



COPPE/UFRJ

DESDOBRAMENTO DE ESPECTROS DE NÊUTRONS UTILIZANDO O MÉTODO
DE MONTE CARLO E REDES NEURAIAS

Roberto Mendonça de Lemos Júnior

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Rio de Janeiro
Março de 2009

DESDOBRAMENTO DE ESPECTROS DE NÊUTRONS UTILIZANDO O MÉTODO
DE MONTE CARLO E REDES NEURAIAS

Roberto Mendonça de Lemos Júnior

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Aprovada por:

Prof. Ademir Xavier da Silva, D.Sc.

Prof. Jose Antonio Carlos Canedo Medeiros, D.Sc.

Dr. Walsan Wagner Pereira, D.Sc.

Dr. Alessandro Facure Neves de Salles Soares, D.Sc.

Dr. Akira Iwahara, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
MARÇO DE 2009

Lemos Júnior, Roberto Mendonça de

Desdobramento de Espectros de Nêutrons Utilizando o Método de Monte Carlo e Redes Neurais/ Roberto Mendonça de Lemos Júnior. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XIII, 104 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2009.

Referencias Bibliográficas: p. 85-92.

1. Nêutrons. 2. Redes Neurais. 3. Espectrometria. 4. Dosimetria. I. Silva, Ademir Xavier da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

Em especial à Rita, minha companheira incondicional, amiga e grande incentivadora dos meus estudos, pela compreensão nos momentos de ausência em função da dedicação ao meu trabalho.

Agradecimentos

- ✓ Ao Professor Ademir Xavier da Silva, pela orientação acadêmica;
- ✓ Ao Dr. Walsan Wagner Pereira, pela co-orientação, dedicação, apoio incentivo e confiança no meu trabalho;
- ✓ Aos amigos Evaldo, Karla, Letícia, Sandro, Ana Paula, Guilherme, Leonardo, Leandro, Daniel e Luciane do LN-LNMRI/IRD, pelo ajuda e suporte fornecido ao meu trabalho;

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

DESDOBRAMENTO DE ESPECTROS DE NÊUTRONS UTILIZANDO O MÉTODO DE MONTE CARLO E REDES NEURAIAS

Roberto Mendonça de Lemos Júnior

Março/2009

Orientadores: Ademir Xavier da Silva

Programa: Engenharia Nuclear

A proposta do presente trabalho é estabelecer uma técnica para desdobramento de espectros de nêutrons com o Espectrômetro de Bonner e um detector cintilador de ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$, utilizando-se o Código de transporte de radiação MCNP aliado ao uso de metodologias clássicas de deconvolução por métodos iterativo e estocástico.

O Código MCNP foi empregado para o desenvolvimento de uma nova matriz resposta para campos de nêutrons e para simulação da resposta do Espectrômetro de Bonner com o detector de ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ em espectros de nêutrons de referência (${}^{241}\text{AmBe}$, ${}^{252}\text{Cf}$ e ${}^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$), publicados na Norma ISO8529-1 (2001). A matriz resposta ROB3 desenvolvida foi validada através do Código de desdobramento BUNKI que utiliza o método iterativo baseado no princípio da teoria da informação.

Um programa de reconhecimento de padrões NEURALN, desenvolvido no Laboratório de Nêutrons (LN/LNMRI-IRD), que aplica a metodologia de redes neurais para a deconvolução de espectros, foi utilizado em um processo de treinamento e teste para um conjunto de entradas que formam vetores de características correspondentes à resposta do Espectrômetro de Bonner. Estas respostas representam saídas conhecidas no treinamento e teste. O programa NEURALN também foi utilizado para identificação de espectros de nêutrons, bem como o cálculo do equivalente de dose ambiente. Isto foi possível com o emprego de uma base de dados para treinamento e teste, com informações de 286 pares de entrada e saída referentes à matriz resposta calculada, aos espectros de nêutrons publicados no TRS (2001) e, na Norma ISO8529-1 (2001).

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

NEUTRON SPECTRA UNFOLDING USING MONTE CARLO METHOD AND
ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Roberto Mendonça de Lemos Júnior

March/2009

Advisor: Ademir Xavier da Silva

Department: Nuclear Engineering

The purpose of this work is to establish a technique for neutron spectra unfolding with the Bonner Spectrometer and a ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ scintillator detector, using the radiation transport code MCNP associated with the use of classical unfolding process by iterative and stochastic methods.

The MCNP code was used for development of a new response matrix for neutrons fields and to simulate the BSS response with ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ detector for reference neutrons fields (${}^{241}\text{AmBe}$, ${}^{252}\text{Cf}$ e ${}^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$) published in the standard ISO8529-1 (2001). The response matrix ROB3 developed was validated by BUNKI unfolding code using iterative method based on information theory principle.

Pattern recognition software called NEURALN, developed at Neutron Laboratory (LN/LNMRI-IRD), implementing the methodology of artificial neural networks for spectra unfolding, was used in a training and test process for a number of entries that are characteristic vectors corresponding to Bonner Spectrometer response. The NEURALN software was also used for neutron spectra identification and ambient dose equivalent calculation. This was possible by using a database for training and testing with informations about 286 pairs of input and output relating to calculated response matrix, to neutron spectra published in TRS (2001) and the standard ISO8529-1 (2001).

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	x
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 Relevância	1
1.2 Objetivo	1
1.3 Espectrometria em Nêutrons	4
1.3.1 Espectrometria por Núcleo de Recuo.....	5
1.3.2 Espectrometria com Base nas Reações Nucleares Produzidas por Nêutrons....	6
1.3.3 Espectrometria com Base na Medida da Radioatividade.....	6
1.3.4 Espectrometria com Base na Medida da Velocidade do Nêutron.....	7
1.3.5 Espectrometria por Método de Multiesferas.....	7
1.4 Redes Neurais Aplicadas na Área Nuclear.....	8
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS	12
2.1 O Espectrômetro de Bonner.....	12
2.1.1 Matriz Resposta.....	13
2.1.2 Método de Desdobramento do Espectro de Nêutrons.....	15
2.2 Código Monte Carlo MCNP.....	15
2.3 Redes Neurais.....	16
2.3.1 Introdução.....	16
2.3.2 O Neurônio Biológico.....	17
2.3.3 O Neurônio Artificial.....	18
2.3.4 Funções de Ativação.....	20
2.3.5 Aprendizado.....	21
2.3.5.1 Aprendizado Supervisionado.....	22
2.3.5.2 Correção de Erros.....	23
2.3.5.3 Aprendizado Não Supervisionado.....	24
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA.....	26
3.1 Cálculo da Matriz Resposta.....	26
3.2 Implementação do Programa BUNKI.....	29
3.3 Simulação do EB em Campos de Referência.....	30
3.4 Modelo Matemático de Rede Neural.....	32
3.4.1 Segmentação dos Dados e Algoritmo de Treinamento e Teste.....	35
3.4.2 Reconhecimento de Espectro	40

3.5 Cálculo da Energia Média	41
3.6 Modelo de Incerteza dos Resultados da RN.....	41
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1 A Matriz Resposta.....	43
4.2 A Validação da Matriz Resposta ROB3.....	46
4.3 A Simulação da Resposta do EB.....	53
4.4 O Treinamento e Teste.....	56
4.4.1 Os Espectros Monoenergético.....	56
4.4.2 Os Espectros Polienergéticos.....	65
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	81
5.1 Aspectos Gerais do Trabalho	81
5.2 Simulação da Matriz Resposta	81
5.3 Inclusão da Matriz ROB3 no Programa BUNKI	82
5.4 Validação da Matriz ROB3 no Programa BUNKI	82
5.5 Segmentação e Base de Treinamento e Teste	82
5.6 Redes Neurais e Espectros Monoenergéticos	83
5.7 Redes Neurais e Espectros Polienergéticos	83
5.8 Recomendações para trabalhos futuros	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXO I – Exemplo de arquivo de entrada do Código MCNP utilizado para obtenção da matriz resposta ROB3 para feixes de nêutrons monoenergéticos	93
ANEXO II – Exemplo de arquivo de entrada do Código MCNP utilizado para simulação da resposta do Espectrômetro de Bonner em alguns campos de referência de ²⁴¹ AmBe, de ²⁵² Cf e de ²⁵² Cf+D ₂ O (Norma ISO, 2001)	96
ANEXO III – Respostas de alguns espectros polienergéticos obtidas no teste da base de dados TRS403E202, para as referências publicadas no compêndio de espectros TRS (2001)	100

Lista de Símbolos e Abreviaturas

ABEN - Associação Brasileira de Energia Nuclear.

AmBeExp - Medições experimentais para o espectro de $^{241}\text{AmBe}$ realizadas no trabalho de Lemos (2004).

AmBeSim - Respostas simuladas para o espectro de $^{241}\text{AmBe}$ obtidas através do Código MCNP.

AmBeTRS - Espectro de $^{241}\text{AmBe}$ de referência (TRS, 2001).

BIPM – Bureau Internacional de Pesos e Medidas.

BOM31G -Algoritmo de desdobramento de espectros de nêutrons do programa BUNKI.

BWR - *Biling water reactor*

Cal_{ij} - Dados de entrada para o algoritmo de treinamento e teste oriundos programa MCNP.

CEA - "*Commissariat à l'Energie Atomique*", France

CERN - *European Organization for Nuclear Research*

Cf+D2OExp - Medições experimentais para o espectro de $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$ realizadas no trabalho de Lemos (2004).

Cf+D2OSim - Respostas simuladas para o espectro de $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$ obtidas através do Código MCNP.

Cf+D2OTRS - Espectro de $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$ de referência (TRS, 2001).

CfExp - Medições experimentais para o espectro de ^{252}Cf realizadas no trabalho de Lemos (2004).

CfSim - Respostas simuladas para o espectro de ^{252}Cf obtidas através do Código MCNP.

CfTRS -Espectro de ^{252}Cf de referência (TRS, 2001).

CONRAD - *Coordinated Network for Radiation Dosimetry*

COPPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia.

CTA - Comando Geral Tecnológico Aeroespaciais

DIF - Diferença percentual.

e(t) - Erro determinado pela diferença da saída desejada pela resposta atual calculada.

EB - Espectrômetro de Bonner

E_{jk} - Dados de saída para o algoritmo de treinamento e teste oriundos trabalho de Lemos (2004) e do programa MCNP.

ENDF/B-VI - Biblioteca de secção de choque do programa MCNP.

EnM - Energia média.

E_p - Energia do próton incidente

ErM - Erro médio

ErQM - Erro quadrático médio

EURADOS - *European Radiation Dosimetry Grup*

eV - Unidade de energia, equivalente a $1,6 \times 10^{-19}$ Joule.

Exp_{ip} - Dados de entrada para o algoritmo de treinamento e teste oriundos trabalho de Lemos (2004).

FLUKA - Código para desdobramento de espectros de nêutrons baseado na técnica de Monte Carlo.

FRUIT - Código para desdobramento de espectros de nêutrons.

GIANT.DAT - Arquivo de dados das matrizes respostas do programa BUNKI.

GRAVEL - Código para desdobramento de espectros de nêutrons.

GRENF - *The GSF realistic neutron fiels facility, Germany*

GRENFb - Espectro obtido por SCHRAUBE et al. (1997), do TRS (2001).

GRENFc - Espectro obtido por SCHRAUBE et al. (1997), do TRS (2001).

GSF - *Research center for environment and health, Germany*

H*(10) - Equivalente de dose ambiente.

h*(10) - Coeficiente de conversão de fluência para equivalente de dose ambiente.

IAEA – *International Atomic Energy Agency*.

Ia_{jk} - Elementos de entrada provenientes do TRS.

ICRP - *International Commission on Radiological Protection*.

IEAv - Instituto de Estudos Avançados.

INAC - *International Nuclear Atlantic Conference*.

INCA - Instituto Nacional do Câncer.

IPSN - *"Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire", France*

IRD - Instituto de Radioproteção e Dosimetria.

Is_{jk} - Elementos de entrada provenientes da Norma ISO8529-1.

ISO – *International Organization for Standardization*.

ISOGUM – Guia para a Expressão da Incerteza de Medição.

LLNL - *Lawrence Livermore National, USA*

LN - Laboratório de Nêutrons do LNMRI/IRD.

$\ln(E/E_0)$ - Variável comumente adotada nas representações gráficas dos espectros de nêutrons denominada de Letargia.

LNMRI - Laboratório Nacional de Metrologia de Radiações Ionizantes do IRD.

LNRTR - Laboratório de Neutronografia em Tempo Real.

LOUHI78 - Código para desdobramento de espectros de nêutrons baseado no método numérico.

MATLAB[®] – Programa computacional interativo voltado para o cálculo numérico.

MAXED - Código para desdobramento de espectros de nêutrons baseado no princípio da entropia máxima.

MCNP – Código de transporte de radiação baseado no método Monte Carlo.

MCP - Modelo de neurônio proposto por MCCULLOCH E PITTS (1943).

MITOM - Código para desdobramento de espectros de nêutrons.

MoXwater - Espectro obtido por NAISMITH e SIEBERT (1997), do TRS (2001).

NEURAL – Programa de Redes Neurais desenvolvido no LN/LNMRI/IRD.

PNL - *Pacific Northwest Laboratory*

PTB - "*Physikalisch Technische Bundesanstalt*" - *National metrology institute providing scientific and technical services, Germany*

PuBePE1m - Espectro de ²³⁹PuBe (medições do CERN) moderado com polietileno (TRS, 2001).

PWR - *Pressurized water reactor*

RBPD - Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento.

RN - Redes Neurais.

ROB3 - Matriz Resposta para nêutrons (de energia até 20 MeV) desenvolvida neste trabalho.

ROB3E84 - Base de dados para RN com 84 espectros monoenergéticos

SAN4 - Matriz resposta do programa BUNKI.

SILENE - Reator nuclear do IPSN/CEA

SPUNIT - Algoritmo de desdobramento de espectros de nêutrons do programa BUNKI.

TEXTOR - *Tokamak Experiment for Technology Orientated Research of the Institute for Plasma Physics, Germany*

TRS – *Technical Reports Series*.

TRS403E202 - Base de dados para RN com 202 espectros polienergéticos

TRS403E286 - Base de dados para RN com 286 espectros polienergéticos

$u(EnM)$ - Incerteza da Energia Média.

$u(H^*(10))$ - Incerteza do equivalente de dose ambiente.

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

UMG - Código para desdobramento de espectros de nêutrons.

USA - *United States of America*

UTA4 - Matriz resposta do programa BUNKI.

UTR-KINKI - Reator nuclear da Universidade de KINKI em Osaka, Japão.

VCR_H - Valor calculado do H*(10) pela RN.

VVC_H - Valor verdadeiro convencional do H*(10) fornecido da RN.

α_{ij} - Representação da matriz resposta ROB3.

$\Phi(k)$ - Fluência de nêutrons para k intervalo de energia.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Relevância

O Laboratório de Nêutrons, criado em 1973, é um dos laboratórios de pesquisa do Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI) do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD). O Laboratório de Nêutrons é o laboratório de referência na área de metrologia de nêutrons, sendo responsável, pela guarda e manutenção do Padrão Brasileiro de Fluência de Nêutrons, e pela realização da grandeza fluência de nêutrons. No desempenho de sua missão institucional, desenvolvem pesquisas nas áreas de metrologia e dosimetria de nêutrons, promovendo também a disseminação da grandeza fluência para os instrumentos de medidas de nêutrons utilizados por indústrias, centros de pesquisa e universidades em âmbito nacional e internacional, assegurando-lhes rastreabilidade e, conseqüentemente, confiabilidade das medições.

Como responsável pela metrologia de nêutrons no país, o laboratório de nêutrons necessita de alguma forma conhecer os espectros de nêutrons para ser capaz de quantificar as grandezas operacionais de radioproteção. Um caminho rápido e mais fácil para isto, é utilizar um sistema de espectrometria em nêutrons, constituído de esferas moderadoras de polietileno de alta densidade, chamado de Espectrômetro de Multiesferas de Bonner.

1.2 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é propor uma técnica para desdobramento de espectros de nêutrons utilizando-se o Espectrômetro de Multiesferas de Bonner com um detector de ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$. Isto foi alcançado com a utilização de duas ferramentas computacionais: o código de transporte de radiação MCNP, baseado no método de Monte Carlo (BRIESMEISTER, 2000), e um programa desenvolvido no Laboratório de Nêutrons do Instituto de Radioproteção e Dosimetria – LN/IRD, chamado de

NEURALN para reconhecimento de padrões, baseado em redes neurais. Este programa se originou no trabalho de PEREIRA (1999) para reconhecimento de caracteres.

O Código MCNP foi empregado para o desenvolvimento de uma nova matriz resposta para campos de nêutrons, e para simulação do Espectrômetro de Multiesferas de Bonner com o detector de ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ e dos espectros de nêutrons de referência, do tipo: ${}^{241}\text{AmBe}$, ${}^{241}\text{AmB}$, ${}^{252}\text{Cf}$ e ${}^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$ publicados na Norma ISO8529-1 (2001). O programa NEURALN foi utilizado para o treinamento e teste da rede neural e para reconhecimento de espectros. Esta ação foi possível inserindo no programa uma base de dados com informações referentes: à matriz resposta calculada, à simulação do Espectrômetro de Multiesferas de Bonner, e alguns espectros e dados de referência encontrados na literatura (TRS, 2001, LEMOS, 2004). Uma vez, a rede treinada e testada, tornou-se capaz de realizar a dosimetria e a espectrometria e em nêutrons, e identificar o espectro medido. A Figura 1.1 apresenta um diagrama de bloco mostrando cada etapa de todo o desenvolvimento do trabalho realizado.

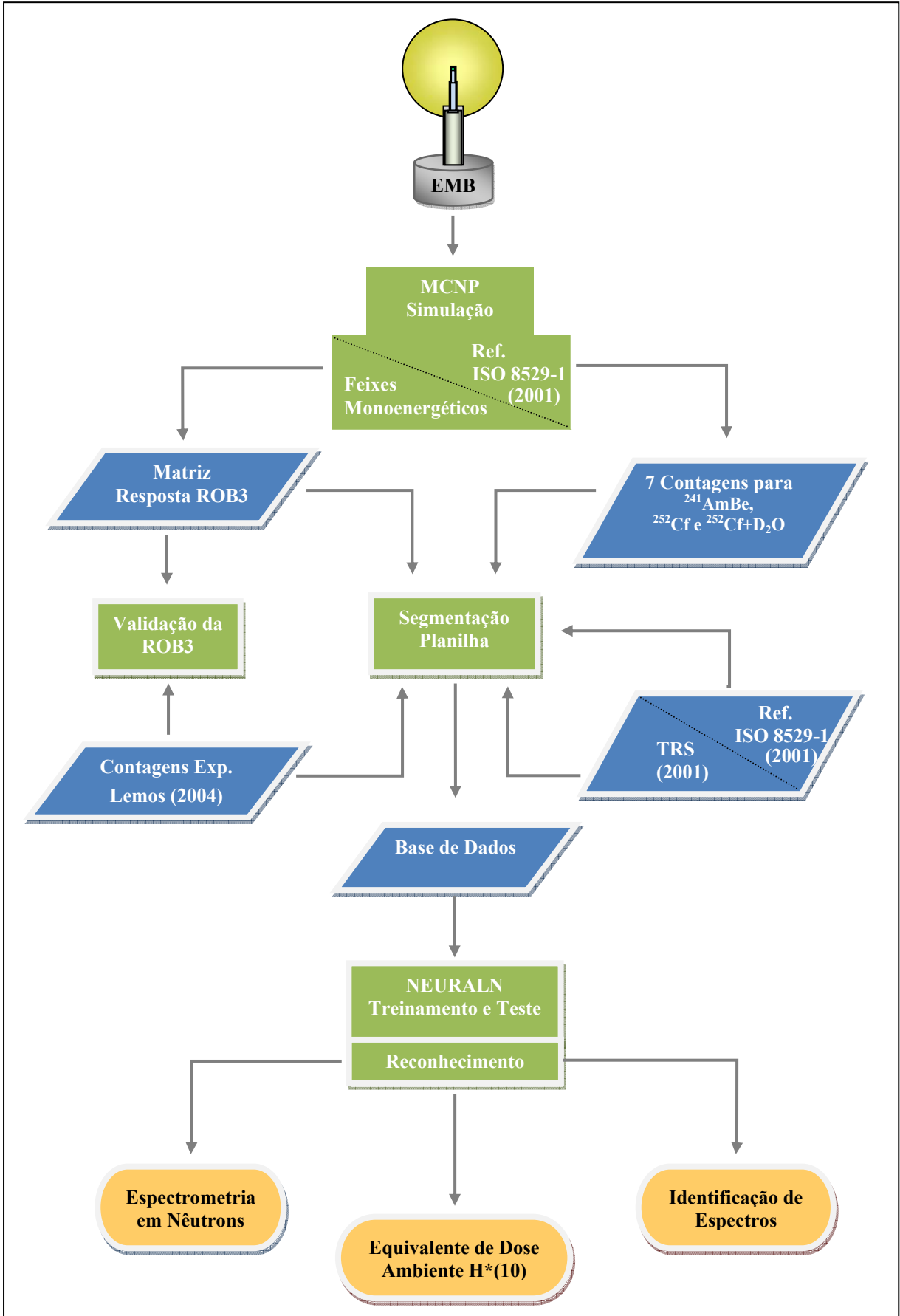


Figura 1.1. Resumo do desenvolvimento do trabalho.

1.3 Espectrometria em Nêutrons

A espectrometria em nêutrons tem contribuído muito para o desenvolvimento da física nuclear desde 1932 e tem também se tornado uma importante ferramenta em vários outros campos, notavelmente em tecnologia nuclear (KRASILNIKOV *et al.*, 1997), diagnóstico por fusão de plasma (ZIMBAL *et al.*, 2004), radioterapia e proteção radiológica (FERNÁNDEZ, 2002).

Os métodos de espectrometria em nêutrons podem ser classificados dentro de sete grupos baseados no princípio de detecção ou medição da energia do nêutron (BROOKS, KLEIN, 2002, THOMAS, KLEIN, 2003).:

1. Métodos em que o nêutron é espalhado e a energia de um núcleo de recuo é medida;
2. Métodos baseados em medições da energia das partículas carregadas, liberadas em reações nucleares induzidas por nêutrons;
3. Métodos em que a velocidade do nêutron é medida;
4. Métodos em que um mínimo de energia do nêutron é indicado pelo surgimento de um efeito induzido por nêutrons, como uma energia específica do raio gama ou uma transição de fase;
5. Métodos em que a distribuição da energia do nêutron é determinada pelo desdobramento de um conjunto de leituras de detectores (geometria de detectores) que diferem na dependência energética de suas respostas aos nêutrons;
6. Métodos baseados em difração de nêutrons; e
7. Métodos em que o tempo de distribuição da moderação de um pulso de alta energia do nêutron em um meio apropriado é medido.

Três fases podem ser identificadas na evolução da espectrometria de nêutrons: de 1932 a 1959, de 1960 a 1979, e de 1980 até o momento. Muitos dos espectrômetros utilizados hoje são baseados em métodos que foram introduzidos antes de 1960: câmaras de ionização e contadores proporcionais (FERGUSON, 1960), emulsões nucleares (WHITE, 1960), cintiladores orgânicos (SWARTZ and OWEN, 1960) entre outros estão em uso até hoje. Espectrômetros de nêutrons baseados em medições de energia dos produtos das reações carregadas incluem o espectrômetro de contador

proporcional ^3He (BATCHELOR and MORRISON, 1960) e o cristal cintilador $^6\text{LiI}(\text{Eu})$ (MUEHLHAUSE, 1960).

Notáveis desenvolvimentos, durante a segunda fase de 1960 a 1979, foram a introdução do método das esferas de Bonner (BRAMBLETT *et al.*, 1960) e os avanços feitos na técnica de espectrometria em nêutrons baseados em detectores de ionização a gás (GROSSHOEG, 1979) e nos detectores cintiladores (HARVEY and HILL, 1979). Um importante desenvolvimento associado foi o avanço dos métodos de desdobramento computacionais para a determinação do espectro de nêutrons de medições de poucos e muitos canais (VERBINSKI *et al.*, 1968). Outros notáveis desenvolvimentos durante este período foram as primeiras aplicações de detectores semicondutores na espectrometria em nêutrons (DEARNALEY, 1963) e a introdução de detectores de bolhas superaquecidos (APFEL, 1979).

A terceira fase (posterior a 1979) também trouxe progressos tecnológicos consideráveis, mas provavelmente será lembrada mais pelo impacto dos computadores na espectrometria em nêutrons. Em particular, espectrometria em nêutrons tem sido aperfeiçoada como um resultado de abrangentes métodos de cálculo como, por exemplo, o desenvolvimento da função resposta mais apropriada ou o cálculo da eficiência de detecção de nêutrons dos diversos sistemas de detectores pela simulação com Monte Carlo; um outro exemplo de aperfeiçoamento é o desdobramento do espectro de fluência de nêutrons a partir das leituras do espectrômetro. A matriz resposta representa a resposta do detector como uma função da energia do nêutron incidente. Até os dias de hoje essas matrizes são quase sempre baseadas em resposta calculadas que devem ser avaliadas por medições experimentais, e a qualidade de um espectrômetro de nêutron é diretamente proporcional ao grau em que suas matrizes resposta são conhecidas e entendidas. Existem vários códigos computacionais desenvolvidos para este fim, de modo que ainda não há um que satisfaça plenamente aos diversos grupos de pesquisadores na área de espectrometria em nêutron, tendo em vista o enorme interesse que é constatado por inúmeros trabalhos desenvolvidos até este momento.

1.3.1 Espectrometria por Núcleo de Recuo

A detecção dos núcleos de recuo (em um particular os prótons de recuo) e a medida de sua energia permitem estabelecer o número e a distribuição energética dos nêutrons incidentes que geraram esses núcleos. A determinação do espectro dos nêutrons a partir do espectro dos núcleos de recuo se realiza mediante métodos de deconvolução apropriados. A sensibilidade da técnica está limitada aos nêutrons que têm uma energia suficientemente alta para, indiretamente, ionizar o volume sensível do detector. Entre os espectrômetros baseados nos prótons de recuo têm-se os constituídos por contadores proporcionais a hidrogênio associados com os gases de H₂ e CH₄ ou mistura desses gases que são sensíveis a nêutrons de energia compreendida de 10 keV a poucos MeV (WU *et al.*, 1999). Para energias superiores a 20 MeV utilizam-se cintiladores sólidos ou líquidos (MEIGO *et al.*, 1999).

1.3.2 Espectrometria com Base nas Reações Nucleares Produzidas por Nêutrons

As reações nucleares ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$, ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$, ${}^{12}\text{C}(n,\alpha){}^9\text{Be}$ e ${}^{28}\text{Si}(n,\alpha){}^{25}\text{Mg}$ são as mais utilizadas em espectrometria quando a energia do núcleo é determinada com a medição da energia dos produtos de reações carregadas. A reação ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$ ($Q = 0,764$ MeV) é a utilizada em espectrometria de nêutrons no intervalo de energia de 50 keV a 5 MeV. Entre os instrumentos têm-se nos contadores proporcionais (TAKEDA *et al.*, 1999) e as câmaras de ionização (HAWKES *et al.*, 1993). A reação ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ tem sido muito utilizada em espectrometria à base de cintilação (SEGHOOR, SENS, 1999). No entanto, o uso de espectrômetro à cintilação tem sido limitado devido a sua sensibilidade para raios gama e a contribuição para a função resposta que surge de interações do nêutron com outros constituintes do cintilador. As reações ${}^{12}\text{C}(n,\alpha){}^9\text{Be}$ e ${}^{28}\text{Si}(n,\alpha){}^{25}\text{Mg}$ têm sido utilizadas em espectrometria com cristais semicondutores de diamante e silício, particularmente em aplicações de diagnósticos de plasma.

1.3.3 Espectrometria com Base na Medida da Radioatividade

Os métodos radioativos são utilizados de forma muito importante para medidas de fluência de nêutrons (BAARD, *et al.*, 1989). Alguns desses métodos se baseiam em reações endoenergéticas induzidas por nêutrons. O espectro energético do campo de nêutrons pode ser determinado a partir de comparações das medidas de várias e diferentes atividades induzidas por nêutrons (com diferente limiar de energia) em

determinadas folhas de ativação inseridas no campo. Outros métodos se baseiam na medida da radiação gama ou do elétron de conversão interna produzidos pelo espalhamento inelástico de nêutrons em cristais de germânio (EJIRI, MATSUOKA., 1991). Um detector utilizado em espectrometria limiar é o de bolhas superaquecidas, cujo processo de detecção é bem compreendido e é caracterizado por um limiar de energia que depende do líquido utilizado, da energia do nêutron e da temperatura e pressão do líquido. O espectro de nêutron pode ser medido pela gravação da taxa de produção de bolhas como uma função da temperatura mediante a uma técnica de desdobramento apropriada. (VANHAVERE, D'ERRICO, 2002).

1.3.4 Espectrometria com Base na Medida da Velocidade do Nêutron

Neste método, a energia do nêutron é determinada pelo seu tempo de voo em uma distância conhecida. A menos que a fonte de nêutron seja pulsada, detectores são requeridos para registrar o início e o término do voo do nêutron de duas formas: em uma, o nêutron é espalhado em um primeiro detector, por exemplo em um cintilador orgânico, e o tempo de voo para o segundo detector em uma distância conhecida é medido; no outro, o sinal inicial é sustentado por uma partícula ou quantum associado que é emitido da fonte de nêutron no mesmo tempo que o nêutron. Este método tem sido empregado para determinar o espectro de fissão espontânea do ^{252}Cf e na medida do espectro de nêutrons do JET- Joint European Torus (situado em Culham no United Kingdom, UK) (JARVIS, 2002).

1.3.5 Espectrometria por Método de Multiesferas

O protótipo do sistema de multiesferas como espectrômetro de nêutrons foi introduzido por BRAMBLETT *et al.* em 1960, e logo se tornou conhecido como o Espectrômetro de Multiesferas de Bonner ou, simplesmente, Espectrômetro de Bonner (EB). Este espectrômetro determina o espectro dos nêutrons sobre um amplo intervalo de energia, mas com relativa pobreza na resolução em energia. O espectro dos nêutrons é determinado pelas medições da taxa de contagem no detector para cada uma das geometrias e o desdobramento destas medidas é realizado a partir de uma matriz resposta que será mais detalhada posteriormente. Importantes desenvolvimentos no campo da espectrometria de nêutron foram criticamente revisados no trabalho de

THOMAS e ALEVRA (2002). O Espectrômetro de Multiesferas de Bonner é amplamente utilizado em aplicações na área de proteção radiológica (THOMAS *et al.*, 2007, FERNÁNDEZ *et al.*, 2007, HERBERT *et al.*, 2007, ROBERTS, 2007, BERDOGNI *et al.*, 2007, CARRILLO *et al.*, 2007, MATTHIÄ, 2008, MAZROU *et al.*, 2008).

1.4 Redes Neurais Aplicadas na Área Nuclear

A técnica de redes neurais artificiais é utilizada em diferentes áreas nas mais diversas aplicações. Na área nuclear podemos citar o trabalho de VIGNERON *et al.* (1996) que, já nesta época, construíram uma rede neural que aplicada ao espectro gama do ^{235}U enriquecido produzia uma saída que se aproximava da fração exata de enriquecimento de urânio. A rede foi treinada com 65 espectros, 5 relativos ao espectro de ^{235}U puro e 10 de cada amostra padrão de UO_2 . Os estudos feitos demonstram que a técnica de redes neurais é eficaz na predição do enriquecimento de ^{235}U . Esta abordagem é útil quando se precisa de uma resposta rápida com boa exatidão. Não são feitas hipóteses espectrais e nenhum modelo matemático é adotado a priori. Uma rede neural adequada com conexões e pesos pode ser facilmente implementada usando um computador pessoal ou comercial. Os resultados mostram que este tipo de análise pode ser considerado o método mais apropriado para estimar as concentrações de radionuclídeos em misturas sob condições experimentais bem definidas.

Outra aplicação da técnica de redes neurais, no passado, pode ser encontrada no trabalho de OLMOS *et al.* (1992). Eles utilizaram a técnica de redes neurais na análise de espectro. A rede foi treinada com espectros resultantes da exposição de um detector de $\text{NaI}(\text{Tl})$ aos isótopos de ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{57}Mn , ^{22}Na , ^{109}Cd e mais um padrão adicional de radiação de fundo. Uma vez que a rede foi treinada com os isótopos de referência, foi apresentada a ela um espectro resultante da mistura destes isótopos. A resposta da rede consiste em um conjunto de coeficientes que indicam o número de vezes que um determinado isótopo aparece no espectro desconhecido, ou, a intensidade de detecção de um dado radioisótopo identificado em relação aquele espectro de calibração. Eles concluíram que a técnica de redes neurais pode ser considerada um novo método para analisar e quantificar os isótopos presentes em uma mistura desconhecida, a partir do espectro produzido por espectrômetros de baixa resolução. A

identificação e quantificação dos isótopos existentes exigem, entretanto, que o conjunto de treinamento inclua todos os isótopos que compõem a amostra a ser analisada.

Ainda na área de espectrometria gama, pode-se citar outro trabalho de OLMOS *et al.* (1991). Eles aplicaram a técnica de redes neurais para resolver o problema de identificação de radioisótopos utilizando o espectro de alturas de pulso, calibrado em energia. O método se baseia no fato de que o espectro de uma dada fonte, composta por um conjunto de radioisótopos, tem uma forma bem conhecida descrita pelos picos devidos a cada componente, distribuídos de acordo com sua energia. Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que a técnica de redes neurais pode ser aplicada no problema de análise de espectro de radiação. Isto leva a um novo conceito em espectroscopia nuclear no sentido de que a forma inteira do espectro é considerada e não apenas os picos individuais.

Outro trabalho interessante é o de IGUCHI *et al.* (1995). Este grupo utilizou a técnica de redes neurais em dosimetria em nêutrons usando folhas de ativação. O desempenho da rede foi conferido por meio de análise de dados conhecidos para campos de nêutrons de reatores de fissão, incluindo um estudo da estrutura da rede neural mais adequada para esta aplicação. Os resultados foram também comparados com os obtidos por um método convencional de ajuste de espectro de nêutrons. Eles mostraram que o ajuste efetuado pela técnica de redes neurais tem vantagens em relação aos métodos convencionais tanto na simplicidade computacional quanto na validade da solução obtida.

Outro trabalho mais recente é o da SILVEIRA (2006), cujo objetivo era identificar espectros em energias para campos fotônicos. Neste trabalho, investigou-se a aplicabilidade de uma rede neural de multicamadas como ferramenta de classificação de padrões em energia, associada a um sistema dosimétrico termoluminescente (TLD-700 e TLD-600). A rede desenvolvida se mostrou apropriada, contudo, é necessário que os dados de entrada para a rede sejam bem caracterizados e previamente processados para valorizar as características que possibilitam diferenciar cada padrão energético. Viu-se também, que a rede desenvolvida é mais eficiente no reconhecimento de energias para irradiações em altas doses (100% de acertos para 10 mSv) do que para valores de baixas doses (50% de acertos para 0,5 mSv). Isto se deve ao fato de que quanto maior a dose, menores são as influências sofridas por agentes externos, como ruído, radiação ambiental e flutuação estatística.

Na área de dosimetria em nêutrons há o trabalho de FEHRENBACHER *et al.* (1999), que utilizaram a técnica de redes neurais para determinar o espectro de nêutrons a partir de medidas efetuadas com detectores de silício. Neste trabalho, a função resposta de cada elemento é determinada por um modelo computacional considerando a interação do nêutron com as camadas do dosímetro e o subsequente transporte de íons produzidos. A rede neural é treinada para um conjunto conhecido de espectro de nêutrons para então ser aplicada a contagens obtidas em campos realísticos de nêutrons. As contagens dos detectores foram calculadas para espectros realísticos de nêutrons e normalizadas pelo seu valor máximo. Foram feitas modificações aleatórias dos 91 espectros que compunham o conjunto original para se obter um conjunto suficientemente grande de espectros de treinamento. Três conjuntos foram construídos aplicando-se distribuições Gaussianas em torno do valor médio de fluência por unidade de energia de 50%, 75% e 100%. O conjunto completo, contendo 364 espectros, foi dividido em dois conjuntos, um de treinamento, com 273 espectros e outro de teste, com 91 espectros. A rede foi treinada com o algoritmo de retro-propagação do erro. Os melhores resultados foram obtidos com uma rede contendo 4 camadas de neurônios: 6:16:10:6. Para os 91 espectros utilizados no teste da rede, o desvio encontrado para a maioria dos valores de equivalente de dose ambiente ficou em torno de 20% e no pior caso, em 35%. Foram utilizados 4 espectros realistas para a validação da rede, e apenas para o espectro contendo alta proporção de nêutrons de baixa energia, a rede falhou. Isto ocorreu porque este tipo de espectro teve pouca representatividade nos arquivos de treinamento e teste da rede.

A utilização de redes neurais na área de classificação pode ser vista no artigo de CAO *et al.* (1998). Neste trabalho, o objetivo era determinar a equivalente de dose ambiente em um campo de radiação contendo nêutrons e fótons. Para isto era preciso conhecer o número relativo de nêutrons em relação ao número de fótons e caracterizar a dependência em energia dos nêutrons. As redes conseguiram separar nêutrons e fótons com um erro de aproximadamente 5% para energias tão baixas quanto 100 keV. Os resultados obtidos neste trabalho demonstram a viabilidade de se utilizar a instrumentação comercial combinada com técnicas de inteligência artificial para desenvolver um detector prático que mede o equivalente de dose em um campo misto de radiação com nêutrons e fótons.

Nos Trabalhos de CARRILLO *et al.* (2003, 2005, 2006 e 2007), a tecnologia de redes neurais tem sido utilizada para desdobrar espectros de nêutrons e determinar doses

a partir das taxas de contagens obtidas de um Espectrômetro de Multiesferas de Bonner. No seu trabalho mais recente (CARRILLO *et al.*, 2007) as taxas de contagens foram obtidas do Espectrômetro de Multiesferas de Bonner com o ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$. Para isto, duas redes diferentes foram criadas, a primeira para realizar espectrometria de nêutrons e a segunda para calcular 13 grandezas dosimétricas. Foram utilizados 177 espectros do TRS (2001) para treinamento e teste usando o programa MATLAB[®]. O espectro foi ajustado para 31 intervalos de energia e as grandezas dosimétricas foram calculadas utilizando o código de transporte de radiação MCNP (BRIESMEISTER, 2000) e os coeficientes de conversão do ICRP 74 (1995). Eles concluíram que os seus resultados estão de acordo com os provenientes da literatura, tanto para espectrometria como para dosimetria, mesmo com diferenças na topologia da rede neural e nos dados de treinamento.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 O Espectrômetro de Bonner

O Espectrômetro de Multiesferas de Bonner, ou mais comumente chamado de Espectrômetro de Bonner (EB), é muito utilizado e estudado em diversos laboratórios por ser capaz de obter uma resposta isotrópica do espectro e, principalmente, por contar nêutrons de qualquer faixa de energia, sendo possível contar da energia térmica a GeV. Esse espectrômetro foi sugerido e descrito primeiramente por BRAMBLETT *et al.* (1960), e consiste em um detector de nêutrons térmicos localizado no centro de várias esferas moderadoras de diâmetros diferentes, geralmente construídas de polietileno de alta densidade. Os detectores comumente utilizados no centro das esferas moderadoras são os contadores proporcionais do tipo $^{10}\text{BF}_3$ (DHAIKYAWAN, 1980), ^3He (BROOKS, KLEIN, 2002), e o detector de cintilação $^6\text{LiI}(\text{Eu})$ que foi originalmente utilizado por BRAMBLETT *et al.* (1960), durante seus estudos. Eles utilizaram um cristal com volume sensível de 4 mm de altura por 4 mm de diâmetro com propósito de favorecer a detecção de nêutrons térmicos e minimizar a detecção de radiação gama, já que a interação do nêutron com o volume sensível do detector é um efeito de superfície.

O efeito combinado da moderação e absorção do espectro de nêutrons em uma esfera de polietileno, ou seja, a perda de energia provocada pelos diversos processos de interação, faz com que nêutrons na faixa de energia térmica cheguem no centro da esfera moderadora, onde está localizado o cristal do detector. Deste modo, um conjunto de esferas passa a funcionar como um espectrômetro, já que a maior sensibilidade do volume sensível da maioria dos detectores de nêutrons está nesta faixa de energia. Assim, para cada diâmetro de esfera, os nêutrons incidentes de faixas de energias diferentes são detectados e informações importantes podem ser extraídas, caracterizando o espectro (THOMAS, ALEVRA, 2002).

2.1.1 Matriz Resposta

Para obter informações de um espectro de nêutrons através do EB, deve-se conhecer a resposta de cada esfera em função da energia do nêutron, uma vez que cada esfera se caracteriza como um detector diferente, por ter a capacidade de registrar nêutrons de intervalos de energias diferentes. A resposta para um conjunto de esferas pode ser obtida a partir da solução da equação:

$$A_j = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \alpha_j(E) \Phi_j(E) dE \quad j = 1, 2, \dots, M, \quad (1)$$

onde:

A_j é a contagem do $j^{\text{ésimo}}$ detector;

$\alpha_j(E)$ é a função resposta do $j^{\text{ésimo}}$ detector;

$\Phi_j(E)$ é a fluência de nêutrons do $j^{\text{ésimo}}$ detector; e

M é o número total de detectores.

A Equação 1 é conhecida como integral de Fredholm de primeira ordem. Ela poderia ser resolvida se a função resposta $\alpha_j(E)$ fosse uma função analiticamente conhecida; mas este não é o caso dos sistemas práticos de espectrometria de nêutrons. Obter o espectro de nêutrons a partir das respostas dos detectores é um processo bastante complexo, já que a contagem de cada esfera apresenta um espectro característico devido à diferença no diâmetro entre elas.

Na prática, a Equação 1 é substituída por um conjunto de M equações lineares dividindo o intervalo de energia daquele detector em várias regiões menores, tornando-se constante a resposta e a fluência do detector nesses pequenos intervalos de energia. Portanto, a Equação 1 pode ser escrita da seguinte forma:

$$A_j = \sum_{k=1}^N \alpha_{jk} \Phi_j(k) \quad j = 1, 2, \dots, M, \quad (2)$$

onde:

α_{jk} é a resposta do $j^{\text{ésimo}}$ detector para nêutrons no $k^{\text{ésimo}}$ intervalo de energia; e

N é o número total de intervalos de energia.

Portanto, a função resposta do detector pode ser substituída pela matriz apresentada a seguir:

$$(\alpha_{jk}) = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \cdots & \alpha_{1N} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \cdots & \alpha_{2N} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & \cdots & \alpha_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{M1} & \alpha_{M2} & \alpha_{M3} & \cdots & \alpha_{MN} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Cada linha da matriz representa um detector, ou seja, a medida feita com uma esfera é representada pela linha da matriz, de modo que os nêutrons sejam distribuídos em cada elemento de acordo com sua faixa de energia. Cada coluna nos mostra as contagens referentes a uma pequena faixa de energia para cada detector, conseqüentemente cada elemento representa essa contagem. O conjunto que representa a resposta do detector (α_{jk}) é chamado de matriz resposta. A Figura 2.1 apresenta um gráfico da função resposta para um conjunto de sete detectores (seis esferas e um detector sem moderador) calculado através do código Monte Carlo (BRIESMEISTER, 2000) no trabalho de LEMOS *et al.* (2006), com o objetivo de desenvolver uma nova matriz resposta para o EB.

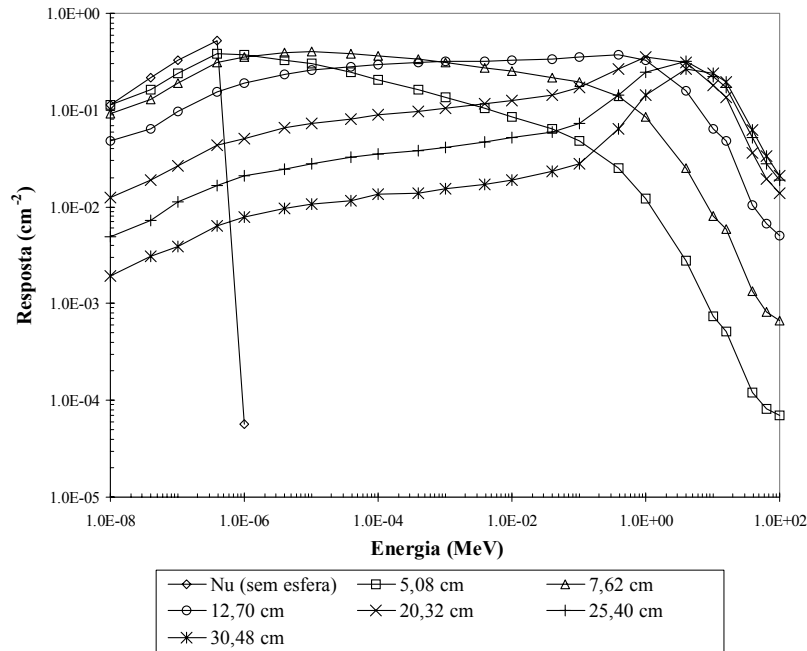


Figura 2.1. Matriz resposta (resposta cm^{-2}) em função da energia (MeV) do nêutron, obtida através do código Monte Carlo MCNP, para o EB (LEMOS *et al.*, 2006).

2.1.2 Método de Desdobramento do Espectro de Nêutrons

O desdobramento de espectro de nêutrons depende diretamente de um algoritmo de função resposta (da matriz resposta). Na literatura, existem vários programas computacionais de desdobramento de espectros, onde estes algoritmos são inseridos. Entre eles estão: o código LOUHI78 desenvolvido por ROUTTI e SANDBERG (1980), que utiliza um método numérico para determinar o espectro; o programa BUNKI desenvolvido por JOHNSON e GORBICS (1981), que obtém o espectro de nêutrons a partir de um método iterativo recursivo baseado no princípio da teoria da informação; o código MAXED desenvolvido por REGINATTO e GOLDHAGEN (2002), que aplica o princípio da entropia máxima para obtenção do espectro; e o FLUKA (BATTISTONI *et al.*, 2007), que surgiu na década de 60 e sofreu várias atualizações por diversos pesquisadores até a versão mais atual FLUKA 2008.3.5 (www.fluka.org). O FLUKA é um código que faz a simulação do espectro utilizando a técnica Monte Carlo. Alguns métodos de desdobramento são baseados em técnicas de inteligência artificial, como os trabalhos de KARDAN *et al.* (2003) e CARRILLO *et al.* (2005), que utilizaram um algoritmo de retropropagação do erro usado para treinamento de redes neurais; e o trabalho de MUKHERJEE (2004), que utilizou uma ferramenta de algoritmo genético na análise de dados de detectores de ativação para desdobrar espectro de nêutrons de altas energias. Além destes códigos, existem vários outros com características específicas para utilização com os diversos detectores de radiação existentes: FRUIT (TRIPATHY *et al.*, 2009), UMG (ROBERTS, 2007), MITOM (TOMÁS *et al.*, 2004), GRAVEL (MATZKE, 1994.) etc.

2.2 Código Monte Carlo MCNP

O código de transporte de radiação (MCNP) é baseado no método Monte Carlo, originalmente desenvolvido para pesquisas na área de armamentos no “Los Alamos National Laboratory”, é considerado no meio científico como uma das ferramentas computacionais mais sofisticadas na área de dosimetria e caracterização de feixes de nêutrons e fótons (BRIESMEISTER, 2000).

O MCNP é um código tridimensional capaz de simular simultaneamente o transporte de nêutrons, fótons e elétrons. O código usa dados de seções de choque para energia contínua e discreta. A abundância de dados de seção de choque é tal que a

interpolação entre pontos resulta numa discrepância inferior a 1% na reprodução dos dados de seções de choque experimentais originais (ZAMENHOF *et al.*, 1996).

Outras características do MCNP, de importância no transporte de partículas são: flexibilidade na elaboração de geometrias, habilidade de calcular reações integrais, seu tratamento de seção de choque contínua, acesso às mais modernas e atualizadas bibliotecas nucleares de seção de choque disponíveis, utilização de uma grande variedade de técnicas de redução de variância e atualização e desenvolvimentos contínuos por uma grande equipe de pesquisadores do “Los Alamos National Laboratory” nos EUA.

2.3 Redes Neurais

2.3.1 Introdução

O final da década de 80 foi marcado pelo ressurgimento da área de Redes Neurais (RN), no campo da Inteligência Artificial. Esta forma de computação é caracterizada por sistemas que, de alguma forma ou maneira, relembram a estrutura do cérebro humano. A computação neural constitui em uma alternativa da computação algorítmica convencional. As RNs são sistemas paralelos distribuídos compostos por unidades de processamento simples (nodos) que computam determinadas funções matemáticas (normalmente não lineares). Tais unidades são dispostas em uma ou mais camadas e interligadas por um grande número de conexões, geralmente, unidirecionais. Na maioria dos modelos estas conexões estão associadas a pesos, os quais armazenam o conhecimento representado no modelo e servem para ponderar a entrada recebida por cada neurônio da rede. O funcionamento desta rede é inspirado em uma estrutura física concebida pela natureza do cérebro humano (KOVÁCS, 2002).

A solução de problemas através das RNs é bastante atrativa. Pois o paralelismo constitui-se na característica principal das RNs, onde esta cria a possibilidade de um desempenho superior em relação à solução de problemas baseados nos modelos convencionais. Em RN, o procedimento usual na solução de problemas passa inicialmente por uma fase de aprendizagem, onde um conjunto de exemplos é apresentado para a rede, que extrai automaticamente as características necessárias para representar a informação fornecida. Essas características são utilizadas posteriormente para gerar respostas para o problema. A capacidade de aprender através de exemplos e

de generalizar a informação aprendida são, os atrativos principais da solução de problemas através das RNs. A generalização está associada à capacidade da rede em aprender através de um conjunto finito de exemplos, e posteriormente, dar respostas coerentes a dados não apresentados a rede. Isto é uma demonstração que a capacidade das RNs vai, além de, simplesmente mapear relações de entrada e saída. As RNs são capazes de extrair informações não-apresentadas de forma explícita através de exemplos. Outras características importantes são a capacidade de auto-organização e processamento temporal que, aliadas a aquela citada anteriormente, fazem das RNs uma ferramenta computacional extremamente poderosa e atrativa para a solução de problemas complexos (KOVÁCS, 2002).

2.3.2 O Neurônio Biológico

As RNs são baseadas na estrutura do cérebro humano e são caracterizadas por sistemas que tentam modelar de forma simplificada os neurônios biológicos contidos na estrutura do cérebro humano.

O neurônio biológico é uma célula que pode ser dividida em três seções: *o corpo da célula, os dendritos e o axônio*, cada uma com funções específicas, porém complementares. O corpo do neurônio mede apenas alguns milésimos de milímetro e os dendritos apresentam poucos milímetros de comprimento. O axônio pode ser mais longo. Os dendritos têm como função receber informações, ou *impulsos nervosos*, oriundos de outros neurônios, e conduzi-los até o corpo celular. Ali, a informação é processada e novos impulsos são gerados. Estes impulsos são transmitidos a outros neurônios (nodos), passando pelo axônio e atingindo os dendritos dos neurônios seguintes. O ponto de contato entre a terminação axônica de um neurônio e o dendrito de outro neurônio é chamado *sinapse*. É pelas sinapses que os nodos se unem funcionalmente, formando as redes neuronais. As sinapses funcionam como válvulas, sendo capazes de controlar a transmissão de impulsos, isto é, o fluxo da informação entre os nodos na rede neuronal. O efeito das sinapses é variável, é esta variação que dá ao neurônio capacidade de adaptação. Na Figura 2.2 estão ilustrados, de forma simplificada, os componentes de uma célula de neurônio biológico (KOVÁCS, 2002).

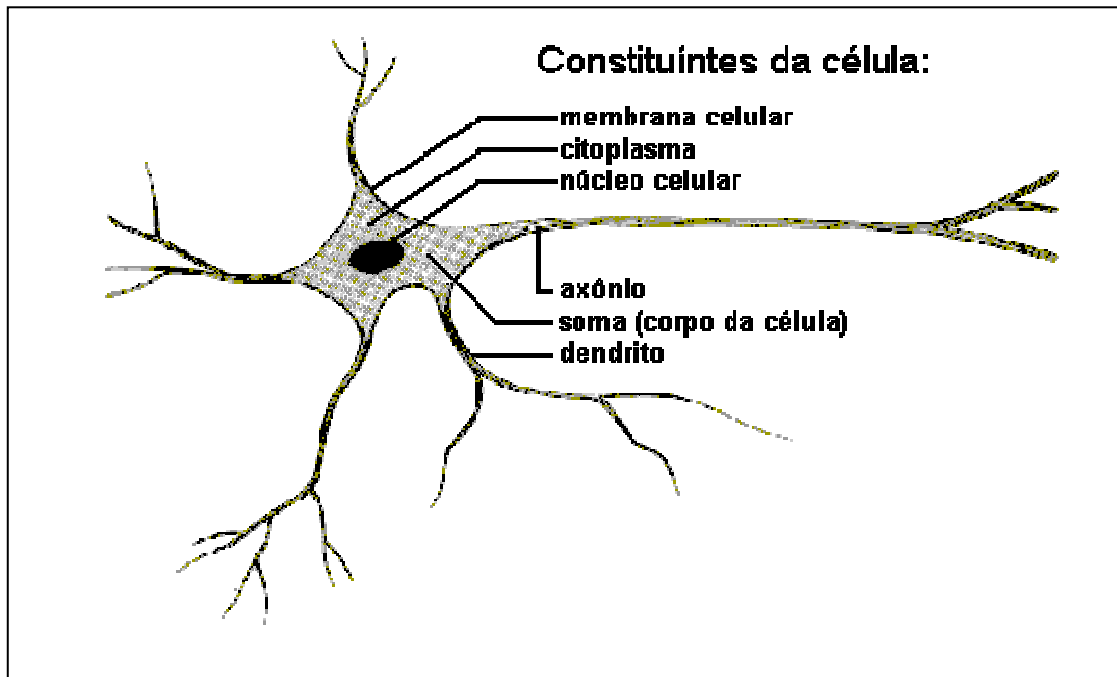


Figura 2.2. Componentes de uma célula de neurônio biológico.

Os sinais oriundos dos nodos *pré-sinápticos* são transmitidos para o corpo do neurônio, onde são comparados com outros sinais recebidos pelo neurônio. Se o percentual em um intervalo curto de tempo é suficientemente alto, a célula “dispara”, produzindo um impulso que é transmitido para as células seguintes (nodos *pós-sinápticos*). Este sistema simples é responsável pela maioria das funções realizadas pelo nosso cérebro. A capacidade de solucionar funções complexas surge com a operação em paralelo de todos os 10^{11} nodos do nosso cérebro (KOVÁCS, 2002).

2.3.3 O Neurônio Artificial

O modelo de neurônio proposto por MCCULLOCH e PITTS (1943), denominado de MCP, é uma simplificação do que se sabia a respeito do neurônio biológico naquela época. A sua descrição matemática resultou em um modelo com n terminais de entrada x_1, x_2, \dots, x_n (que representam os dendritos), e apenas um terminal de saída y (que representa o axônio). Para emular o comportamento das sinapses, os terminais de entrada do neurônio têm *pesos* acoplados w_1, w_2, \dots, w_n , cujos valores podem ser positivos ou negativos, dependendo das sinapses correspondentes serem inibitórias ou excitatórias. O efeito de uma sinapse particular i no neurônio pós-sináptico é dado por: $x_i w_i$. Os pesos determinam “em que grau” o neurônio deve

considerar sinais de disparo que ocorrem naquela conexão. Uma descrição do modelo é apresentada na Figura 2.3 abaixo.

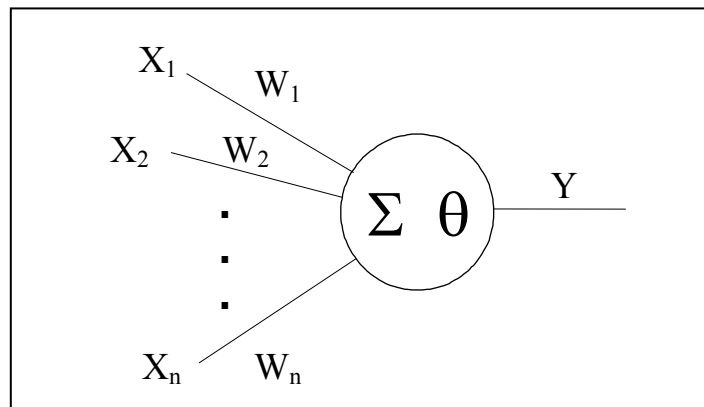


Figura 2.3. Neurônio de McCULLOCH e PITTS (1943).

Um neurônio dispara quando a soma dos impulsos que ele recebe ultrapassa o seu limiar de excitação “*threshold*”. O corpo do neurônio, por sua vez, é emulado por um mecanismo simples que faz a soma dos valores $x_i w_i$ recebidos pelo neurônio (soma ponderada), e, a partir deste mecanismo, toma-se a decisão se o neurônio deve ou não disparar (saída igual a 1 ou a 0) comparando-se a soma obtida ao limiar de excitação do neurônio. No modelo MCP, a ativação do neurônio é obtida através da aplicação de uma “função de ativação”, que ativa a saída ou não, dependendo do valor da soma ponderada das suas entradas. Na descrição original do modelo MCP, a função de ativação é dada pela função limiar descrita a seguir. O nodo MCP terá então sua saída ativa quando:

$$\sum_{i=1}^n x_i w_i \geq \theta \quad (4)$$

onde:

- n é o número de entradas do neurônio;
- w_i é o peso associado à entrada x_i ; e
- θ é o limiar de excitação do neurônio.

MCCULLOCH e PITTS (1943) simplificaram seu modelo assumindo que os nodos em cada camada da rede disparam sincronicamente, isto é, que todos os nodos são avaliados ao mesmo tempo e também que as entradas em um instante de tempo t produzem a sua saída no tempo $t + 1$. Em sistemas biológicos, sabe-se que não existe

um mecanismo para sincronizar as ações de nodos, nem há restrição para que as suas saídas sejam ativadas em tempos discretos como no modelo MCP. Sabe-se também que o valor da próxima saída dos nodos biológicos depende enormemente das ativações dos neurônios anteriores, já que até mesmo os neuro-transmissores liberados anteriormente levam algum tempo para se re-combinarem, influenciando, assim, as ativações seguintes.

2.3.4 Funções de Ativação

A partir do modelo proposto por MCCULLOCH e PITTS (1943) foram derivados vários outros modelos que permitem a produção de uma saída qualquer, não necessariamente zero ou um, e com diferentes funções de ativação. A Figura 2.4 ilustra, graficamente, quatro funções de ativação diferentes: a função linear, a função rampa, a função degrau (*step*) e a função sigmoideal.

A função de ativação linear, mostrada na Figura 2.4a, é definida pela equação abaixo:

$$y = \alpha x \quad (5)$$

onde:

α é um número real que define a saída linear para os valores de entrada;

y é a saída; e

x é a entrada.

A função linear pode ser restringida para produzir valores constantes em uma faixa $[-y + y]$, e neste caso, passa a ser a função rampa mostrada, graficamente, na Figura 2.4b definida pela relação abaixo.

$$y = \begin{cases} +\gamma & \text{se } x > \gamma \\ x & \text{se } x = \gamma \\ -\gamma & \text{se } x < -\gamma \end{cases} \quad (6)$$

Os valores máximos e mínimos da saída são $-y$, $+y$. A função rampa é usada geralmente, como uma função linear simplificada.

A função *step*, ilustrada na Figura 2.4c, é similar a uma função rampa, pois a função produz a saída $+y$ para valores de x maiores que zero, caso contrário a função produz o valor de $-y$. A função *step* é definida por.

$$y = \begin{cases} +\gamma & \text{se } x > 0 \\ -\gamma & \text{se } x \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

A função sigmoideal, conhecida também como *S-shape*, ilustrada na Figura 2.4d, é uma função semilinear. É possível definir várias funções sigmoideais. Uma das funções sigmoideais mais importantes é a função logística definida por:

$$y = \frac{1}{1 + e^{-x/T}} \quad (8)$$

onde o parâmetro T determina a suavidade de curva.

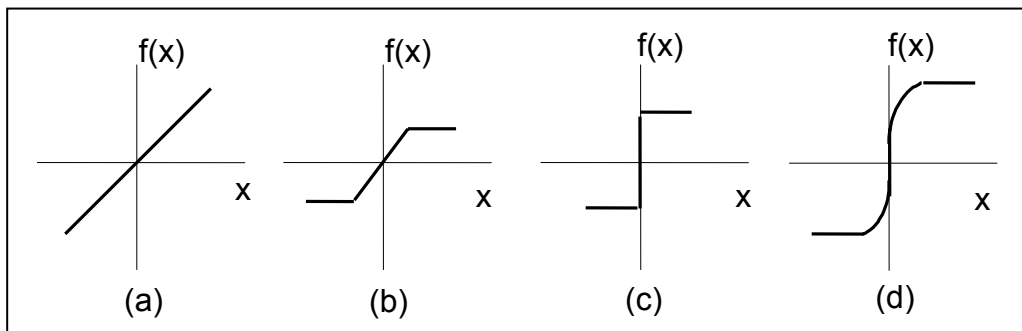


Figura 2.4. Algumas funções de ativação.

2.3.5 Aprendizado

As RNs possuem a capacidade de aprender através exemplos e fazer generalizações do que aprenderam. No aprendizado conexionista não se procura obter regras como na abordagem simbólica da Inteligência Artificial, mas determinar a intensidade das conexões entre os neurônios. Um conjunto de procedimentos bem definidos para adaptar os parâmetros de uma RNs, a fim de que a mesma possa *aprender* uma determinada função é chamado de *algoritmo de aprendizado*. Como era de se esperar, não há um único algoritmo de aprendizado. O que temos é um conjunto de ferramentas representadas por diversos algoritmos, cada qual com suas vantagens e desvantagens. Estes algoritmos, basicamente, diferem pela maneira através da qual o ajuste dos pesos é feito.

Um elemento importante que interfere no aprendizado da rede é o tipo de conexões dos neurônios (SILVEIRA, 2006), que pode ser:

1. “*Feedforward*” ou acíclica, onde a saída de um neurônio na i -ésima camada da rede só pode ser usada como entrada de neurônios em camadas de índice maior que i .
2. “*Feedback*” ou cíclica, onde a saída de algum neurônio na i -ésima camada da rede é usada como entrada de neurônios em camadas de índices menor ou igual a i .

A utilização de uma RN na solução de uma tarefa passa, inicialmente, por uma fase de aprendizagem, onde a rede extrai características relevantes de padrões de informações apresentados para a mesma, criando assim uma representação própria para o problema. A etapa de aprendizagem consiste em um processo iterativo de ajuste de parâmetros da rede, os pesos das conexões entre as unidades de processamento, que guardam o conhecimento que a rede adquiriu do ambiente em que está operando.

Diversos métodos para treinamento de redes foram desenvolvidos e podem ser agrupados em dois paradigmas principais: Aprendizado Supervisionado e Aprendizado Não Supervisionado.

2.3.5.1 Aprendizado Supervisionado

Este tipo de aprendizado é o mais comum no treinamento das RNs, tanto de neurônios com pesos, quanto de neurônios sem pesos, sendo chamado *Aprendizado Supervisionado* porque a saída desejada que a rede deve resultar é fornecida por um supervisor (professor) externo. O objetivo é ajustar os parâmetros da rede, de forma a encontrar uma ligação entre os pares de entrada e saída fornecidos. A Figura 2.5 ilustra o mecanismo de Aprendizado Supervisionado. O professor indica, explicitamente, um comportamento bom ou ruim para a rede, visando direcionar o processo de treinamento. A rede tem sua saída corrente (calculada) comparada com a saída desejada, recebendo informações do supervisor sobre o erro da resposta atual. A cada padrão de entrada submetido à rede compara-se a resposta desejada (que representa uma ação ótima a ser realizada pela rede) com a resposta calculada, e os pesos das conexões são ajustados para minimizar o erro. A minimização da diferença é incremental, já que pequenos ajustes são feitos nos pesos a cada etapa de treinamento, de tal forma que estes caminhem, se possível, para uma solução.

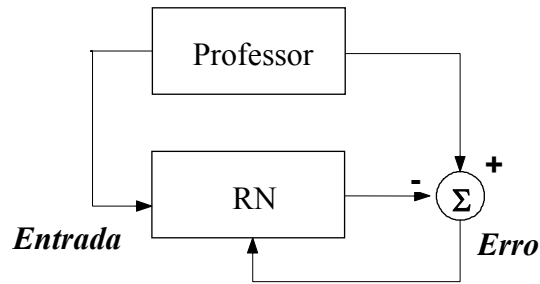


Figura 2.5. Aprendizado supervisionado.

A desvantagem do Aprendizado Supervisionado é que, na ausência do professor, a rede não conseguirá aprender novas estratégias para situações não cobertas pelos exemplos do treinamento da rede. Os exemplos mais conhecidos de algoritmos de Aprendizado Supervisionado são a regra delta ou correção de erros (seção seguinte) (WIDROW e HOFF, 1960) e a sua generalização para redes de múltiplas camadas, o algoritmo de retropropagação do erro (“*back-propagation*”) (RUMELHART *et al.*, 1986, PEREIRA, 1999). O Aprendizado Supervisionado pode ser implementado, basicamente, de duas formas: “*off-line*” e “*on-line*”. Para treinamento “*off-line*”, os dados do conjunto de treinamento não mudam, sendo que uma vez obtida uma solução para a rede, esta deve permanecer fixa. Por sua vez, no aprendizado “*on-line*”, o conjunto de dados muda, continuamente, visto que a rede deve estar em contínuo processo de adaptação.

2.3.5.2 Correção de Erros

O processo de aprendizado por correção de erros procura minimizar a diferença entre a soma ponderada das entradas pelos pesos (saída calculada pela rede) e a saída desejada, ou seja, o erro da resposta atual da rede. O termo $e(t)$ denota o erro e deve ser calculado através da seguinte equação:

$$e(t) = d(t) - y(t), \quad (9)$$

onde

$d(t)$ é a saída desejada; e

$y(t)$ é a resposta atual (calculada) no instante de tempo t .

A forma genérica para alteração dos pesos por correção de erros é definida por:

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \eta e(t) x_i(t), \quad (10)$$

onde:

η é a taxa de aprendizado; e

$x_i(t)$ é a entrada para o neurônio i no tempo t .

Segundo a equação acima, o ajuste dos pesos deve ser proporcional ao produto do erro pelo valor de entrada da sinapse naquele instante de tempo. Esta expressão aparece tanto no algoritmo de treinamento do “*Perceptron*” (ROSENBLATT, 1958) quanto no algoritmo para treinamento do *Adaline* (WIDROW e HOFF, 1960) e posterior generalização para o algoritmo de retropropagação do erro (*Back-propagation*) (RUMELHART *et al.*, 1986).

O método de aprendizado por correção de erros também pode ser chamado de regra delta de aprendizado. Este método caracteriza o conceito de aprendizado supervisionado descrito na seção anterior.

2.3.5.3 Aprendizado Não Supervisionado

No Aprendizado Não Supervisionado, como o próprio nome sugere, não há um professor ou supervisor para acompanhar o processo de aprendizado. Este método é ilustrado na Figura 2.6. Para este tipo de aprendizado, somente os padrões de entrada estão disponíveis para rede, ao contrário do Aprendizado Supervisionado, cujo conjunto de treinamento possui pares de entrada e saída. A partir do momento em que a rede estabelece uma harmonia com as regularidades estatísticas da entrada de dados, desenvolve-se nela uma habilidade de formar representações internas para codificar características da entrada e criar novas classes ou grupos automaticamente. Este tipo de aprendizado, só se torna possível, quando existe redundância nos dados de entrada. Sem redundância seria impossível encontrar quaisquer padrões ou características dos dados de entrada (HEBB, 1949).

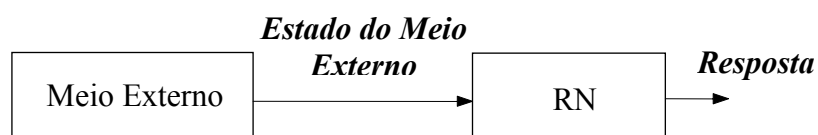


Figura 2.6. Aprendizado não supervisionado.

Uma das vantagens do Aprendizado Não Supervisionado pode ser visualizada na ausência do supervisor ou professor (responsável pela indicação da saída desejada). A desvantagem está, intimamente, ligada ao conjunto de dados para treinamento, onde este deve ser redundante para que a rede consiga abstrair características em seu treinamento.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 Cálculo da Matriz Resposta

A matriz resposta ROB3, desenvolvida para o EB e utilizada neste trabalho, foi calculada utilizando-se o código de transporte de radiação, baseado no método de Monte Carlo, MCNP, versão 5 (BRIESMEISTER, 2000) e nos valores de secção de choque disponíveis na biblioteca ENDF/B-VI incluída no código. As simulações foram realizadas utilizando um *cluster* de computadores do tipo PC como uma ferramenta computacional de alto desempenho. O “*Cluster*” foi desenvolvido no Laboratório de Métodos Computacionais – LMC do Laboratório de Nêutrons do Laboratório Nacional de Metrologia das Irradiações Ionizantes do Instituto de Radioproteção e Dosimetria – LN/LNMRI-IRD.

Os primeiros resultados obtidos para o cálculo da matriz resposta foram apresentados na *International Nuclear Atlantic Conference – INAC 2005* (LEMOS *et al.*, 2005) promovida pela Associação Brasileira de Energia Nuclear – ABEN e publicados na *Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento – RBPD* (LEMOS *et al.*, 2006). O objetivo naquele momento era reproduzir uma matriz resposta com as mesmas características daquelas existentes na literatura. Assim, o trabalho foi comparado com o trabalho de CRUZATE (2002). Os resultados foram satisfatórios, pois a forma da curva para cada esfera foi reproduzida e somente pequenas diferenças em relação à magnitude foram observadas.

Posteriormente, foram realizadas novas simulações em busca de uma matriz resposta com maior resolução conforme apresentado no trabalho de MARES e SHRAUBE (1993). Ele utilizou um sistema de parametrização na resposta obtida expandindo seus resultados para 51 intervalos de energia, entre 0,025 eV a 100 MeV. Nós refizemos os cálculos da matriz resposta com a mesma estrutura, os mesmos intervalos de energia do trabalho de MARES e SHRAUBE e comparamos os resultados. Neste caso, também encontramos as mesmas características em relação à forma da curva com pequenas diferenças apenas na magnitude.

No início do ano de 2005 surgiu uma chamada para intercomparação (*Uncertainty Assessment in Computational Dosimetry – An Intercomparison of Approaches*) promovido pela EURADOS – *European Radiation Dosimetry Group*, através do projeto CONRAD – *Coordinated Network for Radiation Dosimetry* (2005). Dentre os trabalhos sugeridos foi proposta uma intercomparação com o EB, onde todos os detalhes para simulação da matriz resposta, como por exemplo: a geometria e a densidade do detector, a definição dos materiais e os intervalos de energia foram indicados para o trabalho. Com base nessas informações foi calculada a matriz resposta ROB3 utilizada neste trabalho.

O sistema modelado consiste em um detector ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ cilíndrico de densidade $3,494 \text{ g/cm}^3$, com 0,4 cm de diâmetro e 0,4 cm de altura, e um conjunto de esferas de polietileno de alta densidade ($0,95 \text{ g/cm}^3$) com diâmetros de 1 a 12 polegadas inteiras, correspondendo respectivamente aos diâmetros de 2,54 cm, 5,08 cm, 7,62 cm, 10,16 cm, 12,70 cm, 15,24 cm, 17,78 cm, 20,32 cm, 22,86 cm, 25,40 cm, 27,94 cm e 30,48 cm, onde cada esfera é encaixada em três cavidades cilíndricas de diâmetros 1,42 cm e 1,88 cm respectivamente, representando o corpo de alumínio do detector (Figura 3.1). A resposta para o sistema foi definida como o número de reações ($n, {}^3\text{H}$) para a fluência de nêutrons incidentes no volume sensível do detector. Uma colisão entre um nêutron com baixa energia ($E < 1\text{eV}$) e um átomo é afetada pelo movimento térmico do átomo e, em muitos casos, pela presença de átomos vizinhos. Esse movimento térmico não pode ser ignorado em muitas situações. Ligações químicas e estruturas cristalinas das moléculas têm um efeito também expressivo na interação de nêutrons com energia abaixo de 1 eV. Para levar em conta os efeitos dos movimentos térmicos dos átomos, o código MCNP usa um tratamento térmico que é baseado na aproximação do gás livre (gás ideal) e as leis de espalhamento, $S(\alpha, \beta)$, relacionadas aos efeitos das ligações moleculares, para um número limitado de substâncias e temperaturas. A incerteza estatística obtida nas simulações para o cálculo da matriz resposta foi menor que 3%.

As irradiações foram simuladas considerando feixes de nêutrons monoenergéticos, provenientes de uma superfície circular com mesmo diâmetro da esfera moderadora, cuja direção é perpendicular à face cilíndrica do detector de ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$. Foram simulados 84 valores discretos de energia na faixa de 1 meV a 20 MeV. As respostas foram obtidas primeiramente para o detector de ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ nu (sem esfera), e posteriormente para o mesmo localizado no interior da cavidade cilíndrica e no centro

de cada esfera. O espaço entre a superfície interna cilíndrica e o volume sensível do detector foi assumido como vácuo.

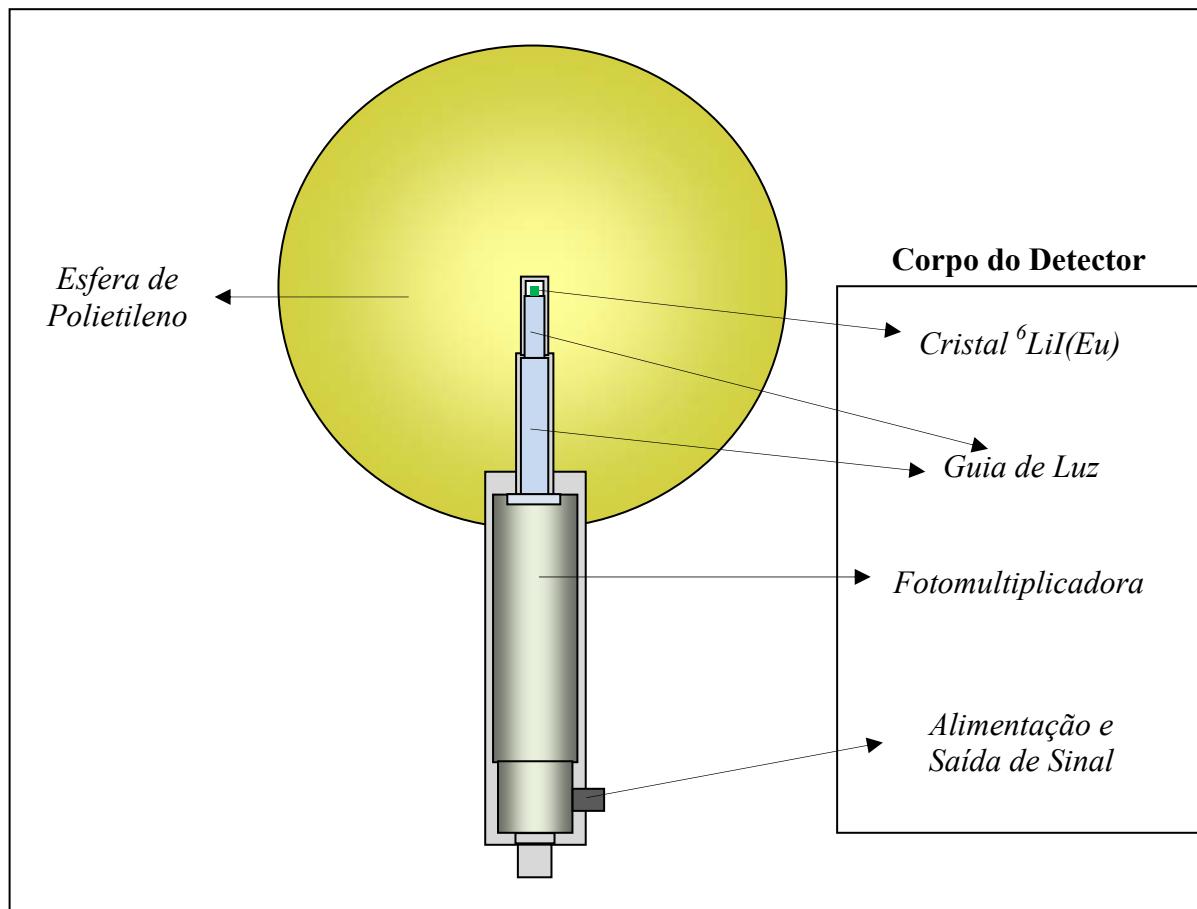


Figura 3.1. Geometria do detector com uma esfera moderadora.

3.2 Implementação do programa BUNKI

O BUNKI é um programa de desdobramento de espectros de nêutrons desenvolvido no Laboratório de Pesquisa Naval em Washington – USA (JOHNSON e GORBICS, 1981). Neste programa é possível escolher o algoritmo de desdobramento, a matriz resposta, o número de intervalos de energia entre 10 meV a 400 MeV, (máximo de 31 intervalos) e vários outros parâmetros. É possível ainda definir um espectro maxwelliano como ponto de partida no processo de deconvolução, ou definir apenas uma função constante. Essas informações são inseridas interativamente pelo usuário.

O programa BUNKI oferece duas possibilidades de escolher o algoritmo de desdobramento: o SPUNIT ou o BON31G. Eles utilizam um método iterativo recursivo no processo de deconvolução baseado no princípio da teoria da informação. Outros recursos oferecidos no programa BUNKI foram discutidos detalhadamente nos trabalhos de LOWRY e JOHNSON (1984a e 1984b) e mais recentemente no trabalho de LEMOS (2004). Neste último trabalho, toda sua estrutura foi avaliada para otimização da sua utilização com os recursos tecnológicos mais atuais.

A implementação deste código se refere na inserção da matriz resposta ROB3 na sua estrutura, a fim de obter sua validação. A ROB3 foi calculada para 84 valores discretos de intervalos de energia, conforme apresentado anteriormente, de modo que foi necessário reduzir os intervalos de energia, a partir de um ajuste linear, para 31 valores discretos originais do BUNKI. O ajuste linear foi realizado ponto a ponto, ou seja, de intervalo a intervalo de energia e a matriz resposta ajustada foi obtida para as 25 primeiras faixas de energia até 14,9 MeV.

A ROB3 ajustada foi inserida no arquivo de dados chamado GIANT.DAT, que compõe o programa BUNKI. Neste arquivo encontram-se todas as matrizes disponíveis ao usuário arranjadas da seguinte forma: 620 linhas por 6 colunas, onde as duas primeiras linhas correspondem à resposta de uma matriz para cada esfera em um intervalo de energia, as duas linhas seguintes correspondem à resposta de outra matriz para cada esfera no mesmo intervalo de energia, e assim por diante até que sejam arranjadas as respostas de todas as matrizes no mesmo intervalo de energia. Assim, todo arranjo é repetido para o intervalo de energia seguinte.

A partir desta pequena modificação foram gerados resultados, através do programa BUNKI e de medições experimentais das fontes de referência de $^{241}\text{AmBe}$, ^{252}Cf e $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$ (ISO8529-1, 2001) realizadas no trabalho de LEMOS (2004),

utilizando as principais matrizes SAN4 e UTA4 (LOWRY e JOHNSON, 1984a, 1984b) para comparação com a matriz ROB3 desenvolvida no presente trabalho. Estes resultados são apresentados no item 4.2 do capítulo seguinte.

3.3 Simulação do EB em Campos de Referência

A simulação da resposta do EB para os espectros de referência $^{241}\text{AmBe}$, ^{252}Cf e $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$ da Norma ISO8529-1 (2001) foi realizada de forma semelhante ao cálculo da matriz resposta, onde a geometria do detector de $^6\text{LiI}(\text{Eu})$ e as definições dos materiais foram mantidas. A diferença foi a substituição da simulação dos feixes monoenergéticos pelos espectros de referência citados acima considerando a geometria da fonte situada a 100 cm do detector. A incerteza estatística obtida nas simulações para a simulação dos espectros de referência também foi menor que 3%.

A geometria da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ é cilíndrica, possui dimensões externas com 3,5 cm de altura e 3,5 cm de diâmetro. É composta por uma camada de aço de 0,4 cm de espessura, de modo que a substância radioativa da fonte preencha uma cavidade cilíndrica de 2,7 cm de altura e 2,7 cm de diâmetro (Figura 3.2a). A geometria da fonte de ^{252}Cf é também cilíndrica e bem menor, com dimensões externas de 1,19 cm de altura e 0,55 cm de diâmetro. É também composta por uma camada de aço de 0,08 cm de espessura na face retangular, com a substância radioativa preenchendo uma cavidade cilíndrica de 0,61 cm de altura e 0,39 cm de diâmetro (Figura 3.2b). A geometria da fonte de $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$ é a mesma da fonte de ^{252}Cf inserida no centro de uma esfera de 15,0 cm de diâmetro contendo D_2O , revestida com uma camada de aço de 0,1 cm de espessura e uma outra de Cd de 0,51 cm de espessura (Figura 3.2c).

A Figura 3.2 mostra um esboço das dimensões em maiores proporções da geometria de cada fonte simulada, onde um corte nas coordenadas (y,z) no centro da fonte é apresentado.

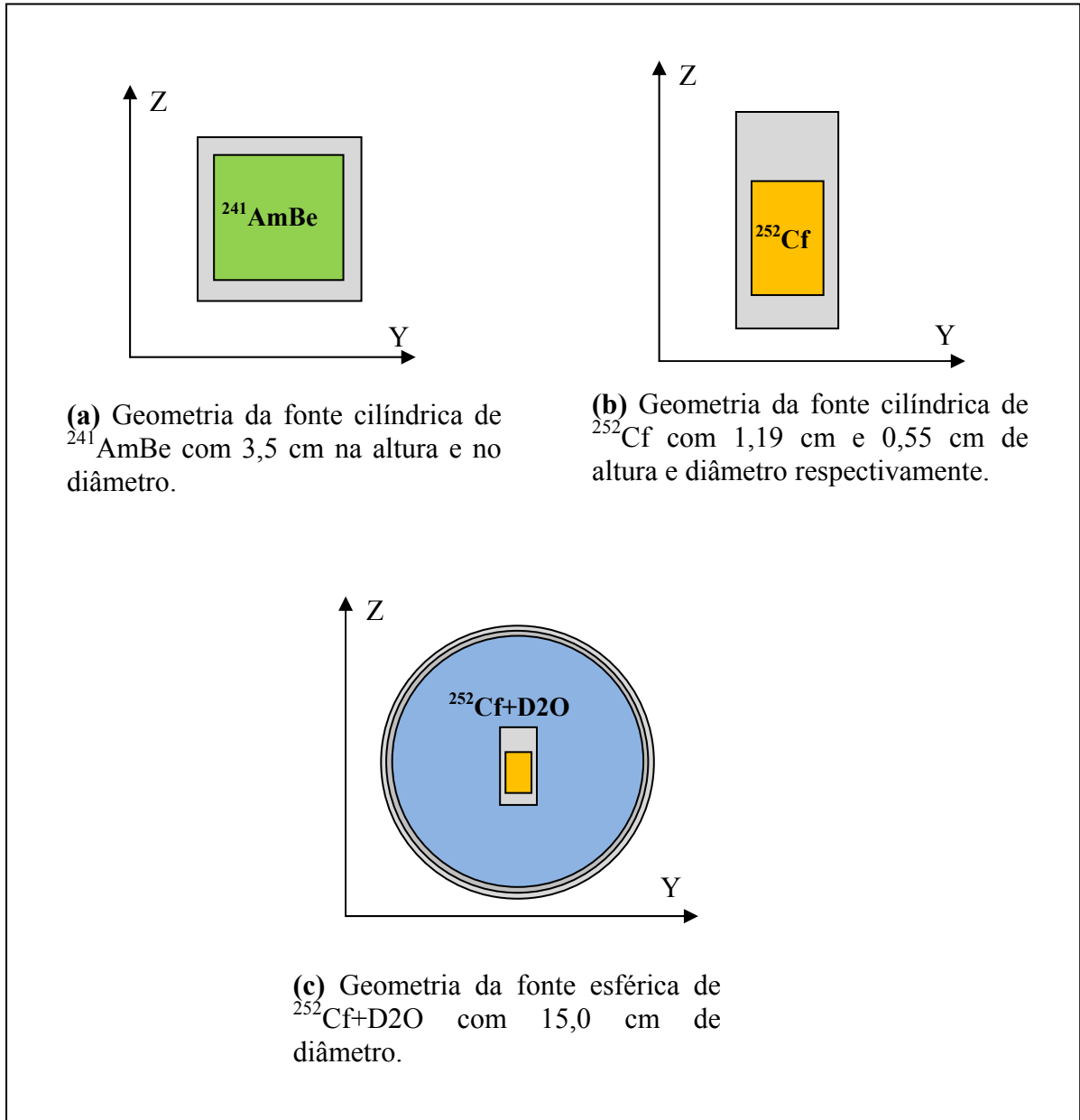


Figura 3.2. Esboço da geometria simulada para visualização relativa dos materiais e das fontes de $^{241}\text{AmBe}$, ^{252}Cf e $^{252}\text{Cf+D}_2\text{O}$ da Norma ISO8529-1 (2001).

3.4 Modelo Matemático de Rede Neural

O modelo matemático de RNs escolhido neste trabalho consiste numa arquitetura de multicamadas do tipo “*Multilayer Perceptron*”, fundamentado em uma configuração de rede totalmente interconectada com aprendizado supervisionado, num algoritmo de retropropagação do erro “*Backpropagation*” com critério de parada de correlação cruzada “*cross-validation*”, baseado no melhor resultado para o conjunto de teste, e para determinação e classificação de características referenciais dos espectros de nêutrons. Quanto ao tipo de conexões de neurônios, foi adotado o “*Feedforward*”. Este modelo de RN de fácil implementação pode ser encontrado em diversos textos da literatura (FERREIRA, 2008, PEREIRA, 1999, AHALT *et al.*, 1990). A Figura 3.3 abaixo apresenta o esboço da estrutura do modelo de RN utilizada neste trabalho.

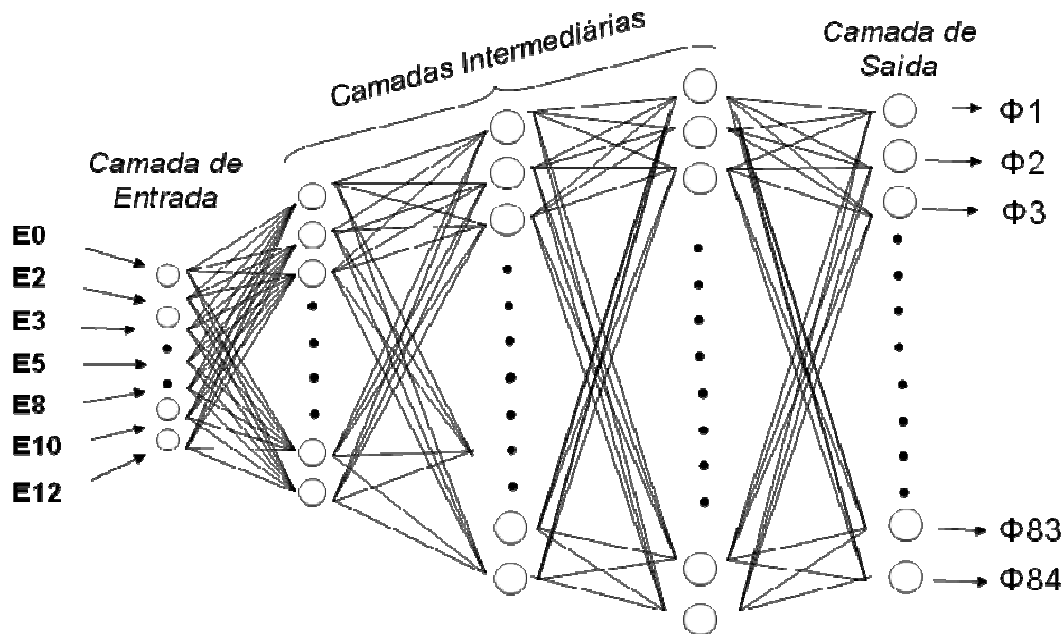


Figura 3.3. Modelo de rede neural interconectada de multicamadas.

Escolheu-se para treinamento e uso um programa chamado NEURALN, que foi desenvolvido a partir do trabalho de PEREIRA (1999). Este programa permite escolher diversos parâmetros, tais como: número de camadas, número de neurônios em cada camada, tipo de treinamento, função de ativação, critério de interrupção a ser aplicado etc. A função de ativação escolhida que fornece os valores de saída dos neurônios é a função logística semilinear chamada de sigmoide apresentada na Figura 2.4d no item 2.3.4.

A Figura 3.4 mostra a tela principal do programa NEURALN, a Figura 3.5 mostra tela para entrada de dados de acordo com o modo de treinamento, a Figura 3.6 mostra a tela de configuração de rede onde se escolhe o número de camadas, o número de neurônios em cada camada, o número de pares de entrada e saída a serem treinados, e a Figura 3.7 mostra a tela de treinamento onde se escolhe, além de outros parâmetros, o passo de treinamento e o percentual de acertos para gravação.

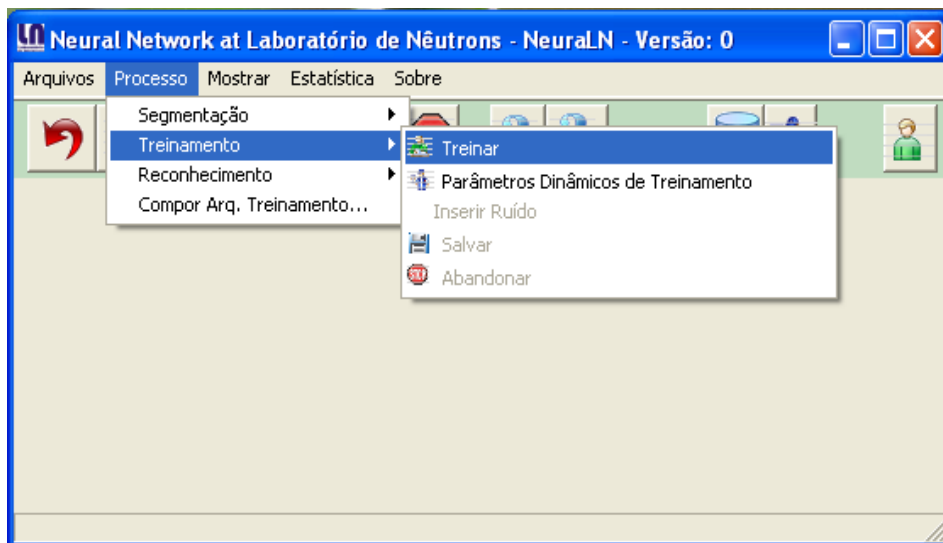


Figura 3.4. Tela principal do programa NEURALN.

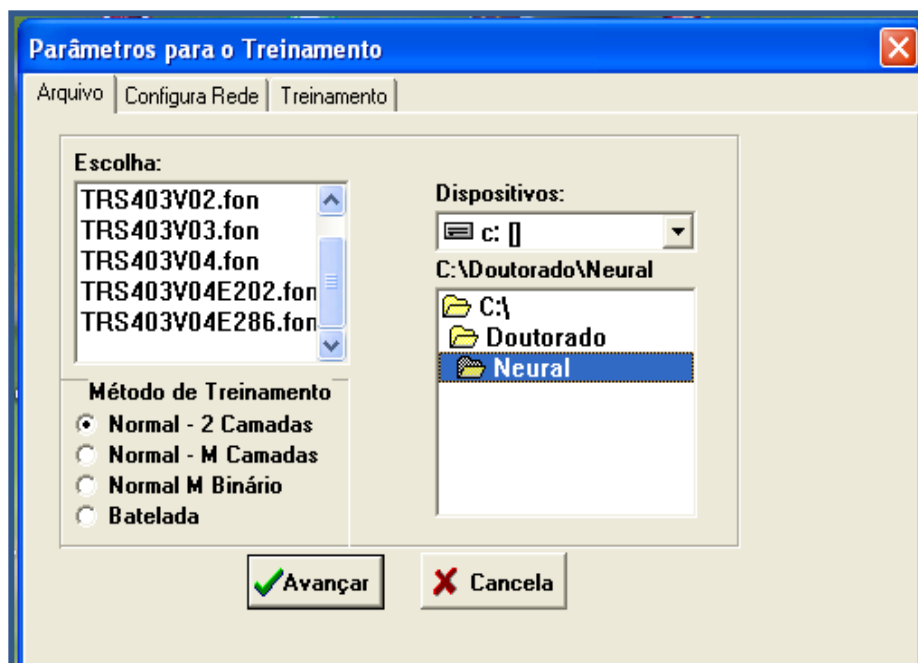


Figura 3.5. Tela para entrada de dados de acordo com o modo de treinamento.

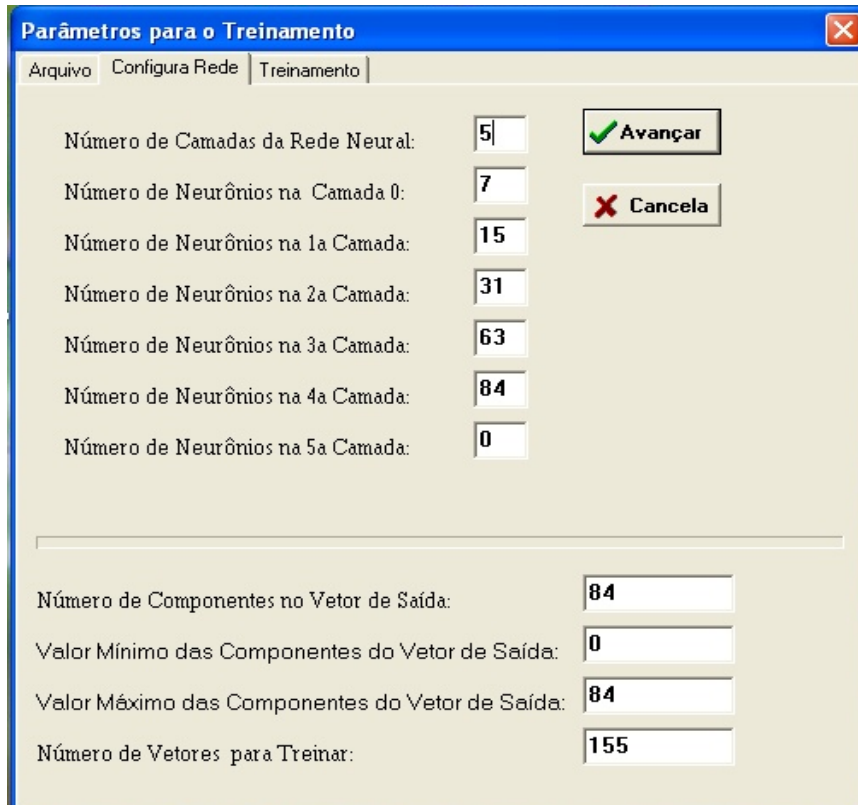


Figura 3.6. Tela de configuração da rede neural onde se escolhe o número de camadas e o número de neurônios de cada camada, bem como o número de pares de entrada e saída a serem treinados etc.

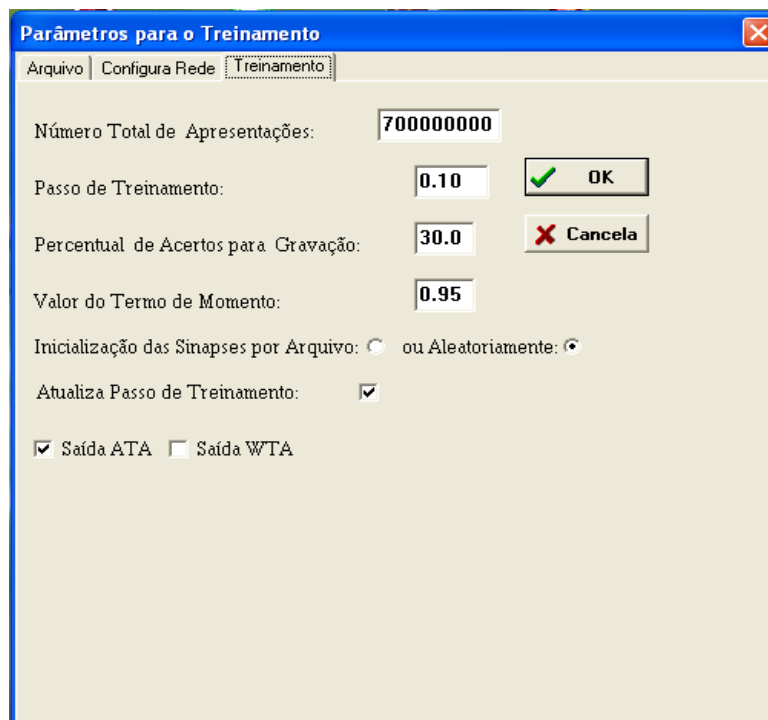


Figura 3.7. Tela de treinamento onde se escolhe, além de outros parâmetros, o passo de treinamento e o percentual de acertos para gravação.

3.4.1 Segmentação dos Dados e Algoritmo de Treinamento e Teste

O algoritmo de treinamento e teste, utilizado na RN como pares de entrada e saída, é composto por um total de 286 espectros, sendo 84 pares obtidos diretamente da matriz resposta ROB3; 192 pares da referência do TRS (2001); 4 pares da Norma ISO 8529-1 (2001); 3 pares obtidos experimentalmente no trabalho de LEMOS (2004); e 3 pares da simulação do EB para os espectros de $^{241}\text{AmBe}$, ^{252}Cf e $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$, através do Código MCNP (BRIESMEISTER, 2000), conforme apresentado anteriormente no item 3.3. A Tabela 3.1 mostra um resumo da origem dos dados de entrada e saída

Tabela 3.1. Origem dos dados de entrada e saída utilizados para treinamento e teste da RN.

Origem	Nº de Espectro
Matriz Resposta ROB3	84
Ref. TRS (2001)	192
Ref. ISO (2001)	4
Ref. LEMOS (2004)	3
Simulação MCNP	3
Total de Espectros	286

A segmentação dos dados de entrada e saída para o treinamento e teste foi realizada através de uma planilha do programa Excel[®]. Os dados de entrada foram normalizados para a unidade. Os dados de saídas (espectros) foram expandidos de 61 para os mesmos 84 intervalos de energia da matriz resposta ROB3, através de um ajuste linear realizado de intervalo a intervalo, e a saída obtida do ajuste foi normalizada para o maior valor. A Figura 3.8 mostra um diagrama com todos os dados e etapas do processo de segmentação.

Os dados de entrada para o algoritmo de treinamento e teste provenientes das referências TRS (2001) e ISO 8529-1 (2001) foram preparados conforme as equações 11 e 12 que têm como base a Equação 2 (subitem 2.1.1), ou seja, através da ROB3 α_{jk} e da fluência de nêutrons em energia $\Phi(k)$ após a realização do ajuste e da normalização explicado acima. Os dados de saída para o algoritmo de treinamento e teste das mesmas

referências citadas acima são representados por E_{jk} , que são os próprios 84 elementos da fluência de nêutrons em energia mencionada acima.

$$IA_{jk} = \sum_{k=1}^{84} \alpha_{jk} \Phi_j(k)_{TRS} \quad j = 1, 2, \dots, 7 \quad , \quad (11)$$

$$IS_{jk} = \sum_{k=1}^{84} \alpha_{jk} \Phi_j(k)_{ISO} \quad j = 1, 2, \dots, 7 \quad , \quad (12)$$

Onde:

IA_{ik} são os elementos de entrada provenientes do TRS (2001);

IS_{jk} são os elementos de entradas provenientes da ISO 8529-1 (2001);

j é o número de detectores (sem e com esfera moderadora); e

k é o número de intervalos de energia.

Os dados de entrada para o algoritmo de treinamento e teste oriundos do trabalho de LEMOS (2004) e da simulação com o Código MCNP (BRIESMEISTER, 2000) são representados pelos elementos Exp_{ik} e Cal_{ij} respectivamente. Os dados de saída destas referências são também representados por E_{jk} , que são os próprios 84 elementos da fluência de nêutrons em energia também após a realização do ajuste e da normalização.

Os dados de entrada para o algoritmo de treinamento e teste originados da ROB3 são representados por α_{jk} , onde os seus dados de saídas correspondentes foram considerados valores nulos e unitários, ou seja, 1 para o intervalo de energia de interesse e 0 para os demais intervalos, de modo a pressupor, neste caso, 84 espectros monoenergéticos.

A Figura 3.9 mostra mais claramente a estrutura da base de dados utilizada para treinamento e teste da RN, na mesma sequência que é realizada a leitura conforme o programa NEURALN. Ela mostra, ainda, uma coluna em base binária para identificação do espectro, outra com o cálculo do equivalente de dose ambiente $H^*(10)$ para cada espectro conforme a Equação 13 abaixo, e uma última coluna com o nome do espectro de referência utilizado.

$$H^*(10) = \sum_{k=1}^{84} \Phi(k) * h_k^*(10) \quad (13)$$

Onde:

$\Phi(k)$ é a fluência de nêutrons em energia normalizada para o maior valor do espectro utilizado para o treinamento;

$h_k^*(10)$ é o coeficiente de conversão de fluência para equivalente de dose ambiente publicado na ICRP 74 (1995); e

k é o número de intervalos de energia.

O arquivo com todos os dados para treinar e testar a RN foi dividido em três bases: uma com todos os 286 pares de entrada e saída misturando os espectros monoenergéticos e polienergéticos, outra considerando somente os espectros polienergéticos com a retirada dos 84 pares provenientes da matriz ROB3 restando um total de 202 pares, e mais uma para os espectros monoenergéticos utilizando somente a própria ROB3 com os seus 84 pares. A Tabela 3.2 mostra os detalhes utilizados para cada base de treinamento e teste realizados, em relação à configuração da RN e aos pares de entrada e saídas.

Tabela 3.2. Base de dados e a configuração da RN para treinamento e teste.

Base	Nº de Camadas	Nº de Neurônios por camada	Nº de Espectros		
			Treinamento	Teste	Total
ROB3E84	5	7-15-31-61-94	56	28	84
TRS403E202	5	7-45-91-169-94	140	62	202
TRS403E286	5	7-45-91-169-94	196	90	286

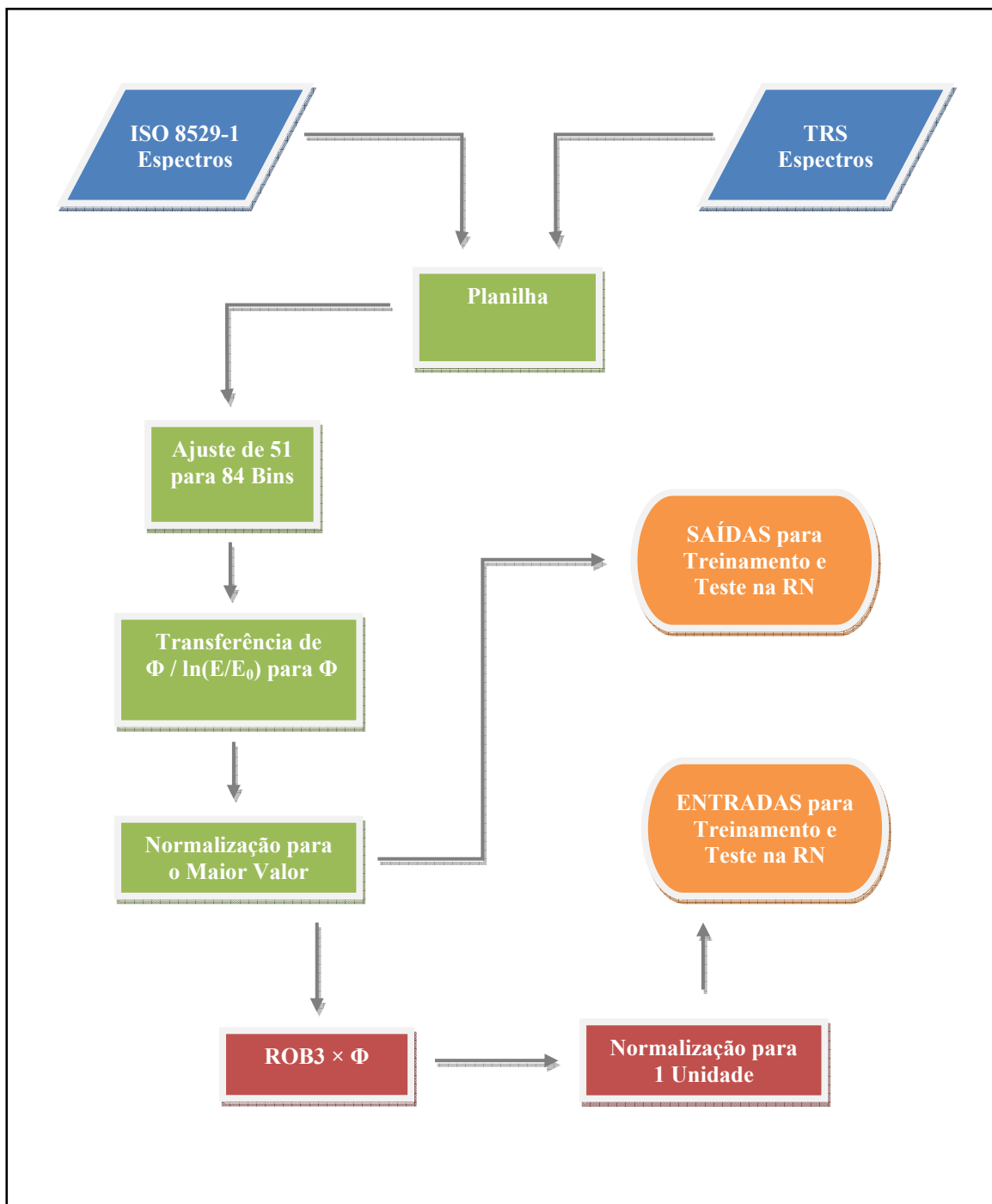


Figura 3.8. Segmentação dos pares de entrada e saída para alimentação da RN.

		ENTRADAS							SAÍDAS							IDENTIFICAÇÃO				EQUIVALENTE DE DOSE AMBIENTE		NOME										
M A T R I Z	R E S P O S T A	α_{11}	α_{21}	α_{31}	α_{41}	α_{51}	α_{61}	α_{71}	1_{11}	0_{21}	0_{31}	.	.	.	.	.	.	.	.	0_{841}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	$H^*(10)_1$	NOME 1	
		α_{12}	α_{22}	α_{32}	α_{42}	α_{52}	α_{62}	α_{72}	0_{12}	1_{22}	0_{32}	.	.	.	.	.	.	.	.	0_{842}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	$H^*(10)_2$	NOME 2
		α_{13}	α_{23}	α_{33}	α_{43}	α_{53}	α_{63}	α_{73}	0_{13}	0_{23}	1_{33}	.	.	.	.	.	.	.	.	0_{843}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	$H^*(10)_3$	NOME 3
	
	
	
	
		α_{184}	α_{284}	α_{384}	α_{484}	α_{584}	α_{684}	α_{784}	0_{8484}	0_{8484}	0_{8484}	.	.	.	.	.	.	.	.	1_{8484}	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
T R S		IA_{11}	IA_{21}	IA_{31}	IA_{41}	IA_{51}	IA_{61}	IA_{71}	E_{11}	E_{21}	E_{31}	.	.	.	.	.	.	.	.	E_{841}	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		IA_{12}	IA_{22}	IA_{32}	IA_{42}	IA_{52}	IA_{62}	IA_{72}	E_{12}	E_{22}	E_{32}	.	.	.	.	.	.	.	.	E_{842}	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		IA_{13}	IA_{23}	IA_{33}	IA_{43}	IA_{53}	IA_{63}	IA_{73}	E_{13}	E_{23}	E_{33}	.	.	.	.	.	.	.	.	E_{843}	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	
	
	
	
		IA_{1192}	IA_{2192}	IA_{3192}	IA_{4192}	IA_{5192}	IA_{6192}	IA_{7192}	E_{1192}	E_{2192}	E_{3192}	.	.	.	.	.	.	.	.	E_{84192}	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
I S O		IS_{11}	IS_{21}	IS_{31}	IS_{41}	IS_{51}	IS_{61}	IS_{71}	E_{11}	E_{21}	E_{31}	.	.	.	.	.	.	.	.	E_{841}	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		IS_{12}	IS_{22}	IS_{32}	IS_{42}	IS_{52}	IS_{62}	IS_{72}	E_{12}	E_{22}	E_{32}	.	.	.	.	.	.	.	.	E_{842}	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		IS_{13}	IS_{23}	IS_{33}	IS_{43}	IS_{53}	IS_{63}	IS_{73}	E_{13}	E_{23}	E_{33}	.	.	.	.	.	.	.	.	E_{843}	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		IS_{14}	IS_{24}	IS_{34}	IS_{44}	IS_{54}	IS_{64}	IS_{74}	E_{14}	E_{24}	E_{34}	.	.	.	.	.	.	.	.	E_{844}	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
L E M O S		Exp_{11}	Exp_{21}	Exp_{31}	Exp_{41}	Exp_{51}	Exp_{61}	Exp_{71}	E_{11}	E_{21}	E_{31}	.	.	.	.	.	.	.	.	E_{841}	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		Exp_{12}	Exp_{22}	Exp_{32}	Exp_{42}	Exp_{52}	Exp_{62}	Exp_{72}	E_{12}	E_{22}	E_{32}	.	.	.	.	.	.	.	.	E_{842}	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		Exp_{13}	Exp_{23}	Exp_{33}	Exp_{43}	Exp_{53}	Exp_{63}	Exp_{73}	E_{13}	E_{23}	E_{33}	.	.	.	.	.	.	.	.	E_{843}	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
M C N P		Cal_{11}	Cal_{21}	Cal_{31}	Cal_{41}	Cal_{51}	Cal_{61}	Cal_{71}	E_{11}	E_{21}	E_{31}	.	.	.	.	.	.	.	.	E_{841}	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		Cal_{12}	Cal_{22}	Cal_{32}	Cal_{42}	Cal_{52}	Cal_{62}	Cal_{72}	E_{12}	E_{22}	E_{32}	.	.	.	.	.	.	.	.	E_{842}	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		Cal_{13}	Cal_{23}	Cal_{33}	Cal_{43}	Cal_{53}	Cal_{63}	Cal_{73}	E_{13}	E_{23}	E_{33}	.	.	.	.	.	.	.	.	E_{843}	0	1	0	0	1	1	1	0	0	$H^*(10)_{286}$	NOME 286	

Figura 3.9. Base de dados para treinamento e teste com as entradas e suas respectivas saídas extraídas da Matriz Resposta ROB3, TRS (2001), ISO8529-1 (2001), LEMOS (2004) e do Código MCNP (BRIESMEISTER, 2000).

Em todos os treinamentos e testes foram considerados para o valor do erro limiar para acerto de treinamento 3% (Equação 9 do subitem 2.3.5.2), para o valor do acerto para base de dados de treinamento 5%, (o valor máximo considerado para gravação dos resultados de treinamento), e para o valor do acerto para a base de dados de teste 20% (o valor máximo considerado para gravação dos resultados de teste).

A RN utilizada para a base ROB3E84 foi configurada para 5 camadas no total. A camada de entrada com 7 neurônios representam a resposta do detector de ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$, ou seja, as 7 contagens (α_{ij}). A camada de saída com 94 neurônios, sendo 84 para representar a fluência de nêutrons em energia, considerando cada intervalo como nulo ou 1 conforme explicado anteriormente (espectros monoenergéticos), 9 neurônios para identificação do espectro e 1 para o cálculo do $H^*(10)$. As camadas intermediárias foram configuradas para 15, 31 e 61 neurônios.

A RN utilizada para a base TRS403E202 foi configurada para 5 camadas no total. A camada de entrada com 7 neurônios representam as contagens calculadas a partir da Equação 11 (IA_{ik}), da Equação 12 (IS_{ik}), e dos elementos Exp_{ik} e Cal_{ij} . A camada de saída com 94 neurônios, sendo 84 elementos da fluência de nêutrons em energia correspondentes (E_{jk}), 9 e 1 para identificação e cálculo do $H^*(10)$. As camadas intermediárias foram configuradas para 45, 91 e 169 neurônios.

A RN utilizada para base TRS403E286 foi configurada também para 5 camadas. Esta rede foi realizada como a junção dos elementos das duas bases anteriores somando num total de 286 pares de entrada e saída, utilizando-se os mesmos números de neurônios da base TRS403E202 em cada camada.

3.4.2 Reconhecimento de Espectro

Após o treinamento o programa NEURALN é capaz de determinar um espectro a partir de um conjunto com no máximo 7 vetores de entrada. Deve-se criar um arquivo de entrada do tipo *.txt* com as contagens obtidas com o EB normalizadas a uma unidade. Este arquivo é processado e convertido num outro com o mesmo nome, mas com uma extensão do tipo *.fon*. O reconhecimento é realizado através de um arquivo do tipo *.pes* originado durante o treinamento. Assim, é criado um arquivo modelo (planilha de resultados) com os valores de fluência em 84 intervalos de energia e o cálculo de equivalente de dose ambiente. Esta planilha de resultados é pré-preparada com vínculos em determinadas células para obtenção automática do espectro de nêutrons.

3.5 Cálculo da Energia Média

Além da espectrometria, a determinação do equivalente de dose ambiente e da identificação do espectro, foi realizada também a determinação da energia média do espectro para fluência. Este cálculo foi inserido na planilha de resultados estando fora da estrutura da RN. A energia média é obtida pela seguinte equação:

$$EnM = \frac{\sum_{k=1}^{84} (E_{k-1} + E_k) \cdot \phi_k}{2 \sum_{k=1}^{84} \phi_k}, \quad (14)$$

onde

ϕ_k é a fluência de nêutrons para o intervalo de energia E_k .

A Equação 14 representa a energia média calculada a partir dos dados de referência e dos valores da própria saída da RN.

3.6 Modelo de Incerteza dos resultados da RN

O modelo utilizado para expressar as incertezas neste trabalho teve como base os procedimentos recomendados pela *Bureau Internacional de Pesos e Medidas – BIPM* e pode ser conferido no *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição* (ISOGUM, 1998). A incerteza foi determinada para os resultados obtidos do equivalente de dose ambiente e para os valores da energia média da fluência, ambos calculados para cada espectro gerado pela RN.

Energia Média

Partindo da definição: $E_{k-1/2} = (E_{k-1} + E_k)$, podemos reescrever a Equação 14 da seguinte forma:

$$EnM = \frac{\sum_{k=1}^{84} (E_{k-1/2}) \cdot \phi_k}{2 \sum_{k=1}^{84} \phi_k}. \quad (15)$$

Como o treinamento da RN permitia na saída do espectro uma diferença máxima de 0,05, o que corresponde um valor máximo de 5% de incerteza na determinação de cada saída do neurônio, podemos desenvolver uma estimativa da incerteza a partir da Equação 15. Portanto, conforme os requerimentos do ISOGUM (1998), a expressão que define a estimativa é representada pela seguinte equação:

$$u(EnM) = \pm \sqrt{\left[\sum_{k=1}^{84} \left[\frac{\left(E_{k-1/2} - 2 \sum_{j=1}^{84} E_{j-1/2} \phi_j \right)}{4 \left[\sum_{j=1}^{84} \phi_j \right]^2} \right]^2 \right]} \cdot u^2(\phi_k), \quad (16)$$

ou, considerando que a fluência total é $\phi_T = \sum_{k=1}^{84} \phi_k$, simplesmente temos:

$$u(EnM) = \pm \sqrt{\left[\sum_{k=1}^{84} \left[\frac{E_{k-1/2}}{4\phi_T^2} - \frac{EnM}{2\phi_T} \right]^2 \right]} \cdot u^2(\phi_k). \quad (17)$$

Equivalente de Dose Ambiente

Analogamente ao cálculo da incerteza para energia média, e partindo da definição do equivalente de dose ambiente, conforme a Equação 13, a expressão que define a estimativa de incerteza é representada pela seguinte equação:

$$u(H^*(10)) = \pm \sqrt{\left[\sum_{k=1}^{84} \left[\frac{\left(h_k^* \sum_{j=1}^{84} \phi_j - \sum_{j=1}^{84} \phi_j h_j^* \right)^2}{\left(\sum_{j=1}^{84} \phi_j \right)^2} u^2(\phi_k) \right] + \sum_{k=1}^{84} \left[\frac{\phi_k}{\sum_{j=1}^{84} \phi_j} \right]^2 u^2(h_k^*) \right]}, \quad (18)$$

ou, considerando $\sum_{j=1}^{84} \phi_j = \phi_T$, temos:

$$u(H^*(10)) = \pm \sqrt{\sum_{k=1}^{84} \left[\left(\frac{h_k^* - H^*(10)}{\phi_T} \right)^2 u^2(\phi_k) \right] + \sum_{k=1}^{84} \left[\left(\frac{\phi_k}{\phi_T} \right)^2 u^2(h_k^*) \right]} \quad (19)$$

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 A Matriz Resposta

Os resultados referentes ao cálculo da matriz resposta para todos os detectores (sem e com esfera) são apresentados na Tabela 4.1. A resposta para cada detector está normalizada a uma unidade e pode ser melhor visualizada na Figura 4.1. Observa-se que existe uma tendência na forma da curva em cada esfera que depende da energia do nêutron e do diâmetro da mesma, ou seja, a sensibilidade máxima na resposta aumenta para as esferas de maiores diâmetros com o aumento da energia, na medida em que os nêutrons de baixas energias são cada vez mais espalhados e capturados no interior do moderador.

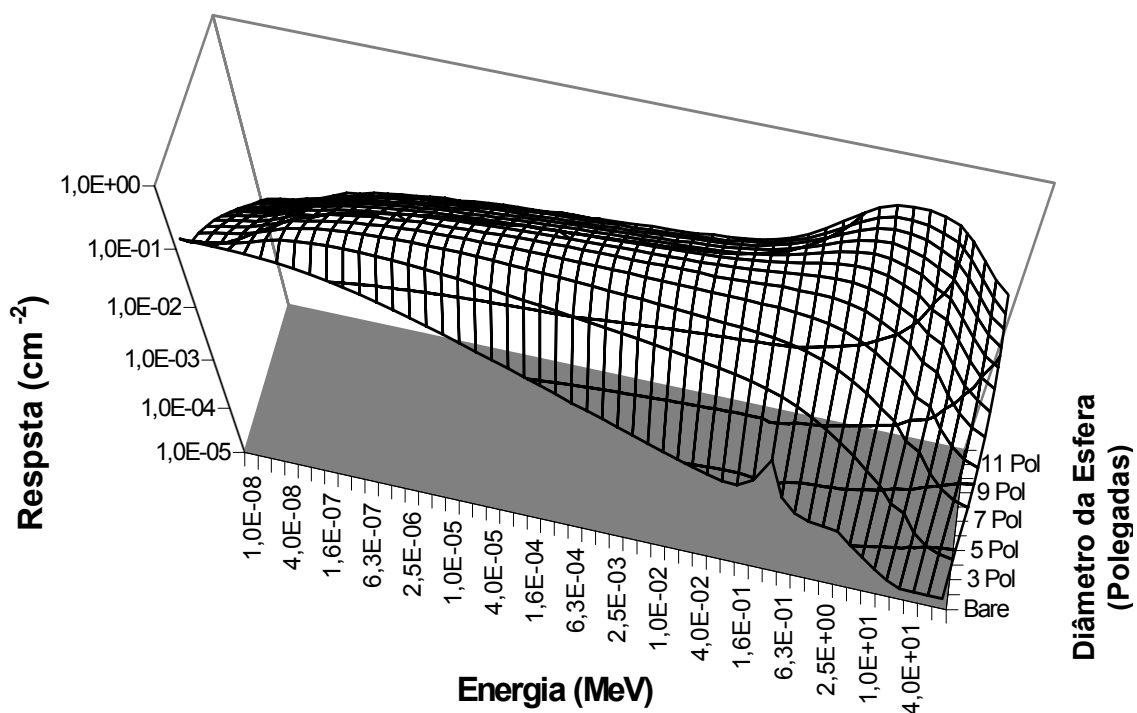


Figura 4.1. Matriz resposta obtida no presente trabalho através do Código MCNP (resposta cm^{-2}) em função da energia (MeV) do nêutron por diâmetro da esfera (polegadas)).

Tabela 4.1. Matriz resposta ROB3 obtida com o Código MCNP para o detector sem esfera (nu) e para os detectores com diâmetros de 1 a 12 polegadas inteiras, correspondendo a 2,54 cm, 5,08 cm, 7,62 cm, 10,16 cm, 12,70 cm, 15,24 cm, 17,78 cm, 20,32 cm, 22,86 cm, 25,40 cm, 27,94 cm e 30,48 cm.

E(MeV)	Nu	1"	2"	3"	4"	5"	6"	7"	8"	9"	10"	11"	12"
1,00E-09	0,153	0,075	0,057	0,042	0,03	0,021	0,013	0,009	0,006	0,004	0,002	0,001	0,001
1,59E-09	0,154	0,079	0,057	0,044	0,031	0,022	0,015	0,01	0,006	0,004	0,002	0,001	0,001
2,51E-09	0,154	0,084	0,06	0,047	0,033	0,022	0,015	0,01	0,006	0,004	0,003	0,002	0,001
3,98E-09	0,154	0,09	0,062	0,05	0,035	0,024	0,016	0,011	0,007	0,004	0,003	0,002	0,001
6,31E-09	0,154	0,098	0,068	0,053	0,038	0,026	0,018	0,012	0,007	0,005	0,003	0,002	0,001
1,00E-08	0,154	0,109	0,078	0,057	0,043	0,029	0,02	0,013	0,009	0,005	0,003	0,002	0,001
1,20E-08	0,153	0,112	0,08	0,061	0,045	0,031	0,021	0,013	0,009	0,005	0,003	0,002	0,001
1,45E-08	0,153	0,116	0,082	0,064	0,047	0,032	0,022	0,014	0,009	0,006	0,004	0,002	0,001
1,74E-08	0,152	0,119	0,089	0,068	0,048	0,033	0,022	0,014	0,009	0,006	0,004	0,002	0,001
2,09E-08	0,152	0,122	0,092	0,071	0,051	0,034	0,023	0,014	0,009	0,006	0,004	0,002	0,001
2,51E-08	0,151	0,125	0,098	0,074	0,053	0,035	0,025	0,016	0,01	0,006	0,004	0,002	0,001
3,02E-08	0,149	0,127	0,101	0,074	0,057	0,037	0,026	0,017	0,011	0,007	0,004	0,002	0,001
3,63E-08	0,148	0,13	0,106	0,081	0,059	0,039	0,028	0,018	0,011	0,007	0,004	0,003	0,002
4,37E-08	0,147	0,133	0,112	0,088	0,063	0,042	0,028	0,019	0,012	0,007	0,005	0,003	0,002
5,25E-08	0,145	0,136	0,119	0,093	0,067	0,045	0,03	0,019	0,012	0,008	0,005	0,003	0,002
6,31E-08	0,142	0,138	0,124	0,1	0,072	0,049	0,034	0,022	0,013	0,008	0,005	0,003	0,002
7,59E-08	0,14	0,14	0,136	0,108	0,078	0,053	0,037	0,023	0,015	0,009	0,006	0,004	0,002
9,12E-08	0,137	0,142	0,148	0,118	0,084	0,058	0,04	0,024	0,016	0,01	0,006	0,004	0,002
1,10E-07	0,134	0,143	0,161	0,128	0,094	0,064	0,041	0,027	0,017	0,01	0,007	0,004	0,002
1,32E-07	0,13	0,143	0,172	0,138	0,101	0,07	0,047	0,028	0,019	0,012	0,007	0,004	0,003
1,59E-07	0,126	0,143	0,181	0,15	0,111	0,076	0,05	0,031	0,021	0,013	0,008	0,005	0,003
1,91E-07	0,122	0,142	0,186	0,158	0,115	0,078	0,055	0,034	0,022	0,013	0,008	0,005	0,003
2,29E-07	0,118	0,141	0,19	0,164	0,121	0,082	0,057	0,035	0,021	0,014	0,009	0,005	0,003
2,75E-07	0,113	0,138	0,197	0,175	0,128	0,087	0,058	0,038	0,023	0,014	0,009	0,006	0,003
3,31E-07	0,108	0,135	0,2	0,182	0,135	0,093	0,061	0,04	0,025	0,016	0,01	0,006	0,004
3,98E-07	0,103	0,132	0,208	0,187	0,142	0,097	0,065	0,04	0,027	0,017	0,01	0,006	0,004
4,79E-07	0,098	0,129	0,212	0,195	0,147	0,103	0,068	0,044	0,027	0,018	0,01	0,007	0,004
5,75E-07	0,093	0,125	0,214	0,2	0,15	0,107	0,07	0,045	0,029	0,018	0,011	0,007	0,004
6,92E-07	0,088	0,121	0,215	0,205	0,16	0,112	0,072	0,047	0,03	0,019	0,011	0,007	0,004
8,32E-07	0,083	0,117	0,22	0,212	0,164	0,117	0,074	0,048	0,032	0,018	0,012	0,007	0,005
1,00E-06	0,079	0,113	0,218	0,217	0,17	0,119	0,078	0,047	0,032	0,02	0,013	0,008	0,005
1,59E-06	0,067	0,102	0,214	0,229	0,179	0,127	0,083	0,056	0,035	0,022	0,013	0,008	0,005
2,51E-06	0,056	0,091	0,215	0,237	0,193	0,14	0,089	0,058	0,038	0,022	0,014	0,008	0,005
3,98E-06	0,047	0,08	0,208	0,242	0,197	0,145	0,099	0,063	0,04	0,025	0,015	0,009	0,006
6,31E-06	0,039	0,071	0,204	0,249	0,213	0,155	0,103	0,067	0,044	0,026	0,017	0,01	0,006
1,00E-05	0,032	0,061	0,194	0,245	0,218	0,159	0,111	0,07	0,045	0,027	0,018	0,01	0,007
1,59E-05	0,026	0,052	0,182	0,246	0,221	0,169	0,116	0,074	0,048	0,03	0,018	0,011	0,007
2,51E-05	0,021	0,044	0,173	0,247	0,226	0,174	0,12	0,078	0,05	0,03	0,019	0,012	0,007
3,98E-05	0,016	0,037	0,159	0,244	0,231	0,178	0,121	0,077	0,054	0,032	0,021	0,013	0,007
6,31E-05	0,013	0,032	0,15	0,24	0,229	0,179	0,129	0,084	0,053	0,034	0,021	0,013	0,008
1,00E-04	0,011	0,027	0,141	0,23	0,234	0,184	0,129	0,088	0,057	0,035	0,022	0,013	0,008
1,59E-04	0,009	0,022	0,13	0,226	0,233	0,189	0,136	0,09	0,057	0,037	0,023	0,013	0,008
2,51E-04	0,007	0,019	0,123	0,222	0,233	0,191	0,139	0,092	0,059	0,037	0,023	0,014	0,009
3,98E-04	0,005	0,016	0,111	0,208	0,23	0,193	0,142	0,094	0,063	0,038	0,024	0,014	0,009
6,31E-04	0,004	0,013	0,103	0,202	0,231	0,197	0,141	0,096	0,062	0,039	0,025	0,016	0,009
1,00E-03	0,003	0,011	0,096	0,202	0,23	0,2	0,144	0,101	0,066	0,039	0,026	0,016	0,01
1,59E-03	0,003	0,009	0,091	0,193	0,228	0,2	0,151	0,104	0,068	0,043	0,027	0,016	0,01
2,51E-03	0,002	0,008	0,081	0,185	0,225	0,2	0,156	0,102	0,069	0,046	0,027	0,016	0,01
3,98E-03	0,002	0,006	0,074	0,183	0,222	0,204	0,157	0,109	0,072	0,048	0,029	0,018	0,011
6,31E-03	0,001	0,005	0,069	0,173	0,214	0,207	0,161	0,113	0,073	0,049	0,03	0,018	0,011
1,00E-02	0,001	0,004	0,063	0,159	0,208	0,209	0,165	0,115	0,076	0,048	0,031	0,019	0,012
1,26E-02	0,001	0,004	0,059	0,157	0,206	0,208	0,166	0,118	0,079	0,052	0,032	0,018	0,012
1,59E-02	0,001	0,003	0,057	0,157	0,206	0,206	0,167	0,122	0,079	0,052	0,033	0,019	0,012
2,00E-02	0,001	0,003	0,053	0,155	0,209	0,207	0,17	0,117	0,082	0,053	0,033	0,02	0,012
2,51E-02	0,001	0,003	0,05	0,155	0,213	0,209	0,167	0,132	0,083	0,056	0,034	0,02	0,013

Tabela 4.1. (Continuação)

E(MeV)	Nu	1"	2"	3"	4"	5"	6"	7"	8"	9"	10"	11"	12"
3,16E-02	0,001	0,002	0,049	0,148	0,208	0,210	0,175	0,128	0,086	0,056	0,036	0,021	0,013
3,98E-02	0,001	0,002	0,047	0,144	0,209	0,212	0,180	0,129	0,089	0,058	0,037	0,023	0,014
5,01E-02	0,001	0,002	0,043	0,140	0,205	0,216	0,187	0,137	0,093	0,060	0,039	0,023	0,015
6,31E-02	0,001	0,002	0,040	0,137	0,207	0,216	0,185	0,140	0,097	0,064	0,041	0,025	0,015
7,94E-02	0,000	0,002	0,037	0,134	0,211	0,222	0,190	0,146	0,101	0,068	0,044	0,026	0,017
1,00E-01	0,000	0,001	0,034	0,129	0,205	0,226	0,197	0,160	0,106	0,072	0,046	0,028	0,018
1,26E-01	0,001	0,001	0,033	0,124	0,203	0,229	0,202	0,161	0,114	0,078	0,050	0,030	0,020
1,59E-01	0,001	0,001	0,031	0,118	0,201	0,232	0,208	0,173	0,123	0,084	0,054	0,033	0,021
2,00E-01	0,001	0,002	0,029	0,113	0,199	0,236	0,218	0,182	0,133	0,093	0,062	0,038	0,025
2,51E-01	0,002	0,002	0,025	0,107	0,198	0,239	0,228	0,195	0,144	0,103	0,069	0,046	0,028
3,16E-01	0,001	0,001	0,022	0,102	0,189	0,238	0,237	0,207	0,157	0,113	0,079	0,050	0,033
3,98E-01	0,000	0,001	0,019	0,094	0,186	0,239	0,247	0,209	0,171	0,126	0,090	0,060	0,040
5,01E-01	0,000	0,001	0,015	0,085	0,174	0,235	0,250	0,224	0,178	0,143	0,103	0,069	0,048
6,31E-01	0,000	0,000	0,014	0,074	0,161	0,232	0,249	0,234	0,200	0,158	0,115	0,083	0,059
7,94E-01	0,000	0,000	0,011	0,066	0,158	0,222	0,245	0,244	0,220	0,176	0,137	0,100	0,071
1,00E+00	0,000	0,000	0,009	0,060	0,139	0,216	0,252	0,256	0,229	0,193	0,151	0,115	0,089
1,26E+00	0,000	0,000	0,008	0,049	0,124	0,196	0,237	0,248	0,240	0,207	0,171	0,137	0,107
1,59E+00	0,000	0,000	0,006	0,041	0,109	0,182	0,225	0,248	0,241	0,221	0,188	0,154	0,125
2,00E+00	0,000	0,000	0,005	0,035	0,095	0,161	0,210	0,240	0,244	0,227	0,203	0,176	0,146
2,51E+00	0,000	0,000	0,004	0,028	0,081	0,141	0,194	0,224	0,235	0,225	0,211	0,192	0,159
3,16E+00	0,000	0,000	0,003	0,022	0,067	0,120	0,168	0,203	0,215	0,212	0,202	0,173	0,161
3,98E+00	0,000	0,000	0,002	0,018	0,055	0,101	0,152	0,181	0,195	0,201	0,194	0,181	0,167
5,01E+00	0,000	0,000	0,002	0,014	0,043	0,086	0,133	0,161	0,190	0,197	0,194	0,189	0,185
6,31E+00	0,000	0,000	0,001	0,011	0,036	0,071	0,114	0,145	0,156	0,177	0,176	0,186	0,166
7,94E+00	0,000	0,000	0,001	0,008	0,026	0,054	0,091	0,117	0,130	0,150	0,150	0,163	0,157
1,00E+01	0,000	0,000	0,001	0,006	0,019	0,042	0,069	0,091	0,112	0,129	0,141	0,149	0,147
1,26E+01	0,000	0,000	0,001	0,005	0,017	0,034	0,056	0,077	0,096	0,111	0,116	0,126	0,134
1,59E+01	0,000	0,000	0,000	0,004	0,015	0,031	0,051	0,070	0,087	0,100	0,111	0,114	0,121
2,00E+01	0,000	0,000	0,000	0,003	0,010	0,022	0,036	0,052	0,065	0,078	0,087	0,092	0,098

4.2 A Validação da Matriz Resposta ROB3

A validação da matriz ROB3 foi realizada através do programa BUNKI conforme metodologia desenvolvida no trabalho de LEMOS (2004) e medições experimentais realizadas no mesmo. Os resultados de saídas são expressos em vinte e cinco intervalos de energia (de $4,14 \times 10^{-7}$ a $1,49 \times 10^1$ MeV) e são esboçados nos gráficos das Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 aqueles intervalos mais representativos dos espectros, pela fluência de nêutrons normalizada a uma unidade por letargia versus energia (MeV) em escala logarítmica conforme os espectros de referência de $^{241}\text{AmBe}$, ^{252}Cf e $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$ publicados na Norma ISO 8529-1 (2001). A variável conhecida como letargia é comumente adotada nos gráficos que apresentam curvas obtidas dos espectros de nêutrons, com o propósito de facilitar sua visualização. Uma definição mais detalhada desta variável pode ser verificada na referência TRS (1982).

Foram utilizadas nas comparações com a ROB3 as matrizes SAN4 e UTA4 (LOWRY e JOHNSON, 1984a, 1984b), que foram aplicadas em diversos trabalhos encontrados na literatura (ESPOSITO e NANDY, 2004, CARRILLO, 2005, 2006, 2007). Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados gerados dos vinte e cinco intervalos de energia para comparação com as matrizes SAN4, UTA4 e ROB3, através do programa BUNKI, para o espectro de $^{241}\text{AmBe}$. A Figura 4.2 mostra as respostas obtidas para os dez últimos intervalos de energia mais representativos, de 11,7 keV a 14,9 MeV, referentes às matrizes mencionadas sobrepostas à curva de referência do espectro de $^{241}\text{AmBe}$.

O programa BUNKI não apresenta boa resolução nos resultados, ele oferece apenas vinte e cinco pontos distribuídos até 14,9 MeV que não são suficientes para um resultado bem discriminado. Mesmo assim, pode-se observar pela Figura 4.2 que os resultados para as matrizes SAN4 e UTA4 são semelhantes entre si com uma pequena diferença entre os seus pontos máximos, de aproximadamente 3,2% do maior valor. Elas diferem da curva de referência do $^{241}\text{AmBe}$ com um deslocamento para direita de aproximadamente 7,3% entre os seus pontos máximos em relação ao maior valor da faixa representativa (14,9 MeV). Já o resultado proveniente da matriz ROB3 não apresenta este deslocamento, mas, por outro lado, apresenta no seu ponto máximo uma diferença a menos de 23,6% na magnitude em relação ao ponto máximo da matriz SAN4, a menos de 21,1% na magnitude em relação ao máximo da UTA4 e a menos de 32,3% em relação ao máximo da curva de referência do $^{241}\text{AmBe}$.

Tabela 4.2. Fluência de nêutrons normalizada por letargia (cm^{-2}) gerada com o BUNKI para matrizes SAN4, UTA4 e ROB3 do espectro de $^{241}\text{AmBe}$ da Norma ISO 8529-1 (2001).

Energia (MeV)	SAN4	UTA4	ROB3
4,14E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
6,83E-07	1,64E-03	1,38E-03	5,25E-03
1,45E-06	1,62E-03	1,46E-03	5,40E-03
3,06E-06	1,56E-03	1,56E-03	5,30E-03
6,48E-06	1,51E-03	1,66E-03	5,29E-03
1,37E-05	1,44E-03	1,75E-03	5,22E-03
2,90E-05	1,37E-03	1,84E-03	5,29E-03
6,14E-05	1,29E-03	1,96E-03	5,32E-03
1,30E-04	1,20E-03	1,95E-03	5,12E-03
2,75E-04	1,11E-03	1,96E-03	5,04E-03
5,93E-04	1,01E-03	1,94E-03	4,85E-03
1,23E-03	9,11E-04	1,88E-03	4,75E-03
2,61E-03	8,35E-04	1,82E-03	4,66E-03
5,53E-03	8,26E-04	1,84E-03	4,55E-03
1,17E-02	1,01E-03	2,11E-03	4,29E-03
2,48E-02	2,53E-03	3,87E-03	4,91E-03
5,25E-02	6,99E-03	1,08E-02	5,89E-03
1,11E-01	1,76E-02	2,65E-02	1,28E-02
2,24E-01	3,59E-02	5,09E-02	3,02E-02
4,51E-01	5,56E-02	7,00E-02	6,50E-02
9,07E-01	7,39E-02	8,11E-02	1,17E-01
1,87E+00	1,20E-01	1,24E-01	2,32E-01
3,68E+00	2,83E-01	2,76E-01	4,01E-01
7,41E+00	5,28E-01	5,11E-01	4,03E-01
1,49E+01	2,19E-01	2,01E-01	7,67E-02

Assim, observa-se que os resultados expressos com as matrizes SAN4, UTA4 e ROB3 através do programa BUNKI possuem diferenças significativas em relação à curva de referência do $^{241}\text{AmBe}$. Isto se deve ao fato do programa BUNKI não apresentar boa resolução no processo de desdobramento de espectros de nêutrons (LEMOS, 2004). Agora, realizando uma comparação entre as matrizes SAN4 e UTA4 com a ROB3 desenvolvida neste trabalho, pode-se afirmar que, para o espectro de $^{241}\text{AmBe}$, a ROB3 se aproxima da referência ISO 8529-1 (2001) com uma maior faixa entre os pontos mais altos de 3,68 a 7,41 MeV, e a diferença na magnitude pode ser corrigida por um fator de 1,3 aproximadamente.

Através do BUNKI foi obtido, também, a energia média do espectro de $^{241}\text{AmBe}$. Para a SAN4 obteve-se 4,44 MeV, para a UTA4 obteve-se 4,17 MeV, e para a

ROB3 obteve-se 3,10 MeV. Observa-se que os valores mais próximos são os das matrizes do BUNKI, estando também mais próximos do valor de referência, que de 4,16 MeV publicada na ISO 8529-1 (2001).

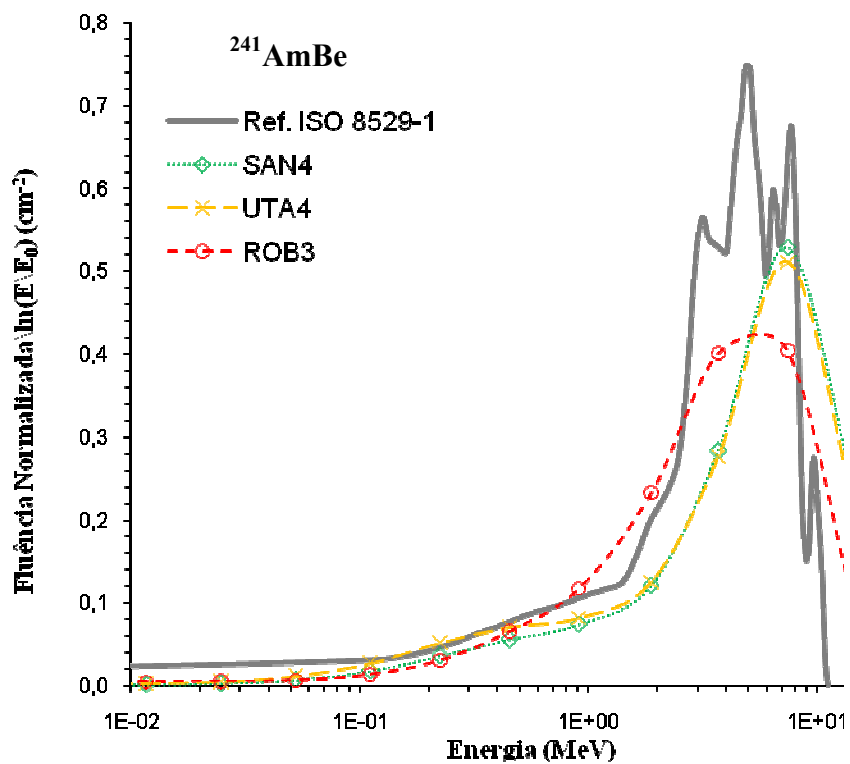


Figura 4.2. Respostas obtidas para as matrizes SAN4, UTA4 e ROB3 através do Código BUNKI, sobrepostas à curva de referência do espectro de $^{241}\text{AmBe}$ (ISO 8529-1, 2001).

Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados da fluência de nêutrons normalizada por letargia (cm^{-2}) gerados dos vinte e cinco intervalos de energia para comparação com as matrizes SAN4, UTA4 e ROB3, através do programa BUNKI, para o espectro de ^{252}Cf . A Figura 4.3 mostra as respostas obtidas para os dez últimos intervalos de energia mais representativos, de 11,7 keV a 10 MeV, referentes às matrizes mencionadas sobrepostas à curva de referência do espectro de ^{252}Cf .

Tabela 4.3. Fluência de nêutrons normalizada por letargia (cm^{-2}) gerada com o BUNKI para matrizes SAN4, UTA4 e ROB3 do espectro de ^{252}Cf da Norma ISO 8529-1 (2001).

Energia (MeV)	SAN4	UTA4	ROB3
4,14E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
6,83E-07	8,65E-04	7,37E-04	4,01E-04
1,45E-06	9,37E-04	8,77E-04	5,07E-04
3,06E-06	1,03E-03	1,08E-03	6,57E-04
6,48E-06	1,14E-03	1,33E-03	8,59E-04
1,37E-05	1,25E-03	1,64E-03	1,12E-03
2,90E-05	1,38E-03	2,01E-03	1,46E-03
6,14E-05	1,52E-03	2,47E-03	1,92E-03
1,30E-04	1,67E-03	3,06E-03	2,46E-03
2,75E-04	1,84E-03	3,77E-03	3,20E-03
5,93E-04	2,03E-03	4,67E-03	4,13E-03
1,23E-03	2,24E-03	5,78E-03	5,33E-03
2,61E-03	2,48E-03	7,16E-03	6,88E-03
5,53E-03	2,78E-03	8,92E-03	9,03E-03
1,17E-02	3,22E-03	1,12E-02	1,15E-02
2,48E-02	3,99E-03	1,44E-02	1,61E-02
5,25E-02	5,71E-03	1,93E-02	2,23E-02
1,11E-01	1,23E-02	2,80E-02	3,50E-02
2,24E-01	3,43E-02	4,55E-02	6,51E-02
4,51E-01	9,02E-02	9,73E-02	1,58E-01
9,07E-01	2,12E-01	2,27E-01	3,04E-01
1,87E+00	4,32E-01	4,03E-01	4,45E-01
3,68E+00	4,38E-01	3,91E-01	2,76E-01
7,41E+00	1,46E-01	1,28E-01	3,41E-02
1,49E+01	6,50E-03	5,19E-03	3,05E-04

A fonte de ^{252}Cf tinha uma produção de nêutrons da ordem de 10^8 s^{-1} no dia da medição. O seu espectro estendeu significativamente em um intervalo de 100 keV a 10 MeV aproximadamente (TRS, 1988). A baixa resolução em energia oferecida pelo programa não dificultou tanto a análise deste espectro, como aconteceu para os resultados do $^{241}\text{AmBe}$. A forma do espectro de referência do ^{252}Cf corresponde bem a uma maxwelliana, não necessitando de um número muito grande de pontos para gerar um espectro com este formato. Assim, as respostas obtidas com os resultados das matrizes para este espectro apresentaram melhores formas.

As matrizes SAN4, UTA4 e ROB3 apresentaram formas semelhantes em relação à curva de referência, onde a SAN4 mostrou um pequeno deslocamento para a direita com uma perda 5,1% no ganho em relação ao máximo da curva de referência. A UTA4 também sofreu um pequeno deslocamento para a direita, com uma perda de 12,7% no ganho em relação ao máximo da curva de referência. Já a ROB3 sofreu um pequeno deslocamento para esquerda, com uma perda de apenas 3,6% no ganho também em relação ao máximo da curva de referência. Portanto, pode-se dizer que a matriz ROB3 desempenha bom comportamento, sendo capaz de gerar uma curva também representativa para este espectro, no processo de desdobramento através do programa BUNKI.

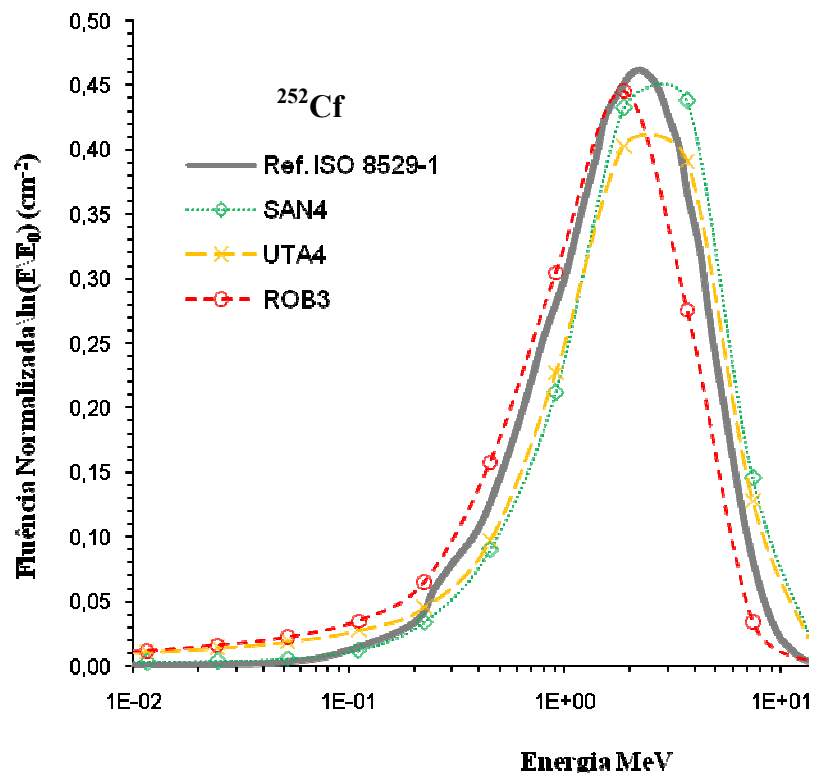


Figura 4.3. Respostas obtidas para as matrizes SAN4, UTA4 e ROB3 através do Código BUNKI, sobrepostas à curva de referência do espectro de ^{252}Cf (ISO 8529-1, 2001).

Através do BUNKI, foi obtido a energia média do espectro de ^{252}Cf . Para a SAN4 se obteve 1,92 MeV, para a UTA4 se obteve 1,72 MeV, e para a ROB3 se obteve 1,23 MeV. Observa-se que com a matriz SAN4 se obtém o valor mais próximos da referência, que é de 2,13 MeV publicada na ISO 8529-1 (2001).

Na Tabela 4.4 são apresentados os resultados da fluência de nêutrons normalizada por letargia (cm^{-2}) gerados dos vinte e cinco intervalos de energia para comparação com as matrizes SAN4, UTA4 e ROB3, através do programa BUNKI, para o espectro de $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$. A Figura 4.4 mostra as respostas obtidas referentes às matrizes mencionadas sobrepostas à curva de referência dos espectros de $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$.

Tabela 4.4. Fluência de nêutrons normalizada por letargia (cm^{-2}) gerada com o BUNKI para matrizes SAN4, UTA4 e ROB3 do espectro de $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$ da Norma ISO 8529-1 (2001).

Energia (MeV)	SAN4	UTA4	ROB3
4,14E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
6,83E-07	3,47E-05	2,28E-04	2,34E-04
1,45E-06	8,85E-05	4,95E-04	8,32E-04
3,06E-06	2,42E-04	1,22E-03	1,56E-03
6,48E-06	6,37E-04	2,88E-03	3,88E-03
1,37E-05	1,61E-03	6,41E-03	7,32E-03
2,90E-05	3,80E-03	1,32E-02	1,89E-02
6,14E-05	8,31E-03	2,79E-02	4,23E-02
1,30E-04	1,66E-02	4,26E-02	4,82E-02
2,75E-04	3,04E-02	6,50E-02	7,40E-02
5,93E-04	5,02E-02	9,12E-02	7,71E-02
1,23E-03	7,51E-02	1,13E-01	1,05E-01
2,61E-03	1,02E-01	1,29E-01	1,31E-01
5,53E-03	1,27E-01	1,36E-01	1,44E-01
1,17E-02	1,44E-01	1,32E-01	7,88E-02
2,48E-02	1,50E-01	1,17E-01	1,63E-01
5,25E-02	1,40E-01	9,35E-02	7,87E-02
1,11E-01	1,11E-01	6,37E-02	5,41E-02
2,24E-01	7,31E-02	3,82E-02	3,11E-02
4,51E-01	4,65E-02	2,48E-02	3,53E-02
9,07E-01	3,51E-02	2,62E-02	3,85E-02
1,87E+00	5,28E-02	4,07E-02	5,97E-02
3,68E+00	6,49E-02	5,83E-02	6,50E-02
7,41E+00	6,69E-02	6,68E-02	5,20E-02
1,49E+01	6,05E-02	6,47E-02	4,52E-02

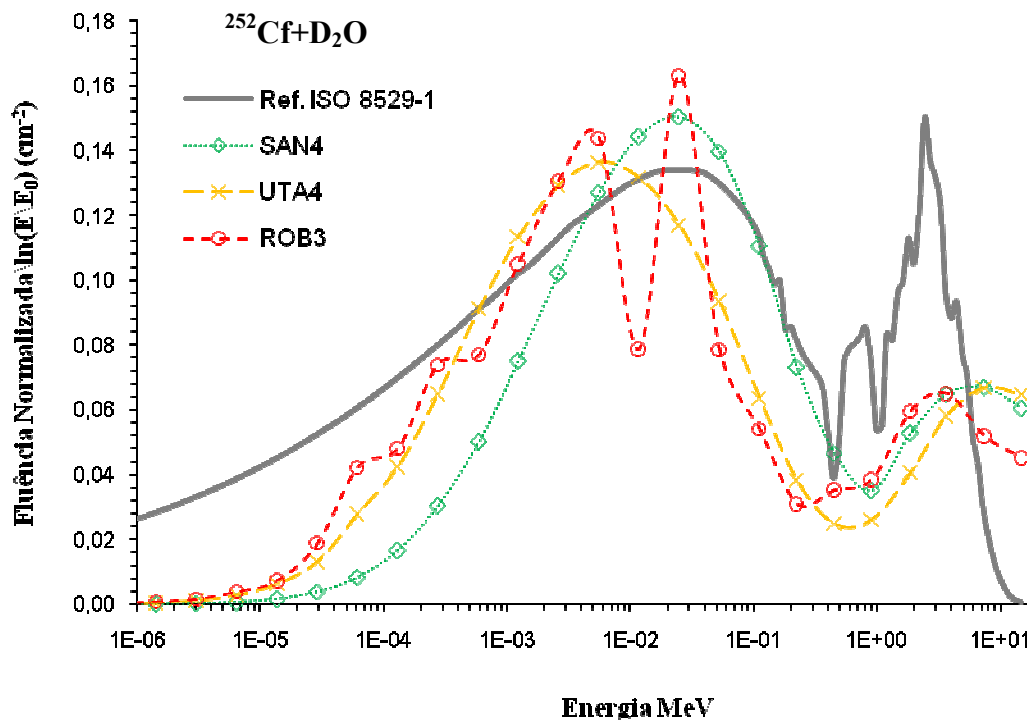


Figura 4.4. Respostas obtidas para as matrizes SAN4, UTA4 e ROB3 através do Código BUNKI, sobrepostas à curva de referência do espectro de $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$ (ISO 8529-1, 2001).

A fonte de $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$ tem um espectro diferenciado, com um número considerável de nêutrons em regiões de mais baixa energia. Com a moderação produzida pela D_2O , além da redução da energia média do espectro de nêutrons, muitos deles são absorvidos provocando uma redução de aproximadamente 11% dos nêutrons emitidos pela fonte de ^{252}Cf . Isto faz com que o equivalente de dose por unidade de fluência, para uma fonte de ^{252}Cf centralizada em uma esfera de 30 cm de diâmetro com D_2O , seja reduzida a quarta parte, aproximadamente, comparando com a fonte livre (TRS, 1988). Na Figura 4.4, diferente dos espectros de $^{241}\text{AmBe}$ e de ^{252}Cf , são apresentados os resultados das matrizes em todos os vinte e cinco intervalo de energia, pois, devido à moderação, os nêutrons também são distribuídos em intervalos de energia menores. Para este espectro, ficam claras as concordâncias e discordâncias dos resultados em relação à referência, já que se tem um número maior de pontos para a geração dos espectros das matrizes.

As respostas das três matrizes se apresentaram de forma semelhante entre si. Um deslocamento pode ser observado na resposta da matriz UTA4 e da ROB3 comparado com a SAN4. Os três espectros comparados com a referência não obtiveram boa forma,

pelo fato do programa ser pobre na resolução em energia, conforme comentado na avaliação do espectro de $^{241}\text{AmBe}$.

Em relação à energia média do $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$, foi obtido, tanto para a SAN4 como para a UTA4, o valor de 0,9 MeV, e com a ROB3 foi obtido um valor de 0,73 MeV. Como o valor de referência é de 0,55 MeV, publicado na ISO 8529-1 (2001), a ROB3 se torna o melhor resultado, apesar da curva não apresentar uma boa forma.

4.3 A Simulação da Resposta do EB

A resposta do EB foi simulada para os espectros de referência $^{241}\text{AmBe}$, ^{252}Cf e $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$ da Norma ISO8529-1 (2001), de forma similar ao cálculo da ROB3, através do Código de transporte de radiação MCNP (2001). A diferença está na substituição dos feixes monoenergéticos para os espectros citados acima considerando a geometria da fonte localizada a 100 cm do detector.

Com a simulação, foram determinadas contagens com as esferas moderadoras de diâmetros diferentes e uma com o detector nu sem esfera, somando num total de 7 contagens. A Tabela 4.5 mostra os resultados obtidos para cada espectro de nêutrons e para cada esfera utilizada na medição, com 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”). A indicação 0 cm significa que nenhuma esfera foi utilizada. A incerteza estatística em função da simulação foi abaixo de 3% em cada esfera simulada.

Além da resposta simulada do EB, são apresentadas na Tabela 4.5, apenas para comparação, as contagens obtidas originadas no trabalho experimental de LEMOS (2004) e aquelas determinadas pela da integral de Fredholm (Equação 1 do subitem 2.1.1) discretizada para 84 intervalos de energia. Isto, considerando a fluência de nêutrons em energia do espectro de referência e a distribuição de probabilidades da matriz ROB3, conforme a Equação 12 do subitem 3.4.1 (ISO (ROB3)). Todas as contagens foram normalizadas a uma unidade.

A Figura 4.5 mostra que os resultados da simulação do EB para o espectro de $^{241}\text{AmBe}$ se apresentaram de forma coerente comparado com os resultados experimentais de LEMOS (2004), e aqueles obtidos a partir da Equação 12. Uma diferença no ponto máximo curva de 6,5%, para a esfera de 8 polegadas de diâmetro (20,32 cm), foi encontrada comparando com LEMOS (2004). Uma diferença no ponto

máximo da curva de 11,5%, para a esfera de 8 polegadas de diâmetros (20,32 cm), foi encontrada na comparação com os resultados obtidos da Equação 12.

A Figura 4.6 mostra os resultados para o espectro de ^{252}Cf , que apresenta uma diferença de 7,8% no ponto máximo da curva, para a esfera de 10 polegadas (20,32 cm), tanto na comparação com os resultados experimentais de LEMOS (2004), como na comparação com os resultados obtidos da Equação 12. A Figura 4.7 mostra os resultados para o espectro de $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$, onde a diferença no ponto máximo da curva foi de 5,6%, para esfera de 5 polegadas (12,7 cm), na comparação com os resultados experimentais de LEMOS (2004), e 4,6% na comparação com os resultados obtidos da Equação 12.

Tabela 4.5. Contagens obtidas com a simulação da resposta do EB em comparação com as contagens do trabalho de LEMOS (2004) e aquelas obtidas a partir da Equação 12.

Esferas (cm)	Contagens Normalizadas $^{241}\text{AmBe}$			Contagens Normalizadas ^{252}Cf			Contagens Normalizadas $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$		
	<i>Simulação</i>	<i>LEMOS</i>	<i>ISO</i>	<i>Simulação</i>	<i>LEMOS</i>	<i>ISO</i>	<i>Simulação</i>	<i>LEMOS</i>	<i>ISO</i>
	<i>EB</i>	<i>(2004)</i>	<i>(ROB3)</i>	<i>EB</i>	<i>(2004)</i>	<i>(ROB3)</i>	<i>EB</i>	<i>(2004)</i>	<i>(ROB3)</i>
0	0,0003	0,0135	0,0010	0,0003	0,0089	0,0009	0,0452	0,0357	0,0359
5,08	0,0113	0,0214	0,0277	0,0132	0,0203	0,0257	0,1416	0,1042	0,1247
7,62	0,0531	0,0629	0,0783	0,0599	0,0834	0,0898	0,2424	0,2542	0,2295
12,70	0,1926	0,1910	0,1869	0,2401	0,2495	0,2403	0,2813	0,2961	0,2770
20,32	0,2851	0,2677	0,2563	0,2899	0,2784	0,2734	0,1600	0,1577	0,1583
25,40	0,2507	0,2422	0,2406	0,2318	0,2152	0,2152	0,0780	0,0951	0,1029
30,48	0,2068	0,2014	0,2092	0,1648	0,1444	0,1548	0,0514	0,0571	0,0718

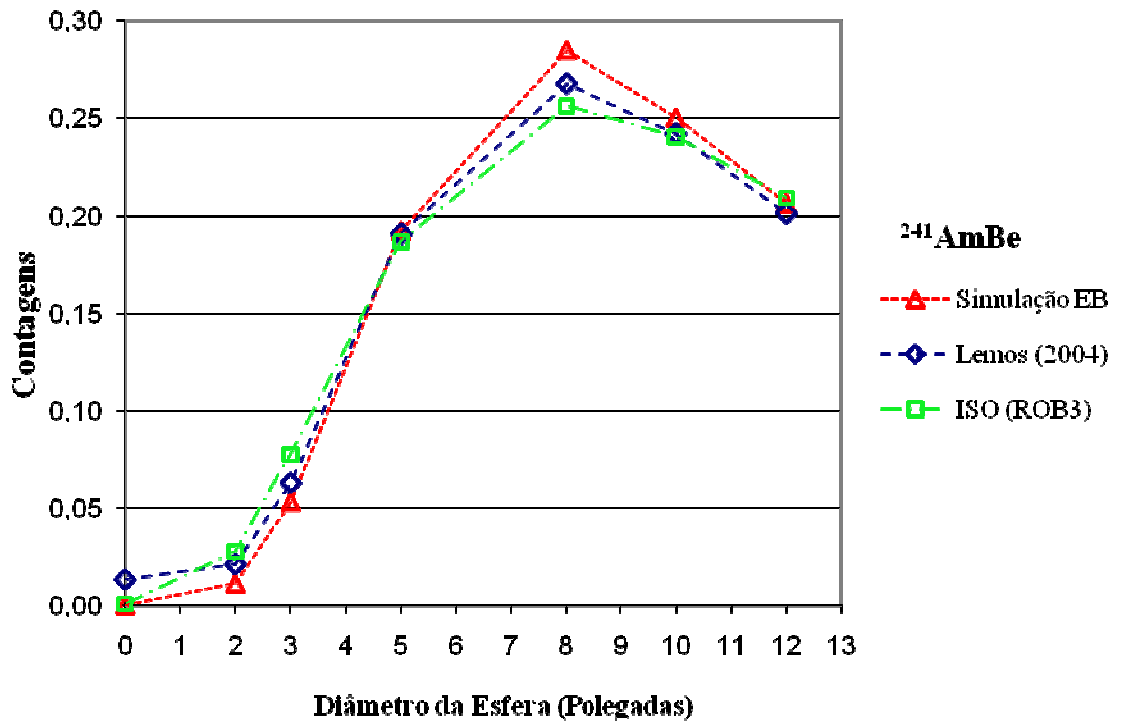


Figura 4.5. Resposta para o $^{241}\text{AmBe}$ de cada esfera moderadora, obtida com a simulação do EB (Simulação EB), no trabalho de Lemos (2004) e determinada pela equação 12 (ISO ROB3).

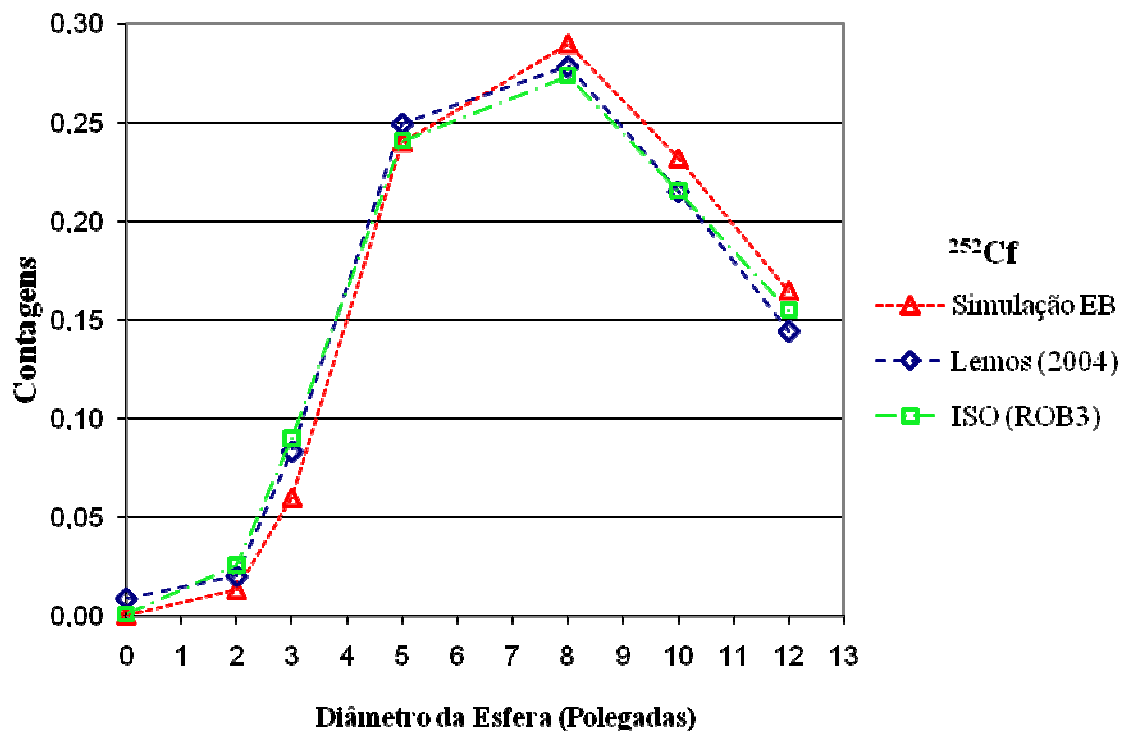


Figura 4.6. Resposta para o ^{252}Cf de cada esfera moderadora, obtida com a simulação do EB (Simulação EB), no trabalho de Lemos (2004) e determinada pela equação 12 (ISO ROB3).

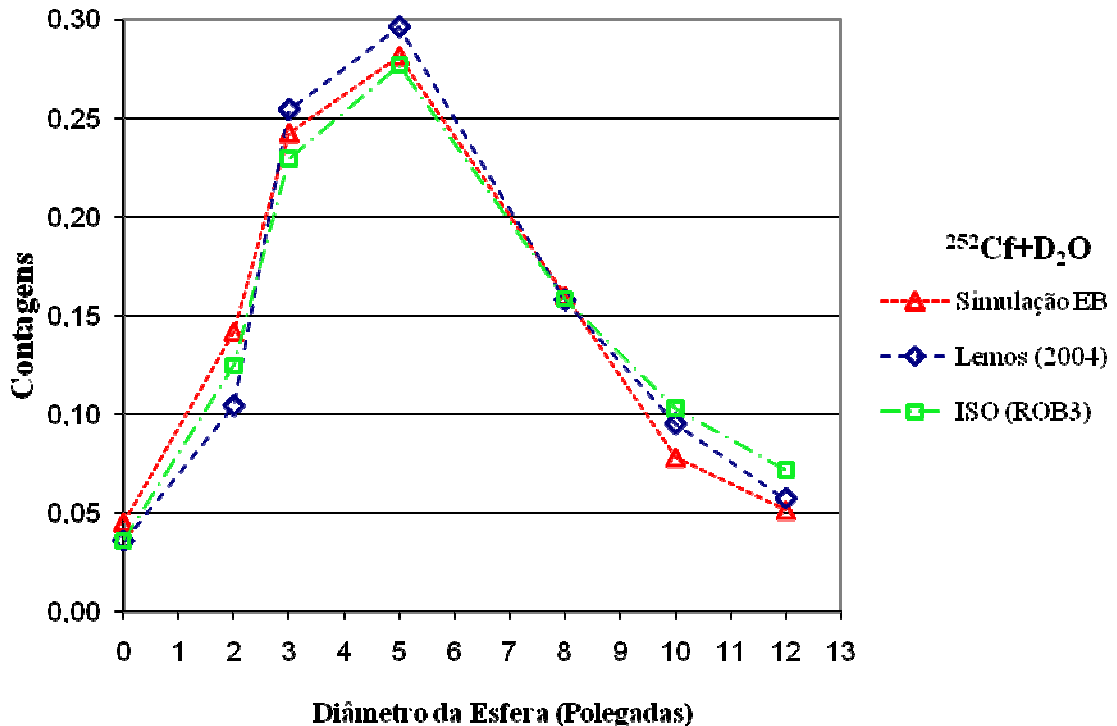


Figura 4.7. Resposta para o $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$ de cada esfera moderadora, obtida com a simulação do EB (Simulação EB), no trabalho de Lemos (2004) e determinada pela equação 12 (ISO ROB3).

4.4 O Treinamento e Teste

4.4.1 Espectros Monoenergéticos

Os 84 primeiros dados de saída utilizados para o treinamento e teste da base ROB3E84, correspondendo à fluência de nêutrons em energia, foram considerados como espectros monoenergéticos, pois apenas em um intervalo de energia é expressada a resposta como a integral de um conjunto de dados de entrada com 7 contagens calculadas, através do Código MCNP (2001), para a matriz ROB3. Assim, de acordo com o treinamento, estabelece uma tendência de apenas um neurônio responder em um determinado intervalo de energia. A Tabela 4.6 mostra a energia correspondente a cada neurônio da camada de saída. Os 9 dados de saída seguintes utilizados no treinamento e teste, que compõe um número na base binária, foram utilizados para a identificação do espectro. O último dado de saída deste treinamento e teste foi utilizado para o cálculo de um valor normalizado do equivalente de dose ambiente $H^*(10)$.

Os resultados para o treinamento e teste dos espectros monoenergéticos deste trabalho foram definidos após várias opções de arquitetura da RN, objetivando a melhor resposta para os 94 neurônios na camada de saída. Os melhores resultados foram obtidos considerando uma diferença máxima entre a saída da RN e a saída desejada ($e(t)$) de 0,05 para a base de treinamento e 0,20 para a base de teste, conforme a Equação 9 do subitem 2.3.5.2. A melhor configuração em relação ao número de camadas e ao número de neurônios por camada foi: 7-31-43-89-94, conforme apresentada no subitem 3.4.1. Para o treinamento, a rede conseguiu acertar 91% dos pares de entrada e saída. Para o teste a RN conseguiu acertar 30% dos pares de entrada e saída.

TABELA 4.6. Representação dos intervalos de energia para cada neurônio da camada de saída da RN.

Energia (keV)	Neurônio	Energia (keV)	Neurônio
1,00E-06	1	2,51E-01	43
1,59E-06	2	3,98E-01	44
2,51E-06	3	6,31E-01	45
3,98E-06	4	1,00E+00	46
6,31E-06	5	1,59E+00	47
1,00E-05	6	2,51E+00	48
1,20E-05	7	3,98E+00	49
1,45E-05	8	6,31E+00	50
1,74E-05	9	1,00E+01	51
2,09E-05	10	1,26E+01	52
2,51E-05	11	1,59E+01	53
3,02E-05	12	2,00E+01	54
3,63E-05	13	2,51E+01	55
4,37E-05	14	3,16E+01	56
5,25E-05	15	3,98E+01	57
6,31E-05	16	5,01E+01	58
7,59E-05	17	6,31E+01	59
9,12E-05	18	7,94E+01	60
1,10E-04	19	1,00E+02	61
1,32E-04	20	1,26E+02	62
1,59E-04	21	1,59E+02	63
1,91E-04	22	2,00E+02	64
2,29E-04	23	2,51E+02	65
2,75E-04	24	3,16E+02	66
3,31E-04	25	3,98E+02	67
3,98E-04	26	5,01E+02	68
4,79E-04	27	6,31E+02	69
5,75E-04	28	7,94E+02	70
6,92E-04	29	1,00E+03	71
8,32E-04	30	1,26E+03	72
1,00E-03	31	1,59E+03	73
1,59E-03	32	2,00E+03	74
2,51E-03	33	2,51E+03	75
3,98E-03	34	3,16E+03	76
6,31E-03	35	3,98E+03	77
1,00E-02	36	5,01E+03	78
1,59E-02	37	6,31E+03	79
2,51E-02	38	7,94E+03	80
3,98E-02	39	1,00E+04	81
6,31E-02	40	1,26E+04	82
1,00E-01	41	1,59E+04	83
1,59E-01	42	2,00E+04	84

O Treinamento

Nas Figuras 4.8 e 4.9 são apresentados somente o pior e o melhor resultado do treinamento dos espectros monoenergéticos. A Tabela 4.7 mostra a energia correspondente ao neurônio que mais respondeu ao treinamento (resultados apresentados nas Figuras 4.8 e 4.9); o erro médio (ErM) e o erro quadrático médio (ErQM) referentes aos 84 neurônios da camada de saída em relação à referência; o valor verdadeiro convencional do $H^*(d)$ fornecido a RN (VVC_H); o valor calculado do $H^*(d)$ pela RN (VCR_H); e a diferença percentual entre o VVC_H e o VCR_H (DIF).

Tabela 4.7. Energia e o neurônio correspondente que mais respondeu ao *treinamento*. Resultados para as curvas apresentadas nas Figuras 4.8 e 4.9.

Espectro (Figura)	Energia (MeV)	Neurônio	ErM	ErQM	VVC_H	VCR_H	DIF
4.9	$3,98 \times 10^{-9}$	4	0,03%	0,19%	13,3 nSv	0,2 pSv	---
4.10	$2,51 \times 10^{-2}$	55	0,01%	0,58%	33,3 nSv	32,5 nSv	2,5%

Em todos os casos de treinamento para a base ROB3E84, houve boa concordância na resposta em relação aos dados de saída fornecidos como referência. A Figura 4.8 mostra um dos melhores casos de treinamento, ou seja, uma pequena variação para menos em relação à magnitude, correspondendo a um erro de 0,5%, é percebida na resposta do neurônio no intervalo de energia de 3,98 meV, O erro médio e o erro quadrático médio, em relação às respostas dos outros neurônios, foram de 0,03% e 0,19% respectivamente. O VCR_H não foi satisfatório, pois não convergindo para o VVC_H esperado de 13,3 nSv, atribuído para o treinamento. A Figura 4.9 mostra variações para os intervalos de energia de 15,9 e 25,1 keV, pois a diferença de 3,6% a menos no ganho para o neurônio da energia 25,1 keV é compensada na faixa de energia de 15,9 keV. O erro médio e o erro quadrático médio neste caso, em relação às respostas dos outros neurônios, foram de 0,01% e 0,58% respectivamente. O VCR_H foi de 32,5 nSv, com uma DIF de 2,5%.

Como podem ser observados, os resultados do treinamento para a base ROBE84 foram satisfatórios, pois erros muitos baixos (menor que 1%) na camada de saída da RN foram vistos para maiorias dos neurônios em todos os treinamentos.

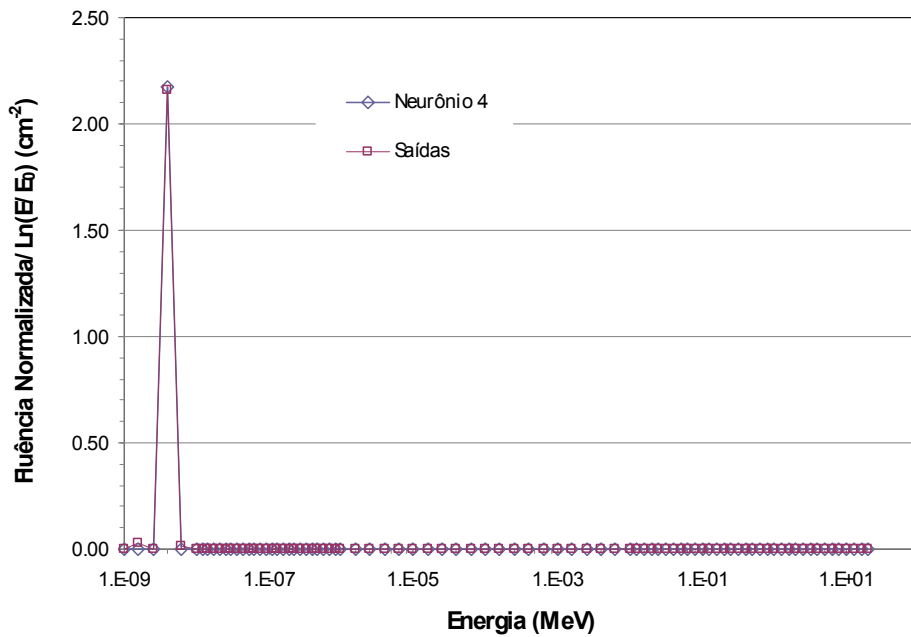


Figura 4.8. Resultado do treinamento para a base ROB3E84 com a resposta do 4º neurônio da camada de saída correspondendo à energia de 3,98 meV.

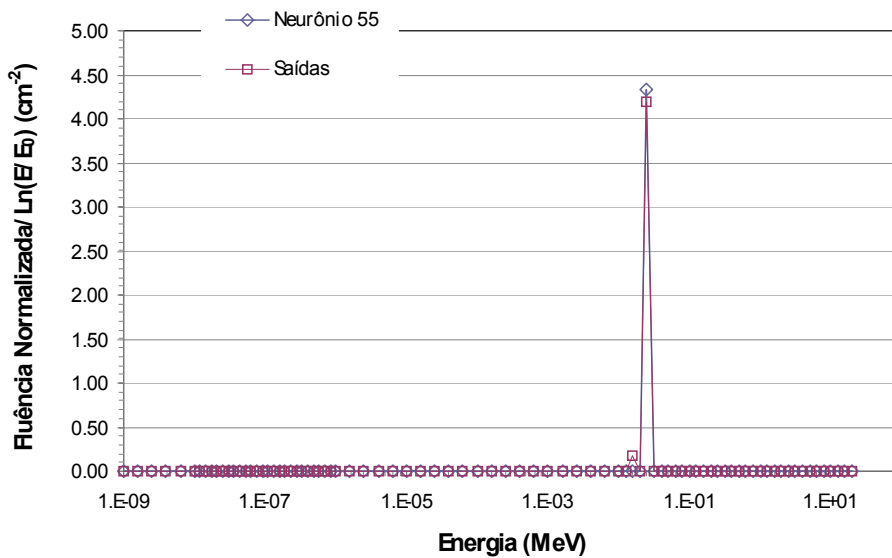


Figura 4.9. Resultado do treinamento para a base ROB3E84 com a resposta do 55º neurônio da camada de saída correspondendo à energia de 25,1 keV.

O Teste

Nas Figuras de 4.10 a 4.13 são apresentados alguns casos de teste, na intenção de avaliar os melhores e piores resultados. A Tabela 4.8 mostra a energia correspondente à resposta do neurônio de referência (resultados apresentados nas Figuras mencionadas acima); o erro médio (ErM) e o erro quadrático médio (ErQM) referente aos 84 neurônios da camada de saída em relação à referência; o valor verdadeiro convencional do $H^*(d)$ fornecido à RN (VVC_H); o valor calculado do $H^*(d)$ pela RN (VCR_H); e a diferença percentual entre o VVC_H pelo VCR_H (DIF).

Tabela 4.8. Energia e os neurônios que mais responderam ao teste. Resultados para as curvas apresentadas nas Figuras 4.10 a 4.13.

Espectro (Figura)	Energia (MeV)	Neurônio	ErM	ErQM	VVC_H	VCR_H	DIF
4.11	$9,12 \times 10^{-8}$	17:19	0,96%	17,7%	21,0 nSv	0,2 nSv	---
4.12	$2,51 \times 10^{-6}$	32:34	0,59%	11,7%	21,0 nSv	0,1 nSv	---
4.13	$2,51 \times 10^{-3}$	47:49	0,03%	13,5%	13,0 nSv	13,4 nSv	2,8%
4.14	$6,31 \times 10^{-1}$	68:70	0,02%	14,3%	0,6 μ Sv	0,5 μ Sv	12,2%

Em todos os casos de teste para a base ROB3E84, houve uma tendência na resposta para os neurônios adjacentes daquele mais representativo para o espectro. Por exemplo, na Figura 4.10, em torno do 18º neurônio correspondente à energia de 0,09 eV, os neurônios mais representativos foram o 17º e o 19º correspondendo os intervalos de energias de 0,08 e 0,11 eV respectivamente. O ponto onde se obteve o maior ganho (do 19º neurônio) ficou com um erro de 6,6% abaixo comparado como o 18º neurônio de referência. O ErM ficou abaixo de 1% e o ErQM ficou abaixo de 18%. O VCR_H não convergiu para o VVC_H esperado de 21,0 nSv. Na Figura 4.11, o ponto referente ao 34º neurônio foi o que apresentou maior ganho ficando muito abaixo, com um erro de 66%, do 33º neurônio de referência. O ErM ficou abaixo de 0,6% e o ErQM ficou abaixo de 12%. O VCR_H não convergiu para o VVC_H esperado de 21,0 nSv.

Na Figura 4.12, o ponto do 47º neurônio, onde se obteve maior ganho, ficou com um erro de 39% abaixo do valor do 48º neurônio de referência e o ponto do 46º neurônio, onde se obteve o menor ganho, ficou com um erro de 60% abaixo do mesmo neurônio de referência. O VCR_H ficou bem próximo do VVC_H , com uma DIF abaixo de 3%. Na Figura 4.13, a resposta foi um pouco melhor, o ponto do 68º neurônio, onde se

obteve maior ganho, ficou com um erro de 17% abaixo do valor do 69º neurônio de referência e o ponto do 70º neurônio, onde se obteve o menor ganho, ficou com erro de 82% abaixo do mesmo valor de referência. O VCR_H ficou um pouco abaixo do VVC_H , com uma DIF de 13%.

Uma característica interessante se observa nos testes onde o erro médio foi menor que os outros, 0,03% para o espectro apresentado na Figura 4.12 e 0,02% para o espectro da Figura 4.14, pois a soma dos ganhos dos neurônios adjacentes tende ao valor dos neurônios de referência, ficando nos dois casos com um erro menor que 1 % em relação aos respectivos neurônios de referência.

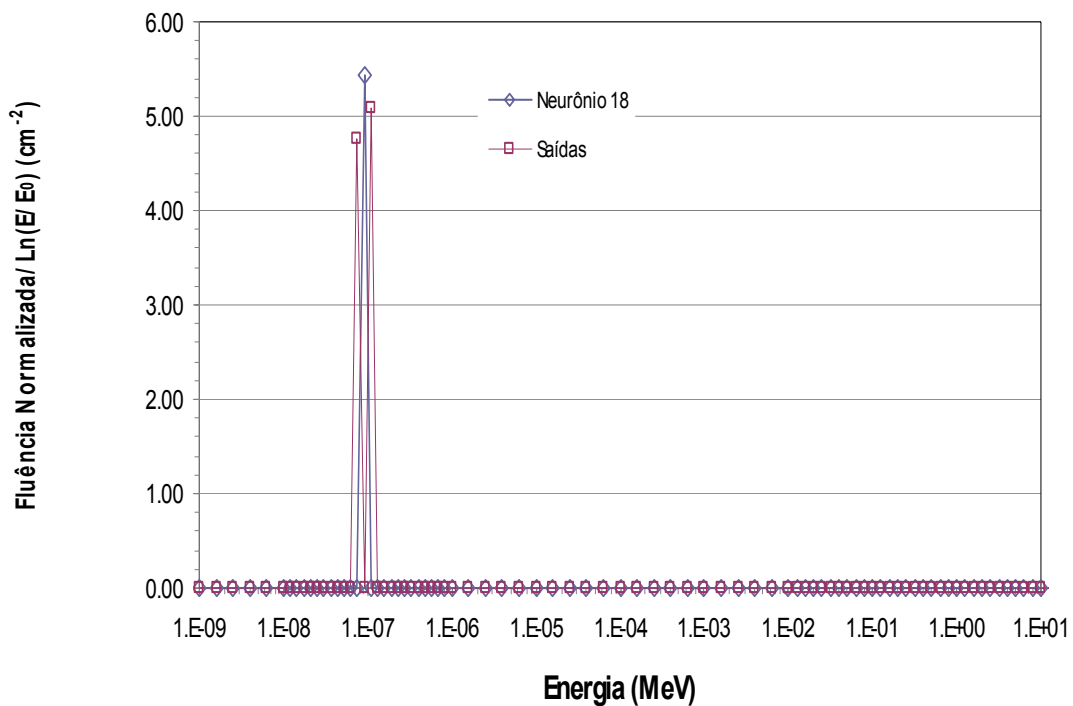


Figura 4.10. Resultado do teste da base ROB3E84 para a resposta do 18º neurônio de referência correspondendo à energia de 0,09 eV.

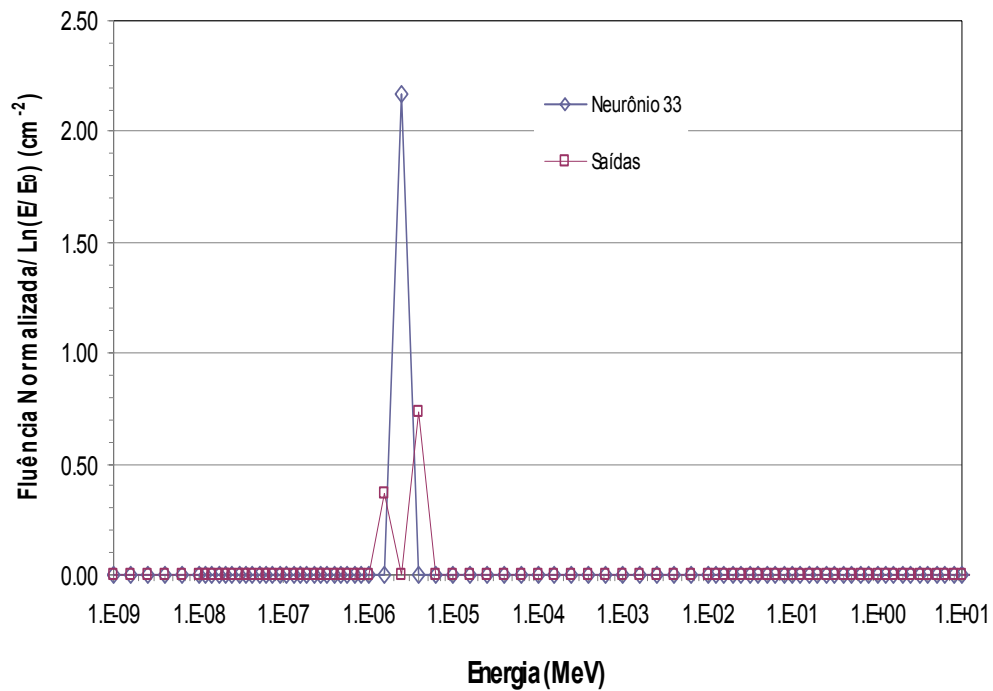


Figura 4.11. Resultado do teste da base ROB3E84 para a resposta do 33º neurônio de referência correspondendo à energia de 2,51 eV.

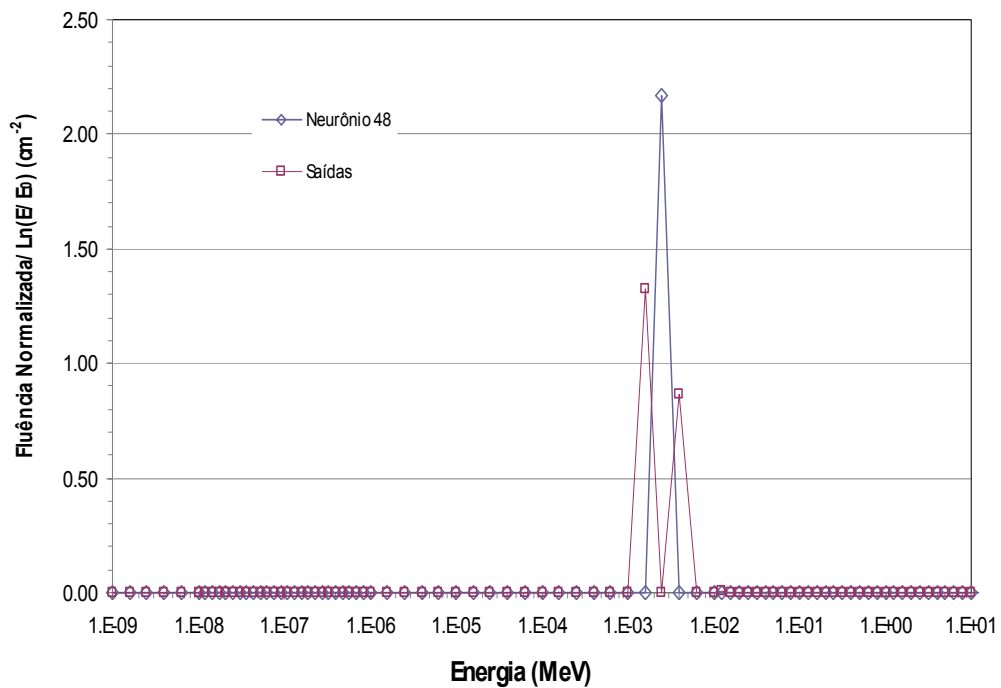


Figura 4.12. Resultado do teste da base ROB3E84 para a resposta do 48º neurônio de referência correspondendo à energia de 2,51 keV.

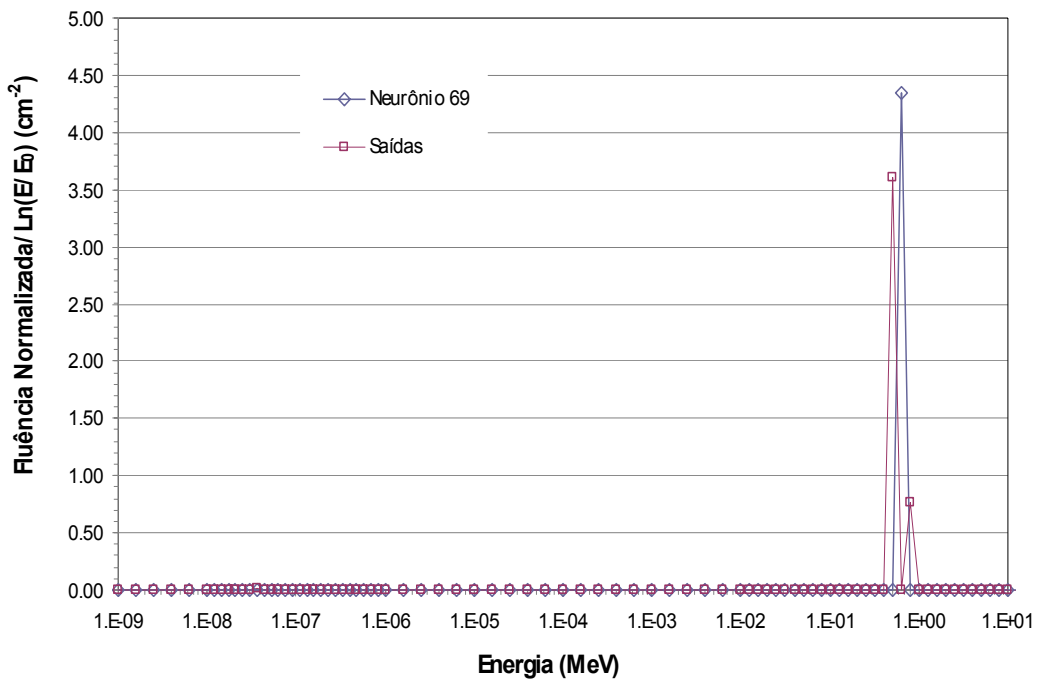


Figura 4.13. Resultado do teste da base ROB3E84 para a resposta do 69° neurônio de referência correspondendo à energia de 0,63 MeV.

4.4.2 Espectros Polienergéticos

Os resultados do treinamento e teste da RN para os espectros polienergéticos foram obtidos a partir de uma base dados TRS403E202 composta por 202 espectros provenientes da literatura TRS (2001), da Norma ISO 8529-1 (2001), do trabalho de LEMOS (2004) e da simulação do EB para os espectros de $^{241}\text{AmBe}$, ^{252}Cf e $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$, através do Código MCNP (BRIESMEISTER, 2000). A quantidade de espectros de cada referência citada pode ser observada na Tabela 3.1 do subitem 3.4.1.

O *Technical Reports Series* número 403 (TRS, 2001) publicado pela *International Atomic Energy Agency* – IAEA nos forneceu a maior quantidade de espectro com um total de 192 referências. Desta referência, foram escolhidos para treinamento e teste da RN os seguintes grupos de espectros:

1. de campos de referência, com e sem moderação de diversos materiais utilizando ou não cone de sombra, apresentados na Tabela 4.I dessa referência;
2. de fontes isotópicas, com e sem moderação de diversos materiais utilizando ou não escudo de acrílico, apresentados na Tabela 4.II;
3. calculados e medidos de campos operacionais apresentados na Tabela 4.III;
4. de reatores de potência apresentados na Tabela 5.I;
5. de aceleradores clínicos apresentados na Tabela 5.II;
6. de reprocessamento de combustível de reator apresentados na Tabela 5.V;
7. de fontes industriais apresentados na Tabela 5.VI; e
8. da técnica de terapia por boro apresentados na Tabela 5.VII.

Os espectros utilizados como referência citados acima foram tratados a partir de uma planilha de segmentação de dados, conforme detalhado no subitem 3.4.1 do capítulo anteriormente, de modo que todos os espectros foram representados na saída da RN por 84 neurônios, um para cada intervalos de energia. Os 9 dados de saída seguintes utilizados no treinamento e teste, que compõe um número na base binária, foram utilizados para a identificação do espectro, e o último dado de saída foi utilizado para o cálculo da equivalente de dose ambiente normalizada.

A melhor resposta da rede foi obtida com a mesma configuração utilizada para o treinamento e o teste dos espectros monoenergéticos, sendo uma diferença máxima entre a saída desejada e a saída da RN de 0,05 ($e(t)$) para a base de treinamento. A melhor configuração em relação ao número de camadas e ao número de neurônio por camada foi: 7-45-91-169-94, conforme apresentada no subitem 3.4.1. Para o

treinamento, a rede conseguiu acertar 98% dos pares de entrada e saída. Para o teste, a rede conseguiu acertar 26% dos pares de entrada e saída.

O Treinamento

Alguns dos espectros utilizados na base de dados TRS403E202 para o treinamento escolhidos daqueles grupos citados do *Technical Reports Series* número 403 (TRS, 2001) são apresentados, buscando sempre avaliar os piores e melhores resultados após o processamento. Os espectros gerados pela base de dados TRS403286 foram similares àqueles gerados pela base TRS403E202, não acrescentando nada de significativo em termos de melhora de resultados. Com a utilização da base de dados TRS403E202, ou seja sem a contribuição dos espectros monoenergéticos (ROB3E84), a RN convergiu mais rapidamente para o melhor resultado alcançado neste trabalho.

A Tabela 4.9 mostra o erro médio (ErM) e o erro quadrático médio (ErQM) referente aos 84 neurônios da camada de saída em relação à referência, o valor verdadeiro convencional do $H^*(d)$ fornecido à RN (VVC_H); o valor calculado do $H^*(d)$ pela RN (VCR_H), com uma estimativa de incerteza do VCR_H obtida através da Equação 19; os valores calculado da energia média para fluência do espectro de referência (EnMr) e do espectro de saída (EnMs), com uma estimativa de incerteza da EnMs obtida através da Equação 17.

Tabela 4.9. Resultados obtidos do *treinamento* para as curvas apresentadas nas Figuras de 4.14 a 4.18.

Espectro	ErM	ErQM	VVC_H (μSv)	VCR_H (μSv)	EnMr (MeV)	EnMs (MeV)
<i>CfTRS</i>	0,01%	0,16%	0,657	(0,66 \pm 0,03)	2,18	(2,17 \pm 0,05)
<i>Cf+D₂OTRS</i>	0,14%	0,46%	0,499	(0,49 \pm 0,01)	0,58	(0,58 \pm 0,01)
<i>AmBeTRS</i>	0,13%	0,59%	0,458	(0,45 \pm 0,04)	4,20	(4,21 \pm 0,15)
<i>PuBePE1m</i>	0,10%	0,84%	0,208	(0,21 \pm 0,01)	0,63	(0,65 \pm 0,01)
<i>GRENFc</i>	0,14%	0,86%	0,484	(0,48 \pm 0,01)	0,15	(0,15 \pm 0,001)

Nas Figuras de 4.14 a 4.18 são apresentados os resultados para os espectros de ^{252}Cf , $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$ e $^{241}\text{AmBe}$ de referência do TRS (2001), nomeados de *CfTRS*, *Cf+D₂OTRS* e *AmBeTRS*. Pode-se observar que houve boa concordância em relação à forma da curva para cada treinamento, o ErM foi abaixo de 0,2% nos três casos e o

ErQM foi abaixo de 0,6%. Os VVC_H foram muito próximos dos VCR_H para estes resultados, com baixos valores de incerteza. A $EnMs$ obtida para cada espectro também foi dentro do esperado comparado com a $EnMr$, com uma estimativa de incerteza de 0,05 MeV para o ^{252}Cf , 0,01 MeV para o $^{252}Cf+D_2O$ e 0,15 MeV para o $^{241}AmBe$.

Na Figura 4.17 é apresentado o resultado para um espectro (medições realizadas no CERN – *European Organization for Nuclear Research*, do TRS (2001)) do $^{239}PuBe$ moderado com polietileno, nomeado neste trabalho de *PuBePE1m*. Pode-se observar que também houve boa concordância em relação à forma da curva, o ErM foi de 0,1% e o ErQM foi de 0,8%. O VCR_H foi muito próximo do VVC_H para este resultado, com baixos valores de incerteza. A $EnMs$ obtida para este espectro também foi dentro do esperado, com uma estimativa de incerteza de 0,01 MeV.

Na Figura 4.18 é apresentado o resultado para um espectro (medições realizadas por SCHRAUBE *et al.* (1997), do TRS (2001)), nomeado de *GREnc*. Pode-se observar que também houve boa concordância em relação à forma da curva, o ErM foi de 0,1% e o ErQM foi de 0,8%. O VCR_H foi próximo do VVC_H , com baixos valores de incerteza. A $EnMs$ também foi muito próxima da $EnMr$, com uma estimativa de incerteza de 1 keV.

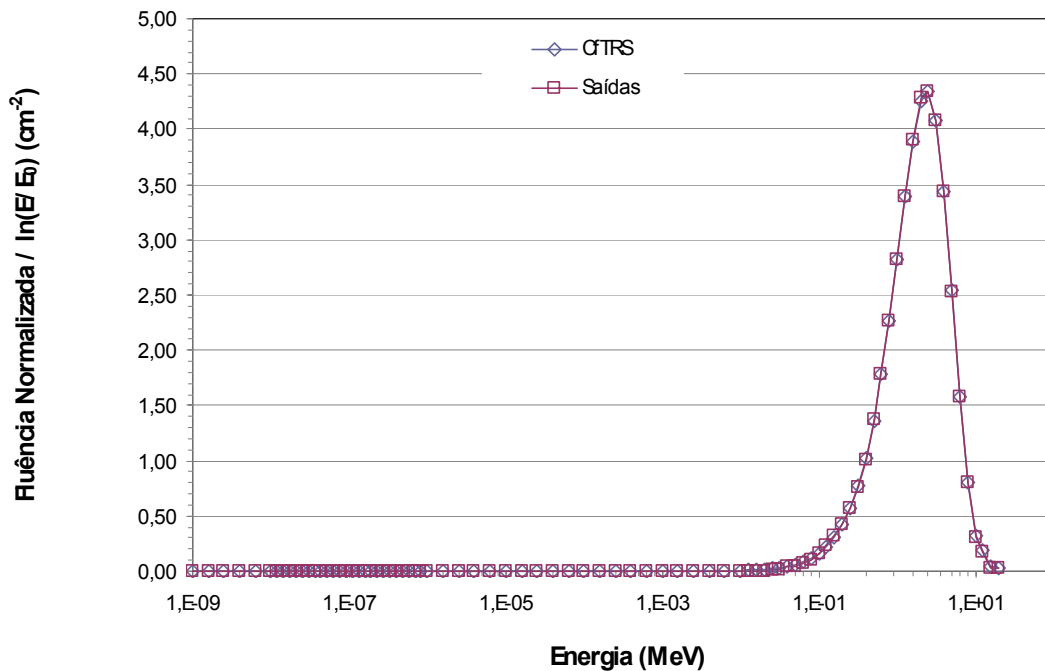


Figura 4.14. Espectro de ^{252}Cf de referência (publicado pela TRS (2001) e nomeado neste trabalho de *CfTRS*), em relação ao resultado do treinamento da saída da RN.

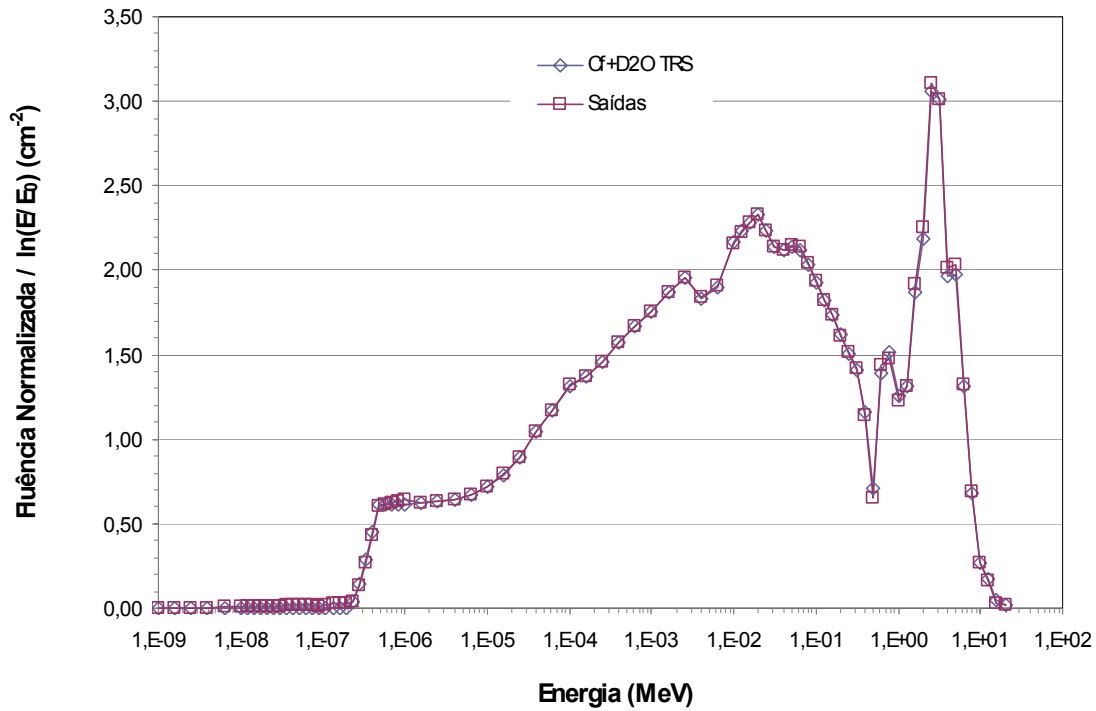


Figura 4.15. Espectro de $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$ de referência (publicado pela TRS (2001) e nomeado de *Cf+D2OTRS*), em relação ao resultado do treinamento da saída da RN.

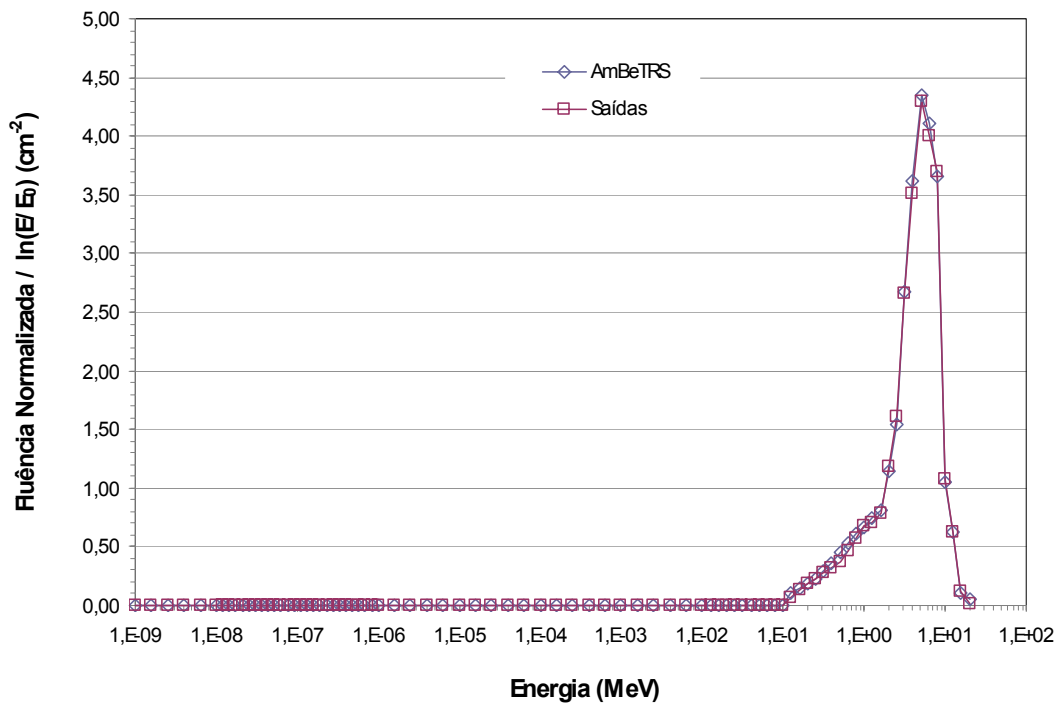


Figura 4.16. Espectro de $^{241}\text{AmBe}$ de referência (publicado pela TRS (2001) e nomeado neste trabalho de *AmBeTRS*), em relação ao resultado do treinamento da saída da RN.

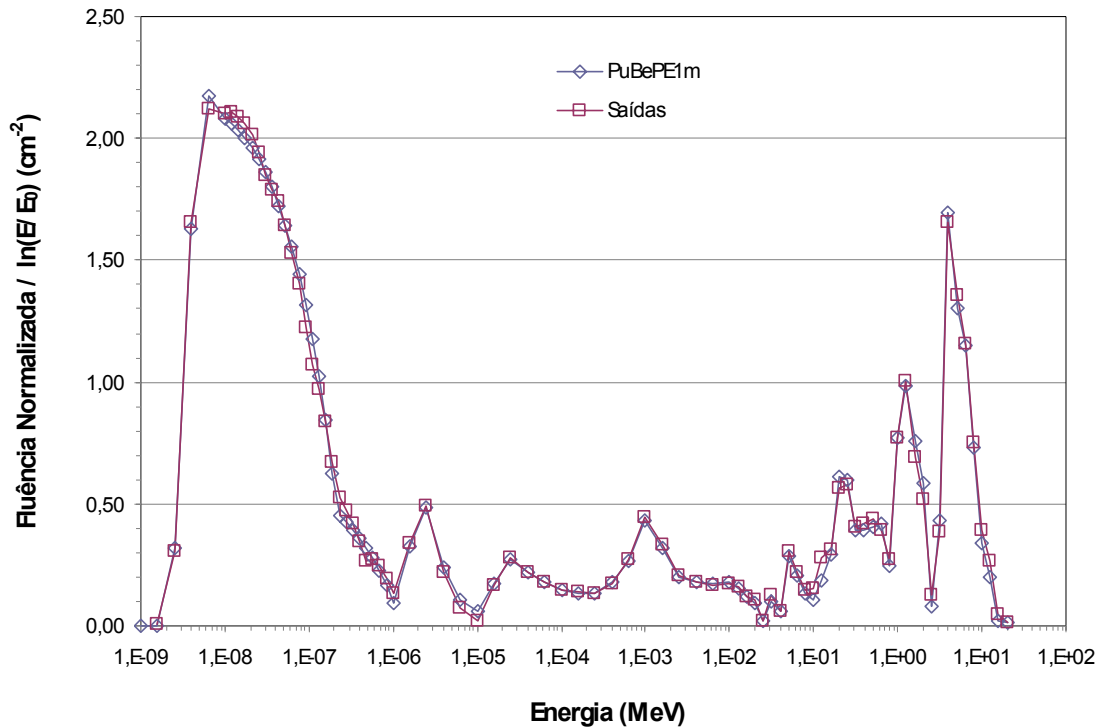


Figura 4.17. Espectro de $^{238}\text{PuBe}$ obtido das medições realizadas no CERN (publicado pela TRS (2001) e nomeado neste trabalho de *PuBePE1m*), em relação ao resultado do treinamento da saída da RN..

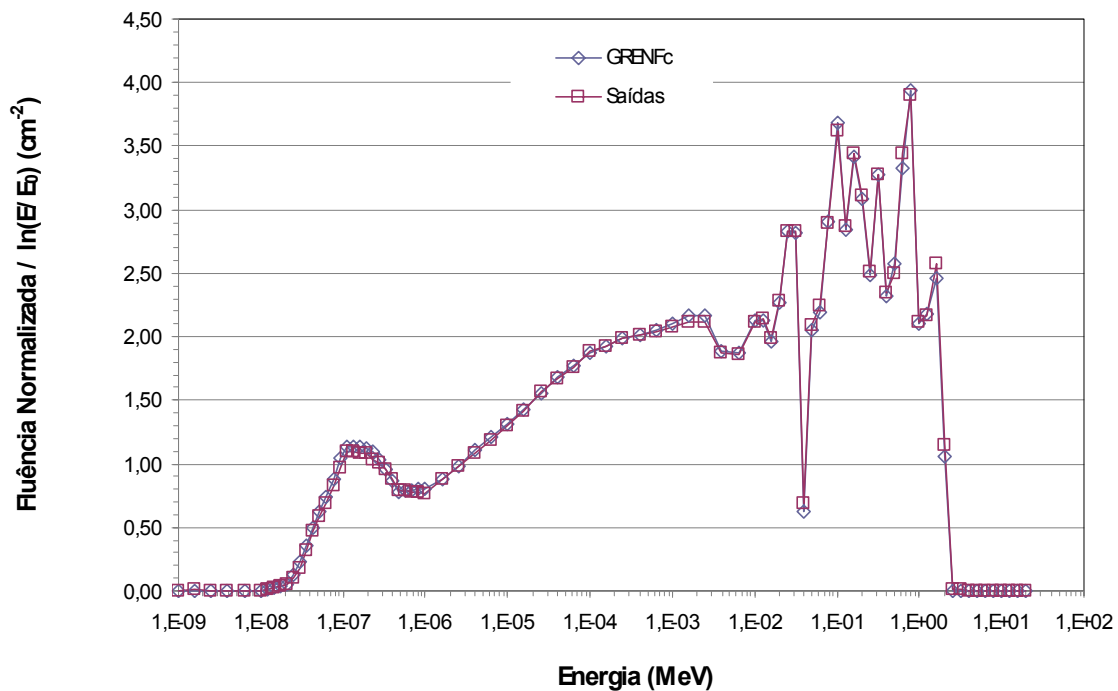


Figura 4.18. Espectro obtido no trabalho de SCHRAUBE et al. (1997), (publicado pela TRS (2001) e nomeado neste trabalho de *GRENFc*), em relação ao resultado do treinamento da saída da RN..

O Teste

A avaliação dos resultados realizada a seguir foi feita apresentando alguns espectros obtidos na saída RN, com a utilização da base de dados TRS403E202. Escolheu-se para serem testados os grupos com os seguintes conjuntos de entradas:

1. três conjuntos de medidas realizadas no trabalho de LEMOS (2004) para os espectros de $^{241}\text{AmBe}$, ^{252}Cf e $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$, nomeados neste trabalho de *AmBeExp*, *CfExp* e *Cf+D₂OExp* respectivamente;
2. três conjuntos de respostas simuladas do EB, também para os espectros de $^{241}\text{AmBe}$, ^{252}Cf e $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$, conforme detalhadas nos subitens 3.3 e 4.3, e nomeados neste trabalho de *AmBeSim*, *CfSim* e *Cf+D₂OSim*;
3. dois conjuntos de resposta provenientes dos espectros escolhidos dos grupos citados do *Technical Reports Series* número 403 (TRS, 2001), que são: o espectro obtido no trabalho de Schraube *et al.* (1997), nomeado de *GRENb*, e o espectro obtido no trabalho de NAISMITH e SIEBERT (1997), nomeado de *MoXwater*;

A Tabela 4.10 mostra o erro médio (ErM) e o erro quadrático médio (ErQM) referente aos 84 neurônios da camada de saída em relação à referência, o valor verdadeiro convencional do $H^*(d)$ fornecido à RN (VVC_H); o valor calculado do $H^*(d)$ pela RN (VCR_H), com uma estimativa de incerteza do VCR_H obtida através da Equação 19; os valores calculado da energia média para fluência do espectro de referência ($EnMr$) e do espectro de saída ($EnMs$), com uma estimativa de incerteza da $EnMs$ obtida através da Equação 17.

As Figuras 4.19 e 4.20 mostram as respostas para o espectro de $^{241}\text{AmBe}$ de dois conjunto de entradas, obtidas experimentalmente *AmBeExp* e com a simulação *AmBeSim*. As curvas foram sobrepostas ao espectro de referência da ISO 8529-1 (2001). Observa-se que, de uma forma geral, o conjunto de entradas experimental *AmBeExp* apresentou melhor forma comparado com a referência. No espectro obtido com o conjunto simulado *AmBeSim*, houve um ganho significativo na faixa de 1,3 a 1,6 MeV em relação à referência como pode ser observado. As outras faixas deste espectro se apresentaram com a mesma forma que a referência com ligeiras diferenças. As diferenças em toda faixa do espectro entre os resultados das Figuras 4.19 e 4.20 ficam estabelecidas comparando os erros de cada espectro. Vejamos: para o espectro *AmBeExp* foi verificado um ErM de 0,2% e um ErQM de 4,1%, já o espectro *AmBeSim*

foi verificado um ErM de 1,7% e um ErQM de 14,5%. Ou seja, uma diferença de uma ordem de grandeza a mais para o *AmBeSiml*. Os resultados para o VVC_H , o VCR_H , a EnMr e a EnMs do espectro *AmBeExp* foram muito próximos com uma incerteza de 0,04 μ Sv e uma U_{EnMs} de 0,15 MeV. Os resultados do *AmBeSim* também foram próximo com uma diferença maior entre a EnMr e a EnMs de 0,41 MeV como pode ser observado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10. Resultados obtidos do *teste* para as curvas apresentadas nas Figuras de 4.19 a 4.26.

Espectro	ErM	ErQM	VVC_H (μ Sv)	VCR_H (μ Sv)	EnMr (MeV)	EnMs (MeV)
<i>AmBeExp</i>	0,20%	4,05%	0,42	(0,43 \pm 0,04)	4,21	(4,13 \pm 0,15)
<i>AmBeSim</i>	1,70%	14,53%	0,42	(0,47 \pm 0,03)		(3,80 \pm 0,11)
<i>CfExp</i>	1,04%	4,93%	0,64	(0,54 \pm 0,03)	2,05	(1,92 \pm 0,05)
<i>CfSim</i>	0,04%	2,24%	0,64	(0,65 \pm 0,03)		(2,30 \pm 0,05)
<i>Cf+D₂OExp</i>	7,55%	19,17%	0,49	(0,44 \pm 0,01)	0,53	(0,19 \pm 0,0026)
<i>Cf+D₂OSim</i>	9,14%	23,72%	0,49	(0,56 \pm 0,01)		(0,16 \pm 0,0011)
<i>GRENFb</i>	0,60%	6,88%	0,51	(0,48 \pm 0,01)	0,16	(0,15 \pm 0,0011)
<i>MoXwater</i>	4,01%	25,05%	0,28	(0,43 \pm 0,01)	0,12	(0,25 \pm 0,0023)

As Figuras 4.21 e 4.22 mostram as respostas para o espectro de ^{252}Cf de dois conjunto de entradas, uma obtida experimentalmente *CfExp* e outra com a simulação *CfSim*. As curvas foram sobrepostas ao espectro de referência da ISO 8529-1 (2001). Neste caso, o espectro que melhor concordou com a referência foi o simulado *CfSim*. No espectro *CfExp* houve uma perda significativa na faixa de 0,6 MeV em relação à referência. As outras faixas se apresentaram com a mesma forma que a referência com ligeiras diferenças. As diferenças em toda faixa do espectro entre os resultados das Figuras 4.21 e 4.22 ficam estabelecidas comparando os erros de cada espectro: para o espectro *CfSim* foi verificado um ErM de 0,04% e um ErQM de 2,2%, já o espectro *CfExp* foi verificado um ErM de 1,0% e um ErQM de 4,9%. Ou seja, uma diferença de duas ordem de grandeza a mais do ErM para o espectro *CfExp* e mais do que o dobro do ErQM para o *CfExp*. Os resultados para o VVC_H , o VCR_H , a EnMr e a EnMs do espectro *CfExp* foram muito próximos com uma incerteza de 0,54 μ Sv e uma incerteza para energia média de 0,05 MeV. Os resultados do *CfSim* também foram próximo com uma diferença ligeiramente maior entre a EnMr e a EnMs de 0,25 MeV como pode ser observado.

As Figuras 4.23 e 4.24 mostram as respostas para o espectro de $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$ de dois conjuntos de entradas, uma obtida experimentalmente $\text{Cf}+\text{D}_2\text{OExp}$ e outra com a simulação $\text{Cf}+\text{D}_2\text{OSim}$. As curvas também foram sobrepostas ao espectro de referência da ISO8529-1 (2001). Estes casos são aqueles ruins que a RN não identificou o espectro de forma adequada. Observa-se que a forma da curva para o espectro $\text{Cf}+\text{D}_2\text{OExp}$ obtido do conjunto de entradas experimental não concorda com o espectro de referência. A curva obtida $\text{Cf}+\text{D}_2\text{OSim}$ do conjunto de entradas da simulação não concorda, mas se apresenta mais próxima da referência. Os resultados para o VVC_H e o VCR_H foram próximos, com uma incerteza de $0,01 \mu\text{Sv}$ para os $\text{Cf}+\text{D}_2\text{OExp}$ e $\text{Cf}+\text{D}_2\text{OSim}$. Os resultados para a EnMr e EnMs apresentaram grandes diferenças como podem ser observado na Tabela 4.10.

A Figura 4.25 mostra a resposta de um espectro simulado de um acelerador obtido por SCHRAUBE *et al.* (1997) e publicado no TRS (2001). O resultado de saída da RN obtido para este espectro, nomeado de *GRENFb*, foi sobreposto no mesmo par de eixo que o espectro original admitido como referência. Observa-se que houve concordância em relação à forma da curva praticamente em todas as faixas, apenas uma perda no ganho é mais nítida em torno de 40 keV. Os resultados para o VVC_H , VCR_H , EnMr e a EnMs foram próximos, com uma incerteza de $0,01 \mu\text{Sv}$, e uma incerteza para energia média de 1,1 keV.

A Figura 4.26 mostra a resposta de um espectro de um reprocessamento de combustível de reator obtido por NAISMITH e SIEBERT (1997) e publicado no TRS (2001). O resultado de saída da RN obtido para este espectro, nomeado de *MoXwater*, também foi sobreposto no mesmo par de eixo que o espectro original admitido como referência. Observa-se que não houve uma boa concordância, sendo este caso como um daqueles ruins onde a RN não realiza uma boa identificação. Os resultados para o VVC_H e VCR_H não foram próximos com uma diferença de $0,15 \mu\text{Sv}$ entre eles. Os resultados para a EnMr e a EnMs também não corresponderam ao esperado como podem ser observados na Tabela 4.10.

As características verificadas em todos os resultados do teste (base de dados TRS403E202) permaneceram semelhantes no que diz respeito à identificação e ao grau de concordâncias e discordâncias em relação à forma da curva. Nas Figuras de 4.31 a 4.58 do anexo III são apresentados os resultados que compõe os grupos mencionados no segundo parágrafo deste subitem para maior apreciação (TRS, 2001).

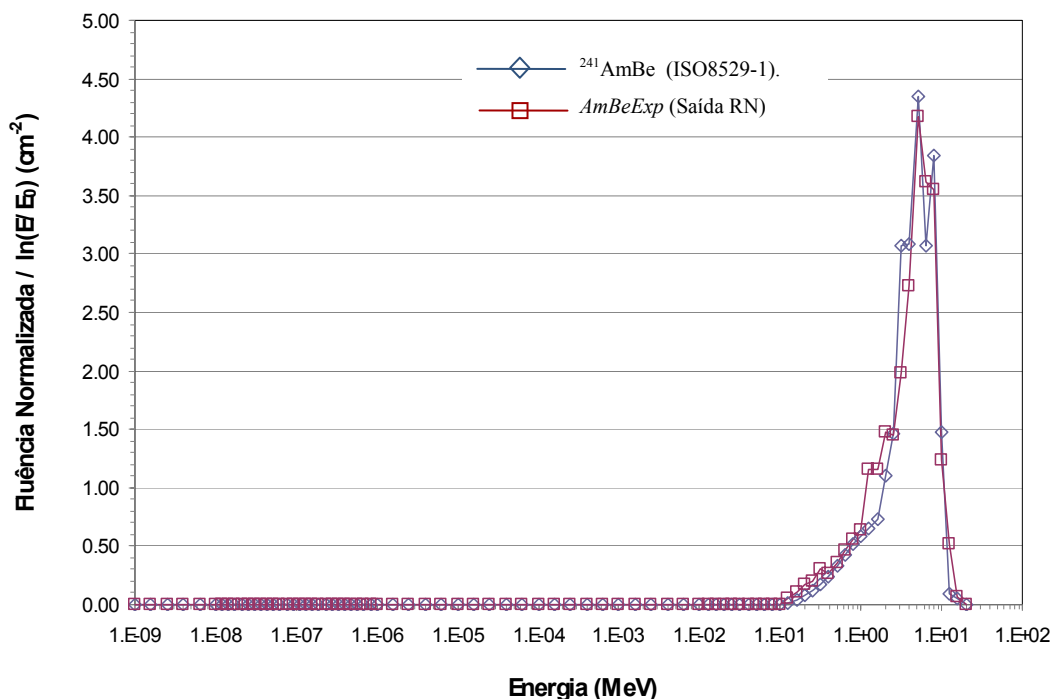


Figura 4.19. Resultado obtido da RN (através de um conjunto de entradas obtidas experimentalmente) sobreposto ao espectro de referência $^{241}\text{AmBe}$ da ISO8529-1 (2001).

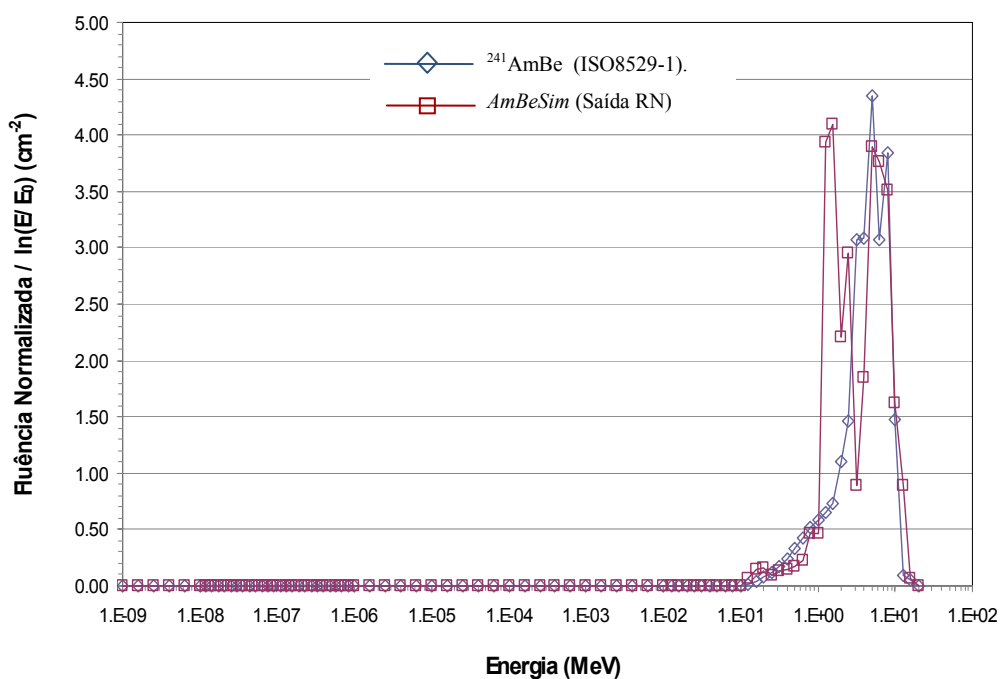


Figura 4.20. Resultado obtido da RN (através de um conjunto de entradas obtidas da simulação) sobreposto ao espectro de referência $^{241}\text{AmBe}$ da ISO8529-1 (2001).

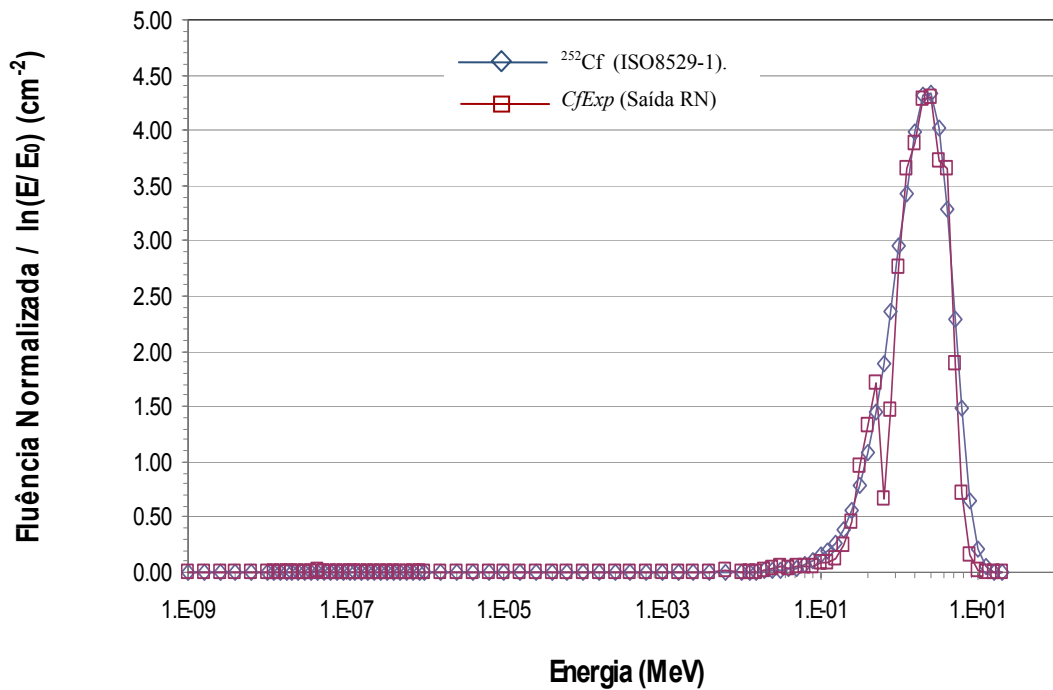


Figura 4.21. Resultado obtido da RN (através de um conjunto de entradas obtidas experimentalmente) sobreposto ao espectro de referência ^{252}Cf da ISO8529-1 (2001).

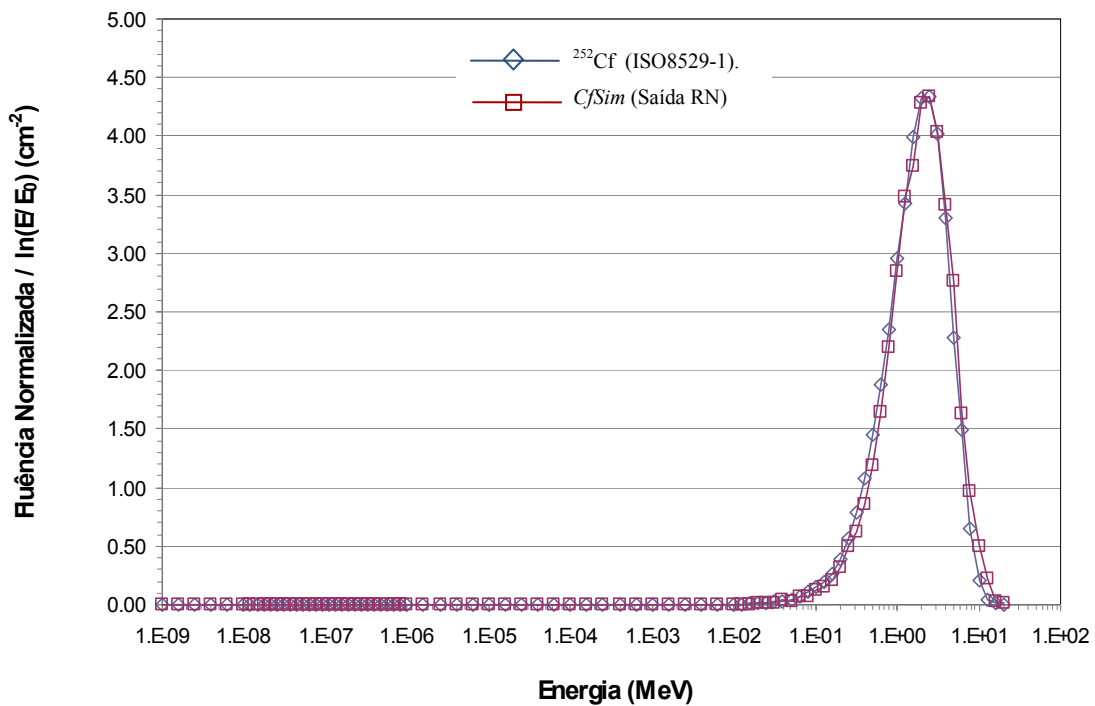


Figura 4.22. Resultado obtido da RN (através de um conjunto de entradas obtidas da simulação) sobreposto ao espectro de referência ^{252}Cf da ISO8529-1 (2001).

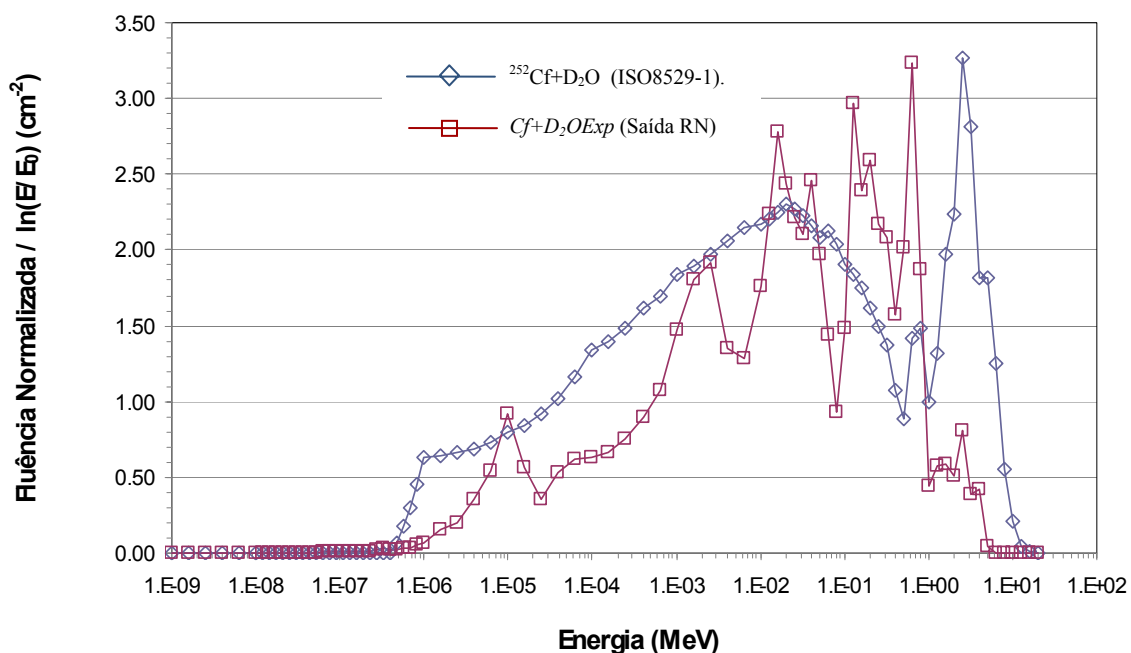


Figura 4.23. Resultado obtido da RN (através de um conjunto de entradas obtidas experimentalmente) sobreposto ao espectro de referência $^{241}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$ da ISO8529-1 (2001).

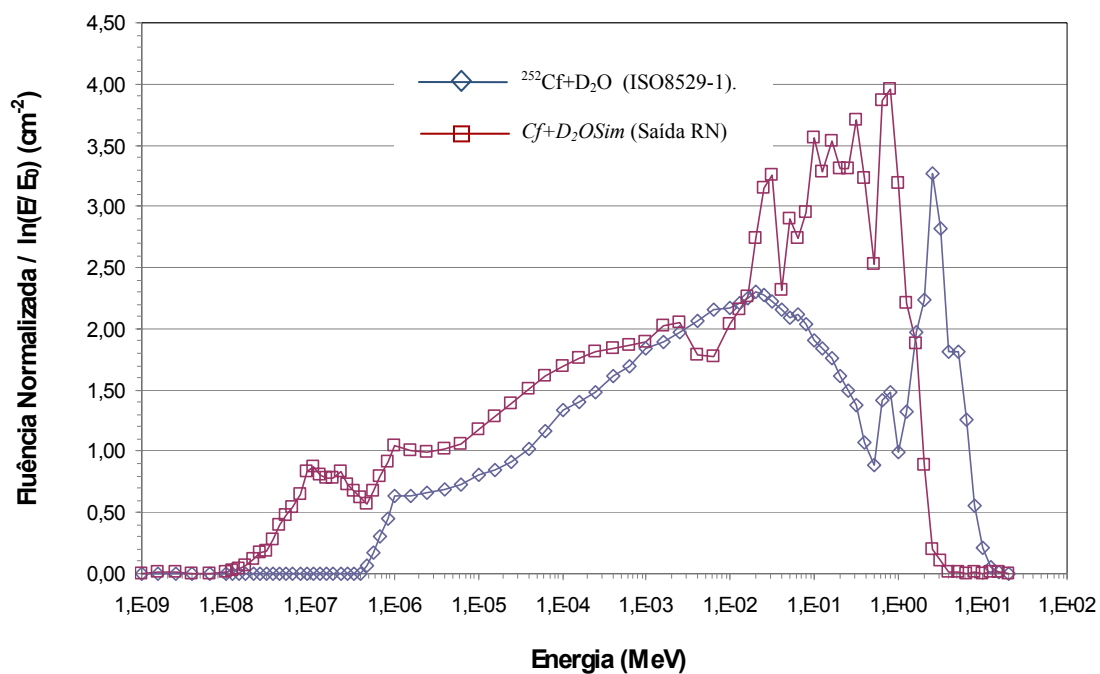


Figura 4.24. Resultado obtido da RN (através de um conjunto de entradas obtidas da simulação) sobreposto ao espectro de referência $^{241}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$ da ISO8529-1 (2001).

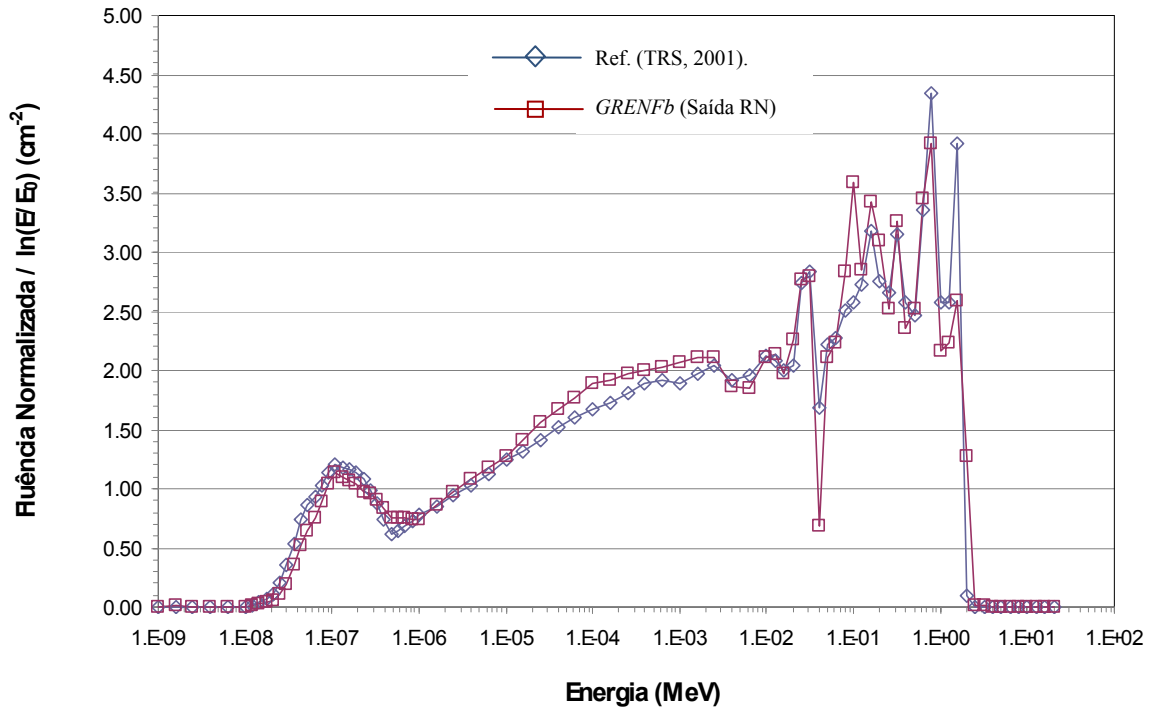


Figura 4.25. Resultado obtido da RN para *GRENFb* (através de um conjunto de entradas obtidas da equação 11) sobreposto ao espectro de referência do TRS (2001).

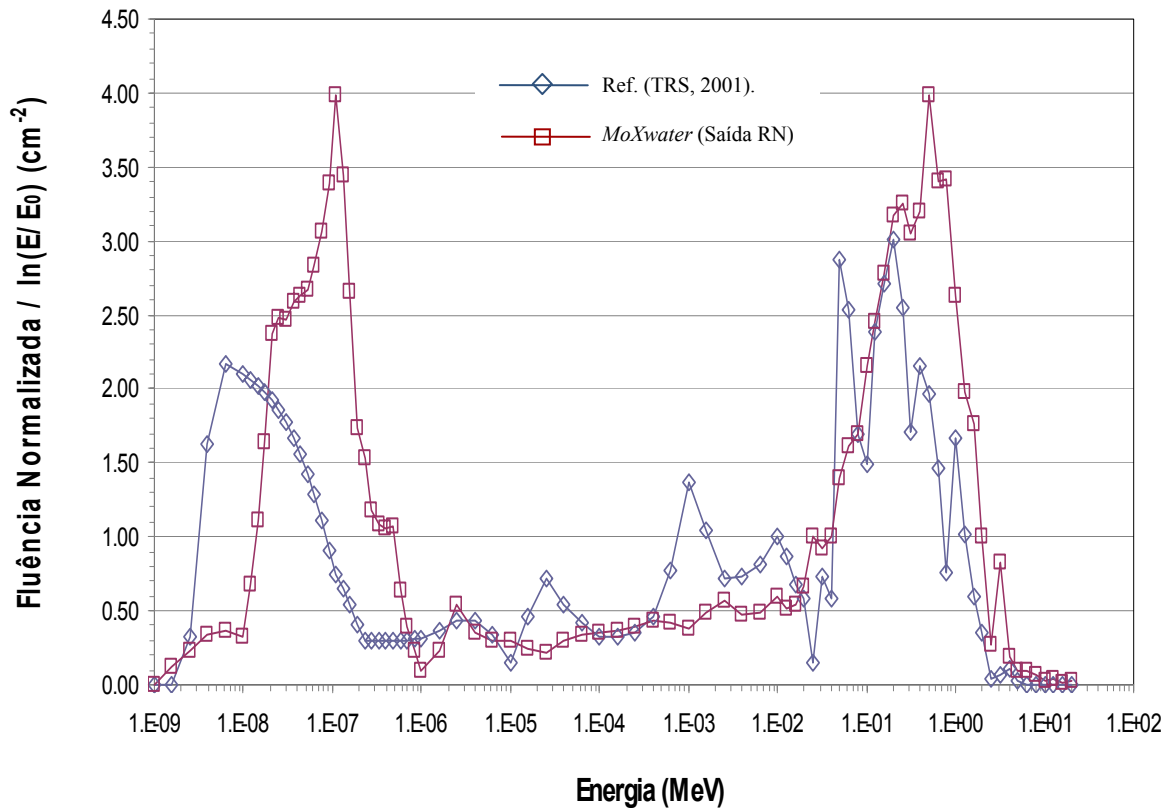


Figura 4.26. Resultado obtido da RN para *MoXwater* (através de um conjunto de entradas obtidas da equação 11) sobreposto ao espectro de referência do TRS (2001).

Validação da Rede Neural

A validação da RN é feita com a apresentação de três espectros desconhecidos, obtidos de medições realizadas em diversos locais pelo Laboratório de Nêutrons do Laboratório Nacional de Metrologia e Tecnologia – LN/LNMRI-IRD. Estes espectros não foram utilizados nas bases de dados citadas anteriormente e formam dois grupos com os seguintes conjuntos de entrada:

1. dois conjuntos de medidas de raios cósmicos realizadas no Pico das Agulhas Negras na cidade de Itatiaia e no Instituto de Estudos Avançados do Comando-Geral Tecnológico Aeroespaciais – IEAv/CTA na cidade de São José dos Campos; e
2. um conjunto de medidas realizadas no Instituto Nacional do Câncer – INCA ao redor de um acelerador linear clínico no Rio de Janeiro.

Será apresentada também, como espectro desconhecido, uma fonte de $^{238}\text{PuBe}$, que é padrão de referência do LN/LNMRI-IRD.

A Tabela 4.11 mostra o valor calculado do $H^*(d)$ pela RN (VCR_H) com uma estimativa de incerteza do VCR_H obtida através da Equação 19; o valor calculado da energia média para fluência do espectro de saída da RN ($EnMs$), com uma estimativa de incerteza da $EnMs$ obtida através da Equação 17.

Tabela 4.11. Resultados de espectros desconhecidos para as curvas apresentadas nas Figuras de 4.27 a 4.30.

Espectro	VCR_H (μSv)	$EnMs$ (MeV)
<i>Itatiaia</i>	(0,44 ± 0,02)	(1,77 ± 0,03)
<i>IEAv</i>	(0,40 ± 0,01)	(1,44 ± 0,01)
<i>INCA</i>	(0,47 ± 0,02)	(1,59 ± 0,02)
$^{238}\text{PuBe}$	(0,42 ± 0,03)	(4,11 ± 0,15)

A Figura 4.27 mostra um espectro (da cidade de Itatiaia) com características parecidas de espectro moderado, pois se observa uma contribuição significativa de nêutrons de baixa energia em até 0,25 keV. Por outro lado, um número bem maior de nêutrons em torno de 4,0 MeV também pode ser observado. O resultado obtido para VCR_H foi de (0,44 ± 0,02) μSv e o valor da $EnMs$ foi de (1,77 ± 0,03) MeV.

A Figura 4.28 mostra um espectro (medido no IEAv) semelhante ao de Itatiaia, porém com uma maior contribuição de nêutrons de baixa energia, em até 1,6 eV. Uma

contribuição significativa de nêutrons de alta energia também aparece neste espectro em torno de 4,0 MeV. O resultado obtido para VCR_H foi de $(0,40 \pm 0,01) \mu Sv$ e o valor da $EnMs$ foi de $(1,44 \pm 0,01) MeV$. A Figura 4.29 mostra um espectro (medido no Hospital do INCA) também com características semelhantes aos espectros anteriores. Os resultados para o VCR_H e para a $EnMs$ foram bem próximo dos espectros de Itatiaia e do IEAV, de $(0,47 \pm 0,02) \mu Sv$ e $(1,59 \pm 0,02) MeV$ respectivamente. A Figura 4.30 mostra um espectro de uma fonte padrão de $^{238}PuBe$ do LN/LNMRI-IRD. O espectro se apresenta com uma ganho significativo em torno de 5 MeV. O valor da $EnMs$ foi de $(4,11 \pm 0,02) MeV$ bem próximo do valor de 4,38 MeV encontrado no trabalho de LEMOS (2004).

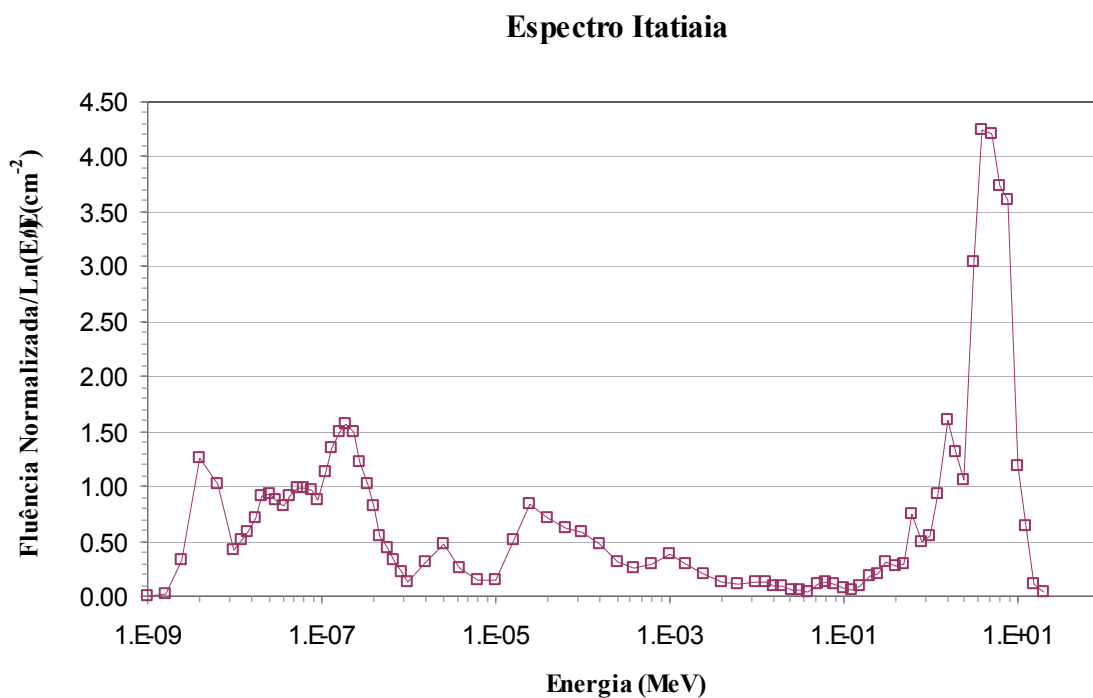


Figura 4.27. Resultado da RN para o espectro obtido no Pico das Agulhas Negras na cidade de Itatiaia.

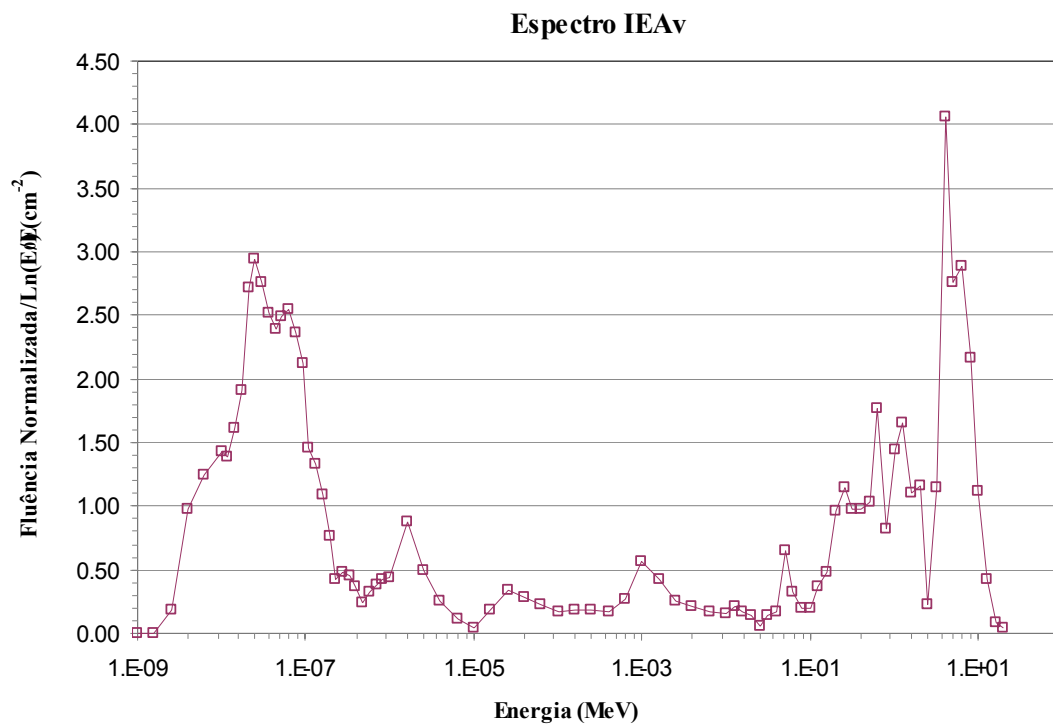


Figura 4.28. Resultado da RN para o espectro obtido no Instituto de Estudos Avançados do Comando-Geral Tecnológico Aeroespaciais – IEAv/CTA na cidade de São José dos Campos.

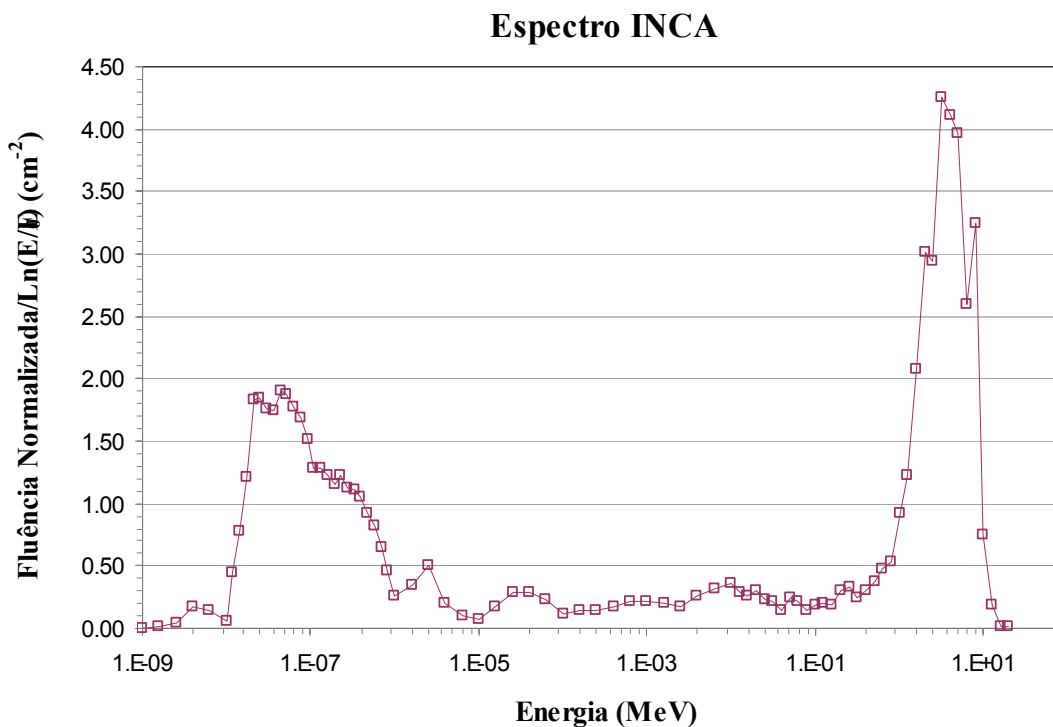


Figura 4.29. Resultado da RN para o espectro obtido no Instituto Nacional do Câncer ao redor de um acelerador linear clínico.

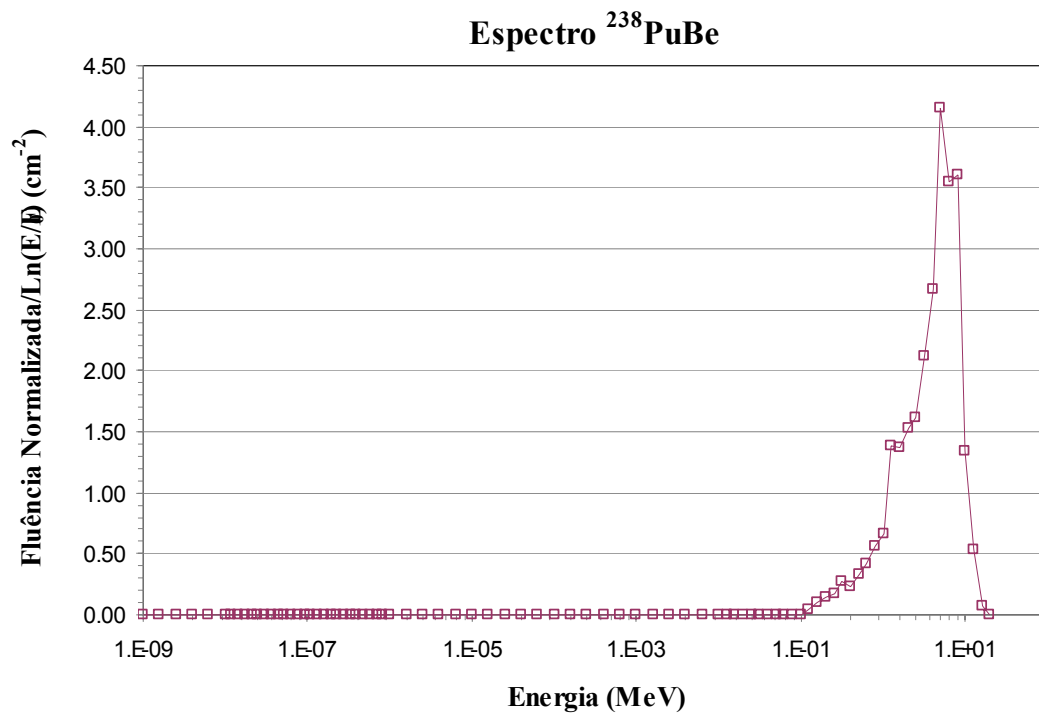


Figura 4.30. Resultado da RN para o espectro de uma fonte padrão de $^{238}\text{PuBe}$ do LN/LNMRI-IRD.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

5.1 Aspectos Gerais do Trabalho

Os recursos utilizados para a realização deste trabalho foram aqueles disponibilizados pelo Laboratório de Neutronografia em Tempo Real (LNRTR) da COPPE/UFRJ e outros importantes oferecidos pelo Laboratório de Nêutrons (LN) do Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes – LNMRI-IRD. O LN é referência na área de metrologia de nêutrons, sendo responsável pela guarda e manutenção do Padrão Brasileiro de Fluência de Nêutrons, possuindo uma infraestrutura de grande capacidade que possibilitou a realização deste trabalho.

O principal recurso oferecido pelo LN foi à disponibilização de uma ferramenta de computação de alto desempenho, ou seja, um “*cluster*” com 20 computadores do tipo PC, que foi desenvolvido no Laboratório de Métodos Computacionais do LN. Além disso, a disponibilidade de fontes de referência de nêutrons e medições realizadas em hospitais e diversas localidades externas contribuíram para o teste e validação deste trabalho.

5.2 Simulação da Matriz Resposta

A matriz resposta ROB3 apresentada neste trabalho foi construída com 84 intervalos de energia e para 13 detectores que compõem o Espectrômetro de Bonner. Isto corresponde a um total de 1092 arquivos de entradas para o MNCP. Neste Código computacional todas as saídas de interesse foram computadas com erro estatístico abaixo de 3%. As maiores dificuldades da simulação foram percebidas com a esfera de maior diâmetro (de 30,48 cm), levando um tempo de até 50 h para o seu término do processamento. Por outro lado, a simulação com o detector sem moderação convergiu rapidamente num tempo mínimo de 3 min.

5.3 Inclusão da Matriz ROB3 no Programa BUNKI

Algumas modificações na estrutura do BUNKI foram necessárias para inserção da matriz ROB3 no programa. Algumas variáveis, bem como o algoritmo de saída, foram modificadas. Vale ressaltar que existiu a necessidade de reduzir o número de intervalos de energia da ROB3, através de um ajuste linear, diminuído a resolução de 84 para 31 energias. Assim, juntamente com as outras matrizes disponíveis no BUNKI, esta agora faz parte da coleção de matrizes respostas do LN preparadas para avaliação de espectros de nêutrons.

5.4 Validação da Matriz ROB3 no programa BUNKI

As diferenças dos resultados obtidos com as matrizes, comparado com o espectro de referência, foram mais significativas, principalmente, para o espectro de $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$. Isto se deve ao fato do programa BUNKI não apresentar boa resolução em energia no processo de desdobramento de espectro de nêutrons.

Outra observação importante está no fato de que as configurações e os parâmetros adotados no programa BUNKI, para a geração dos espectros, foram aqueles definidos no trabalho de LEMOS (2004), para as matrizes SAN4 e UTA4 utilizadas na comparação. Assim, torna-se necessário um maior estudo das características do BUNKI para utilizar a matriz ROB3 com os recursos mais apropriados.

5.5 Segmentação e Base de Treinamento e Teste

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foi construída uma base de dados com informações relevantes de 192 espectros do TRS (2001), como por exemplo, a fluência e a energia média de cada um deles. Isto servirá como uma base de dados para trabalhos futuros.

O trabalho de segmentação de dados para RN deu origem a uma ideia de redução ou expansão de intervalos de energia, a partir de um simples ajuste linear. Esta ideia funcionou e também pode ser utilizada em trabalhos futuros.

5.6 Redes Neurais e Espectros Monoenergéticos

Foi visto que a RN, treinada com uma base de dados composta com espectros monoenergéticos, se comportou como esperado para os treinamentos e com características interessantes para os testes. Houve uma tendência dos neurônios adjacentes responderem mais que o neurônio da energia de referência, de modo que a soma dos ganhos destes neurônios tende ao valor do neurônio de referência. Ou seja, se consideramos o valor intermediário, pode-se dizer que o acerto do teste foi de 100%.

5.7 Redes Neurais e Espectros Polienergéticos

Foi visto que, para o treinamento, a RN conseguiu acertar 98% dos pares de entrada e saída utilizados na base de dados. Em relação ao teste, a RN acertou 26% dos pares de entrada e saída. Mesmo assim, os resultados foram satisfatórios, pois foi possível identificar vários espectros, principalmente àqueles que tendem na sua forma uma curva do tipo maxwelliana. O valor da energia média foi um ponto positivo, pois mesmo no caso em que a RN não caracterizou bem a forma do espectro, houve uma aproximação da energia média do espectro de referência. Com exceção do espectro de $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$, que foi o pior caso de teste para RN. Em relação aos espectros desconhecidos, houve coerência com os resultados. Por exemplo, as medições em Itatiaia, no Pico das Agulhas Negras, foram parecidas com aquelas obtidas no IEAv. A diferença está na moderação para este último espectro, devido à baixa altitude comparada com a medição de Itatiaia.

5.8 Recomendações para Trabalhos Futuros

Existem várias possibilidades para trabalhos futuros a partir desta atividade. Isto, devido ao desenvolvimento de algumas ferramentas de grande importância para o Laboratório de Nêutron. São elas: uma base de dados com informações de 192 espectros de referência publicados no TRS (2001); uma planilha de segmentação de dados que servirá para utilização em outros processamentos; uma matriz resposta (ROB3) com solução para 13 detectores; o programa BUNKI de desdobramento para utilização em campos de neutros; e um processo de deconvolução de espectros nêutrons através de

uma RN para uma resposta mais resolvida em energia. Com isso, podem ser desenvolvidas as seguintes atividades:

1 – atualizar a matriz resposta ROB3 a fim de reduzir o erro estatístico para abaixo de 1%;

2 – simular a resposta do EB para os espectros do TRS (2001) a partir da base de dados criada neste trabalho;

3 – realizar um estudo mais detalhado dos grupos de espectros do TRS (2001) para uma melhor classificação dos mesmos;

4 – pesquisar novas arquiteturas de RN a fim de melhorar a incerteza dos resultados; e

5 – modificar o programa BUNKI buscando atualizar os coeficientes de conversão para as grandezas operacionais de radioproteção da ICRP74 (1995), melhorando com isso a resolução em energia.

6 – Aumentar a capacidade da matriz resposta para nêutrons de maiores energia acima de 20 MeV, simulando feixes monoenergéticos com moderadores de polietileno coberto com cádmio ou outro material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APFEL, R. E. 1979, “The superheated drop detector”, *Nuclear instruments and Methods*, Vol 162, pp. 603-608.
- AHALT, S.C. Chen, P. Chou, C.-T., 1990, “ The Neural Shell: A Neural Network Simulation Tool” , In : *Proceedings of the 2nd International IEEE Conference on Tools for Artificial Intelligence*, pp 118-124, Herndon, VA, USA.
- BAARD, J. H., ZIJP, W. L., HOLTHENIUS, H. J., 1989, “Nuclear Data Guide for Reactor Neutron Dosimetry”, Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands.
- BATCHELOR, R., MORRISON, G. C., 1960, in: J.B. Marion, J.F. Fowler (Eds), *Fast Neutron Physics*, Part 1, Interscience, New York, pp. 413.
- BATTISTONI, G., MURARO, S., SALA, P. R., 2007, "FLUKA: a multi-particle transport code", *Proceedings of the Hadronic Shower Simulation Workshop 2006*, Fermilab 6--8 September 2006, M. Albrow, R. Raja eds., AIP Conference Proceeding 896, 31-49.
- BRAMBLETT, R. L., EDWING, R. I., BONNER, T. W., 1960, “A new type of neutron spectrometer”, *Nuclear instruments and Methods*, Vol. 9 pp. 1-12.
- BERDOGNI, R., et al., 2007, “Neutron Spectrometry Around A High-Energy Electron–Positron Collider Using A Multi-Sphere System With Passive Detectors”, *Radiation Protection Dosimetry*, v. 126, n.1–4, pp. 541–545
- BRIESMEISTER, J. F., 2000, “MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport, Code, Version 4C2”, Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory; LA-13709-M, April.
- BROOKS, F. D., KLEIN, H., 2002, “Neutron Spectrometry - Historical review and present status”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Section A Vol. 476 pp. 1-11.
- CAO, Z., MILLER, L. F., BUCKNER, E., 1998, “Implementation of Dynamic Bias for Neutron-photon Pulse Shape Discrimination by Using Neural Network Classifiers”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Section A Vol. 416 pp. 438-445.
- CARRILLO, H. R. V., HERNÁNDEZ, V. M., MANZANARES, E., et. al., 2003, “Reconstrucción de Espectros de Neutrones Mediante Redes Neuronales”, In: *XIV Congreso Annual de la SMM/XXI Reunión Annual de la SMSR*, México, Septiembre.

- CARRILLO, H. R. V., HERNÁNDEZ, V. M., MANZANARES, E., et. al., 2005, “Artificial neural networks in neutron dosimetry”, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 118 n. 3, pp. 251-259.
- CARRILLO, H. R. V., HERNÁNDEZ, V. M., MANZANARES, E., et. al., 2006, “Neutron spectrometry using artificial neural networks”, *Radiation Measurements*, Vol 41, pp. 425-431.
- CARRILLO, H. R. V., HERNÁNDEZ, V. M., MANZANARES, E., et. al., 2007, “Artificial Neural Networks Technology for Neutron Spectrometry and Dosimetry”, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 126, n. 1-4 pp. 408-412.
- ESPOSITO A., NANDY, M., 2004, “Measurements and Unfolding of Neutron Spectra Using Bonner Spheres”, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 110, n. 1-4 pp. 555-558.
- CONRAD, 2005, “*Uncertainty Assessment in Computational Dosimetry – An Intercomparison of Approaches*”, CONRAD – Coordinated Network for Radiation Dosimetry, EURADOS – European Radiation Dosimetry Grup., <http://www.eurados.org/conrad/>.
- CRUZATE, J. A., GREGORI, B. N., et al., 2002, “Multisphere Neutron Spectrometric System with Thermoluminescent Detectors” *IRPA – International Radiation Protection Association*, Japan, pp-3b-158.
- DEARNALEY, G., 1963, in: G. C. Phillips, J.B. Marion, J. R. Risser (Eds), *Progress in Fast Neutron Physics*, The University of Chicago Press, Chicago, pp.173.
- DHAIRYAWAN, M. P., et al., 1980, “Response Functions of Spherically Moderated Neutron Detectors”, *Nuclear Instruments and Methods*, Vol. 169 pp. 115-120.
- ESPOSITO A., NANDY M., 2004, “Measurement and Unfolding of Neutron Spectra Using Bonner Spheres”, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 110 n. 1-4 pp. 555-558.
- EJIRI, H., MATSUOKA, K., CHOI E., 1991, “Low-background Measurement of Fast Neutrons by Means of Ge Detectors”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Section A Vol. 302 pp. 482-488.
- FEHRENBACHER, G., SCHUTZ, R., HAHN, K., et al., 1999, “Proposal of a New Method for Neutron Dosimetry Based on Spectral Information Obtained by Application of Artificial Neural Networks”, *Radiation Protection Dosimetry* Vol. 83 n. 4 pp. 293-301.

- FERGUSON, A. T., 1960, in: J.B. Marion, J.F. Fowler (Eds), *Fast Neutron Physics*, Part 1, Interscience, New York, pp. 179.
- FERNÁNDEZ, F., 2002, “Espectrometría de neutrones aplicada a la dosimetría”, *Radioprotección - Revista de la Sociedad Española de Protección Radiológica*, Vol. IX, Nº 34, p. 36-44.
- FERNÁNDEZ, F., et al., 2007, “Neutron Measurements In Spanish Nuclear Power Plants With A Bonner Sphere Spectrometer System”, *Radiation Protection Dosimetry*, pp.1-6
- FERREIRA, F. J. O., 2008, *Detecção de explosivos plásticos e narcóticos, aplicando neutrongrafia em tempo real, aliada à tomografia computadorizada por transmissão*, Tese de D.Sc., PEN/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- GROSSHOEG, G., 1979, “Neutron ionization chambers”, *Nuclear instruments and Methods*, Vol 162, pp. 125-160.
- HARVEY, J. A., HILL, N. W., 1979, “Scintillation detectors for neutron physics research”, *Nuclear instruments and Methods*, Vol 162, pp. 507-529.
- HAWKES, N. P., VAN BELLE, P., DIXON, P., et al., 1993, “A 2.5 MeV neutron spectrometry system with a tangential line of sight for the D-D phase at the JET tokamak”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Section A Vol. 335 pp. 533-546.
- HEBB, D. O., 1949, “*The Organization of Behavior*”. Wiley.
- HERBERT, M.S., et al., 2007, “Determination of Neutron Energy Spectra Inside a Water Phantom Irradiated by 64 MeV Neutrons” *Radiation Protection Dosimetry*, v. 126, n. 1-6, pp. 346-349
- ICRP 74, 1995, “*Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation*”, ICRP Publication 74, International Commission on Radiological Protection.
- IGUCHI, T., SATOH, S., TAKAHASHI, H., et al., 1995, “Application of Neural Network to Neutron Dosimetry Using Activation Foils”, *Hoshashe*, Vol. 21 n. 4.
- ISO, 2001, “*Characteristics and methods of production*”, International Organization for Standardization, ISO8529-1. Neutron Reference Radiation – Part 1.
- ISOGUM, 1998, “*Guia para a expressão da incerteza de mediação*”, International Organization for Standardization. Edição Revisada, Segunda Edição Brasileira.
- JARVIS, O. N., 2002, “Neutron Spectrometry at JET (1983–1999)”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Section A Vol. 476 pp. 474-484.

- JOHNSON, T. L., GORBICS, S. G., 1981, “An Iterative Perturbation Method for Unfolding Neutron Spectron form Bonner Sphere Data”, *Health Physics*. Vol 41, pp. 859.
- KARDAN, M. R., SETAYESHI, S., KOOHI-FAYEGH, R., et. al., 2003, “Neutron Spectra Unfolding in Bonner Spheres Spectrometry Using Neural Networks”, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 104, pp. 27-30.
- KOVÁCS, Z. L., 2002, “*Redes Neurais Artificiais: Fundamentos e aplicações*”. São Paulo , SP – Livraria da Física Editora.
- KRASILNIKOV, A. V., KANEKO, J., ISOBE, M., et al., 1997, “Fusion Neutronic Source deuterium–tritium neutron spectrum measurements using natural diamond detectors”, *Review of Scientific Instruments*, Vol 68, Issue 4, pp. 1720-1724.
- LEMOS JR, R. M., PEREIRA, W. W., DA SILVA, A. X., et. al., 2006, “Desenvolvimento de uma Matriz Resposta para o Espectrômetro de Multiesferas de Bonner”, *Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento*, v. 7.
- LEMOS JR, R. M., DA SILVA, A. X., PEREIRA, W. W., 2005, “Determinação de uma Matriz Resposta para o Espectrômetro de Multiesferas de Bonner”. *International Nuclear Atlantic Conference – INAC*, Santos, São Paulo, BR, 28-Ago – 2-Set.
- LEMOS JR, R. M., 2004, *Medidas de espectros de referência de nêutrons com o Espectrômetro de Multiesfera de Bonner*, Dissertação de M.Sc., IRD/CNEN, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- LOWRY, K. A., JOHNSON T. L., 1984a, *Modifications to Iterative Recursion Unfolding Algorithms and Computer Codes To Find More Appropriate Neutron spectra*. In: NRL Memorandum Report 5340, Naval Research Laboratory, Washington, D. C., USA.
- LOWRY, K. A., JOHNSON T. L., 1984b, *The effect of the Choise of Response Matrix on Unfolded Bonner Sphere Spectra*. In: NRL Memorandum Report 5493. Naval Research Laboratory. Washington, D. C., USA.
- MARES, V., SCHRAUBE, H., 1993, “Evaluation of the matrix of a Bonner Sphere Spectrometer with LiI detector from thermal energia to 100 MeV”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Section A Vol. 337 pp. 461-473.
- MATTHIÃ, D., SIHVER, L., MEIER, M., 2008, “Monte-Carlo Calculations of Particle Fluences and Neutron Effective Dose Rates in the Atmosphere”, *Radiation Protection Dosimetry*, v.131, n.2, pp.222-228

- MATZKE, M., 1994. “Unfolding of pulse height spectra: The HEPRO program system”, Report PTB-N-19, Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt.
- MAZROU, H., et al., 2008, “Characterization of the CRNA Bonner Sphere Spectrometer Based on ^6LiI Scintillator Exposed to an ^{241}Am -Be Neutron Source”, *Radiation Measurements*, v. 43, pp. 1095-1099
- MEIGO, S., TAKADA, H., CHIBA, S., et al., 1999, “Measurements of neutron spectra produced from a thick lead target bombarded with 0.5- and 1.5-GeV protons”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Section A Vol. 431 pp. 521-530.
- MCCULLOCH, W. S., PITTS, W., 1943 “A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity”, *Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 5 pp.115-133.
- MUEHLHAUSE, C. O., 1960, in: J.B. Marion, J.F. Fowler (Eds), *Fast Neutron Physics*, Part 1, Interscience, New York, pp. 123.
- MUKHERJEE, B., 2004, “ANDI-03: A Genetic Algorithm Tool for the Analysis of Activation Detector Data to Unfold High-Energy Neutron Spectra”, *Radiation Protection Dosimetr*, Vol. 110, pp. 249-254.
- NAISMITH, O. F., SIEBERT, B. R. L., 1997, “A Database of Neutron Spectra, Instrument Response Functions, and Dosimetric Conversion Factors for Radiation Protection Applications”, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 70 pp. 241-246
- OLMOS, P., DIAZ, J. C., PEREZ, J. M., GARCIA, G., 1992, “Application of Neural Network Techniques in Gama Spectroscopy”, *Nuclear Instruments and Methods in Physucis Research*, Section A Vol. 312 pp. 167-173.
- OLMOS, P., DIAZ, J. C., PEREZ, J. M., GOMEZ, P., et al., 1991, “A New approach to automatic radiation spectrum analysis”, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 38 n. 4.
- PEREIRA, W. W., 1999, *Reconhecimento de Padrões por Morfologia Matemática e Redes Neurais Consirerando Incertezas: Uma Aplicação à Língua Portuguesa*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- REGINATO, M. GOLDHAGEN, P., NEUMANN, S., 2002, “Spectrum unfolding, sensitivity analysis and propagation of uncertainties with the maximum entropy deconvolution code MAXED”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Section A Vol. 476 pp. 242-246.

- ROBERTS, N.J., 2007, “Investigation of Combined Unfolding of Neutron Spectra Using The UMG Unfolding Codes”, *Radiation Protection Dosimetry*, v. 126, n.1-4, pp. 398-403
- ROSENBLATT, F., 1958, “The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain”, *Psychol. Rev.*, Vol. 65 pp.386-408.
- RUMELHART, D. E., HINTON, G. E., WILLIAMS, R. J., 1986, “*Learning Representations by Back-propagation Error*”, *Nature*, Vol. 323 pp.533-536.
- ROUTTI, J. T., SANDBERG, J. V., 1980, “General Purpose Unfolding Program LOUHI78 with Linear and Nonlinear Regularizations”. *Computer Physics. Commun* 21 p. 119-114.
- SCHRAUBE, H., HIETEL, B., JAKES, J., et al., 1997 “GRENF – The GSF Realistic Neutron Field Facility”, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 70 pp. 337-340.
- SEGHOOR, A., SENS, J., C., 1999, “Neutron spectrometry at Strasbourg University Reactor”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A* Vol. 420 pp. 243-248.
- SILVEIRA, R. R., 2006, *Utilização de Redes Neurais Artificiais para Identificação de Energias em Campos Fotônicos com Materiais Termoluminescentes*, Dissertação de M. Sc., PROTEN-DEM/UFPE, Recife, PE, Brasil.
- SWARTZ, C. D., Owen, G. E., 1960, in: J.B. Marion, J.F. Fowler (Eds), *Fast Neutron Physics, Part 1*, Interscience, New York, pp. 211.
- TAKEDA, N., KUDO, K., TOYOKAWA, H., et al., 1999, “A development of NESRPG Monte Carlo Code for the calculation of neutron response function for gas counters”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A* Vol. 422 pp. 69-74.
- THOMAS, D. J., ALEVRA, A. V., 2002, “Bonner Sphere Spectrometers – A Critical Review”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A* Vol. 476 pp. 12-20.
- THOMAS, D. J., KLEIN, H., 2003, “Why is spectrometry needed for radiation protection”, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 107 pp. 13-21.
- THOMAS, D.J., et al., 2007, “Characterization And Utilization Of A Bonner Sphere Set Based On Gold Activation Foils”, *Radiation Protection Dosimetry*, v.126, n. 1-4, pp.229-233

- TOMÁS, M., FERNANDEZ F., BAKALI M., et al., 2004, “MITON: a new unfolding code based on a spectra model method applied to neutron spectrometry”, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 110 pp. 545-548.
- TRIPATHY, S.P., 2009, “Measurement of ^{241}Am -Be Spectra (bare and Pb covered) Using TLD Pairs in Multi-spheres: Spectrum Unfolding by Different Methods”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, v.598, pp. 556-560
- TRS, 1982, “*Dosimetry for Criticality Accidents*”, International Atomic Energy Agency – IAEA, Technical Report Series n° 211, Vienna.
- TRS, 1988, “*Guidelines on Calibration of Neutron Measuring Devices*”, International Atomic Energy Agency – IAEA, Technical Report Series n° 285, Vienna.
- TRS, 2001, “*Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes*”, International Atomic Energy Agency – IAEA, Technical Report Series n° 318 e n° 403, Vienna.
- VERBINSKI, V. V., BURROS, W. R., LOVE, T. A., et al., 1968, *Nuclear Instruments and Methods*, Vol 65, pp 8.
- VIGNERON, V., MOREL, J., LÉPY, M. C., et al., 1996, “Statistical Modelling of Neural Network Techniques in Gama Spectroscopy”, *Nuclear Instruments and Methods in Physucis Research*, Section A Vol. 369 pp. 642-647.
- VANHAVERE, F. D'ERRICO, F., 2002, “Standardisation of Superheated Drop and Bubble Detectors” *Radiation Protection Dosimetry*, v.101, pp. 283 - 287
- WHITE, R. S., 1960, in: J.B. Marion, J.F. Fowler (Eds), *Fast Nêutron Physics*, Part 1, Interscience, New York, p. 297.
- WIDROW, B., HOFF, M. E., 1960, “Adaptative Switching Circuits”, *Institute of Radio Engineers*. Western Electronic Show and Convention.
- WU, M. W., GUUNG, T.C., PEI, C.C., 1999, “Absolute Neutron Fluence Measurements Between 0.5 and 3 MeV and their Intercomparisons”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Section A Vol. 422 pp. 79-83.
- ZAMENHOF, R.G., CLEMENT, S.D., HARLING, O.K., BRENNER, J.K., WAZER, D.E., MADOC-JONES, H., YANCH, J.C., 1996, “Monte Carlo-Based Treatment Planning for Boron Neutron Capture Therapy Using Custom Designed Models Automatically Generated From CT Data”, *Int. J. Radiation Oncology Biol Phys*, Vol. 35, n. 2, pp. 383-397.

ZIMBAL, A., REGINALTTO, M., SCHUHMACHER, H., 2004, "Compact NE213 neutron spectrometer with high energy resolution for fusion applications", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 75, Issue 10, pp. 3553-3555.

ANEXO I

***Exemplo de arquivo de entrada do Código MCNP
utilizado para obtenção da matriz resposta ROB3 para
feixes de nêutrons monoenergéticos.***

```
Espectrômetro de Bonner - Esfera de 8 Polegadas de Diâmetro
c
c *****
c ***CÁLCULO DA MATRIZ RESPOTA***
c *****
c
c *****
c ***** Células *****
c *****
c ****Detector LiI****
100 1 -3.494 -2 -4 6
c
c ****Cavidades do detector****
105 0 -8 -10 6 #100
c cilindro 1 interno
110 2 -1.19 -8 -6 12
c cilindro 1 externo
120 3 -2.7 -14 -16 17 #100 #105 #110
c cilindro 2 interno
130 2 -1.19 -18 -12 20
c Cilindro 2 externo
140 3 -2.7 -22 -17 24 8 #130
c foto catodo
145 2 -1.19 -22 -24 20 #130 #140
146 2 -1.19 -23 -24 25 #130 #140 #145
c cilindro 3 interno
150 0 -26 -20 28 #146
c cilindro 4 interno
160 0 -30 -28 32
c cilindro 5 interno
165 3 -2.7 -22 -32 38
c BNC Conector
170 0 -44 46 -47 48 1000 -2000 #160
c cilindro 3, 4 e 5 externo
175 3 -2.7 -34 -36 38 22 #130 #140 #145 #146 #150 #160 #165
#170
c cilindro 6
180 3 -2.7 -40 -38 42
c
c ****Cavidade da Esfera****
200 4 -0.95 -50 #100 #105 #110 #120 #130 #140 #145 #146 #150
#170 #175
c
c ****Vácuo****
300 0 -60 #100 #105 #110 #120 #130 #140 #145 #146 #150 #160 #165
#170 #175 #180 #200
c
c ****Universo****
400 0 60
c *****
c ***** Superfície *****
c *****
c Superfícies do detector
2 cz 0.2
4 pz 0.2
6 pz -0.2
c Cilindro1 Interno
8 cz 0.5
10 pz 0.7
```

```

12      pz      -3.8
c      Cilindro1 Externo
14      cz      0.7
16      pz      0.9
17      pz      -3.6
c      Cilindro2 Interno
18      cz      0.6
20      pz      -10.8
c      Cilindro2 Externo
22      cz      0.9
c      Foto catodo
23      cz      1.42
24      pz      -10.6
25      pz      -11
c      Cilindro3 Interno
26      cz      2.14
28      pz      -24.53
c      Cilindro4 Interno
30      cz      1.94
32      pz      -28.41
c      Cilindro34 Externo
34      cz      2.54
36      pz      -9.6
38      pz      -28.91
c      Cilindro6
40      cz      0.8
42      pz      -30.51
c      BNC conector
44      pz      -25.83
46      pz      -27.11
47      px      3.5
48      px      1
1000     py      -0.8
2000     py      0.7
c      Esfera
50      so      10.16
c
c      Superfície do Vácuo
60      so      120

c      *****
c      ***** Definição de Material *****
c      *****
mode n
c      (LiI)
m1      3006.  -0.0436 $ 6Li
        3007.  -0.0018 $ 7Li
        53127. -0.9546 $ I

c
c      <Acrílico PMMA>
m2      6012.  -0.6 $ C
        1001.  -0.08 $ H
        8016.  -0.32 $ O

c
c      <Alumínio>
m3      13027. -1 $ Al
c
c      <Polietileno )
m4      6012.  -0.857 $ C
        1001.  -0.143 $ H

c
imp:n 1 15r 0 $ 100, 400
sdef   pos = 0.00000000 100.0000000 0.00000000
        vec = 0.00000000 -1.00000000 0.00000000
        axs = 0.00000000 -1.00000000 0.00000000
        rad = d1 dir = 1  erg = 6.310E-03
        ara = 324.29279
sil 0 10.16

```

```

sp1 -21 1
c
fc4 ***** FLUXO DE NÊUTRONS NO DETECTOR - CELL 100 *****
f4:n 100
c e4 5.12e-7 1e-02 1e-1 7e-1 9e-1 1e+0 7e+0 9e+0 10 15 20 50 100
e4 1.000E-09 1.585E-09 2.512E-09 3.981E-09 6.310E-09 1.000E-08 1.202E-08
1.445E-08 1.738E-08 2.089E-08 2.512E-08 3.020E-08 3.631E-08 4.365E-08
5.248E-08 6.310E-08 7.586E-08 9.120E-08 1.096E-07 1.318E-07 1.585E-07
1.905E-07 2.291E-07 2.754E-07 3.311E-07 3.981E-07 4.786E-07 5.754E-07
6.918E-07 8.318E-07 1.000E-06 1.585E-06 2.512E-06 3.981E-06 6.310E-06
1.000E-05 1.585E-05 2.512E-05 3.981E-05 6.310E-05 1.000E-04 1.585E-04
2.512E-04 3.981E-04 6.310E-04 1.000E-03 1.585E-03 2.512E-03 3.981E-03
6.310E-03 1.000E-02 1.259E-02 1.585E-02 1.995E-02 2.512E-02 3.162E-02
3.981E-02 5.012E-02 6.310E-02 7.943E-02 1.000E-01 1.259E-01 1.585E-01
1.995E-01 2.512E-01 3.162E-01 3.981E-01 5.012E-01 6.310E-01 7.943E-01
1.000E+00 1.259E+00 1.585E+00 1.995E+00 2.512E+00 3.162E+00 3.981E+00
5.012E+00 6.310E+00 7.943E+00 1.000E+01 1.259E+01 1.585E+01 2.000E+02
fm4 1.58933E-03 1 (-2) (105)
c OBS: (316187E-2*5.02655E-02) = 1.58933E-03 Fator de Peso
mt4 POLY.01T
c
nps 20000000
prtmp 2j 1 1
print

```

ANEXO II

Exemplo de arquivo de entrada do Código MCNP utilizado para simulação da resposta do Espectrômetro de Bonner em alguns campos de referência de $^{241}\text{AmBe}$, de ^{252}Cf e de $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$ (Norma ISO, 2001).

Espectrômetro de Bonner - Esfera de 8 Polegadas de Diâmetro

```
c
c *****
c ***SIMULAÇÃO DA RESPOSTA DO EB***
c *****
c
c *****
c ***** Células *****
c *****
c ****fonte****
1 5 -0.00134 (-200 300 -400)
2 6 -7.93 (200:-300:400)(-500 -600 700)
3 7 -1.1056 -750 #1 #2
4 6 -7.93 -800 750
5 8 -8.65 -850 800
c
c ****Detector LiI****
100 1 -3.494 -2 -4 6
c
c ****Cavidade do detector****
105 0 -8 -10 6 #100
c cilindro 1 interno
110 2 -1.19 -8 -6 12
c cilindro 1 externo
120 3 -2.7 -14 -16 17 #100 #105 #110
c cilindro 2 interno
130 2 -1.19 -18 -12 20
c Cilindro 2 externo
140 3 -2.7 -22 -17 24 8 #130
c foto catodo
145 2 -1.19 -22 -24 20 #130 #140
146 2 -1.19 -23 -24 25 #130 #140 #145
c cilindro 3 interno
150 0 -26 -20 28 #146
c cilindro 4 interno
160 0 -30 -28 32
c cilindro 5 interno
165 3 -2.7 -22 -32 38
c BNC Conector
170 0 -44 46 -47 48 1000 -2000 #160
c cilindro 3, 4 e 5 externo
175 3 -2.7 -34 -36 38 22 #130 #140 #145 #146 #150 #160 #165
#170
c cilindro 6
180 3 -2.7 -40 -38 42
c
c ****Cavidades da Esfera****
200 4 -0.95 -50 #100 #105 #110 #120 #130 #140 #145 #146 #150
#170 #175
c ****Vácuo****
300 0 -60 #1 #2 #3 #4 #5 #100 #105 #110 #120 #130 #140 #145 #146
#150 #160 #165 #170 #175 #180 #200
c
c ****Universo****
400 0 60
c
c *****
c ***** Superfície *****
```

```

c          *****
c  Superfícies do detector
2          cz          0.2
4          pz          0.2
6          pz         -0.2
c  Cilindro1 Interno
8          cz          0.5
10         pz          0.7
12         pz         -3.8
c  Cilindro1 Externo
14         cz          0.7
16         pz          0.9
17         pz         -3.6
c  Cilindro2 Interno
18         cz          0.6
20         pz         -10.8
c  Cilindro2 Externo
22         cz          0.9
c  Foto catodo
23         cz          1.42
24         pz         -10.6
25         pz         -11
c  Cilindro3 Interno
26         cz          2.14
28         pz         -24.53
c  Cilindro4 Interno
30         cz          1.94
32         pz         -28.41
c  Cilindro34 Externo
34         cz          2.54
36         pz          -9.6
38         pz         -28.91
c  Cilindro6
40         cz          0.8
42         pz         -30.51
c  BNC conector
44         pz         -25.83
46         pz         -27.11
47         px          3.5
48         px          1
1000        py         -0.8
2000        py          0.7
c  Esfera
50         so          10.16
c  Fonte
200         C/z 0 100 .19558 $ raio do material radioativo
300         Pz         -.4065
400         Pz         .2033
500         C/z 0 100 .277
600         Pz         .597
700         Pz         -.597
c  Moderação
750         sy         100 15
800         sy         100 15.1
850         sy         100 15.608
c  Superfície do Vácuo
60         so          120

c          *****
c          ***** Definição de Material *****
c          *****
mode  n
c      (LiI)
m1    3006. -0.0436 $ 6Li
      3007. -0.0018 $ 7Li
      53127. -0.9546 $ I

c
c      <Acrílico PMMA>

```

```

m2      6012.  -0.6 $ C
        1001.  -0.08 $ H
        8016.  -0.32 $ O

c
c      <Alumínio>
m3      13027.  -1 $ Al
c
c      <Polietileno>
m4      6012.  -0.857 $ C
        1001.  -0.143 $ H

c
c      **** Materiais formadores da fonte radioativa ****
c      <Califórnio>
m5      98252  1 $ Cf
c      <Aço>
m6      26000 -0.65395 24000 -0.17 28000 -0.11
        25055 -0.02 14000 -0.01 15031 -0.00045
        16032 -0.0003 6012 -0.0003 42000 -0.025
c      <Deutério>
m7      1002  0.667 $ D2O
        8016  0.333 $ O
c      <Cádmio>
m8      48112  1 $ Cd
c
imp:n  1  20r  0  $ 100, 400
c
SC1  Fonte cilíndrica de Cf252+D2O
SDEF  ERG=D1 POS=0 100 -.4065 AXS=0 0 1 EXT=D2 RAD=d3
c      DIR=D4 VEC=0 -1 0 WGT=0.00202
C      ***** Espectro da ISO 8529-
1:2001*****
SI1  h 4.14E-07 1.00E-06 1.00E-05 5.00E-05 1.00E-04 2.00E-04 4.00E-04 7.00E-04
      1.00E-03 3.00E-03 6.00E-03 1.00E-02 2.00E-02 4.00E-02 6.00E-02 8.00E-02
      1.00E-01 1.50E-01 2.00E-01 2.50E-01 3.00E-01 3.50E-01 4.00E-01 4.50E-01
      5.00E-01 5.50E-01 6.00E-01 7.00E-01 8.00E-01 9.00E-01 1.00E+00 1.20E+00
      1.40E+00 1.60E+00 1.80E+00 2.00E+00 2.30E+00 2.60E+00 3.00E+00 3.50E+00
      4.00E+00 4.50E+00 5.00E+00 6.00E+00 7.00E+00 8.00E+00 9.00E+00 1.00E+01
      1.10E+01 1.20E+01 1.30E+01 1.40E+01 1.50E+01
SP1  d 0.00E+00 3.10E-10 1.11E-08 1.27E-07 2.76E-07 7.82E-07 2.21E-06 4.53E-06
      5.68E-06 5.51E-05 1.28E-04 2.30E-04 7.74E-04 2.17E-03 2.80E-03 3.29E-03
      3.68E-03 1.05E-02 1.21E-02 1.33E-02 1.42E-02 1.49E-02 1.55E-02 1.60E-02
      1.63E-02 1.66E-02 1.68E-02 3.38E-02 3.39E-02 3.37E-02 3.33E-02 6.46E-02
      6.12E-02 5.73E-02 5.31E-02 4.88E-02 6.55E-02 5.67E-02 6.33E-02 6.21E-02
      4.68E-02 3.49E-02 2.58E-02 3.30E-02 1.74E-02 9.01E-03 4.61E-03 2.33E-03
      1.17E-03 5.83E-04 2.88E-04 1.42E-04 6.95E-05

c
SI2  0 .6098
SP2  -21 0
SI3  0 .19558
SP3  -21 1
c
fc4      ***** FLUXO DE NÊUTRONS NO DETECTOR - CELL 100 *****
f4:n  100
c  e4  5.12e-7 1e-02 1e-1 7e-1 9e-1 1e+0 7e+0 9e+0 10 15 20 50 100
e4      1.000E-09 1.585E-09 2.512E-09 3.981E-09 6.310E-09 1.000E-08 1.202E-08
      1.445E-08 1.738E-08 2.089E-08 2.512E-08 3.020E-08 3.631E-08 4.365E-08
      5.248E-08 6.310E-08 7.586E-08 9.120E-08 1.096E-07 1.318E-07 1.585E-07
      1.905E-07 2.291E-07 2.754E-07 3.311E-07 3.981E-07 4.786E-07 5.754E-07
      6.918E-07 8.318E-07 1.000E-06 1.585E-06 2.512E-06 3.981E-06 6.310E-06
      1.000E-05 1.585E-05 2.512E-05 3.981E-05 6.310E-05 1.000E-04 1.585E-04
      2.512E-04 3.981E-04 6.310E-04 1.000E-03 1.585E-03 2.512E-03 3.981E-03
      6.310E-03 1.000E-02 1.259E-02 1.585E-02 1.995E-02 2.512E-02 3.162E-02
      3.981E-02 5.012E-02 6.310E-02 7.943E-02 1.000E-01 1.259E-01 1.585E-01
      1.995E-01 2.512E-01 3.162E-01 3.981E-01 5.012E-01 6.310E-01 7.943E-01
      1.000E+00 1.259E+00 1.585E+00 1.995E+00 2.512E+00 3.162E+00 3.981E+00
      5.012E+00 6.310E+00 7.943E+00 1.000E+01 1.259E+01 1.585E+01 2.000E+02
fm4  1.58933E-03 1 (-2) (105)
c  OBS: (316187E-2*5.02655E-02) = 1.58933E-03 Fator de Peso

```

```
c  
mt4 POLY.01T  
c  
nps 2100000000  
prdmp 2j 1 1  
print
```


ANEXO III

Respostas de alguns espectros polienergéticos obtidas no teste da base de dados TRS403E202, para as referências publicadas no compêndio de espectros TRS (2001).

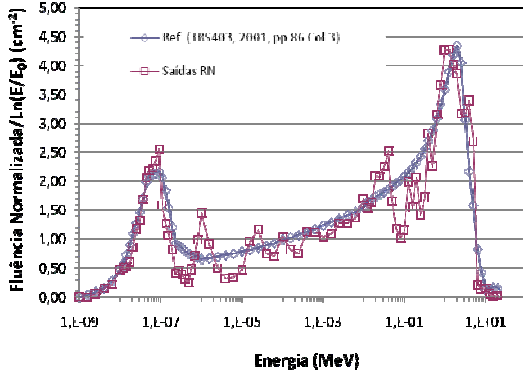


Figura 4.31. Espectro medido de ^{252}Cf (no PTB, Alemanha) com um cone de sombra (TRS, 2001).

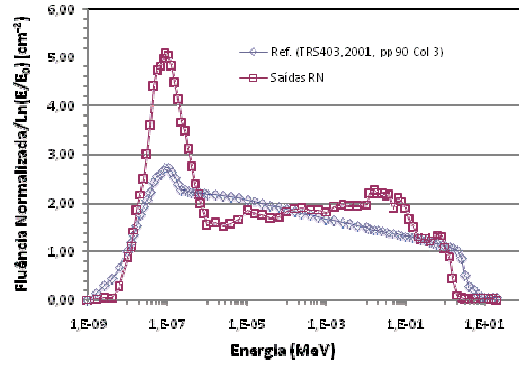


Figura 4.32. Espectro medido de $^{252}\text{Cf}+\text{D}_2\text{O}$ (no PTB, Alemanha) com um cone de sombra (TRS, 2001).

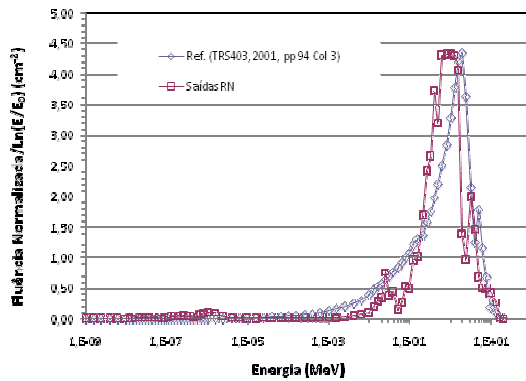


Figura 4.33. Espectro medido de $^{252}\text{Cf}+\text{C}$ na Universidade de Tohoku, Japão (TRS, 2001).

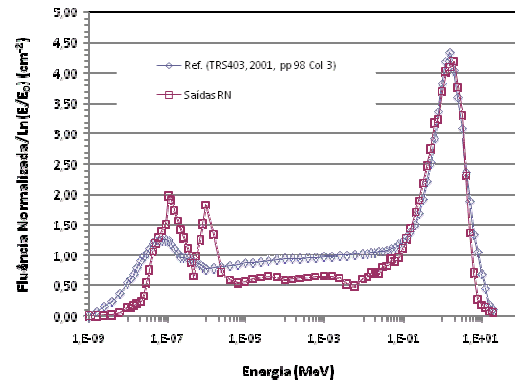


Figura 4.34. Espectro medido de $^{242}\text{AmBe}$ (no PTB, Alemanha) com um cone de sombra (TRS, 2001).

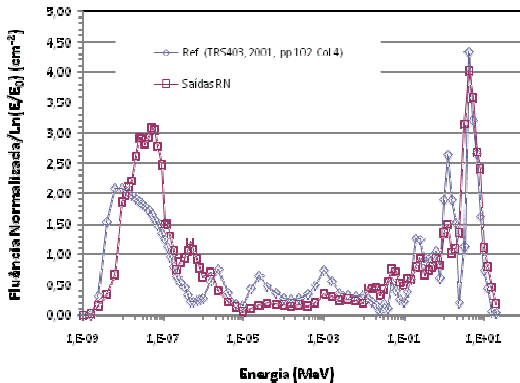


Figura 4.35. Espectro medido de $^{238}\text{PuBe}$ (CERN, Suíça) a 3 m de distância da fonte (TRS, 2001).

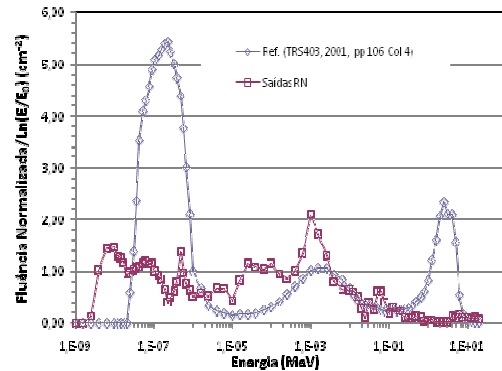


Figura 4.36. Espectro medido de $^{238}\text{PuBe}+\text{D}_2\text{O}$ (no LLNL, USA), considerando o espalhamento da sala (TRS, 2001).

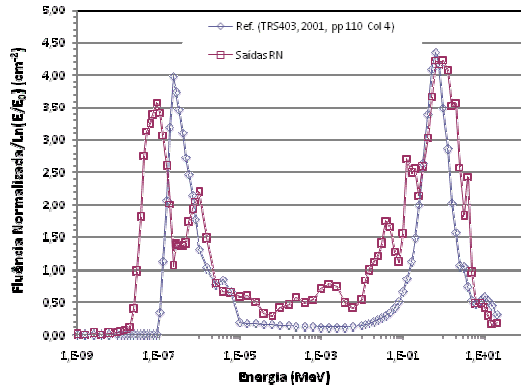


Figura 4.37. Espectro medido de Fluoreto de ^{238}Pu (PNL, USA), moderado com 2 polegadas de acrílico (TRS, 2001).

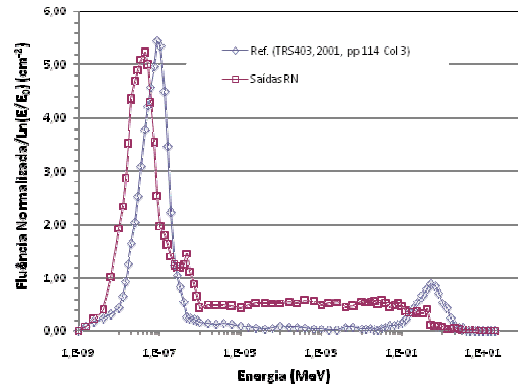


Figura 4.38. Espectro medido de ^{252}Cf no NRI-REZ (República Czech), moderado com 25 cm de Fe e 10 cm de polietileno (TRS, 2001).

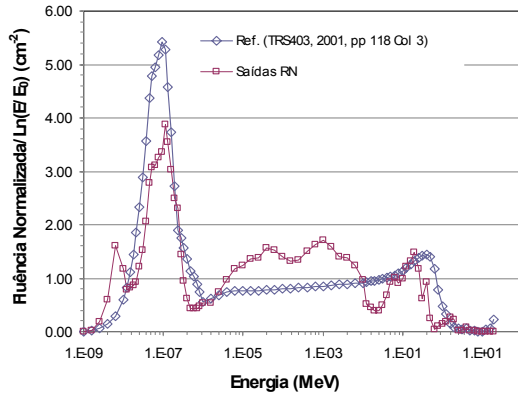


Figura 4.39. Espectro medido (Cadarache, França) de um acelerador (TRS, 2001).

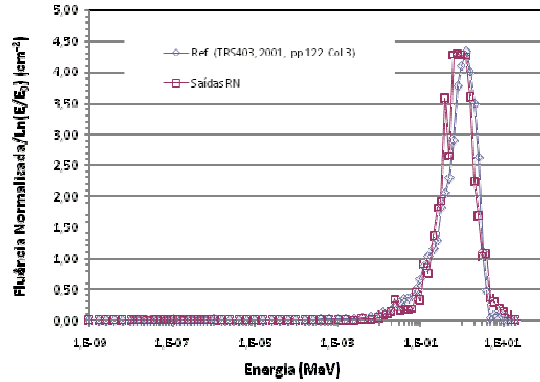


Figura 4.40. Espectro medido (acelerador) nas instalações do GRENF (Alemanha), moderado com uma placa de 10 cm de Fe (TRS, 2001).

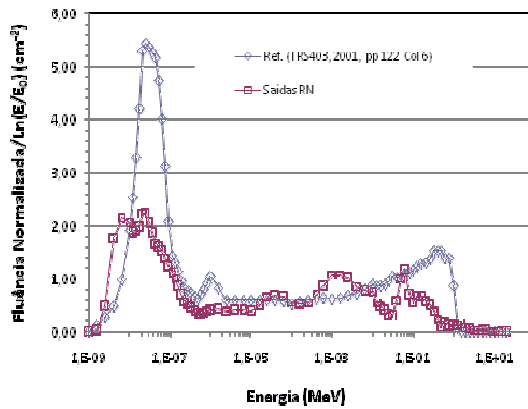


Figura 4.41. Espectro medido (acelerador) da reação $\text{Li}(p,n)\text{Be}$ (no PTB, Alemanha), com $E_p = 3,3$ MeV (TRS, 2001).

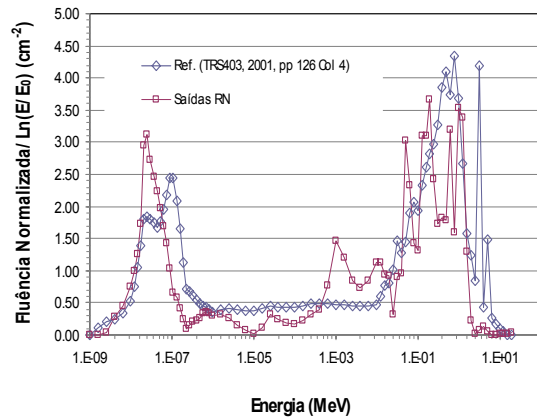


Figura 4.42. Espectro calculado de 2,8 MeV utilizando ^{238}U (Cadarache, França), com moderação de 1 cm Polietileno (TRS, 2001).

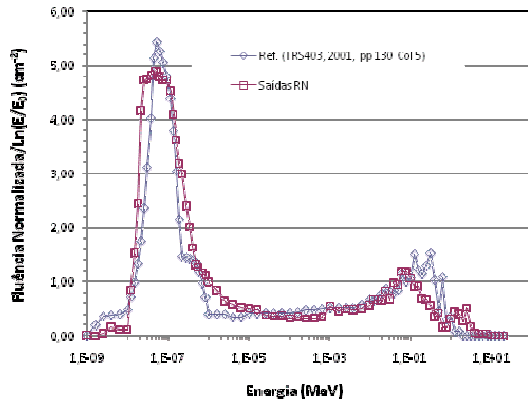


Figura 4.43. Espectro calculado de 14 MeV de um acelerador de 150 kV (do IPSN/CEA, França), com proteção de 5 cm de H₂O (TRS, 2001).

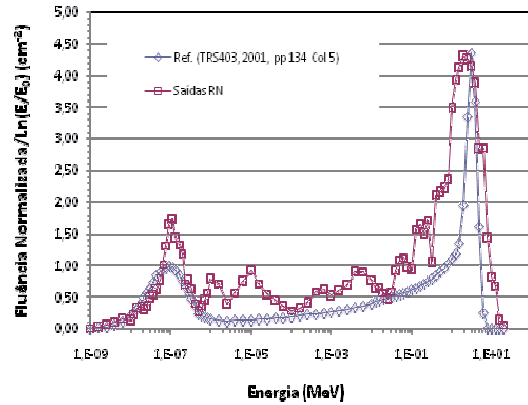


Figura 4.44. Espectro medido de um experimento de plasma TEXTOR (de Julich, Alemanha), com proteção de madeira (TRS, 2001).

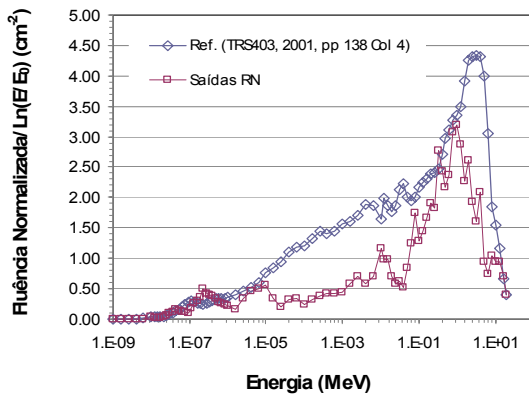


Figura 4.45. Espectro medido do reator UTR-KINKI (de Osaka, Japão) em um ambiente de fissão (TRS, 2001).

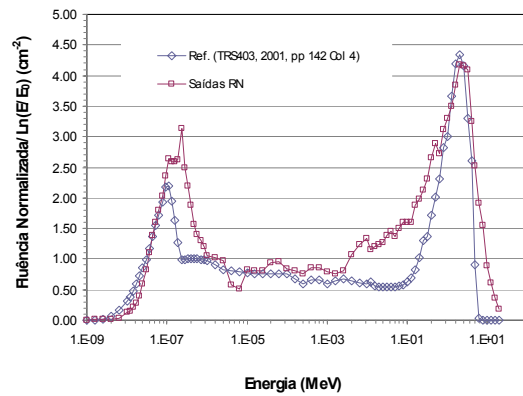


Figura 4.46. Espectro medido do reator SILENE (do IPSN/CEA, França) com proteção de polietileno (TRS, 2001).

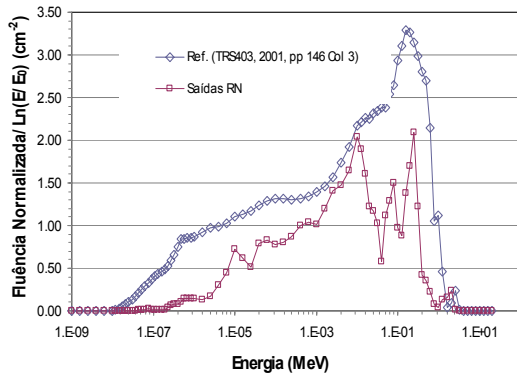


Figura 4.47. Espectro medido de reator PWR (do PNL, USA), na posição 2 (TRS, 2001).

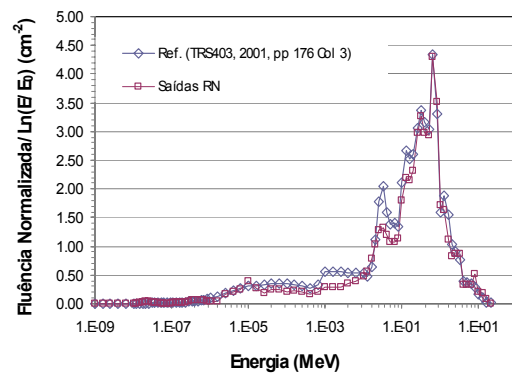


Figura 4.48. Espectro medido de reator BWR (de Caorso, Itália), na posição 2 (TRS, 2001).

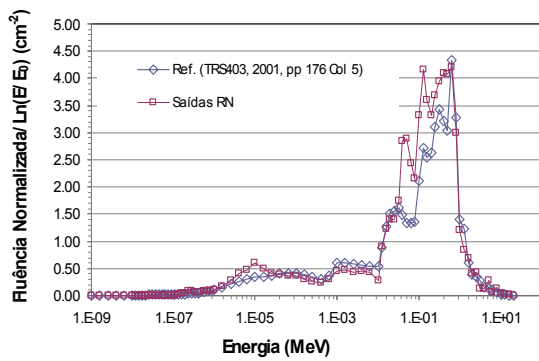


Figura 4.49. Espectro medido de reator BWR (de Caorso, Itália), na posição 4 (TRS, 2001).

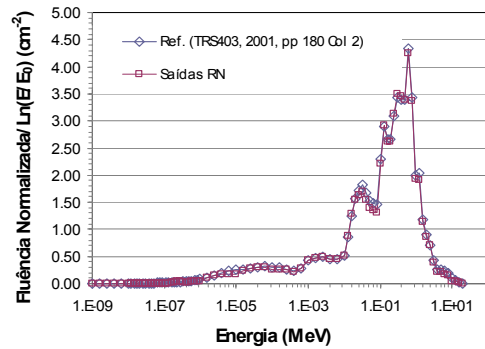


Figura 4.50. Espectro calculado de reator BWR (de Caorso, Itália), posição 1 (TRS, 2001).

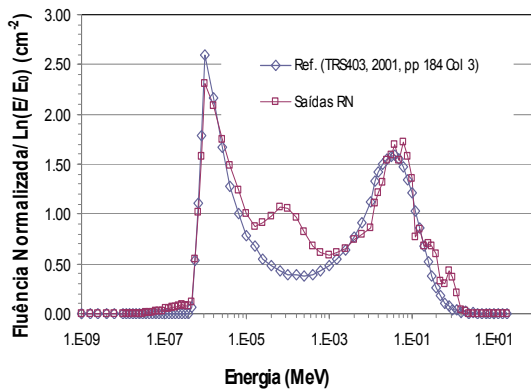


Figura 4.51. Espectro medido de reator BWR (de Dungeness, Alemanha), no teto (TRS, 2001).

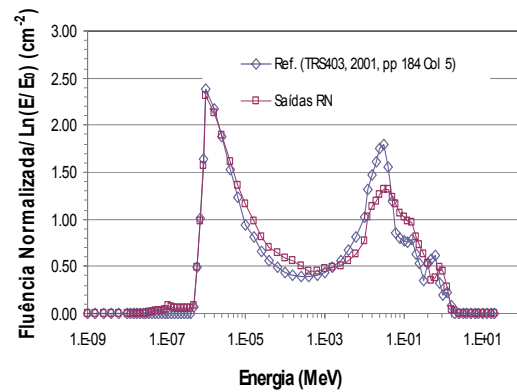


Figura 4.52. Espectro medido de reator PWR “Gosgen” (de Switzerland, Alemanha), na posição 1 (TRS, 2001).

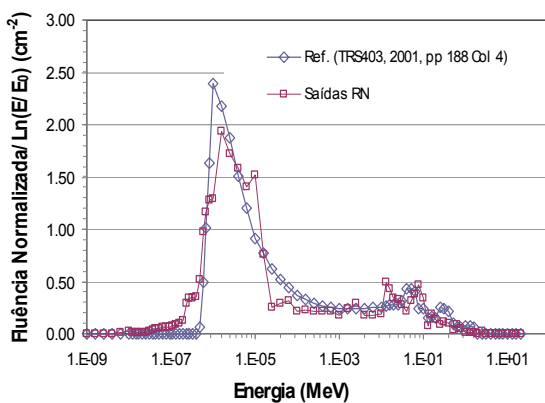


Figura 4.53. Espectro medido de reator PWR Gosgen (de Switzerland, Alemanha), na galeria de filtro (TRS, 2001).

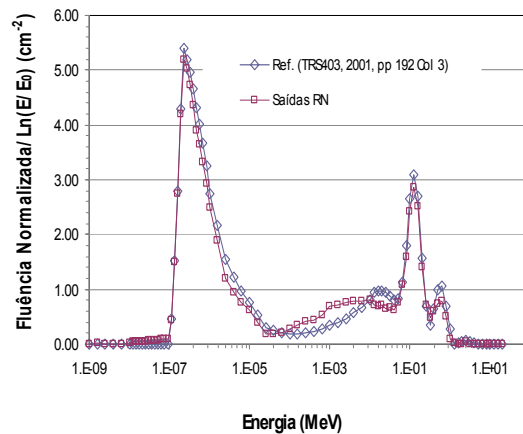


Figura 4.54. Espectro medido de reator PWR Wolf Creek de Kansas (USA), com 50% de potência a 2 m do nível PH 2047’ (TRS, 2001).

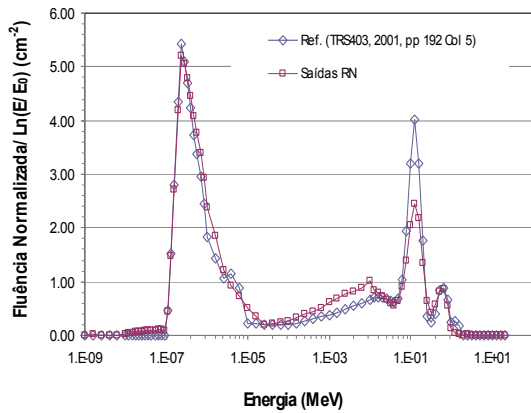


Figura 4.55. Espectro medido de reator PWR Wolf Creek de Kansas (USA), com 100% de potência no nível PH 2047'. (TRS, 2001).

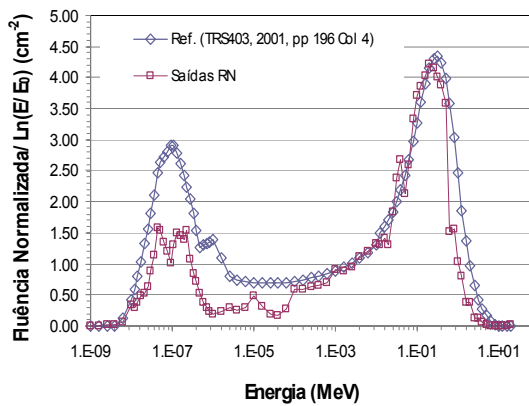


Figura 4.56. Espectro medido de reator PWR da república Czech. Sala de bomba, lado quente (TRS, 2001).

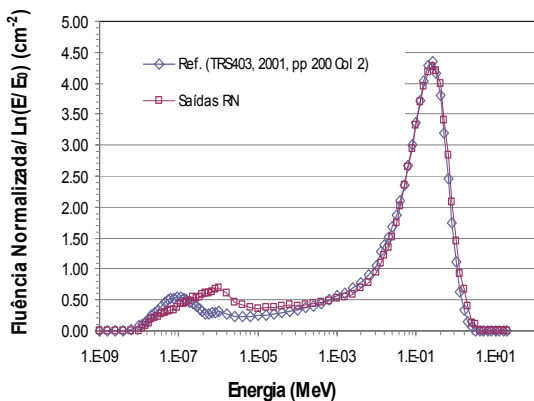


Figura 4.57. Espectro medido de reator PWR da república Czech. Sala de teste embaixo do reator posição 1 (TRS, 2001).

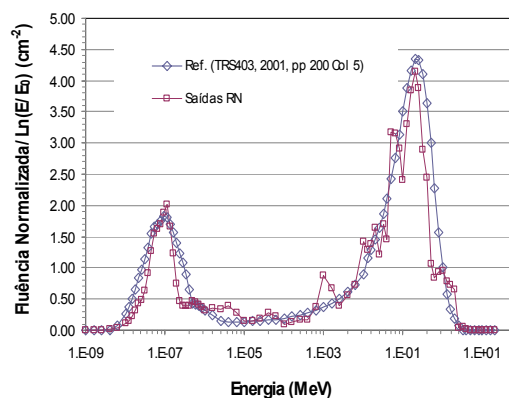


Figura 4.58. Espectro medido de reator PWR da república Czech. Corredor do lado de fora da sala (TRS, 2001).