



COPPE/UF RJ

**ESTUDO E AVALIAÇÃO DOS DETECTORES DE BOLHAS PARA MEDIDAS DE
CAMPOS DE NÊUTRONS**

José Eduardo Ramalho Dantas

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear.

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2010

ESTUDO E AVALIAÇÃO DOS DETECTORES DE BOLHAS PARA MEDIDAS DE
CAMPOS DE NÊUTRONS

José Eduardo Ramalho Dantas

DISSERTAÇÃO 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 MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:

Prof. Ademir Xavier da Silva, D. Sc.

Prof. Delson Braz, D. Sc.

Dr. Edmilson Monteiro de Souza, D. Sc.

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

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2010

Dantas, José Eduardo Ramalho

Estudo e Avaliação dos Detectores de Bolhas para
Medidas de Campos de Nêutrons/ José Eduardo Ramalho
Dantas.– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XIX, 103 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Nuclear, 2010.

Referencias Bibliográficas: p. 95-103.

1. Detector de Bolhas. 2. Nêutrons. 3. Espectrometria. 4.
Dosimetria. 5. Proteção Radiológica. I. Silva, Ademir
Xavier da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro,
COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

*Quando as coisas vão erradas
Não pense que todos os seus esforços
têm sido em vão.*

*Talvez tudo foi para melhor;
por isso sorria...
e experimente outra vez!
Pode ser que o seu aparente fracasso
Venha ser a porta mágica que o conduzirá
para uma nova felicidade
que dantes você jamais conheceu.*

*Você pode estar enfraquecido pela luta,
mas, não se considere vencido...
isto não quer dizer derrota.
Não vale a pena
gastar o precioso tempo
em lágrimas e lamentos.*

*LEVANTE-SE...
e enfrente a vida outra vez...
o alto objetivo de suas aspirações,
Os seus sonhos se realização...
Tire proveito dos seus erros,
Colha experiências das suas dores,
E, então um dia você dirá:
- GRAÇAS A DEUS
EU OUSEI EXPERIMENAR OUTRA VEZ!*

AUTOR DESCONHECIDO

À minha mãe Sonia, por tudo e mais um pouco, ontem, hoje e sempre.

Ao meu pai Alvandir, à minha bisavó Laurinda e meu tios-avôs João e Wilson, que torcem por mim lá do outro lado da vida.

À minha avó Jacy, pelo amor e carinho incondicionais.

Aos meus irmãos Gil, Hermani e Heverton pelo apoio.

Ao meu irmãozinho Felipe e ao meu sobrinho Caio, pela fé contínua no amanhã.

Aos meus padrinhos José Carlos e Tânia.

E a todos os meus parentes, pela torcida.

Agradecimentos

Raul Seixas já dizia que nunca se vence uma guerra lutando sozinho e Joe Cocker, parafraseando Paul McCartney, cantava que as coisas eram possíveis com uma pequena ajuda dos amigos. Evidentemente um trabalho de dissertação de mestrado só é possível com o apoio que vem de onde esperamos ou não esperamos. Sou, pois, eternamente grato:

A Deus, pelo céu, pelo mar e por eventuais chuvas e trovoadas.

Depois do Amigo lá de cima, não poderia deixar de citar em primeiro lugar o meu orientador, o professor e grande amigo Ademir, pelo apoio desde o início da minha saga no PEN, pela magnífica orientação e pelas recomendações e conselhos sempre úteis e por toda a ajuda possível e imaginária que me deu durante todo o período do mestrado, sem a qual o desenvolvimento e a conclusão deste trabalho não seriam possíveis. Obrigado do fundo do meu coração!

Ao querido amigo Alessandro Facure, que se iniciou na vida acadêmica junto comigo e hoje é uma referência em sua área de atuação, pela sugestão do tema e as discussões em torno dele.

Ao Luiz Reina, grande amigo que conheci durante o mestrado, que é um dos principais responsáveis pelo sucesso do projeto que culminou nessa dissertação, por ter tornado possível a utilização do espaço do IEN durante a sua parte experimental, além do apoio fora da esfera acadêmica de grande valia que recebemos daqueles seres realmente especiais.

Ainda na esfera IEN/CNEN, aproveito, ainda, para agradecer aos amigos Luiz Bellido pela valiosíssima ajuda na idealização do aparato de contagem, Paulo Ramos, pelo empréstimo do laboratório e do equipamento fotográfico de fotografia da metalurgia do IEN, aos funcionários da oficina mecânica do IEN Marciano e Dagoberto, aos amigos Osvaldir e João pelas dicas e apoio e

Às bibliotecárias Emília (CNEN), Bernarda (IEN) e Dilma (IRD), cujas presteza e prontidão foram de fundamental importância para a o levantamento bibliográfico necessário para a realização desta dissertação.

Aos amigos Pedro Paulo, Thalís, Paulo Travassos e Delano, da Física Médica do INCA, pelas valiosas dicas na fase embrionária da pesquisa que culminou na presente dissertação de mestrado.

Ao Mário Pereira, do Instituto de Biologia da UERJ, que desenvolveu a rotina macro utilizada na contagem automatizada das bolhas.

Aos amigos do Laboratório de Nêutrons do IRD, em especial à Karla, Maria Letícia, Evaldo, Walsan e Sandro pela irradiação dos detectores de bolhas, além de várias discussões e sugestões sobre o objeto da nossa pesquisa.

Ao “Bonde do Polônio” (Alessandra, André, Antônio Carlos, Cícero, Dalton, Luana, Luciane, Luiz Antônio, Marco Saulo, Marco Vieira, Sarah, Valmir e Tatiana), minha querida turma de mestrado pela amizade, carinho, momentos de descontração, tão necessários nesta árdua caminhada.

Ao amigo Edmilson, símbolo vivo da vitória da persistência e obstinação, pelas valiosas recomendações feitas após o meu seminário de qualificação.

Aos amigos de longa data do programa: Catarine, Clara, Léo Bóia, Christiano, Anderson Menezes e Maghali, além da galera do LNRTR: Juraci, Thaiana, Arthur, Jacqueline e Samanda.

À Secretaria do PEN, nas pessoas dos velhos (Jô, Tânia, Reginaldo e Lili) e dos novos (Raquel, Washington e Suzana) amigos, pelo suporte sempre eficiente e caloroso, sem o qual tornaria bem mais íngreme a jornada.

Ao corpo docente do PEN/COPPE, pelos ensinamentos ministrados desde o CPM.

À galera do Chat do Ceratocone do MSN, formado por vários amigos do Brasil e do mundo que me ajudaram a compreender e lidar com este fato recente na minha vida, que quase me fez abandonar esta empreitada.

Ao titio Edno, que redescobriu minha família recentemente.

À querida amiga Carla Neto, pelo carinho e apoio, mesmo que à distância.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização de todas as etapas desta dissertação de mestrado.

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

ESTUDO E AVALIAÇÃO DOS DETECTORES DE BOLHAS PARA MEDIDAS DE CAMPOS DE NÊUTRONS

José Eduardo Ramalho Dantas

Fevereiro/2010

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Programa: Engenharia Nuclear

Medidas de campos de nêutrons, sobretudo as de caráter dosimétrico, são uma preocupação atual dos trabalhadores em radiação ionizante por conta de questões de proteção radiológica. No presente trabalho foram estudadas as propriedades gerais dos detectores de bolhas, além de realizados diversos experimentos com tal dispositivo. O trabalho dividiu-se em duas partes: a primeira tratou do estado da arte dos detectores de bolhas, com ênfase nos “Bubble Detector Spectrometers” (BDS), com uma extensa revisão de literatura, enquanto que na segunda diversos ensaios foram planejados e executados com eles. Além dos aspectos relativos às contagens das bolhas e a aplicações mais imediatas, como a deconvolução de espectros de fontes de nêutrons, testou-se um procedimento de automatização da contagem de bolhas e foi avaliado o uso dos BDS após sua recompressão, assim como e seu uso como dosímetro. Os detectores de bolhas se mostraram uma boa ferramenta para as medidas de campos de nêutrons, apesar da necessidade de mais investigações para tirar-se o máximo proveito possível de tais dispositivos, em especial para nêutrons de baixa energia e no uso após a recompressão, que merece uma análise mais aprofundada a fim de verificar sua viabilidade.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

STUDY AND EVALUATION OF THE BUBBLE DETECTORS FOR NEUTRON
FIELD MEASUREMENTS

José Eduardo Ramalho Dantas

February/2010

Advisor: Ademir Xavier da Silva

Department: Nuclear Engineering

Neutron field measurements, especially the dosimetric ones, are a great concern for ionizing radiation workers nowadays, because of the radioprotection issues. In this work, general proprieties of the bubble detectors were studied and several experiments with such device were done. It was a two-part task: At first, the bubble detector's state of art was established, emphasizing the "Bubble Detector Spectrometers" (BDS), and an extensive literature review. In the second part several trials with BDS were planned and performed. Besides the bubble counting process and the most immediate applications, such as unfolding spectra, a test of an automatic procedure for bubble counting was performed and the use of bubble detector after recompression and its use as a dosimeter were evaluated. Bubble detectors proved to be a good tool on neutron measurements, despite the need of further investigation for optimizing the gain of such devices, especially for low energy neutrons and the use after the recompression, which deserves a deeper analysis in order to check its viability.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 PRÓLOGO.....	1
1.1.1 <i>Considerações Iniciais</i>	1
1.1.2 <i>O problema: Exposição e Medidas de Campos de Nêutrons</i>	2
1.2 OBJETIVOS	4
1.2.1 <i>Apresentação da Proposta de Trabalho</i>	4
1.2.2 <i>Justificativa e Relevância</i>	6
1.2.3 <i>Organização do Trabalho</i>	9

CAPÍTULO 2

ASPECTOS TEÓRICOS E FENOMENOLÓGICOS

2.1 PROPRIEDADES GERAIS DOS NÊUTRONS	11
2.1.1 <i>Breve Histórico</i>	11
2.1.2 <i>Interações com o Núcleo, Produção e Fontes</i>	13
2.1.3 <i>Interação com a Matéria e Seção de Choque</i>	15
2.1.3 <i>Deteção</i>	17
2.2 MEDIDAS DE CAMPOS DE NÊUTRONS PARA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA	18
2.2.1 <i>Espectrometria e Dosimetria de Nêutrons: conceitos básicos</i>	18
2.2.2 <i>Grandezas Radiológicas de Interesse</i>	18
2.2.3 <i>Técnicas de Espectrometria e Dosimetria</i>	20

CAPÍTULO 3

ESTADO DE ARTE DOS DETECTORES DE BOLHAS

3.1 ASPECTOS FUNDAMENTAIS	23
3.1.1 <i>Histórico</i>	23
3.1.2 <i>Constituição</i>	24
3.1.3 <i>Características Básicas de Funcionamento</i>	25
3.1.4 <i>Fabricantes dos Detectores de Bolhas</i>	29
3.1.5 <i>Aplicações dos Detectores de Bolhas</i>	30
3.2 O ESPECTRÔMETRO DETECTOR DE BOLHAS (BDS)	31
3.2.1 <i>Os Detectores de Bolhas da BTI</i>	31
3.2.2 <i>Características Básicas do BDS</i>	31
3.2.3 <i>Instruções de Operação</i>	34
3.2.4 <i>Procedimento de Deconvolução Espectral</i>	34

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1 IRRADIAÇÃO DOS BDS NAS FONTES DE NÊUTRONS DE INTERESSE	38
4.1.1 Fonte de Referência de Am-Be do IRD.....	38
4.1.2 O Cíclotron RDS-111 do IEN/CNEN.....	41
4.1.3 Irradiação dos BDS.....	42
4.2 PROCEDIMENTOS PARA CONTAGEM DE BOLHAS	44
4.2.1 Aquisição de Imagens dos BDS Irrradiados.....	44
4.2.2 Procedimento de Contagem Manual das Bolhas.....	45
4.2.3 Análise da Estatística de Contagem das Bolhas.....	47
4.3 Ensaios com o BDS.....	48
4.3.1 Deconvolução do Espectro da Fonte de Am-Be	48
4.3.2 Automatização da Contagem e Comparação dos Métodos.....	49
4.3.3 Uso dos BDS após Recompressão.....	50
4.3.4 Possibilidade de Uso do BDS como Dosímetro.....	51

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CONTAGENS MANUAL DAS BOLHAS NO BDS.....	53
5.1.1 Irradiação e Aquisição de Imagens dos BDS.....	53
5.1.2 Estatística Básica de Contagem dos BDS irradiados	55
5.2 DECONVOLUÇÃO ESPECTRAL.....	64
5.2.1 Espectro da Fonte de Am-Be.....	64
5.2.2 O Espectro de Nêutrons do RDS-111	66
5.3 ENSAIOS COM O BDS.....	69
5.3.1 Contagem Automatizada e a Comparação entre os Procedimentos.....	69
5.3.2 Análise do uso após recompressão.....	75
5.3.3 Uso como Dosímetro	81

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 ASPECTOS GERAIS DO TRABALHO	86
6.2 POTENCIAL E LIMITAÇÃO DOS BDS.....	87
6.3 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	88

APÊNDICE

A.1 NOÇÕES BÁSICAS DE ESTATÍSTICA DE CONTAGEM PARA RADIAÇÃO.....	89
A.2 PROCEDIMENTO DE RECOMPRESSÃO DOS BDS COM O RC-18	91
A.3 INPUT DA SIMULAÇÃO COM MCNP DA FONTE DE AM-BE.....	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95

Lista de Figuras

FIGURA	PG.
1.1. Aplicações da energia nuclear	1
1.2. Monitores de nêutrons	4
1.3. Detector de bolhas	5
1.4. Acelerador linear clínico e seus componentes internos.	8
1.5: Website sobre produção de radiofármacos no IEN	8
2.1: Modelo atômico de Rutherford	12
2.2: Arranjo experimental de Chadwick para detecção de nêutrons	13
3.1: Donald Glaser e a câmara de bolhas	23
3.2: Exemplos de detectores de bolhas	24
3.3: Diagrama de fases de uma substância qualquer	26
3.4: Esquema da formação de bolha de vapor com raio crítico em meio líquido	27
3.5: Etapas de formação das bolhas em emulsões superaquecidas	27
3.6: Esquema de funcionamento de um detector de bolhas	29
3.7: Um jogo de BDS	32
3.8: Respostas Normalizadas dos BDS	33
4.1: Espectros de Nêutrons de Fontes de Referência	39

4.2: Espectros de Nêutrons da fonte de Am-Be	39
4.3: Espectro de nêutrons da fonte de Am-Be mais comum	40
4.4: Fontes de Am-Be do IRD; a fonte ao centro foi usada neste trabalho	40
4.5: Espectro de nêutrons da fonte de Am-Be do IRD	41
4.6: O cíclotron RDS-111	42
4.7: Setup da irradiação dos BDS na fonte de Am-Be	43
4.8: Vista do Alvo 1 do RDS-111	43
4.9: Aparato para aquisição de fotos dos detectores de bolhas.	44
4.10: Tratamento das fotos dos detectores no Photoshop	45
4.11: Imagens do BDS reproduzidas na tela de TV	46
4.12: Delimitações e resultados de contagens das bolhas	46
4.13: Interface do Orgin 6.0 durante o processo de estatística de contagem	47
4.14: Execução do software MatLab 7.5	48
4.15: Interface do programa ImagePro	49
4.16: Câmara de recompressão <i>RC-18</i>	51
5.1: Imagens adquiridas dos BDS expostos à fonte de Am-Be no IRD	53
5.2: Imagens adquiridas dos BDS irradiados expostos ao <i>RDS-111</i> do <i>IEN</i>	54
5.3: Histograma das contagens do BDS_10_18 e do BDS_100_12	56
5.4: Histograma das contagens do BDS_600_14 e do BDS_1000_17	57

5.5: Histograma das contagens do BDS_2500_13 e do BDS_10000_066	58
5.6: Histograma das contagens dos BDS_10_11 e BDS_10_14	59
5.7: Histograma das contagens do BDS_100_13 e BDS_100_14	60
5.8: Histograma das contagens do BDS_600_17 e BDS_600_20	61
5.9: Histograma das contagens do BDS_1000_13 e BDS_1000_17	62
5.10: Histograma das contagens do BDS_2500_14 e BDS_2500_15	63
5.11: Respostas padronizadas dos detectores expostos ao RDS-111	64
5.12: Deconvolução espectral do RDS-111	65
5.13: Espectro de Nêutrons de uma fonte de Am-Be obtido por Zanini e colaboradores	66
5.14: Respostas padronizadas dos detectores expostos ao RDS-111	67
5.15: Deconvolução espectral do RDS-111	68
5.16: Espectro parcial de nêutrons do RDS-111	69
5.17: Contagem de bolhas com o uso do software ImagePro.	70
5.18: Resultado das contagens (manual e semi-automática) de bolhas	71
5.19: Contagem nos processos manual e semi-automático e suas barras de erro	72
5.20: Respostas padronizadas do RDS (contagem manual e semi-automática)	73
5.21: Deconvoluções do Espectro do RDS-111, obtidas através da contagem manual e da contagem semi-automática das bolhas nos BDS	74
5.22: Fotos dos BDS antes e depois da Recompressão	75

5.23: Desvanecimento da dose equivalente do BD-100R após várias recompressões	76
5.24: Comparação entre as taxas de Fluência por unidade de energia antes e depois da recompressão dos BDS	78
5.25: Respostas Normalizadas dos BDS em várias temperaturas	79
5.26: Comparação entre a resposta padronizada dos BDS-10, os valores de dose de referência e suas respectivas barras de erro	83
5.27: Esquema de Nêutrons de fontes de Am-Be com atividades distintas	84

Lista de Tabelas

TABELA	PG.
1.1: Exemplos de exposição a fontes de nêutrons	3
1.2: Monitores e dosímetros de nêutrons	5
1.3: Características do sistema passivo de dosimetria de nêutrons	7
2.1: Interações dos Nêutrons com o Núcleo, com equações gerais ou exemplos	14
2.2: Fontes de Nêutrons por Modo de Produção e Energia	14
2.3: Terminologia e faixas de energia de nêutrons	16
2.4: Detectores de Nêutrons e suas faixas de energia	21
3.1: Exemplos de freons utilizados em detectores de bolhas	25
3.2: Modelos de detectores de bolhas da BTI	31
3.3: Intervalos do histograma, correspondentes às seções de choque médias para nêutrons no BDS para as faixas de energia.	36
4.1: Informações sobre a fonte de Am-Be do IRD	41
5.1: Estatística de contagem das bolhas dos BDS irradiados no IRD	55
5.2: Estatística de contagem das bolhas dos BDS expostos no RDS-111	59
5.3: Dados para a deconvolução de espectro da fonte de Am-Be	65
5.4: Valores de Fluência e Taxa de Fluência para o Espectro da Fonte de Am-Be obtidos com o BDS	66

5.5: Dados para a deconvolução do espectro do cíclotron RDS-111	67
5.6: Valores da Fluência e Taxa de Fluência para o Espectro do cíclotron RDS-111 obtidos com o BDS	68
5.7: Contagem automatizada das bolhas dos BDS	70
5.8: Dados para a deconvolução do espectro do cíclotron RDS-111 após a contagem semi-automática	73
5.9: Comparação entre as fluências totais no processo manual e semi-automático	74
5.10: Comparação entre os valores de contagem dos BDS irradiados antes e depois da recompressão	76
5.11: Estatística de contagem das bolhas dos BDS expostos no RDS-111 após a recompressão no RC-18	77
5.12: Dados para a deconvolução do espectro do RDS-111, para os BDS irradiados após recompressão no RC-18	77
5.13: Respostas Normalizadas dos BDS irradiados no RDS-111 antes e depois da recompressão	80
5.14: Comparação entre as respostas padronizadas dos BDS e as doses devidas à fonte de Am-Be calculada via MCNP	81
5.15: Comparação entre os valores totais de dose obtidos pelo BDS, calculados via MCNP e o valor informado pelo IRD	82
5.16: Comparação entre a resposta padronizada do BDS-10 e os valores de dose ambiental de referência	82
5.17: Medidas de Dose e Taxas de dose nos campos de nêutrons de interesse realizados com o BDS-10	85

Siglas e Abreviaturas

SIGLA OU ABREVIATURA	SIGNIFICADO
<i>Am-Be</i>	<i>Fonte de Amerício-Belírio-241</i>
<i>BDS</i>	<i>Espectrômetro Detector de Bolhas</i>
<i>BSM</i>	<i>Banho de Sulfato de Manganês</i>
<i>BTI</i>	<i>Bubble Tech Inc.</i>
<i>CNEN</i>	<i>Comissão Nacional de Energia Nuclear</i>
<i>ICRP</i>	<i>International Commission On Radiation Protection</i>
<i>ICRU</i>	<i>International Commission on Radiation Units</i>
<i>IEN</i>	<i>Instituto de Engenharia Nuclear</i>
<i>IRD</i>	<i>Instituto de Radiação e Dosimetria</i>
<i>LET</i>	<i>Transferência Linear d Energia</i>
<i>LNMRI</i>	<i>Laboratório Nacional de Metrologia de Radiações Ionizantes do IRD</i>
<i>LNTR</i>	<i>Laboratório de Neutronografia em Tempo Real do PEN/COPPE</i>
<i>MCNP</i>	<i>Monte Carlo N. Particle</i>
<i>PET</i>	<i>Tomografia por Emissão de Pósitrons</i>
<i>RBE</i>	<i>Eficiência Biológica Relativa</i>

<i>SPECT</i>	<i>Tomografia Computadorizada por Emissão de Fóton Único</i>
<i>SPND</i>	<i>Detector de Nêutrons Auto-Alimentado</i>
<i>TLD</i>	<i>Detector Termoluminescente</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Prólogo

1.1.1 Considerações Iniciais

A energia nuclear vem desempenhando importante papel em vários momentos da história da humanidade desde o final do século XIX. Graças a ela, a geração de energia elétrica, a medicina, a indústria, a agricultura, dentre outros campos, passaram por grande desenvolvimento, sendo esta indispensável para o bem estar da humanidade. Na Figura 1.1 estão ilustradas algumas de suas aplicações

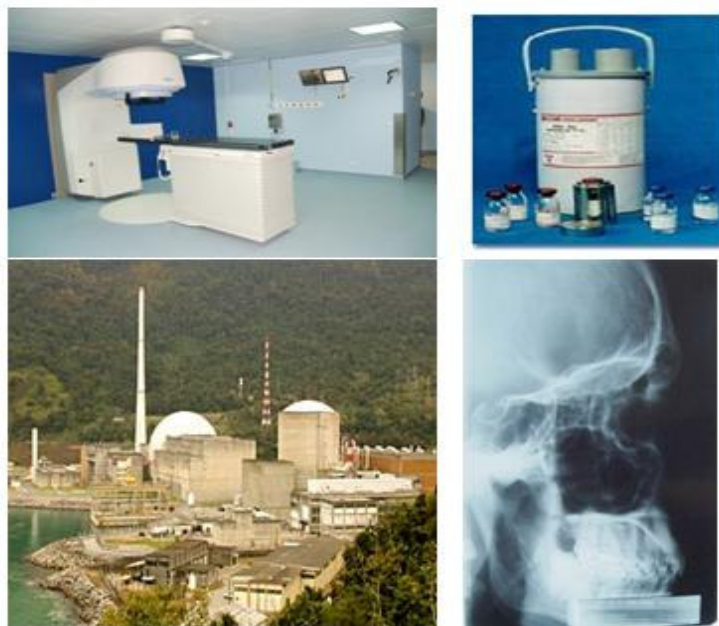


Figura 1.1. Aplicações da energia nuclear (em sentido horário: radioterapia, produção de radiofármacos, radiodiagnóstico e geração de energia)

Apesar das diversas aplicações científicas e tecnológicas que muito contribuem para o progresso da sociedade, os avanços científicos e tecnológicos na área nuclear

trouxeram muitos problemas relacionados à exposição de pessoas a fontes de radiação, sobretudo em nível ocupacional [1, 2, 3] e clínico [4, 5].

A principal preocupação no que concerne às radiações direta ou indiretamente ionizantes, diz respeito aos seus efeitos no tecido biológico [6], que possuem natureza bem variável e são dependentes de diversos fatores como, por exemplo, se a dose de radiação recebida for crônica ou aguda, localizada ou de corpo inteiro.

Mesmo com tantos aspectos deletérios, não há como abrir mão do uso da radiação nos dias de hoje, sendo urgente a prevenção de tais efeitos. Essa é a principal finalidade da *proteção radiológica*, que tem como princípios fundamentais, aceitos em 1988, que são a *Justificação*, a *Otimização* e a *Limitação de Dose, com o controle da exposição* à radiação, para a garantia do atendimento às especificações das normas de proteção radiológica e de seus princípios, estando fundamentada em três fatores principais: o *tempo de exposição*, a *distância da fonte* e a *blindagem*, enquanto que os aspectos quantitativos do controle de exposição à radiação estão primordialmente ligados ao tipo de radiação envolvida [7, 8].

É possível encontrar na literatura diversos trabalhos relacionados à proteção radiológica envolvendo partículas carregadas e raios X e gama [8]. Contudo, ainda há um tipo de radiação que gera bastante preocupação naqueles com ela envolvidos direta ou indiretamente e que vem a ser o foco deste trabalho.

1.1.2 O problema: Exposição e Medidas de Campos de Nêutrons

Com o desenvolvimento de reatores nucleares, ao fim da primeira metade do século passado, a detecção de nêutrons e a medida quantitativa da radiação deles oriunda tornaram-se as maiores fontes de preocupação dos pesquisadores nas áreas de Engenharia Nuclear e Física das Radiações, além de sua devida proteção radiológica [9, 10, 11].

A exposição a campos de nêutrons afetam muitas pessoas e as medições envolvendo tais partículas são uma necessidade atual. Contudo, essa tarefa é das mais complexas, já que as medidas com nêutrons não são tão simples como as que envolvem

partículas carregadas ou radiação eletromagnética [12]. Exemplos de exposição a nêutrons, divididos em quatro grupos, estão listados na Tabela 1.1.

Tabela 1.1. Exemplos de exposição a fontes de nêutrons [13]

ÁREAS DE EXPOSIÇÃO	EXEMPLOS
<i>Na tecnologia</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usinas elétricas nucleares; ✓ Análise de ativação de nêutrons; ✓ Determinação de umidade e óleo contido em rochas, solo e carvão; ✓ Neutronografia.
<i>Na ciência</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Estudo de estruturas moleculares e cristalinas; ✓ Estudo de fissão; ✓ Aceleradores (lineares de pulso de elétrons Van der Graff) ✓ Reatores de pesquisa.
<i>Na medicina</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Radioterapia.
<i>Radiação natural de fundo</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Nêutrons produzidos em alta atmosfera e a possível exposição de passageiros e tripulação em aviões comerciais por essas partículas. ✓ Raios cósmicos.

Em se tratando de campos de nêutrons, além dos campos intensos, merece especial atenção locais onde esta representa uma pequena fração da radiação emitida, como no caso dos pacientes de tratamento radioterápico e trabalhadores em instalações radiativas [14]. Não se tem até o momento total conhecimento dos efeitos dos nêutrons no tecido biológico. Sabe-se, contudo, que nêutrons oriundos de uma fonte de Califórnio-252 possuem RBE que podem causar alterações genéticas em vários tipos de células somáticas [15], com tais efeitos dependendo do LET desses nêutrons [16].

Atualmente existem diversos monitores e detectores, mas sua maioria não preenche os todos os requisitos, sendo úteis apenas para determinadas tarefas [17]. A Figura 1.2 mostra diversos tipos de monitores de nêutrons, para medidas em campos de radiação mistos.



Figura 1.2. Monitores de nêutrons

1.2 Objetivos

1.2.1 Apresentação da Proposta de Trabalho

Extensas pesquisas vêm sendo feitas na área de detecção de radiação, visando ao desenvolvimento de monitores de nêutrons com melhor resposta em energia. Exemplos de estudos atuais em tais áreas podem ser encontrados nos trabalhos realizados pelo *EVIDOS* (*E*valuation of *I*ndividual *D*OSimetry), levado a cabo por diversos pesquisadores [18, 19].

Apesar de representar apenas uma pequena fração de trabalhadores expostos e de suas implicações econômicas, que geraram uma lenta evolução nessa área, sistemas passivos e ativos para dosimetria de nêutrons¹ tiveram um significativo crescimento por conta das demandas técnicas e das regulamentações da penúltima década do século passado [19].

Os monitores de nêutrons e dosímetros mais conhecidos são listados na Tabela 1.2.

¹ Um sistema de detecção de radiação passivo é aquele em que a medida é feita após a irradiação, através de contagem manual ou óptica, enquanto que um sistema ativo de detecção é aquele em que as contagens são realizadas quase que imediatamente, através de um aparato eletrônico associado. Neste trabalho, utilizou-se apenas o sistema passivo.

Tabela 1.2. Monitores e dosímetros de nêutrons [12, 19]

MONITORES	DOSÍMETROS
✓ <i>De nêutrons térmicos</i>	✓ <i>Emulsões nucleares;</i>
✓ <i>De nêutrons rápidos</i>	✓ <i>TLDs;</i>
✓ <i>Do tipo moderador</i>	✓ <i>Detectores de traços</i>
✓ <i>de dose equivalente</i>	✓ <i>Contador proporcional de tecido equivalente</i>
✓ <i>Espectrômetros</i>	✓ <i>Líquidos superaquecidos</i>

A fim de cumprir os requisitos oriundos das normas e recomendações da *ICRP*, esforços computacionais e experimentais intensos têm sido feitos para a criação de dosímetros baseados em detectores de nêutrons térmicos e seus resultados têm sido continuamente comparados e analisados [20, 21, 22]. Apesar dos resultados encorajadores, ainda há a necessidade de redução do tamanho de tais dispositivos, que forneçam valores precisos de taxas de equivalente de dose de nêutrons em vários campos radioativos [17, 18]. Tais esforços culminaram no surgimento dos *detectores de emulsão superaquecida*, também conhecidos como *detectores de bolhas*. (Figura 1.3).

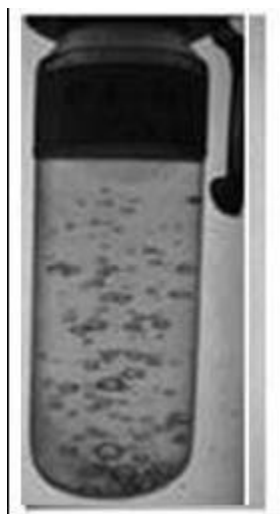


Figura 1.3. Detector de bolhas

Muitas pesquisas têm sido realizadas extensivamente para o desenvolvimento de monitores de nêutrons com energia de resposta ampliada, sobretudo para as medições efetuadas em campos de radiação mistos, segundo as recomendações da *ICRP*, com diversos esforços realizados para a criação de dosímetros baseados em detectores de nêutrons térmicos e rápidos. Tal necessidade faz a pesquisa envolvendo medidas com nêutrons estar bastante presente na Engenharia Nuclear.

O foco principal deste trabalho é o uso de espectrômetros baseados em líquidos superaquecidos, que são a base para os detectores de bolhas, que são praticamente insensíveis aos raios gama, tornando possível em larga escala a espectrometria e dosimetria experimentais de nêutrons nos dias atuais [23].

A pesquisa tem como objetivo a realização de um estudo teórico e prático sobre os detectores de bolhas utilizados nas medidas experimentais de nêutrons, sobretudo as de caráter dosimétrico, a fim de estabelecer-se seu estado de arte e o desenvolvimento de novas metodologias para suas diversas aplicações, visando, dentre outras coisas:

- ✓ Uma caracterização teórica dos detectores de bolhas;
- ✓ Montagem de aparato experimental para a contagem manual das bolhas e sua posterior simplificação;
- ✓ Propostas para a automatização das contagens de bolhas e as conseqüentes medidas neutrônicas, sobretudo a dosimetria e a espectrometria;
- ✓ Desenvolvimento e implementação de uma metodologia estatística de contagem das bolhas, para qualquer tipo de detector de bolhas;
- ✓ Medidas de campos de nêutrons diversos (de referência e desconhecidos) e as comparações de tais resultados com aqueles encontrados na literatura;

1.2.2 Justificativa e Relevância

Os detectores de bolhas são ferramentas bastante importantes na proteção radiológica. Ao contrário de outros monitores de nêutrons, eles possibilitam, através de visualização instantânea, a detecção de campos fracos ou fortes de nêutrons, que permitem aos indivíduos sujeitos à exposição uma rápida ação a fim de evitar doses indesejadas de nêutrons, e respeitar os limites máximos de taxas de dose para trabalhadores e o público em geral.

Diferentemente de outros monitores de nêutrons (como o contador proporcional BF_3 , os detectores termoluminescentes, *detectores sólidos de traços nucleares* e *Esferas de Bonner*), as formas compactas dos detectores de bolhas permitem medições de campos de nêutrons em instalações radioativas ou em aviões comerciais a grandes altitudes e naves espaciais [24]. As vantagens e desvantagens de tal sistema estão listadas na Tabela 1.3.

Tabela 1.3. Características do sistema passivo de dosimetria de nêutrons [25]

<i>Vantagens</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Dispensa a necessidade de componentes eletrônicos durante a exposição e os detectores podem ser utilizados em ambientes mais complicados; ✓ É possível utilizá-los em campos pulsantes de radiação, em curtos ou longos períodos de tempo; ✓ Baixo custo e vários deles podem ser utilizados para mapear campos radioativos; ✓ Maior sensibilidade, ainda que possam ser bem pequenos, do que detectores de maior tamanho; ✓ Boa discriminação da radiação gama. ✓ O uso de detectores passivos integrados é conveniente quando a medição ocorrer por um longo período.
<i>Desvantagens</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ A sensibilidade é freqüentemente subestimada (devido principalmente ao pequeno tamanho dos detectores comumente usados); ✓ Grande dependência da temperatura para a maioria dos detectores; ✓ A resposta em energia é determinada pela seção de choque da reação, não podendo ser “ajustada” em uma curva de dose ou dose equivalente.

Apesar da grande importância para dosimetria de nêutrons e proteção radiológica em geral, os detectores de bolhas ainda são pouco usados e conhecidos no Brasil, embora o assunto faça parte de livros-texto de detecção de radiação [26, 27].

Um trabalho desta natureza se justifica pelo fato de não haver um estudo detalhado e recente sobre as características dos detectores de bolhas no Brasil, o que torna relevante a atualização dos procedimentos de uso de tais dispositivos, visando uma aplicação mais efetiva e em maior escala, haja vista suas inúmeras aplicações.

Um exemplo clássico de aplicação de detectores de bolhas é na verificação de fotonêutrons emitidos durante sessões radioterápicas. As fontes de fotonêutrons mais estudadas atualmente, para fins de proteção radiológica, são os aceleradores lineares

clínicos – com um deles ilustrado na Figura 1.4 – que geram fotonêutrons a partir de feixes com energia acima de 10 MeV [5].

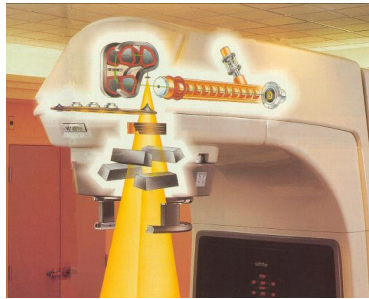


Figura 1.4: Acelerador linear clínico e seus componentes internos.

Além da medida de campo de fotonêutrons, é possível a produção de nêutrons a partir de cíclotrons, como o RDS-111 [28], que começou a ser fabricado no fim do século passado, e é utilizado para a produção de radiofármacos (a foto do website sobre produção de radiofármacos no IEN com informações do RDS-111 consta na Figura 1.5), através do radioisótopo ^{18}F e de *Flúordesoxiglicose* (também conhecido como *FDG*), usado em equipamentos de *PET* e *SPECT*, responsáveis por revolucionar os diagnósticos em diversas áreas da medicina [28, 29]. Durante o aumento de sua produção de ^{18}F , verificou-se o aumento de taxas de doses de nêutron em certos locais das instalações do cíclotron e o levantamento destas e as blindagens devidas tornaram-se vitais para o cumprimento do princípio *ALARA*² para radiações ionizantes [28]. Logo, torna-se importante o estudo dos campos de nêutrons produzidos por este acelerador.



Figura 1.5: Website sobre produção de radiofármacos no IEN

² ALARA é a abreviação de “As Low As Reasonable Achievable”, que significa “Tão baixo quanto exequível”. Esta é a filosofia básica do uso de radiações ionizantes, onde se considera que o uso de radiações ionizantes deve ser tão baixo quanto possível, a fim de não se exceder os limites de exposição previamente determinados.

Outra questão bastante importante no uso dos detectores de bolhas é a automatização do seu procedimento de contagem. Tal quantitativo se torna necessário a fim de se conseguir uma boa redução nas incertezas das medidas de nêutrons, de acordo com as recomendações do fabricante [30]. Por esta razão, a obtenção de métodos ópticos e automáticos para a realização dessas contagens dos detectores de bolhas, junto com as características de funcionamento se tornou uma grande necessidade em pesquisas envolvendo radiação e o uso de detectores de bolhas em particular [31].

Apesar de o fabricante disponibilizar um leitor, o *BDR-III* [32], o mesmo apresenta um custo relativamente alto e pouca eficiência na contagem, o que estimula a criação de procedimentos alternativos, utilizando aparelhos de tomografia e de ressonância magnética [33]. Por esta razão, a implementação de um procedimento automatizado de contagem de bolhas também foi contemplada neste trabalho de pesquisa.

1.2.3 Organização do Trabalho

A presente dissertação de mestrado está estruturada em seis capítulos e um apêndice de três partes, organizados da seguinte forma:

Neste primeiro capítulo, foi apresentado o problema a ser estudado e a proposta de trabalho, além dos objetivos, justificativa e relevância da realização desta pesquisa, visando à dissertação de mestrado.

O capítulo 2 trata da fundamentação teórica e fenomenológica do trabalho, ou seja, as características físicas dos nêutrons, assim como suas medidas mais relevantes, sobretudo as de caráter espectrométrico e dosimétrico.

O terceiro capítulo apresenta o estado de arte dos detectores de bolhas, em que se trata das características científicas e tecnológicas dos mesmos. Será dada ênfase aos *Bubble Detector Spectrometers*, conhecidos como BDS, principal objeto de estudo da presente pesquisa de mestrado.

A parte experimental do trabalho está descrita no quarto capítulo, onde são apresentados os processos de irradiação dos BDS, uma sugestão de procedimento de

contagem de bolhas nos detectores irradiados, a implementação do processo de deconvolução dos respectivos espectros de nêutrons e três ensaios envolvendo: uma proposta de automatização de contagens, análise do uso dos detectores após a recompressão e a possibilidade de uso como dosímetros.

No capítulo 5, encontram-se a apresentação e a discussão dos resultados obtidos após os experimentos descritos no parágrafo anterior.

As considerações finais envolvendo todos os aspectos mencionados nesta pesquisa e recomendações para trabalhos futuros constam no capítulo 6.

Por fim, no apêndice, constam uma breve revisão sobre estatística de contagem, o procedimento de recompressão dos detectores de bolhas e o arquivo de entrada com a simulação da fonte de Am-Be utilizada no presente trabalho.

Capítulo 2

Aspectos Teóricos e Fenomenológicos

2.1 Propriedades Gerais dos Nêutrons

2.1.1 Breve Histórico

A descoberta dos nêutrons abriu um vasto campo de pesquisa experimental nas Ciências em geral e na Física e Química em particular, possuindo diversas propriedades e aplicações na Ciência e Tecnologia, desde a neutrongrafia até a geração de energia. Por isso, num primeiro momento, é conveniente mostrar um pouco mais da história da sua descoberta, a fim de ilustrar um exemplo do uso do método científico.

Há muito tempo se tentava entender e explicar a estrutura da matéria, sendo os precursores os filósofos gregos **Leucipo** e **Demócrito**. No início da era moderna, modelos atômicos mais conhecidos eram as “pequenas bolas indivisíveis” de **John Dalton** no século XVIII e o “*pudim de ameixas*” de **J. J. Thomson**, que culminou na descoberta do elétron em 1895. Em 1911, **Ernest Rutherford** constatou, após sua célebre experiência, na qual o cientista neozelandês bombardeou uma delgada folha de ouro com partículas alfa e verificou que, diferentemente do previsto pelos modelos atômicos até então vigentes, a maior parte de tais partículas atravessou a folha de ouro, enquanto uma pequena fração sofreu desvios, com a folha ainda rechaçando um pouco da radiação [34].

O átomo não mais era uma esfera homogênea e nem os elétrons estavam incrustados nas cargas positivas, conforme postulava Thomson; as cargas positivas estavam concentradas fortemente num pequeno espaço, com as cargas negativas as circundando, conforme se vê na Figura 2.1.

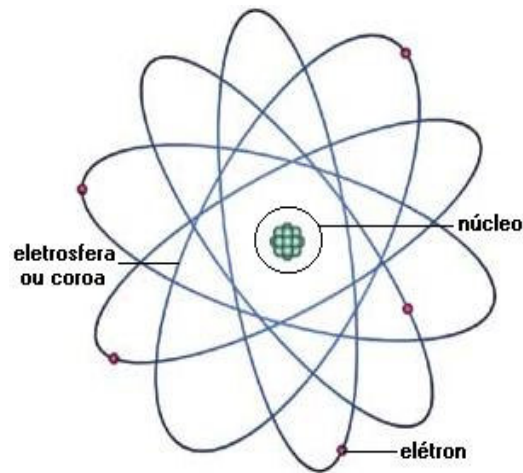


Figura 2.1: Modelo atômico de Rutherford

Surge o conceito de núcleo atômico e suas propriedades começaram a ser estudadas exaustivamente. Acreditava-se que ele era constituído apenas de partículas positivas, mais tarde batizadas de prótons. Entretanto, esta idéia precisou ser abandonada por conta do enorme aumento da massa nuclear em átomos de grande número atômico [35].

Durante o início dos estudos da natureza nuclear, um tipo bastante penetrante de radiação era emitido pelo núcleo composto a partir do bombardeio de partículas alfa em alvos de berílio, sendo esta considerada radiação gama – com energia de 7 MeV – num primeiro momento. Com a hipótese do raio gama descartada³, postula-se a existência de uma nova partícula, com massa próxima a do próton e sem carga elétrica, que constituía o núcleo atômico juntamente com tal partícula positiva. Essa partícula “fictícia” foi batizada de *nêutron* e somente em 1932 ela foi detectada experimentalmente graças aos trabalhos do britânico **James Chadwick**, conforme ilustrado na Figura 2.2.

³ Graças aos trabalhos de **Bothe e Becker**, seguidos de **Curie-Joliot**, descobriu-se que tal radiação, contrariando as características das ondas eletromagnéticas, poderia ser freada devido a prótons oriundos da parafina e outros materiais hidrogenados. Assumindo-se que a interação entre os supostos “raios gama” e os prótons da parafina seja perfeitamente elástica, cálculos mostram que cada fóton deveria ter uma energia de 55 MeV, o que torna inconsistente a idéia de que a radiação emitida pelo núcleo composto da interação entre as partículas alfa e o alvo de berílio seja devida a fótons, visto que esta não ultrapassa o valor de 15,6 MeV.

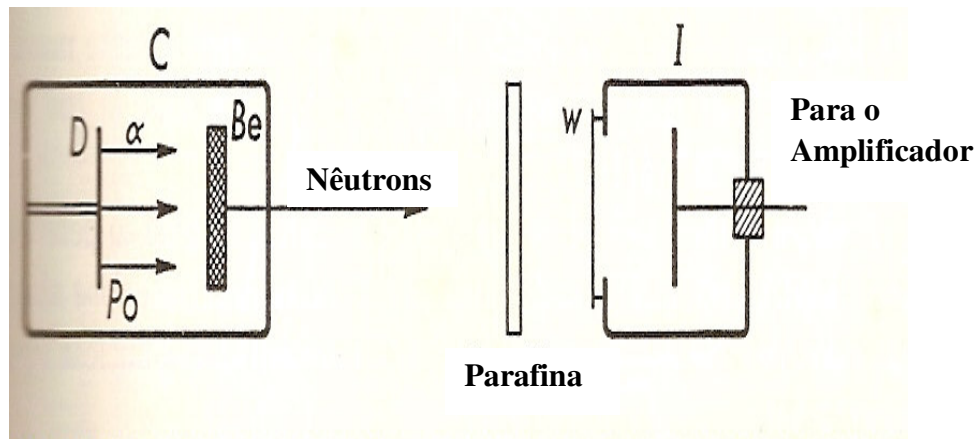


Figura 2.2: Arranjo experimental de Chadwick para detecção de nêutrons [35]

A fonte de partículas α em questão é o polônio depositado no disco “D”, inserida juntamente com o alvo de berílio numa câmara de vácuo “C”, cujos nêutrons emitidos pelo alvo de berílio passam pela parede da câmara e atingem a câmara de ionização “I”, através da janela “w”, que está conectada a um amplificador e posteriormente a um dispositivo gravador como um contador elétrico.

James Chadwick obtivera um nêutron isolado através de um alvo de Berílio bombardeado por núcleos de ${}^4\text{He}$ (partículas α), além de liberar-se energia (ΔE). Tal reação está descrita na equação (2.1).



2.1.2 Interações com o Núcleo, Produção e Fontes

Os nêutrons são produzidos a partir de reações que ocorrem no núcleo. Eles têm demonstrado alta eficiência na produção de transformações nucleares por serem mais propensos a penetrar no núcleo do que as partículas carregadas, pois a ausência de carga elétrica os torna imunes ao campo elétrico dos átomos, acarretando seu movimento através dos espaços atômicos vazios sem interagir com eles. Entretanto, caso passem próximos aos núcleos, os nêutrons interagem com eles por conta da força nuclear forte.

As principais interações dos nêutrons com os núcleos estão listadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Interações dos Nêutrons com o Núcleo, com equações gerais ou exemplos [36, 37]

Interação	Equação geral ou Exemplo
<i>Espalhamento Elástico</i>	${}^1_0n + {}^AX \rightarrow {}^1_0n + {}^AX$ (2.2)
<i>Espalhamento Inelástico</i>	${}^1_0n + {}^AX \rightarrow {}^{A+1}Y^* \rightarrow {}^AX^* + {}^1_0n \rightarrow {}^AX + {}^1_0n + \gamma$ (2.3)
<i>Transmutação</i>	${}^1_0n + {}^{10}B \rightarrow {}^7Li + \alpha$ (2.4)
<i>Captura Radioativa</i>	${}^1_0n + {}^AX \rightarrow {}^AX^* \rightarrow {}^{A+1}X + \gamma$ (2.5)
<i>Espalação</i>	${}^1_0n + {}^{16}O \rightarrow 3\alpha + 2{}^1_1p + 3{}^1_0n$ (2.6)
<i>Fissão</i>	${}^1_0n + {}^{235}U \rightarrow {}^{236}U^* \rightarrow {}^aX_b + {}^dY_c + \gamma + f{}^1_0n$ (2.7)
<i>Fusão</i>	${}^2_1H + {}^3_1H \rightarrow {}^4_2He + {}^1_0n + 17,6 \text{ MeV}$ (2.9)

Existem diversas fontes de nêutrons com uma larga faixa de energia, cessando a produção após seu desligamento. A geração de nêutrons depende de como o núcleo alvo é irradiado e a produção cessa quando a fonte de irradiação é retirada. A Tabela 2.2 mostra as principais fontes de nêutrons, formas de produção e energia.

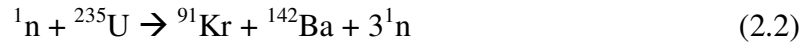
Tabela 2.2: Fontes de Nêutrons por Modo de Produção e Energia [8]

<i>Fonte</i>	<i>Reação</i>	<i>Faixa de Energia</i>	<i>E_{Média} (MeV)</i>
²⁴¹ Am-Be	(α,n)	0 – 10 MeV	4,5
¹²⁴ Sb-Be	(γ,n)	Monoenergética ⁴ .	0,024
⁸⁸ Y-Be	(γ,n)	Monoenergética.	0,16
²⁴ Na-D2O	(γ,n)	Monoenergética.	0,22
⁸⁸ Y-Be	(γ,n)	Monoenergética.	0,31
²⁴ Na-Be	(γ,n)	Monoenergética.	0,83
Fissão	(n,n)	0 – 8 MeV	2
² H- ² H(D-D)	(d,n)	Monoenergética.	3,27
²²⁶ Ra-Be	(α,n)	0 – 8 MeV	5
²³⁹ Pu-Be	(α,n)	0 – 8 MeV	4,5
²⁵² Cf	Fissão	0 – 10 MeV	2,3
² H- ³ H (D-T)	(d,n)	Monoenergética.	14,1

Além das fontes listadas na Tabela 2.2, é possível a obtenção de nêutrons através de reatores nucleares (devido à reação em cadeia), aceleradores de partículas (graças ao

⁴ As faixas de energia monoenergéticas dependem da auto-absorção na fonte.

bombardeamento de um alvo por deutério ou trítio, liberando grande quantidade de energia) e os fotonêutrons (originados pelo bombardeio de raios gama em alvos como Berílio), cujas principais reações são, respectivamente:



2.1.3 Interação com a Matéria e Seção de Choque

Com o desenvolvimento de reatores nucleares, a detecção de nêutrons tornou-se de suma importância para as pesquisas envolvendo radiação. Após a análise do comportamento do nêutron ao interagir com o núcleo, é fundamental para a compreensão das características de sua detecção a interação de tais partículas com a matéria, sendo este bastante diferente daquele que ocorre com as partículas carregadas e ondas eletromagnéticas.

Como o nêutron é uma partícula não carregada e de grande massa, não sofre a ação da força coulombiana, o que faz com que essa partícula se propague pela matéria e interaja com o núcleo caso eles estejam muito próximos [36]. Sua interação se dá por meio de radiação secundária, geralmente material hidrogenado para nêutrons rápidos, propriedade descoberta por **Enrico Fermi** em 1934 [35] ou produtos de reações do tipo (n,α) com alto poder de ionização, culminando no espalhamento do nêutron, o que explica ainda sua alta penetrabilidade.

Existem duas categorias de interação dos nêutrons com a matéria: o espalhamento e a absorção. Outro fator crucial na interação do nêutron com a matéria é a sua enorme dependência em relação à energia dessas partículas. As faixas de energia dos nêutrons são descritas com jargão termodinâmico e a classificação atualizada é apresentada na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Terminologia e faixas de energias de nêutrons⁵ [38]

Termo	Energia	Velocidade (m/s)	Temperatura (K)
<i>Ultra frio</i>	$< 0,2 \mu eV$	< 6	$< 0,002$
<i>Muito frio</i>	$0,2 \mu eV \leq E < 50 \mu eV$	$6 \leq v < 100$	$0,002 \leq T < 6$
<i>Frio (lento)</i>	$50 \mu eV \leq E < 25 meV$	$100 < v \leq 2200$	$0,6 \leq T < 300$
<i>Térmico</i>	$25 meV$	2200	300
<i>Epitérmico</i>	$25 meV < E \leq 500 keV$	$2200 < v \leq 10^7$	<i>Não informado</i>
<i>Rápido</i>	$> 500 keV$	$> 10^7$	<i>Não informado</i>

A probabilidade por unidade de trajetória percorrida é constante nos mecanismos de interação anteriormente listados, para nêutrons com energias fixas, sendo expressa por uma grandeza conhecida por *seção de choque microscópica*, que é representada por σ e possui dimensões de área, com a unidade “barn” sendo freqüentemente utilizada⁶. Outra grandeza bastante utilizada é a *seção de choque macroscópica* [39], definida por:

$$\Sigma = N\sigma \quad (2.5)$$

É importante frisar que (2.5) possui dimensões de inverso do comprimento e que N representa o número de nêutrons por unidade de volume. Em termos físicos, é a probabilidade para que os processos de interação descritos pelas seções de choque microscópicas ocorram, sendo que todos esses processos podem ser combinados, somando-se todas as seções de choque individuais, como se vê na equação (2.6):

$$\Sigma_{TOTAL} = \Sigma_{absorção} + \Sigma_{espalhamento} + \Sigma_{captura} + \dots \quad (2.6)$$

Enfim, a interação dos nêutrons com a matéria é representada pela probabilidade de um nêutron ser absorvido ou espalhado, através da soma de seções de choque e a atenuação de um feixe de nêutrons em um material com espessura x qualquer é representada por:

$$I = I_0 e^{-\Sigma_{TOTAL}x} \quad (2.7)$$

⁵ Alguns autores acrescentam a essa classificação os termos ‘intermediário’, com energia entre 1 e 100 keV e ‘alta energia’ para nêutrons com mais de 10 MeV [34] e ‘epicádímio’, para nêutrons que são transparentes a alvos de cádmio com energia superior a 1 eV [8]. Neste trabalho, o foco de interesse são os nêutrons térmicos, epitérmicos e rápidos.

⁶ Tal unidade equivale a 10^{-28} cm^2 .

2.1.3 Detecção

Os processos de detecção de nêutrons estão relacionados com a sua interação com o detector. Diferente das partículas carregadas e das radiações eletromagnéticas, não é possível detectar os nêutrons com o equipamento mais corriqueiro, sendo sua detecção ligada a efeitos secundários resultantes de suas interações com o detector, associado a um sistema convencional de contagens, através dos seguintes mecanismos [39, 40]:

- a) *Reação de absorção induzida por nêutrons na qual a radiação resultante torna possível a detecção;*
- b) *Reação de absorção na qual o núcleo resultante é radioativo, cujo decaimento fornece a informação necessária sobre os nêutrons que induziram a radioatividade;*
- c) *Espalhamento de nêutrons, onde o núcleo de recuo é carregado e passível de ser detectado, sendo o espalhamento elástico de um nêutron por um próton o exemplo mais importante.*

Detectores de nêutrons podem ser classificados em termos dos dispositivos em que eles se baseiam [41]. Os mais típicos são os seguintes:

- a) *Detectores baseados em partículas carregadas, cujos exemplos mais conhecidos são o BF_3 e o 3He , além de cintiladores inorgânicos e orgânicos;*
- b) *Detectores baseados em raios gama e radioatividade induzida, como as folhas de ativação e o $CdWO_4$;*
- c) *Detectores baseados em danos por radiação, sendo os mais conhecidos os detectores sólidos de traços nucleares e os detectores de bolha (objeto da presente dissertação).*

2.2 Medidas de Campos de Nêutrons para Proteção Radiológica

2.2.1 Espectrometria e Dosimetria de Nêutrons: conceitos básicos

Nem todos os dispositivos que apontam a presença de nêutrons são capazes de determinar a energia dos nêutrons incidentes. Tal processo é conhecido como *espectrometria de nêutrons*, uma área de pesquisa bastante ativa e abrangente, com sua utilidade em pesquisa de materiais e química bem estabelecida [36].

Instrumentos capazes de discriminar energia em campos de radiação são conhecidos como *espectrômetros*, sendo que qualquer fenômeno que varie de maneira previsível com a energia de nêutrons pode ser usado como sua base, com a maioria deles operando numa faixa de energia entre milésimos e centenas de MeV e suas sensibilidades para fótons dependem dos pulsos acumulados de grande intensidade, sendo que alguns deles necessitam de um conhecimento da direção do campo de nêutrons [42]. Ajudam na escolha de um espectrômetro para certa utilidade o seu tamanho, portabilidade, disponibilidade geral, facilidade no uso e a habilidade na operação em ambientes desfavoráveis, como aqueles em que o campo de radiação de fundo é muito intenso ou em locais de difícil acesso, como em grandes altitudes [43].

Na proteção radiológica, a grande preocupação é com a radiação à qual as pessoas tendem a se expor. A medida da energia transferida, depositada ou liberada aos constituintes do meio que sofre a sua incidência é conhecida por *dosimetria* [44].

Para nêutrons, não há até o momento dosímetros plenamente confiáveis, para todas as situações ocupacionais ou clínicas. A grande importância da espectrometria está no fato de ser possível obterem-se informações relevantes acerca das medidas de dose de radiação através de espectros, mesmo os com baixa resolução [45].

2.2.2 Grandezas Radiológicas de Interesse

Uma grandeza é uma propriedade de um fenômeno, corpo ou substância na qual um valor pode ser atribuído. Uma unidade é uma medida padronizada ou uma

quantidade usada para expressar a magnitude de uma grandeza e é definida e adotada por convenção. O padrão para campos de nêutrons de referência é o ISO 8529-3 [46].

As grandezas radiológicas podem ser divididas em três grupos:

- a) *Grandezas Radiométricas*: Fluência, Taxa de Fluência, etc.
- b) *Grandezas Dosimétricas*: Kerma, Dose Absorvida, LET, Equivalente de Dose, etc.
- c) *Grandezas Operacionais e de Proteção Radiológica* → Definidas pela ICRU e ICRP respectivamente. Dose Equivalente; Dose Efetiva, Equivalente de Dose Ambiente, Equivalente de Dose Pessoal, etc.

As grandezas radiológicas utilizadas neste trabalho são as seguintes [47]:

i) Fluência

Define-se fluência como o quociente entre o número de partículas incidentes dN numa esfera qualquer com área de seção transversal da . Matematicamente:

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad (2.8)$$

Também se pode expressar a fluência de um campo de nêutrons através de uma distribuição em energia $\Phi_E(E)$:

$$\Phi = \int_0^{\infty} \Phi_E(E) dE \quad (2.9)$$

A unidade de fluência padrão é o inverso do quadrado do centímetro (cm^{-2}), sendo o inverso do quadrado do metro (m^{-2}) também usado.

ii) Taxa de Fluência ou Fluxo

Taxa de fluência ou fluxo é a variação da fluência num dado intervalo de tempo. É representada matematicamente por:

$$\dot{\Phi} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.10)$$

iii) *Equivalente de Dose Ambiente*

O Equivalente de Dose Ambiente, em um ponto qualquer de um campo de radiação, é definido como a dose equivalente que seria produzida pelo campo correspondente na esfera ICRU a uma profundidade d num raio oposto ao campo alinhado. Representa-se por $H^*(d)$. O ICRU recomenda que a profundidade d da esfera seja igual a 10 mm; por isso a dose ambiente também é representada por $H^*(10)$ [48].

A relação entre as medidas de fluência e equivalente de dose ambiente se dá através dos chamados *coeficientes de conversão*, definidos como a razão entre a dose ambiente $H^*(10)$ e a fluência Φ em um ponto do campo de radiação não perturbado pelo objeto irradiado [49]. Tal coeficiente, representado por $h^*_\Phi(E)$ requer um estabelecimento do tipo de equivalente de dose ambiente, como se vê na equação (2.11):

$$H^*(10) = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} h^*_\Phi(E) \Phi(E) dE \quad (2.11)$$

As medidas de equivalente de dose ambiente, no Sistema Internacional de Unidades, é dada pela grandeza $J.kg^{-1}$, mais conhecida como *sievert* (símbolo Sv).

2.2.3 Técnicas de Espectrometria e Dosimetria

A espectrometria de nêutrons é bastante útil em diversas áreas, além da proteção radiológica, em especial na tecnologia nuclear, no diagnóstico da fusão de plasma e na radioterapia [50]. A espectrometria pode ser classificada em sete grupos baseados nos princípios de medida de energia:

- a) *Métodos em que o nêutron é espalhado e a energia de recuo é medida (tal qual na experiência de Chadwick);*
- b) *Métodos baseados em medidas de energia de partículas carregadas originárias de reações nucleares induzidas por nêutrons;*
- c) *Métodos nos quais a velocidade do nêutron é medida (“time of flight”);*

- d) *Métodos de medidas de limiar, onde uma energia neutrônica mínima é apontada pelo efeito induzido por nêutrons, como na radioatividade ou em raios gama com energias específicas;*
- e) *Métodos nos quais a distribuição da energia de nêutrons é determinada pela deconvolução de um conjunto de leitura de detectores que diferem na resposta em energia desses nêutrons;*
- f) *Métodos baseados em difração de nêutrons;*
- g) *Métodos nos quais a distribuição temporal de desaceleração de nêutrons com pequeno feixe ou alta energia em um meio adaptado é medido.*

Os detectores de nêutrons baseados nas reações descritas anteriormente e suas faixas de aplicação estão listados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Detectores de nêutrons e suas faixas de energia.

Faixa de Energia de Nêutrons	Apenas contagem de nêutrons	Medida de energia e contagem de nêutrons
0 < E < 1 keV	<i>BF₃, TLD, ⁶Li, ³He, Folhas de Ativação, Detectores de Traços</i>	<i>Espectrômetros de Cristal, através da técnica “time-of-flight”</i>
1 keV < E ≤ 2 MeV	<i>BF₃, ⁶Li (com baixa eficiência), Folhas de Ativação, SPND, Esferas de Bonner.</i>	<i>Detectores proporcionais, cintiladores orgânicos, através de prótons de recuo e reações limiares</i>
E ≥ 1 MeV	<i>Folhas de Ativação</i>	<i>Cintiladores orgânicos, através de reações limiares</i>

A medida de espectro de energia de nêutrons se dá através detectores limiares e conjunto com um código computacional de deconvolução. Existem diversos mecanismos de interação e detectores de diferentes energias. Dentre os inúmeros trabalhos envolvendo a deconvolução de espectros de nêutrons; encontra-se uma revisão bastante ampla do assunto na referência [51].

Dentre as técnicas de dosimetria conhecidas, podem-se destacar os dosímetros termoluminescentes (conhecidos como TLDs), as folhas de ativação e os detectores sólidos de traços [52]. A descrição detalhada desses dispositivos foge do escopo dessa dissertação, mas há extensa literatura disponível sobre eles, como por exemplo, em [22].

Capítulo 3

Estado de Arte dos Detectores de Bolhas

3.1 Aspectos Fundamentais

3.1.1 Histórico

A trajetória dos detectores de bolhas iniciou-se em 1952, quando o físico americano **Donald Arthur Glaser** (Figura 3.1a) projetou a câmara de bolhas (Figura 3.1b), um grande recipiente preenchido com líquido superaquecido transparente usado para a detecção de partículas carregadas que se movem dentro dele, aproveitando-se do fato previamente conhecido de que radiações ionizantes poderiam iniciar a ebulição de líquidos superaquecidos [53].

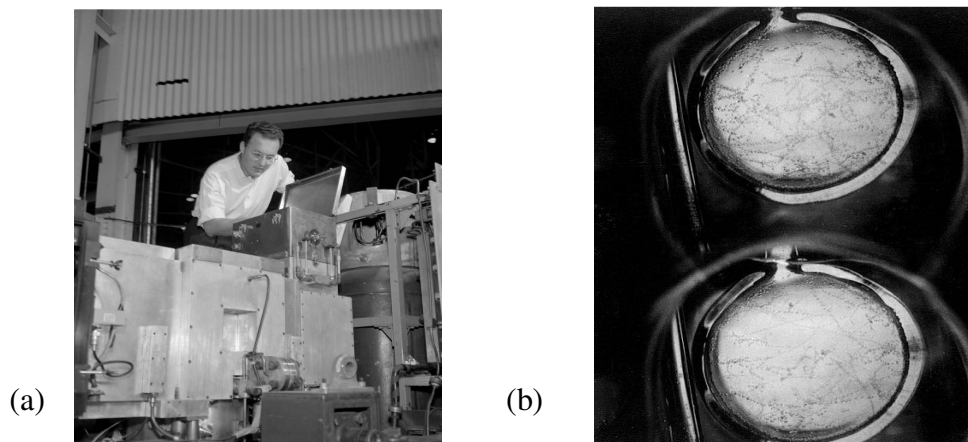


Figura 3.1: Donald Glaser e a câmara de bolhas

Influenciado pelos trabalhos de Glaser acerca das reações em líquidos superaquecidos expostos a radiações ionizantes, **Robert Apfel** [54] desenvolveu um detector de nêutrons que continha emulsão superaquecida à base de gotículas de halocarbonetos vaporizados por prótons de recuo com alto LET. Cinco anos depois, **Harry Ing** e **H. C. Birnboim** [55] sugeriram o uso de polímeros para conter tais emulsões.

O dispositivo em questão, também conhecido como *detector de bolhas* e ilustrado na Figura 3.2, foi revelado ao mundo e desde então vem oferecendo um enfoque alternativo para a dosimetria de nêutrons para fins de proteção radiológica.

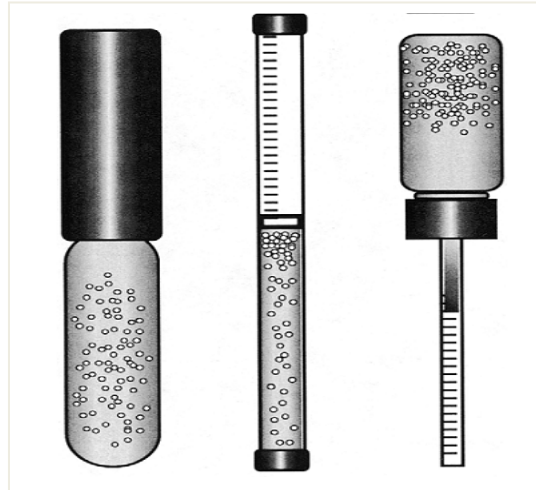


Figura 3.2: Exemplos de detectores de bolhas [33]

O detector de bolhas vem tendo larga aplicação em vários campos da Física, sobretudo na área das radiações, nuclear, espacial e de altas energias [56].

3.1.2 Constituição

Nas suas formas mais simples o detector de bolhas consiste de um frasco de policarbonato preenchido por um polímero gel equivalente de tecido onde se dispersam as gotículas de líquido superaquecido, sendo o *freon*⁷ o material mais comum para tal finalidade, com gotículas de cerca de 10 μ m [57].

A Tabela 3.1 apresenta os tipos de freons utilizados como líquidos superaquecidos para a confecção de detectores de radiação e algumas de suas propriedades físicas.

⁷ O *freon* é marca registrada da empresa norte americana DuPont, para o gás clorofluorcarbono (CFC) por ela produzido. É utilizado comercialmente pela indústria de refrigeradores, eletrônica, mecânica, etc.

Tabela 3.1: Exemplos freons utilizados em detectores de bolhas [58]

Líquido	R-12	R-21	R-22	R-115	R-114
Fórmula Química	CCl_2F_2	$CHCl_2F_2$	$CHClF_2$	C_2ClF_5	$C_2Cl_2F_4$
Peso Molecular	120,91	102,92	80,47	154,47	170,93
Ponto de Ebulição (° C)	-29,79	8,92	-40,75	-38,7	3,77
Tensão Superficial (dyn/cm)	9	18	8	5	13
Densidade (g/cm ³)	1,293	1,354	1,175	1,291	1,456

O freon mais utilizado para detecção de nêutrons é o R-12 (*diclorofluormetano*), sensível a nêutrons a partir da faixa térmica, sendo que o R-114 (*diclorotetrafluormetano*) também é bastante usado na detecção de íons pesados e nêutrons com maiores limiares de energia [33].

O volume da emulsão superaquecida dispersa no polímero é de poucos centímetros cúbicos – cerca de 1% do volume do frasco – e as propriedades ópticas do material que o envolve são escolhidas de modo que a emulsão pareça virtualmente transparente enquanto que as gotículas estejam suspensas em seu líquido estacionário, introduzindo-se o R-114 na emulsão a fim de reduzir-se o tamanho das bolhas, dependendo da pressão exercida pelo vapor que é desejada [59].

Antes da polimerização, para que as gotículas superaquecidas – com aspecto semelhante ao óleo – não mudem de posição e se sobreponham umas às outras, adiciona-se a elas um sal pesado, como o cloreto de cério, a fim de igualar suas densidades com a do polímero – com aspecto semelhante à água [60].

3.1.3 Características Básicas de Funcionamento

A teoria por trás do comportamento de um detector de bolhas deve levar em conta a teoria clássica da cavidade em líquidos, a Física dos estados metaestáveis nos sistemas fluídicos e o efeito da radiação na matéria [61].

O funcionamento dos detectores de bolhas é semelhante ao das câmaras de bolhas [62], devendo-se fundamentalmente a dois fenômenos físicos: o *superaquecimento* e a *nucleação*.

Um líquido superaquecido é aquele que entra em ebulição abaixo da temperatura crítica, sendo um estado metaestável, em se tratando de pequenas perturbações no meio,

tornando-se instável para perturbações maiores e conduzindo-o a um estado mais estável (vapor) [63]. O diagrama de fases de uma substância qualquer que sofre superaquecimento está ilustrado pela Figura 3.3.

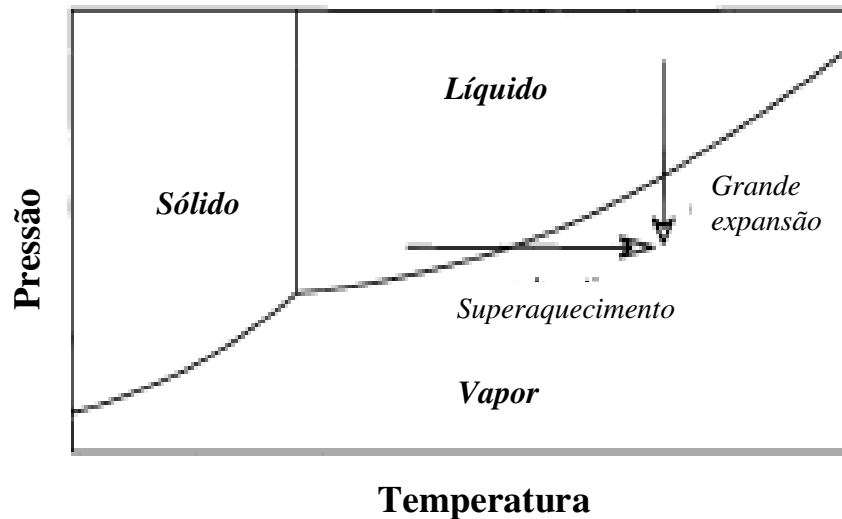


Figura 3.3: Diagrama de fases de uma substância qualquer

Após um líquido superaquecido sofrer certa perturbação, este muda de fase e surgem diversas bolhas no meio. Esse processo é conhecido como nucleação e teve sua caracterização teórica estabelecida por **Frederic Sietz**, conhecida por “*espeto térmico*” [64].

De acordo com esse modelo, a excitação e ionização intensas pela trajetória da partícula carregada produzem calor localizado, resultado na rápida formação de bolhas de vapor. Se a bolha atinge determinado tamanho, chamado de *raio crítico* e representado na Figura 3.4, que a torna termodinamicamente instável, ela crescerá até um tamanho visível devido à evaporação do líquido superaquecido até que toda a gotícula se consuma (Figura 3.5) [65, 66].

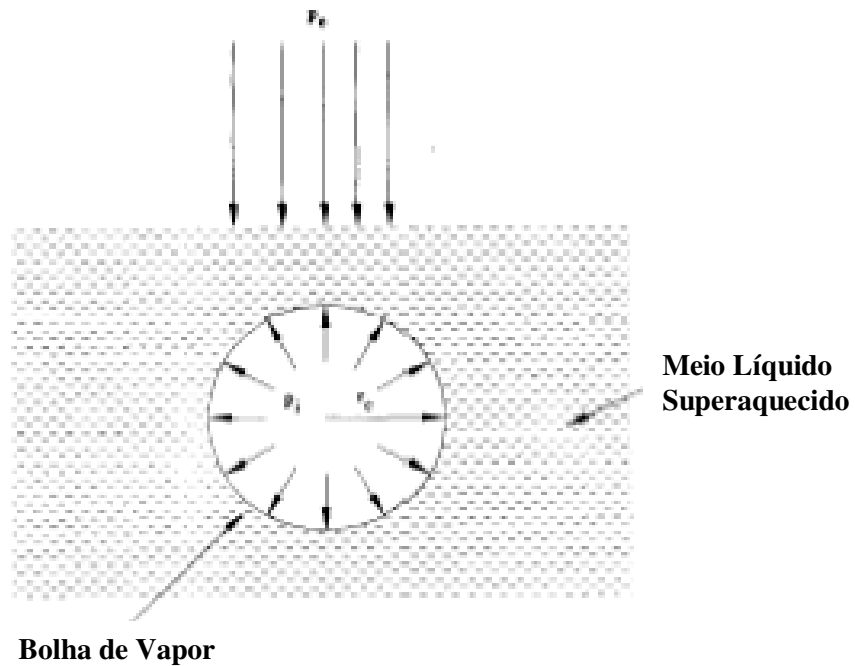


Figura 3.4: Esquema da formação de bolha de vapor com raio crítico em meio líquido

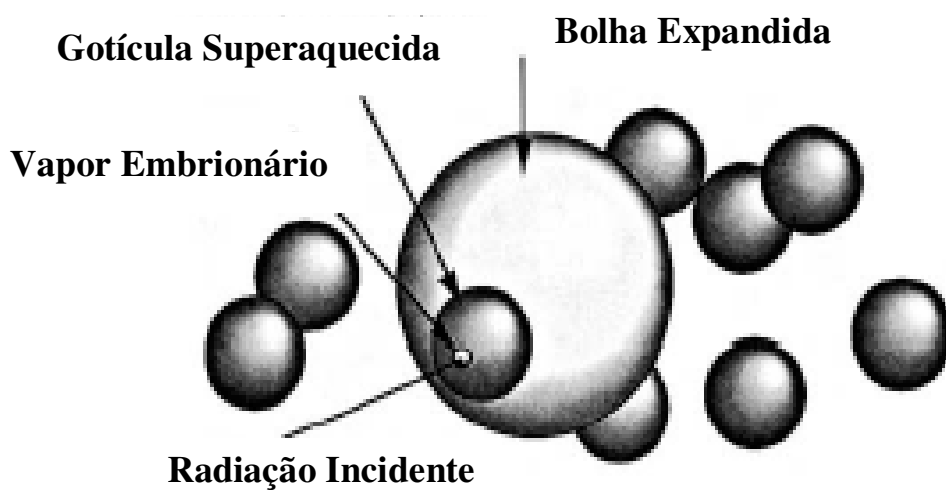


Figura 3.5: Etapas de formação das bolhas em emulsões superaquecidas

A pressão dentro da bolha é devida à pressão de equilíbrio do vapor, o raio crítico da superfície depende do balanço de tensão superficial, com a vaporização ocorrendo quando a perda de energia da partícula incidente é suficiente para produzir uma bolha com o raio maior que o valor crítico [58].

O raio crítico é, pois, dado por:

$$r_c = \frac{2\gamma(T)}{\Delta p} \quad (3.1)$$

A produção de bolhas requer calor suficiente para que este seja depositado a uma curta distância (raio crítico da ordem de micron) aumentando localmente a pressão do vapor do líquido superaquecido acima da pressão externa de 1 atmosfera. Tal energia neutrônica limiar depende do raio crítico juntamente com o poder de freamento das partículas carregadas secundárias. Para nêutrons de certa energia interagindo com certo meio detector, o limiar energético pode ser diminuído aumentando a variação de pressão [58].

O trabalho mínimo necessário para a formação de bolhas é dado por:

$$W = \frac{16}{3} \left[\frac{\gamma^3(T)}{\Delta p^2} \right] \quad (3.2)$$

Nas equações (3.1) e (3.2), T representa a temperatura, γ a tensão superficial (dependente da temperatura) e Δp representa a variação de pressão entre o interior da bolha e a pressão externa (neste caso a pressão atmosférica).

O esquema de funcionamento básico de um detector de bolhas é mostrado na Figura 3.6. O nêutron incidente no detector interage com a matriz de polímero que envolve a emulsão superaquecida, liberando os prótons, freqüentemente através da reação $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$, ou outras partículas carregadas responsáveis pela nucleação dessas emulsões, com as bolhas resultantes ficando presas no interior do detector [59].

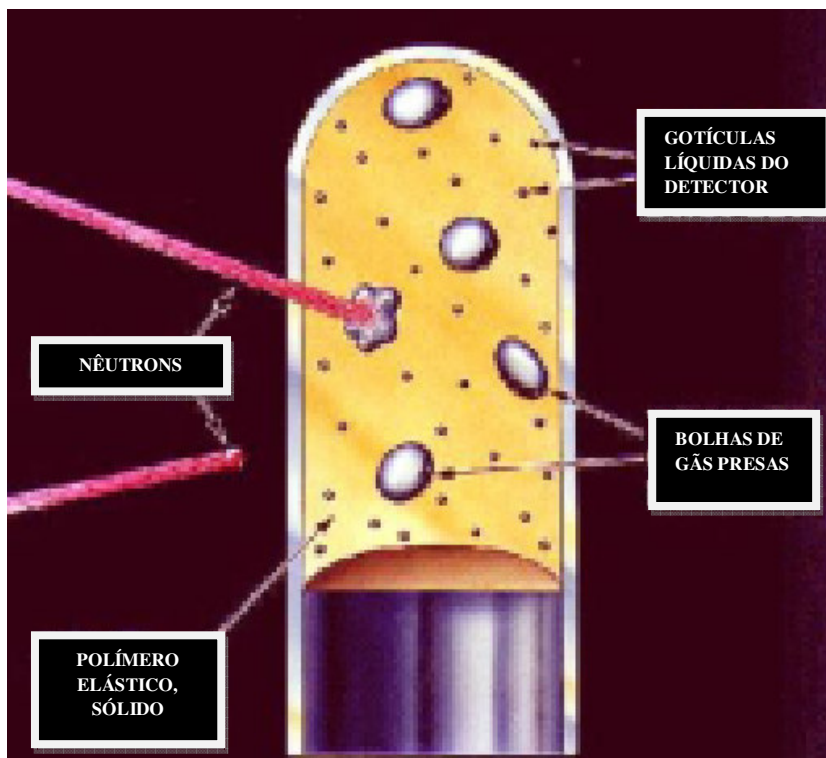


Figura 3.6: Esquema de funcionamento de um detector de bolhas

A sensibilidade de detecção – isto é, a relação entre os nêutrons incidentes com alguma unidade de medida de interesse, como dose – pode ser controlada alterando a quantidade de líquido detector disperso no polímero. Por exemplo, sensibilidade a nêutrons térmicos pode ser atribuída à reação nêutron-próton no cloro e no nitrogênio presentes no meio detector [33].

3.1.4 Fabricantes dos Detectores de Bolhas

Existem dois grandes fabricantes de detectores de bolha: a *Apfel Enterprises* – produz os SDD (*Superheated Drop Detector*), freqüentemente operados como dispositivos ativos usando um sensor sonoro localizado em contato com o frasco contendo a emulsão, ao passo que a *Bubble Tech Industries* produz os BDs (abreviatura de “*Bubble Detector*”), os detectores de bolhas mais utilizados [33].

É importante frisar que os termos “*Superheated Drop Detector*” e “*Bubble Detector*” são marcas registradas dos respectivos fabricantes e que o termo “*Superheated Emulsion Detector*” é o nome recomendado pela ICRP a fim de designar

detectores de radiação que funcionam com base nas emulsões superaquecidas [57, 58, 61].

3.1.5 Aplicações dos Detectores de Bolhas

A principal aplicação dos detectores de bolha é na dosimetria de nêutrons. Para tal propósito, num primeiro momento, um detector foi idealizado a fim de produzir uma bolha por unidade de dose de nêutron, independente da energia do nêutron incidente. O número de bolhas acumuladas após certo tempo de exposição pode ser associada à dose total, sem conhecimento do espectro do nêutron incidente, requerendo tal comportamento que a eficiência de detecção do dispositivo seja tanto função da energia do nêutron combinada com a curva de dose por nêutrons quanto função de energia [67].

Verifica-se experimentalmente que detectores com a composição correta – isto é, como estão constituídas as moléculas da emulsão superaquecida – podem ter aproximadamente esse comportamento [68]. Eles respondem de forma eficiente para nêutrons de altas energias através de núcleos de recuo diretos, e são menos eficientes na detecção de nêutrons intermediários e lentos onde a implicação da dose destes é menor [58].

Sensibilidades típicas estão na faixa de algumas bolhas por mSv, um nível que é útil para dosimetria pessoal, monitoramento de rotina para trabalhadores em campos de radiação, levantamento raiométrico em cíclotrons, assim como para pacientes de tratamento radioterápico [69, 70] expostos a campos de fotonêutrons indesejados, que são produzidos nos cabeçotes dos aceleradores lineares clínicos.

Encontram-se, ainda, na literatura exemplos de uso dos detectores de bolhas para medidas de campos de nêutrons a grandes altitudes, em aviões comerciais [72], seja em naves espaciais [71, 72]. Há ainda a aplicação dos detectores de bolhas para o estudo de matéria escura [73].

3.2 O Espectrômetro Detector de Bolhas (BDS)

3.2.1 Os Detectores de Bolhas da BTI

Os detectores de bolhas da *Bubble Tech* foram utilizados na parte experimental do presente trabalho. A Tabela 3.3 mostra os modelos de detectores de bolhas da BTI, e as respectivas propostas de aplicação.

Tabela 3.2: Modelos de detectores de bolhas da BTI [74]

MODELOS	FINALIDADES
BD-PND	Recomendado para dosimetria pessoal de nêutrons, incorporando compensação automática para sensibilidade, indo além das recomendações da ICRP-60, variando com a temperatura além da faixa operacional de 20° C – 37° C.
BD100R	Desempenho similar ao BD-PND, mas sem a compensação de temperatura.
BDT	Usado para medir doses devidas a nêutrons térmicos. Frequentemente utilizado e conjunto com o BD-PND e o BD100R
BDS	Espectrômetro de nêutrons de baixo custo.

O “*Bubble Detector Spectrometer*” é o principal objeto desta pesquisa de mestrado e seu detalhamento começa a seguir.

3.2.2 Características Básicas do BDS

O *Espectrômetro Detector de Bolhas* (mais conhecido como *BDS* – nome que será utilizado daqui por diante) foi utilizado na parte experimental do presente trabalho, que será detalhada no próximo capítulo. Tem como principal finalidade a espectrometria de nêutrons em baixa resolução, na faixa de 10 keV a 20 MeV.

Os BDS se baseiam em detectores de bolhas especialmente desenvolvidos para possuírem diferentes limiares de energias para nêutrons, aplicando a propriedade básica dos líquidos superaquecidos da diminuição da energia dos nêutrons necessária para causar nucleação com o aumento do grau de superaquecimento [56]. Para isso, várias amostras de líquidos superaquecidos com diferentes pontos de ebulição foram utilizadas, correspondentes aos diversos limiares energéticos [61], sendo os líquidos

superaquecidos mais utilizados para este fim o já citado R-114 e o C-318 (mais conhecido como *octafluorciclobutano*).

Cada jogo de BDS, ilustrado na Figura 3.7, possui 36 detectores, sendo seis de cada limiar energético: 10 keV, 100 keV, 600 keV, 1 MeV, 2,5 MeV, 10 MeV. O limiar energético para nêutrons produzirem bolhas por núcleos de recuo diretamente varia com o nível do superaquecimento, com este limiar diminuindo com o aumento do nível do superaquecimento. [69, 75].



Figura 3.7: Um jogo de BDS

Os detalhes acerca da definição de tais limiares energéticos não são divulgados pelos fabricantes dos detectores de bolhas [75]. A Figura 3.8 apresenta as funções resposta dos BDS em seus vários limiares energéticos [30].

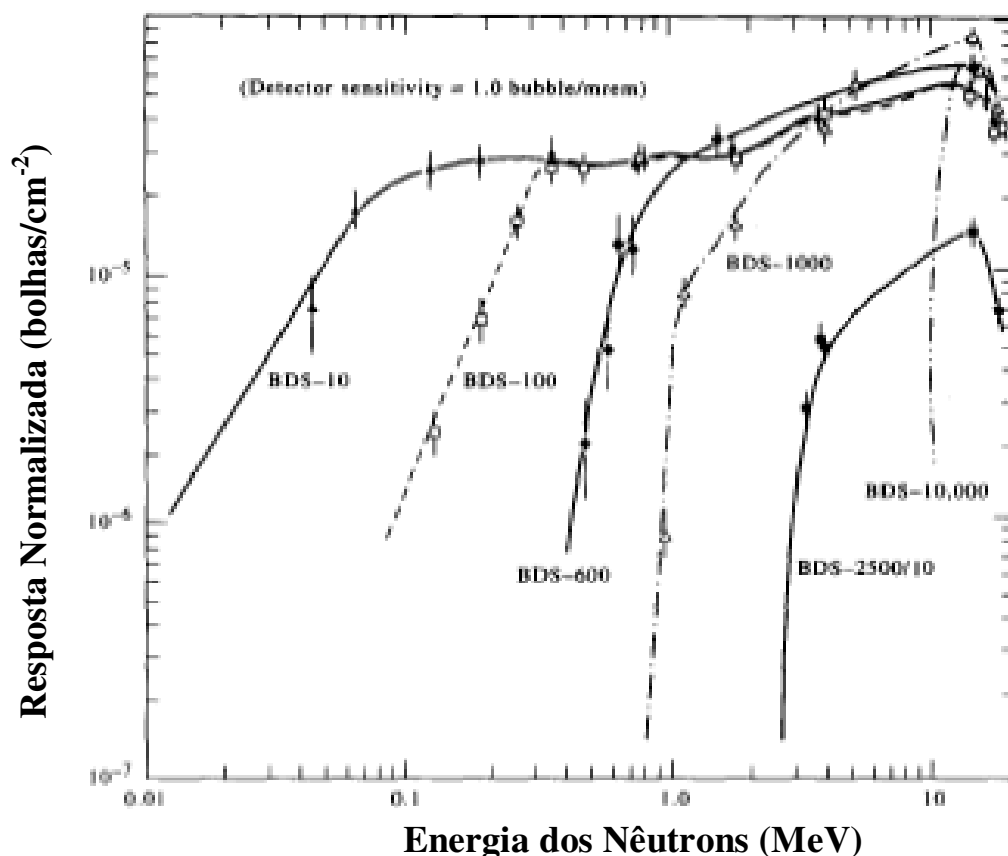


Figura 3.8: Respostas Normalizadas dos BDS [61]

Os BDS possuem duas propriedades bastante úteis na medida de nêutrons: são insensíveis aos raios gama – o que possibilita seu uso em áreas com radiação gama de fundo – e, sendo detectores passivos, podem ser utilizados em campos radiativos pulsantes. Por isso, estes dispositivos têm sido usados na determinação de espectros de nêutrons no espaço e são freqüentemente usados junto a operações com reatores e para a medida de campos de nêutrons indesejáveis em aceleradores de pesquisa ou clínicos devendo, pois ser utilizados quando se deseja saber da energia de campo de nêutrons, sobretudo onde tal campo represente apenas uma pequena fração do campo de radiação total [76].

Cada BDS possui um rótulo com um número identificador, limiar de energia de nêutrons incidentes e sensibilidade (informações também listadas em uma folha de dados fornecida pelo fabricante). Por exemplo, se no rótulo de um BDS estiver escrito “*BDS-100 1.2#1*”, significa que ele possui energia limiar de 100 keV, sensibilidade de 1,2 bolhas por mrem (0,12 bolhas por μ Sv, na unidade de dose mais atual) e número identificador igual a 1 [30].

3.2.3 Instruções de Operação

Alguns cuidados são necessários antes da utilização os BDS e os detectores de bolhas em geral. Primeiramente, o jogo completo deve estar guardado em um ambiente fresco até o momento de utilização, quando eles devem equilibrar-se com a temperatura ambiente, preferencialmente a 20 °C. Isso é feito facilmente, deixando-os expostos ao ar do recinto por 45 minutos antes de iniciar a operação. Uma caixa de isopor ajuda a assegurar que a temperatura do detector permaneça a 20 °C no tempo de exposição. O valor de temperatura supracitado justifica-se pelo fato de os BDS não possuírem sistema de compensação de temperatura, o que produz vários efeitos adversos nas suas medidas fora de tais padrões.

A fim de sensibilizar o detector para nêutrons, deve-se colocá-lo de cabeça para baixo e torcer a tampa (para permitir que o ar no seu interior seja removido, pois o mesmo está sob pressão) recolocando-a a seguir no detector sem apertar [30]. É importante frisar que o conteúdo dos BDS está submetido a uma forte pressão e ele deve ser mantido longe do rosto durante esse processo.

Os BDS estão, pois, prontos para detectar nêutrons na faixa de energia especificada. É importante sempre anotar a posição de cada detector, pondo os detectores nos mesmos locais para exposições repetidas. Após cada exposição, as bolhas registradas nos detectores são contadas, sendo recomendável que o procedimento aconteça 30 minutos após a exposição para que todas as bolhas sejam visíveis a olho nu [65].

3.2.4 Procedimento de Deconvolução Espectral

A principal aplicação dos BDS é o fornecimento de espectro de nêutrons em baixa resolução, visando determinar doses de nêutrons para fins de proteção radiológica [30]. Para isso, são utilizados um ou dois jogos de BDS. Tal escolha depende da incerteza estatística desejada [77].

A determinação do espectro de nêutrons é feita posicionando o jogo de detectores num campo de nêutrons durante o intervalo de tempo pré-estabelecido. Apesar dos diversos modos de se obter espectros de nêutrons, foi usado neste trabalho

um método simplificado para a obtenção de tais espectros, conhecido como *algoritmo de despojamento espectral* [59], que se baseia em três pressupostos:

- a) *O procedimento de obtenção do espectro pode ser adequadamente aproximado por um histograma de seis regiões, correspondentes aos 6 limiares dos BDS.*
- b) *A faixa de energia de interesse para nêutrons detectados pelo BDS é de 10 keV a 20 MeV. Essa é uma faixa razoável a ser assumida, já que muitos dos campos de nêutrons de interesses dosimétricos localizam-se abaixo dos 20 MeV.*
- c) *A fluência por unidade de energia é constante durante todo o intervalo do histograma.*

O cálculo do espectro propriamente dito é feito por partes. Primeiramente, efetuam-se as contagens das bolhas registradas nos detectores conforme descrito na seção anterior e esses valores são normalizados dividindo o número de bolhas pela sensibilidade fornecida pelo fabricante dos BDS.

$$R_i = \frac{\text{Número de bolhas}}{\text{sensibilidade}} \quad (3.3)$$

Onde R_i é a resposta padronizada onde o índice “i” denota um detector em particular com $i=1$ correspondendo ao BDS-10 e $i=6$ ao BDS-10000, por exemplo.

Logo, quando certo número de detectores (aqui denotado por “k”) com um mesmo limiar energético é utilizado, a resposta padronizada em cada limiar energético é dada por:

$$\overline{R}_i = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k R_i \quad (3.4)$$

De posse dos valores das respostas padronizadas, parte-se para os cálculos intermediários, em que se determinam os valores do número de nêutrons N_i nos histogramas correspondentes, através da expressão:

$$R_i = \sigma_{ij} \times N_i \quad (3.5)$$

A expressão (3.5) corresponde a um sistema de equações lineares, onde i e j variam de 1 a 6, com j representando os intervalos de energia de cada detector i e σ_{ij} a resposta média do detector i no intervalo j , cujos valores estão listados na Tabela 3.4.

Tabela 3.3: Intervalos do histograma, correspondentes às seções de choque médias para nêutrons no BDS para as faixas de energia [30]

<i>I.D.</i>	<i>j</i> =	1 (0,01-0,1)	2 (0,1-0,6)	3 (0,6-1,0)	4 (1,0-2,5)	5 (2,5-10)	6 (10-20)	MeV
BDS-10	1	5×10^{-6}	$2,5 \times 10^{-5}$	$2,92 \times 10^{-5}$	$2,97 \times 10^{-5}$	$4,15 \times 10^{-5}$	$4,78 \times 10^{-5}$	
BDS-100	2	--	$2,27 \times 10^{-5}$	$3,14 \times 10^{-5}$	$3,23 \times 10^{-5}$	$4,47 \times 10^{-5}$	$5,09 \times 10^{-5}$	
BDS-600	3	--	--	$1,60 \times 10^{-5}$	$3,27 \times 10^{-5}$	$4,75 \times 10^{-5}$	$5,45 \times 10^{-5}$	
BDS-1000	4	--	--	--	$1,32 \times 10^{-5}$	$3,50 \times 10^{-5}$	$5,90 \times 10^{-5}$	
BDS-2500	5	--	--	--	--	$2,99 \times 10^{-5}$	$8,70 \times 10^{-5}$	
BDS-10000	6	--	--	--	--	--	$4,35 \times 10^{-5}$	

Em certos intervalos de energia, pode haver pouquíssimos ou nenhum nêutron no espectro da fonte emissora. Sob tais circunstâncias, o valor de N_i pode ser negativo devido a incertezas estatísticas. Nessa situação, recomenda-se que se substitua N_i por zero. Tal procedimento é conhecido como *condição de “não-negatividade”*, que é imposta à obtenção do espectro.

A fluência por unidade de intervalo de energia abrangido pelo respectivo histograma em cada um deles é dada por:

$$fluência/energia = \frac{N_i}{\Delta E_i} \quad (3.6)$$

A fluência total Φ (n.cm⁻²) durante o tempo da exposição dos BDS é dada por:

$$\Phi = \sum_{n=1}^k N_i \quad (3.7)$$

A taxa de fluência será:

$$\dot{\Phi} = \sum_{n=1}^k \frac{N_i}{\Delta t_i} \quad (3.8)$$

Enfim, a taxa de fluência por unidade de energia é dada por:

$$\frac{\dot{\Phi}}{\Delta E} = \sum_{n=1}^k \frac{N_i}{\Delta t_i \times \Delta E_i} \quad (3.9)$$

Apesar de este método ser bastante simples e não exigir maiores esforços computacionais, ele sofre de grande propagação de erro, que pode acarretar grandes incertezas nas energias mais baixas, conforme a precisão estatística dos dados oriundos dos limiares energéticos mais altos [75]. O fabricante informa que um número reduzido de bolhas (até 25) acarreta uma incerteza de 40% na resposta desejada do detector de bolhas em geral [77], ao passo que alguns autores recomendam para o BDS o mínimo de 1800 bolhas para cada limiar energético (300 bolhas para cada detector em média), a fim de garantir uma baixa incerteza [30].

Capítulo 4

Metodologia Experimental

4.1 Irradiação dos BDS nas fontes de Nêutrons de Interesse

4.1.1 Fonte de Referência de Am-Be do IRD

A primeira coisa a se fazer antes das aplicações usuais de um detector de radiação qualquer no Brasil é proceder à devida calibração⁸, de acordo com as normas da CNEN. Para monitores de nêutrons, estão disponíveis fontes de referência no *Laboratório de Nêutrons* do LNMRI/IRD.

O LNMRI é integrante da rede de laboratórios de Dosimetria Padrão Secundário da Agência Internacional de Energia Atômica, a partir da segunda metade da década de 1970 e desde 2002 é responsável pela guarda e disseminação dos padrões nacionais das grandezas físicas *kerma*, *fluência*, *equivalente de dose*, *dose absorvida* e *atividade* para as diversas aplicações das radiações ionizantes nos seus campos de pesquisa, realizando trabalho de calibração de monitores de área, medição com BSM (banho de sulfato de manganês), irradiação de monitores individuais e amostras diversas, além de outros ensaios [78]. Lá estão disponíveis as fontes de referência de Califórnio, Califórnio moderado com Água Pesada, Plutônio-Berílio e Amerício Berílio.

Os espectros de nêutrons de tais fontes de referência estão esboçados na Figura 4.1.

⁸ Calibração é o conjunto de procedimentos que estabelece, sob condições específicas, a relação entre os valores indicados em certo dosímetro e aqueles correspondentes conhecidos da grandeza a ser medida. [46].

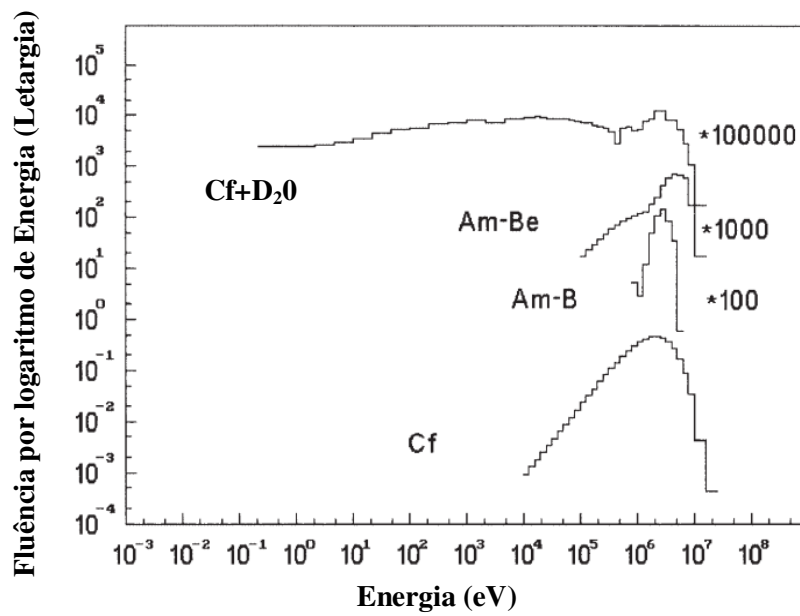


Figura 4.1: Espectros de Nêutrons de Fontes de Referência [79]

A fonte de Americio-Berílio foi utilizada no presente trabalho por ser o padrão brasileiro para fluência de nêutrons [78]. Seus espectros mais conhecidos podem ser vistos na Figura 4.2, com uma melhor visão do espectro de nêutrons da fonte de amerício-berílio mais comum está disponível na Figura 4.3.

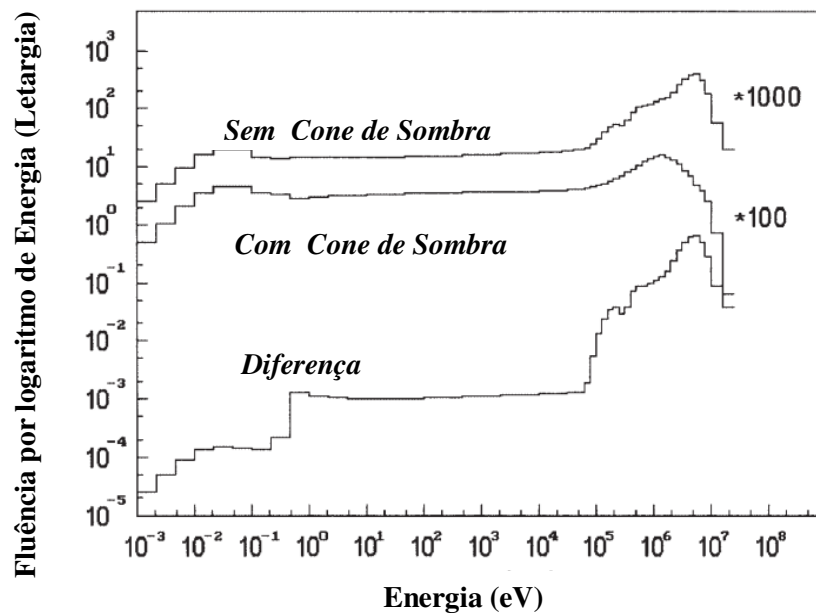


Figura 4.2: Espectros de Nêutrons da fonte de Am-Be [80]

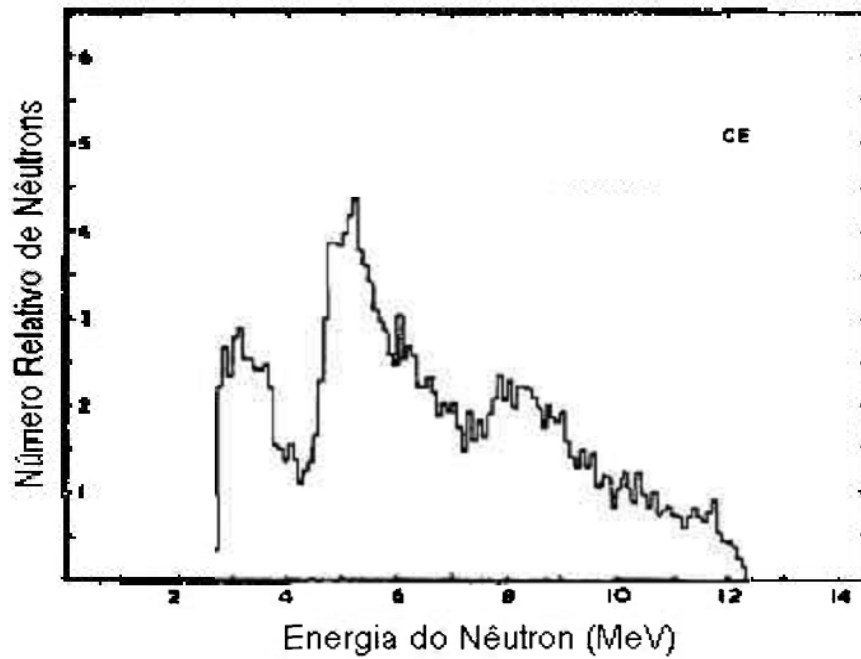


Figura 4.3: Espectro de nêutrons da fonte de Am-Be mais comum [81]

As principais características da fonte de Am-Be do IRD (Figura 4.4) utilizada neste trabalho e o seu espectro estão expostos na Tabela 4.1 e na Figura 4.5, respectivamente.



Figura 4.4: Fontes de Am-Be do IRD; a fonte ao centro foi usada neste trabalho [82]

Tabela 4.1: Informações sobre a Fonte de Am-Be do IRD [81]

Características da Fonte	Valores
Data da Fabricação	26 de março de 1973
Modelo	31/105
Série	A639
Atividade	0,2 TBq
Meia-Vida	432 anos
Produção de Nêutrons	10^7 nêutrons por segundo
Intervalo do Espectro	1 a 11 MeV
Intervalo com 60% de nêutrons emitidos	3 a 8 MeV

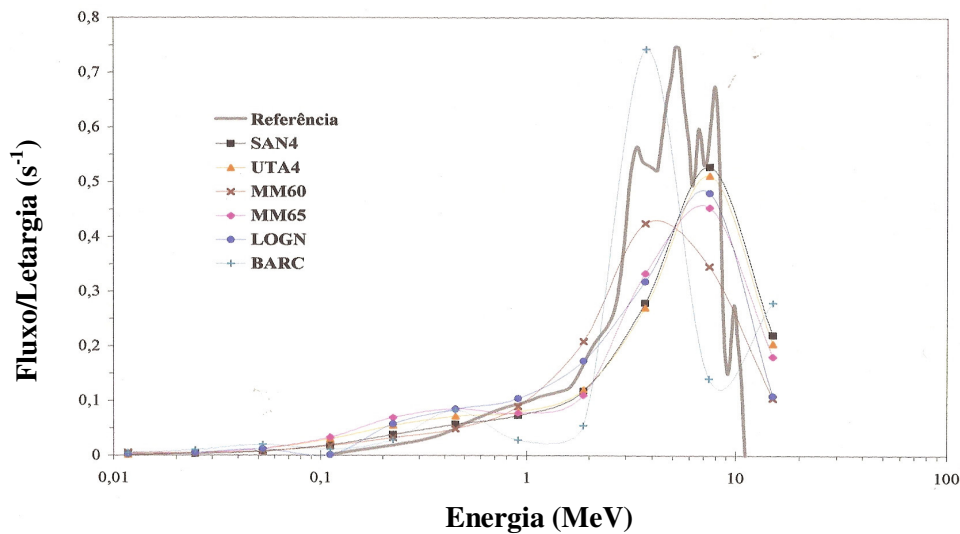


Figura 4.5: Espectro de nêutrons da fonte de Am-Be do IRD [81]

4.1.2 O Cíclotron RDS-111 do IEN/CNEN

O cíclotron é um acelerador de partículas que provê altas energias para partículas carregadas, tendo sido inventado na década de 1930 [83, 84]. O primeiro cíclotron instalado no Brasil foi o *CV-28*, da *Cyclotron Corp* no Instituto de Engenharia Nuclear no fim do ano de 1974, que também abriga o cíclotron *RDS-111* (Figura 4.6), adquirido pela instituição em 2003.

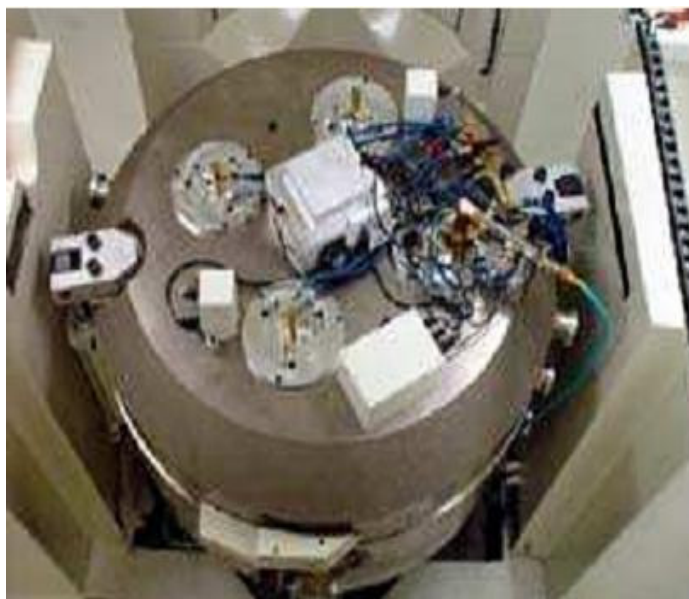


Figura 4.6: O ciclotron RDS-111 [29]

O RDS-111, que começou a ser produzido no fim do século passado, é utilizado para a produção do radioisótopo ^{18}F , através do bombardeamento de dois alvos de oxigênio-18 (devido à reação $^{18}O(p,n)^{18}F$) [28] e usado para síntese do radiofármaco *FDG*, usado em equipamentos de *PET* e *SPECT* [29].

4.1.3 Irradiação dos BDS

As medições com os BDS adquiridos pelo *Laboratório de Neutronografia em Tempo Real* do *PEN/COPPE* foram feitas a partir da irradiação dos mesmos nas fontes de Am-Be do IRD e no RDS-111 do IEN entre agosto e setembro de 2008.

Para a exposição ao campo de nêutrons gerado pela fonte de Am-Be, seis BDS, cada um correspondendo a um limiar energético, foram irradiados pela fonte descrita no item 4.1.1 de acordo com o setup exibido na Figura 4.7.



Figura 4.7: Setup da irradiação dos BDS na fonte de Am-Be

Os detectores foram expostos a um campo de radiação ionizante de referência gerado pela fonte de Am-Be durante 29 minutos, submetendo os BDS a um equivalente de dose ambiente de $(0,96 \pm 0,09)$ mSv⁹, valor próximo ao limite máximo de 1 mSv par o uso do BDS em campos de nêutrons. O procedimento fora realizado a (20 ± 5) °C, pressão de $(101,3 \pm 5)$ kPa e $(55 \pm 5)\%$ de umidade relativa e teve como geometria de irradiação o eixo longitudinal do detector perpendicular ao feixe de irradiação de referência com o centro geométrico do detector como ponto de referência.

Para a irradiação no RDS-111, uma dúzia de detectores – dois jogos com os seis limiares energéticos dos BDS – foi posicionada lado a lado numa pequena área do alvo do cíclotron fora da blindagem, estando 1,20 metros acima do solo e a 90 centímetros do alvo número 1 (Figura 4.8) na blindagem externa do cíclotron.



Figura 4.8: Vista do Alvo 1 do RDS-111[28]

⁹ O BDS 600 foi irradiado durante 21 minutos, recebendo uma dose ambiental de $(0,88 \pm 0,08)$ mSv.

A irradiação foi realizada em duas partes, durante um procedimento de rotina para a produção de radiofármacos. Na primeira, de número 660, três pares com os BDS de energia limiar mais baixas foram expostos a campo de nêutrons produzidos no alvo do cíclotron no processo de irradiação de feixe de prótons, durante 180 minutos com uma corrente elétrica no alvo de $55 \mu A$. Na segunda, de número 678, os outros três pares de BDS com maior energia limiar foram irradiados por outro feixe prótons, durante 150 minutos e uma corrente elétrica utilizada de $51 \mu A$. A atividade do cíclotron durante o funcionamento é de 0,101 TBq.

4.2 Procedimentos para Contagem de Bolhas

4.2.1 Aquisição de Imagens dos BDS Irrradiados

A fim de realizar-se a contagem das bolhas nos BDS irradiados, o primeiro passo é a obtenção de imagens digitais dos mesmos em diversos ângulos.

Um aparato especialmente montado para tal tarefa [85, 86] está ilustrado na Figura 4.9.



Figura 4.9: Aparato para aquisição de fotos dos detectores de bolhas.

Utilizou-se em tal aparato uma câmera digital, um goniômetro, um recipiente (copo de vidro adaptado) com água destilada para a ampliação das bolhas. A câmera digital em questão é uma *Nikon Coolpix* que sofreu os seguintes ajustes: *abertura de diafragma 5.3*, *velocidade do obturador 1/125*, *ASA 400* e operação no modo *MACRO AUTO* a uma distância de 24 centímetros dos detectores para melhor qualidade de imagem.

Variando os ângulos entre o detector e a câmera digital com o auxílio do goniômetro de 15° em 15°, fotos obtidas treze fotografias em preto e branco foram obtidas de cada detector irradiado, sendo estas posteriormente processadas pelo software *Adobe Photoshop CS3 versão 6.0*, para a conversão das pela câmera digital em imagens bidimensionais com resolução de oito bits, como se vê na Figura 4.10.

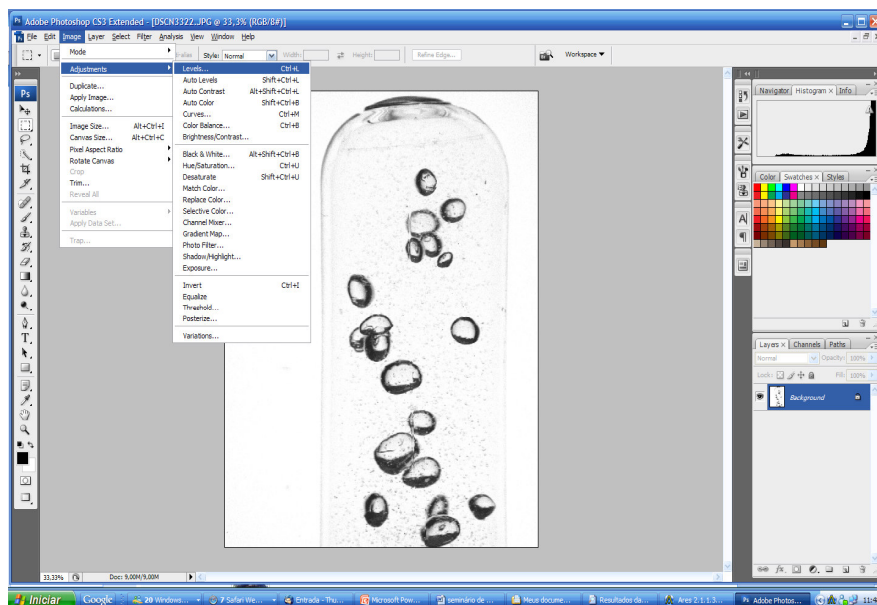


Figura 4.10: Tratamento das fotos dos detectores no Photoshop

Estas foram agrupadas em diretórios cujos nomes são os respectivos limiares energéticos de cada detector. Cerca de 160 imagens foram submetidas a tal processo.

4.2.2 Procedimento de Contagem Manual das Bolhas

Ao fim do processo de aquisição e armazenamento das imagens dos BDS, os diretórios que as contêm foram gravados em uma mídia de *CD-DVD* para posterior

reprodução em aparelhos de *TV* e *DVD* comuns, com um exemplo da imagem resultante ilustrado na Figura 4.11.

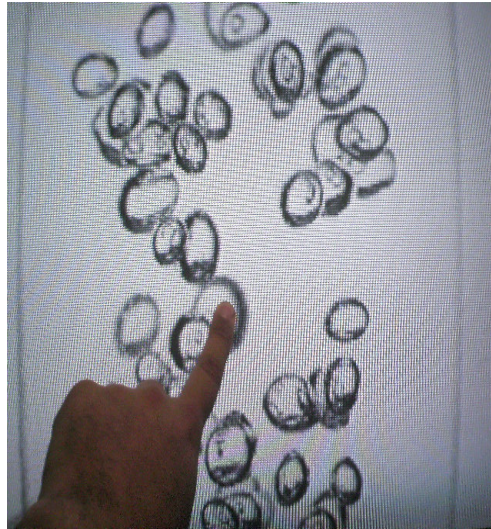


Figura 4.11: Imagens do BDS reproduzidas na tela de TV

Usando um marcador de quadro branco, as regiões que abrigam as bolhas foram demarcadas e as contagens realizadas. Na Figura 4.12, é possível ver a delimitação e as contagens parciais para dada imagem.



Figura 4.12: Delimitações e resultados de contagens das bolhas

Bolhas sobrepostas em duplas são fácil e frequentemente identificadas graças a uma observação mais próxima da imagem. Entretanto, quando três ou mais bolhas estão sobrepostas, a identificação torna-se mais difícil e, a fim de evitar que o número de

bolhas no detector seja subestimado, as bolhas menores contidas em bolhas maiores foram contadas individualmente.

4.2.3 Análise da Estatística de Contagem das Bolhas

A contagem final de cada detector e suas respectivas incertezas foram obtidas através de procedimentos baseados em estatística de contagem de radiação [26, 27, 36, 83] adaptados para os detectores de bolha, aplicadas a cada modelo de BDS fotografado, cujos parâmetros fundamentais para a estatística de contagem são: a média, o desvio padrão e o desvio da média. Foram incluídos, a título de ilustração os menores e maiores valores de contagem encontrados e as respectivas medianas¹⁰.

Para cada detector, foram efetuadas as contagens em cada fotografia digital adquirida, com tais valores submetidos a uma análise estatística realizada com auxílio do software Origin 6.0 em versão portátil (Figura 4.13).

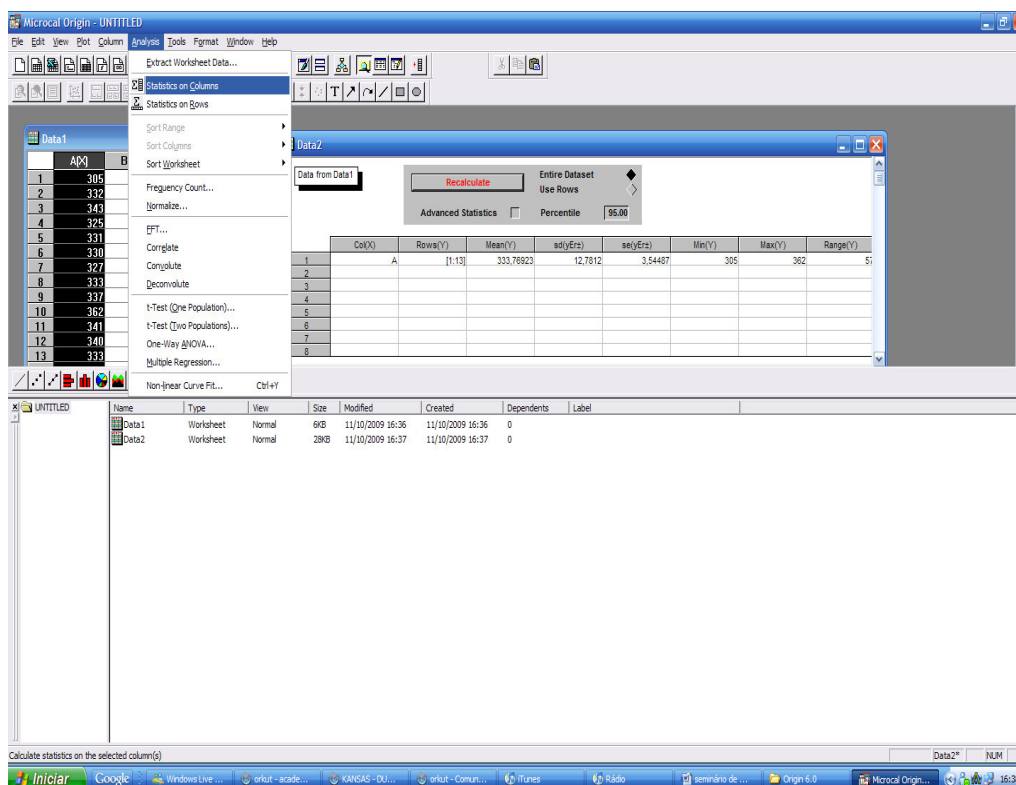


Figura 4.13: Interface do Orgin 6.0 durante o processo de estatística de contagem

¹⁰ Para fins informativos, encontra-se no apêndice A-1, uma breve revisão sobre estatística de contagem de radiação.

O histograma de cada contagem também foi construído e tais procedimentos foram realizados para todos os detectores irradiados. Ao invés de um histograma no formato mais comum, ele foi montado a partir dos pontos médios das energias limiaries, em forma de polígonos de frequência [87].

4.3 Ensaios com o BDS

4.3.1 Deconvolução do Espectro da Fonte de Am-Be

A partir da contagem de bolhas dos BDS irradiados por uma fonte de nêutrons qualquer, é possível a obtenção de seu espectro através dos procedimentos descritos na subseção 3.2.4. Para este fim, e a título de comparação com outra fonte conhecida, foi utilizada a fonte de Am-Be descrita na subseção 4.1.1.

Após a contagem das bolhas nos BDS e os cálculos das respostas padronizadas, o sistema de equações (3.5) foi resolvido numericamente através do programa MatLab 7.5, na sua versão portátil (Figura 4.14), e os dados necessários para a deconvolução do espectro foram utilizados na mesma versão portátil do Origin 6.0 citada anteriormente.

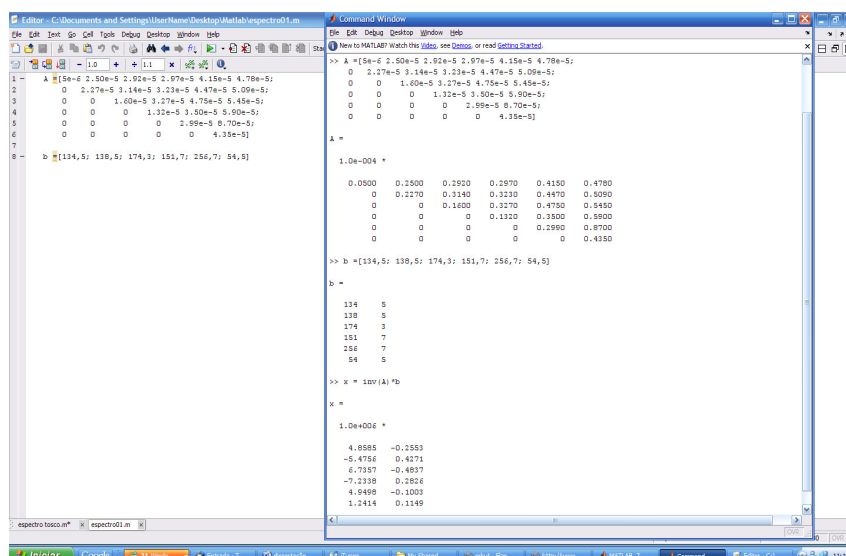


Figura 4.14: Execução do software MatLab 7.5

O espectro assim obtido foi comparado com os de referência que consta na Figura 4.5.

4.3.2 Automatização da Contagem e Comparação dos Métodos

Uma das atividades propostas para este trabalho foi a criação de um procedimento automatizado para a contagem de bolhas no detector, visto que o processo de contagem manual descrito na subseção 4.2.2 pode ser bastante árduo quando o número de bolhas no detector for elevado. Para aproximadamente 100 bolhas, tal processo de contagem torna-se excessivamente penoso, o que torna fundamental o uso de processos automatizados para a realização de tal tarefa.

Conforme dito no Capítulo 1, o fabricante dos BDS disponibiliza um leitor automático. Por conta do seu alto custo para os padrões nacionais (cerca de 10 mil dólares) e pouca confiabilidade, associado à burocracia para adquiri-lo, optou-se pelo desenvolvimento de uma metodologia própria para este fim.

Para este trabalho, o software *ImagePro Plus 4.5.1.29* (Figura 4.15) da *Media Cybernetics*, especializado na quantificação e processamento de imagens bi e tridimensionais, foi utilizado em conjunto com uma rotina Macro desenvolvida em *Visual Basic* para a análise das imagens das bolhas, através de segmentação de escalas de cinza, com o objetivo de individualizá-las o máximo possível, através do comando *Count/Size* [85].

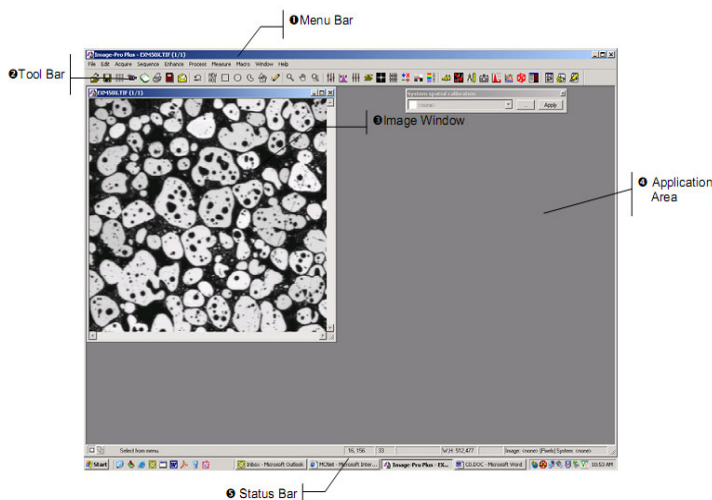


Figura 4.15: Interface do programa ImagePro

Primeiramente, é necessário definir certos parâmetros – como o tamanho dos objetos em análise – para a estimativa de objetos lineares e espaciais, através das extensivas ferramentas de medidas e personalização de polígonos fechados – as bolhas nos detectores irradiados – fornecendo os seus limites anteriores e posteriores. Para cada detector, oito imagens foram capturadas, registrando séries de ângulos de 22,5° em torno do eixo central para cada um dos tubos de amostra.

A rotina macro desenvolvida possibilita interatividade, para a supressão das bolhas sobrepostas que podem não ser consideradas automaticamente, por não estarem dentro dos parâmetros pré-estabelecidos. Essas bolhas sobrepostas foram identificadas por um observador treinado, com o intuito de compensar as subestimativas do método.

As imagens com o número maior de bolhas foram consideradas em cada amostra, para representá-las na contagem final [85].

Com os dados obtidos a partir dessas contagens, foram obtidas as respostas padronizadas e os espectros de nêutrons do cíclotron RDS-111, com o objetivo de verificar a validade do processo de contagem semi-automático, além de apontar possíveis limitações e maneiras de implementá-lo para aplicações futuras.

4.3.3 Uso dos BDS após Recompressão

Os BDS irradiados podem ser reutilizados após a recompressão das bolhas. Para este fim, juntamente com o jogo de BDS, utilizou-se a câmara de recompressão *RC-18* [88], fornecida pelo fabricante e ilustrada na Figura 4.16. Após a recompressão¹¹, os detectores podem ser retirados da câmara e postos em uma geladeira para estocagem¹².

¹¹ Os detalhes do procedimento de recompressão constam no apêndice A-2 do presente trabalho.

¹² Seguindo este protocolo, é recomendável que os detectores sejam checados periodicamente e as bolhas encontradas recomprimidas, com os detectores podendo ser estocados até três meses dessa maneira



Figura 4.16: Câmara de recompressão *RC-18*

Para verificar o reaproveitamento dos BDS após o processo de recompressão no RC-18, alguns dos detectores irradiados no RDS-111 foram expostos nos mesmos campos de nêutrons e nas mesmas condições descritas na subseção 4.1.3.

As imagens dos detectores irradiados antes e depois da recompressão foram comparadas e analisadas. Em seguida, uma tabela com as contagens das bolhas e suas respostas padronizadas antes e depois da recompressão foram construídas e seus resultados comparados e analisados.

4.3.4 Possibilidade de Uso do BDS como Dosímetro

De acordo com o manual da BTI e artigos encontrados na literatura [75, 89, 90], as respostas padronizadas dos BDS calculadas através da equação (3.3) possuem dimensões de dose.

A fim de verificar-se a veracidade e a validade de tal afirmação que possibilitaria o uso dos BDS como dosímetros, os valores das respostas padronizadas foram comparados aqueles calculados através de simulação computacional com o código MCNP, versão 5, e com o valor medido durante a o processo de irradiação.

Primeiramente realizou-se a simulação das doses ambientais obtidas de acordo com o procedimento experimental descrito na subseção 4.1.3 para a fonte de Am-Be e esses valores foram comparados com aqueles obtidos através do cálculo das respostas padronizadas dos BDS no experimento supracitado. Os valores foram posteriormente

comparados e, em seguida, o detector com menor limiar energético (10 keV), e que mais sofre com a propagação de erros característica aos BDS, teve o valor de resposta padronizada comparado com o valor da dose total simulada e a dose total experimental.

Tais procedimentos baseiam-se nas referências [89] e [90], onde as respostas padronizadas com os BDS foram relacionadas a valores de referência (experimental e MCNP), tanto para valores parciais quanto para valores totais.

Capítulo 5

Resultados e Discussão

5.1 Contagens Manual das Bolhas no BDS

5.1.1 Irradiação e Aquisição de Imagens dos BDS

Após a irradiação dos BDS, os mesmos foram fotografados com câmera digital para posterior contagem das bolhas neles contidas. As fotos dos detectores irradiados no *IRD* e no *IEN* podem ser vistas nas Figuras 5.1 e 5.2, respectivamente. Por questões de espaço, apenas uma foto de cada BDS irradiado, das treze obtidas, será apresentada.

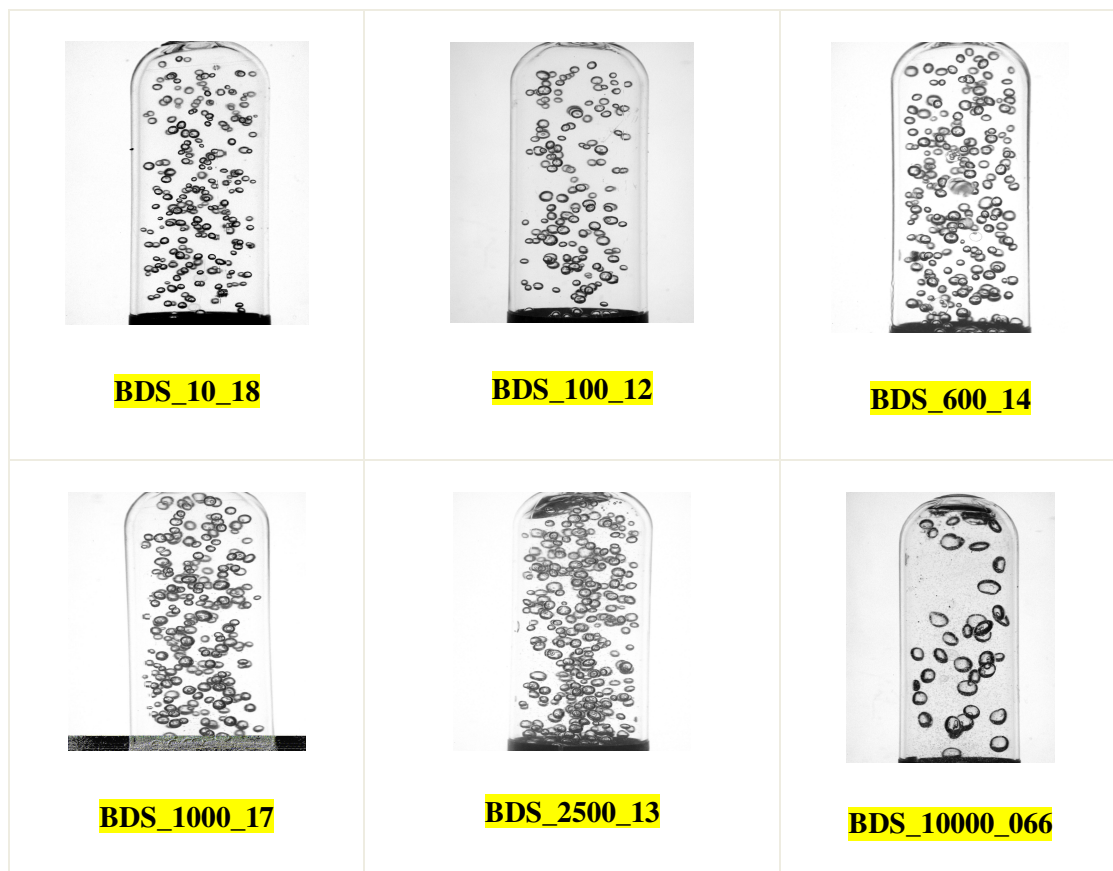


Figura 5.1: Imagens adquiridas dos BDS expostos à fonte de Am-Be no IRD

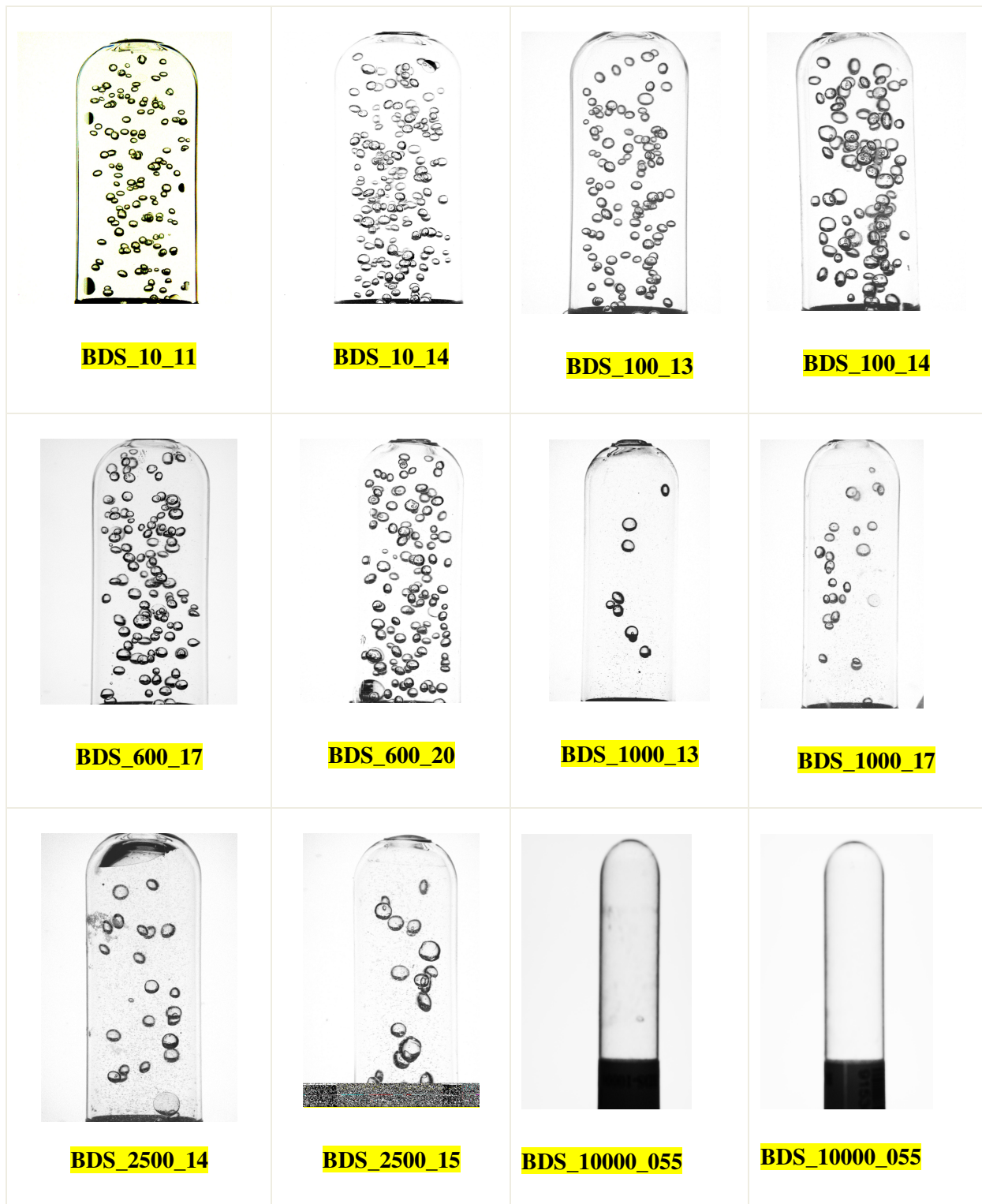


Figura 5.2: Imagens adquiridas dos BDS irradiados expostos ao *RDS-111* do *IEN*

Levando-se em consideração apenas o qualitativo visível de bolhas, pode-se dizer que a partir do campo de radiação por nêutrons da fonte de Am-Be conseguiu-se um bom número delas, que condiz com o intenso campo de radiação ao qual os BDS foram expostos.

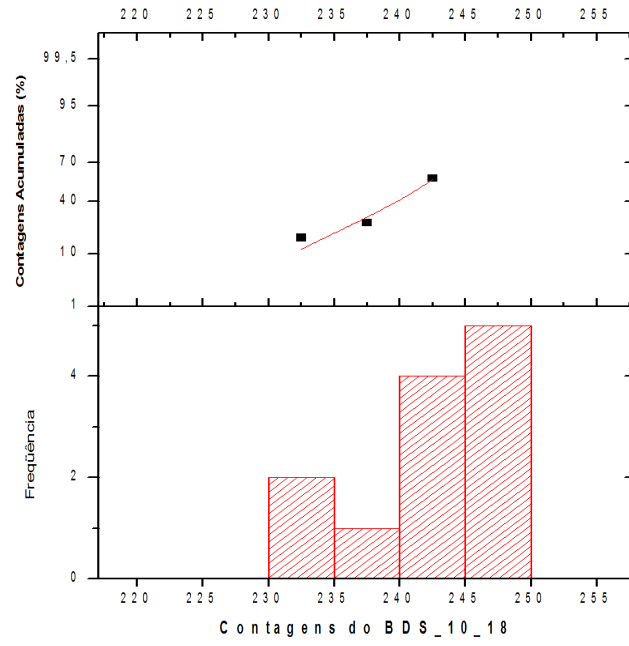
Durante o processo de irradiação no RDS-111, conforme esperado, nenhuma bolha fora produzida em ambos os BDS_10000, visto que seu limiar é superior à energia máxima dos nêutrons emitidos pelo ciclotron. Percebem-se ainda, com exceção dos BDS-1000, similaridades entre a quantidade de bolhas produzidas nos pares de BDS de mesmo limiar.

5.1.2 Estatística Básica de Contagem dos BDS irradiados

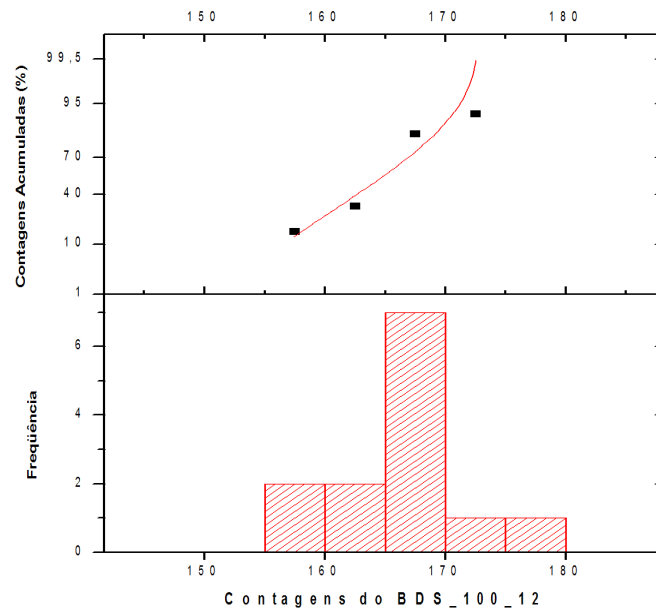
Os valores da estatística de contagem das bolhas dos BDS irradiados na fonte de nêutrons de Am-Be estão detalhados na Tabela 5.1, com os respectivos histogramas expostos nas Figuras 5.3 a 5.5. Os símbolos listados nas Tabelas 5.1 e 5.2 são: $N_{\text{média}}$ o número médio de bolhas contadas, σ_N o seu desvio padrão, S_N o desvio da média, $N_{\text{mín}}$ e $N_{\text{máx}}$ o número mínimo e o número máximo de bolhas respectivamente.

Tabela 5.1: Estatística de contagem das bolhas dos BDS irradiados no IRD

# Série	Identificação	$N_{\text{média}}$	σ_N	S_N	$N_{\text{mín}}$	$N_{\text{máx}}$	Mediana
7341412	BDS_10_18	243,54	7,64	2,12	230	261	244
7344251	BDS_100_12	166,15	5,64	1,56	155	175	167
7344238	BDS_600_14	244,00	10,16	2,80	224	259	245
7354341	BDS_1000_17	257,92	16,22	4,50	231	292	258
7354442	BDS_2500_13	333,77	12,78	3,54	305	362	333
915297	BDS_1000_066	36,15	1,77	0,49	34	40	36



(a)



(b)

Figura 5.3: Histograma das contagens do BDS_{10_18} (a) e do BDS_{100_12} (b)

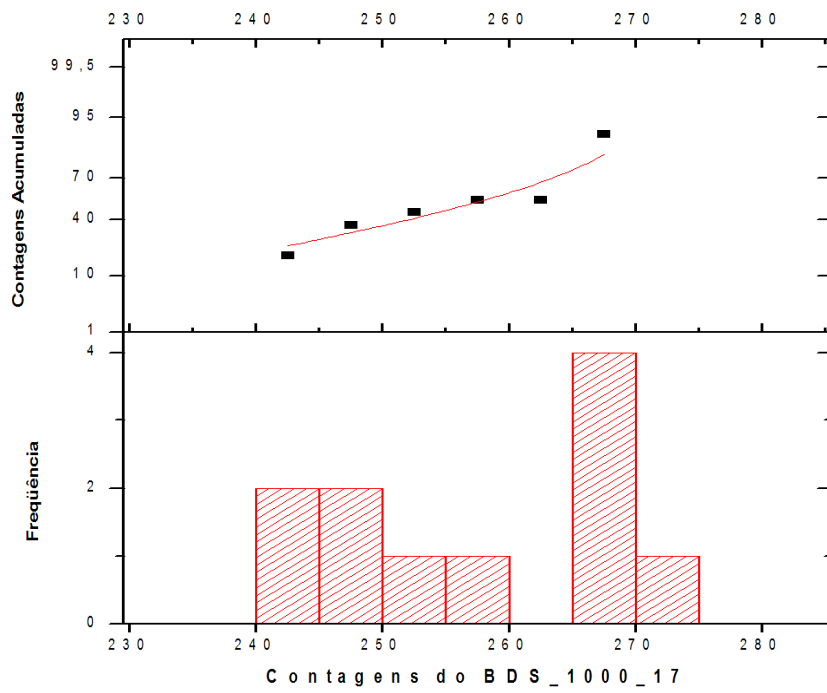
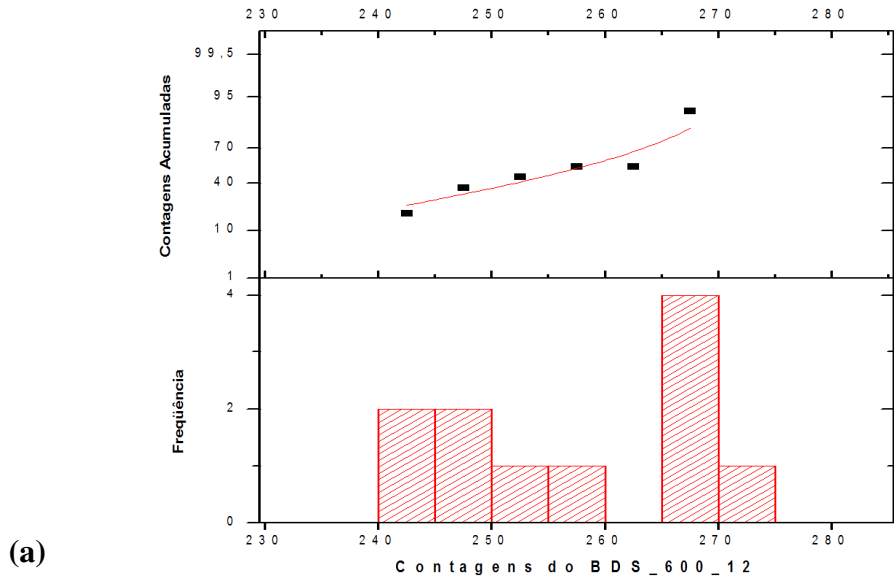
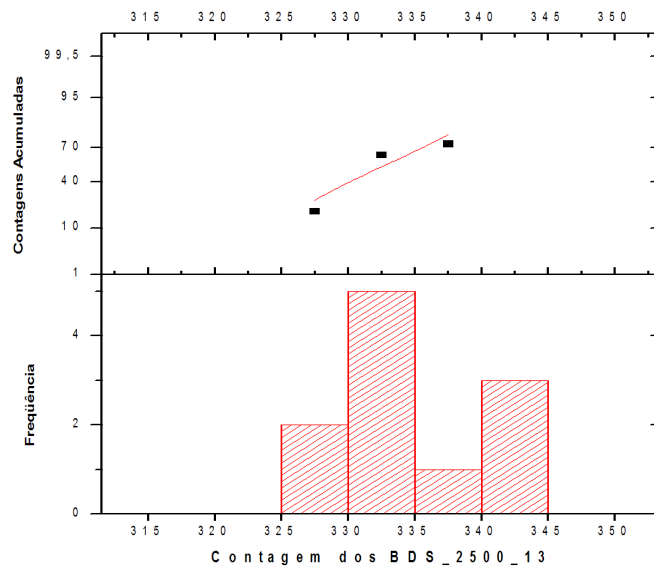
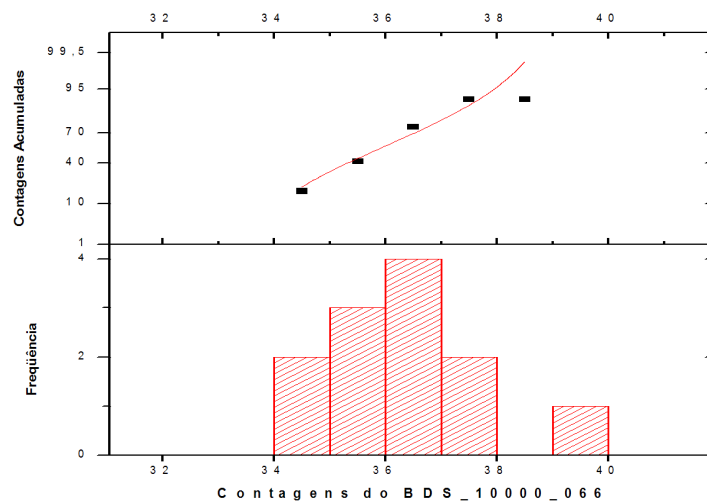


Figura 5.4: Histograma das contagens do BDS_600_14 (a) e do BDS_1000_17 (b)



(a)



(b)

Figura 5.5: Histograma das contagens do BDS_2500_13 (a) e do BDS_10000_066 (b)

De modo similar aos valores encontrados no item anterior, os valores da estatística de contagem das bolhas dos BDS expostos no ciclotron RDS-111 estão detalhados na Tabela 5.2, com os respectivos histogramas expostos nos Figuras 5.6 a 5.10.

Tabela 5.2: Estatística de contagem das bolhas dos BDS expostos no RDS-111

# Série	Identificação	$N_{média}$	σ_N	S_N	$N_{mín}$	$N_{máx}$	Mediana
7341455	BDS_10_11	147,31	5,36	1,49	137	156	148
7341401	BDS_10_14	174,46	5,41	1,50	165	183	175
7354246	BDS_100_13	113,38	3,73	1,03	108	120	113
7354250	BDS_100_14	103,31	3,07	0,85	99	108	103
7344234	BDS_600_17	119,92	3,38	0,94	114	127	120
7344232	BDS_600_20	136,08	3,66	1,02	129	143	135
7354335	BDS_1000_13	9,38	0,65	0,18	9	11	9
7354324	BDS_1000_17	26,46	1,61	0,45	24	30	26
7354446	BDS_2500_14	24,45	1,75	0,52	22	28	24
7354443	BDS_2500_15	20,83	1,59	0,46	19	24	21
915296	BDS_10000_055	0	*	*	0	0	0
915300	BDS_10000_055	0	*	*	0	0	0

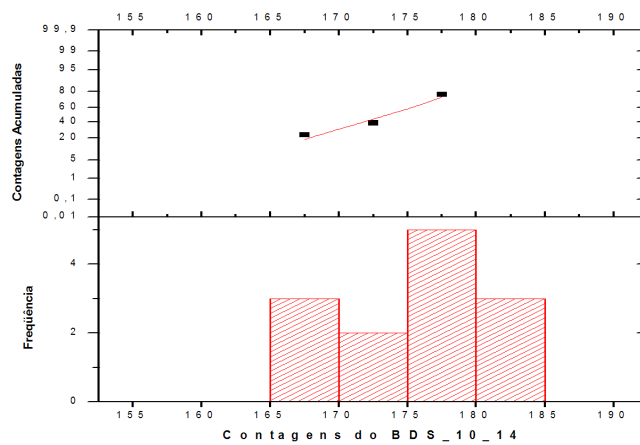
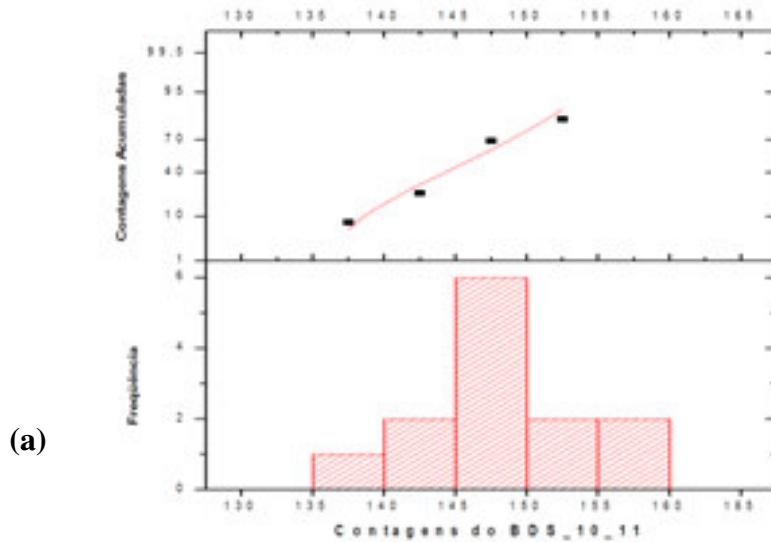
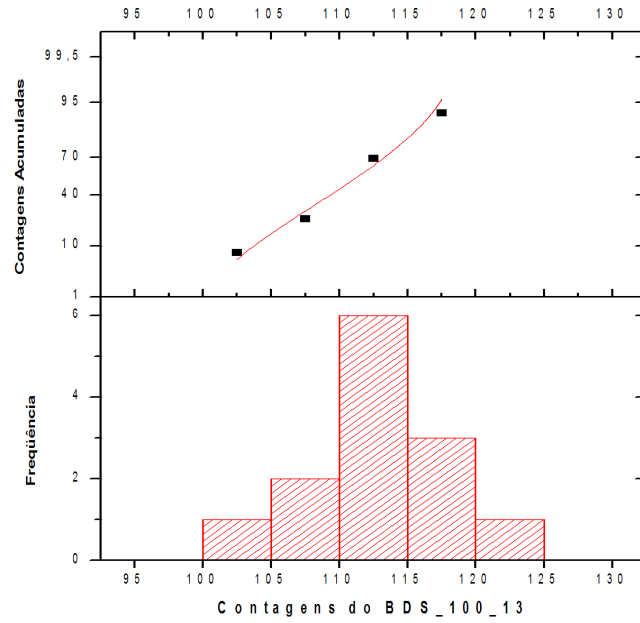
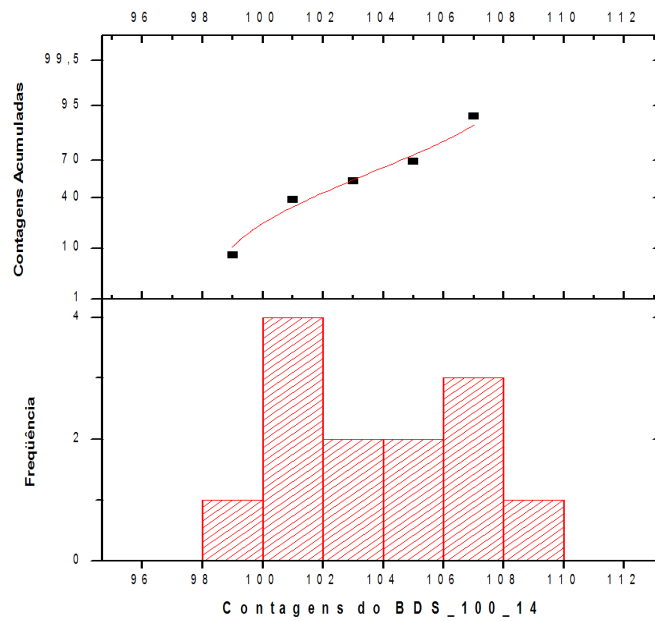


Figura 5.6: Histograma das contagens dos BDS_10_11 (a) e BDS_10_14 (b)

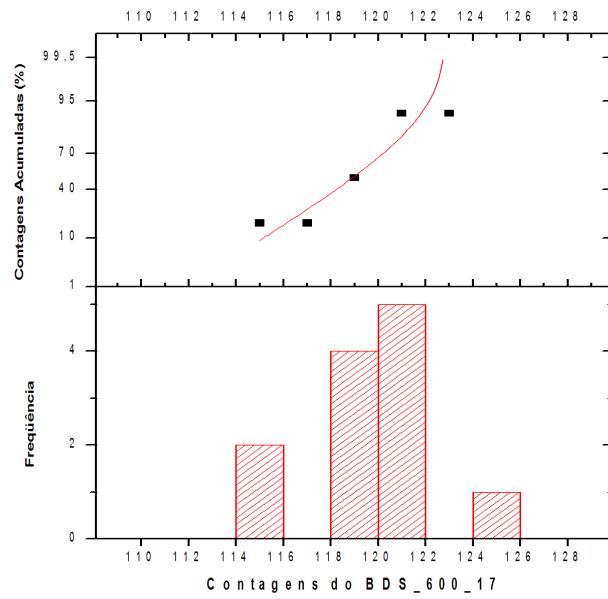


(a)

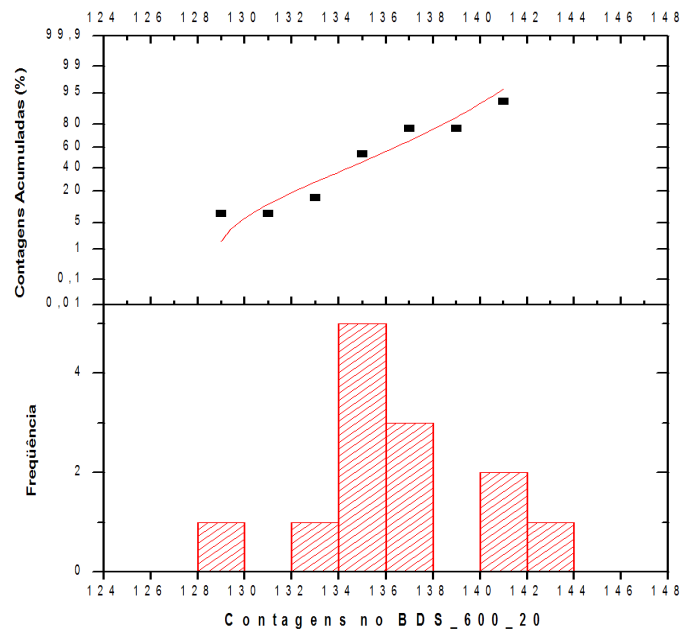


(b)

Figura 5.7: Histograma das contagens do BDS_100_13 (a) e BDS_100_14 (b)

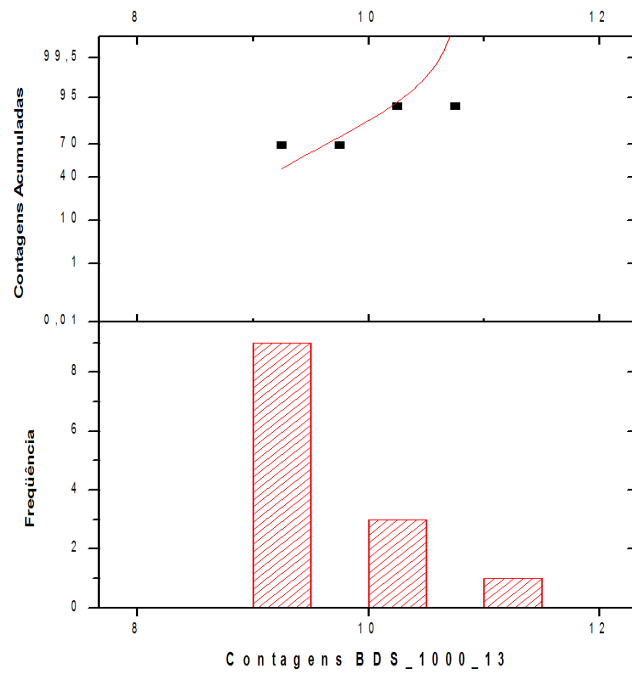


(a)

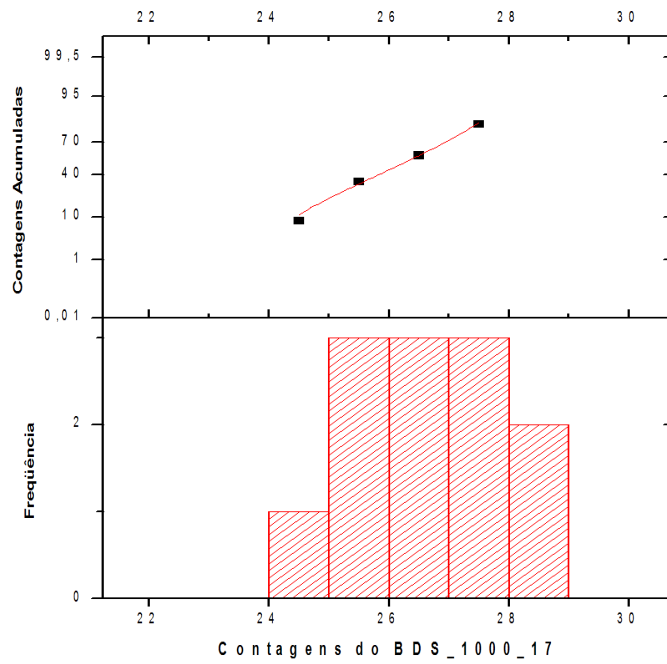


(b)

Figura 5.8: Histograma das contagens do BDS_600_17 (a) e BDS_600_20 (b)

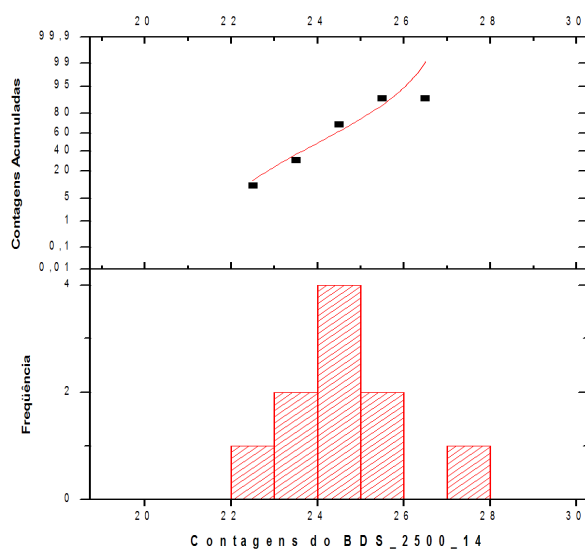


(a)

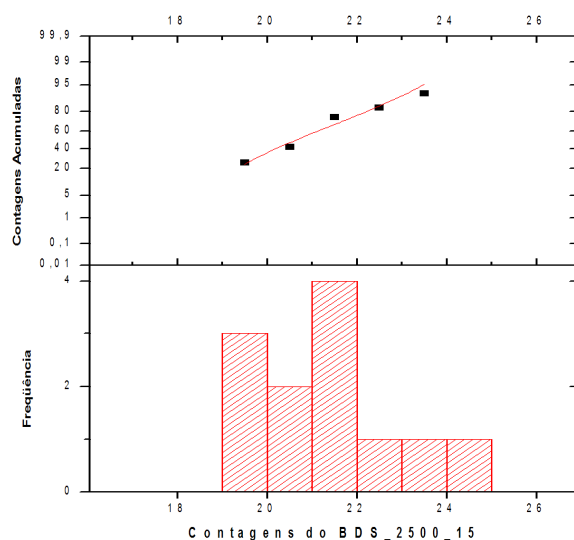


(b)

Figura 5.9: Histograma das contagens do BDS_1000_13 (a) e BDS_1000_17 (b)



(a)



(b)

Figura 5.10: Histograma das contagens do BDS_2500_14 (a) e BDS_2500_15 (b)

Um ponto que merece ser destacado é a flutuação dos valores das contagens, sobretudo nos detectores com mais de 100 bolhas, onde várias dessas contagens foram descartadas após a aplicação do critério de Chauvenet [91]. Portanto, um tratamento estatístico mais rigoroso na contagem de bolhas do BDS se justifica pelo fato de que diferentemente dos dosímetros PND, BD-100R e BDT – dispositivos onde a superestimativa de bolhas é válida para fins de proteção radiológica – os valores imprecisos da quantidade de bolhas influencia na forma do espectro, o que pode

acarretar sérias conseqüências para aqueles expostos ao campo de radiação por nêutrons.

5.2 Deconvolução Espectral

5.2.1 Espectro da Fonte de Am-Be

A partir dos resultados apresentados na Tabela 5.1, aplicou-se o procedimento descrito na subseção 3.2.4 visando a obtenção do espectro da fonte de Am-Be de referência localizada no IRD. Primeiramente, foram calculadas as respostas padronizadas, cujos valores encontram-se representados na Figura 5.11.

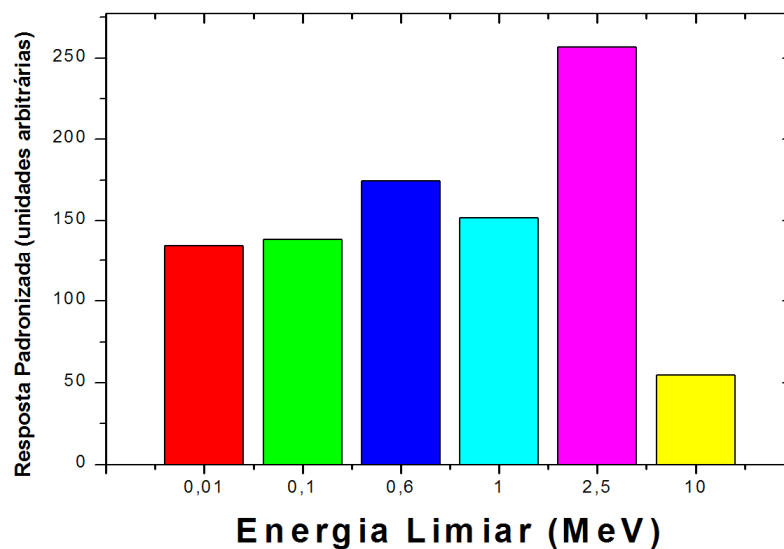


Figura 5.11: Respostas padronizadas do espectro da fonte de Am-Be

Os valores de interesse para a deconvolução do espectro da fonte de Am-Be estão listados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Dados para a deconvolução de espectro da fonte de Am-Be

E_{Limiar} (MeV)	0,01	0,1	0,6	1	2,5	10
# Bolhas	243,54	166,15	244,00	257,92	333,77	36,15
Sensibilidade (bolhas/mrem)	1,8	1,2	1,4	1,7	1,3	0,66
Resposta Padronizada (unidades arbitrárias)	135,3	138,5	174,3	151,7	256,7	54,8
Fluência (10^6 Nêutrons/cm ²)	5,06	-5,48(0)	6,74	-7,23 (0)	4,95	1,24
Incerteza da Fluência (10^6 Nêutrons/cm ²)	3,85	0	2,84	0	1,49	0,50
Taxa de Fluência por unidade de Energia (10^6 n.cm ⁻² .h ⁻¹ .MeV ⁻¹)	4,81	0	3,62	0	6,74	2,94

Após os ajustes com as informações fornecidas na subseção 4.1.3, realizou-se a deconvolução do espectro da fonte de Am-Be, que está ilustrada na Figura 5.12.

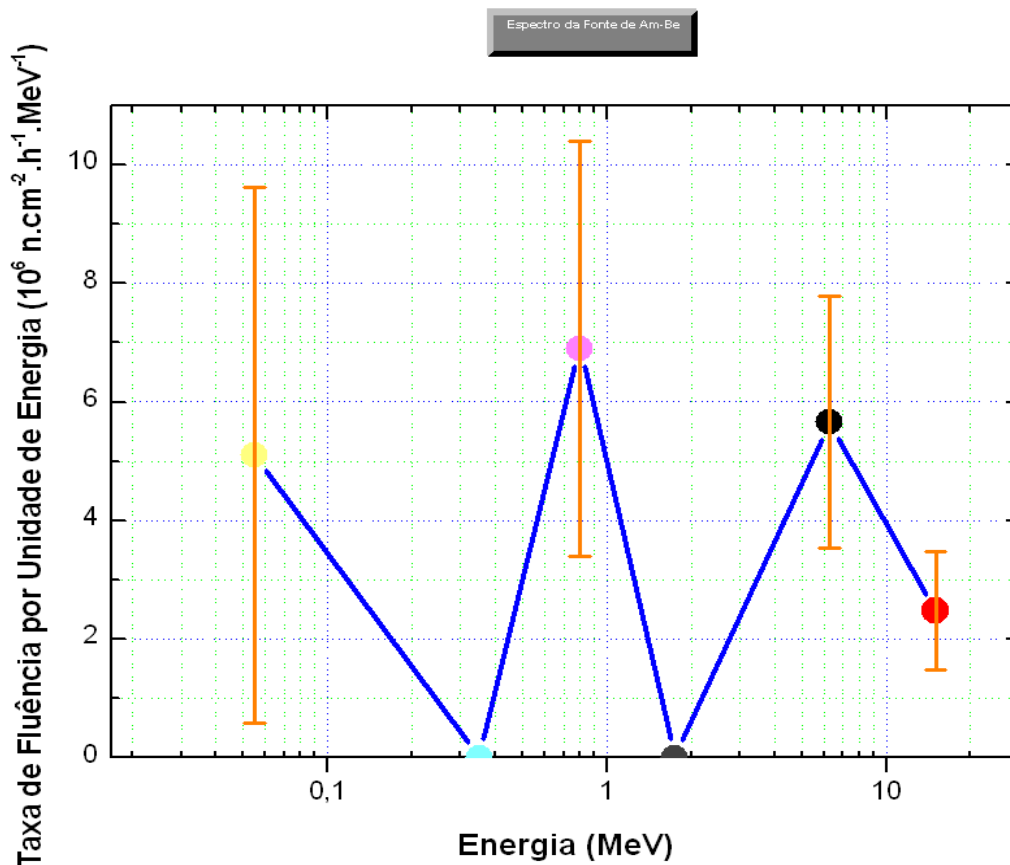


Figura 5.12: Deconvolução do espectro da fonte de Am-Be

Para o espectro ilustrado acima, tem-se os valores de fluência e taxa de fluência listados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Valores de Fluência e Taxa de Fluência totais para o espectro da fonte de Am-Be obtido com os BDS

Fluência (10^7 n.cm^{-2})	Taxa de Fluência ($10^6 \text{ n.cm}^{-2}.\text{h}^{-1}$)	Taxa de Fluência ($10^3 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
($1,80 \pm 0,87$)	($3,60 \pm 1,74$)	($1,00 \pm 0,48$)

Apesar das grandes faixas de incerteza, o espectro obtido através dos BDS está em bom acordo com aquele de referência ilustrado nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.5 e com o trabalho de Zanini e colaboradores [69], onde esses detectores de bolhas foram utilizados em conjunto com o software BUNTO, variação do BUNKI, utilizado para a deconvolução de espectros de nêutrons a partir das esferas de Bonner [51]. O espectro de uma fonte de Am-Be obtido por Zanini e colaboradores pode ser visto na Figura 5.3.

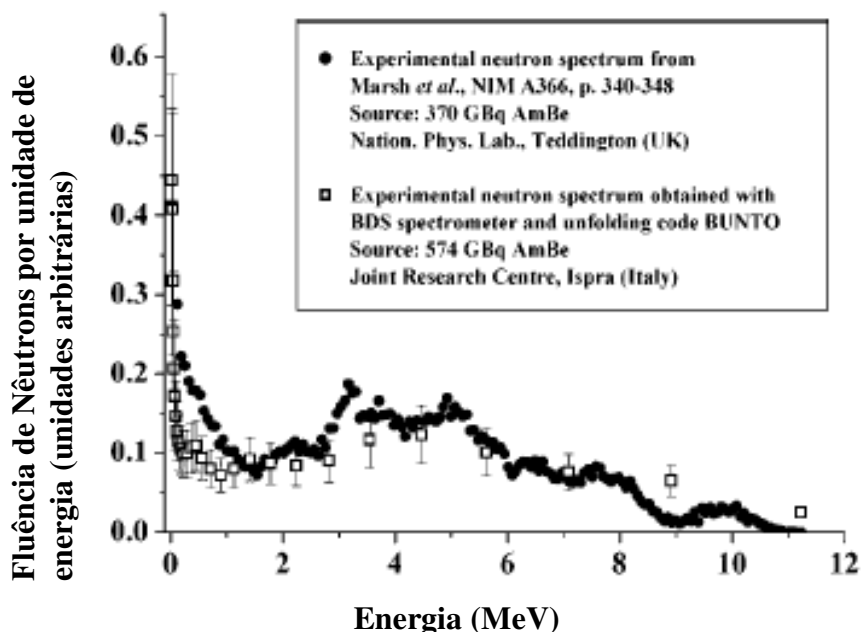


Figura 5.13: Espectro de Nêutrons de uma fonte de Am-Be obtido por Zanini e colaboradores

5.2.2 O Espectro de Nêutrons do RDS-111

De modo similar ao apresentado na subseção anterior, as respostas padronizadas dos detectores expostos ao RDS-111 foram calculadas e estão representadas no gráfico na Figura 5.14.

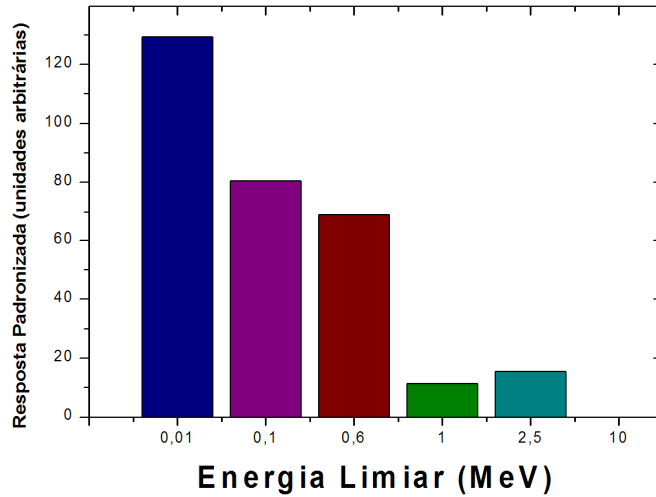


Figura 5.14: Respostas padronizadas dos detectores expostos ao RDS-111

Os valores de interesse para a deconvolução do espectro estão listados na Tabela 5.5. Foram tomados os valores médios do número das seguintes grandezas: número de bolhas, sensibilidade dos BDS e suas respostas padronizadas.

Tabela 5.5: Dados para a deconvolução do espectro do cíclotron RDS-111

E_{Limiar} (MeV)	0,01	0,1	0,6	1	2,5	10
# Bolhas	160,9	108,4	128,0	17,9	22,64	0
Sensibilidade (bolhas/mrem)	1,3	1,4	1,9	1,5	1,5	0,55
Resposta Padronizada (unidades arbitrárias)	123,8	77,4	67,4	11,9	15,1	0
Fluência (10^6 Nêutrons/cm ²)	11,8	-2,03 (0)	3,71	-0,497 (0)	0,502	0
Incerteza da Fluência (10^6 Nêutrons/cm ²)	3,3	0	0,94	0	0,201	0
Taxa de Fluência por unidade de Energia (10^4 n.cm ⁻² .h ⁻¹ .MeV ⁻¹)	23,7	0	6,82	0	1,37	0

A deconvolução do espectro está ilustrada na Figura 5.15.

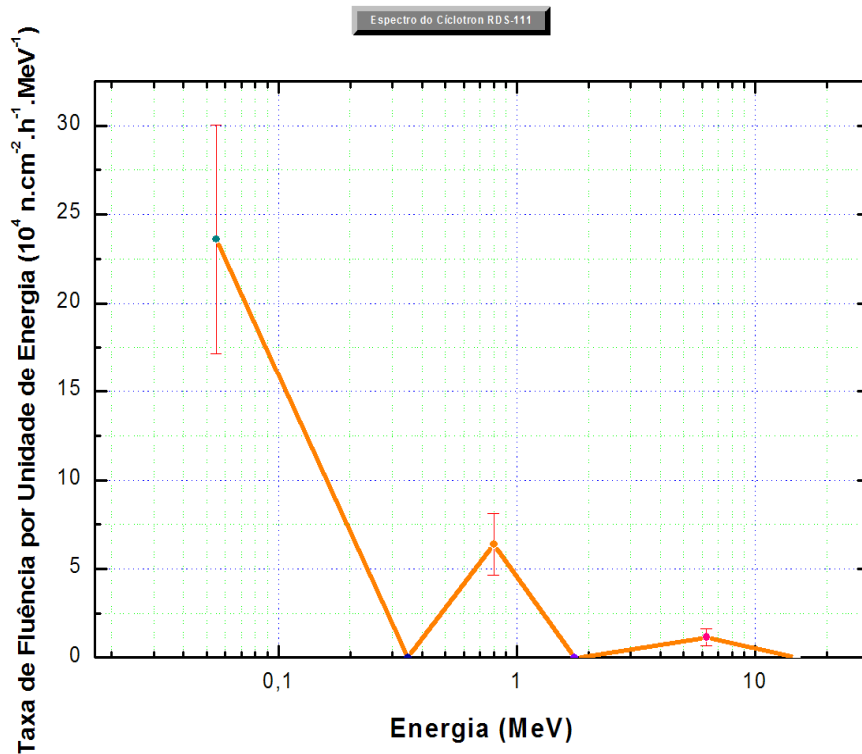


Figura 5.15: Deconvolução espectral do RDS-111

Para o espectro ilustrado acima, tem-se os valores de Fluência e Taxa de Fluência listados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Valores de Fluência e Taxa de Fluência totais para o espectro do ciclotron RDS-111 obtido com os BDS

Fluência (10^6 n.cm^{-2})	Taxa de Fluência ($10^5 \text{ n.cm}^{-2}.\text{h}^{-1}$)	Taxa de Fluência ($10^2 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
$(1,60 \pm 0,44)$	$(5,37 \pm 1,50)$	$(1,49 \pm 0,42)$

Durante essa etapa do trabalho de pesquisa, somente encontramos uma referência acerca do espectro do ciclotron RDS-111 [92]. Na Figura 5.16, há o espectro experimental parcial obtido no trabalho supracitado.

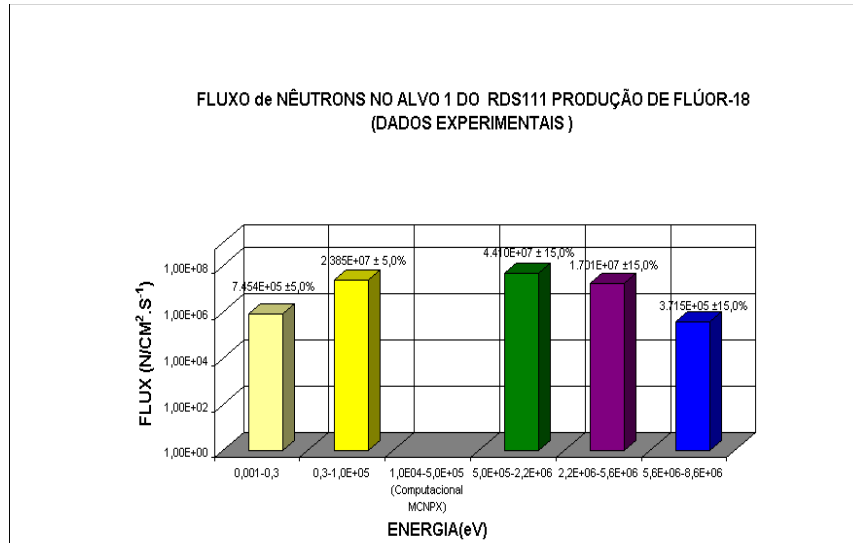


Figura 5.4: Espectro parcial de nêutrons do RDS-111 [92]

Notam-se similaridades entre os espectros nas faixas mais altas de energia. Não há ainda definição do espectro experimental do RDS-111 para energias entre 10 e 500 keV.

5.3 Ensaios com o BDS

5.3.1 Contagem Automatizada e a Comparação entre os Procedimentos

Paralelamente ao procedimento de contagem manual, as bolhas dos BDS irradiados no cíclotron RDS-111 foram contadas com auxílio de uma rotina macro em conjunto com o programa *ImagePro Plus*.

A contagem através desse software pode ser vista na Figura 5.17, com a contagem final a partir desse processo apresentada na Tabela 5.7.

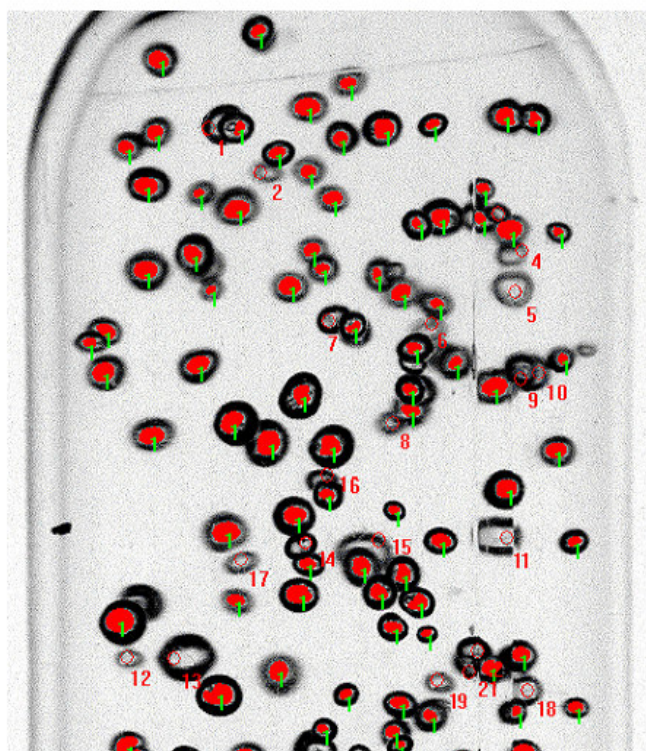


Figura 5.17: Contagem de bolhas com o uso do software ImagePro.

Tabela 5.7: Contagem automatizada das bolhas dos BDS

# Série	Identificação	N _{auto}	N _{manual}	N _{Total}	N _{maior}	Incerteza(%)
7341455	BDS_10_11	52	56	108	123	12,20
7341401	BDS_10_14	22	98	120	150	20,00
7354246	BDS_100_13	38	54	92	104	19,23
7354250	BDS_100_14	21	57	78	94	17,02
7344234	BDS_600_17	23	78	101	111	12,61
7344232	BDS_600_20	28	81	109	112	8,93
7354335	BDS_1000_13	5	4	9	9	11,11
7354324	BDS_1000_17	16	9	25	26	11,54
7354446	BDS_2500_14	15	7	22	23	8,70
7354443	BDS_2500_15	6	14	20	21	14,29
915296	BDS_10000_055	0	0	0	0	*
915300	BDS_10000_055	0	0	0	0	*

As setas na Figura 5.17 representam as bolhas que foram contadas automaticamente pela rotina macro, em que aquelas que estavam isoladas foram contadas sem maiores problemas. Contudo, a contagem das bolhas sobrepostas tornou-se bem complexa. Nesse caso, optou-se pela utilização de um observador bem treinado que visualizava as bolhas pelo monitor do computador e estas foram contadas manualmente. Por esta razão, este processo é descrito como *semi-automático*.

O processo semi-automático ainda detectou algumas bolhas que não foram visíveis para o observador, devido às limitações características de um monitor de computador. Por conta deste detalhe os fabricantes dos detectores de bolhas recomendam o uso de um televisor comum para a execução de tal tarefa.

Os resultados obtidos pelos processos de contagem semi-automático e manual podem ser dispostos em um mesmo gráfico (Figura 5.18), a fim de realizarem-se as devidas comparações.

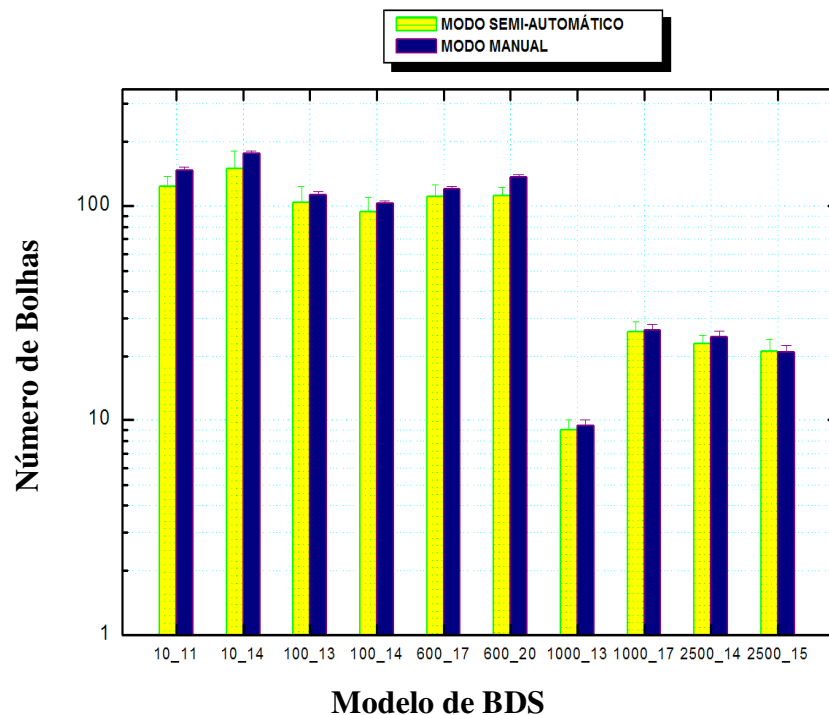


Figura 5.18: Resultado das contagens de bolhas

Apresentam-se na Figura 5.19 os resultados da contagem em cada procedimento, com as respectivas barras de erro, para melhor análise dos resultados.

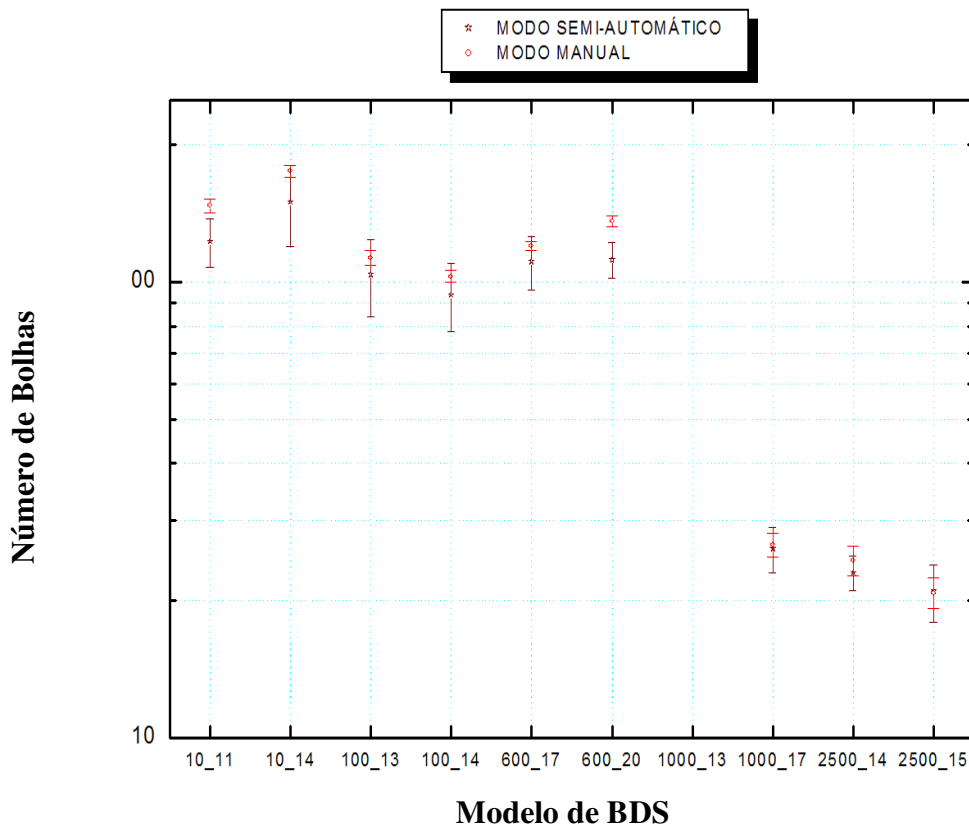


Figura 5.19: Contagem nos processos manual e semi-automático e suas barras de erro

A contagem semi-automática registrou menos bolhas do que a contagem manual, com pequena diferença em quase todos os casos. Isso ocorreu por diversas razões como, por exemplo, a limitação visual de um monitor de computador antigo, como aquele utilizado no procedimento de contagem semi-automática. Apesar de tais contratempos, a variação entre as contagens manual e semi-automática foi de 9% em média.

O processo de contagem manual, com um grande número de bolhas, apresentou uma incerteza menor do que o processo semi-automático, embora os resultados sejam bem similares para poucas bolhas. Vale mais uma vez ressaltar que o uso de uma TV comum, como a usada no procedimento de contagem manual, é recomendável para a visualização das imagens dos detectores irradiados.

De modo análogo à seção anterior, foi obtida a resposta padronizada de cada energia limiar dos BDS. De acordo com os procedimentos apresentados na subseção 3.2.4, os valores da respostas padronizadas para as contagens manuais e semi-automáticas foram calculados e os resultados apresentados na Figura 5.20.

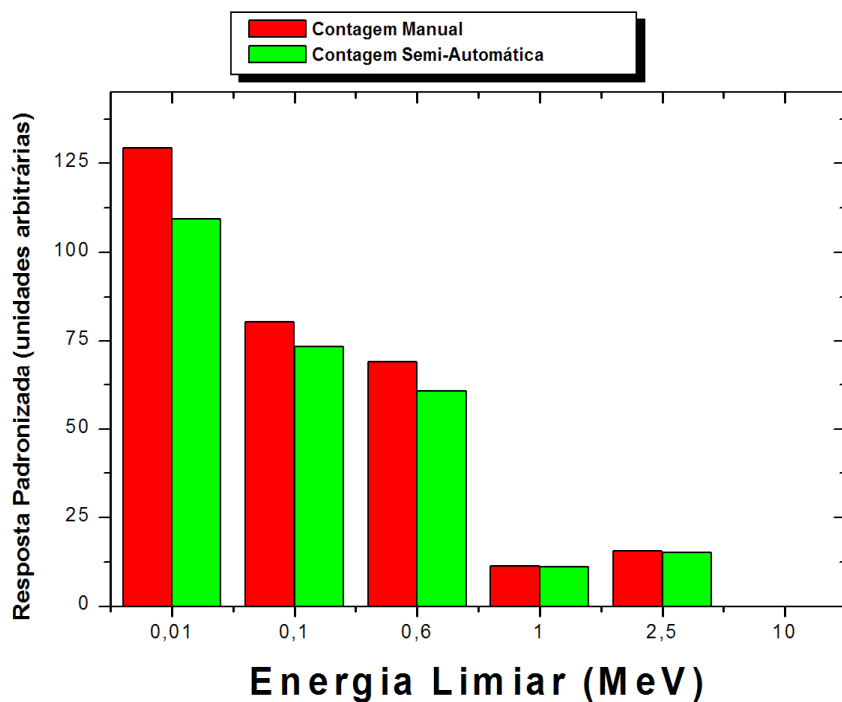


Figura 5.20: Respostas padronizadas do RDS (contagem manual e semi-automática)

Como não houve bolhas no limiar energético de 10 MeV, a resposta padronizada para essa faixa de energia é nula. Assim como na subseção 5.2.2, foram encontrados os valores de interesse para a deconvolução do espectro do RDS-111, através da contagem semi-automática das bolhas, conforme se vê na Tabela 5.6, com a deconvolução dos espectros para cada processo de contagem ilustrada na Figura 5.21.

Tabela 5.8: Dados para a deconvolução do espectro do ciclotron RDS-111 após a contagem semi-automática

E_{Limiar} (MeV)	0,01	0,1	0,6	1	2,5	10
# Bolhas	136,5	99,0	111,5	17,5	22,0	0
Sensibilidade (bolhas/mrem)	1,3	1,4	1,9	1,5	1,5	0,55
Resposta Padronizada (unidades arbitrárias)	105	70,7	58,4	11,7	14,7	0
Fluência (10^6 Nêutons/cm ²)	9,13	-1,50(0)	3,07	0,405	0,468	0
Incerteza da Fluência (10^6 Nêutons/cm ²)	2,63	0	0,801	0	0,187	0
Taxa de Fluência por unidade de Energia (10^4 n.cm ⁻¹ .h ⁻¹ .MeV ⁻¹)	15,1	0	5,45	0	1,19	0

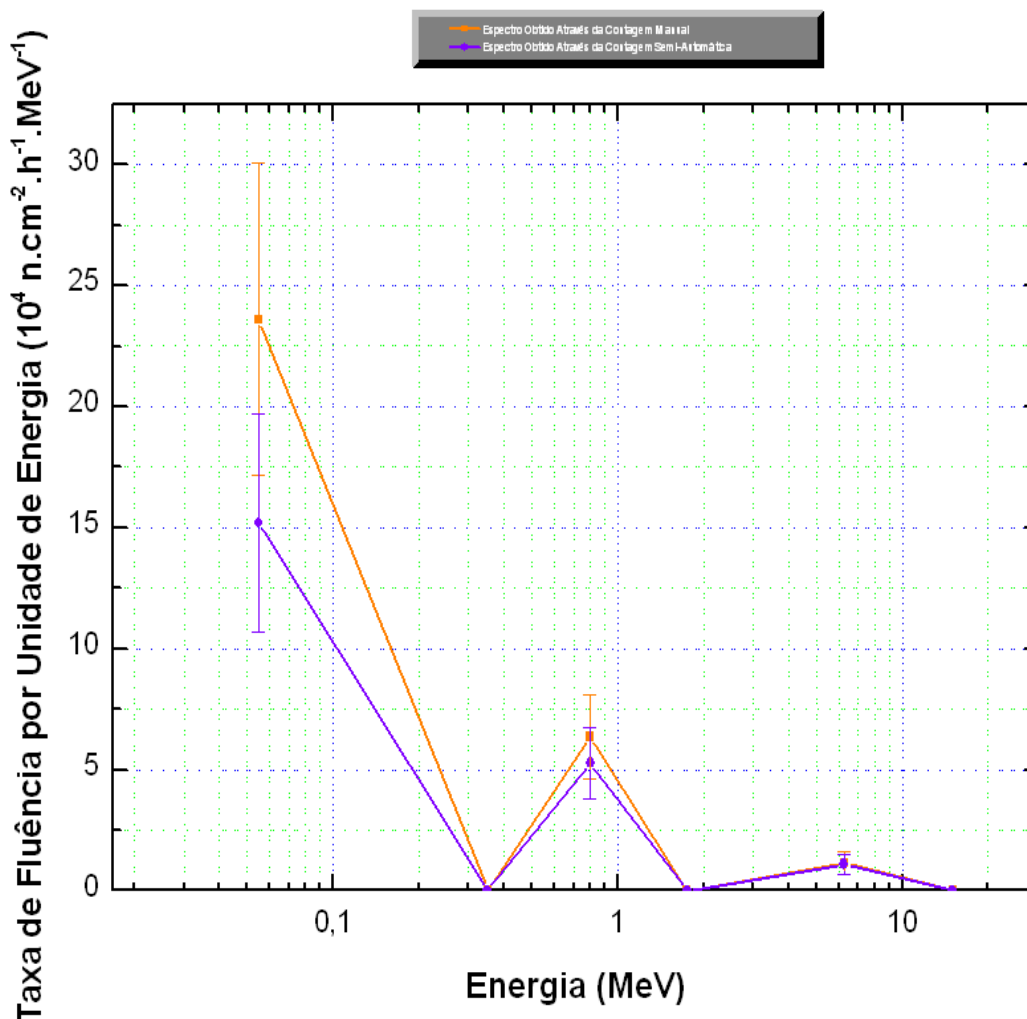


Figura 5.21: Deconvoluções do Espectro do RDS-111, obtidas através da contagem manual e da contagem semi-automática das bolhas nos BDS

Por fim, as fluências totais para cada método de contagem, assim como a variação percentual entre elas, estão descritas na Tabela 5.9.

Tabela 5.9: Comparação entre as fluências totais no processo manual e semi-automático

Metodologia de Contagem	Fluência (10^6 n.cm^{-2})	Taxa de Fluência ($10^5 \text{ n.cm}^{-2}.\text{h}^{-1}$)	Taxa de Fluência ($10^2 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
<i>MANUAL</i>	$(1,60 \pm 0,44)$	$(5,37 \pm 1,50)$	$(1,49 \pm 0,42)$
<i>SEMI-AUTOMÁTICA</i>	$(1,27 \pm 0,36)$	$(4,25 \pm 1,22)$	$(1,18 \pm 0,34)$

A variação entre as fluências e taxas de fluências obtidas com as contagens manual e semi-automática é de cerca de 20%, o que está em bom acordo com as

finalidades dos BDS, cuja principal delas é a espectrometria de nêutrons em baixa resolução.

5.3.2 Análise do uso após recompressão

Dezoito detectores previamente utilizados foram recomprimidos e irradiados no ciclotron RDS-111 no segundo semestre de 2009, nos mesmos moldes das irradiações realizadas em agosto e setembro de 2008. Destes, sete foram utilizados no experimento descrito anteriormente, incluindo o BDS_10000_055 com número de identificação 9153000, que não registrou nenhuma bolha nesse novo ensaio.

Além do mesmo procedimento de irradiação, os BDS recomprimidos passaram pelo mesmo processo de aquisição de imagens descrito na subseção 4.2.1, com as bolhas contadas manualmente do mesmo modo descrito na subseção 4.2.2. As fotos dos detectores irradiados no RDS-111, antes e depois da recompressão, estão na Figura 5.22.

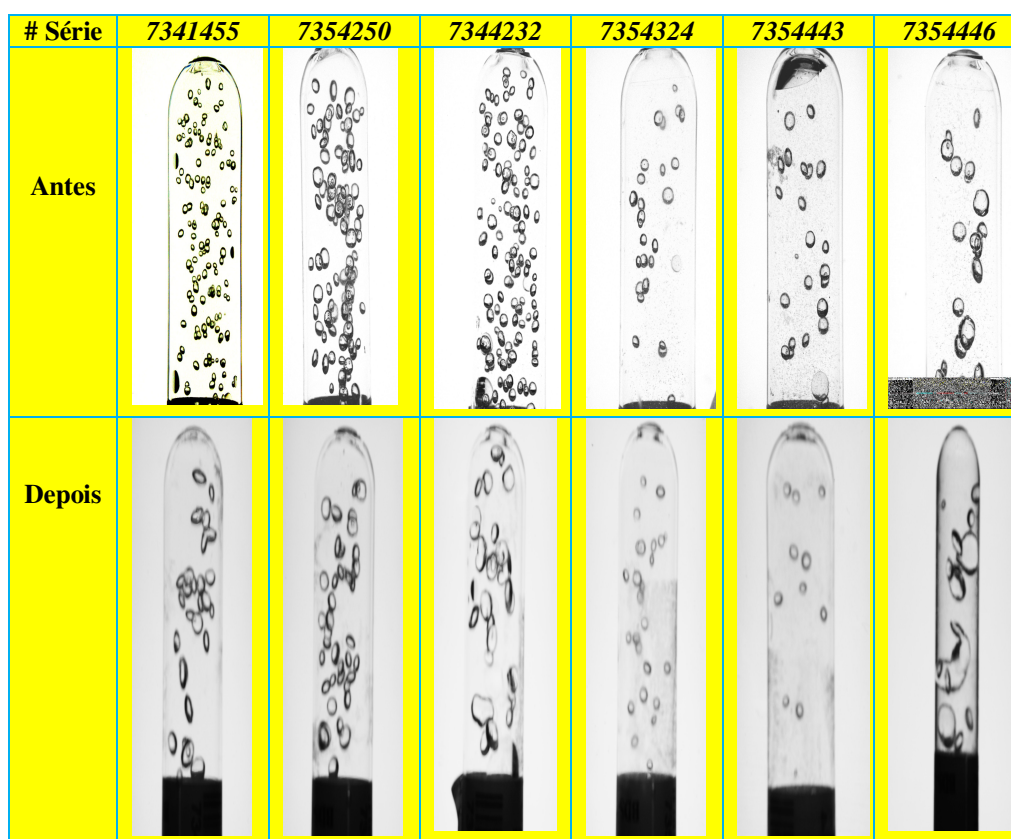


Figura 5.22: Fotos dos BDS antes e depois da Recompressão

Analisando a Figura 5.22, percebe-se claramente a diminuição da quantidade de bolhas dos BDS irradiados depois da recompressão, em relação aos irradiados antes, assim como das dimensões dessas bolhas, com exceção do BDS com número de identificação 7354324. Na Tabela 5.10 consta a contagem antes e depois da recompressão dos detectores irradiados pela segunda vez, assim como a variação entre elas.

Tabela 5.10: Comparação entre os valores de contagem dos BDS irradiados antes e depois da recompressão

# Série	7341455	7354250	7344232	7354324	7354443	7354446
Antes	147	103	136	26	21	24
Depois	26	39	29	26	12	10
Variação (%)	82	62	94	0	43	58

Os resultados acima mostram que os BDS após a recompressão possuem discrepâncias semelhantes ao BD-100R irradiados após a recompressão das bolhas [93], cujo resultado pode ser visto na Figura 5.23.

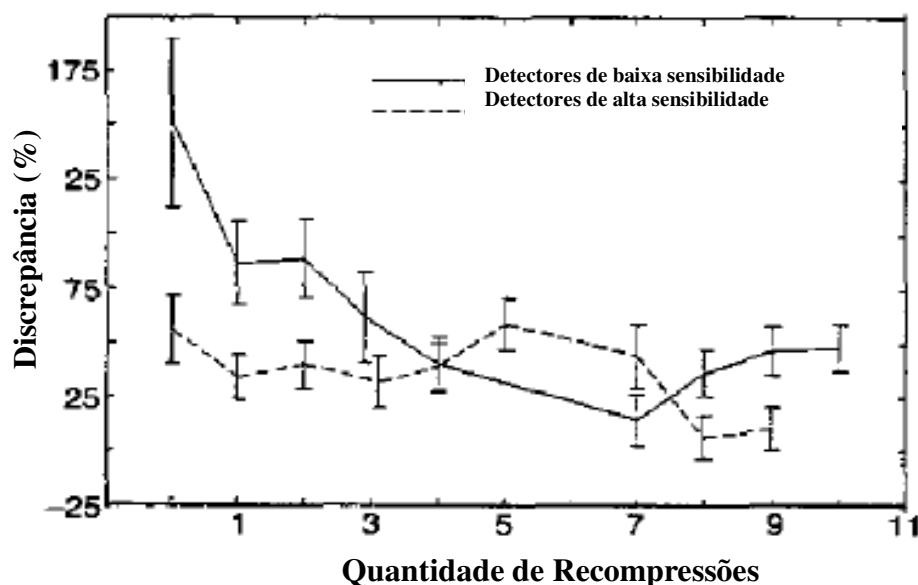


Figura 5.23: Desvanecimento da dose equivalente do BD-100R após várias recompressões

A estatística básica de contagem dos BDS irradiados após a recompressão está listada na Tabela 5.11, ao passo que os dados para a deconvolução espectral constam na Tabela 5.12.

Tabela 5.11: Estatística de contagem das bolhas dos BDS expostos no RDS-111 após recompressão no RC-18

# Série	Identificação	$N_{m\acute{e}dia}$	σ_N	S_N	$N_{m\acute{i}n}$	$N_{m\acute{a}x}$	Mediana
7341455	BDS_10_11	26,47	1,37	0,35	24	29	26
7431453	BDS_10_11	25,75	1,06	0,30	24	27	26
7341435	BDS_10_18	17,38	0,65	0,18	16	18	17
7354240	BDS_100_15	13,94	0,68	0,17	13	15	14
7354250	BDS_100_14	39,31	1,38	0,38	17	42	39
7354259	BDS_100_19	18,85	0,99	0,27	17	20	19
7344232	BDS_600_20	29,25	1,36	0,39	27	31	29
7344229	BDS_600_19	34,78	1,92	0,64	32	38	35
7344230	BDS_600_18	34,85	1,34	0,37	32	37	35
7354324	BDS_1000_17	26,10	0,99	0,31	25	28	26
7344330	BDS_1000_14	21,71	1,00	0,51	18	24	22
7354329	BDS_1000_17	13,67	0,78	0,22	12	15	14
7354443	BDS_2500_15	10,33	0,49	0,14	10	11	10
7354450	BDS_2500_14	13,67	1,61	0,47	11	16	14
7354446	BDS_2500_14	11,85	1,21	0,34	10	14	12

Tabela 5.12: Dados para a deconvolução do espectro do RDS-111, para os BDS irradiados após recompressão no RC-18

E_{Limiar} (MeV)	0,01	0,1	0,6	1	2,5	10
# Bolhas	23,20	24,03	32,96	20,49	11,95	0
Sensibilidade (bolhas/mrem)	1,3	1,6	1,9	1,6	1,4	0,55
Resposta Padronizada (unidades arbitrárias)	17,9	15,0	13,4	12,8	8,54	0
Fluência (10^6 Nêutrons/cm ²)	0,345	0,389	-0,350(0)	0,200	0,268	0
Incerteza da Fluência (10^6 Nêutrons/cm ²)	0,481	0,343	0	0,187	0,107	0
Taxa de Fluência por unidade de Energia (10^4 n.cm ⁻² .h ⁻¹ .MeV ⁻¹)	0,061	0,072	0	0,048	0,079	0

Vale uma vez mais ressaltar que os três BDS_10000 utilizados nessa irradiação não produziram bolhas, o que condiz com o comportamento esperado.

A deconvolução do espectro consta na Figura 5.24.

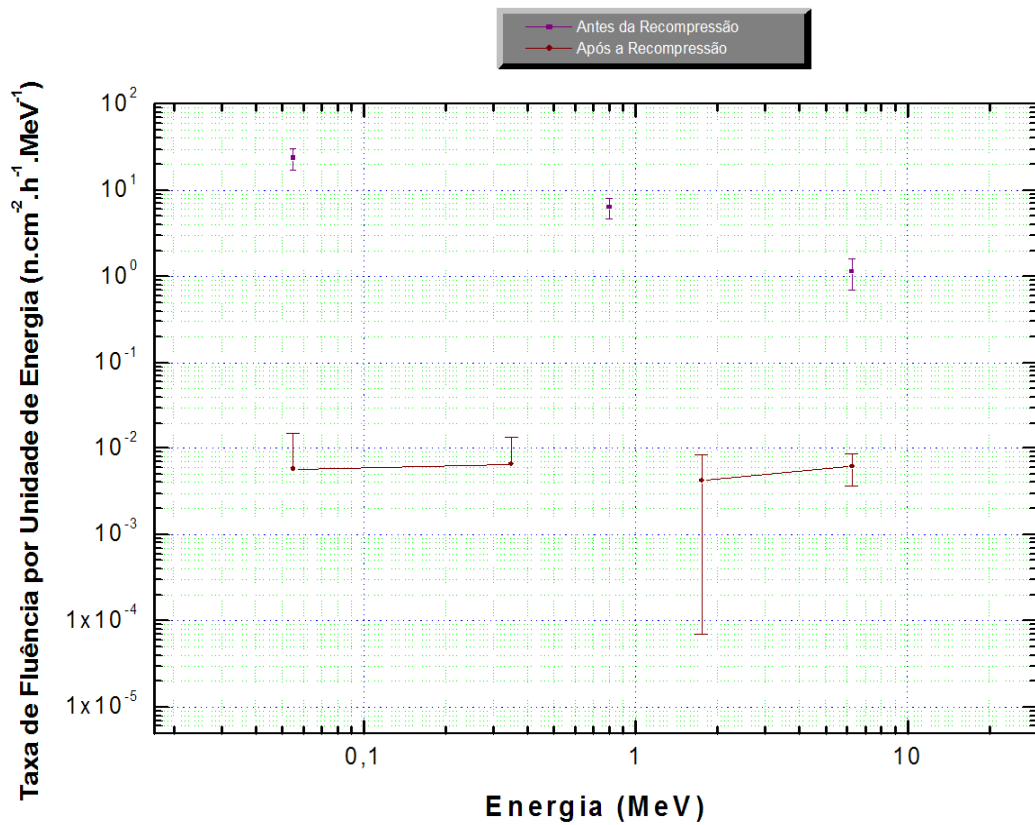


Figura 5.24: Comparação entre as taxas de fluência por unidade de energia antes e depois da recompressão dos BDS

Conforme citado anteriormente, os BDS possuem enorme dependência com a temperatura. Numa análise mais aprofundada, Buckner e colaboradores [94] verificaram que para valores de temperatura acima de 25°C, as medidas são questionáveis, ao passo que se tornam impossíveis acima de 30°C, pois as suas respostas normalizadas sofrem grandes alterações como pode ser visto na Figura 5.25.

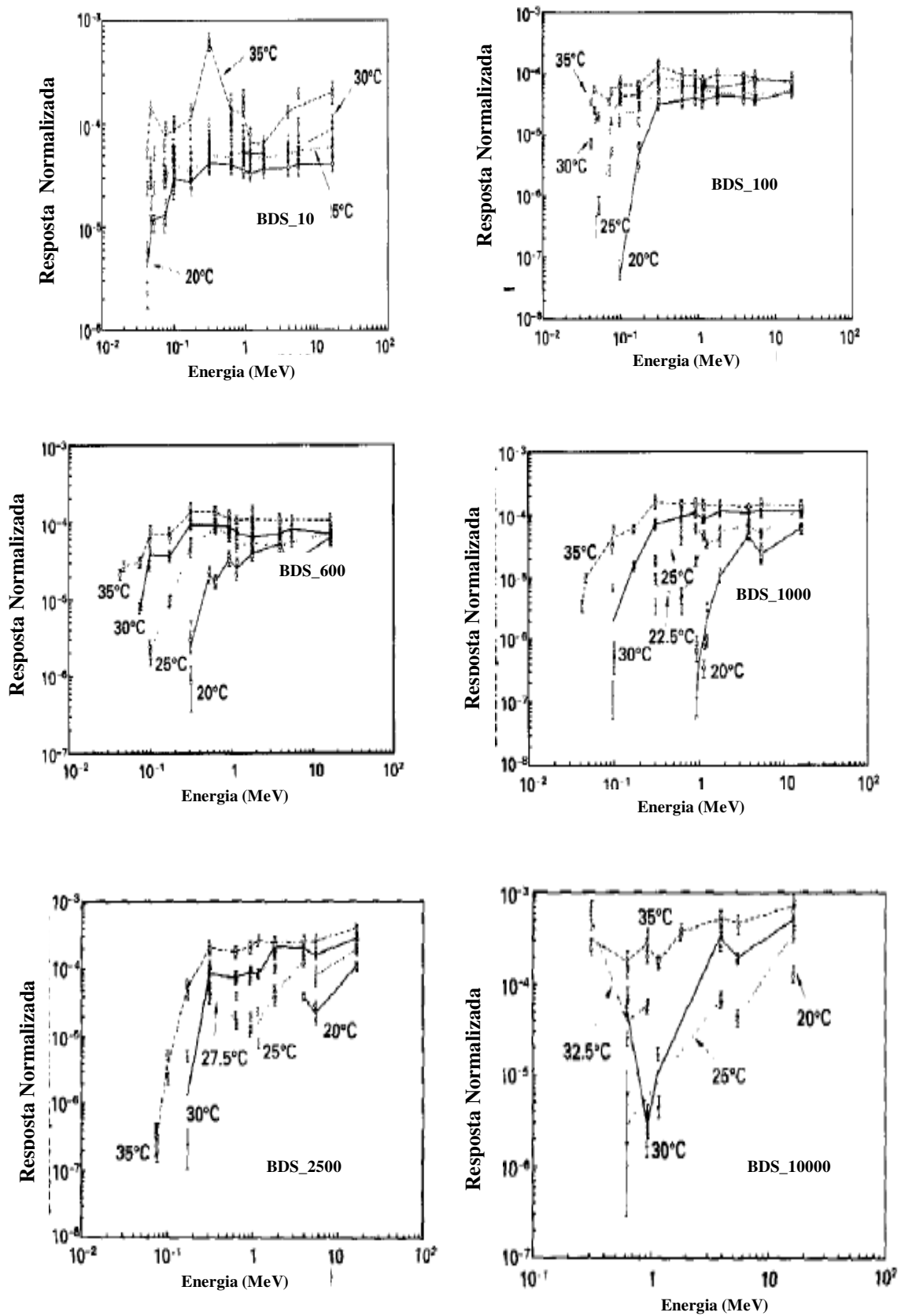


Figura 5.9: Respostas Normalizadas dos BDS em diversas temperaturas

A Tabela 5.13 mostra as respostas normalizadas dos BDS irradiados no cíclotron RDS-111

Tabela 5.13: Respostas normalizadas dos BDS irradiados no RDS-111, antes e depois da recompressão

	Resposta Normalizada ANTES da Recompressão <i>(10⁻⁵ bolhas/nêutrons.cm⁻²)</i>	Resposta Normalizada DEPOIS da Recompressão <i>(10⁻⁵ bolhas/nêutrons.cm⁻²)</i>
BDS_10	4,88	67,20
BDS_100	0	61,74
BDS_600	3,45	0
BDS_1000	0	102,5
BDS_2500	4,51	44,59
BDS_10000	0	0

Comparando os dados da Tabela 5.13 com as respostas normalizadas da Figura 5.25, nota-se que antes da recompressão os BDS tiveram as respostas esperadas, com algumas oscilações, para uma temperatura igual a 20°C. Entretanto, após a recompressão, as respostas normalizadas tiveram um comportamento que remete a temperaturas entre 30°C e 35°C. O desvanecimento das bolhas nos BDS irradiados após a recompressão afetou sobremaneira as respostas e não foi possível efetuar a deconvolução do espectro do cíclotron RDS-111 nesse caso.

A provável explicação para o fenômeno supracitado está em parte na Termodinâmica Clássica. Apesar de o ambiente estar à temperatura desejada (20° C), os BDS não necessariamente estão, devido às condições para o equilíbrio térmico dos constituintes do detector, sobretudo nas emulsões superaquecidas, que necessitam de aproximadamente 8 horas para equilibrar-se por completo com a temperatura ambiente [95].

Outro ponto que deve ser considerado é a pressão aplicada pelo RC-18 aos BDS recomprimidos. Tal grandeza física exerce grande influência no superaquecimento das emulsões nos detectores, modificando suas respostas em energia e podendo alterar seus limiares energéticos [96]. Por conta disso, é necessária uma pressão máxima de 400 psig para recomprimir as bolhas sem alterar drasticamente as propriedades do líquido superaquecido no interior dos BDS, lembrando que quanto mais tempo a bolha fica

dentro do detector, maior o desvanecimento das emulsões superaquecidas e mais difícil se torna a recompressão das bolhas [97], fato comprovado durante a fase de experimentos deste trabalho. Então, torna-se importante minimizar o tempo de permanência de qualquer bolha eventualmente presente nos detectores a fim de garantir-lhes a maior vida útil possível [98].

5.3.3 Uso como Dosímetro

Com base na irradiação dos BDS na fonte de referência de Am-Be do IRD, foi realizada uma simulação com MCNP a fim de calcular os valores de equivalente de dose ambiental para cada limiar energético da fonte supracitada. O arquivo de entrada dessa simulação consta no apêndice da presente dissertação.

Após os procedimentos descritos na subseção 3.2.4, os valores calculados das respostas padronizadas dos BDS foram comparados com os valores de equivalente de dose ambiente encontrados na simulação com MCNP da fonte de Am-Be, representados por $H^*(10)$. Os resultados obtidos constam na Tabela 5.14.

Tabela 5.14: Comparação entre as respostas padronizadas dos BDS e as doses devidas à fonte de Am-Be calculada via MCNP ($H^*(10)$)

E_{limiar} (keV)	# Bolhas	Sens. (b/ μSv)	Resp. Padr.	$H^*(10)$ (μSv)	<u>Resp. Padr.</u> $H^*(10)_{\text{limiar}}$	<u>Resp. Padr.</u> $H^*(10)_{\text{total}}$
10	242,08	0,18	1345	1,12	1200	1,70
100	116,15	0,12	1385	36,5	38	1,75
600	244,00	0,14	1743	37,0	47	2,21
1000	255,08	0,17	1517	121,9	10	1,92
2500	333,82	0,13	2567	579,5	5	3,25
10000	35,83	0,066	545	10,9	50	0,69

As respostas padronizadas para cada BDS, que segundo o fabricante possuem dimensões de equivalente de dose ambiente para cada limiar energético, são muito superiores aos valores obtidos via simulação com MCNP. A superestimativa de valores de equivalente de dose ambiente em detectores de bolhas também foi verificada por Ross e colaboradores [99] ao estudar campos de nêutrons oriundos de aceleradores clínicos de energia intermediária. Por isso, torna-se desaconselhável atribuir um caráter

dosimétrico às respostas padronizadas em cada BDS irradiado, conforme se vê na Tabela 5.15.

Tabela 5.15: Comparação entre os valores totais de equivalente de dose ambiente obtidos pelo BDS e os valores de referência (valores em μSv)

RESPOSTA PADRONIZADA	<i>9102</i>
SIMULAÇÃO MCNP	<i>790</i>
VARIAÇÃO (%)	<i>1550</i>
VALOR INFORMADO IRD	<i>947</i>
VARIAÇÃO (%)	<i>960</i>

A seguir, considerando apenas o BDS com menor energia limiar, que devido à propagação de erro por ele sofrida é possível admitir que ele receba nêutrons de todas as faixas de energia, efetuou-se uma comparação com os mesmos valores de dose total de referência. Os resultados constam na Tabela 5.16.

Tabela 5.16: Comparação entre a resposta padronizada do BDS_10 e os valores de equivalente de dose ambiente de referência

RESPOSTA PADRONIZADA	<i>1345</i>
SIMULAÇÃO MCNP	<i>790</i>
VARIAÇÃO (%)	<i>70</i>
VALOR INFORMADO IRD	<i>947</i>
VARIAÇÃO (%)	<i>42</i>

A partir da deconvolução dos espectros da fonte de Am-Be (Figura 5.10) e do cíclotron RDS-111 (Figura 5.12), percebe-se claramente uma grande incerteza no limiar energético mais baixo, o que permite atribuir para as respostas padronizadas dos BDS uma incerteza entre 25 e 75 por cento. Na Figura 5.26, encontra-se uma análise comparativa mais aprofundada entre a resposta padronizada do BDS_10, os valores de dose de referência e suas respectivas barras de erro.

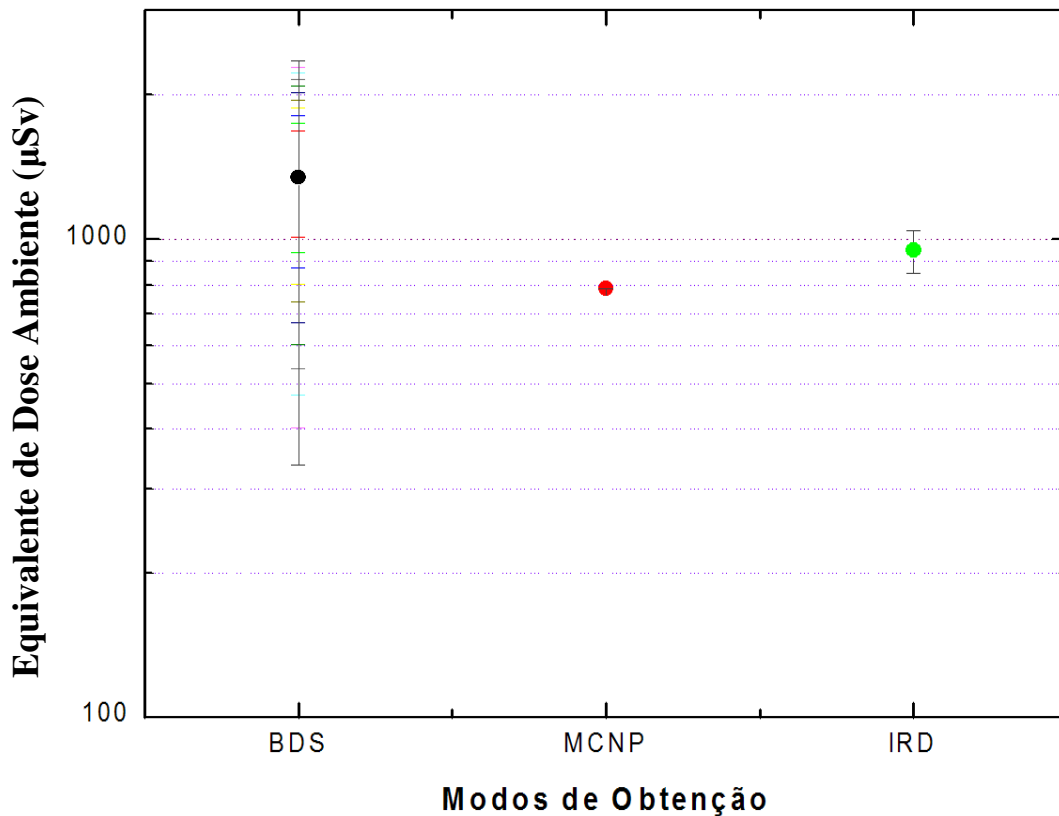


Figura 5.26: Comparação entre a resposta padronizada do BDS_10, os valores de equivalente de dose ambiente de referência e suas respectivas barras de erro.

Verifica-se a partir do gráfico acima que os valores são bem mais convergentes do que para a soma das respostas padronizadas, com o BDS superestimando o valor de dose. Logo, o BDS_10 pode ser usado como um dosímetro para medidas de equivalente de dose ambiente, desde que observado fatores limitantes como a superestimativa e a fonte de nêutrons a ser medida.

A questão da fonte tornou-se relevante por conta das características da fonte de Am-Be utilizada nesta fase do experimento, pois para energias abaixo de 2 MeV a forma do

espectro de uma fonte de Am-Be depende da atividade da fonte, de seu tamanho, do tamanho dos grãos de amerício e berílio, do nível de umidade e pressão no interior do encapsulamento, dentre outros fatores [100].

A Figura 5.27 ilustra espectros de fontes de Am-Be com atividades diferentes.

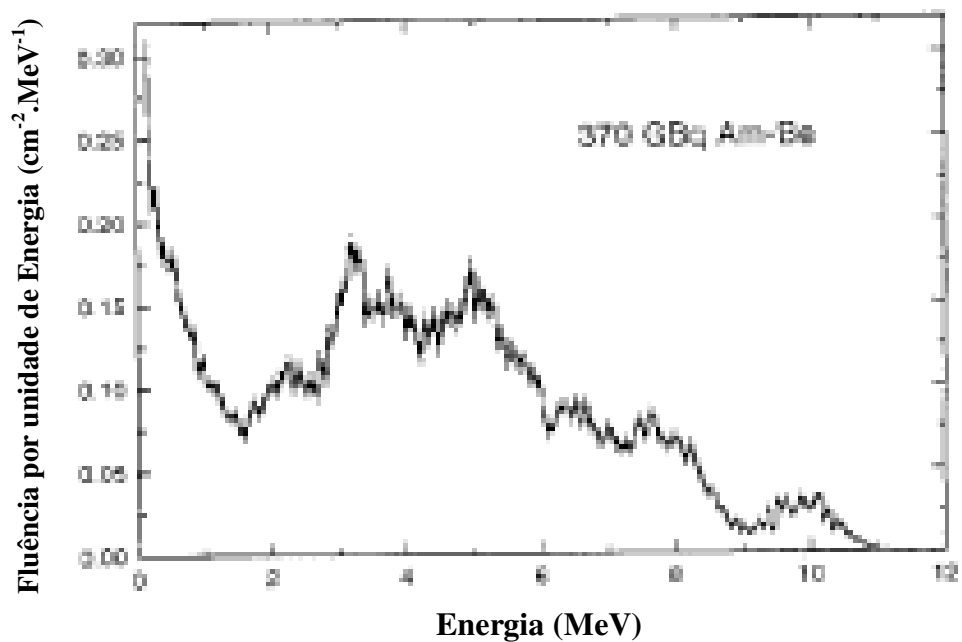
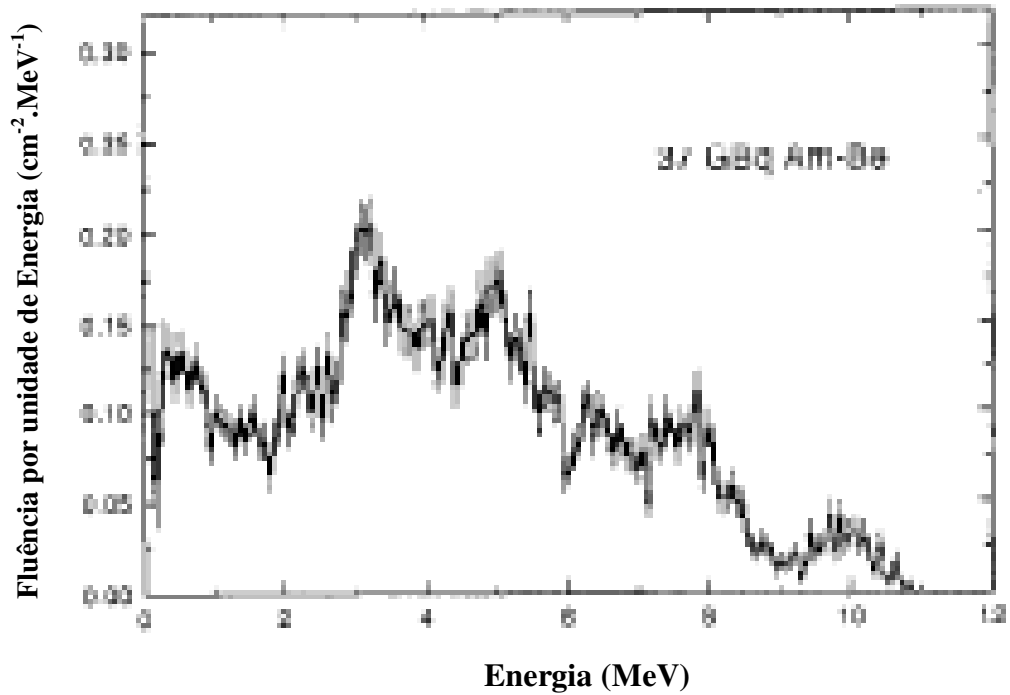


Figura 5.27: Espectro de Nêutrons de fontes de Am-Be com atividades distintas

Após analisar as condições acima descritas, é possível atribuir uma incerteza de 50% ao equivalente de dose ambiente medida com o BDS_10. Logo, é possível atribuir medidas de dose e taxas de dose tanto para a fonte de Am-Be quanto para o cíclotron RDS-111, conforme se vê na Tabela 5.17.

Tabela 5.17: Medidas de Dose e Taxas de Dose nos campos de nêutrons de interesse realizadas com o BDS_10

Fonte de Nêutrons	<i>Am-Be</i>	<i>RDS-111</i>
Dose (μSv)	<i>1345\pm673</i>	<i>1328\pm664</i>
Taxa de Dose Ambiente ($\mu\text{Sv/h}$)	<i>2690\pm1346</i>	<i>443\pm221</i>
Taxa de Dose Ambiente ($\mu\text{Sv/s}$)	<i>0,75\pm0,37</i>	<i>0,12\pm0,06</i>

Capítulo 6

Considerações Finais

6.1 Aspectos Gerais do Trabalho

Este trabalho tratou do estudo dos detectores de bolhas, tanto em nível teórico, a fim de estabelecer seu estado de arte, quanto em nível experimental, para avaliar os potenciais e limitações do BDS (Espectrômetro Detector de Bolhas).

Os estudos exploratórios foram bem sucedidos. Vale ressaltar, contudo, a necessidade de um capítulo específico sobre a teoria por trás do funcionamento dos detectores de bolhas, por conta da ausência de matéria sobre o assunto em língua portuguesa e, principalmente, a fim de compreender melhor os resultados obtidos após os procedimentos experimentais.

A dificuldade inerente à contagem manual das bolhas, sobretudo quando estas estão em grande quantidade, faz com que a pesquisa por métodos automatizados seja um dos mais importantes campos de pesquisa no que diz respeito a detectores de bolhas passivos. O procedimento semi-automático apresentado neste trabalho mostrou-se uma boa alternativa em nível prático e econômico, apesar da necessidade de ajustes para uma melhor contagem de bolhas em grande quantidade.

A fonte de Am-Be utilizada neste trabalho possui características que influenciam sobremaneira suas medidas experimentais e dosimétricas nos menores limiares energéticos. Tal fato contribuiu para as altas incertezas na deconvolução espectral utilizando o BDS, em especial na comparação com os resultados obtidos via MCNP para o cálculo de doses nos respectivos limiares energéticos.

6.2 Potencial e Limitação dos BDS

A dosimetria de nêutrons é sem dúvida um dos assuntos mais complicados no estudo e na pesquisa em radiações. Diferentemente de outros monitores de nêutrons, os detectores de bolhas são ferramentas muito úteis na proteção radiológica, pois possibilitam a detecção imediata de campos de nêutrons, permitindo uma rápida ação a fim de evitar doses de nêutrons indesejadas para todos aqueles sujeitos à exposição.

Os resultados experimentais do trabalho mostraram o grande potencial do detector de bolhas. Entretanto, foram verificadas diversas limitações para o uso dos BDS, sendo a principal e base de todas as outras a questão do seu uso a uma temperatura de 20°C. Tal temperatura deve ser submetida não somente ao local de irradiação, mas também no interior dos detectores, o que não foi possível de acordo com as propriedades físicas dos detectores de bolhas anteriormente citadas. Esse fato praticamente acarreta o descarte dos BDS após a primeira utilização.

Não foi possível neste trabalho efetuar uma calibração de acordo com os padrões nacionais dos BDS devido às características das fontes de Am-Be, além dos problemas supracitados relacionados à temperatura e à recompressão de tais detectores. O uso dos BDS-10 como dosímetros deve levar em conta a alta incerteza e a superestimativa de dose, que apesar de grande valia para fins de proteção radiológica, não deve ser considerado o único método de dosimetria de nêutrons em ambientes sujeitos a esse tipo de radiação.

Um ponto que merece destaque é a quantidade bastante reduzida de artigos na literatura sobre o BDS em particular, sendo que praticamente todas fazem parte das referências bibliográficas desse trabalho. Além disso, ao contrário dos PND e BDT, ele não faz parte dos dispositivos que passaram por rigorosos testes a fim de constarem como monitores de nêutrons oficiais nos dias de hoje.

Logo, os BDS devem ser usados apenas como um primeiro estágio para verificar a presença e posterior medida de radioproteção que deve ser adotada, realizando sempre outras medidas de doses de nêutrons para uma dosimetria mais acurada.

6.3 Sugestões de Trabalhos Futuros

Apesar das limitações, ainda há muito que se fazer na pesquisa acerca do detector de bolhas. Dentre as propostas para trabalhos futuros, pode-se destacar:

- ✓ A criação de um processo de calibração e análise da reprodutibilidade e rastreabilidade dos detectores de bolhas, em especial o BDS.
- ✓ Redução de custos econômicos e computacionais de várias etapas do projeto que culminou no presente trabalho, através do uso do ImageJ para a contagem automatizada das bolhas e no uso de software livre para o tratamento das imagens obtidas.
- ✓ Desenvolvimento de um processo automatizado de deconvolução de espectros, através de um programa computacional simplificado a fim de executar os cálculos básicos e um uso mais ostensivo do software MATLAB para a deconvolução propriamente dita. Também há de se considerar a aquisição do software BUNTO para realização de tal tarefa.
- ✓ Até o momento não há simulação MCNP disponível para a emissão de nêutrons pelo RDS-111, o que reforça ainda mais a importância das medições que podem ser realizadas com o detector de bolhas. Portanto, outra proposta que se pode lançar para o futuro é a comparação dos resultados aqui obtidos para o ciclotron RDS-111 com outros que venham a ser posteriormente obtidos.
- ✓ Comparação do espectro da fonte de Am-Be obtido neste trabalho com simulações com MCNP levando em conta as peculiaridades de tal fonte de nêutrons apresentada na presente dissertação, sobretudo para limiares de energia abaixo de 2 MeV.
- ✓ Medidas de outras fontes de referência, realizadas de forma simultânea com outros detectores de nêutrons, como TLDs e folhas de ativação.

Apêndice

A.1 Noções Básicas de Estatística de Contagem para Radiação

O decaimento radioativo é um processo aleatório. Portanto, qualquer medição baseada em observações de radiação, qualquer que seja, emitida está sujeita a flutuações estatísticas.

Existem várias aplicações da estatística em contagens de radiação. Nesta primeira experiência, realizamos N medições de radiação emitida (que chamamos de x_i) e utilizamos as seguintes caracterizações de dados:

a) *Média das contagens:*
$$\bar{x}_N = \sum_{i=1}^N x_i$$

b) *Desvio padrão:*
$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_N)^2}$$

c) *Desvio da média:*
$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{N}}$$

Sob certas condições, é possível prever uma função de distribuição estatística para certas medidas sujeitas a grandes repetições. Definimos como medida aqui a contagem da probabilidade de “sucessos” (denotados por “p”) em uma série de “tentativas” (denotados por 1-p). Estes são os chamados modelos estatísticos e trabalharemos aqui com 3 deles:

a) *Distribuição Binomial:* É o modelo mais geral e largamente aplicável em casos de p constante. Não é o método ideal para analisar decaimento radioativo. É expresso da seguinte forma:

<u>Definição</u>	<u>Média</u>	<u>Desvio Padrão</u>
$P(x) = \frac{n!}{r!(n-x)!} p^x (1-p)^{n-x}$	$\mu = np$	$\sigma = Np(1-p)$

b) Distribuição Normal (ou de Gauss): Outro importante modelo de distribuição, que é útil para uma taxa de sucessos relativamente grande e podendo ser usada para acumulação de umas poucas medidas realizadas. É a distribuição mais usual na análise estatística. Seus valores característicos são:

<u>Definição</u>	<u>Média</u>	<u>Desvio Padrão</u>
$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \bar{x}}} \exp\left(-\frac{\left(x - \bar{x}\right)^2}{2\bar{x}}\right)$	μ	$\sigma = \sqrt{\mu}$

c) Distribuição de Poisson: Simplificação matemática do modelo binomial, com a condição de que p seja pequeno e constante. Em outras palavras, para decaimentos radioativos, o tempo de observação deve ser muito menor do que a meia-vida do radioisótopo. Eis os seus valores característicos:

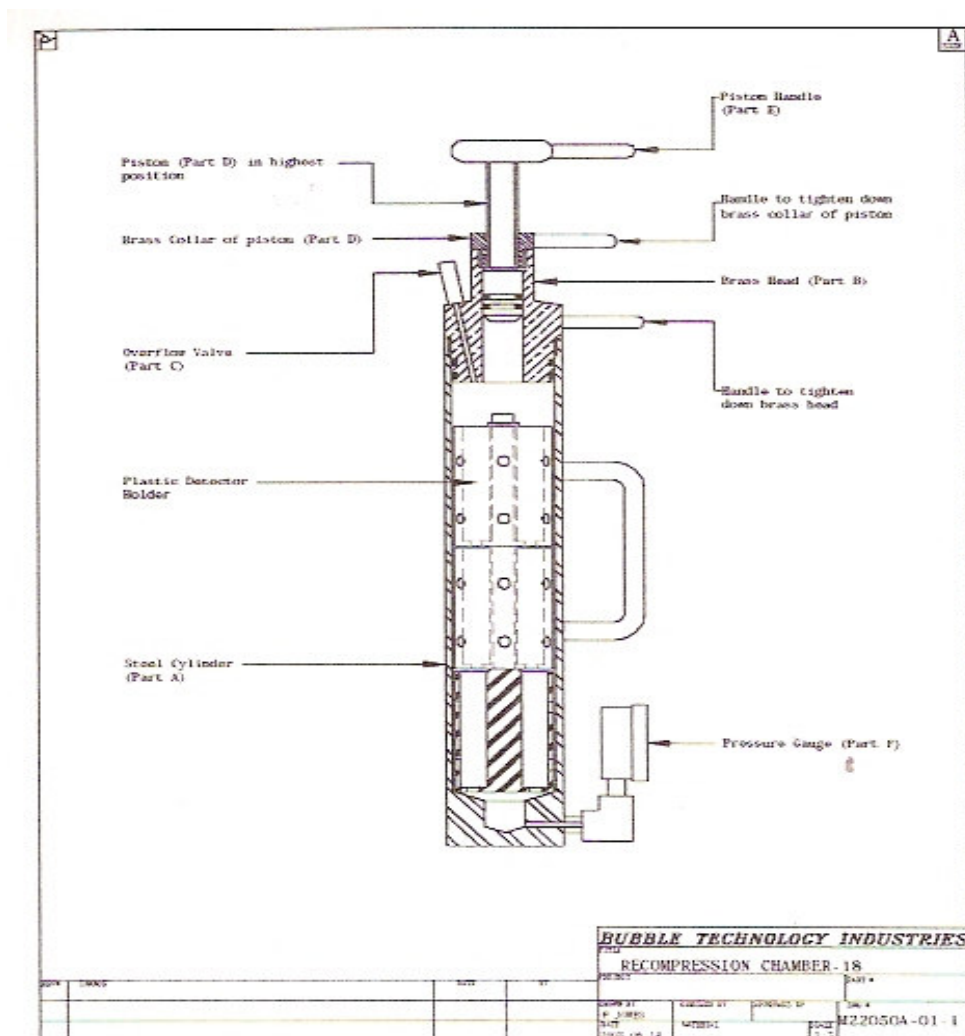
<u>Definição</u>	<u>Média</u>	<u>Desvio Padrão</u>
$P(x) = \frac{\left(\frac{-}{x}\right)^x e^{-x}}{x!}$	$\mu = pn$	$\sigma = \sqrt{x}$

Os resultados obtidos por meio de amostras nem sempre concordam com os valores teóricos esperados, de acordo com a regra da probabilidade. Deseja-se freqüentemente saber se as freqüências observadas diferem de modo significativo das

esperadas. Para esse fim, usa-se a estatística χ^2 (qui quadrado) que visa medir a discrepância existente entre as frequências observadas e esperadas. Essa medida é definida como:

$$\chi^2 = \frac{(N - 1) \times S^2}{\bar{x}}$$

A.2 Procedimento de Recompressão dos BDS com o RC-18



1. Encha os detectores com água da torneira¹³ até a boca (isso irá assegurar que não haverá ar no seu interior).
2. Coloque os detectores no recipiente de plástico (cada um comporta 18 detectores).
3. Insira o recipiente com os detectores no cilindro de aço (parte A).
4. Encha o cilindro de aço (parte A) com água da torneira (20 °C).
5. Insira a cabeça do instrumento (parte B) sem o pistão (parte D) no cilindro de aço (parte A) e aperte para baixo.
6. Com a válvula de escape (parte C) completamente aberta, encha o equipamento (partes A e B) com água da torneira.
7. Com o pistão (parte D) na posição mais alta, insira junta do pistão no topo do instrumento (parte B). Isso fará a água deslocar-se através da válvula de escape (parte C). Aperte com o dedo a válvula de escape.
8. Pressione o instrumento na junta do pistão.
9. Termine de apertar a válvula de escape com uma chave inglesa.
10. Gire o pistão (parte D) no sentido horário com a manivela (parte E) até que se atinja uma pressão de 400 psi (veja o calibre de pressão na parte F).

OBSERVAÇÃO: Se a pressão desejada não for possível de ser obtida, pode haver algum vazamento no sistema. Diminua a pressão girando a manivela do contador do pistão no sentido horário, até que seja lido no mostrador 0 psi. Abra a válvula de escape e remova o pistão. Adicione mais água e repita o procedimento, a partir do passo 6.

11. Deixe o equipamento nessas condições durante 10 minutos para assegurar uma reinicialização apropriada aos detectores.
12. Diminua a pressão girando a manivela do contador do pistão, até que a que seja lido no mostrador 0 psi. Abra a válvula de escape e remova o pistão (parte D). Remova o instrumento (parte B) e extraia o recipiente com os detectores.
13. Se os detectores não estiverem completamente sem bolhas, repita o procedimento com uma pressão maior (não maior que 1000 psi) e/ou durante um período de tempo maior.

Observação: Não deixe o equipamento em contato direto com o sol, ou a pressão aumentará devido ao calor incidente.

¹³ Atualmente os fabricantes recomendam o uso de água destilada durante esse procedimento.

A.3 Input da Simulação com MCNP da Fonte de Am-Be

```
c *****
C * Programa para calcular o Fluxo de nêutrons da Fonte *
C *   de Am241/Be (alfa,n) 185GBq  MCNP   *
C
c
C Detector
c mat densid
400 1 -0.001205 -10 IMP:N=1 $polipropileno ZnS(Ag)
C
200 0 10 IMP:N=0 $vacuo
C
c

C *****
C ***** Definicao de Superfícies *****
C *****
C
10 SO 100
c
c

c *****
C ***** Bloco de Dados *****
C *****
C
C *****
C ***** Definição da Fonte *****
C *****
C
C Tipo de partícula a simular Nêutrons e fótons
C
MODE N
SDEF RAD=D1 EXT=D2 AXS= 0 0 1 ERG=D4
C
C
C *** Espectro de Energia da Fonte de Am/Be *****
c *****
c *** Espectro da iso8529-1:2001 AmBe(alfa,n) *****
C
SI1 0 1.26
SI2 -2.525 2.525
c
SI4 h 4.14E-07 .11 .33 .54 .75 .97 1.18 1.40 1.61 1.82 2.04 2.25
    2.47 2.68 2.90 3.11 3.32 3.54 3.75 3.97 4.18 4.39 4.61
    4.82 5.04 5.25 5.47 5.68 5.89 6.11 6.32 6.54 6.75 6.96
    7.18 7.39 7.61 7.82 8.03 8.25 8.46 8.68 8.89 9.11 9.32
```

```

9.53 9.75 9.96 10.18 10.39 10.60 10.82 11.03
SP4 d 0.0 1.44E-02 3.34E-02 3.13E-02 2.81E-02 2.50E-02
2.14E-02 1.98E-02 1.75E-02 1.92E-02 2.23E-02 2.15E-02
2.25E-02 2.28E-02 2.95E-02 3.56E-02 3.69E-02 3.46E-02
3.07E-02 3.00E-02 2.69E-02 2.86E-02 3.18E-02 3.07E-02
3.33E-02 3.04E-02 2.74E-02 2.33E-02 2.06E-02 1.82E-02
1.77E-02 2.04E-02 1.83E-02 1.63E-02 1.68E-02 1.680E-02
1.88E-02 1.84E-02 1.69E-02 1.44E-02 9.68E-03 6.52E-03
4.26E-03 3.67E-03 3.81E-03 5.06E-03 6.25E-03 5.52E-03
4.68E-03 3.70E-03 2.78E-03 1.51E-03 3.63E-04
C *****
C ***** Definição de Materiais *****
C *****
C ***** Ar *****
C
M1 7014 -0.755 $Nitrogênio-14
8016 -0.232 $Oxigênio-16
18000 -0.013 $Argônio-40
C
c
F5:N 0 50 0 0 0 -50 0 0
DE5 LIN 1.0E-09 1.0E-08 2.53E-08 1.0E-7 2.0E-7 5.0E-07 1.0E-06 2.0E-06
5.0E-06 1.0E-05 2.0E-05 5.0E-05 1.0E-04 2.0E-04 5.0E-04 1.0E-03
2.0E-03 5.0E-03 1.0E-02 2.0E-02 3.0E-02 5.0E-02 7.0E-02 1.0E-01
1.5E-01 2.0E-01 3.0E-01 5.0E-01 7.0E-01 9.0E-01 1.0 1.2 2.0 3.0
4.0 5.0 6.0 7.0 8.0 9.0 10 12 14 15 16 18 20
DF5 LIN 6.60 9.0 10.6 12.9 13.5 13.6 13.3 12.9 12 11.3 10.6 9.9 9.4
8.9 8.3 7.9 7.7 8 10.5 16.6 23.7 41.1 60 88 132 170 233 322 375
400 416 425 420 412 408 405 400 405 409 420 440 480 520 540 555
570 600
E5 1E-09 1E-2 0.1 0.6 1 2.5 10 20
c
FM5 0.0628704 $ H(10) SAI EM Sv !
C
C MPlot FREQ 10000 NONORM NOERRBAR LINLOG
c
C
NPS 900000

```

Referências Bibliográficas

- [1] MARTINS, M. M. “**Desenvolvimento e Caracterização de um Sistema de Monitoração Individual de Nêutrons Tipo Albedo de Duas Componentes Usando Detectores Termoluminescentes**”. *Tese de Doutorado*. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. Brasil. (2008)
- [2] CARDIS, E.; RICHARDSON, D.. “**Health Effects of Radiation Exposure at Uranium Processing Facilities**”. *Journal of Radiological Protection*, n. 20, pp. 95-97 (2000)
- [3] MUIRHEAD, C. R.; GOODILL, A. A.; HAYLOCK, R. G. E.; VOKES, J.; LITTLE, M. P.; JACKSON, D. A.; O'HAGAN, J. A.; THOMAS, J. M.; KENDALL, G. M.; SILK, T. J.; BINGHAM, D.; BERRIDGE, G. L. C. “**Occupational Radiation Exposure and Mortality: second analysis of the National Registry for Radiation Workers**”. *Journal of Radiation Protection*, v. 19, n. 1-3, pp. 3-26 (1999)
- [4] CORREA, S. C. A. “**Otimização da Dose e da Imagem Radiográfica Digital de Tórax Usando Modelagem Computacional**”. *Tese de Doutorado*. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. Brasil. (2009)
- [5] FACURE, A. N. S. S., “**Doses Ocupacionais Devido a Nêutrons em Salas de Aceleradores Lineares de Uso Médico**”. *Tese de Doutorado*. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, (2006)
- [6] TAHUATA, L.; SALATI, I.; PRINZIO, R. Di; PRINZIO, A. R. Di. “**Radiação e Dosimetria: Fundamentos**”. 5ª Revisão. IRD/CNEN, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. (2003)
- [7] XAVIER, A. M.; MORO, J. T.; HEILBRON, P. F.. “**Princípios Básicos de Proteção Radiológica**”. 3ª ed. rev. UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. (2006)
- [8] MARTIN, J. E. “**Physics for Radiation Protection – a handbook**”. 2nd ed. Wiley VCH, Weinheim, Germany (2006)
- [9] ALEINIKOV, V. E.; BAMBLEVSKI, V. P.; KOMOCHKOV, M. M.; KRYLOV, Y.; MOKROV, V.; TIIMOSHENKO, G. N.. “**Reference Neutron Fields for Metrology of Radiation Monitoring**”. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 54, n. 1, pp. 57-59 (1994)
- [10] BRENNER, D. J.; HALL, E. J.. “**Computed Tomography – An Increasing Source of Radiation Exposure**”. *The New England Journal of Medicine*, v. 357, n. 22, pp. 2277-2284 (2007)
- [11] WAGNER, S. R.. “**Quantities for Neutron and Units for Neutron Dosimetry in Radiation Protection**”. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 10, 1-4, pp. 23-27 (1985)

- [12] ING, H.; PIESCH, E.. **“Status of Neutron Dosimetry”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 10, n. 1-4, pp. 5-15 (1985)
- [13] HARVEY, J. R. **“Neutron Exposure: Sources and Radiological Significance”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 10, n. 1-4, pp. 17-22 (1985)
- [14] GRIFFITH, R. V.. **“Individual Neutron Monitoring – needs for the nineties”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 44, n. 1-4, pp. 259-266 (1992)
- [15] YOSHIKAWA, I. **“Distinct Difference in Relative Biological Effectiveness of ^{252}Cf Neutrons for the Induction of Mitotic Crossing Over and Intragenic Reversion of the White-Ivory Allet in *Drosophila Melanogaster*”**. *Mutation Research*, v.357, n. 1-2, p. 35-42 (1996)
- [16] BERRY, R. J. **“Differences in LET Dependence of Cell Killing and the Production of Heritable Non-Lethal Damage in Mammalian Systems”**. In IAEA (org.): *Radiological Applications of Neutron Irradiation*, Viena (1971)
- [17] DORSCHER, B.; SEIFERT, H.; STREUBEL, G.. **“Some New Techniques for Neutron Radiation Protection Measurements”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 44, n. 1-4, pp. 355-361 (1992)
- [18] d’ERRICO, F.; BARTLETT, D.; B.-MILSTAJN, T.; H.; BOSCHUNG, M.; COECK, M.; CURZIO, G.; FIECHTNER, A.; KYLLONEN, J. –E.; LACOSTE, V.; LINDBORG, L.; LUSZIK-BHADRA, M.; REGINATTO, M.; SCHUHMACHER, H.; TANNER, R.; VANHAVERE, F.. **“Evaluation of Individual Dosimetry in Mixed Neutron and Photon Radiation Fields (EVIDOS). Part I: Scope and Methods of The Project”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 125, n. 1-4, pp. 275-280 (2007)
- [19] SCHUHMACHER, H.; BARTLETT, D.; BOLOGNESE-MILSTAJN, T.; BOSCHUNG, M.; COECK, M.; CURZIO, G.; d’ERRICO, F.; FIECHTNER, A.; KYLLONEN, J. –E.; LACOSTE, V.; LINDBORG, L.; LUSZIK-BHADRA, M., REGINATTO, M.; TANNER, R.; VANHAVERE, F.. **“Evaluation of Individual Dosimetry in Mixed Neutron and Photon Radiation Fields (EVIDOS). Part II: Conclusions and Recommendations”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 125, n. 1-4, pp. 281-284 (2007)
- [20] ROLLET, S.; AGOSTEO, S.; FEHENBACHER, G.; HRANIZKY, C.; RADON, T.; WIND, M.. **“Intercomparison of Radiation Protection Devices in a High-Energy Stray Neutron Field, Part I: Monte Carlo simulations”**. *Radiation Measurements*, v.44, pp. 649-659 (2009)
- [21] WIEGEL, B.; AGOSTEO, S.; BEDOGNI, R.; CARESANA, M; ESPOSITO, A.; FEHENBACHER, G.; FERRARINI, M.; HOHMANN, E.; HRANIZKY, C.; KASPER, A.; KHURANA, S.; MARES, V.; REGINATTO, M.; ROLLET, S.; RÜHM, W; SCHARDT, D.; SILARI, M.; SIMMER, G.; WEITZENEGGER, E.. **“Intercomparison of Radiation Protection Devices in a High-Energy Stray Neutron Field, Part II: Bonner Sphere Spectrometry”**. *Radiation Measurements*, v.44, pp. 660-672 (2009)

- [22] SILARI, M.; AGOSTEO, S.; BECK, P.; BEDOGNI, R.; CALE, E.; CARESANA, M.; DOMINGO, C.; DONADILLE, L.; DUBOURG, N.; ESPOSITO, A.; FEHENBACHER, G.; FERNÁNDEZ, F.; FERRARINI, M.; FIECHTNER, A.; FUCHS, A.; GARCÍA, M. J.; GOLNIK, N.; GUTERMUTH, F.; KHURANA, S.; KLAGES, T.; LATOCHA, M.; MARES, V.; MAYER, S.; RADON, T.; REITHMEIER, H.; ROLLET, S.; ROOS, H.; RÜHM, W.; SANDRI, S.; SCHARDT, D.; SIMMER, G.; SPURNÝ, F.; TROMPIER, F.; VILLA-GRASA, C.; WEITZENEGGER, W.; WIEGEL, B.; WIELUNSKI, M.; WISSMANN, F.; ZECHNER, A.; ZIELCZINSKI, M.. **“Intercomparison of Radiation Protection Devices in a High-Energy Stray Neutron Field, Part III: Instrument Response.** *Radiation Measurements*, v.44, pp. 673-691 (2009)
- [23] d’ERRICO, F.; BOS, A. J.. **“Passive Detectors for Neutron Personal Dosimetry: state of art”.** *Radiation Protection Dosimetry*, v. 110, n. 1-4, pp. 195-200 (2004)
- [24] VAIJAPURKAR, S. G.; SENWAR, K. R.; J. S. HOODA; PARIHAR, A.. **“The Performance Evaluation of Gamma-and-Neutron-Sensitive Superheated Emulsion (Bubble) Detectors”.** *Radiation Protection Dosimetry*, v. 130, n. 3, pp. 285-290.
- [25] HOLT, P. D.. **“Passive Detectors for Neutron Fluence Measurement”.** *Radiation Protection Dosimetry*, v. 10, n. 1-4, pp. 251-264 (1985)
- [26] KNOLL, G. **“Radiation Detection and Measurement”.** 3rd ed. John Wiley and Sons, New York – NY, USA. (2000)
- [27] TSOULFANIDIS, N. **“Measurement and Detection of Radiation”.** 2nd ed. Taylor and Francis, Washington D. C., USA. (1995)
- [28] REINA, L. C.; SILVA, A. X.; SUITA, J. C.; SOUZA, M. I. S.; FACURE, A.; SILVA, J. C. P.; FURLANETTO, J. A. D.; SANTOS, J. R. dos; SANTOS, O. P.; REBELLO, W.. **“Determination of neutron flux at IEN/CNEN Cyclotron Facilities in Order to Estimate and Minimize Neutron Dose Rates Received By Occupationally Exposed Individuals”.** In: *Proceedings of the 2009 International Nuclear Atlantic Conference*, DVD-ROM, paper e01_647_fullpaper.pdf, Rio de Janeiro, RJ. (2009)
- [29] SANTOS, O. P.; SILVA, J. C. P.; SILVA, L. C. R. P. da. **“Radiological Practices Using Dosimetric Films and Electronic Dosimeters in F-18 Production at Cyclotron Complex Center at IEN/CNEN”.** In: *Proceedings of the 2009 International Nuclear Atlantic Conference*, DVD-ROM, paper i09_598_fullpaper.pdf, Rio de Janeiro, RJ. (2009)
- [30] BTI. **“Bubble Detector Spectrometer Manual”** (2006)
- [31] d’ERRICO, F.; FULVIO, A. Di; MARYANSKI, M.; SELICI, S.; TORRIGIANI, M.. **“Optical Readout of Superheated Emulsions”.** *Radiation Measurements*, n. 43, pp. 432-436 (2008)
- [32] BTI. **“BDR-III Bubble Reader’s Folder”.** (2008)

- [33] d'ERRICO, F.. **“Radiation Dosimetry and Spectrometry with superheated emulsions”**, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, n. 184, pp. 229-254 (2001)
- [34] HEWITT, P.. **“Física Conceitual”**. 9ª Edição. Bookman. Porto Alegre. (2002)
- [35] SEMAT, H.. **“Introduction to Atomic and Nuclear Physics”**. 11th printing. Rinehart & Company, New York, USA (1959)
- [36] AHMED, S. N.. **“Physics and Engineering of Radiation Detection”**. American Press, Burlington, MA, USA (2007)
- [37] PODGORSK, E. **“Radiation Physics for Medical Physicists”**. Springer. Berlin (2006)
- [38] NICO, J.S; SNOW, W. M.. **“Fundamental Neutron Physics”**. *Annual Review Nuclear Science* v.55, p. 27-69 (2005)
- [39] KAPLAN, I.. **“Física Nuclear”**. 2ª edição. Guanabara Dois, Rio de Janeiro (1978)
- [40] MAFRA, O. Y.. **“Técnicas e Medidas Nucleares”**. Edgard Bloucher, São Paulo. (1973)
- [41] BELL, Z. W.; CARPENTER, D. A.; CRISTY, S. S.; LAMBERTI, V. E.; BURNER, A; WOODFIELD, B. F.; NIEDERMAYR, I.; DRAGOS, H.; LABOV, S. E.; FRIEDERICH, S.; WEST, W. G.; POHL, K. R.; BERG, L. van der; **“Neutron Detection with Criogenics and Semiconductors”**. *Physica Status Solidi (C)*, v.2, n.5, p. 1592-1605 (2005)
- [42] CROSS, W. H.; ING, H.. **“Neutron Spectroscopy”**. In ATTIX, F. W. (ed.) *The Dosimetry of Ionizing Radiation, Vol. II*. American Press, p. 91-167 (1987)
- [43] THOMAS, D. J.; KLEIN, H.. **“Introduction”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v.107, n.1-3, pp. 13-21 (2003)
- [44] FRATIN, L. **“Dosimetria de Nêutrons”**. Tese de Doutorado. IF/USP, São Paulo, SP, Brasil (1993)
- [45] Mc. DONALD, J. C.; SIEBERT, B. R. L.; ALBERTS, W. G.. **“Neutron spectrometry for radiation protection purposes”**. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A*, v.476, pp. 347-352 (2002)
- [46] Mc. DONALD, J. C.. **“Challenges of Personell Dosimetry at Accelerators”**. Mimeo. s/d
- [47] BARTLETT, D. T.; CHARTIER, J. L.; MATZKE, M.; RIMPLER, A.; THOMAS, D. J.. **“Concepts and Quantities in Spectrometry and Radiation Protection”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v.107, n.1-3, pp. 25-35 (2003)

- [48] SEYDALIEV, M.. “**Development and Test of a GEM-Based TEPC for Neutron Protection Dosimetry**”. PhD. Thesis. The Woodruff School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, Georgia., USA (2007)
- [49] JAHAN, Q. M.. “**Characterization of Neutron Dosimeters Containing Perforated Neutron Detectors**”. M.Sc. Thesis. Department of Mechanical and Nuclear Engineering, College of Engineering, Kansas State University, USA (2008)
- [50] BROOKS, F. D.; KLEIN, H.. “**Neutron spectrometry: historical review and present status**”. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A*, v.476, pp. 1-11 (2002).
- [51] LEMOS, R.. “**Desdobramento de Espectros de Nêutrons Utilizando o Método de Monte Carlo e Redes Neurais**”. Tese de Doutorado, PEN/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. (2008)
- [52] BELOGNI, R.. “**Neutron Spectrometry and Dosimetry for Radiation Protection Around a High Energy Electron/Positron Collider**”. D.Sc. Thesis. Facultat de Ciències, Departament de Física, Universitat Autònoma de Barcelona, España (2006)
- [53] GLASER, D. A.. “**Some Effects of Ionizing Radiation on the Formation of Bubbles in Liquids**”. *Physics Review*, n. 87(4), p. 665 (1952)
- [54] APFEL, R. E. “**The Superheat Drop Detector**”. *Nuclear Instruments and Methods*, v.162, pp. 603-609 (1979)
- [55] ING, H.; BIRNBOIM, H. G.. “**A Bubble-Damage Polymer Detector for Neutrons**”. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, v.8, n. 1-4, pp 285-288 (1984)
- [56] ROY, S. C.. “**Superheated Liquid and its Place in Radiation Physics**”. *Radiation Physics and Chemistry*, v.61, pp. 271-281 (2001)
- [57] d’ERRICO, F.; MATZKE, M. “**Neutron Spectrometry in Mixed Fields: superheated drop (bubble) detectors**”. *Radiation Protection Dosimetry*, v.107, n.1-3, pp. 111-124 (2003)
- [58] ROY, S. C.; B. ROY.. “**Use of Superheated Liquid in Neutron Detection**”. *Current Science*, v. 84, n. 4, pp. 516-528 (2003)
- [59] COUSINS, T.; TREMBLAY, K.; ING, H.. “**The Application of the Bubble Detector to the Measurement of Intense Neutron Fluences and Energy Spectra**”. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, v.37, n.6, pp. 1769-1775 (1990)
- [60] LESSARD, L.; HAMEL, L.-A.; ZACEK, V.. “**Neutron Response Functions for Superheated Droplet Detectors**”. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, v. 46, n.6, pp. 1907-1912 (1999)

- [61] ING, H.; NOULTY, R. A.; McLean, T. D.. **“Bubble Detectors – a maturing technology”**. *Radiation Measurements*, v. 27, n. 1, pp. 1-11 (1997)
- [62] JORDAN, D. V.; ELY, J. H.; PEURRUNG, A. J.; BOND, L. J.; COLLAR, J. I.; FLAKE, M.; KNOFF, M. A.; PITTS, W. K.; SHAVER, M.; SONNENSCHNEIN, A.; SMART, J. E.; TODD, L. C.. **“Neutron Detection via Bubble Chambers”**. *Applied Radiation and Isotopes*, v.63, pp. 645-653 (2005).
- [63] ROY, S. C.; APFEL, R. E.; LO, Y.-C.. **“Superheated Drop Detector: a potential tool on in neutron research”**. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, v.255, pp. 199-206 (1987)
- [64] SEITZ, F.. **“On the Theory of the Bubble Chamber”**. *The Physics of Fluids*, v.1, n.1, pp. 2-13 (1958)
- [65] ING, H. **“Neutron Measurements Using Bubble Detectors – terrestrial and space”**. *Radiation Measurements*, n. 33, pp. 275, 286 (2001)
- [66] d’ERRICO, F.; ALBERTS, W. G. **“Superheated-Drop (Bubble) Neutron Detectors and their Compliance with ICRP-60”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 54, n. 3-4, pp. 357-360 (1994)
- [67] LIM, W.; WANG, C. K.. **“Position-sensitive superheated-liquid-droplet neutron dosimeter”**. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 370, pp. 568-572 (1996)
- [68] d’ERRICO, F.; ALBERTS, W. G.; DIETZ, E.; GUALDRINI, G.; KURKDJIAN, J.; NOCCIONI, P.; SIEBERT, B. R. L. **“Neutron ambient dosimetry with superheated drop (bubble) detectors”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 65, n. 1-4, pp. 397-400 (1996)
- [69] ZANINI, A.; FASOLO, F.; VISCA, L.; DURISI, E.; PEROSINO, M.; ANNAND, J. R. M.; BURN, K. W.. **“Test of a bubble passive spectrometer for neutron dosimetry”**. *Physics in Medicine and Biology*, n. 50, pp. 4287-4297 (2005)
- [70] d’ERRICO, F.; NATH, R.; SILVANO, G.; TANA, L.. **“In Vivo Neutron Dosimetry During High Energy Bremsstrahlung Radiotherapy”**. *Int. J. Radiat. Oncology Biology Physics*, n. 41, pp. 1185-1192 (1998)
- [71] GREEN, A. R.; BENNET, L. G. I.; LEWIS, B. J.; TUME, P.; ANDREWS, H. R.; NOULTY, R. A.; ING, H.. **“Characterization of Bubble Detectors for Aircrew and Space Radiation Exposure”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 120, n. 1-4; pp. 485-490 (2006)
- [72] SPURNY, F.; JADRNICHOVA, J.. **“Some Recent Measurements Onboard Spacecraft with Passive Detectors”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 116, n. 1-4, pp. 228-231 (2005).
- [73] BOUKHIRA, N.; BOUSSAROQUE, I.; GORNEA, R.; DI MARCO, M.; LESSARD, L.; PAGÉ, V.; VINET, J.; ZACEK, V.. **“Suitability of Superheated Droplet Detectors for Dark Matter Search”**. *Astroparticle Physics*, v.14, pp. 227-237 (2000)

- [74] BTI. **“Bubble Detector Spectrometer Catalog – Radiation Detectors and Dosimeters”** http://www.bubbletech.ca/radiation_detectors.html (2009)
- [75] BONIN, H. W.; DESNOYERS, G. R.; COUSINS, T.: **“Fast Neutron Dosimetry and Spectroscopy Using Bubble Detectors”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 46, n. 4, pp. 265-271 (1993)
- [76] MANFREDOTTI, C.; NASTASI, U.; ORNATO, E; ZANINI, A.. **“Evaluation of the Undesired Neutron Dose Equivalent to Critical Organs in Patients Treated by Linear Accelerator Gamma Ray Therapy”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 44, n.1-4, pp. 457-462 (1992)
- [77] BTI. **“Bubble Detectors: accuracy of dose determination”**. *Information Note* (2006)
- [78] FONSECA, E. S.; PEREIRA, W. W.; LEITE, J. O.; PATRÃO, K. C. S.. **“Metrologia de Nêutrons no Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes”**. *Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento*, v.7, n.1, pp. 113-119 (2005)
- [79] IAEA. **“Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes”**. *Technical Report Series*, n.318. Vienna (2001)
- [80] IAEA. **“Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes”**. *Technical Report Series*, n.403. Vienna (2001)
- [81] LEMOS, R.. **Medidas de Espectros de Referência de Nêutrons com o Espectrômetro de Multiesferas de Bonner**. Dissertação de Mestrado. IRD/CNEN, Rio de Janeiro, Brasil. (2004)
- [82] LEITE, S. P.; PEREIRA, W. W.; FONSECA, E. S.; PATRÃO, K. C. S.; GONÇALVES, M. G.. **“Cálculo do Fator de Correção K para Fontes de Nêutrons de Amerício-Berílio Medida no Banho de Sulfato de Manganês do LMNRI/IRD”**. *Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento*, v.7, n.1, pp. 76-80 (2005)
- [83] COELHO, A. P.. **“Energia Nuclear”**. Composta. Rio de Janeiro. (1977)
- [84] FRETTER, W. B.. **“Introducion to Experimental Physics”**. Prentice Hall, New York, USA (1998)
- [85] REINA, L. C.; BELLIDO, L. F.; SILVA, A. X.; RAMOS, P. R.; PEREIRA, M.; FACURE, A.; DANTAS, J. E. R. **“Semi-Automatic Bubble Counting System for Superheated Droplet Detectors”**. In: *Proceedings of the 2009 International Nuclear Atlantic Conference*, DVD-ROM, paper e02_392_fullpaper.pdf, Rio de Janeiro, RJ. (2009)

- [86] RAMALHO, E.; REINA, L.; BELLIDO, L. F.; PEREIRA, M.; RAMOS, P. R.; FACURE, A.; SILVA, A. X.. **“Proposals of Counting Method for Bubble Detectors and Their Intercomparisons”**. In: *Proceedings of the 2009 International Nuclear Atlantic Conference*, DVD-ROM, paper e01_1055_fullpaper.pdf, Rio de Janeiro, RJ. (2009)
- [87] DOWNING, D.; CLARK, J.. **“Estatística Aplicada”**. Saraiva, São Paulo, SP, Brasil (2000)
- [88] BTI. **“RC-18: BDS Recompression Chamber”**. 2006
- [89] BAMBLEVSKI, V. P.; SPURNY, F.; DUDKIN, V. E.. **“Neutron Spectrometry with Bubble Damage Neutron Detectors”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 64, n.4, pp 309-311 (1996)
- [90] ROSENSTOCK, W.; SCHULZE, J.; KOBLE, T.; THESING, P.; JAUNICH, G.; KONHOLZ, H. –L.. **“Estimation of Neutron Energy Spectra with Bubble Detectors: potential and limitations”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 61, n. 1-3, pp. 133-136 (1995)
- [91] SPIEGEL, M. R.. **“Estatística”**. 13^a reimpressão, Mc Graw-Hill do Brasil, São Paulo, SP, Brasil (1979)
- [92] REINA, L. C.. **“Metodologia para minimização de doses ocupacionais devido a nêutrons em instalações radiativas com aceleradores cíclotrons”**. Tese de Doutorado. PEN/COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. (2010)
- [93] SCHULZE, J.; ROSENSTOCK, W.; KRONHOLTZ, H. L.. **“Measurements of Fast Neutrons by Bubble Detectors”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 44, n. 1-4, pp. 351-354 (1992)
- [94] BUKNER, M.A.; NOULTY, R. A.; COUSINS, T.. **“The Effect of Temperature on the Neutron Energy Thresholds of Bubble Technology Detectors”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v.55, n.23, pp. 23-30 (1994)
- [95] IPE, N. E.; BUSICK, D. D.; POLLOCK, R. W.. **“Factors Affecting the Response of the Bubble Detector BD-100 and a Comparison of Its Response to CR-39”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v.23, n.1-4, pp. 135-138 (1988)
- [96] SCHWARTZ, R. B.; HUNT, B.. **“Measurement of the Energy Response of Superheated Drop Neutron Detectors”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 34, n. 1-4, pp. 377-381 (1990)
- [97] VANHAVERE, F.; LOOS, M.; THIERENS, H.. **“The Life Span of the BD-PND Bubble Detector”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v.85, n.1-4, pp. 27-30 (1999)
- [98] VANHAVERE, F.; d’ERRICO, F.. **“Standardsation of Superheated Drop and Bubble Detector”**. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 101, n. 1-4, pp. 283-287 (2002)

- [99] ROSS, C.; SAULL, P.; TCHMSHKYAN, D. **“Neutrons from Electron Accelerations with Beam Energies from 6 to 10 MeV”**. *Final Report on File 34-R299-1*, Institute for National Measurement Standards, National Research Council, Ottawa, Canada (2007)
- [100] MARSH, J. W.; THOMAS, D. J.; BURKE, M.; **“High Resolution measurements of Neutron Energy Spectra from Am-Be and Am-B Neutron Sources”**. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A*, n. 366, pp. 340-348 (1995)