	$2,15 \cdot 10^{-2}$	$1,94 \cdot 10^{-2}$
$1,65 \cdot 10^{-2}$	$9,27 \cdot 10^{-5}$	$2,33 \cdot 10^{-3}$	$6,16 \cdot 10^{-3}$	$2,37 \cdot 10^{-2}$	$2,57 \cdot 10^{-2}$	$2,17 \cdot 10^{-2}$	$1,96 \cdot 10^{-2}$
$2,46 \cdot 10^{-2}$	$8,43 \cdot 10^{-5}$	$1,08 \cdot 10^{-3}$	$6,06 \cdot 10^{-3}$	$2,39 \cdot 10^{-2}$	$2,56 \cdot 10^{-2}$	$2,18 \cdot 10^{-2}$	$2,01 \cdot 10^{-2}$
$3,26 \cdot 10^{-2}$	$7,12 \cdot 10^{-5}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$5,93 \cdot 10^{-3}$	$2,35 \cdot 10^{-2}$	$2,53 \cdot 10^{-2}$	$2,19 \cdot 10^{-2}$	$2,09 \cdot 10^{-2}$
$4,07 \cdot 10^{-2}$	$7,84 \cdot 10^{-5}$	$9,80 \cdot 10^{-4}$	$5,71 \cdot 10^{-3}$	$2,27 \cdot 10^{-2}$	$2,58 \cdot 10^{-2}$	$2,21 \cdot 10^{-2}$	$2,11 \cdot 10^{-2}$
$4,88 \cdot 10^{-2}$	$7,08 \cdot 10^{-5}$	$9,26 \cdot 10^{-4}$	$5,59 \cdot 10^{-3}$	$2,23 \cdot 10^{-2}$	$2,52 \cdot 10^{-2}$	$2,24 \cdot 10^{-2}$	$2,14 \cdot 10^{-2}$
$5,69 \cdot 10^{-2}$	$6,46 \cdot 10^{-5}$	$8,56 \cdot 10^{-4}$	$5,48 \cdot 10^{-3}$	$2,17 \cdot 10^{-2}$	$2,47 \cdot 10^{-2}$	$2,26 \cdot 10^{-2}$	$2,16 \cdot 10^{-2}$
$6,49 \cdot 10^{-2}$	$5,07 \cdot 10^{-5}$	$7,82 \cdot 10^{-4}$	$5,36 \cdot 10^{-3}$	$2,18 \cdot 10^{-2}$	$2,38 \cdot 10^{-2}$	$2,32 \cdot 10^{-2}$	$2,22 \cdot 10^{-2}$
$7,30 \cdot 10^{-2}$	$4,29 \cdot 10^{-5}$	$7,46 \cdot 10^{-4}$	$5,12 \cdot 10^{-3}$	$2,15 \cdot 10^{-2}$	$2,27 \cdot 10^{-2}$	$2,34 \cdot 10^{-2}$	$2,24 \cdot 10^{-2}$

$8,11 \cdot 10^{-2}$	$4,09 \cdot 10^{-5}$	$6,14 \cdot 10^{-4}$	$4,94 \cdot 10^{-3}$	$2,13 \cdot 10^{-2}$	$2,22 \cdot 10^{-2}$	$2,35 \cdot 10^{-2}$	$2,25 \cdot 10^{-2}$
$8,91 \cdot 10^{-2}$	$3,44 \cdot 10^{-5}$	$5,35 \cdot 10^{-4}$	$4,69 \cdot 10^{-3}$	$2,09 \cdot 10^{-2}$	$2,18 \cdot 10^{-2}$	$2,38 \cdot 10^{-2}$	$2,27 \cdot 10^{-2}$
$1,00 \cdot 10^{-1}$	$2,70 \cdot 10^{-4}$	$4,12 \cdot 10^{-4}$	$4,54 \cdot 10^{-3}$	$2,24 \cdot 10^{-2}$	$2,16 \cdot 10^{-2}$	$2,42 \cdot 10^{-2}$	$2,32 \cdot 10^{-2}$
$1,93 \cdot 10^{-1}$	$2,60 \cdot 10^{-4}$	$3,27 \cdot 10^{-4}$	$3,89 \cdot 10^{-3}$	$2,10 \cdot 10^{-2}$	$2,14 \cdot 10^{-2}$	$2,45 \cdot 10^{-2}$	$2,35 \cdot 10^{-2}$
$2,86 \cdot 10^{-1}$	$2,53 \cdot 10^{-4}$	$3,04 \cdot 10^{-4}$	$3,75 \cdot 10^{-3}$	$1,93 \cdot 10^{-2}$	$2,06 \cdot 10^{-2}$	$2,47 \cdot 10^{-2}$	$2,37 \cdot 10^{-2}$
$3,78 \cdot 10^{-1}$	$2,52 \cdot 10^{-4}$	$2,73 \cdot 10^{-4}$	$3,61 \cdot 10^{-3}$	$1,82 \cdot 10^{-2}$	$1,98 \cdot 10^{-2}$	$2,36 \cdot 10^{-2}$	$2,38 \cdot 10^{-2}$
$4,71 \cdot 10^{-1}$	$1,81 \cdot 10^{-4}$	$2,66 \cdot 10^{-4}$	$3,63 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$1,95 \cdot 10^{-2}$	$2,25 \cdot 10^{-2}$	$2,44 \cdot 10^{-2}$
$5,64 \cdot 10^{-1}$	$1,39 \cdot 10^{-4}$	$2,58 \cdot 10^{-4}$	$3,46 \cdot 10^{-3}$	$1,56 \cdot 10^{-2}$	$1,86 \cdot 10^{-2}$	$2,23 \cdot 10^{-2}$	$2,45 \cdot 10^{-2}$
$6,57 \cdot 10^{-1}$	$9,29 \cdot 10^{-5}$	$2,51 \cdot 10^{-4}$	$3,29 \cdot 10^{-3}$	$1,39 \cdot 10^{-2}$	$1,69 \cdot 10^{-2}$	$2,19 \cdot 10^{-2}$	$2,48 \cdot 10^{-2}$
$7,49 \cdot 10^{-1}$	$9,48 \cdot 10^{-5}$	$1,91 \cdot 10^{-4}$	$2,88 \cdot 10^{-3}$	$1,28 \cdot 10^{-2}$	$1,58 \cdot 10^{-2}$	$2,08 \cdot 10^{-2}$	$2,47 \cdot 10^{-2}$
$8,42 \cdot 10^{-1}$	$9,05 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$	$1,95 \cdot 10^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$1,43 \cdot 10^{-2}$	$1,93 \cdot 10^{-2}$	$2,46 \cdot 10^{-2}$
$9,35 \cdot 10^{-1}$	$8,88 \cdot 10^{-5}$	$9,48 \cdot 10^{-5}$	$1,78 \cdot 10^{-3}$	$8,81 \cdot 10^{-3}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$2,45 \cdot 10^{-2}$
$1,02 \cdot 10^0$	$7,41 \cdot 10^{-5}$	$9,05 \cdot 10^{-5}$	$1,44 \cdot 10^{-3}$	$7,41 \cdot 10^{-3}$	$1,24 \cdot 10^{-2}$	$1,56 \cdot 10^{-2}$	$2,44 \cdot 10^{-2}$
$2,02 \cdot 10^0$	$6,41 \cdot 10^{-5}$	$8,88 \cdot 10^{-5}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$6,32 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-2}$	$1,47 \cdot 10^{-2}$	$2,37 \cdot 10^{-2}$
$3,02 \cdot 10^0$	$4,45 \cdot 10^{-5}$	$7,41 \cdot 10^{-5}$	$9,86 \cdot 10^{-4}$	$5,45 \cdot 10^{-3}$	$9,05 \cdot 10^{-3}$	$1,38 \cdot 10^{-2}$	$2,31 \cdot 10^{-2}$
$4,01 \cdot 10^0$	$4,45 \cdot 10^{-5}$	$6,41 \cdot 10^{-5}$	$9,55 \cdot 10^{-4}$	$4,59 \cdot 10^{-3}$	$5,91 \cdot 10^{-3}$	$1,21 \cdot 10^{-2}$	$2,24 \cdot 10^{-2}$
$5,01 \cdot 10^0$	$3,57 \cdot 10^{-5}$	$4,68 \cdot 10^{-5}$	$9,33 \cdot 10^{-4}$	$3,57 \cdot 10^{-3}$	$5,72 \cdot 10^{-3}$	$1,19 \cdot 10^{-2}$	$1,89 \cdot 10^{-2}$
$6,01 \cdot 10^0$	$2,24 \cdot 10^{-5}$	$4,44 \cdot 10^{-5}$	$8,73 \cdot 10^{-4}$	$2,24 \cdot 10^{-3}$	$4,45 \cdot 10^{-3}$	$9,9 \cdot 10^{-3}$	$1,39 \cdot 10^{-2}$
$7,01 \cdot 10^0$	$8,37 \cdot 10^{-6}$	$3,53 \cdot 10^{-5}$	$7,37 \cdot 10^{-4}$	$1,37 \cdot 10^{-3}$	$3,75 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-3}$
$8,01 \cdot 10^0$	$7,83 \cdot 10^{-6}$	$2,29 \cdot 10^{-5}$	$6,83 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$2,23 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-3}$
$9,00 \cdot 10^0$	$7,39 \cdot 10^{-6}$	$9,57 \cdot 10^{-6}$	$5,71 \cdot 10^{-4}$	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$2,11 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$
$1,00 \cdot 10^{+1}$	$6,01 \cdot 10^{-6}$	$8,63 \cdot 10^{-6}$	$5,03 \cdot 10^{-4}$	$9,71 \cdot 10^{-4}$	$1,57 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$
$1,01 \cdot 10^{+1}$	$5,39 \cdot 10^{-6}$	$7,73 \cdot 10^{-6}$	$4,89 \cdot 10^{-4}$	$8,81 \cdot 10^{-4}$	$1,43 \cdot 10^{-3}$	$3,43 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$
$1,12 \cdot 10^{+1}$	$4,69 \cdot 10^{-6}$	$6,62 \cdot 10^{-6}$	$4,69 \cdot 10^{-4}$	$7,69 \cdot 10^{-4}$	$1,13 \cdot 10^{-3}$	$3,13 \cdot 10^{-3}$	$3,62 \cdot 10^{-3}$
$1,23 \cdot 10^{+1}$	$3,80 \cdot 10^{-6}$	$6,79 \cdot 10^{-6}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$6,09 \cdot 10^{-4}$	$9,79 \cdot 10^{-4}$	$2,67 \cdot 10^{-3}$	$2,91 \cdot 10^{-3}$
$1,34 \cdot 10^{+1}$	$3,68 \cdot 10^{-6}$	$6,06 \cdot 10^{-6}$	$2,53 \cdot 10^{-4}$	$5,68 \cdot 10^{-4}$	$8,48 \cdot 10^{-4}$	$1,68 \cdot 10^{-3}$	$2,57 \cdot 10^{-3}$
$1,45 \cdot 10^{+1}$	$3,51 \cdot 10^{-6}$	$5,88 \cdot 10^{-6}$	$1,51 \cdot 10^{-4}$	$4,51 \cdot 10^{-4}$	$7,31 \cdot 10^{-4}$	$9,76 \cdot 10^{-4}$	$1,54 \cdot 10^{-3}$
$1,56 \cdot 10^{+1}$	$2,92 \cdot 10^{-6}$	$5,22 \cdot 10^{-6}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$	$3,92 \cdot 10^{-4}$	$6,24 \cdot 10^{-4}$	$8,17 \cdot 10^{-4}$	$9,44 \cdot 10^{-4}$
$1,67 \cdot 10^{+1}$	$2,25 \cdot 10^{-6}$	$4,74 \cdot 10^{-6}$	$9,75 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$4,25 \cdot 10^{-4}$	$7,17 \cdot 10^{-4}$	$8,58 \cdot 10^{-4}$
$1,78 \cdot 10^{+1}$	$2,31 \cdot 10^{-6}$	$4,81 \cdot 10^{-6}$	$9,31 \cdot 10^{-4}$	$9,91 \cdot 10^{-5}$	$8,73 \cdot 10^{-5}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$	$7,18 \cdot 10^{-5}$
$1,89 \cdot 10^{+1}$	$2,26 \cdot 10^{-6}$	$3,85 \cdot 10^{-6}$	$8,94 \cdot 10^{-5}$	$8,28 \cdot 10^{-5}$	$8,82 \cdot 10^{-5}$	$5,12 \cdot 10^{-5}$	$5,12 \cdot 10^{-5}$
$2,00 \cdot 10^{+1}$	$1,06 \cdot 10^{-6}$	$2,12 \cdot 10^{-6}$	$7,86 \cdot 10^{-5}$	$7,80 \cdot 10^{-5}$	$6,32 \cdot 10^{-5}$	$5,33 \cdot 10^{-5}$	$5,33 \cdot 10^{-5}$



## REFERÊNCIAS

ALEVRA, A.V. **Neutron spectrometry**. Radioprotection. v 34. p 305 – 333. 1999.

ATTIX, F.H. Neutron interactions and dosimetry. **In: Introduction to radiological physics and radiation dosimetry**. John Wiley & Sons. 2<sup>nd</sup> Edition. 2004.

BAKALI, M. **Espectrometria neutrônica em las centrales nucleares mediante um sistema de esferas de Bonner**. Tese de Doutorado. Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). 2001.

BECKURTS, K.H.; WIRTZ, K. **Neutron physics**. E.U.A. Springer-Verlag. New York Inc. 1964.

BRAMBLETT, R.L.; EWING, R.I.; BONNER, T.W. **A new type of neutron spectrometer**. Nuclear Instruments and Methods. v 9. p 1 – 12. 1960.

BYRNE, J. The neutron as an elementary particle. **In: Neutrons, nuclei and matter. An exploration of the physics of slow neutrons**. U.K. Institute of Physics Publishing, cap 1. p 1-51. 1994.

CASALI, F.; CHIRCO, P. ZANARINI, M. **Advanced imaging techniques: a new deal for neutron physics**. Rivista del Nouvo Cimento della Società Italiana di Fisica. v 18. n 10. 1995.

CHADWICK, J. **The existence of a neutron**. Proc. Roy. Soc. Lond. A, v 136. p 692 – 708. 1935.

CONSTANTI, F.J. **Introdução à física Moderna**. Rio de Janeiro. Editora Campus/EFEI. 1981.

CURTISS, L.F. **An introduction to neutron physics**. D. Van Nostrand – Princeton. 1959.

EISBERG, R.M. O núcleo. In: **Fundamentos da Física Moderna**. Rio de Janeiro. Guanabara Dois, 1ª Edição, cap 16, p 507 – 638. 1979.

GLASSTONE, S.; SESONSKE, A. Nuclear reactions and radiations. In: **Nuclear reactor engineering. Reactor design basics**. 4<sup>th</sup> edition. Chapman & Hall Inc. 1994.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Neutron monitoring for radiological protection**. Technical Reports Series n°252. Vienna. 1985.

KNOLL, G.F. **Radiation detection and measurement**. John Wiley & Sons. 3<sup>rd</sup> Edition. 2000.

PEURRUNG, A.J. **Recent developments in neutron detection**. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research – A. vol 443. p 400 – 415. 2000.