

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORAÇÃO
INDIVIDUAL DE NÊUTRONS TIPO ALBEDO DE DUAS COMPONENTES USANDO
DETECTORES TERMOLUMINESCENTES

Marcelo Marques Martins

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
NUCLEAR

Aprovada por:

Prof. Ademir Xavier da Silva, D.Sc.

Dra. Cláudia Lúcia de Pinho Maurício, D.Sc.

Profª. Vergínia Reis Crispim, D.Sc.

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

Dr. Luiz Antonio Ribeiro da Rosa, D.Sc.

Dr. Walsan Wagner Pereira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2008

MARTINS, MARCELO MARQUES

Desenvolvimento e Caracterização de um Sistema de Monitoração Individual de Nêutrons Tipo Albedo de Duas Componentes Usando Detectores Termoluminescente [Rio de Janeiro] 2008

XII, 124 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Nuclear, 2008)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Monitoração Individual de Nêutrons 2. Monitores de Albedo 3. Equivalente de Dose Pessoal - $H_p(10)$ 4. TLDs 5. Norma ISO 21909

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*“É melhor o fim de alguma coisa do que o
começo; é melhor o paciente do que o de
espírito orgulhoso”.*
(Eclesiastes 7:8)

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Ademir Xavier da Silva e à Dra. Cláudia Lúcia de Pinho Maurício pela orientação deste trabalho e pelas revisões que me auxiliaram a torná-lo mais consistente.

Aos professores da COPPE pelos ensinamentos transmitidos ao longo do curso. E aos seus funcionários pela cooperação na realização deste curso.

Aos membros da banca examinadora pelas contribuições no refinamento desta tese.

A minha esposa Helena por ter entendido a importância do doutorado na minha vida e por todos os momentos privados em decorrência deste trabalho.

A minha mãe pelo esforço dedicado ao longo da sua vida na minha formação.

Aos profissionais Márcia Terezinha, Paulo Cunha, Carlos Eduardo Veloso de Almeida, Josué Peter, Mônica Stuck, Adaugoberto Soares, Denison Santos, Pedro Queiroz e Nilton Ferreira Meira (*in memoriam*) pelo incentivo na realização deste doutorado.

Aos colegas Ricardo Diz, Rosângela Seda e Sérgio Alves do Laboratório de TLD do IRD pelo apoio constante na realização desta tese.

Ao Laboratório de Nêutrons do IRD que disponibilizou o Salão de Baixo Espalhamento e campos padrões de nêutrons, sem os quais seria impossível a realização deste trabalho. E, adicionalmente, aos seus profissionais: Evaldo, Walsan, Tindyua, Karla, Maria Letícia, Joubert, Sandro,... pelas proveitosas discussões e pelo apoio durante as irradiações.

Aos colegas da COPPE, em especial a José Francisco, João Leocádio, Manuel Lourenço e Márcia, pelo companheirismo durante o curso.

Finalmente, agradeço a todos os colegas da CNEN e da COPPE que direta ou indiretamente contribuíram nesta tese.

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

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORAÇÃO INDIVIDUAL DE NÊUTRONS TIPO ALBEDO DE DUAS COMPONENTES USANDO DETECTORES TERMOLUMINESCENTES

Marcelo Marques Martins

Junho/2008

Orientadores: Ademir Xavier da Silva

Cláudia Lúcia de Pinho Maurício

Programa: Engenharia Nuclear

Neste trabalho, foi desenvolvido e caracterizado um sistema de monitoração individual de nêutrons de duas componentes, usando detectores termoluminescentes e empregando a técnica de albedo. O monitor compreende um suporte plástico preto, uma blindagem dos nêutrons incidentes à base de boro, um corpo moderador de polietileno (para aumentar a resposta), dois pares de TLD-600 e TLD-700 (um par para cada componente) e um cinto regulável na cintura. O sistema de monitoração foi calibrado em campos de nêutrons térmicos e nêutrons monoenergéticos de 70 keV, 144 keV, 565 keV, 1,2 MeV e 5 MeV. Adicionalmente, foi calibrado em fontes de $^{252}\text{Cf}(\text{D}_2\text{O})$, ^{252}Cf , $^{241}\text{Am-B}$, $^{241}\text{Am-Be}$ e $^{238}\text{Pu-Be}$. Para estes últimos, os limites inferiores de detecção são, respectivamente, de 0,009 mSv, 0,06 mSv, 0,12 mSv, 0,09 mSv e 0,08 mSv. O sistema foi caracterizado com sucesso em todos os requisitos para a técnica TLD-albedo da norma ISO 21909 e em um *draft* de regulamento técnico do IRD. A participação em uma intercomparação internacional promovida pela AIEA simulando campos ocupacionais validou o sistema. Atualmente, o sistema encontra-se em uso pelo IRD na prestação de serviço de monitoração individual para corpo inteiro de nêutrons de cinco instituições que abrangem diversas atividades.

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

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF TWO-COMPONENT ALBEDO
BASED NEUTRON INDIVIDUAL MONITORING SYSTEM USING
THERMOLUMINESCENT DETECTORS

Marcelo Marques Martins

June/2008

Advisors: Ademir Xavier da Silva
Cláudia Lúcia de Pinho Maurício

Department: Nuclear Engineering

A TLD-albedo based two-component neutron individual monitoring system was developed and characterized in this work. The monitor consists of a black plastic holder, an incident neutron boron loaded shield, a moderator polyethylene body (to increase its response), two pairs of TLD-600 and TLD-700 (one pair to each component) and an adjustable belt. This monitoring system was calibrated in thermal neutron fields and in 70 keV, 144 keV, 565 keV, 1.2 MeV and 5 MeV monoenergetic neutron fields. In addition, it was calibrated in $^{252}\text{Cf}(\text{D}_2\text{O})$, ^{252}Cf , $^{241}\text{Am-B}$, $^{241}\text{Am-Be}$ and $^{238}\text{Pu-Be}$ source fields. For the latter, the lower detection levels are, respectively, 0.009 mSv, 0.06 mSv, 0.12 mSv, 0.09 mSv and 0.08 mSv. The participation in an international intercomparison sponsored by IAEA with simulated workplace fields validated the system. The monitoring system was successfully characterized in the ISO 21909 standard and in an IRD technical regulation draft. Nowadays, the neutron individual system is in use by IRD for whole body individual monitoring of five institutions, which comprehend several activities.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	vii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xi
Capítulo 1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Apresentação	1
1.2 Objetivo	3
Capítulo 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 Monitoração Individual de Nêutrons	4
2.1.1 Exposições Ocupacionais a Nêutrons	4
2.1.2 Aspectos Gerais da Monitoração Individual	7
2.1.3 Limite Individual de Dose Ocupacional e Nível de Registro	8
2.1.4 Detecção de Nêutrons	9
2.1.5 Dosimetria Termoluminescente	11
2.1.5.1 Característica dos TLDs Empregados em Monitores de Albedo	11
2.1.5.2 Característica do TLD-600 e do TLD-700	12
2.1.6 A Técnica de Albedo	14
2.1.7 Monitoração Individual de Nêutrons Tipo Albedo	15
2.1.7.1 Curva de Resposta dos Monitores de Albedo	16
2.1.7.2 Componentes de um Monitor de Albedo	17
2.1.7.3 Janela de Albedo	20
2.1.7.4 Posicionamento do Monitor de Albedo sobre o Corpo Humano	20
2.1.8 Blindagem dos Nêutrons Incidentes	22
2.1.9 Considerações Teóricas sobre Materiais de Engenharia para Monitoração de Nêutrons	25
2.2 Calibração e Caracterização de Monitores Individuais de Nêutrons	27
2.2.1 Simuladores	27
2.2.1.1 Descrição dos Simuladores da ISO	27
2.2.1.2 Incertezas Associadas a Simuladores	28
2.2.2 Considerações Teóricas sobre o Algoritmo de $H_p(10)$ de Nêutrons	28
2.2.3 Fator de Conversão Local de Monitores Individuais de Nêutrons	30
2.2.3.1 Calibração do Monitor Individual <i>In Situ</i>	34
2.2.3.2 Considerações Teórico-Práticas sobre o FCL	35
2.2.4 Normas e Regulamentos para Sistemas de Monitoração Individual de Nêutrons	36
2.2.5 Validação de Resultados da Monitoração Individual de Nêutrons	40
2.2.5.1 Desempenho dos Monitores de Albedo em Intercomparações	40
2.2.5.2 Curvas Trombeta	40

2.2.5.3 Controle da Qualidade Rotineiro	42
Capítulo 3 INSTALAÇÕES, MATERIAIS E METODOLOGIA	43
3.1 O Laboratório de Dosimetria TL do Serviço Monitoração Individual Externa do IRD	43
3.1.1 Apresentação da Infra-Estrutura	43
3.1.2 Seleção de TLDs para Uso Rotineiro.....	47
3.1.3 Câmara Climática de Umidade e Temperatura Controladas.....	49
3.2 O Laboratório de Irradiações do Serviço de Monitoração Externa do IRD.....	50
3.3 O Laboratório de Nêutrons do IRD.....	51
3.3.1 Instalações Físicas do Laboratório de Nêutrons.....	51
3.3.2 Fonte de Nêutrons.....	52
3.4 Simuladores e Arranjos de Irradiação	55
3.4.1 Fabricação do Simulador de Tronco da ISO.....	55
3.4.2 Arranjo Experimental para Irradiação com Simuladores	55
Capítulo 4 DESENVOLVIMENTO DO MONITOR	58
4.1 TLDs e Arranjo de Irradiação de Detectores.....	58
4.1.1 Identificação dos TLDs.....	58
4.1.2 Seleção dos TLDs	58
4.1.3 Arranjo Experimental para Irradiação de TLDs.....	59
4.2 Seleção do Corpo Moderador.....	60
4.3 Seleção da Blindagem dos Nêutrons Incidentes.....	63
4.3.1 Material da Blindagem dos Nêutrons Incidentes	64
4.3.2 Fôrma para Fabricação da BNI.....	64
4.4 Fabricação do Monitor Individual de Nêutrons.....	66
4.4.1 Projeto do Monitor	66
4.4.2 Fabricação do Suporte do Monitor.....	68
4.4.3 Fabricação do Moderador	68
4.4.4 Fabricação da Blindagem dos Nêutrons Incidentes	69
4.4.5 <i>Design</i> Final.....	69
4.5 Descrição do Algoritmo.....	69
Capítulo 5 CALIBRAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO.....	72
5.1 Calibração do Monitor: Obtenção dos FCLs e FIAs.....	72
5.2 Resultados dos Testes de Caracterização da ISO 21909	75
5.2.1 Homogeneidade do Lote (C.3.1).....	76
5.2.2 Reprodutibilidade (C.3.2)	76
5.2.3 Linearidade (C.3.3).....	77
5.2.4 Limite Inferior de Detecção (C.3.4)	78
5.2.5 Desvanecimento (C.3.5).....	78
5.2.6 Sinal Residual (C.3.6).....	79

5.2.7 Auto Irradiação (C.3.7)	79
5.2.8 Estabilidade da Resposta sob Diversas Condições Climáticas (C.3.8)	79
5.2.8.1 Efeito na Resposta do Armazenamento nas Condições Padrões de Teste (C.3.8.1)	79
5.2.8.2 Efeito na Resposta do Armazenamento em Altas Umidade e Temperatura (C.3.8.2)	80
5.2.9 Efeito da Luz sobre o Monitor (C.3.9)	82
5.2.9.1 Efeito na Dose Zero da Exposição à Luz por 24 Horas (C.3.9.1)	82
5.2.9.2 Efeito na Resposta da Exposição à Luz por 168 Horas (C.3.9.2)	82
5.2.10 Dependência Angular (C.3.10)	82
5.2.11 Resumo dos Testes da ISO	83
5.3 Resultados dos Testes de Caracterização do IRD	85
5.3.1 Reprodutibilidade (4.3.1)	86
5.3.2 Limite Inferior de Detecção (4.3.2)	87
5.3.3 Estabilidade dos Monitores sob Diferentes Condições Ambientais (4.3.3)	87
5.3.3.1 Efeito na Resposta do Armazenamento nas Condições Padrões de Teste por 30 Dias (4.3.3a)	87
5.3.3.2 Efeito na Resposta do Armazenamento nas Condições Padrões de Teste por 90 Dias (4.3.3b)	88
5.3.3.3 Efeito na Resposta do Armazenamento em Alta Temperatura por 7 Dias (4.3.3c)	89
5.3.3.4 Efeito na Resposta do Armazenamento em Alta Umidade por 30 Dias (4.3.3d)	90
5.3.4 Efeito da Luz sobre o Monitor (4.3.4)	91
5.3.4.1 Efeito da Exposição à Luz por 24 Horas na Dose Zero (4.3.4a)	91
5.3.4.2 Efeito da Exposição à Luz por 168 Horas na Resposta (4.3.4b)	91
5.3.5 Linearidade (4.3.5)	92
5.3.6 Dependência Angular (4.3.6)	93
5.3.7 Discriminação Nêutron-Gama (4.3.7)	93
5.3.8 Resistência a Impactos (4.3.8)	94
5.3.9 Resumo dos Testes do IRD	94
5.4 Discussão sobre a Implementação do Sistema	96
5.5 Validação do Sistema	97
Capítulo 6 CONCLUSÃO	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
ANEXO A GRANDEZA PARA MONITORAÇÃO INDIVIDUAL DE NÊUTRONS	115
A.1 Grandezas Operacionais	115
A.2 Equivalente de Dose Pessoal	116

ANEXO B TESTES DE CARACTERIZAÇÃO DO IRD	118
B.1 Teste de Reprodutibilidade (4.3.1)	118
B.2 Teste de Limite Inferior de Detecção (4.3.2)	119
B.3 Teste de Estabilidade dos Monitores sob Diferentes Condições Ambientais (4.3.2)	119
B.4 Teste de Efeito da Luz sobre o Monitor (4.3.4)	120
B.5 Teste de Linearidade (4.3.5)	121
B.6 Teste de Dependência Angular (4.3.6)	121
B.7 Teste de Discriminação Nêutron-Gama (4.3.7)	122
B.8 Teste de Resistência a Impactos (4.3.8)	122
ANEXO C INFORMAÇÕES ESTATÍSTICAS RELACIONADAS ÀS MEDIDAS	123
C.1 Coeficiente de Variação	123
C.2 Distribuição do “t” de <i>Student</i>	123
ANEXO D PRODUÇÃO CIENTÍFICA RELACIONADA A ESTE TRABALHO	124

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

$^{252}\text{Cf}(\text{D}_2\text{O})$ - ^{252}Cf moderado por 15 cm de água pesada e recoberto com cádmio	53
^6LiF – Fluoreto de Lítio-6	11
^7LiF – Fluoreto de Lítio-7	11
BNI - Blindagem dos Nêutrons Incidentes	16
CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear	8
CV - Coeficiente de Variação	123
d – distância (cm) do centro da fonte radioativa até a face frontal do simulador	56
DZ – Dose Zero	49
E - dose efetiva.....	5
F – Fator de Incerteza	40
FC - Fator de Calibração para a leitura de fótons do ‘6’ - TLD-600 ou do ‘7’ - TLD-700	30
FCL - Fator de Conversão Local	30
FIA - fator de correlação entre a moderação do campo de nêutrons esperado e o encontrado.....	32
FTP - Fluxo Térmico Padrão	73
$H^*(10)$ - equivalente de dose ambiente a 10 mm	5
H_a – apparent photon dose equivalent.....	37
H_{li} – Limite Inferior	40
H_{ls} – Limite Superior	40
$H_p(10)$ - equivalente de dose pessoal a 10 mm de profundidade	3
$H_p(d)$ – equivalente de dose pessoal na profundidade d.....	116
ICRP - International Commission on Radiation Protection	8
ICRU - International Commission on Radiation Units	27
IOE - Indivíduo Ocupacionalmente Exposto	2
IRD – Instituto de Radioproteção e Dosimetria.....	2
IRSN - Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire	73
ISO – International Organization for Standardization	27
K_{ar} – KERMA no ar	48
LABIR - Laboratório de Irradiações.....	50
LID – Limite Inferior de Detecção.....	3
LiF – Fluoreto de Lítio.....	11
LN - Laboratório de Nêutrons.....	51
LNMRI – Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes	50
MADE – maximum dose equivalent.....	5
MC - Monitor de Controle	30
M_{IOE} - Monitor do IOE	30

NR - Nível de Registro.....	3
PA-6 – poliamida-6.....	60
PE – polietileno.....	19
PEAD - Polietileno de Alta Densidade	26
PEBD - Polietileno de Baixa Densidade	26
PMMA - poli(metacrilato de metila)	26
PP - polipropileno	60
PTB - Physikalisch-Technische Bundesanstalt	74
PTFE - poli(tetraflúor-etileno).....	64
PTW – Physikalisch-Technische Werkstätten	43
PVA - poli(acetato de vinila)	24
PWR – Pressurized Water Reactor.....	54
razão i/a - razão entre a resposta da componente de nêutrons incidentes e a de albedo .	33
RF – Radiação de Fundo	30
SBE - Salão de Baixo Espalhamento.....	51
$s_{RF\gamma}(6.7)$ – desvio padrão da leitura da radiação de fundo de fótons para o lote do ‘6’ – TLD-600 ou para o lote ‘7’ – TLD-700.....	30
TL – termoluminescente ou termoluminescência	10
TLD - detector termoluminescente.....	3
VA – Valor Avaliado.....	39
VC – Valor Verdadeiro Convencional	37

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Em várias áreas da atividade humana, os nêutrons estão presentes como uma radiação principal e necessária ou como um subproduto indesejável. Desde que foi descoberto por Chadwick em 1932, nêutrons têm sido produzidos por meio da fissão ou fusão dos núcleos atômicos ou de reações nucleares (FIX *et al.*, 1996). A partir daquela época, então, o potencial de exposição a este tipo de radiação vem aumentando.

Fontes de radiação neutrônica são empregadas em três áreas da atividade humana: industrial, científica e médica (MARTINS *et al.*, 1995, ALBERTS *et al.*, 1996). Na primeira, destaca-se a geração de energia nuclear, medidores industriais de processo (principalmente umidade), prospecção de petróleo e neutrongrafia. No campo científico, os nêutrons estão presentes em estudos de estrutura cristalina e molecular, estudos de fissão e fusão, física nuclear básica, radiobiologia e composição isotópica de diversos materiais, através de análise por ativação. Na área médica, os nêutrons são usados em tratamento com nêutrons rápidos, em terapia por captura de nêutrons por boro e aparecem também como subproduto indesejável em feixes de elétrons e de fótons de alta energia provenientes de aceleradores lineares (FACURE, 2006). Além dos campos de nêutrons intencionalmente produzidos em reatores, aceleradores de partículas e geradores de nêutrons, existem outros campos secundários onde os nêutrons podem ser gerados por reações nucleares de partículas com o núcleo dos materiais que compõem os alvos de irradiação, o arranjo da irradiação, as blindagens, os alvos, etc.

Nas aplicações industriais, as exposições profissionais na perfilagem nuclear de poços de petróleo merecem especial atenção devido ao número e intensidade das fontes radioativas utilizadas. No território brasileiro, existem diversas empresas atuando em perfilagem nuclear de poços de petróleo. Atualmente, estas empresas usam fontes de nêutrons compostas de $^{241}\text{Am-Be}$, na faixa de atividade de 550 a 740 GBq, para realização do ensaio de perfilagem nuclear. Esta área concentra em torno de 60% de todas as fontes de nêutrons no país (MARTINS *et al.*, 1995).

No presente processo de modernização do parque radioterápico brasileiro, os aceleradores lineares de baixa energia e equipamentos de teleterapia de ^{60}Co estão sendo progressivamente substituídos por equipamentos com feixes de fótons com energia igual ou superior a 10 MeV. Apesar de apresentarem diversas vantagens,

essas novas máquinas produzem fotonêutrons como contaminantes, devido à energia dos fótons próxima ou superior à energia de ligação dos núcleons (>5-15 MeV) dos materiais constituintes do cabeçote dos aceleradores lineares (FACURE, 2006).

Quando comparado com as exposições ocupacionais a fótons, existem poucos dados na literatura a respeito das exposições ocupacionais a nêutrons no Brasil e no exterior (MARTINS *et al.*, 1995, UNSCEAR, 2000). Mesmo na literatura especializada, como o UNSCEAR – *United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR, 2000), não há descrição clara das exposições ocupacionais a nêutrons, separadamente das devidas a fótons.

Desde 1987, no Brasil, as doses ocupacionais de fótons, avaliadas por Serviços de Monitoração Individual Externa certificados pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), são armazenadas em um Banco de Dados Nacional denominado Sistema de Registro de Doses. E como, legalmente, apenas serviços certificados podem fornecer este tipo de monitoração, todas as doses ocupacionais de fótons brasileiras estão no Sistema de Registro de Doses (IRD, 1995a). O mesmo não ocorre com as doses ocupacionais de nêutrons, por dois motivos:

1. Uma quantidade considerável de Indivíduos Ocupacionalmente Expostos (IOEs) não são monitorados, pela falta de disponibilidade dos serviços brasileiros para atender toda a demanda (alguns são monitorados por serviços estrangeiros), e
2. Não existe certificação no Brasil para a prestação de serviços de monitoração individual de nêutrons.

A monitoração individual de nêutrons apresenta maiores dificuldades de se operacionalizar quando comparada à de fótons por causa da complexidade dos processos envolvendo a transferência da energia dos nêutrons para o meio material (com grande variação das seções de choque das reações nucleares com a energia), dependência angular dos detectores e da grande faixa de energia dos nêutrons encontrada ocupacionalmente (GRIFFITH *et al.*, 1979, DOUGLAS, 1981, GIBSON, 1988, PERKS, 1993, IAEA, 1999a, THOMAS *et al.*, 1999). Sob o aspecto da monitoração individual (IRD, 1995a, 2001b, ISO, 2005), enquanto os campos ocupacionais de fótons variam normalmente na faixa de 20 a 1250 keV, os de nêutrons variam na faixa de 0,0253 eV a 20 MeV. Isto é, a faixa de trabalho de um monitor individual de fótons é de 3 ordens de grandeza, enquanto que a faixa de trabalho de um monitor individual de nêutrons alcança cerca de 10 ordens de grandeza (ALBERTS *et al.*, 1996).

Até a edição da norma ISO/DIS 21909 (2002) na condição de *draft*, não havia nenhuma norma internacional onde estivessem definidos os requisitos de desempenho

para as diferentes técnicas dosimétricas dos sistemas de monitoração individual de nêutrons. No *draft* da ISO/DIS 21909, foi estabelecido todo um conjunto de testes a serem realizados de modo a se caracterizar o sistema na grandeza $H_p(10)$ - equivalente de dose pessoal a 10 mm de profundidade. Posteriormente, foi editada a norma ISO 21909 na sua versão final (ISO, 2005). As técnicas dosimétricas, os testes, como os critérios de desempenho foram na grande maioria mantidos. A principal modificação está relacionada à metodologia de cálculo de cada teste.

Contudo, até a presente data, não existe disponível um monitor individual de nêutrons caracterizado por esta norma internacional. Todas essas considerações anteriores impulsionam a pesquisa por sistemas de monitoração individual externa de nêutrons que procurassem atender aos requisitos desejados (D'ERRICO e BOS, 2004, ISO, 2005). O grande número de dificuldades operacionais na monitoração individual de nêutrons também atua como um incentivo na pesquisa e desenvolvimento tecnológico de um monitor individual de nêutrons ideal; isto é, que seja capaz de medir com exatidão as doses de nêutrons, independentemente do espectro de nêutrons (STRAND e STORRUSTE, 1986, GRIFFITH, 1988, BÖHM *et al.*, 1992, ALBERTS *et al.*, 1996, THOMAS *et al.*, 1999).

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de monitoração individual de nêutrons com as seguintes características:

- a) Possua um Limite Inferior de Detecção (LID) menor ou igual ao Nível de Registro (NR), para fontes não moderadas de $^{241}\text{Am-Be}$; considerando-se o $H_p(10)$ como grandeza de interesse e um período de monitoração mensal, visando ao atendimento da legislação brasileira (CNEN, 2005a);
- b) Empregue a técnica de albedo;
- c) Empregue pares de detectores termoluminescentes (TLDs) de $^6\text{LiF:Mg,Ti}$ (TLD-600) e $^7\text{LiF:Mg,Ti}$ (TLD-700);
- d) Permita a medida de duas componentes de nêutrons: de albedo e incidentes;
- e) Possibilite, em seu projeto e concepção, que as partes do monitor possam ser reaproveitadas, caso uma delas seja danificada;
- f) Atenda aos requisitos da norma ISO 21909 (ISO, 2005).

Capítulo 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Monitoração Individual de Nêutrons

2.1.1 Exposições Ocupacionais a Nêutrons

A partir de um estudo (MARTINS *et al.*, 1995) sobre a situação dos trabalhadores expostos a nêutrons no Brasil, estimou-se em cerca de 600 a quantidade destes profissionais no país; sendo que de um terço à metade deste total se refere a trabalhadores em perfilagem nuclear de poços de petróleo. Diferentemente das outras atividades dentro da área industrial, existe pelos IOEs uma intensa manipulação de fontes de nêutrons nas práticas de trabalho encontradas em perfilagem nuclear de poços de petróleo; sendo que em muitas ocasiões em espaços físicos limitados. Semelhantemente na área científica, nas práticas de trabalho encontradas nas atividades de pesquisa, ocorre esta sistemática de manipulação de fontes de nêutrons; contudo, a quantidade de IOEs envolvidos é bem menor. Assim sendo, no Brasil e em vários países, a perfilagem nuclear de poços tem sido identificada, dentre as técnicas industriais, como aquela que pode levar às maiores dose ocupacionais de nêutrons aos trabalhadores (UNSCEAR, 2000).

Em poucos países do mundo, existem informações quanto às doses ocupacionais na área de perfilagem nuclear de poços de petróleo e, ainda assim, os relatórios não distinguem a contribuição de nêutrons das exposições totais e apresentam incluídas as exposições referentes a outras perfilagens (UNSCEAR, 2000). No Brasil, existem apenas informações parciais (MARTINS *et al.*, 1995) em relação às doses ocupacionais de nêutrons dos trabalhadores em perfilagem nuclear de poços de petróleo: a dose coletiva estimada para nêutrons em perfilagem é maior do que o somatório das doses relativas a todas as outras atividades envolvendo esta radiação.

Na radiação natural, também se observa a presença de nêutrons. Eles são produzidos devido à interação da radiação ionizante de origem cósmica, principalmente prótons e partículas alfa, na atmosfera terrestre (BAILEY, 2000). Como a maior parte destes nêutrons é absorvida pela própria atmosfera, seu fluxo ao nível do mar é desprezível. Entretanto, a contribuição natural dos nêutrons varia com a atividade solar, a latitude e com a altitude, atingindo um máximo entre aproximadamente 6000 e 11000 metros, faixa de operação dos aviões comerciais (UNSCEAR, 2000).

Os campos de nêutrons se estendem da energia de 0,0253 eV até 20 MeV; contudo, não foi encontrada na literatura, uma classificação única para os nêutrons de acordo com a energia cinética. É conveniente adotar para propósitos dosimétricos a seguinte classificação dos campos de nêutrons (ATTIX, 1986):

- Térmicos: energia < 0,5 eV; nêutrons abaixo da energia de corte do cádmio.
- Intermediários: 0,5 eV até 10 keV.
- Rápidos: energia > 10 keV.

Por causa da faixa de energia tão grande de 10 ordens de grandeza, não existe um monitor individual de nêutrons ideal (PIESCH, 1985, ALBERTS *et al.*, 1996, THOMAS *et al.*, 1999), isto é, que apresente resposta independente da energia. Enquanto que para a faixa de medição da dose do nível de registro até 100 mSv (IRD, 1995a, 2001b, ISO, 2005), os monitores individuais de nêutrons costumam apresentar uma resposta linear.

O formato das curvas de resposta de monitores individuais de nêutrons tipo albedo é diferente da curva de conversão de fluência em dose. Na Figura 2.1 estão apresentadas simultaneamente as curvas (ISO, 1998, ICRP, 1995, IAEA, 2001, LNMRI, 2002) para conversão de fluência em diferentes grandezas de dose (E – dose efetiva, $H^*(10)$ - equivalente de dose ambiente a 10 mm, $H_p(10)$ e o equivalente de dose máximo (MADE – *maximum dose equivalent*)), a curva de resposta do monitor de albedo do IRD (SCHUCH, 1978) e a curva de resposta do monitor de albedo multielementos do *Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH*, ambas em função da fluência de nêutrons (IAEA, 2001). Vide também o Anexo A.

Essa diferença apresentada na Figura 2.1 ocorre porque o formato da curva de conversão da fluência de nêutrons rápidos em equivalente dose é totalmente diferente da resposta de albedo, ou seja, a resposta de albedo é baixa para nêutrons de altas energias. A fração de nêutrons térmicos que são retroespalhados num monitor de albedo varia com a energia dos nêutrons incidentes, de modo que a resposta como um todo do monitor de albedo é, portanto, altamente dependente da energia (DOUGLAS e MARSHALL, 1978).

A forte dependência energética apresentada na Figura 2.1 não é exclusiva da técnica de albedo; mas sim característica de todas as técnicas de medida na monitoração individual de nêutrons, devido à extensa faixa de medida ocupacional (ISO, 2005). A Figura 2.2 pode ser visualizada para ilustrar a curva de resposta teórica de um monitor de albedo em comparação com outros detectores (PIESCH, 1985).

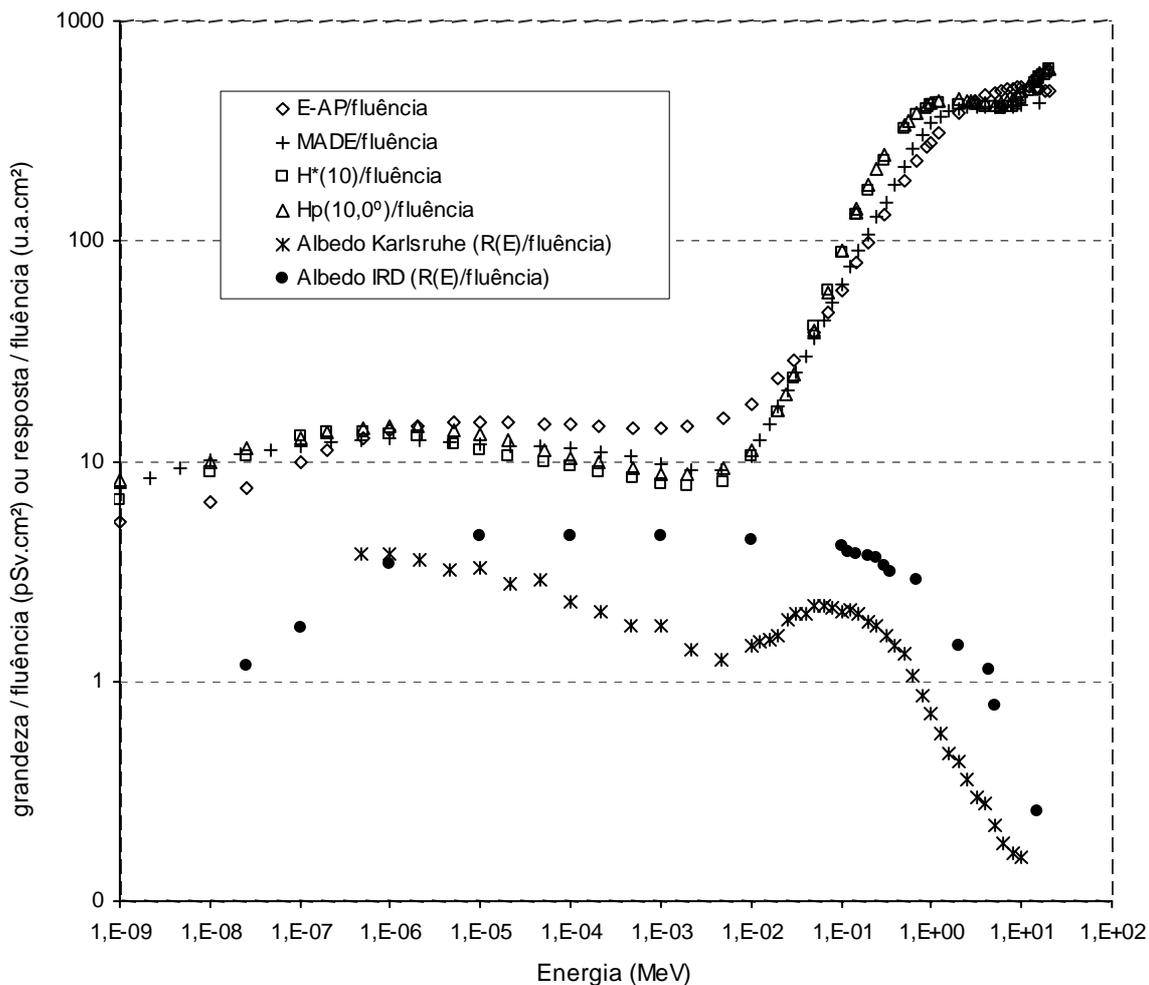


Figura 2.1: Curvas de resposta por fluência de monitores individuais de nêutrons tipo albedo comparada com as curvas de conversão da fluência em dose em função da energia dos nêutrons

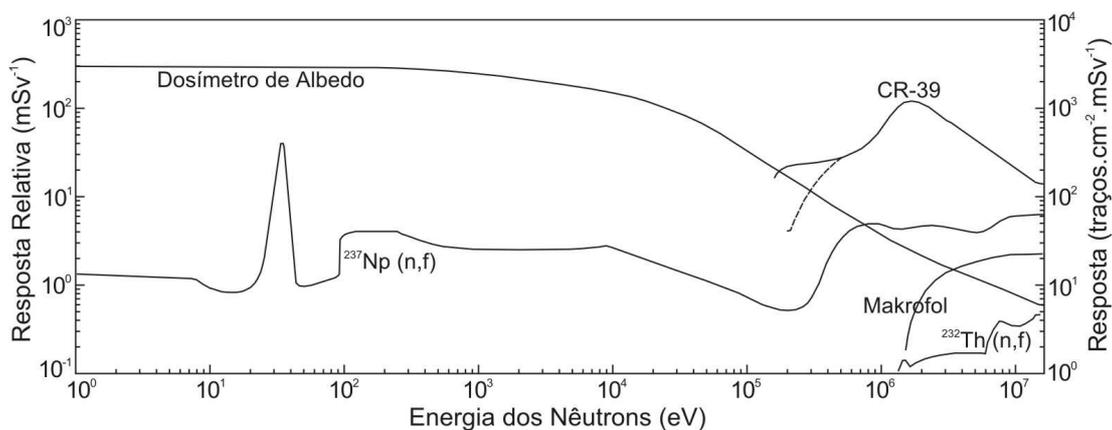


Figura 2.2: Curvas de resposta do dosímetro de albedo em comparação com alguns outros detectores de nêutrons em função da energia dos nêutrons (PIESCH, 1985)

2.1.2 Aspectos Gerais da Monitoração Individual

Pode-se considerar resumidamente que na proteção radiológica de uma instalação existem duas fases operacionais (CUNHA, 1997, IAEA, 1999b):

- ◆ Planejamento: onde, por meio de soluções de engenharia, da elaboração e implementação de procedimentos são criados os meios necessários para que as doses anuais do trabalhador e/ou de público se situem em níveis inferiores aos valores estabelecidos durante a fase de projeto;
- ◆ Confirmatória: onde, por meio de programas de monitoração (individual, área ou ambiental), é demonstrado que as rotinas acontecem conforme planejado. Caso contrário, ela indica a necessidade de intervenção para a redução das exposições.

O principal propósito da monitoração individual é fornecer um acompanhamento periódico da exposição ocupacional do trabalhador para confirmação ou não de boas práticas de trabalho (CNEN, 2005a). E, secundariamente, um registro que possa ser arquivado até que o IOE atinja 75 anos e por, pelo menos, 30 anos após o término da sua ocupação, mesmo que ele já tenha falecido (CNEN, 2005a). Dependendo da natureza e das práticas de trabalho, um programa de monitoração individual possui também o intuito de fornecer (BÖHM *et al.*, 1992, IAEA, 1999b):

- Dados para estudos epidemiológicos e/ou análises sobre risco/benefício;
- Dados para fins médicos e/ou legais;
- Informação sobre a radioproteção no ambiente de trabalho, em especial detectar mudanças nas condições de trabalho do IOE;
- Informação sobre doses altas não planejadas; tais como aquelas que eventualmente ocorrem em acidentes.

Para isto, os monitores individuais devem ser capazes de realizar medidas confiáveis da grandeza de interesse (JULIUS, 1996).

Os monitores individuais podem ser classificados como (a) ativos ou (b) passivos. No primeiro caso (a), entende-se como ativo aquele monitor que fornece a informação direta e imediata sobre a dose ou a taxa de dose do trabalhador; no segundo caso (b), entende-se como passivo aquele monitor que necessita de um tratamento posterior, em laboratório, para se obter a informação sobre a dose do trabalhador, integrada durante o seu período de uso (ALBERTS, 1999).

O emprego da monitoração individual para nêutrons não substitui ou cancela a monitoração individual para fótons (IAEA, 1999a). Adicionalmente, não existe na legislação brasileira critério específico para se empregar monitores individuais de nêutrons em áreas de radiação neutrônica. Um monitor individual de nêutrons para que possa ser empregado satisfatoriamente deve atender aos seguintes requisitos

mínimos (GRIFFITH *et al.*, 1979, STRAND e STORRUSTE, 1986, ALBERTS *et al.*, 1996, IAEA, 1999a):

- ⇒ Atendimento aos critérios de desempenho (IRD, 2001b, ISO, 2005);
- ⇒ Custo, o mais baixo possível;
- ⇒ Desvanecimento da leitura desprezível ou possível de ser corrigido;
- ⇒ Estabilidade sobre condições climáticas adversas;
- ⇒ Insensibilidade a campos elétricos e magnéticos;
- ⇒ Larga faixa de medida da dose; desde valores baixos ocupacionalmente encontrados até valores altos, no caso de acidentes;
- ⇒ LID abaixo do NR na faixa de energia para a qual o monitor destina ser usado;
- ⇒ Resistência mecânica;
- ⇒ Resposta, o mais proporcional possível à grandeza $H_p(10)$;
- ⇒ Sensibilidade desprezível ou possibilidade de separar as contribuições devido a outros tipos de radiação (raios gama e X).

2.1.3 Limite Individual de Dose Ocupacional e Nível de Registro

Em 1991, a ICRP - *International Commission on Radiation Protection* recomendou na publicação 60 (ICRP, 1991) um limite de dose para o indivíduo mais restritivo do que o anteriormente em vigor na publicação 26 (ICRP, 1977) (ou ICRP 26, como é popularmente conhecida). A ICRP 26 havia servido de base para a norma nacional básica de radioproteção da CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear CNEN-NE-3.01 (CNEN, 1988). Tanto na ICRP 26 como na Norma CNEN-NE-3.01, o limite da dose efetiva (E) era de 50 mSv por ano (ICRP, 1977, CNEN, 1988). Em 2005, a CNEN revisou a norma básica de radioproteção, editando-a com a denominação de CNEN-NN-3.01 (CNEN, 2005a). Nesta nova edição da norma brasileira, como na ICRP 60, foi introduzida a restrição de que a média ponderada em 5 anos consecutivos do limite de dose efetiva seja de 20 mSv por ano, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano (ICRP, 1991, CNEN, 2005a).

Como Nível de Registro (NR), se entende o menor valor de dose definido pela autoridade reguladora nacional a partir do qual há interesse em se registrar o valor da monitoração individual (ICRP, 1997). Teoricamente, o NR tem sido definido como 1/10 do valor do limite para a dose anual do indivíduo (ICRP, 1977, ICRP, 1991, CNEN, 2005a). Operacionalmente, ou seja, do ponto de vista legal, o NR adotado no Brasil para todo o tipo de monitoração individual é de 0,20 mSv (UNSCEAR, 2000, CNEN, 2005b). Não existe na legislação brasileira um NR específico para a monitoração individual de nêutrons (IRD, 2001b, CNEN, 2005a). Por outro lado, o LID é uma função

do período adotado para a monitoração individual (LIU e SIMS, 1990). Considerando-se um período de monitoração individual mensal, o nível de registro do ponto de vista teórico para monitoração individual seria obtido a partir da equação 2.1:

$$NR = \frac{20 \text{ mSv.ano}^{-1}}{10 \times 12 \text{ mês.ano}^{-1}} = 0,17 \text{ mSv.mês}^{-1} \quad 2.1$$

O LID para qualquer sistema de monitoração individual é o valor mínimo avaliado para o qual a resposta de um monitor é significativamente diferente, para certo nível de confiança, da resposta de um monitor não irradiado. Do ponto de vista prático, o LID é o menor valor de dose para o qual este sistema é capaz de medir. Contudo, considerando-se a grande faixa de energia coberta pela monitoração individual de nêutrons, o LID numa certa faixa de energia pode não ser menor do que o NR desejado ou estipulado (D'ERRICO e BOS, 2004); enquanto o NR é um valor fixo, o LID de cada sistema de monitoração varia com o campo de nêutrons. Portanto, é importante que um sistema de monitoração individual seja capaz de medir 0,17 mSv, caso um nível de registro mais restritivo seja adotado no Brasil.

2.1.4 Detecção de Nêutrons

Para a monitoração individual de nêutrons, o detector ideal ou a combinação de detectores deve apresentar as seguintes características (PERKS, 1993, ALBERTS *et al.*, 1996):

- ◇ A resposta às radiações de nêutrons e de fótons deve ser independente da energia;
- ◇ A resposta deve ser linear com a dose, para uma larga faixa de dose;
- ◇ A sensibilidade deve ser adequada para permitir a separação das componentes das radiações de nêutrons e de fótons;
- ◇ Baixo custo;
- ◇ Fáceis de serem usados;
- ◇ O desvanecimento durante o período de monitoração deve ser pequeno ou, preferencialmente, desprezível;
- ◇ Passíveis de serem reutilizáveis.

A Figura 2.3 pode ser usada para ilustrar as relações entre detectores de estado sólido para monitoração de nêutrons (GRIFFITH, 1988). O esquema sob a forma de uma árvore representa uma tentativa de se encontrar, subindo-se por seus galhos, um dosímetro universal para nêutrons.

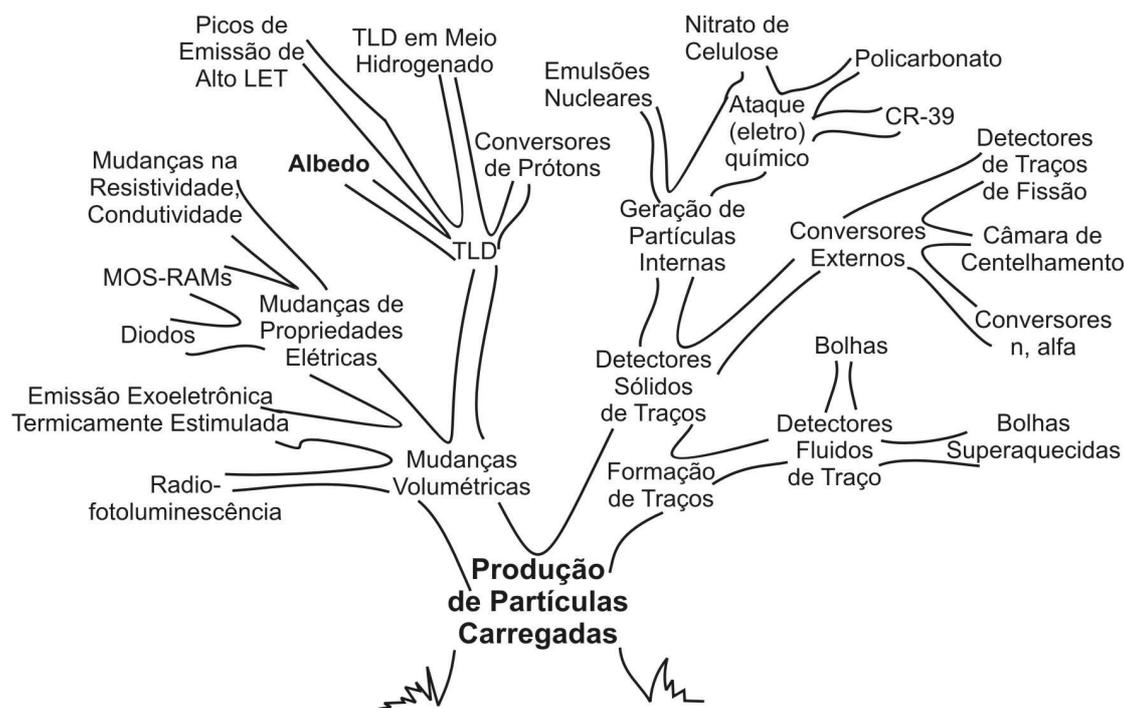


Figura 2.3: Árvore genealógica para monitoração individual de nêutrons (GRIFFITH, 1988)

Considerando que não existe um detector ideal, muitos pesquisadores têm procurado no desenvolvimento de um monitor individual de nêutrons empregar uma combinação de duas técnicas diferentes de detecção. Assim, para atender os requisitos de desempenho para um monitor individual de nêutrons, faz-se uso de detectores com diferentes faixas de dependência energética, sensibilidade, dependência angular e faixa de resposta, (GRIFFITH, 1988). Esta prática tem como objetivo complementar a resposta de um detector com a de outro, empregando a vantagem das respostas diferentes dos detectores (GRIFFITH, 1988). Por exemplo, enquanto um detector possui uma boa resposta para nêutrons térmicos e intermediários, o outro possui uma boa resposta para nêutrons rápidos. Seguindo este princípio, diversas técnicas de detecção têm sido agrupadas num único monitor. No caso específico da dosimetria termoluminescente (TL) podem ser encontradas:

- a) Dosimetria TL e análise por ativação neutrônica (TUYN e LANKSMANAN, 1984);
- b) Dosimetria TL e detectores fluidos de traços (bolhas) (LIU e SIMS, 1990);
- c) Dosimetria TL e detectores sólidos de traços nucleares (CR-39) (HARVEY *et al.*, 1993, LUSZIK-BHADRA *et al.*, 1993);
- d) Dosimetria TL e emulsões nucleares (KNIGHT *et al.*, 1973, ANDERSON e CRAIN, 1979);
- e) Dosimetria TL e nitrato de celulose (TYMONS *et al.*, 1973);
- f) Dosimetria TL e policarbonato (BUISMAN, 1988);

g) Dosimetria TL e detectores de traços de fissão (BURGER e MORHART, 1977, BORODIN *et al.*, 1988, PETRE, 1992);

Em relação ao agrupamento de outras técnicas podem ser encontradas:

h) Emulsão nucleares e detectores de traços de fissão (GOMAA *et al.*, 1973);

i) Policarbonato e detectores sólidos de traços nucleares (SOHRABI e KATOUZI, 1991);

j) Policarbonato e detectores de traços de fissão (PRÊTRE, 1973).

Por outro lado, o uso de duas ou mais técnicas de detecção apresenta os seguintes inconvenientes:

- o Aumenta a complexidade do algoritmo de cálculo da dose (IAEA, 1999a);
- o Aumenta a incerteza associada à medida da dose;
- o Dificulta a automação do serviço (MANFREDOTTI *et al.*, 1989);
- o É necessário operar dois laboratórios diferentes (para duas técnicas diferentes);
- o Incrementa o custo da monitoração individual;
- o Necessita de caracterização do sistema de monitoração individual por 2 técnicas diferentes;
- o Torna o monitor mais complexo e mais caro.

2.1.5 Dosimetria Termoluminescente

2.1.5.1 Característica dos TLDs Empregados em Monitores de Albedo

Os dois tipos de TLDs possíveis de serem empregados na monitoração individual de nêutrons são o LiF e o $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, devido à alta seção de choque neutrônica do lítio (ALSMILLER Jr. e BARISH, 1974, PIESCH, 1977). A variação das respostas a nêutrons da molécula de fluoreto de lítio enriquecida com lítio-6 (^6LiF) e da molécula de fluoreto de lítio enriquecida com lítio-7 (^7LiF) estão apresentadas na Figura 2.4 (TANAKA e FURUTA, 1977). Enquanto que a diferença nas seções de choque entre o ^6LiF e o ^7LiF é maior do que 1000 para nêutrons térmicos, ela decresce para em torno de 100 em 100 keV e para 10 em 1 MeV (KRON, 1995). Isto faz com que a resposta do ^7LiF para nêutrons seja desprezível quando este detector é empregado na técnica de albedo, uma vez que a maior parte da leitura dos detectores do monitor seja devido ao componente térmico do fluxo refletido (CARVALHO, 1975).

Os monitores individuais de nêutrons tipo albedo usando o par de fluoreto de lítio (LiF) como detectores podem avaliar mais eficientemente baixas doses de nêutrons, mesmo na presença de campos de fótons, do que os monitores de leitura direta ou pseudo-albedos (ZEMAN e SNYDER, 1978). Em virtude do conjunto das suas características, a técnica de albedo empregando TLD possibilita a monitoração

individual de nêutrons com um baixo custo e a melhor reprodutibilidade quando comparada com outras técnicas (GIBSON, 1988).

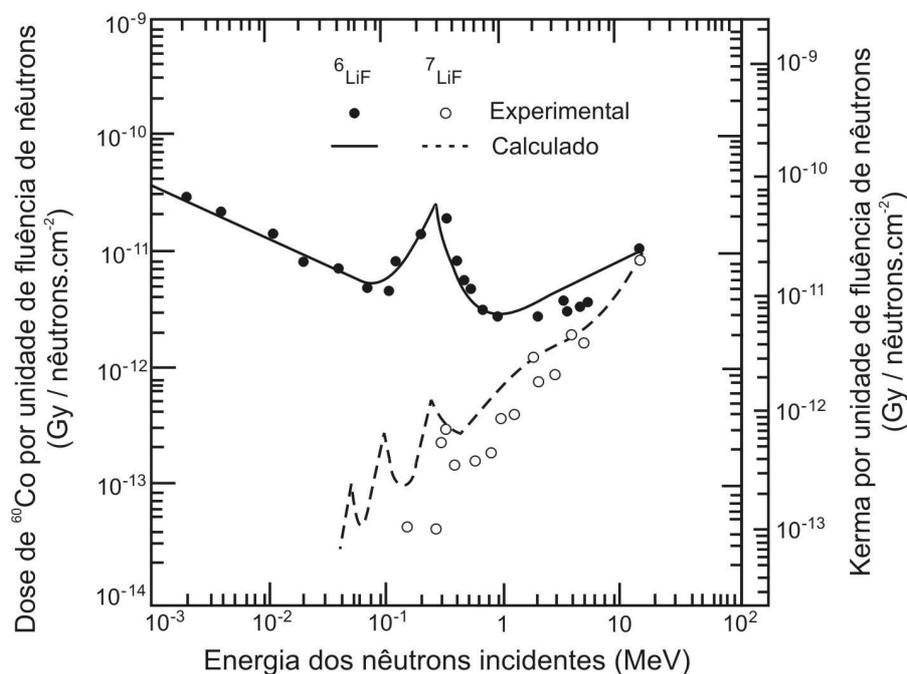


Figura 2.4: Variação das respostas do ${}^6\text{LiF}$ e ${}^7\text{LiF}$ com a energia do nêutron (TANAKA e FURUTA, 1977)

2.1.5.2 Característica do TLD-600 e do TLD-700

Com a denominação de TLD-100, a Harshaw comercializa o fluoreto de lítio natural dopado com magnésio e titânio, isto é sem nenhum tipo de enriquecimento isotópico do lítio (LiF:Mg,Ti) (McKEEVER *et al.*, 1995).

Diferentemente do TLD-100, existem dois outros TLDs de LiF:Mg,Ti que possuem diferentes enriquecimentos do isótopo de lítio: TLD-600 e TLD-700. O TLD-600 é sensível a nêutrons e fótons, enquanto o TLD-700 é sensível somente a fótons. O TLD-600 é um detector enriquecido com 95,6% de ${}^6\text{Li}$ e o TLD-700 é enriquecido com 99,993% de ${}^7\text{Li}$, respectivamente: ${}^6\text{LiF:Mg,Ti}$ e ${}^7\text{LiF:Mg,Ti}$ (McKEEVER *et al.*, 1995). O TLD-100 também poderia ser empregado como um detector misto, para nêutrons e fótons, tal como o TLD-600. Contudo, o TLD-100 apresenta uma sensibilidade de apenas 18% (MAURÍCIO, 2001) em relação a este último, pelo fato de possuir apenas 7,5% de ${}^6\text{LiF}$.

O LiF:Mg,Ti apresenta uma curva TL complexa com 10 picos, na faixa da temperatura ambiente até 400°C (McKEEVER *et al.*, 1995). Alguns picos iniciais possuem um considerável desvanecimento; enquanto outros são bastante estáveis à temperatura ambiente. Além do sinal termoluminescente que se apresenta no TLD-700 (que emprega ${}^7\text{LiF}$), no TLD-600 (que emprega ${}^6\text{LiF}$) existe uma contribuição ao sinal

TL decorrente da partícula $\alpha(^4\text{He})$ e do trício (^3H) produzidos na reação $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$ (WEINSTEIN *et al.*, 2006). Quando se utiliza o TLD-600, esta contribuição é notada pelo crescimento no sinal dos picos 1 ao 5 e pelo aparecimento dos picos 6 e 7 (Figura 2.5).

Na Figura 2.5, estão apresentados esquematicamente as curvas TL do TLD-600 e do TLD-700 (do pico 2 ao 7), quando irradiados num campo misto de nêutrons e fótons. Nesta figura, o pico 1 não foi representado por apresentar uma meia-vida de apenas 5 minutos (a temperatura ambiente de 20°C) e os picos de 8 a 10 por estarem situados em temperaturas maiores e não serem usados em dosimetria (McKEEVER *et al.*, 1995, MAURÍCIO, 2000, 2001). Do ponto de vista do campo de radiação mista (nêutrons e gama) incidente, as curvas TL do TLD-600 e TLD-700 são dependentes das intensidades e das energias de ambas as radiações. A diferença entre as respostas TL do TLD-600 e do TLD-700 é proporcional à dose de nêutrons (LIU e SIMS, 1990).

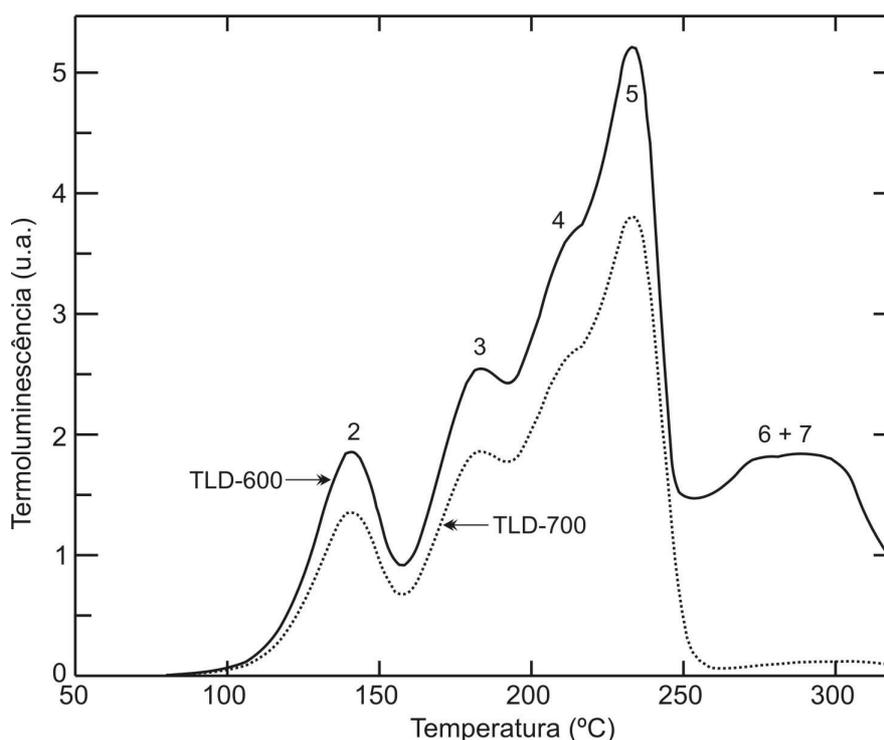


Figura 2.5: Curva TL esquemática (apresentando do pico 2 ao 7) dos TLD-600 e TLD-700, considerando avaliação num leitor com taxa de aquecimento linear e irradiação num campo misto de nêutrons e fótons

No TLD-600, o lítio-6 ao capturar um nêutron decai em duas partículas: ^4He e ^3H (DOUGLAS, 1981). A resposta a nêutrons provém da interação das partículas carregadas resultantes com a estrutura cristalina do elemento detector. Como tanto o hélio-4 como o trício possuem alta energia cinética, conseguem ativar

armadilhamentos nos picos 6 e 7 do TLD-600. A energia resultante de 4,78 MeV é, então, dividida entre os dois isótopos (KNOLL, 1989).

2.1.6 A Técnica de Albedo

O termo “albedo” foi adaptado por similaridade da astronomia; onde ele significa o coeficiente de reflexão entre a luz refletida pela superfície de um corpo celeste e a luz que este recebe do Sol (HYPERPHYSICS, 2003). Na física de nêutrons, este termo foi inicialmente introduzido por Amaldi e Fermi (1936) devido à complexidade dos fenômenos de difusão, incluindo retroespalhamento, relacionados a esta partícula. A partir da década de sessenta, procurou-se empregar o próprio corpo humano do trabalhador exposto como um moderador e refletor de nêutrons (MEJDAHL, 1967, UNRUH *et al.*, 1967). Por similaridade ao fenômeno descrito por Amaldi e Fermi (1936), começou-se a empregar o termo “albedo” para o fluxo de nêutrons espalhado pelo corpo humano. Posteriormente, começou-se a generalizar o termo “albedo” como uma técnica de medida na monitoração individual de nêutrons (BROWN *et al.*, 1967). Isto originou a técnica de albedo como uma das mais importantes na monitoração individual de nêutrons para o IOE (GIBSON, 1988). Deste modo, nêutrons de albedo são denominados aqueles moderados e retroespalhados pelo corpo humano quando este está exposto num campo de nêutrons (HANKINS, 1972). De uma forma geral, albedo significa fração da radiação incidente espalhada de uma superfície (ISO, 2005). Quando se trata de monitoração individual de nêutrons, o termo albedo, portanto, é sinônimo de refletância de nêutrons (ATTIX, 1986).

Se o suporte do monitor individual for totalmente (na frente e lateralmente) blindado para os nêutrons incidentes, ele reproduzirá aproximadamente a curva teórica de albedo (Figura 2.6), pelo fato de não responder mais aos nêutrons incidentes (MAURÍCIO, 1987). O coeficiente de albedo de um monitor que emprega esta técnica é definido como a razão entre a fluência total de nêutrons térmicos refletidos pelo corpo e a fluência total de nêutrons incidentes; este coeficiente varia aproximadamente de 0,8 para nêutrons térmicos até aproximadamente 0,14 para nêutrons de 1 MeV (MAURÍCIO, 1987, PIESCH, 1982). Na Figura 2.6, está apresentado o coeficiente de albedo em função da energia dos nêutrons (HARVEY *et al.*, 1973, CARVALHO, 1975, DOUGLAS, 1981, STRAND e STORRUSTE, 1986).

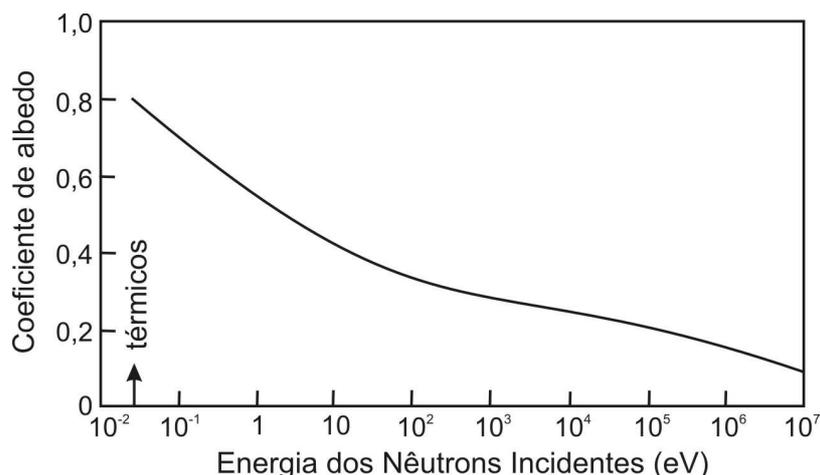


Figura 2.6: Relação entre os nêutrons térmicos de albedo para nêutrons incidentes de diferentes energias refletidos pelo corpo humano (DOUGLAS, 1981)

O monitor individual de albedo é um dispositivo passivo posicionado sobre o corpo humano que faz uso destes nêutrons para avaliar a dose ocupacional. A premissa básica de funcionamento da maioria destes monitores individuais de nêutrons é a de que a fluência de nêutrons de albedo, produzida pela fluência dos nêutrons incidentes no corpo humano, é proporcional à dose no corpo humano (ALSMILLER Jr. e BARISH, 1974, DOUGLAS e MARSHALL, 1978).

2.1.7 Monitoração Individual de Nêutrons Tipo Albedo

O emprego da técnica de albedo com TLDs nos monitores individuais de nêutrons tem se justificado pelo fato dos monitores de albedo apresentarem a resposta mais adequada para baixa energia (SCHWARTZ e EISENHAUER, 1980) e uma das melhores reprodutibilidade (GIBSON, 1988), como também um dos que apresentam menores dificuldades na medida de doses próximas ao LID (SWAJA, 1988). Além disso, é possível empregar, com grande eficiência, monitores de albedo na medida de campos de radiação neutrônica até 100 keV, que são os maiores responsáveis pela exposição ocupacional a nêutrons (MAURÍCIO, 1987). Desta forma, segundo BUGKHARDT e PIESCH (1982) e STRAND e STORRUSTE (1986), os monitores de albedo são capazes de medir as doses ocupacionais na maior parte da faixa de energia que pode ser encontrada nas práticas de trabalho. Isto porque o trabalhador praticamente nunca se expõe diretamente a um campo de nêutrons monoenergéticos e, principalmente, a um campo de nêutrons exclusivamente rápidos (ICRP, 1995, THOMAS *et al.*, 1999); os parâmetros distância e blindagem reduzem a energia média deste campo. A energia dos nêutrons nos campos de radiação usualmente se estende por uma faixa muito larga; em alguns casos em até 10 ordens de magnitude. Assim, por exemplo, mesmo na operação de um gerador de nêutrons operando a 14 MeV, o

trabalhador efetivamente fica exposto a um campo de nêutrons térmicos e intermediários.

Diversos esforços têm sido feitos para incrementar a resposta de um monitor de albedo, por meio de (DOUGLAS e MARSHALL, 1978, PERKS, 1993):

- (1) Incorporação de um moderador no seu interior.
- (2) Incorporação de detector(es) extra(s).

Por outro lado, segundo Gibson (1988) a adição de TLDs extras e blindagem para separar a componente de nêutrons de albedo da componente de nêutrons incidente em um monitor individual de albedo não incrementa a resposta deste monitor e o melhor emprego do monitor de albedo seria em trabalhadores expostos a campos de nêutrons onde o espectro não sofre modificação. A Blindagem dos Nêutrons Incidentes (BNI) tem por finalidade tornar possível discriminar a componente de nêutrons incidentes da componente de albedo (HANKINS, 1972, PIESCH e BURGHARDT, 1973, YEH *et al.*, 1981, MAURÍCIO, 1987).

2.1.7.1 Curva de Resposta dos Monitores de Albedo

Os resultados da avaliação de monitores de albedo em uma intercomparação realizada em Harwell em 1976 (BURGER e MORHART, 1977, DOUGLAS e MARSHALL, 1978, DOUGLAS, 1981) mostraram que a resposta dos monitores de albedo em função da energia apresenta desempenho praticamente similar para nêutrons acima de 100 keV (Figura 2.7), independentemente das suas características de construção e dos seus critérios de avaliação, mudando apenas a sensibilidade. Não existe uma uniformidade na resposta abaixo de 100 keV, a resposta dos monitores de albedo depende de todo um conjunto de fatores: formato, composição dos materiais, posição de uso no corpo humano, blindagem. Estes fatores são avaliados de acordo com a finalidade para o qual o monitor de albedo é desenvolvido (SCHUCH, 1978). Por exemplo, para os monitores de albedo que possuem a sua janela de albedo blindada, a resposta de albedo diminui com a diminuição da energia (DOUGLAS, 1981).

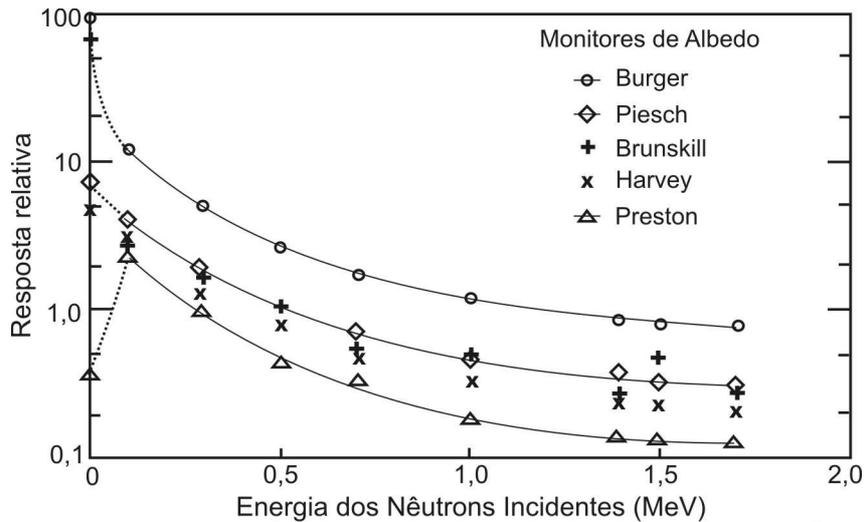


Figura 2.7: Curva de resposta de alguns monitores individuais de nêutrons tipo albedo em uma intercomparação realizada em Harwell em 1976 (DOUGLAS e MARSHALL, 1978)

2.1.7.2 Componentes de um Monitor de Albedo

A dependência energética da resposta do monitor individual não pode ser significativamente melhorada pela otimização do seu projeto (MAURÍCIO, 1987). Entretanto, detectores adicionais podem ser incorporados ao detector de albedo de modo a fornecer informação sobre o espectro dos nêutrons incidentes ou, mesmo ainda, outros espectros como o de nêutrons intermediários (PIESCH e BURGKHARDT, 1974, DOUGLAS e MARSHALL, 1978, PERKS, 1993).

Não existe um modelo oficial para classificação dos monitores de albedo empregando TLDs. Existem, porém, esquemas de classificação, como o apresentado na Figura 2.8 (PIESCH, 1977, 1985), onde os monitores de albedo estão dispostos em quatro grupos (onde o número **6** representa o TLD-600 e **7**, o TLD-700) (GRIFFITH *et al.*, 1979, STRAND e STORRUSTE, 1986, PERKS, 1993).

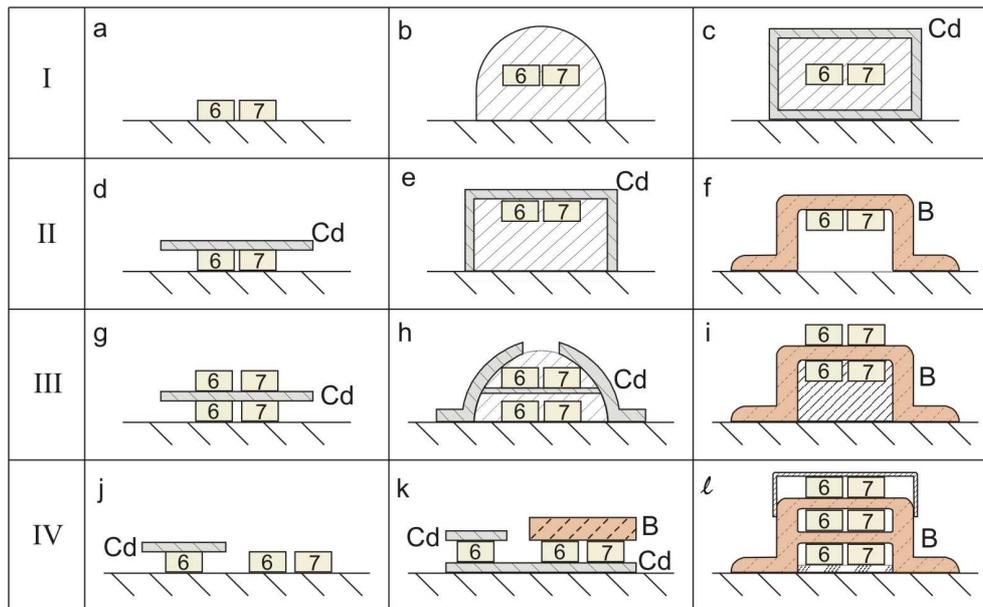


Figura 2.8: Esquema de classificação de monitores individuais de nêutrons tipo albedo (PIESCH, 1977)

Grupo I) Tipo sem discriminação dos nêutrons incidentes e de albedo. Este tipo detecta tanto os nêutrons incidentes como os nêutrons de albedo (retroespalhados pelo corpo) com um único detector, sem usar uma blindagem de nêutrons em alguma parte do suporte do monitor individual. Por causa disto, este monitor tipo “I” tem sido também chamado de pseudo-albedo (HARVEY *et al.*, 1993). O emprego de um moderador melhora a resposta do monitor, porém torna a sua resposta ainda mais elevada a nêutrons térmicos; como é o exemplo do monitor “b”. Por causa disto, o monitor “c” apresenta-se todo envolto em uma blindagem de cádmio. Os monitores deste tipo apresentam sensibilidade razoável para nêutrons térmicos e muito baixa para nêutrons rápidos, o que na prática não é desejável, a não ser, especificamente, na monitoração em campos de nêutrons de baixa energia (MAURÍCIO, 1987). Exemplos do tipo I (sem discriminação): (b) - PERKS, 1993; (c) - HANKINS, 1973.

Grupo II) Tipo discriminante. Este tipo detecta exclusivamente os nêutrons de albedo usando um único detector dentro de uma blindagem na frente do monitor individual, que é aberto no lado voltado para o corpo humano. Sua concepção não permite a identificação de qualquer mudança no campo de nêutrons (DA ROSA, 1993). Exemplos do tipo II (discriminante): (e) - DOUGLAS e MARSHALL, 1978; (f) - HARVEY *et al.*, 1973.

Grupo III) Tipo discriminante analisador. Este tipo detecta separadamente tanto os nêutrons incidentes como os nêutrons de albedo pelo uso de no mínimo dois detectores; um dos quais é posicionado no interior da blindagem de nêutrons e o

outro externamente à blindagem, de modo a se obter informações adicionais sobre o campo de nêutrons incidentes. As 2 componentes encontradas no algoritmo de cálculo da dose de nêutrons são a de albedo e a de nêutrons incidentes. Exemplos do tipo III (discriminante analisador): (g) – BRUNSKILL, 1977, NASH *et al.*, 1985; (h) - HOY, 1972; (i) BUSUOLI *et al.*, 1976.

Grupo IV) Tipo discriminante multianalisador. Este tipo detecta separadamente os nêutrons incidentes, os nêutrons de albedo e os nêutrons intermediários; para isto, faz uso de vários detectores e blindagens de nêutrons. No algoritmo de cálculo da dose de nêutrons é possível se obter pelo menos 3 componentes. Exemplos do tipo IV (discriminante multianalisador): (j) – ENDRES, 1971 e KOCHER *et al.*, 1973; (k) - BOGGS, 1971, GRIFFITH, 1973; (l) - PIESCH e BURGKHARDT, 1974.

Os monitores de albedo também podem ser classificados pelas suas componentes de medida. Em relação ao esquema de classificação apresentado na Figura 2.8, os monitores do tipo “I” e “II” apresentam apenas uma componente de medida. Os monitores do tipo “III” apresentam duas componentes de medida. Os monitores do tipo “IV” podem apresentar três ou mais componentes de medida. Como exemplo de monitores de albedo com um determinado número de componentes podem ser encontrados:

- ⇒ Uma (CARVALHO, 1975, BURGER e MORHART, 1977).
- ⇒ Duas (HOY, 1972, PRESTON e PEABODY, 1973, BRUNSKILL, 1977, PIESCH e BURGKHARDT, 1988).
- ⇒ Três (PIESCH e BURGKHARDT, 1974 ou PIESCH *et al.*, 1982, STRAND e STORRUSTE, 1986, MANFREDOTTI *et al.*, 1989, STUDENÁ, *et al.*, 1989, SOHRABI e KATOUZI, 1991).
- ⇒ Quatro (PIESCH e BURGKHARDT, 1980).

Demonstrou-se que a adição de um corpo moderador de polietileno (PE) incrementa consideravelmente a sensibilidade de um monitor individual de albedo em função da energia do campo de nêutrons, ainda que a dependência energética não seja alterada (HANKINS, 1972, BURGER e MORHART, 1977, DOUGLAS e MARSHALL, 1978). Isto é de extrema importância na medida de campos de nêutrons rápidos e na determinação de doses de nêutrons na presença de campos mistos baseada na diferença de resposta de detectores sensíveis a fótons (HANKINS, 1972, CARVALHO, 1975). Os monitores de albedo com moderador apresentam uma resposta da componente de albedo maior do que aqueles que não apresentam corpo moderador. Dentre os monitores individuais de nêutrons apresentados na Figura 2.7, o monitor de albedo de Burger (DOUGLAS e MARSHALL, 1978) é o que apresenta o maior corpo moderador e, conseqüentemente, a maior resposta. A presença do corpo

moderador no monitor de albedo torna-o como uma extensão do corpo humano; ou seja, é como se os TLDs do monitor estivessem no interior do ser humano (CARVALHO, 1975, SCHUCH, 1978).

2.1.7.3 Janela de Albedo

Num monitor de albedo possuindo corpo moderador, os TLDs podem ficar dispostos ao longo de diversas posições: desde próximos do corpo humano, na janela de albedo, até afastado dele, inseridos no fim do moderador e próximo da blindagem.

Como janela de albedo, entende-se a área traseira, não blindada, do monitor direcionada para o corpo humano e sensível ao fluxo de albedo. A janela de albedo de um monitor individual de nêutrons depende, portanto, da:

- ◇ Estrutura do seu projeto.
- ◇ Existência de blindagens na parte (traseira) voltada para o corpo humano que modifica a resposta de albedo (PERKS, 1993).

Um monitor de nêutrons com uma grande área traseira teria sem blindagem, a priori, uma grande janela de albedo. Na Figura 2.9, pode ser observado o efeito da blindagem na limitação da janela de albedo. Deve existir, contudo, um limite nesta variável; haja vista que a partir de uma determinada janela de albedo, começar-se-ia a blindar os nêutrons incidentes.

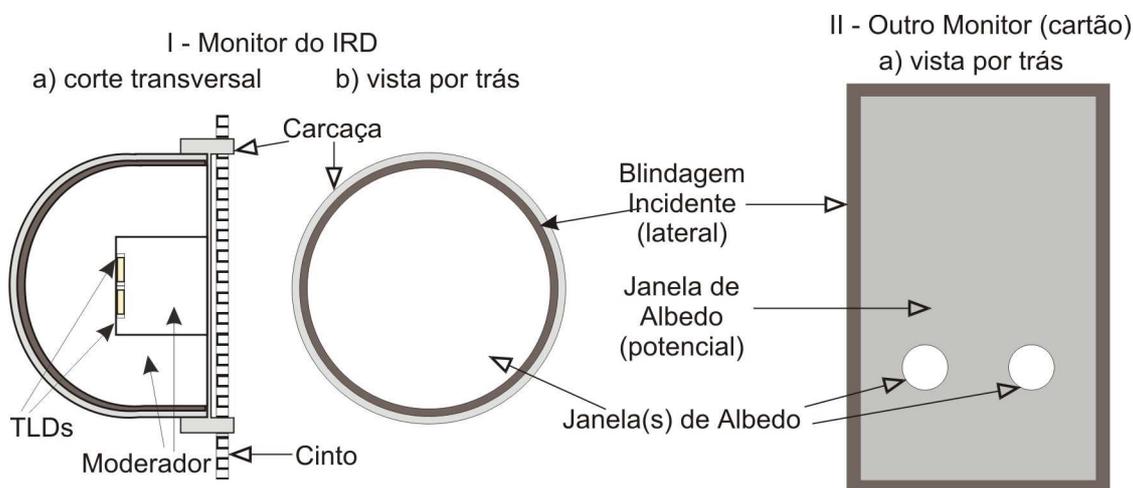


Figura 2.9: Exemplos de janela de albedo

2.1.7.4 Posicionamento do Monitor de Albedo sobre o Corpo Humano

Para posicionamento do monitor de albedo no tronco humano, duas formas têm sido adotadas: com um cinto ao redor da cintura (DISTENFELD, 1971, HOY, 1972, NASH *et al.*, 1985, DA ROSA *et al.*, 1993, GUNTER, 1994) ou com uma presilha pendurado na roupa (PIESCH *et al.*, 1982). Na primeira condição, se mantém

constante a distância entre o monitor e o corpo humano, ainda que exista o inconveniente de se empregar um cinto. Na segunda condição, a variação da distância do monitor ao corpo humano gera mais uma fonte de incerteza na medida.

A resposta do monitor de albedo é dependente da distância da janela de albedo até a superfície do corpo humano ou do simulador de tronco que o represente (DISTENFELD, 1971, SOHRABI e KATOUZI, 1992, FIX *et al.*, 1996). Além disso, foi constatado que a adição de moderador no monitor de albedo torna-o sensível a variações na distância do monitor individual ao corpo humano (HANKINS, 1972, CARVALHO, 1975, MAURÍCIO, 1987). O efeito da distância na resposta do monitor é, portanto, prejudicial porque incrementa a resposta onde ele é muito sensível, em campos de nêutrons térmicos, e a diminui onde ela é pouco sensível, em campos de nêutrons rápidos (^{252}Cf). Na Figura 2.10 está apresentada a resposta de alguns monitores de albedo versus a distância do detector a um simulador de tronco esférico quando o monitor é irradiado a 1,25 m de distância da fonte e de altura do solo com nêutrons térmicos e com uma fonte de ^{252}Cf (PIESCH e BURGKHARDT, 1993). Nesta Figura 2.10 pode ser verificada a perda na resposta do monitor de albedo em campos de nêutrons de alta energia (^{252}Cf), justamente onde sua sensibilidade piora.

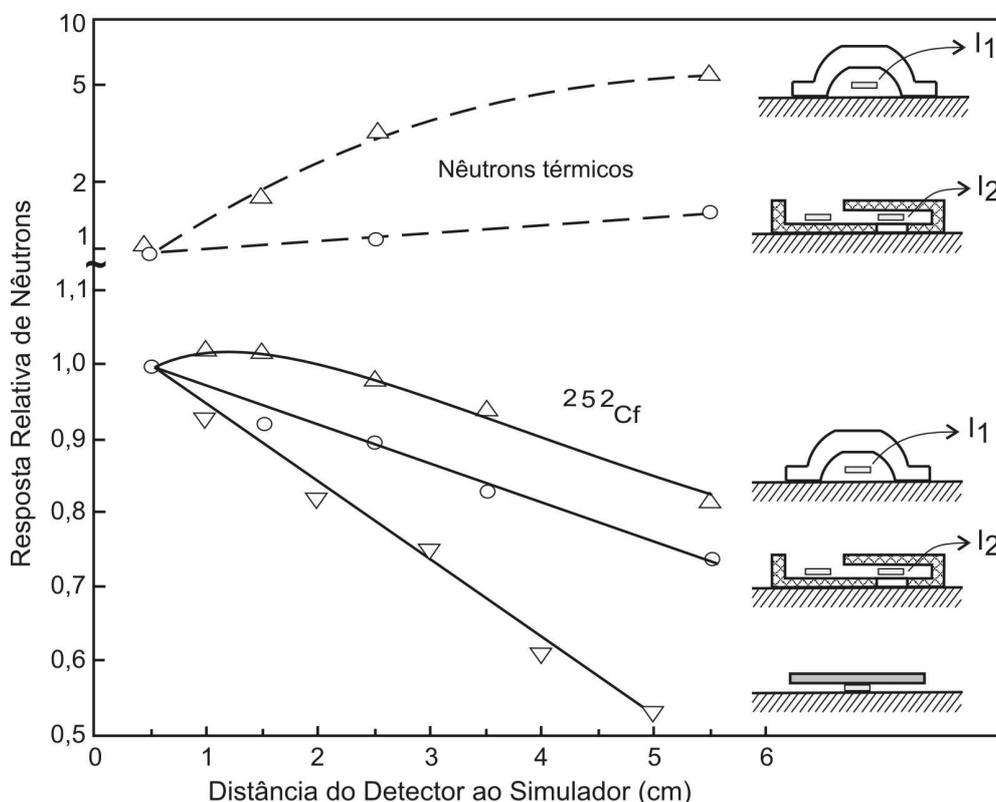


Figura 2.10: Efeito da distância entre os detectores dos monitores individuais e um simulador esférico (PIESCH e BURGKHARDT, 1993)

2.1.8 Blindagem dos Nêutrons Incidentes

Empregando uma blindagem de nêutrons entre dois pares idênticos de um monitor individual de albedo, tais como TLD-600 e TLD-700, é possível discriminar a componente de medida dos nêutrons incidentes da componente de medida dos nêutrons de albedo moderada e retroespalhada pelo corpo humano (LIU *et al.*, 1990, KRON, 1995), conforme mostrado na Figura 2.8. Em adição à blindagem frontal de nêutrons num monitor de albedo, a colocação de blindagem lateral diminui a resposta do monitor; contudo, melhora a sua dependência angular (HARVEY *et al.*, 1973, ALSMILLER Jr. e BARISH, 1974).

Considera-se que o absorvedor de nêutrons mais apropriado para ser empregado como BNI num monitor de albedo é aquele que apresente as seguintes características (STRAND e STORRUSTE, 1986, MARTINS e MAURÍCIO, 2001):

§ Emissão de radiação alfa ao invés da radiação gama.

§ Seção de choque microscópica com resposta da absorção similar ao do elemento detector de nêutrons empregado no monitor.

Avaliando materiais com alta seção de choque, o ouro, por exemplo, apresenta uma seção de choque para nêutrons térmicos de 98,8 barn, com absorção tipo $1/v$; entretanto, tem um altíssimo custo. Outro exemplo seria o do lítio-6 que está presente como isótopo em dois dos mais usados detectores na monitoração individual de nêutrons: ${}^6\text{LiF}$ e ${}^6\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$. A alta seção de choque para nêutrons térmicos (940 barn) do ${}^6\text{Li}$ é para a reação (n,α) ; emitindo, portanto, radiação alfa ao invés de radiação gama (LONE *et al.*, 1980, SEELMANN-EGGEBERT *et al.*, 1981). Desse modo, o lítio-6 seria um excelente absorvedor de nêutrons para ser empregado como um possível material em BNI. Por outro lado, o ${}^7\text{Li}$ possui uma seção de choque desprezível de 0,033 barn (DOUGLAS, 1981). Contudo, os compostos de lítio podem produzir nêutrons rápidos com energias de 1 até 16 MeV, por meio do trício produzido pela reação ${}^6\text{Li}(n,{}^3\text{H}){}^4\text{He}$ que interage com o lítio (LONE *et al.*, 1980); ainda que o rendimento de produção de nêutrons não seja significativo: aproximadamente um nêutron rápido é emitido para cada 105 nêutrons incidentes (LONE *et al.*, 1980, OSBORN *et al.*, 2006). Além disso, os compostos de lítio de uma maneira geral apresentam alto custo, são tóxicos, inflamáveis e corrosivos (MERCK, 2001). Assim como o boro, o ${}^{14}\text{N}$, o ${}^{63}\text{Cu}$ e o ${}^{197}\text{Au}$, o lítio-6 possui uma seção de choque do tipo $1/v$ (GRIFFITH, 1973, PERKS, 1993).

As seções de choque microscópicas para alguns materiais empregados como blindagens são apresentadas na Figura 2.11 (KAERI, 2006).

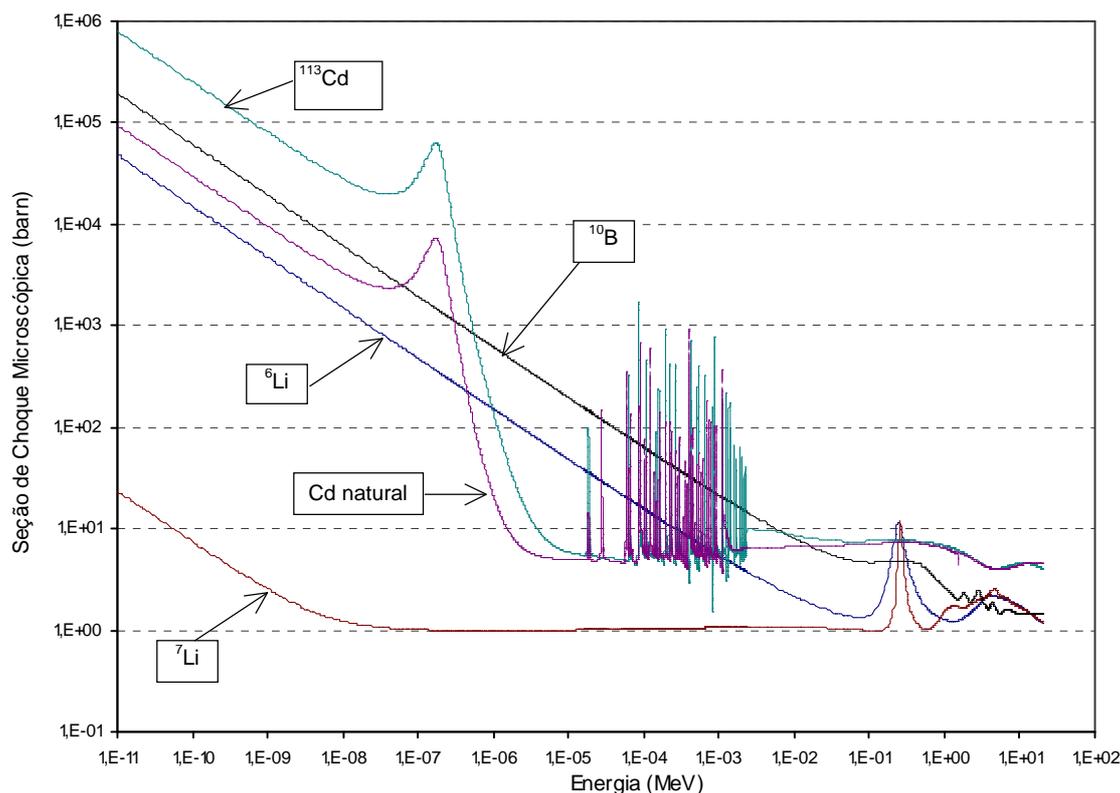


Figura 2.11: Seção de choque microscópica para alguns materiais comumente empregados como blindagem de nêutrons (KAERI, 2006)

Ainda que diversos absorvedores de nêutrons possam ser usados em BNIs, os dois elementos químicos mais empregados na monitoração individual são boro (B) e cádmio (Cd) (PIESCH, 1977, MARTINS e MAURÍCIO, 2001). Mesmo que possuam propriedades físicas e químicas diferentes, o Cd e o B apresentam alta seção de choque para nêutrons térmicos (SOHRABI e KATOUZI, 1991). Cada um desses dois absorvedores de nêutrons possui suas vantagens e desvantagens.

O cádmio natural apresenta 8 isótopos e uma seção de choque para nêutrons térmicos de 2450 barn, que é devido, principalmente, a altíssima seção de choque do ^{113}Cd : 19910 barn (SEELMANN-EGGEBERT *et al.*, 1981). O cádmio é um metal e pode ser manufaturado em finas lâminas. Porém, o uso do Cd apresenta grandes inconvenientes:

- ✘ É um metal tóxico (MERCK, 2001).
- ✘ Não apresenta uma seção de choque para nêutrons com resposta similar ao TLD-600, elemento detector de nêutrons do monitor.
- ✘ E, principalmente, decai emitindo radiação gama após capturar nêutrons, devido à reação (n,γ) (SEELMANN-EGGEBERT *et al.*, 1981).

Devido a sua seção de choque tipo corte (Figura 2.11), o cádmio causa uma deformação na curva de resposta de um monitor de albedo, pela captura somente dos nêutrons térmicos incidentes (BURGER e MORHART, 1977). A contribuição da radiação gama, resultante da reação $Cd(n,\gamma)Cd$ ou da existência de um campo de radiação misto, na formação do sinal termoluminescente do TLD-600, dificulta o cálculo da dose devido exclusivamente a nêutrons, acarretando portanto no aumento da incerteza deste resultado (LIU *et al.*, 1992, PIESCH e BURGHARDT, 1993). Por causa disto, o emprego do cádmio como elemento constituinte da blindagem de monitores de albedo resulta na complexidade da discriminação da radiação gama num campo misto: nêutron e fóton.

Por outro lado, o boro apresenta 2 isótopos naturais e uma seção de choque do tipo $1/v$, conforme descrito na Figura 2.11. A seção de choque para nêutrons térmicos do boro natural é de 759 barn, devido principalmente à alta seção de choque do ^{10}B de 3837 barn (SEELMANN-EGGEBERT *et al.*, 1981). O boro é um semi-metal que se apresenta sob o formato de pó, com estrutura cristalina ou amorfa (MERCK, 2001). O boro sob a forma física de pó pode ainda ser encontrado em vários compostos químicos (ESK, 1996): carbeto de boro (B_4C); nitreto de boro (BN); hexaboreto de cálcio (CaB_6); hexaboreto de európio (EuB_6); ácido bórico (H_3BO_3); diboreto de titânio (TiB_2). Um material com seção de choque inversamente proporcional à velocidade do nêutron, ou seção de choque tipo $1/v$, possui capacidade de absorção similar à sensibilidade do detector de albedo; ou seja, o absorvedor de nêutrons captura os nêutrons incidentes da mesma forma que eles são detectados.

O B_4C é um absorvedor de nêutrons muito prático; ele tem sido empregado em blindagem neutrônica de uma forma geral (LONE *et al.*, 1980, OSBORN *et al.*, 2006) e intensivamente na monitoração individual misturado com diversos materiais: cola plástica a base de PVA - poli(acetato de vinila) (MARTINS e MAURÍCIO, 2006); borracha (YEH *et al.*, 1981); resina fenólica (PIESCH e BURGHARDT, 1973, HARVEY *et al.*, 1993); PE (STUDENÁ *et al.*, 1989). Cabe destacar que não foi encontrado na literatura um percentual mínimo de absorção de nêutrons que uma BNI deve ter como característica de um monitor de albedo.

A absorção percentual de nêutrons do material em análise pode ser calculada, a partir da seção de choque macroscópica (Σ), pela equação 2.2 (GLASSTONE e SESONSKE, 1963):

$$\frac{I}{I_0}(\%) = e^{-\Sigma_i \cdot x_m} \cdot 100 = e^{-\frac{\rho \cdot N_a}{M} \cdot v_i \sigma_i \cdot x_m} \cdot 100 \quad 2.2$$

onde: ρ - densidade do material expressa em grama por cm^3 ;
M - peso molecular do material;
 N_a - constante de Avogadro ($0,6025 \cdot 10^{24}$ moléculas.mole⁻¹);
 V_i - número de átomos de cada elemento, i , na molécula do material;
 σ_i - seção de choque microscópica de cada elemento;
 x_m – espessura do material em análise.

Para vários elementos, i , a seção de choque macroscópica do material em análise Σ_i , é o somatório de cada um deles isoladamente:

$$\Sigma_i = N_1 \cdot \sigma_1 + N_2 \cdot \sigma_2 + \dots + N_i \cdot \sigma_i + \dots \quad 2.3$$

onde N_i é a quantidade de núcleos (ou átomos individualmente) por átomo grama.

Apesar de Σ ser denominado como “seção de choque macroscópica”, Σ não representa uma área; mas sim, sendo expresso em unidades de cm^{-1} , como um coeficiente de atenuação de nêutrons (GLASSTONE e SESONSKE, 1963). O que faz com que, após atravessar uma espessura, x_m , o percentual de absorção de nêutrons térmicos seja a razão entre o fluxo em análise e o fluxo incidente.

2.1.9 Considerações Teóricas sobre Materiais de Engenharia para Monitoração de Nêutrons

Além das macromoléculas encontradas na natureza, muitos produtos químicos denominados polímeros sintéticos também podem apresentar longas cadeias. Dentre os polímeros sintéticos, se encontram materiais de engenharia de importante aplicação na monitoração individual que podem ser divididos em dois grandes grupos (MANO, 1991):

- Termoplásticos: Amolecem quando aquecidos, podendo ser moldados; ao se resfriar se solidificam e esta operação pode ser repetida várias vezes desde que a matriz não tenha a presença de contaminantes ou de materiais dispersos.
- Termorrígidos: Endurecem a certa temperatura e permanecem neste estado, não podendo ser moldados outra vez.

Comumente, os materiais de engenharia não são empregados puros; mas sim como uma matriz num compósito junto com o reforço. Cada parte do compósito, ou mistura, apresenta uma característica distinta (GONÇALEZ, 2006):

✓ Matriz - que consiste em uma fase líquida que envolve completamente a outra parte.

✓ Reforço - material disperso, podendo ser na forma de partículas ou fibras.

Deste modo, quando um compósito é empregado na fase líquida, a mistura adquire o formato desejado antes da cura. As propriedades dos compósitos dependem das interações entre essas partes, além da proporção de cada um deles e do arranjo da parte dispersa.

A resina epóxi é uma das matrizes que podem ser empregadas na produção de compósitos estruturais; como são aqueles destinados à fabricação de BNIs. O emprego deste termorrígido em BNIs decorre das suas características (MANO, 1991, GONÇALEZ, 2006, EPOXTEC, 2008):

- Alta adesividade a cargas;
- Baixa contração após a cura;
- Estrutura infusível e insolúvel, após a cura;
- Resistência química e térmica.

Um dos termoplásticos mais empregados em dosimetria e monitoração individual de nêutrons é o PE. Em relação ao seu grau de ramificação, existem dois tipos de PE: o Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e o Polietileno de Baixa Densidade (PEBD). Ambos apresentam estrutura muito simples, composta basicamente de carbono e hidrogênio. As características do PEAD são (MANO, 1991):

- ☒ Alta resistência ao desgaste físico.
- ☒ Alta resistência química e a solventes.
- ☒ Boa transformabilidade.
- ☒ Custo muito inferior ao poli(metacrilato de metila) (PMMA) que apresenta qualidades semelhantes.
- ☒ Densidade variando entre 0,94 e 0,97 (próxima da água).
- ☒ Fisiologicamente inerte.
- ☒ Mínima absorção de água.
- ☒ Resistência a condições atmosféricas adversas: umidade relativa alta ($\geq 85\%$) e temperatura ambiente alta (de 40°C a 50°C).
- ☒ Resistência a impactos.

2.2 Calibração e Caracterização de Monitores Individuais de Nêutrons

2.2.1 Simuladores

A resposta de albedo na monitoração individual de nêutrons acarreta a presença do corpo humano (SOHRABI e KATOUZI, 1992). Entretanto, em nenhum momento, monitores individuais podem ser calibrados sobre o corpo humano: simuladores são necessários, portanto, para este propósito. Isto requer que nos processos de irradiação de monitores individuais de nêutrons esteja obrigatoriamente definido um simulador do corpo humano.

2.2.1.1 Descrição dos Simuladores da ISO

Para calibração de monitores individuais de nêutrons para corpo inteiro na grandeza $H_p(10)$ é necessário utilizar o simulador de tronco da *International Organization for Standardization (ISO)*, denominado em inglês *ISO Water Slab Phantom*. Ao longo deste trabalho, referir-nos-emos a ele como “Simulador de Tronco da ISO” ou simplesmente simulador. Este simulador deve apresentar formato de um paralelepípedo e possuir as seguintes dimensões: face frontal de 300 x 300 mm² e profundidade de 150 mm para representar o tronco humano (ALBERTS *et al.*, 1995). Ele possui as suas paredes de PMMA; sendo a frontal de 2,5 mm de espessura e as demais de 10 mm (ALBERTS *et al.*, 1995). A parede frontal reta facilita a fixação de monitores individuais neste simulador, diferentemente do que ocorria anteriormente na esfera da ICRU (*International Commission on Radiation Units*) (GIBSON, 1988).

PMMA é um termoplástico de engenharia com densidade de 1,19 g.cm⁻³ e com composição mássica de 8,05% de hidrogênio, 59,99% de carbono e 31,96% de oxigênio (MANO, 1991, MERCK, 2001). O PMMA pode ainda encontrar-se citado na literatura por alguns de seus produtos mais conhecidos comercialmente, como por exemplo: acrígel, lucite, perspex, plexiglas (MANO, 1991).

Quando for utilizado o simulador de tronco feito de PMMA, com as dimensões descritas acima e preenchido com água, não é necessário aplicar fatores para corrigir a resposta em relação ao espalhamento que ocorre no tecido da ICRU, tanto para irradiações com fótons como para irradiações com nêutrons (ALBERTS *et al.*, 1995, ISO, 1998, 1999). Isto porque quando um monitor individual é calibrado sobre a face frontal do simulador considera-se que determinará adequadamente $H_p(10)$ quando usado no corpo humano e, assim, fornecerá uma estimativa com suficiente exatidão da dose efetiva (JULIUS, 1996, BORDY *et al.*, 2000).

Ao contrário de quando o simulador é utilizado para irradiação com fótons, a pureza da água no seu interior é extremamente crítica para irradiação com nêutrons;

pois, os elementos químicos dissolvidos podem espalhar os nêutrons e/ou capturá-los pela reação (n,γ) , como ocorre neste último caso com o sódio e o cloro presentes na água comum, por exemplo.

2.2.1.2 Incertezas Associadas a Simuladores

A grandeza operacional $H_p(10)$ está definida no corpo humano, sendo medida diretamente sobre a pessoa. Durante este processo de medida, a pessoa influencia o campo de radiação devido ao espalhamento e atenuação da radiação. Considerando-se que $H_p(10)$ é medida no corpo da respectiva pessoa, o seu valor varia de uma pessoa para outra, como também depende da posição do corpo em que ela está sendo medida (ALBERTS *et al.*, 1995). Isto acarreta numa incerteza associada à medida do equivalente de dose pessoal no corpo do trabalhador.

Antes da padronização do simulador de tronco da ISO, diferentes simuladores maciços ou preenchidos com água eram empregados na irradiação de monitor individual de nêutrons apresentando os mais variados formatos: cilíndrico, cúbico, esférico e paralelepípedo (SOHRABI e KATOUZI, 1992).

Alguns estudos indicaram que havia uma variação de até 50 % na resposta de monitores de albedo, quando os mesmos ao serem calibrados eram colocados muito próximos da borda dos simuladores que estavam sendo usados, em relação aos colocados no centro dos simuladores (NASH e JOHNSON, 1980, SOHRABI e KATOUZI, 1992). Para minimizar eventuais variações na resposta, foi sugerido (NASH e JOHNSON, 1980) que dever-se-ia posicionar os TLDs no centro do monitor e que o monitor individual deveria ser colocado no centro geométrico da face frontal do simulador, como está apresentada na Figura 2.12.

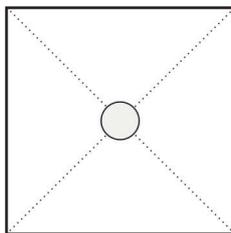


Figura 2.12: Irradiação de um único monitor individual posicionado no centro da face frontal do simulador de tronco da ISO

2.2.2 Considerações Teóricas sobre o Algoritmo de $H_p(10)$ de Nêutrons

A dose de nêutrons deve ser calculada a partir da subtração das leituras do TLD-600 pelo TLD-700 (STUDENÁ *et al.*, 1989). Contudo, deve-se ter em mente que

nos campos de nêutrons de alta energia a sensibilidade do detector a nêutrons é baixa enquanto a sensibilidade a fótons se mantém constante (ALBERTS *et al.*, 1996).

Existem vários métodos para se separar as componentes das radiações de nêutrons e de fótons do sinal termoluminescente emitido pelo TLD-600 e pelo TLD-700 (BURGKHARDT e PIESCH, 1982, IAEA, 1985, WEINSTEIN *et al.*, 2006); conforme mostrado na Figura 2.5:

- a) Integração da carga dos picos 4 + 5 de ambos os TLDs, quando eles são usados em par.
- b) Integração da carga dos picos 4 a 7 de ambos os TLDs, quando eles são usados em par.
- c) Integração, separadamente, das cargas dos picos 4 + 5 e do pico 6 + 7, somente do TLD-600.
- d) Razão entre a altura dos picos 4 + 5 e dos picos 6 + 7 de ambos os TLDs, quando eles são usados em par.

O método (a) tem se mostrado o mais atrativo sob o aspecto de medida de baixas doses, próximas ao nível de registro ou quando se deseja alcançar um baixo valor para o LID. Isto é devido a vários motivos:

- ⇒ A altura dos picos depende do tratamento térmico realizado (REGULLA e DRISCOLL, 1993, McKEEVER *et al.*, 1995).
- ⇒ A medida dos picos 4 + 5 isoladamente acarreta numa melhor exatidão para baixas doses de nêutrons que são as mais críticas de serem detectadas (BURGKHARDT e PIESCH, 1982).
- ⇒ A sensibilidade gama na região dos picos 6 + 7 não é desprezível e varia de lote para lote de detectores (DELGADO *et al.*, 2007).
- ⇒ A razão entre os picos 4 + 5 e os picos 6 + 7 não é linear (DOUGLAS e MARSHALL, 1978).
- ⇒ Após irradiação com nêutrons, o pico 4 + 5 apresenta uma estabilidade maior do que os picos 6 + 7 (ATTIX, 1986).
- ⇒ Existe uma tendência de aumento dos picos 6 + 7 no TLD-600 em decorrência do trício contido em TLDs usados (BURGKHARDT e PIESCH, 1982, McKEEVER *et al.*, 1995).
- ⇒ Não é necessário um conhecimento das energias das radiações gamas e neutrônicas num campo misto (LIU e SIMS, 1991).
- ⇒ O deslocamento da curva TL pode comprometer a medida de um ou mais picos.
- ⇒ Parte do pico 6 e, principalmente, o pico 7 se encontram na região de emissão de luz infravermelha da prancheta (BURGKHARDT e PIESCH, 1982).

Para avaliação da dose de fótons recebida por um usuário de um monitor individual, durante um período do seu uso, é preciso utilizar um Monitor de Controle (MC), além do próprio Monitor do IOE (M_{IOE}) (MEIRA, 2001). Este monitor de controle tem por finalidade avaliar a fração da dose devido à Radiação de Fundo (RF) a qual o monitor foi submetido quando não usado pelo IOE. Diferentemente para a medida da dose nêutrons, são muito raras as instalações que apresentem RF para nêutrons e por causa disto necessitam de um monitor de controle para nêutrons (MARTINS e MAURÍCIO, 2006, 2007).

Um dos valores mais críticos a serem calculados pelo algoritmo é o do LID que depende de um conjunto de fatores (McKEEVER *et al.*, 1995). Para o cálculo do LID em cada instalação, são empregados ambos os fatores de calibração para a leitura de fótons dos TLDs e ambos os desvios padrões das médias das leituras das RFs de fótons dos TLDs, além do Fator de Conversão Local (FCL), conforme é mostrado na equação 2.4 (BURGKHARDT e PIESCH, 1982, PIESCH e BURGKHARDT, 1993).

$$LID(mSv) = FCL \sqrt{(2.FC6.s_{RF\gamma6})^2 + (2.FC7.s_{RF\gamma7})^2} \quad 2.4$$

onde:

FCL - Fator de Conversão Local para instituição e setor ($mSv.mGy^{-1}$);

FC(6:7) - Fator de Calibração para a leitura de fótons do TLD-600 - '6' ou do TLD-700 - '7' ($mGy.nC^{-1}$);

$s_{RF\gamma(6:7)}$ – desvio padrão da leitura da radiação de fundo de fótons para o lote do '6' - TLD-600 ou para o lote '7' - TLD-700 (nC).

2.2.3 Fator de Conversão Local de Monitores Individuais de Nêutrons

Devido à alta dependência energética dos monitores de albedo, assim como de qualquer monitor individual para nêutrons, torna-se necessário aplicar um FCL para corrigir a resposta em função do tipo de espectro de nêutrons onde os monitores estão sendo empregados (THOMAS *et al.*, 1999).

Para o monitor de albedo de uma componente, tem sido proposto que, quando o usuário de uma mesma instituição trabalhar em instalações com diferentes campos de nêutrons, como, por exemplo, num reator de pesquisa e acelerador de partícula, e, conseqüentemente, existirem diferentes FCLs a serem aplicados, ele deve usar dois monitores independentes, ou seja, um para cada instalação (LUSZIK-BHADRA *et al.*, 1993, MARTINS e MAURÍCIO, 2006, 2007). A experiência na

monitoração individual de nêutrons reforça a decisão de empregar o monitor tipo albedo em somente um único tipo de aplicação, independentemente de quantas componentes ele possua (PIESCH e BURGKHARDT, 1988). Por outro lado, existe a necessidade da instituição usuária (onde existirem mais de um tipo de instalação, como por exemplo reator de pesquisa e acelerador) do monitor entender as limitações deste tipo de sistema de monitoração (GRIFFITH *et al.*, 1979), ou seja de que existe para cada instalação da instituição um FCL mais adequado (PIESCH e BURGKHARDT, 1988).

Para os monitores de albedo de multicomponentes usados em instalações onde existem campos de nêutrons com complexo grau de moderação, tem sido proposto (DOUGLAS, 1981) que o FCL deve ser proporcional à fração de nêutrons térmicos incidentes presentes no campo. Contudo, pode não existir, necessariamente, uma relação entre a fração de nêutrons incidentes, que são térmicos, e a energia média para diferentes espectros de nêutrons. Uma blindagem ou arranjo de irradiação com uma faixa de ressonância modificará profundamente o espectro de nêutrons e tornará difícil este tipo de análise (DOUGLAS e MARSHALL, 1978, PERKS, 1993). Por exemplo, o ferro possui uma seção de choque não desprezível; mas com um vale de absorção de nêutrons, também conhecido como janela, em torno de 24 keV (SCHWARTZ e EISENHAUER, 1980).

Independentemente de qual grandeza está sendo medida, o principal problema na avaliação da dose de nêutrons com monitores individuais de albedo é a calibração do sistema e, portanto, a determinação do FCL (PIESCH, 1982, GIBSON, 1988, LIU e SIMS, 1990, ALBERTS *et al.*, 1996, THOMAS *et al.*, 1999). A resposta dos monitores de albedo varia, por exemplo, por cerca de aproximadamente 15 vezes em campos de nêutrons na faixa de energia de 0,1 a 1,7 MeV (DOUGLAS e MARSHALL, 1978, PERKS, 1993) que é a faixa na qual todos os monitores de albedo apresentam o mesmo formato na curva de resposta (vide Figura 2.7). A resposta do monitor de albedo do IRD, por exemplo, varia de um fator aproximadamente igual a 60 na faixa de energia desde os nêutrons térmicos até aqueles com energia de 2,0 MeV (CARVALHO, 1975). Outros monitores de albedo apresentam um valor intermediário entre essas duas razões, como 25 vezes (ALBERTS *et al.*, 1996). Isto exemplifica a fortíssima dependência energética dos monitores de albedo que precisam monitorar uma faixa tão extensa de nêutrons: 0,0253 eV a 20 MeV, (ISO, 2005). Desse modo, um monitor de albedo não pode ser utilizado na avaliação de doses sem a aplicação de um FCL, para a correção da resposta. Como correção da resposta, entende-se o emprego de um fator no algoritmo, no nosso caso FCL, que corrija a dependência

energética da resposta do monitor de albedo dentro da larga faixa de utilização de um monitor individual de nêutrons (THOMAS *et al.*, 1999, ISO, 2005).

Para determinação do FCL, os seguintes aspectos dos tipos de instalações ou áreas de trabalho devem ser considerados (DOUGLAS e MARSHALL, 1978, DOUGLAS, 1981):

- a) O espectro de nêutrons é constante.
- b) Existe uma fonte de nêutrons, com vários graus de moderação.
- c) Existe mais do que uma fonte de nêutrons e/ou tipo de blindagens.

Existe um único FCL aplicável para cada usuário/instalação, mesmo que o IOE possa estar exposto a um campo de nêutrons com várias ordens de grandezas de energia (THOMAS *et al.*, 1999). Isto porque, de fato, o FCL representa num único número todo o conjunto de fatores de calibração que poderiam ser aplicados em cada faixa de energia, em decorrência da dependência energética do monitor individual de nêutrons.

Por outro lado, não pode se esperar que um FCL seja imutável; pois, pode-se esperar que, como conseqüência de variação na moderação no campo de nêutrons (como apresentado no parágrafo anterior), o fator a ser aplicável não seja mais representativo (THOMAS *et al.*, 1999). Para correção no fator de calibração desta variação entre a moderação encontrada no campo de nêutrons e a esperada, é aplicado no algoritmo o fator de correlação entre a moderação do campo de nêutrons esperado e o encontrado, denominado "FIA". Com a aplicação de um "FIA", disponível nos monitores de nêutrons de múltiplas componentes, é possível realizar essa correção no FCL (PIESCH e BURGKHARDT, 1980). O FIA também pode ser entendido como um FCL corrigido, quando aplicável.

O conhecimento do espectro de nêutrons de uma instalação é necessário para se aplicar uma correção à resposta do monitor que leve em conta a sensibilidade do sistema de monitoração individual para esse espectro de energia e diferenças entre os espectros incidentes e o de calibração (SCHWARTZ e EISENHAUER, 1980, 1982, MAURÍCIO, 1987, LIU *et al.*, 1990). Isto porque a resposta de um monitor de albedo é tanto mais exata quando o mesmo for calibrado para o campo de nêutrons onde estará sendo usado (PIESCH e BURGKHARDT, 1980, FAJARDO e MAURÍCIO, 1990, ALBERTS *et al.*, 1996, MARTINS e MAURÍCIO, 2006). No caso específico de um trabalhador exposto simultaneamente a várias fontes de nêutrons, torna-se necessário a obtenção de um FIA específico para este conjunto de fontes.

Avaliando a resposta de dois monitores de albedo de duas-componentes, verificou-se (DOUGLAS e MARSHALL, 1978, DOUGLAS, 1981, PIESCH, 1982) que, fora da faixa de nêutrons térmicos, a razão entre a resposta dos nêutrons incidentes e

a de albedo é constante para nêutrons monoenergéticos, como apresentado na Figura 2.13. Quando da irradiação por um espectro de nêutrons que não fosse monoenergético, esta razão forneceria uma indicação da componente de nêutrons térmicos na radiação incidente. Portanto, dentro de uma margem de tolerância, a partir da alteração do FCL esperado é possível constatar uma modificação na moderação do campo de nêutrons onde o monitor de albedo foi usado.

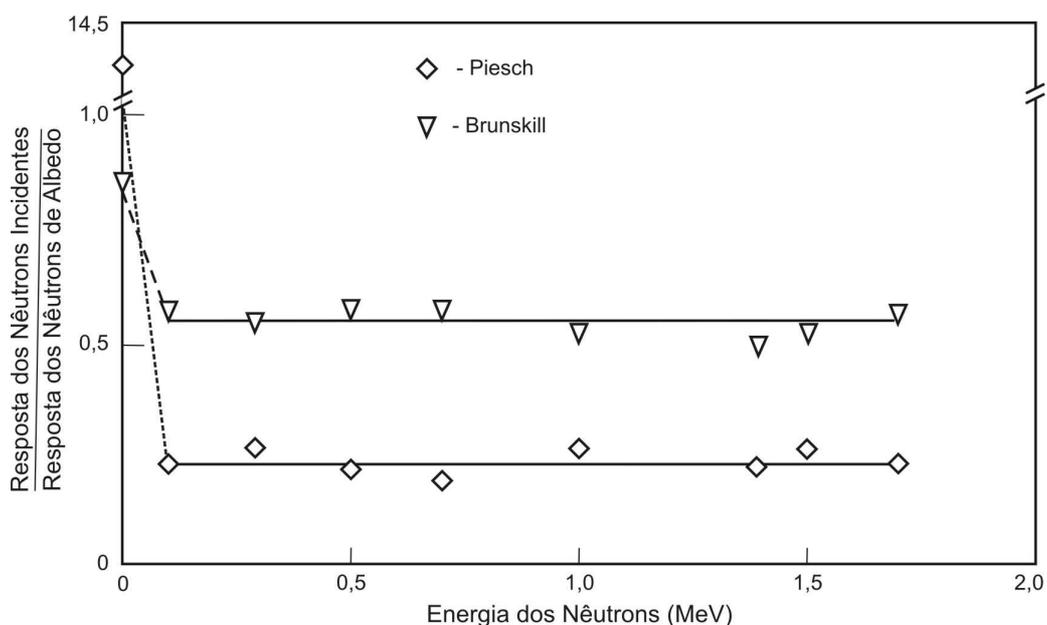


Figura 2.13: Razão das respostas das componentes de nêutrons incidentes e de albedo para dois monitores de albedo em campos de nêutrons monoenergéticos (DOUGLAS e MARSHALL, 1978)

A razão entre a resposta do monitor a campos de nêutrons incidentes e a do monitor a campos de nêutrons de albedo foi denominada de “razão i/a ” (DOUGLAS e MARSHALL, 1978, LIU *et al.*, 1990, ALBERTS *et al.*, 1996). Por causa disto, a calibração de um monitor de albedo deve ocorrer em campos padrões de nêutrons da ISO que permitam a comparação de seus resultados com a de outros monitores. Esta calibração resultará em curvas específicas para cada espectro de nêutrons relacionando o FIA com a “razão i/a ”; permitindo, portanto, a correção da leitura do monitor de albedo (PIESCH e BURGKHARDT, 1980).

Um monitor de albedo de duas-componentes apresenta-se mais versátil em relação ao monitor de uma componente; pois, é possível se fazer correções na calibração do monitor de albedo para o campo de nêutrons no qual ele foi usado (STUDENÁ *et al.*, 1989, DA ROSA, 1993). Teoricamente, um monitor de múltiplas componentes, portanto, seria útil por fazer correções no FCL para variações no espectro em decorrência de variações na moderação do campo (PIESCH, 1985).

Seguindo esta linha de raciocínio, os monitores de albedo de 3 ou mais componentes forneceriam teoricamente muito mais informações sobre o campo de nêutrons monitorado. Verificou-se, contudo, que não havia melhoria significativa na resposta em relação ao aumento do custo de processamento do monitor de duas componentes (FALK, 1971). Para que houvesse uma informação complementar sobre o campo de nêutrons seria necessário o emprego de um detector com resposta para nêutrons rápidos, como pode ser visualizado na Figura 2.2 (PIESCH, 1985). A opção por se empregar um monitor de duas-componentes está baseada no fato de que este tipo de monitor é apropriado, em termos de custo benefício, para avaliar com suficiente exatidão $H_p(10)$ e permitir a correção de variações da sua resposta nos campos de nêutrons (PIESCH, 1985, PIESCH e BURGHARDT, 1988).

2.2.3.1 Calibração do Monitor Individual *In Situ*

Espectrômetros de nêutrons têm sido grandemente aplicados para determinação dos espectros das fluências encontradas nos ambientes de trabalho (KLEIN e LINDBORG, 1995, ALBERTS *et al.*, 1996). Considerando-se, contudo, que a atividade de espectrometria requer um considerável esforço e é seriamente afetada por diversos parâmetros, tais como: instrumentação sofisticada, altas temperaturas, umidade, interferências eletromagnéticas e aspectos de segurança em centrais nucleares, as calibrações de campo nem sempre podem ser realizadas satisfatoriamente (LIU *et al.*, 1992, ALBERTS *et al.*, 1996).

Para se obter o fator de calibração (FCL) de monitor individual de nêutrons para um setor de uma instalação (por exemplo, a sala de controle de um acelerador), a maneira mais prática é expondo-se no local desejado, simultaneamente, o monitor individual e um monitor de área que apresente a curva de resposta o mais próximo possível da curva apresentada na Figura 2.1 para a grandeza de interesse (no caso deste trabalho $H_p(10)$) (PIESCH, 1985, MAURÍCIO, 1987, ALBERTS, 1999). Nesta situação, faz-se uma aproximação de que a grandeza $H^*(10)$ medida pelo monitor de área é a melhor indicação de $H_p(10)$.

Adicionalmente, este monitor de área também deve apresentar na faixa de energia do campo de nêutrons de interesse as seguintes características (SCHUCH, 1978, PIESCH, 1985, FAJARDO e MAURÍCIO, 1990, ALBERTS *et al.*, 1996): alta exatidão, alta sensibilidade para detecção de nêutrons, baixa dependência angular, estabilidade a longo prazo em termos de condições ambientais, resposta isotrópica, robustez mecânica e, principalmente, disponibilidade para uso em termos de custo. Não existe um monitor de área que atenda completa e perfeitamente a todas essas características, numa faixa de medida de nêutrons térmicos até 20 MeV (ICRP, 1995);

ele tem sido alvo de pesquisa e desenvolvimento (BORDY *et al.*, 1998). A opção pelo emprego de um determinado monitor de área na prática de integração é, de fato, concretizada pela disponibilidade do monitor que atenda a maior parte daquelas características. Na instalação onde será efetuada esta integração, torna-se aplicável um estudo dos locais de efetiva necessidade da monitoração individual de nêutrons. Os monitores individuais e de área devem permanecer integrando durante um período de tempo tal que a dose alcance, sempre que possível, um valor em torno de aproximadamente 2 mSv; ainda que este procedimento seja bastante trabalhoso e demorado (MAURÍCIO, 1987). Considerando-se que não haja variações cronológicas no espectro de nêutrons, o FCL é fornecido pela equação 2.5 (HANKINS, 1976, SCHUCH, 1978, MAURÍCIO, 1987, BURGKHARDT e PIESCH, 1988, ALBERTS, 1999):

$$FCL = \frac{H_p(10)}{D_n} \cong \frac{H^*(10)}{(L6a.FC6 - L7a.FC7)} \quad 2.5$$

Onde:

D_n – dose bruta de nêutrons, sem correção (mGy).

$L(6:7)(a)$ – leitura do '6' - TLD-600 ou do '7' - TLD-700, para o 'a' - campo de nêutrons de albedo (nC).

$H^*(10)$ – equivalente de dose ambiente integrado pelo monitor de área (mSv), considerado aproximadamente igual ao $H_p(10)$.

2.2.3.2 Considerações Teórico-Práticas sobre o FCL

Na situação em que um monitor individual necessite ser empregado numa instalação que ele não tenha sido diretamente calibrado neste local, pode-se, porém, inferir que o FCL seja similar ao de um mesmo tipo de instalação. Dentre os parâmetros que podem servir para identificar a similaridade entre os espectros de instalações está (PIESCH, 1985, PIESCH *et al.*, 1985, SWAJA, 1988):

- Comparação com a resposta de outros monitores individuais (DOUGLAS e MARSHALL, 1978).
- Compêndio de espectros de nêutrons (GRIFFITH *et al.*, 1979, IAEA, 1985, 1990, 2001).
- Energia média do campo de nêutrons de instalações do mesmo tipo (THOMAS *et al.*, 1999).
- Espectro do campo de nêutrons (FAJARDO e MAURÍCIO, 1990).
- Estudos de análises ocupacionais (THOMAS *et al.*, 1999).

- Metodologias de calibração de outros monitores individuais de nêutrons (HANKINS, 1976, PIESCH, 1985).
- Razão entre 2 tipos diferentes de esferas de moderadores [por exemplo: razão entre 2"/12" (PIESCH, 1985); 3"/9" (NASH *et al.*, 1985, PIESCH, 1985); 3"/10" (ANDERSON e CRAIN, 1979, PIESCH, 1985, STUDENÁ *et al.*, 1989); 3"/12" (MAURÍCIO, 1987)].
- Razão de cádmio: razão entre a fluência de nêutrons com e sem uma blindagem de cádmio; ou seja, razão entre a resposta de nêutrons térmicos e a total.
- Razão entre as doses devido a fótons e devido a nêutrons.

Um outro método mais simples, consiste em classificar os FCLs em tipos comuns de aplicação; como por exemplo (PIESCH e BURGKHARDT, 1988):

N1 → Reactores e aceleradores, grande blindagem.

N2 → Ciclo do combustível, baixa blindagem.

N3 → Fontes radioativas de nêutrons.

N4 → Aceleradores de pesquisa.

E fazer ajuste fino no FCL por meio do "FIA".

2.2.4 Normas e Regulamentos para Sistemas de Monitoração Individual de Nêutrons

Na Tabela 2.1 está apresentado um resumo com a descrição dos testes de desempenho da norma ISO 21909 (2005) que serão empregados na caracterização deste sistema de monitoração individual. Esta tabela descreve uma tradução livre; pois, não existe uma oficial.

Tabela 2.1: Descrição dos testes de desempenho da ISO 21909

Teste*	Tipo de Teste	Descrição do Teste	Critério
C.3.1	Homogeneidade do Lote	O CV do H_a para um conjunto de N monitores não deve exceder 20%	$\leq 20\%$
C.3.2	Reprodutibilidade	O CV do H_a para um conjunto de N monitores não deve exceder 20% para cada monitor separadamente quando irradiados 10 vezes	$\leq 20\%$
C.3.3	Linearidade	A resposta não deve variar por mais de 10% quando os monitores são irradiados com nêutrons e fótons produzindo leituras de H_a para 1 mSv, 3 mSv, 10 mSv, 30 mSv e 100 mSv	$\leq 10\%$
C.3.4	Limite Inferior de Detecção	O LID não deve exceder um H_a de 0,3 mSv	$\leq 0,3$ mSv
C.3.5	Desvanecimento	A resposta dos monitores irradiados no início do período de armazenamento não deve se alterar por mais 10% para 90 dias de armazenamento em condições padrão de teste	$\leq 10\%$
C.3.6	Sinal Residual	O sinal residual não deve exceder um H_a de 0,3 mSv depois de uma irradiação de H_a de 10 mSv	$\leq 0,3$ mSv
C.3.7	Auto Irradiação	Após um período de armazenamento de 60 dias, a dose não deve se alterar para um H_a de mais de 0,3 mSv	$\leq 0,3$ mSv
C.3.8	Estabilidade da Resposta sob Diversas Condições Climáticas com Armazenamento por:	A H_a dos monitores irradiados no início ou no final do período de armazenamento não deve diferir do VC em mais de:	
C.3.8.1	30 Dias nas Condições Climáticas Padrão de Teste	5%; ou seja de 0,95 a 1,05	$\leq 5\%$
C.3.8.2	48 horas: Umidade Relativa do Ar $\geq 90\%$ e Temperatura Ambiente = $40^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$	10%; ou seja 0,90 a 1,10	$\leq 10\%$
C.3.9	Efeito da Luz sobre o Monitor	Quando monitores são expostos à iluminação equivalente à luz solar de 1000 W.m^{-2} e irradiados no início ou no final do período de armazenamento:	
C.3.9.1	Efeito na Dose Zero da Exposição à Luz por 24h	A dose zero não deve se alterar para mais do que um H_a de 0,3 mSv	$\leq 0,3$ mSv
C.3.9.2	Efeito na Resposta da Exposição à Luz por 168h (1 semana)	O H_a não deve diferir em mais de 10% daqueles obtidos com os monitores mantidos no escuro. O H_a deve ser de aproximadamente 1 mSv	$\leq 10\%$
C.3.10	Dependência Angular	A média aritmética da resposta do monitor individual em ângulos de incidência de 0° , 15° , 45° e 60° não deve diferir em mais de 30% da resposta na incidência normal. $H_p(10)$ (nêutrons) ≈ 1 mSv	$\leq 30\%$

Nota: * - referente ao código da Norma ISO 21909.

Siglas: H_a – *apparent photon dose equivalent*; $H_p(10)$ avaliado como se o monitor tivesse sido irradiado com uma fonte de fótons de referência.

CV – Coeficiente de Variação (Anexo C).

VC – Valor Verdadeiro Convencional.

No Brasil, a certificação de laboratórios que prestam serviços de medidas dosimétricas e radiométricas foi designada para ser realizada pelo IRD (BRASIL, 1995a). A certificação de serviços de monitoração individual externa de corpo inteiro para fótons foi regulamentada por meio de uma portaria que descreve um conjunto de regulamentos exclusivamente para monitores individuais passivos para fótons de corpo inteiro (BRASIL, 1995b, IRD, 1995a, 1995b). Esta legislação não contempla nem monitores ativos, nem outros tipos passivos para monitoração individual externa, como a de corpo inteiro para nêutrons ou a de extremidade para fótons.

Posteriormente, o IRD constituiu o Comitê de Avaliação de Serviços de Monitoração Individual Externa para Nêutrons (CASMIN) para escrever os regulamentos específicos para certificação de corpo inteiro para nêutrons. Em 2001, o IRD editou para consulta pública entre todos os serviços de monitoração individual externa certificados, na época exclusivamente para fótons, 3 diferentes regulamentos sob a forma de *drafts* para consulta pública (IRD, 2001a, 2001b). Até a presente data, não foram implementados os processos de certificação para sistemas de monitoração individual externa de corpo inteiro para nêutrons; pois, nem os regulamentos foram editados na sua forma definitiva, nem sua sistemática de certificação estabelecida por portaria. Desta forma, enquanto que para o emprego no Brasil de monitores individuais passivos de fótons, a certificação (IRD, 1995a, 1995b) se encontra bem estabelecida, para nêutrons, ela nunca foi implantada (IRD, 2001a, 2001b).

Dentre estes regulamentos, o IRD-RT-007.01/01 (IRD, 2001b) estabelece os critérios e condições de desempenho de sistemas de monitoração individual para nêutrons. Na Tabela 2.2, está apresentado um resumo com a descrição destes testes de desempenho do IRD (2001b). A redação completa dos testes se encontra no Anexo B. Ainda que os regulamentos nunca tenham sido editados em sua forma definitiva, a caracterização do monitor pelos testes de desempenho do IRD é válida porque complementa os de caracterização da ISO 21909.

Tabela 2.2: Descrição dos testes de desempenho do IRD

Teste*	Tipo de Teste	Descrição do Teste	Critério
4.3.1	Reprodutibilidade	O CV do VA não deve ser maior que 15% para cada monitor considerado individualmente, como também para o conjunto de N monitores considerados coletivamente, para uma dose de ≈ 5 mSv	$\leq 15\%$
4.3.2	Limite Inferior de Detecção	O LID deve ser menor ou igual a 0,2 mSv, com 50% de nível de confiança	$\leq 0,2$ mSv
4.3.3	Estabilidade sob Diversas Condições Climáticas	Os VAs com monitores irradiados no início ou no final do período de armazenamento não devem diferir do VC em mais de:	
4.3.3a	Armazenamento por 30 dias nas condições climáticas padrão de Teste	15%; ou seja de 0,85 a 1,15	$\leq 15\%$
4.3.3b	Armazenamento por 90 dias nas condições climáticas padrão de teste	20%; ou seja de 0,80 a 1,20	$\leq 20\%$
4.3.3c	Armazenamento por 7 dias: H padrão e temperatura ambiente = $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$	25%; ou seja de 0,75 a 1,25	$\leq 25\%$
4.3.3d	Armazenamento por 30 dias: H $\geq 90\%$ e temperatura ambiente $\approx 25^{\circ}\text{C}$	25%; ou seja de 0,75 a 1,25	$\leq 25\%$
4.3.4	Efeito da Luz sobre o Monitor		
4.3.4a	Efeito da Luz sobre a Dose Zero do Monitor	Após uma exposição de 24 horas à luz, o VA nos monitores não irradiados não deve sofrer uma alteração maior que o LID exigido	$\leq 0,2$ mSv
4.3.4b	Efeito da Luz sobre a Resposta do Monitor	Após exposição de 168 horas à luz, o VA não deve diferir em de 15% daquele obtidos com monitores mantidos no escuro	$\leq 15\%$
4.3.5	Linearidade	A linearidade do sistema para doses de nêutrons de 0,2; 1; 10 e 100 mSv não deve variar em mais de 30%	$\leq 30\%$
4.3.6	Dependência Angular	O VA médio, para ângulos de incidência de 0° , 30° , -30° e 60° em relação à normal, não deve diferir em mais de 20% em relação à incidência normal	$\leq 20\%$
4.3.7	Discriminação Nêutron-Gama	O VA médio, para dose de nêutrons entre 1 e 10 mSv, acrescida de uma dose de fótons 3 vezes maior, não deve diferir em mais de 20% do VA para a mesma dose, obtida apenas com uma fonte de nêutrons	$\leq 20\%$
4.3.8	Resistência a Impactos	O monitor e cada uma de suas partes devem resistir ao impacto de uma queda livre da altura de 1,5 m sobre uma superfície rígida	

Nota: * - referente ao código do regulamento do IRD.

Siglas: H – umidade relativa do ar.

VA – Valor Avaliado.

2.2.5 Validação de Resultados da Monitoração Individual de Nêutrons

2.2.5.1 Desempenho dos Monitores de Albedo em Intercomparações

Em diversas intercomparações para a medida de doses de nêutrons, em campos de nêutrons ou mistos (gama e nêutrons) realísticos, os monitores de albedo estiveram entre os que apresentaram a melhor resposta (SWAJA, 1988). De uma forma geral, para os monitores individuais de nêutrons tipo albedo, a precisão é normalmente maior do que para outros monitores de nêutrons para altas energias (VAN DIJK *et al.*, 2000). Assim, é possível a obtenção de um bom desempenho com monitores individuais de albedo, mesmo em campos de nêutrons rápidos, com a aplicação adequada de fatores de calibração e quando o valor verdadeiro convencional não está abaixo do LID. Numa intercomparação americana em campos de nêutrons rápidos em torno de 20 MeV, o laboratório que empregou a técnica de albedo e TLDs foi aquele que apresentou um dos melhores resultados dentre os 9 participantes (McDONALD *et al.*, 1993).

2.2.5.2 Curvas Trombeta

Para se avaliar o desempenho global de um determinado tipo de sistema de monitoração individual, costuma-se empregar as “curvas trombeta” (BÖHM *et al.*, 1994, CHRISTENSEN e GRIFFITH, 1994). Elas têm sido amplamente empregadas em intercomparações internacionais (ZIMBAL e SCHUHMACHER, 2005).

Por causa, principalmente, da extensa faixa de medida da dose, da dependência angular e da forte dependência energética de todos os detectores de nêutrons, até um fator 2 pode ser aceito na medida da dose avaliada de nêutrons acima do valor verdadeiro convencional (VC) (BÖHM *et al.*, 1994). Porém, para a subavaliação do VC da dose de nêutrons, a incerteza associada é mais restritiva.

A incerteza aceitável para um valor de dose varia em função do seu VC, do Nível de Registro (NR) e do Fator da Incerteza (F) estipulado para cada tipo de medida: fótons para corpo inteiro, fótons para extremidade, nêutrons para corpo inteiro. Assim sendo, o Limite Superior (H_{is}) e o Limite Inferior (H_{li}) aceitáveis na monitoração individual de nêutrons estão apresentados, respectivamente, nas equações 2.6 e 2.7 (BÖHM *et al.*, 1994).

$$H_{ls} = F \quad 2.6$$

$$H_{li} = 0 \quad \text{para } VC < NR$$

$$H_{li} = \left(\frac{1}{F}\right) \left[1 - \frac{2.NR}{(NR + VC)}\right] \quad \text{para } VC \geq NR \quad 2.7$$

No caso da monitoração individual de nêutrons, onde as incertezas associadas às medidas são maiores, F é igual a 2 (BÖHM *et al.*, 1994). Diferentemente, na monitoração individual de fótons para corpo inteiro o valor de F é 1,5 (CHRISTENSEN e GRIFFITH, 1994). Especificamente na monitoração individual de fótons, o H_{ls} é calculado pela equação 2.8.

$$H_{ls} = F \cdot \left[\frac{(1 + NR)}{(2.NR + VC)} \right] \quad 2.8$$

A partir das equações 2.6 e 2.7, costuma-se construir um gráfico com os valores avaliados em relação à VC, como o que está apresentado na Figura 2.14, onde o valor máximo de VC (100 mSv) foi retirado do teste de linearidade da norma ISO 21909 (2005). A título de comparação, foram desenhados o H_{ls} (equação 2.8) e o H_{li} (equação 2.7) para fótons (BÖHM *et al.*, 1994).

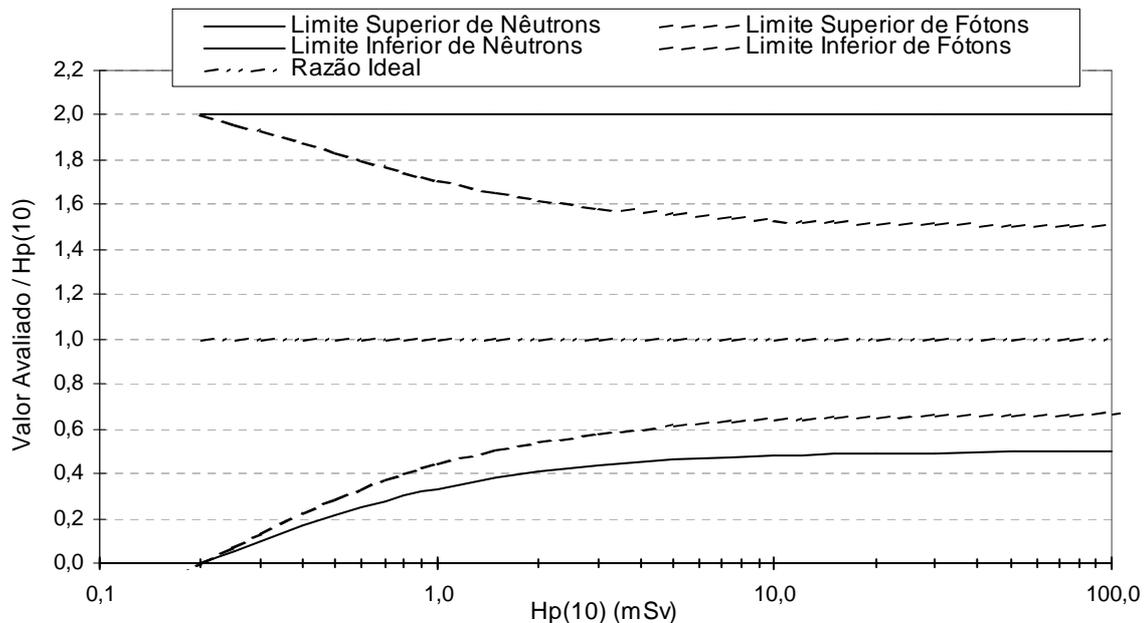


Figura 2.14: Curvas trombeta para monitoração individual de nêutrons e, comparativamente, para monitoração individual de fótons para corpo inteiro

2.2.5.3 Controle da Qualidade Rotineiro

Um processo prático de se avaliar um sistema de monitoração individual é o de se irradiar alguns monitores com determinadas energias em $H_p(10)$ e avaliá-los sem que os valores verdadeiros convencionais sejam conhecidos pelo sistema. No IRD, o “Projeto Fantasma” concretiza este processo para os sistemas de monitoração individual de:

- ◇ nêutrons de duas componentes (monitor de albedo).
- ◇ fótons para corpo inteiro (filme dosimétrico).
- ◇ fótons para extremidade (anel dosimétrico).

No caso específico do sistema de monitoração individual de nêutrons, as irradiações são realizadas pelo Laboratório de Nêutrons, sem que o Laboratório de Dosimetria TL saiba os valores de dose, apenas quais foram os campos de nêutrons empregados. A resposta de cada monitor versus o VC é aplicada em curvas trombeta específicas para nêutrons.

Capítulo 3

INSTALAÇÕES, MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 O Laboratório de Dosimetria TL do Serviço Monitoração Individual Externa do IRD

3.1.1 Apresentação da Infra-Estrutura

Neste trabalho, as atividades relacionadas à dosimetria termoluminescente foram executadas no Laboratório de Dosimetria TL do Serviço de Monitoração Individual Externa do IRD (LDT/IRD). A instrumentação necessária à realização destas atividades pode ser, simplificada, dividida em:

- Instrumentação para manipulação dos TLD-600 e TLD-700.
- Instrumentação para tratamento térmico.
- Instrumentação para leitura TL.

Para o tratamento térmico dos TLDs, é usado o forno automático modelo TLDO, fabricado pela companhia alemã PTW[§]. Na Figura 3.1, estão apresentados dois desenhos deste forno: vista frontal com o equipamento fechado e vista frontal com o aberto, mostrando detalhes dos apoios internos para bandejas.

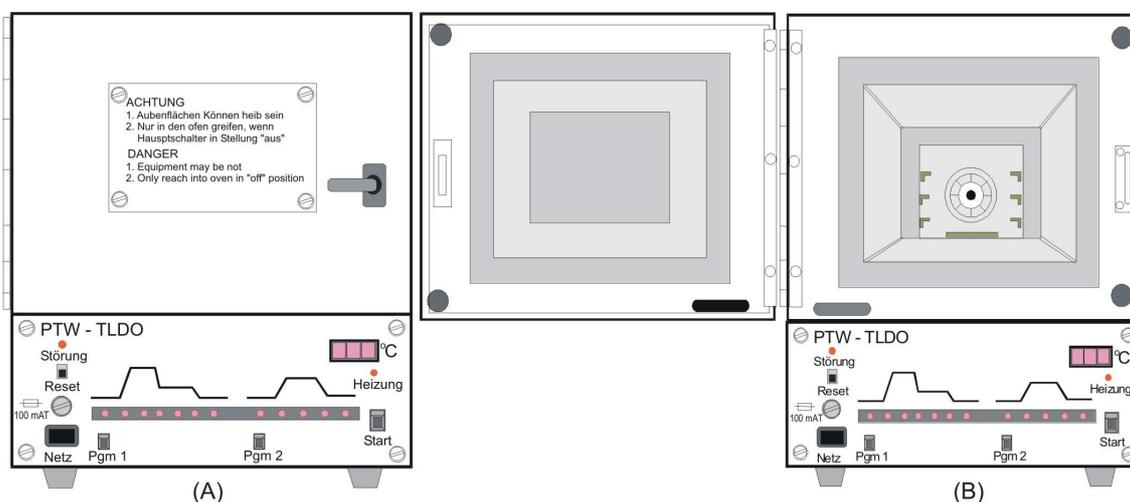


Figura 3.1: Forno automático PTW modelo TLDO para tratamento térmico dos TLDs:
(A) Forno fechado; (B) Forno aberto para inserção de até 3 bandejas

[§] Physikalisch-Technische Werkstätten, Freiburg, Alemanha.

Desenvolvido pela PTW exclusivamente para tratamento térmico de detectores luminescentes, este forno possui as seguintes especificações (PTW, 1998):

- A taxa de aquecimento é constante, em torno de $15\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$.
- A taxa de resfriamento é constante, em torno de $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$.
- A temperatura é controlada dentro do intervalo de 1°C ou 2°C , no máximo.
- É possível realizar tratamento térmico de centenas de TLDs simultaneamente.
- Existe um ventilador no seu interior que homogeneiza a temperatura.
- Existem apoios para até 3 bandejas de tratamento térmico simultaneamente.
- Para cada tipo de tratamento térmico, são possíveis de serem programados até 10 diferentes tratamentos térmicos pré-irradiação e outros 10 diferentes de tratamentos térmicos pós-irradiação.

Para a realização dos 2 tipos de tratamento térmico, existem 3 fornos deste modelo TLDO, identificados pelas letras seqüenciais: “A”, “B” e “C”. Os tratamentos térmicos pré-irradiação foram realizados no forno “C”; enquanto que os tratamentos de pós-irradiação nos fornos “A” ou “B”. Neste trabalho, para os dois tipos de tratamento térmico dos TLD-600 e TLD-700 foram seguidas as seguintes condições:

- Pré-irradiação: 1 hora a 400°C posteriormente mais 2 horas a 100°C .
- Pós-irradiação: 10 minutos a 100°C .

Independentemente do tipo de tratamento térmico dos TLDs, devem ser empregadas bandejas constituídas de material inerte. De modo a que todos os TLDs apresentem o mesmo “histórico térmico” durante o uso, os detectores devem ser tratados simultaneamente no mesmo forno. Esta tarefa se torna mais crítica no processo de seleção dos TLDs para formação de lotes de trabalho quando se deve trabalhar com a maior quantidade possível de detectores. Pelo fato dos TLDs serem adquiridos da Harshaw/Bicron-NE sem selecionamento, considera-se que o lote de fabricação dos TLD-600 e TLD-700 não satisfaz aos critérios a serem descritos na seção 3.1.2 (Seleção de TLDs para Uso Rotineiro). Por causa disto, foi desenvolvida uma “Bandeja com Cavidades Raiadas para Tratamento Térmico de Detectores Luminescentes” que apresenta a capacidade de tratamento térmico de até 480 TLDs. Esta bandeja, cujo desenho pode ser visto na Figura 3.2, teve o seu pedido de patente de invenção nº PI0704629-4 depositada no INPI (MARTINS *et al.*, 2007a). Assim sendo, com a bandeja desenvolvida é possível tratar até 1440 TLDs simultaneamente num único tratamento térmico.

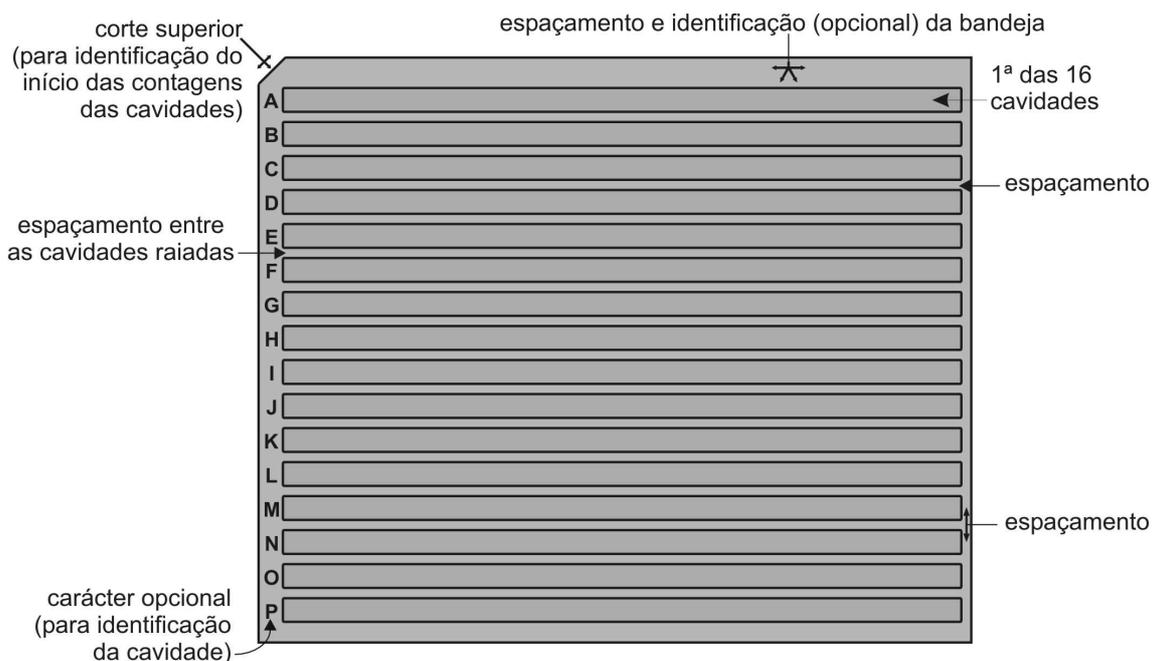


Figura 3.2: Bandeja de cavidades raiadas para tratamento térmico de até 480 TLDs

Neste trabalho, para a avaliação de todos os TLDs foi usado o leitor TL Modelo 3500, fabricado pela Harshaw-Bicron NE, conforme pode ser visto na Figura 3.3, popularmente conhecido como Harshaw 3500 (HARSHAW/BICRON, 1993). Neste leitor, uma prancheta de aço inoxidável, com rebaixo quadrado de 6,4 mm de lado, serve para posicionamento e aquecimento do TLD a ser avaliado.

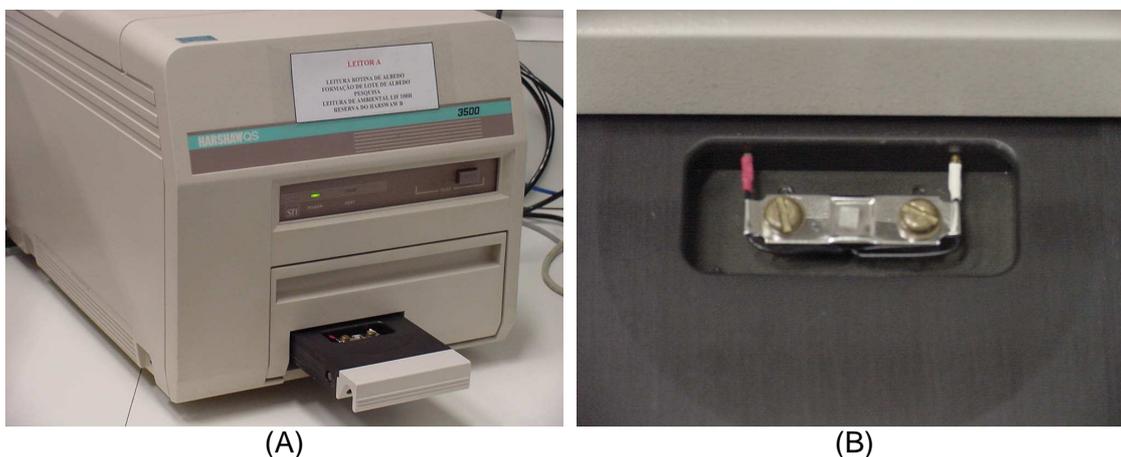


Figura 3.3: Leitor TL modelo 3500 empregado neste trabalho: (A) vista frontal com gaveta aberta mostrando prancheta; (B) detalhe da prancheta com TLD

O leitor TL Harshaw modelo 3500 possui as seguintes características (HARSHAW/BICRON, 1993, MAURÍCIO, 2001):

- ✦ A faixa de detecção da luz TL abrange 7 décadas de leitura, com linearidade melhor do que 1%.

- ✘ A reprodutibilidade de temperatura nos ciclos de aquecimento do leitor é melhor do que $\pm 1\%$.
- ✘ Aquecimento pelo método resistivo.
- ✘ Avaliação manual do material TL.
- ✘ Emprego de nitrogênio gasoso para obtenção de atmosfera inerte na cavidade de leitura e para refrigeração do tubo fotomultiplicador.
- ✘ Filtros óticos para blindagem da luz.
- ✘ Luz de referência para teste da sensibilidade de todo o sistema de leitura TL produzida por um LED de cor azul (470 nm).
- ✘ Sistema de detecção da luz com maior sensibilidade na faixa do azul. Faixa de emissão dos TLD-600 e TLD-700.
- ✘ Taxa de aquecimento controlada por termopar.

Este equipamento funciona acoplado a um microcomputador que gerencia o seu funcionamento. Por meio de um programa denominado "TLShell", os parâmetros de operação do leitor são estabelecidos e controlados pelo usuário. Todas as informações podem ser exportadas em um arquivo ASCII (MAURÍCIO, 2000). A tela de saída de uma leitura está apresentada na Figura 3.4, na qual podem ser visualizadas a curva de aquecimento (linha reta branca) e a curva de emissão TL.

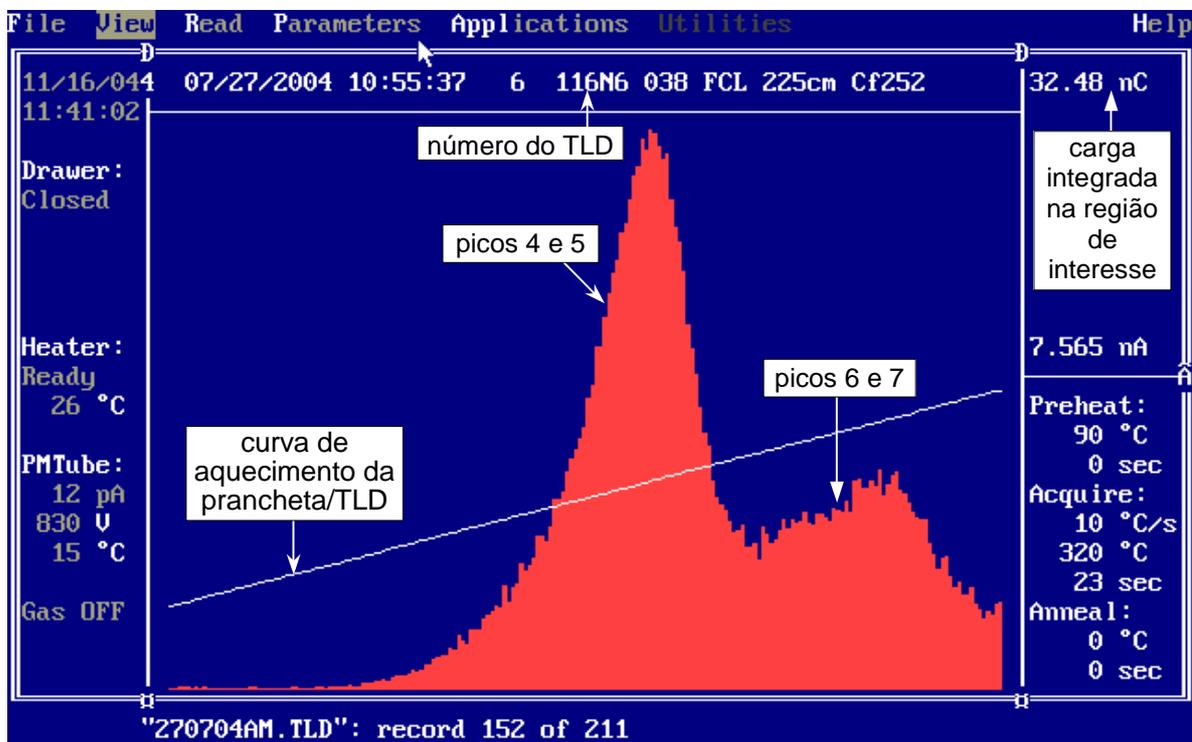


Figura 3.4: Exemplo de tela de saída do leitor Harshaw modelo 3500, apresentando curva TL do TLD-600 e curva de aquecimento

A curva TL experimental do TLD-600 apresentada na Figura 3.4 é diferente da apresentada na Figura 2.5 pelo fato de que nas práticas deste trabalho com TLDs é realizado o tratamento térmico pós-irradiação, o que elimina os picos de emissão TL mais baixos e de parte do pico 4. Ambas as curvas (TL e de aquecimento) da Figura 3.4 são obtidas a partir da amostragem de 200 canais. No presente trabalho, foram empregados os seguintes parâmetros para leitura dos TLDs no leitor modelo 3500:

- Sem pré-aquecimento (feito coletivamente no forno).
- Faixa de temperatura de coleta do sinal TL de 90 a 320°C.
- Integração da carga do canal 1 ao canal 150; ou seja, somente até o pico 5, aproximadamente (WEINSTEIN *et al.*, 2006).
- Taxa de aquecimento de 10°C.s⁻¹.
- Tempo de integração do sinal TL de 23 s.
- Sem tratamento térmico individual de cada detector (feito coletivamente no forno).

Todos os leitores Harshaw, assim como os seus microcomputadores, funcionam numa sala de leitura que possui condições ambientais controladas. Tanto a temperatura como a umidade desta sala são mantidas ininterruptamente na faixa de 25 ± 5°C e ≤80%, respectivamente. Todas as leituras são realizadas com um fluxo de 0,13 m³.h⁻¹ de nitrogênio com pureza mínima de 99,5%, de acordo com as instruções do fabricante (HARSHAW/BICRON, 1993).

3.1.2 Seleção de TLDs para Uso Rotineiro

Neste trabalho, foram empregados os detectores TLD-600 e TLD-700 produzidos pela Harshaw, dos Estados Unidos.

Em cada detector, seja TLD-600 ou TLD-700, devem ser escritos três códigos diferentes (MARTINS, 2002b), conforme pode ser visto no exemplo da Figura 3.5:

- i) O de identificação seqüencial de cada detector em relação ao total do lote de trabalho: de 1 até 999.
- ii) O de identificação do tipo de detector: onde X significa 6 para o TLD-600 ou 7 para o TLD-700.
- iii) O de identificação do lote de trabalho em relação aos outros, procurando-se utilizar uma letra diferente, no exemplo da Figura 3.5 usou-se a "N".

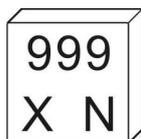


Figura 3.5: Modelo de identificação dos TLDs

Ainda que retirados do mesmo lote de fabricação, eles possuem sensibilidades individuais diferentes. De modo a se fazer uma correta separação da componente de fótons e da de nêutrons presente em ambos os TLDs, torna-se necessário estabelecer um fator de calibração (FC) tanto para o TLD-600 como para TLD-700 (ZEMAN e SNYDER, 1978, PIESCH e BURGKHARDT, 1993).

Pode haver mais de um período de uso do monitor, ou seja, período de monitoração do trabalhador: quinzenal, mensal, bimensal, trimestral (GUNTER, 1994). De modo a atender a legislação vigente no Brasil, adotou-se a monitoração mensal (CNEN, 2005b). O FC(6:7) é obtido também mensalmente a partir da equação 3.1, independentemente se o TLD foi empregado na medida da componente de nêutrons de albedo ou de nêutrons incidentes. Adicionalmente, existe uma variação na sensibilidade dos lotes de fabricação ao longo do tempo (PIESCH e BURGKHARDT, 1993). A determinação do FC(6:7), segundo a equação 3.1, tem por objetivo determinar a cada mês a sensibilidade dos lotes empregados de TLD-600 e de TLD-700 em termos de fótons (STUDENÁ *et al.*, 1989).

$$FC(6:7)(mGy.nC^{-1}) = \frac{Irradiação}{\{L_{\gamma}(6:7) - RF_{\gamma}(6:7)\}} \quad 3.1$$

Por causa disto, mensalmente, são separados 20 TLDs tanto do TLD-600 como do TLD-700 de cada lote de trabalho empregado: 10 de cada para servirem de RF_γ do lote e 10 de cada para serem irradiados simultaneamente no mesmo arranjo experimental a ser descrito na seção 4.1.3. Para a “Irradiação” empregou-se o valor verdadeiro convencional (VC) na faixa de 2 a 5 mGy em termos da grandeza KERMA no ar (K_{ar}). Não foi possível empregar um valor único para “irradiação”, devido à disponibilidade da fonte de radiação gama. Este valor mínimo de K_{ar} foi estabelecido por causa do aumento na incerteza da medida para valores mais baixos (REGULLA e DRISCOLL, 1993).

Para serem usados como um lote de trabalho, é necessário que os TLDs possuam uma resposta homogênea (DOUGLAS e MARSHALL, 1978). Para formação

deste lote de trabalho obedeceu-se documento específico para tal do IRD (MARTINS, 2002a), onde devem ser obedecidos os seguintes critérios:

- 1º) Homogeneidade na resposta à radiação gama: o coeficiente de variação percentual igual ou menor do que 3,5%.
- 2º) Verificação da resposta à Dose Zero (DZ): o coeficiente de variação percentual da resposta à dose zero igual ou menor do que 25%.

3.1.3 Câmara Climática de Umidade e Temperatura Controladas

Foi desenvolvida uma câmara climática de umidade e temperatura controladas que é apresentada na Figura 3.6. Ela é adequada para a realização dos seguintes testes de caracterização:

- ◇ C.3.8.2 (Tabela 2.1) da norma ISO 21909 (ISO, 2005);
- ◇ 4.3.3 (Tabela 2.2) do regulamento IRD-RT Nº 007.01/01 (IRD, 2001b).

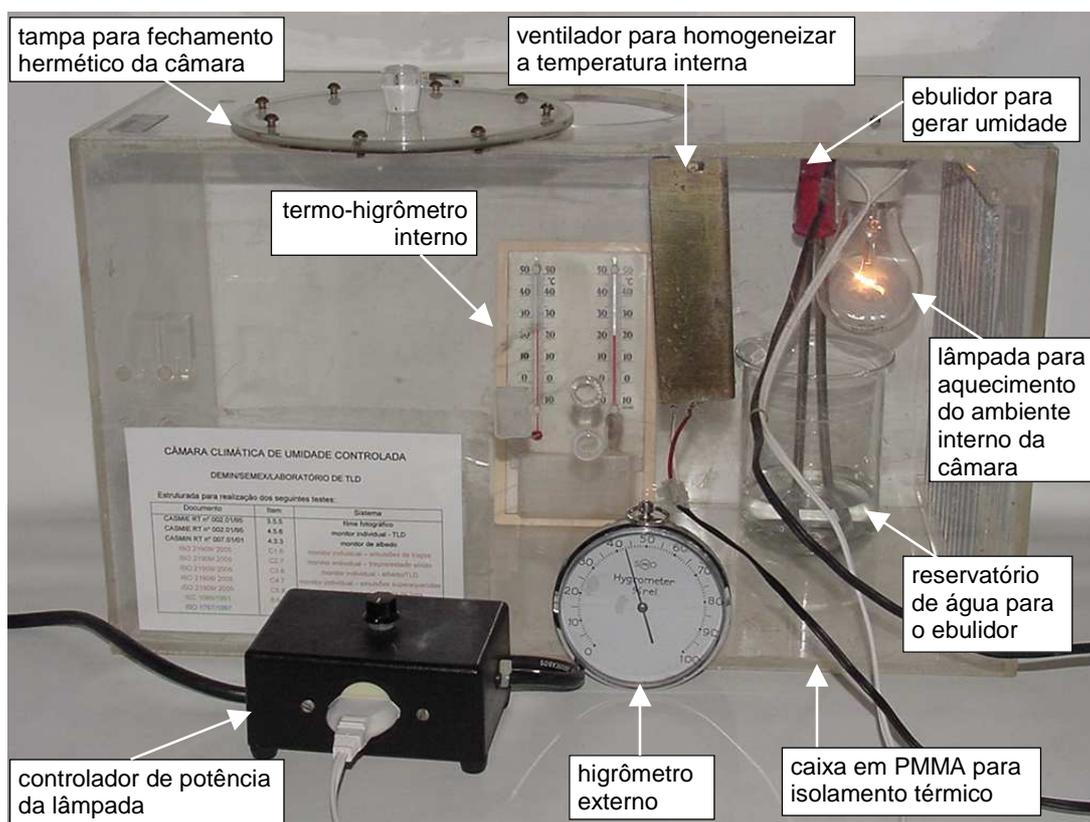


Figura 3.6: Câmara Climática de Temperatura e Umidade Controladas para realização dos testes de caracterização da ISO e do IRD

3.2 O Laboratório de Irradiações do Serviço de Monitoração Externa do IRD

O Laboratório de Irradiações (LABIR) do IRD foi estruturado exclusivamente para irradiação, calibração e caracterização de monitores individuais e dos detectores associados a estes monitores. O LABIR consiste da instalação física apresentada na Figura 3.7. No LABIR, a temperatura é mantida em torno de $25^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ durante as irradiações de modo a não influenciar a resposta TL (McKEEVER *et al.*, 1995).

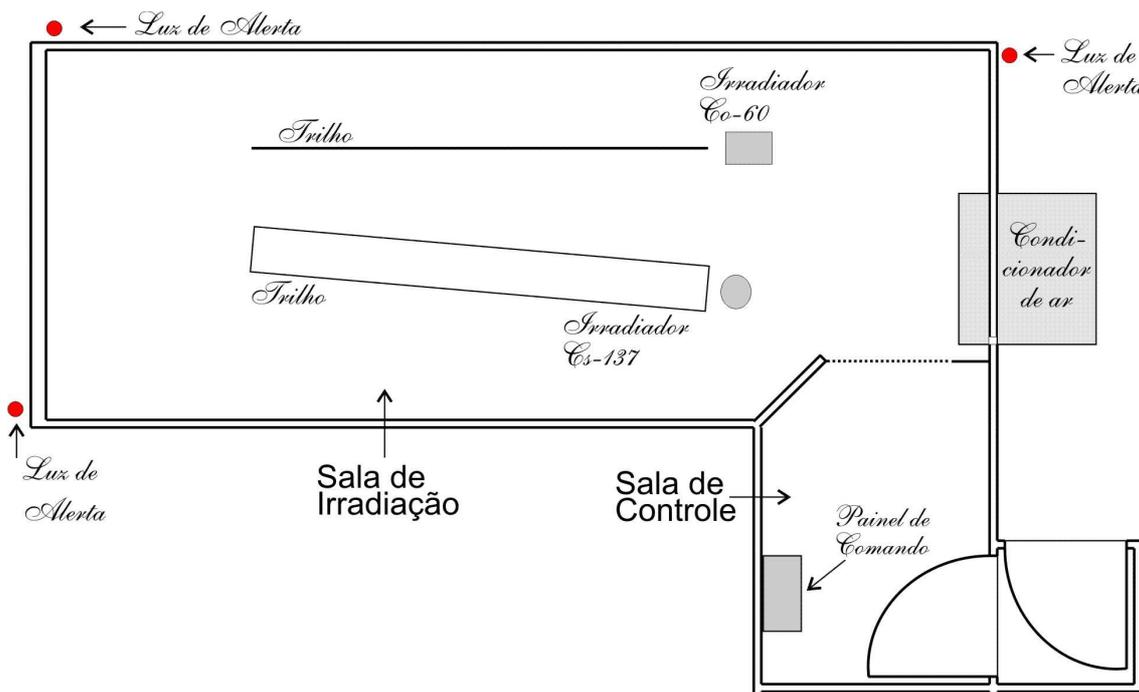


Figura 3.7: Diagrama do Laboratório de Irradiações (LABIR/IRD)

Neste laboratório, existem dois arranjos de irradiação para cada uma das duas fontes: ^{60}Co e ^{137}Cs . Os campos de radiação de ambas as fontes são padrões terciários rastreados ao Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI) do IRD. As características relacionadas com os irradiadores que acondicionam estas fontes estão relacionadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Parâmetros técnicos dos Irradiadores do LABIR

Irradiador	Fabricante	Taxa de K_{ar} a 1m ($\text{mGy}\cdot\text{h}^{-1}$)	Data da Calibração	Distâncias para Irradiação (cm)
^{60}Co	Atomic Energy of Canada	1,875	26/01/01	100 a 240 - em trilho
^{137}Cs	J. L. Shepherd - Amersham	43,173	23/01/01	50 a 200 - em mesa

Por apresentar uma mesa, o arranjo da fonte de ^{137}Cs possibilita a irradiação da caixa de irradiação e do simulador de tronco, enquanto que o da fonte de ^{60}Co somente da caixa de irradiação. Ambas as fontes estão calibradas em termos de K_{ar} . Para conversão na grandeza de interesse, são empregados os coeficientes descritos na norma ISO 4037-3 (1999). Para irradiação na fonte de ^{137}Cs , torna-se necessário o emprego de uma camada de *build-up* com 2,0 mm de espessura de PMMA e para irradiação na fonte de ^{60}Co com 4 mm de espessura de PMMA (ISO, 1999).

3.3 O Laboratório de Nêutrons do IRD

3.3.1 Instalações Físicas do Laboratório de Nêutrons

A instalação disponível no Laboratório de Nêutrons (LN/IRD) do IRD para irradiação e calibração de monitores individuais e de área com fontes de nêutrons é um Salão de Baixo Espalhamento (SBE). Um croqui simples do SBE é apresentado na Figura 3.8.

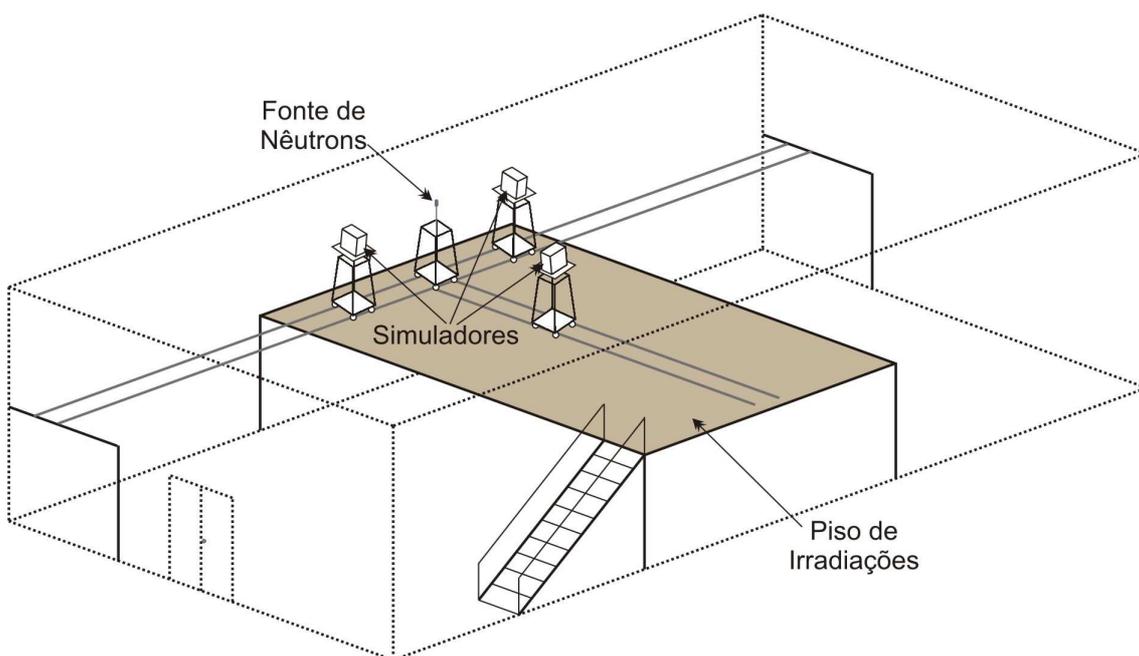


Figura 3.8: Diagrama do SBE apresentando um exemplo de arranjo de irradiação simultânea de 3 simuladores de tronco da ISO

O SBE apresenta as dimensões laterais de $7 \times 18 \text{ m}^2$ por 6 m de altura do chão ao forro do teto (FONSECA *et al.*, 2005). O chão do piso do SBE é feito de concreto. As paredes laterais são de placas de madeira (compensado), enquanto que o forro do teto é feito de madeira aglomerada. Telhas de alumínio, acima do forro, cobrem todo o prédio. A 2,2 m acima do solo, existe um segundo piso de placas de

madeira denominado “Piso de Irradiações”. Apesar de haver passado mais de 30 anos desde a sua construção, o SBE atende às recomendações, em termos das dimensões físicas necessárias, que um salão de baixo espalhamento deve possuir para que haja o mínimo de interferência possível em termos de espalhamento (BURGKHARDT e PIESCH, 1988, ISO, 2000b).

Nas suas instalações, o LN realiza várias atividades. Aquelas relacionadas à irradiação de monitores individuais ocuparam 57% de todas as atividades, no período entre 1995 e agosto de 2005 (FONSECA *et al.*, 2005).

As fontes de nêutrons para irradiação são sempre posicionadas a no mínimo 1,5 m de altura do Piso de Irradiações, seguindo prática rotineira de trabalho para irradiação com nêutrons (NASH *et al.*, 1985, HARVEY *et al.*, 1993). Existe um suporte específico fabricado em alumínio ou PMMA para cada fonte de nêutrons.

Especificamente, a fonte de ^{252}Cf é muito difícil de ser manipulada, devido a sua pequena dimensão: 5,5 mm de diâmetro e 11,8 mm de altura. Por causa disto, foi desenvolvido um método e dispositivo para seu emprego em irradiação que teve o seu pedido de patente nº MU8700006-7 depositado no INPI (MARTINS *et al.*, 2007d).

3.3.2 Fonte de Nêutrons

As normas da série ISO 8529 recomendam o uso de quatro padrões de referência de nêutrons obtidos a partir de fontes radioativas (ISO, 1998, ISO, 2000b, ISO, 2001): $^{252}\text{Cf}(\text{D}_2\text{O})$; ^{252}Cf ; $^{241}\text{Am-B}$; $^{241}\text{Am-Be}$.

Cada vez mais, as fontes de ^{252}Cf têm sido empregadas comercialmente. Elas fornecem, dependendo do fabricante, uma intensidade, aproximadamente, de 2,3 a $5,9 \times 10^6$ nêutrons por segundo e por micro-grama de óxido de califórnio, para uma geometria 4π (LORCH, 1973, KARELIN *et al.*, 1997). O conteúdo de óxido de ^{252}Cf , dentro do encapsulamento, varia desde 0,001 mg até 1 mg. Suas aplicações estão parcialmente limitadas pelo seu custo elevado para uma meia-vida (2,645 anos) relativamente curta do ^{252}Cf , quando comparada à das fontes $X(\alpha,n)Y$. Por outro lado, estas fontes apresentam vantagens em relação às fontes $X(\alpha,n)Y$, às quais elas têm substituído (SCHWARTZ e EISENHAUER, 1980, KARELIN *et al.*, 1997):

- ♣ Alta fluência específica, permitindo a produção de fontes de nêutrons com dimensões reduzidas.
- ♣ Baixa geração de calor e gás (em decorrência da não geração de hélio, como nas fontes com radionuclídeos emissores alfa), diminuindo o risco de dano pela operação em longo prazo.

- ♣ Espectro de energia dos nêutrons suave e baixa atividade gama, quando comparado a outros tipos de fontes (ISO, 2001).
- ♣ Menor probabilidade de vir a ser um rejeito radioativo ao longo do tempo.
- ♣ Possuem um espectro de fissão bem conhecido.
- ♣ Uma fluência que pode alcançar algumas ordens de grandeza superior à fluência das fontes (α, n).

O campo de nêutrons de $^{252}\text{Cf}(\text{D}_2\text{O})$ é representado por uma fonte de ^{252}Cf no interior de uma esfera oca de aço inoxidável com 15 cm de raio e cerca de 1 mm de espessura. A esfera de aço é preenchida com D_2O e recoberta com uma camada de cádmio de 0,508 mm de espessura (SCHWARTZ e EISENHAUER, 1980). Na Figura 3.9A está apresentada uma foto desta esfera, modelo 149, existente no LN/LNMRI adquirida do fabricante Shepherd[§]; mas sem a fonte de ^{252}Cf no seu interior. E na Figura 3.9B está apresentado um desenho com o corte transversal desta esfera, mas com a fonte de ^{252}Cf inserida.

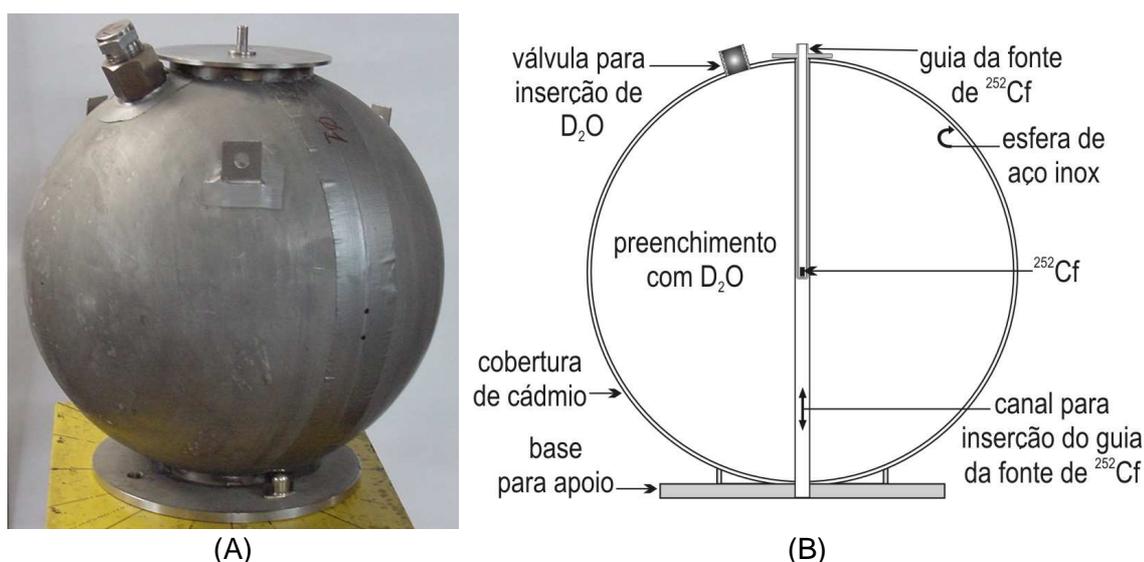


Figura 3.9: Esfera de aço inoxidável preenchida com água pesada e recoberta com cádmio: (A) Foto da esfera sem a fonte de ^{252}Cf inserida; (B) Desenho do corte transversal da esfera com a fonte de ^{252}Cf inserida

Ainda que o espectro da fonte de $^{252}\text{Cf}(\text{D}_2\text{O})$ não consiga reproduzir exatamente um espectro de nêutrons específico de uma instalação, ele apresenta uma energia média dentro da faixa de energia média de diversos tipos de instalações nucleares (THOMAS *et al.*, 1999). Para os monitores individuais de nêutrons, a fonte de $^{252}\text{Cf}(\text{D}_2\text{O})$ fornece um padrão de calibração com espectro de energia similar ao

[§] J.L. Shepherd & Associates, San Fernando, Estados Unidos.

espectro de nêutrons existente na operação de reatores de potência tipo água leve pressurizada, *Pressurized Water Reactor* (PWR) (SCHWARTZ e EISENHAUER, 1980). A calibração no espectro de $^{252}\text{Cf}(\text{D}_2\text{O})$ permite, por exemplo, o emprego do monitor de albedo nas usinas nucleares Angra I e II que são do tipo PWR.

Em relação aos campos padrões de nêutrons da ISO obtidos a partir de fontes radioativas, o LN possui todos os quatro. Ainda que a fonte de $^{241}\text{Am-B}$ apresente uma fluência muito baixa. Contudo, na maioria das vezes, os espectros de nêutrons normalmente encontrados nas situações de rotina das instalações radiativas e nucleares são diferentes dos espectros produzidos pelos padrões da ISO especificados para fontes radioativas (ISO, 2000a).

As características das fontes de nêutrons existentes no LN/LNMRI estão apresentadas na Tabela 3.2. Os valores descritos para a energia média (em relação à fluência) da Tabela 3.2 para os padrões de referência de nêutrons ($^{252}\text{Cf}(\text{D}_2\text{O})$; ^{252}Cf ; $^{241}\text{Am-B}$; $^{241}\text{Am-Be}$) foram os da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001); para a fonte $^{238}\text{Pu-Be}$, o valor foi retirado de um relatório de instituição cujo fabricante destas fontes é o mesmo do LN/LNMRI (LIU *et al.*, 1991); enquanto que para as fontes de $^{241}\text{Am-F}$ e $^{241}\text{Am-Li}$, os valores das energias foram obtidos na internet (NPL, 2008). Os valores descritos para a meia-vida na Tabela 3.2 foram obtidos de BÉ *et al.* (2006).

Tabela 3.2: Características das fontes de nêutrons disponíveis no LN/LNMRI

Fonte de Nêutrons	Energia Média* (MeV)	Meia-Vida (anos)
$^{252}\text{Cf}(\text{D}_2\text{O})$	0,55	2,645 ± 0,003
^{252}Cf	2,13	2,645 ± 0,003
$^{241}\text{Am-B}$	2,72	432,6 ± 0,6
$^{241}\text{Am-Be}$	4,16	432,6 ± 0,6
$^{241}\text{Am-F}$	1,5	432,6 ± 0,6
$^{241}\text{Am-Li}$	0,5	432,6 ± 0,6
$^{238}\text{Pu-Be}$	4,2	87,74 ± 0,03

Nota: * - Em relação à fluência.

3.4 Simuladores e Arranjos de Irradiação

3.4.1 Fabricação do Simulador de Tronco da ISO

A partir das informações contidas na seção 2.2.1.1 e de modo a se calibrar o monitor desenvolvido em $H_p(10)$, sete simuladores de tronco da ISO foram construídos na Oficina Mecânica do IRD. Cinco deles foram separados especificamente para irradiação em campos de nêutrons e os outros dois para irradiação em campos de fótons. Os simuladores foram preenchidos com água destilada ou, quando disponível, com água ultrapura; tanto os usados para irradiação com nêutrons, como os usados para irradiação com fótons.

3.4.2 Arranjo Experimental para Irradiação com Simuladores

A prática de se irradiar somente um monitor individual no centro do simulador, como apresentado na Figura 2.12, acarreta num demorado processo de irradiação quando esta é necessária de ser realizada com diversos monitores.

Neste trabalho, os monitores individuais foram irradiados sobre um simulador sempre em grupo de no máximo 4 monitores. Cada um dos monitores foi posicionado com o seu centro geométrico em uma das interseções da reta transversal entre o centro do simulador e o seu vértice com um círculo de 7,5 cm de raio a partir do centro geométrico da face frontal do simulador, conforme recomendação da ISO 8529-3 (1998). Na Figura 3.10(A) é mostrado o arranjo de posicionamento de até 4 monitores de albedo. Porém, quando da realização de testes de dependência angular de nêutrons, torna-se necessário girar o simulador de tronco em relação à fonte de radiação (SOHRABI e KATOUZI, 1992). Para manter constante a distância dos detectores à fonte de radiação quando da rotação do simulador, foi estruturado o arranjo mostrado na Figura 3.10(B).



Figura 3.10: Configuração de monitores individuais sobre simulador de tronco da ISO: (A) Arranjo de irradiação a 0° . (B) Arranjo de irradiação com ângulo diferente de 0°

Para se irradiar simultaneamente até vinte monitores em cinco simuladores de uma única vez, adotou-se o arranjo experimental apresentado na Figura 3.11. Onde

“d” nesta figura e ao longo deste trabalho é a distância em cm do centro da fonte radioativa até a face frontal do simulador. De modo a manter uma aproximação prática e um compromisso entre os requisitos de baixo espalhamento, boa homogeneidade de irradiação e pequena influência da posição do centro efetivo da fonte de nêutrons, procurou-se, sempre que possível, seguir a recomendação de $d = 75$ cm nas irradiações de caracterização (ISO, 2000b).

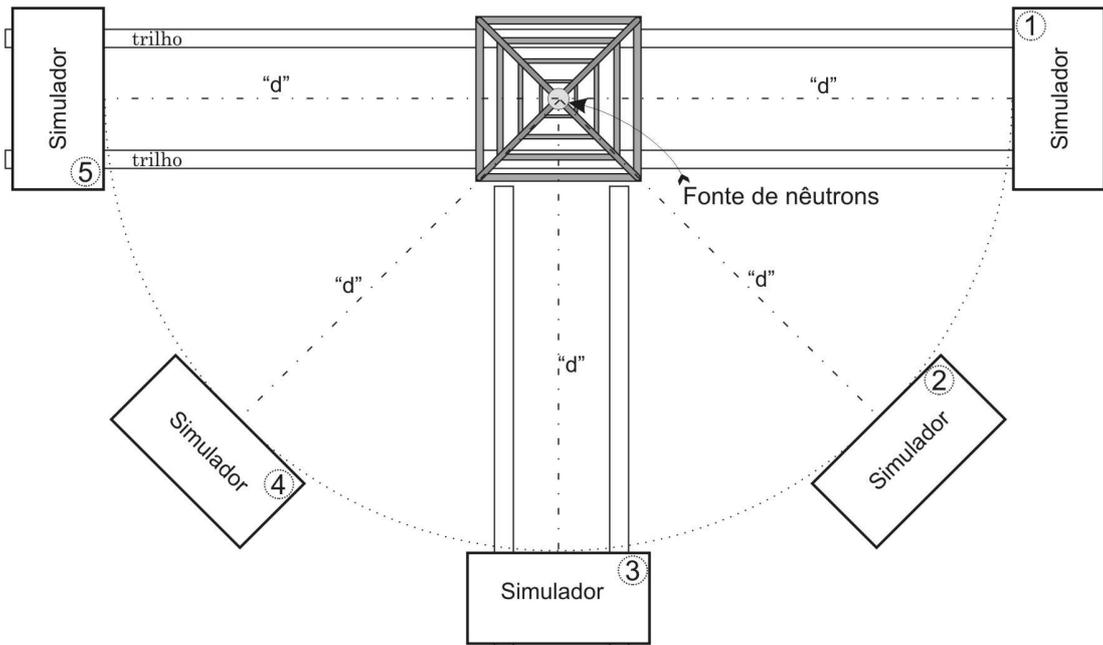


Figura 3.11: Configuração de arranjo experimental para irradiação simultânea de cinco simuladores com fonte de nêutrons

Na condição de serem empregados apenas dois simuladores, como no arranjo de irradiação com a fonte de $^{238}\text{Pu-Be}$, são usados apenas os de numeração “1” e “5”. Para três simuladores, os de numeração “1”, “3” e “5”. Enquanto que para quatro simuladores, os de “1”, “2”, “3” e “5”. Especificamente, para a realização dos Testes de Dependência Angular, adotou-se o arranjo experimental da Figura 3.12 (SOHRABI e KATOUZI, 1992), sendo θ o ângulo de rotação do simulador.

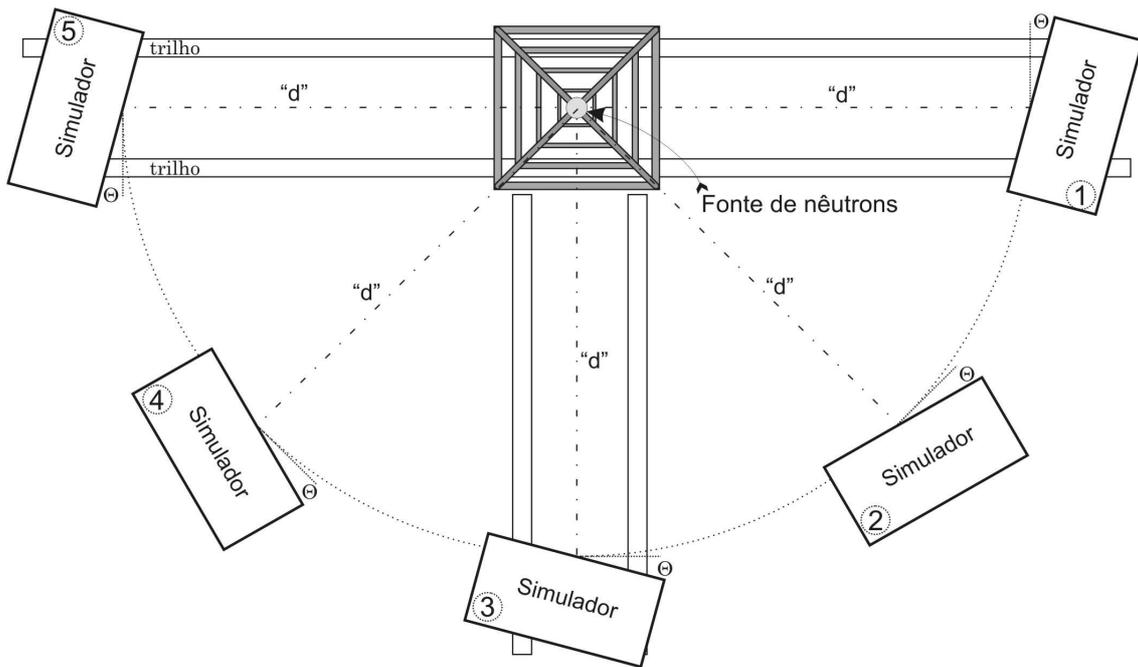


Figura 3.12: Configuração de arranjo experimental para irradiação simultânea de cinco simuladores em teste de dependência angular com fonte de nêutrons

Capítulo 4

DESENVOLVIMENTO DO MONITOR

4.1 TLDs e Arranjo de Irradiação de Detectores

4.1.1 Identificação dos TLDs

Para formação do lote de trabalho de TLDs (descrito na seção 3.1.2), em cada TLD-600 ou TLD-700 foram escritos três códigos diferentes (MARTINS, 2002b), conforme pode ser visto na Figura 3.5:

- i) O de identificação seqüencial de cada detector em relação ao total do lote de trabalho: o campo 999 pode variar de 1 até 291.
- ii) O de identificação do tipo de detector: onde X significa 6 para o TLD-600 ou 7 para o TLD-700.
- iii) O lote de trabalho: N.

4.1.2 Seleção dos TLDs

Para a seleção do lote de trabalho descrito na seção 3.1.2, o 1º critério (homogeneidade na resposta à radiação gama) foi obtido irradiando-se duas vezes todos os detectores, tanto TLD-600 como TLD-700, com 4,386 mGy em termos da grandeza K_{ar} na fonte de ^{60}Co do LABIR.

A partir dos resultados de ambas as leituras das irradiações, calculou-se a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação percentual (CV%). Para que os detectores fossem empregados dentro do lote de trabalho “N”, era necessário que coletivamente, o coeficiente de variação percentual do lote de trabalho fosse menor do que 3,5% (MARTINS, 2002a). Para que isto fosse conseguido neste trabalho, foi necessário retirar todos os TLD-600 e TLD-700 que individualmente apresentasse um desvio padrão, em relação à média de cada irradiação, maior ou menor do que 1,75 desvio padrão, simultaneamente em ambas as irradiações.

O 2º critério (dose zero) foi obtido avaliando-se os detectores logo após terem sido submetidos ao tratamento térmico pré-irradiação. Para serem considerados no lote de trabalho, era necessário que o coeficiente de variação percentual da resposta à dose zero (CV%DZ) fosse menor ou igual a 25%. Os resultados finais da formação do lote de trabalho “N” estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Dados dos lotes de TLDs em uso

Tipo de TLD	CV% da Irradiação	CV%DZ	Lote de Fabricação da Harshaw
TLD-600	3,343	21,78	S-4314(S-2)
TLD-700	3,393	17,88	S-4341(S-2)

4.1.3 Arranjo Experimental para Irradiação de TLDs

De modo a se dispor de uma condição adequada para irradiação de TLDs avulsos em campos de ^{137}Cs ou de ^{60}Co e simultaneamente para transporte e armazenamento de TLDs, foi desenvolvido um dispositivo denominado Porta-TLDs. Existem duas tampas que funcionam como camada de *build-up*, para garantir o equilíbrio eletrônico das irradiações no campo para o qual ela é específica: uma com 2 mm de espessura de PMMA para ^{137}Cs e outra com 4 mm de espessura de PMMA para ^{60}Co . Na tampa, está marcado o centro da caixa. Na Figura 4.1 é visualizado o porta-TLDs semi-fechado com a tampa.

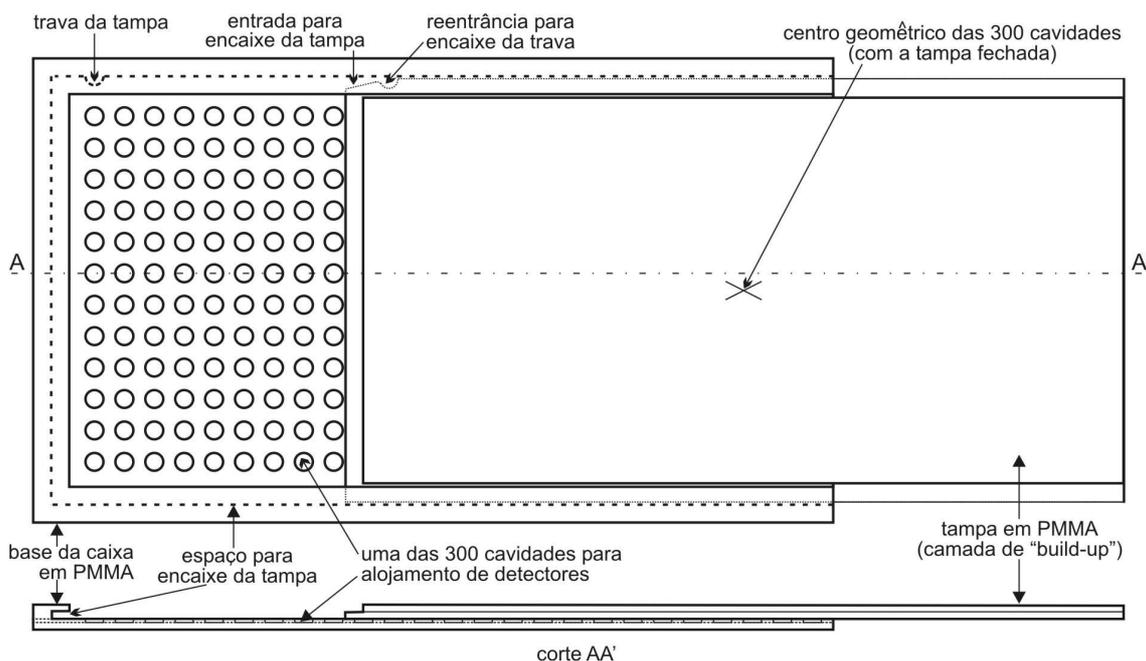


Figura 4.1: Exemplo do Porta-TLDs para armazenamento, transporte e irradiação

Durante o desenvolvimento deste trabalho, este porta-TLDs teve o seu pedido de patente depositado sob o nº PI0603355-5 com a denominação *Caixa para Armazenagem, Transporte e Irradiação de Detectores Luminescentes* (MARTINS *et al.*, 2006). Com a tampa fechada, o Porta-TLDs possui as dimensões de 222 x 130 mm².

Na Figura 4.2 está apresentado o arranjo experimental de irradiação de TLDs isolados dentro do Porta-TLDs no irradiador de ^{60}Co do LABIR.



Figura 4.2: Arranjo experimental de irradiação do Porta-TLDs no irradiador de ^{60}Co do LABIR

4.2 Seleção do Corpo Moderador

Para a escolha do material a ser empregado no corpo moderador do monitor de albedo, existem diversas variáveis: custo; reutilização; energia dos nêutrons. Decidiu-se optar por um termoplástico ao invés de um termorrígido, porque o primeiro material pode ter as suas partes reutilizadas e é mais barato do que o segundo (MARTINS e MAURÍCIO, 2001).

Num teste realizado com um conjunto de termoplásticos disponíveis: poliamida-6 (PA-6), PEAD e polipropileno (PP), para um mesmo volume de formato cilíndrico, irradiados com $^{241}\text{Am-Be}$, verificou-se que não existe diferença estatisticamente significativa entre eles (MARTINS e MAURÍCIO, 2001). A priori, pode-se inferir que as incertezas presentes no teste não permitem a discriminação dessas diferenças; visto que existe diferença nas densidades destes termoplásticos: do PEAD varia de 0,94 a 0,97; do PA-6, de 1,12 a 1,14; do PP é 0,90 (MANO, 1991). Outro ponto que deve ser levado em consideração é o fato do PA-6, como outras poliamidas, conterem em sua composição nitrogênio que apresenta uma seção de choque não desprezível de 1,85 barn para nêutrons térmicos (SEELMANN-EGGEBERT *et al.*, 1981).

Com alguns protótipos de PA-6 e PEAD, procurou-se verificar a resposta de albedo em função do aumento do corpo moderador. Os resultados dos ensaios deste trabalho estão apresentados na Figura 4.3 sob a forma de quadrado (□) e círculo (°). Os resultados estão normalizados para a resposta do monitor de albedo do IRD. Os resultados obtidos por Hankins (1972), em triângulo (Δ), e por Falk (1971), em losango (◇), estão normalizados para espessura nula de moderador. No caso específico de Falk (1971), os resultados se referem a uma espessura de moderador anteposto aos TLDs puros; pois, não existe corpo moderador.

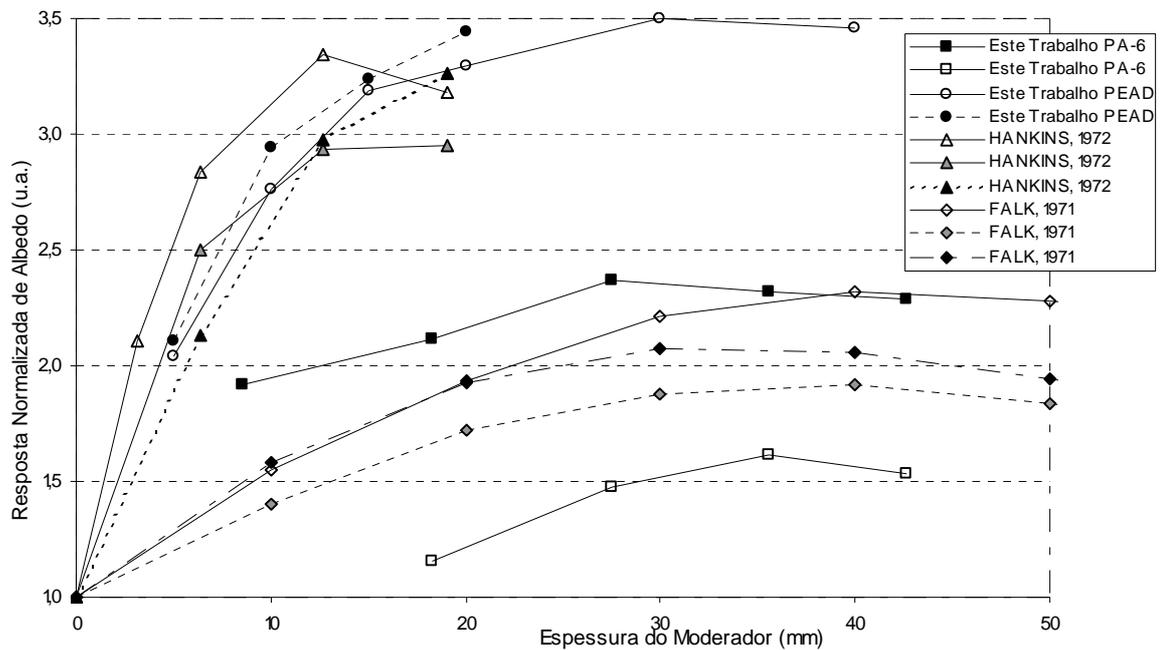


Figura 4.3: Efeito da resposta de albedo como função da espessura do moderador

	Símbolo	Material	Diâmetro da Janela de Albedo	Posição do TLD*	Campo de Nêutrons
Este Trabalho	■	PA-6	φ32 mm	superfície	²⁴¹ Am-Be a 1 m
	□	PA-6	φ32 mm	12 mm	²⁴¹ Am-Be a 1 m
	○	PEAD	φ50 mm	superfície	²⁴¹ Am-Be a 1 m
	●	PEAD	φ50 mm	superfície	²⁵² Cf a 0,75 m
HANKINS, 1972	△	PEAD	φ50,8 mm	superfície	térmico
	▲	PEAD	φ50,8 mm	superfície	²³⁸ Pu-F+ 277mm PEAD
	▲	PEAD	φ50,8 mm	superfície	²³⁸ Pu-F a 0,3 m
FALK, 1971	◇	PEAD	-	superfície	Pu-F
	◇	PEAD	-	superfície	Pu-Be
	◆	PEAD	-	superfície	²⁵² Cf

Nota: * - Distância em relação à janela de albedo (vide a seção 2.1.7.3).

Como visualizado na Figura 4.3, ainda que a espessura do moderador aumente para uma mesma janela de albedo, a tendência de saturação é comum tanto para o PA-6, como para o PEAD (PERKS, 1993, MARTINS *et al.*, 1996). Não foi encontrada referência para outros termoplásticos. Esta diminuição na resposta normalizada de albedo pode ser entendida, resumidamente, pelo fato de que após um grande número de colisões dos nêutrons com o moderador, eles apresentam um espectro de energia bem termalizado; favorecendo a captura deles pelo meio (GLASSTONE e SESONSKE, 1963, RAMOS, 2004).

Os formatos mais comuns para o corpo moderador são: cilíndrico (DOUGLAS e MARSHALL, 1978, MANFREDOTTI *et al.*, 1989) e hemisférico (HOY, 1972, CARVALHO, 1975, BURGER e MORHART, 1977). Optou-se pelo formato cilíndrico pela facilidade do corpo moderador ser usinado, caso não fosse injetado e porque não foi verificada diferença estatisticamente significativa em termos de dependência angular entre estes dois formatos (MARTINS *et al.*, 1996).

Com alguns protótipos de PA-6, procurou-se verificar a resposta de albedo em função da distância do TLD ao longo do eixo central do corpo moderador, tendo como referência a janela de albedo. Os resultados deste trabalho e os obtidos por Hankins (1972) são apresentados na Figura 4.4. Os dados em triângulo (Δ) foram obtidos com protótipos cilíndricos de PEAD, com diâmetro de 50,8 mm e espessura de 19 mm (HANKINS, 1972). Os dados em quadrado (\square) foram obtidos com protótipos cilíndricos de PA-6 com diâmetro de 32 mm e duas alturas (h), enquanto que os dados em círculo vazio (\circ) foram obtidos com protótipos hemisféricos de PA-6 com diâmetro de 52 mm (MARTINS *et al.*, 1996).

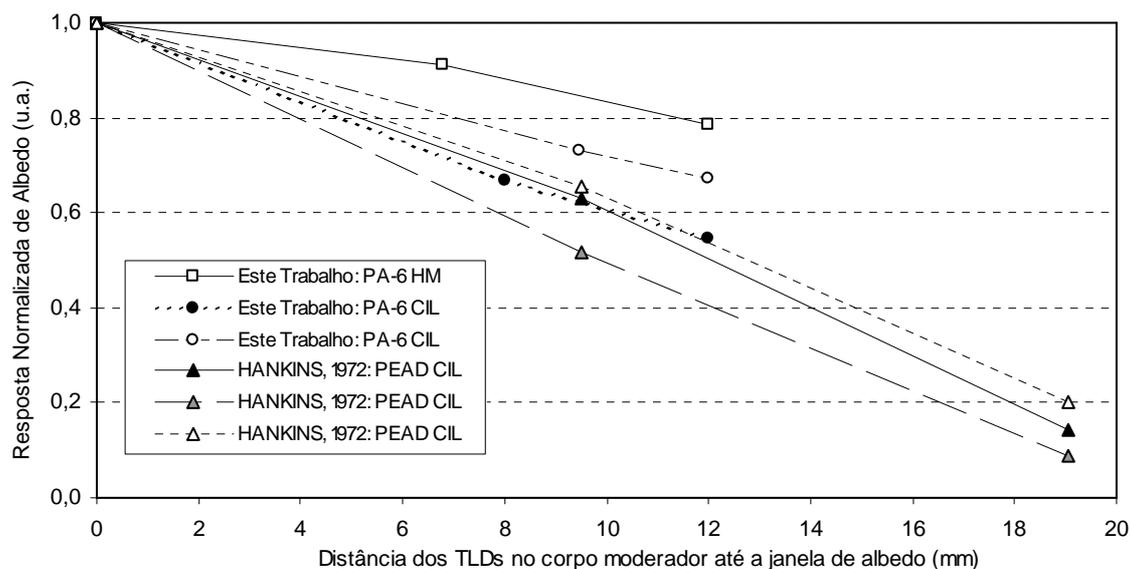


Figura 4.4: Efeito da posição do TLD na resposta da componente de albedo em relação à janela de albedo do corpo moderador

	Símbolo	Material	Dimensões do Protótipo	Campo de Nêutrons
Este Trabalho	□	PA-6	HM ϕ 52 mm x h 25 mm	$^{241}\text{Am-Be}$ a 1 m
	●	PA-6	CIL ϕ 32 mm x h 18,3 mm	$^{241}\text{Am-Be}$ a 1 m
	○	PA-6	CIL ϕ 32 mm x h 27,5 mm	$^{241}\text{Am-Be}$ a 1 m
HANKINS, 1972	▲	PEAD	CIL ϕ 50,8 mm x h 19 mm	$^{238}\text{Pu-Be}$ a 30 cm
	△	PEAD	CIL ϕ 50,8 mm x h 19 mm	Térmico
	△	PEAD	CIL ϕ 50,8 mm x h 19 mm	$^{238}\text{Pu-F} + 1,25$ cm PEAD

Siglas: HM – hemisférico; CIL – cilindro; ϕ - diâmetro; h – altura.

Dentro do corpo moderador, os TLDs podem ficar dispostos em qualquer ponto radial ao longo do eixo do corpo moderador. Neste trabalho, adotou-se o critério de se posicionar o TLD-600 ao lado do TLD-700, porém em cavidades distintas, sem se friccionarem, no centro do eixo axial (HANKINS, 1973, PERKS, 1993). Por causa disto, procurou-se evitar que um detector blindasse o outro num mesmo ponto axial e que os detectores estivessem localizados a diferentes distâncias em irradiações não perpendiculares (LIU *et al.*, 1990).

4.3 Seleção da Blindagem dos Nêutrons Incidentes

Em princípio, seria possível empregar qualquer bom absorvedor de nêutrons na blindagem dos nêutrons incidentes (BNI), ou seja com alta seção de choque. Contudo, um material adequado para tal deve atender aos seguintes requisitos:

- ◆ Baixo custo;

- ◆ Poder ser manufacturado sob diferentes formas;
- ◆ Seção de choque do tipo 1/v;
- ◆ Toxicidade bioquímica tão baixa quanto possível.

Portanto, devido às considerações apresentadas, decidiu-se empregar o elemento boro, como material absorvedor de nêutrons na sua blindagem.

4.3.1 Material da Blindagem dos Nêutrons Incidentes

Optou-se pelo processo de moldagem para fabricação da BNI. Existem dois outros processos possíveis para fabricação da blindagem: *dye-press* e injeção. Contudo por limitações orçamentárias, os dois processos não foram testados.

4.3.2 Fôrma para Fabricação da BNI

Para a fabricação da blindagem dos nêutrons incidentes do monitor de albedo, de acordo com as especificações da seção 2.1.8, projetou-se uma fôrma em aço inox 304 e outra em poli(tetraflúor-etileno) (PTFE). Para uso da fôrma, foram fabricadas 10 unidades de cada material pela Oficina Mecânica do IRD. Exemplos de cada uma delas estão apresentados vazios e destampados na Figura 4.5.

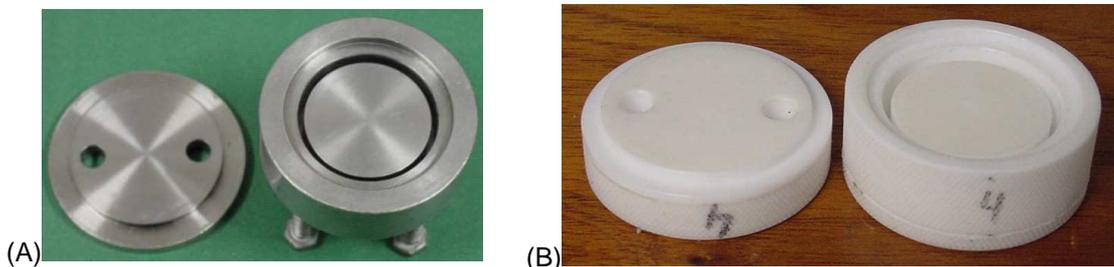


Figura 4.5: Fôrmas para fabricação manual da BNI em: (A) Aço Inox; (B) PTFE

Na parte superior de ambas as fôrmas, a tampa apresenta 2 aberturas para extravasar o excesso da mistura moldada. Enquanto que na parte inferior, ela possui 4 entradas para encaixe de parafusos. Para retirada da BNI moldada, coloca-se a fôrma de cabeça para baixo e aperta-se gradualmente cada um dos parafusos em sentido horário, de modo a inserir ar na cavidade da fôrma.

O ensaio experimental consistiu em verificar a capacidade de moldagem em ambos os materiais da fôrma (Figura 4.5), da mistura da resina epóxi 8003 da Epoxtec[§] (50% em peso) com um dos compostos de boro (50% em peso) com a intenção de se verificar o mais adequado para se produzir BNIs.

[§] Epoxtec Produtos Químicos Ltda, Rio de Janeiro, Brasil.

Antes das fôrmas receberem a mistura, elas eram limpas com acetona comercial. Posteriormente, as superfícies das fôrmas eram cobertas com desmoldante denominado “SL”, conforme instrução do fabricante da resina (EPOXTEC, 2008). A cura parcial do molde era obtida após 2 h. Porém, para que não houvesse risco de dano durante a operação de desmolde, aguardava-se, no mínimo 24 h, para que, à temperatura ambiente, houvesse ocorrido cura completa das misturas em processo de moldagem (EPOXTEC, 2008). Na Figura 4.6 é apresentada a BNI após o desmolde da fôrma de moldagem (A) e após o polimento das rebarbas (B).



Figura 4.6: BNI: (A) após o desmolde da fôrma e (B) após o polimento das rebarbas

Os resultados experimentais das moldagens dos compostos e os teóricos relativos à absorção de nêutrons térmicos pelos BNIs estão apresentados na Tabela 4.2; sendo que a absorção percentual de nêutrons térmicos descrita na última coluna desta tabela foi calculada a partir da equação 2.2.

Tabela 4.2: Desempenho dos compostos de boro testados como absorvedores de nêutrons em mistura com resina epoxídica

Composto de Boro	Tamanho da Partícula* (µm)	Homogeneidade da Mistura antes de Moldar	Capacidade de Moldar	Fissuras após Polimento	Absorção de Nêutrons Térmicos (%)
B (amorfo)	10	intermediária	não moldou	-x-	99,88
B ₄ C	50	a melhor	o melhor	nenhuma	99,54
CaB ₆	50	intermediária	boa	muitas	98,51
H ₃ BO ₃	40 a 230	ruim	não moldou	-x-	-
TiB ₂	50	intermediária	boa	algumas	91,73

nota: * - relativo ao da partícula do composto de boro.

Os resultados mostrados na Tabela 4.2 referem-se unicamente aos das misturas moldadas nas fôrmas de aço inox. As BNIs desmoldadas das fôrmas de PTFE revelaram-se deformadas. Entre as características necessárias para uma fôrma, pode-se inferir que o PTFE não apresentou uma ou mais de uma das seguintes características: alta condutividade térmica; alta resistência à deformação; boa estabilidade química.

Portanto, optou-se pela fabricação da fôrma em aço inox 304; apesar do material ser mais trabalhoso de ser usinado do que o PTFE e ter relativamente um alto custo em comparação a outros materiais de engenharia.

4.4 Fabricação do Monitor Individual de Nêutrons

Torna-se necessário quando se projeta um monitor individual de nêutrons que ele atenda à legislação vigente. Neste trabalho foi feita a opção de se blindar frontal e lateralmente o monitor de albedo entre os dois pares de TLDs usados. Adicionalmente, foi feita a opção de empregar-se somente um suporte no monitor, uma vez que o emprego de dois suportes para um monitor acarreta numa elevação do custo unitário de produção, quase o duplicando, se não for considerado o cinto ou qualquer outro meio para fixação dos suportes ao corpo humano.

4.4.1 Projeto do Monitor

Considerando-se todos os parâmetros apresentados anteriormente, foi desenvolvido o monitor individual de nêutrons tipo albedo de duas componentes para corpo inteiro, cujo corte transversal do seu projeto está apresentado na Figura 4.7. O depósito de pedido de patente foi efetuado sob o n° MU8500012-4 com a denominação “Monitor Individual de Nêutrons Passivo Tipo Albedo de Duas Componentes para Corpo Inteiro” (MARTINS *et al.*, 2005). Duas vistas explodidas deste monitor podem ser encontradas na Figura 4.8.

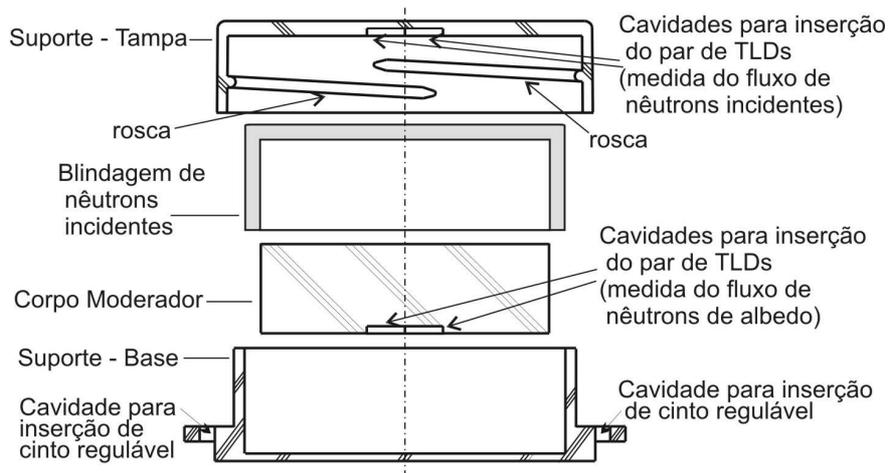


Figura 4.7: *Design* do monitor individual de nêutrons tipo albedo de duas componentes visto em corte transversal

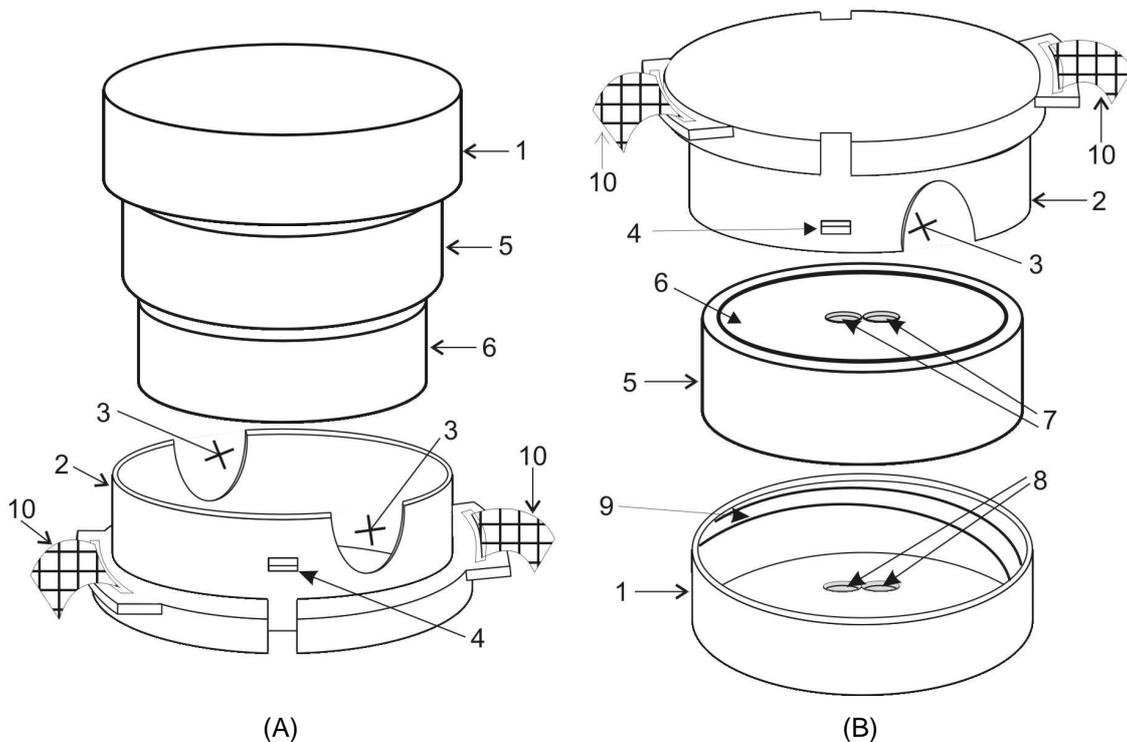


Figura 4.8: Monitor individual de nêutrons tipo albedo de duas componentes em vista explodida: (A) Visto de cima para baixo; (B) Visto de baixo para cima

Nº	Descrição na Figura	Nº	Descrição na Figura
1	Tampa do suporte do monitor	6	Corpo moderador
2	Base do suporte do monitor	7	Cavidades para TLDs de nêutrons de albedo
3	Reentrância para extração da BNI	8	Cavidades para TLDs de nêutrons incidentes
4	Pino de encaixe na rosca da tampa	9	Rosca para fechamento da tampa
5	BNI	10	Cinto

4.4.2 Fabricação do Suporte do Monitor

Pelas características descritas na seção 2.1.9, o PEAD foi escolhido como material para fabricação do suporte plástico, tanto da base como da tampa. Para injeção do suporte, foi contratada a empresa “Ciplast, Comércio e Indústria de Plásticos Ltda”. A partir de um porta-molde modelo 15.15 da empresa “Polimold”, aquela empresa (Ciplast) fabricou um molde, usinando cavidades e fazendo têmpera nas suas superfícies internas; para que a tampa e a base fossem simultaneamente injetadas. Na Figura 4.9 é apresentado o molde fabricado.

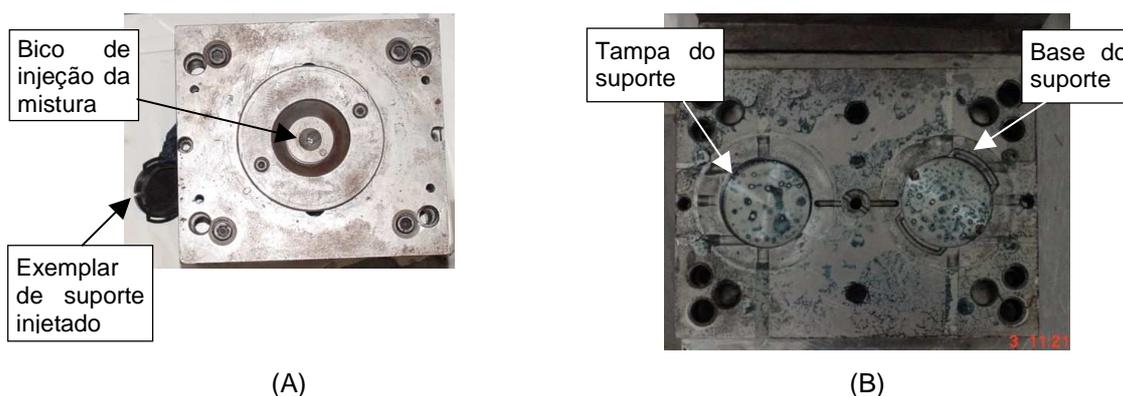


Figura 4.9: Molde para injeção simultânea da base e tampa do suporte plástico do monitor individual: (A) Fechado e (B) Aberto

Em ambas as partes do suporte, empregou-se o PEAD fabricado pela empresa “Nitaplast”, comercialmente denominado de Nitalen. De modo a blindar a luz incidente sobre os TLDs do monitor, empregou-se a carga de negro-de-fumo. Ficando o suporte com a coloração preta. O negro-de-fumo é uma das 4 formas alotrópicas do carbono que é amplamente empregado como pigmento (MERCK, 2001). Além disso, o negro-de-fumo apresenta vantagens ao ser inserido como carga: melhora a fotoestabilidade do PEAD quando exposto por um período prolongado à luz e à radiação ultravioleta.

4.4.3 Fabricação do Moderador

O corpo moderador foi produzido a partir da usinagem de tarugos cilíndricos de PEAD a partir de projeto baseado na Figura 4.7. Primeiramente, o tarugo de PEAD foi usinado até atingir o diâmetro desejado. Posteriormente, foram cortados os discos na altura especificada. Finalmente, as cavidades do par TLD-600 e TLD-700 foram usinadas.

4.4.4 Fabricação da Blindagem dos Nêutrons Incidentes

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4.2, optou-se trabalhar com carbetto de boro (ESK, 1996). Empregou-se o B₄C produzido pela South Bay[§] na proporção de 50% em peso na mistura com resina epóxi. De modo a se agilizar o processo de fabricação, cada uma das 10 fôrmas de aço inox foi individualmente identificada com uma letra. As fôrmas empregados na fabricação manual das BNIs estão descritos na seção 4.3.2.

4.4.5 Design Final

Confeccionado com uma tira de poliamida, na cor preta, com 2,5 cm de largura e presilhas de polipropileno, o cinto pode ser regulável de aproximadamente 73 até 117 cm à cintura do trabalhador (Figura 4.10).

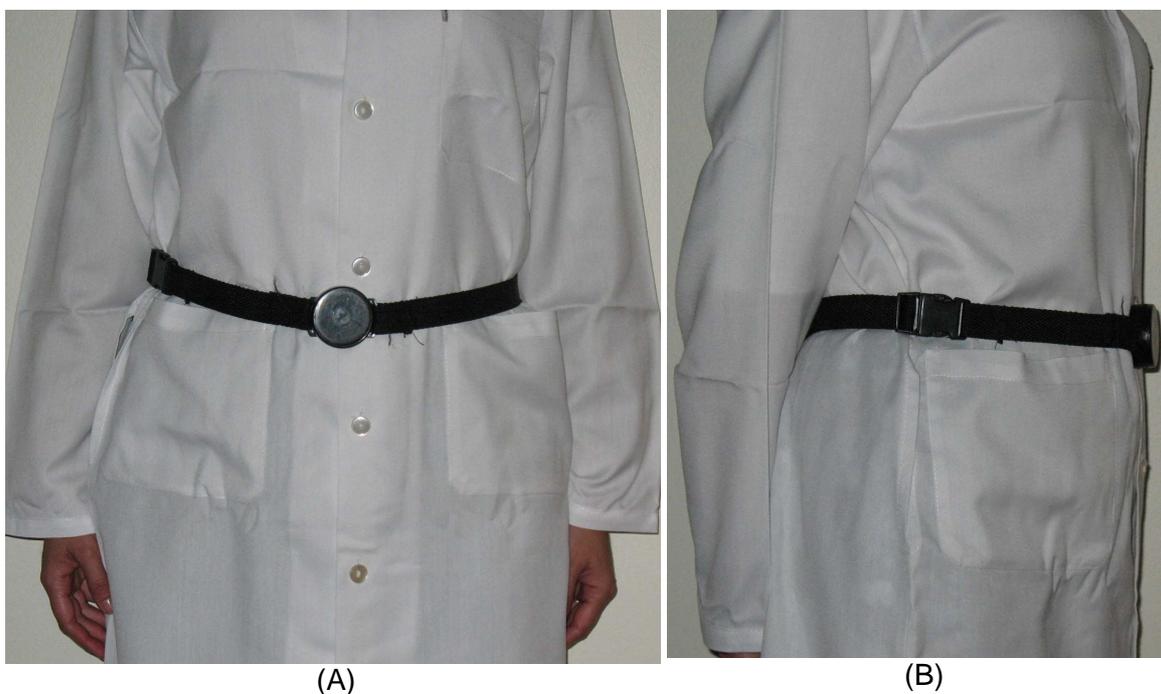


Figura 4.10: Modelo usando o monitor individual de nêutrons desenvolvido: (A) vista de frente e (B) vista lateral

4.5 Descrição do Algoritmo

A partir das informações descritas na seção 2.2.2 e da experiência adquirida em monitoração individual, foi elaborado o algoritmo para o cálculo da dose de nêutrons que está apresentado na Figura 4.11. O processamento físico do monitor tem início quando da desmontagem de todos os Monitores dos IOEs (M_{IOEs}) de uma instituição/setor, inclusive do seu Monitor de Controle (MC) se houver.

[§] South Bay Technology, San Clemente, Estados Unidos.

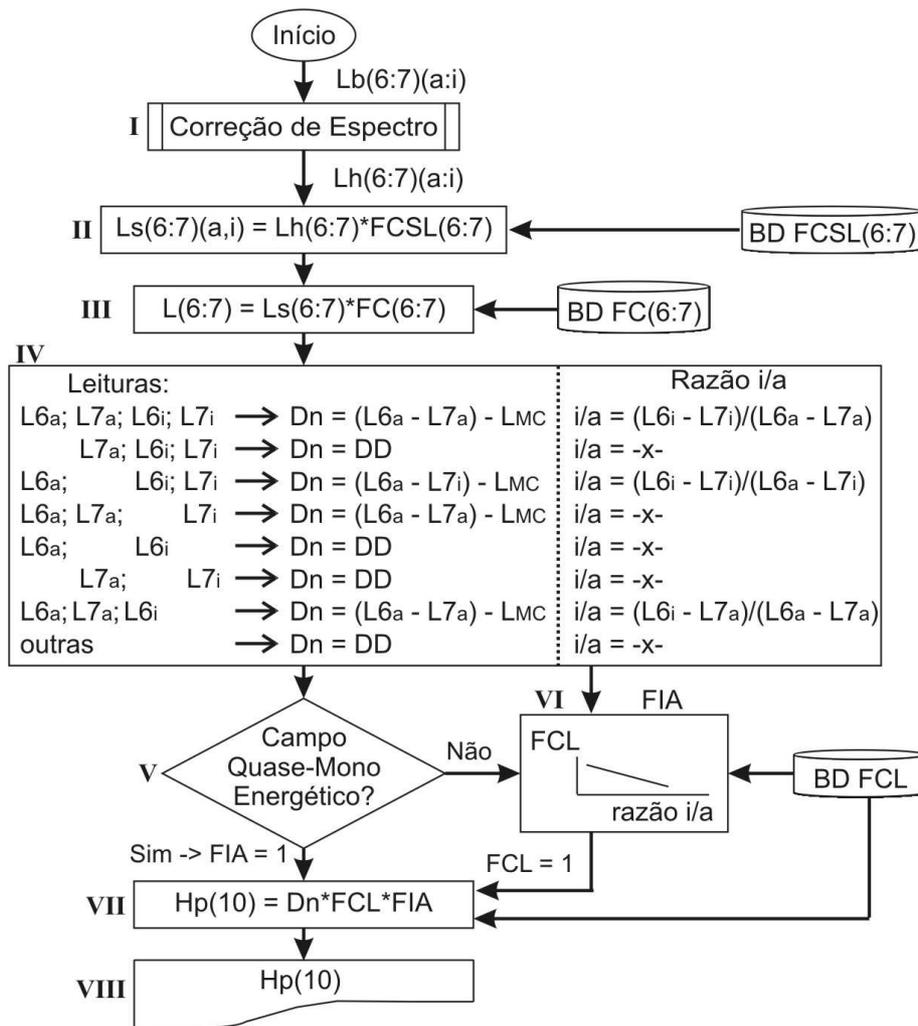


Figura 4.11: Fluxograma para cálculo do Equivalente de Dose Pessoal de nêutrons

Etapa	Descrição da Etapa
I	A curva TL é eventualmente corrigida de qualquer sinal espúrio (por exemplo, ruído) que esteja presente em qualquer dos detectores
II	Devido ao fenômeno da supralinearidade, a integração da curva TL é eventualmente corrigida (somente para doses maiores que 1 Gy – faixa não ocupacional)
III	As leituras do TLD-600 e do TLD-700 são corrigidas pelo FC mensal de cada tipo de detector
IV	A partir das quatro leituras dos detectores do monitor, são calculadas: a dose bruta de nêutrons (Dn) e a “razão i/a”
V	Decisão de se aplicar um “FIA” se o campo de nêutrons não for quase-monoenergético
VI	É obtido um fator “FIA” para correção do FCL, se aplicável
VII	Cálculo do $H_p(10)$
VIII	Registro do $H_p(10)$ de cada monitor de albedo

Siglas e Nomenclaturas da Figura 4.11:

- BD FC(6:7) - banco de dados do Fator de Calibração para a leitura de fótons do TLD-600 - '6' ou do TLD-700 - '7' (mGy.nC^{-1}).
- BD FCL - banco de dados do Fator de Conversão Local (mSv.mGy^{-1}).
- BD FC SL(6:7) - banco de dados do Fator de Correção da Supralinearidade do detector: '6' - TLD-600 ou '7' - TLD-700 (adimensional).
- D_n - dose bruta de nêutrons, sem correção (mGy).
- DD - dose desconhecida.
- FC SL(6:7) - fator de correção da supralinearidade do detector: '6' - TLD-600 ou '7' - TLD-700 (adimensional).
- L(6:7)(a:i) - leitura do '6' - TLD-600 ou do '7' - TLD-700, para o 'a' - campo de nêutrons de albedo e o 'i' - campo de nêutrons incidentes (nC).
- L_b(6:7)(a:i) - leitura bruta do '6' - TLD-600 ou do '7' - TLD-700, para o 'a' - campos de nêutrons de albedo e o 'i' - campos de nêutrons incidentes e o (nC).
- L_h(6:7)(a:i) - leitura corrigida pela análise de espectro do '6' - TLD-600 ou do '7' - TLD-700, para o 'a' - campo de nêutrons de albedo e o 'i' - campo de nêutrons incidentes (nC).
- L_{MC} - leitura da componente de albedo do monitor de controle (nC).
- L_s(6:7)(a:i) - leitura corrigida para supralinearidade do TLD-600 '6' ou do TLD-700 '7', para o 'a' - campo de nêutrons de albedo e para o 'i' - campo de nêutrons incidentes (nC).

Capítulo 5

CALIBRAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO

5.1 Calibração do Monitor: Obtenção dos FCLs e FIAs

Para calibração do monitor individual de albedo em campos de nêutrons oriundos de fontes radioisotópicas, foram empregadas as fontes de nêutrons descritas na Tabela 3.2. Procurou-se realizar as irradiações com o valor de $H_p(10)$ em torno de 3 mSv. Contudo, a fonte de $^{241}\text{Am-B}$ apresenta uma baixa fluência. Por causa disto, para o $^{241}\text{Am-B}$ somente foi realizada uma calibração a 50 cm com o valor de dose de 1 mSv. Para esta distância, o LID obtido para a fonte de $^{241}\text{Am-B}$ é 0,12 mSv. Para a distância recomendada (75 cm) pela norma ISO 8529-2 (ISO, 2000b), os LIDs obtidos para as fontes de $^{252}\text{Cf}(\text{D}_2\text{O})$, ^{252}Cf , $^{241}\text{Am-Be}$ e $^{238}\text{Pu-Be}$ foram, respectivamente, 0,009 mSv, 0,06 mSv, 0,09 mSv e 0,08 mSv. Como as fontes de $^{238}\text{Pu-Be}$ não são campos padronizados, foram efetuadas apenas três medidas para se obter uma estimativa da resposta do monitor de albedo neste campo de nêutrons. Os resultados dos FCLs estão apresentados na Tabela 5.1 (MARTINS *et al.*, 2007c).

Tabela 5.1: FCLs (mSv/mGy ^{60}Co) obtidos para fontes de nêutrons do LN/IRD

Fonte	distância (cm)						
	50	75	100	150	225	300	400
$^{252}\text{Cf}(\text{D}_2\text{O})$	0,147	0,154	0,141	0,123	0,108	0,0885	0,0915
^{252}Cf	1,09	1,08	0,987	0,858	0,723	0,573	0,498
$^{241}\text{Am-B}(\alpha,n)$	1,89						
$^{241}\text{Am-Be}(\alpha,n)$	1,74	1,51	1,41	1,24	0,984	0,845	0,782
$^{238}\text{Pu-Be}(\alpha,n)$		1,21		0,976		0,742	

A partir dos resultados obtidos e apresentados na Tabela 5.1, foram construídas as curvas relacionando o FIA com a razão $i/a \times 100$. Na Figura 5.1, estão apresentados estas relações para obtenção dos FIAs para os campos de nêutrons de $^{252}\text{Cf}(\text{D}_2\text{O})$, ^{252}Cf , $^{241}\text{Am-Be}$ e $^{238}\text{Pu-Be}$ (qualitativamente) (MARTINS *et al.*, 2007b). Os valores calculados para os FIAs serviram como dados de entrada para o algoritmo de cálculo da dose de nêutrons.

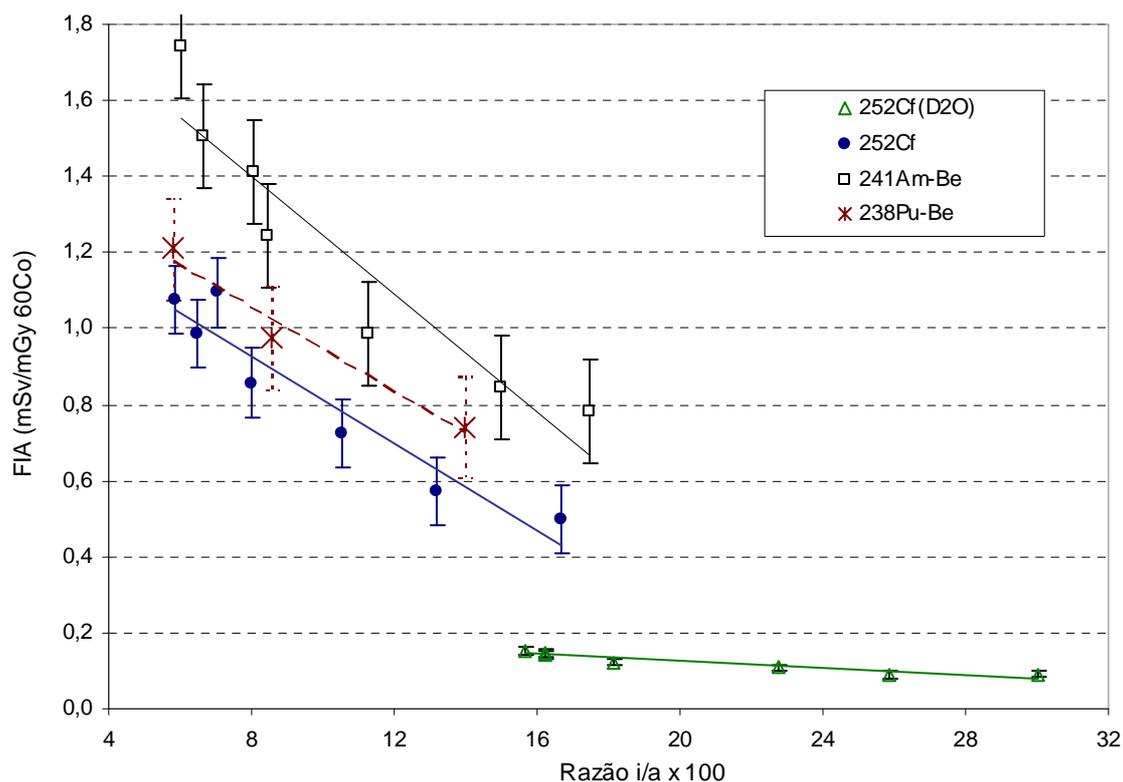


Figura 5.1: Relação entre o FIA e razão i/a para alguns campos de nêutrons

Símbolo	Campo de Nêutrons	FIA	Correlação
△	²⁵² Cf(D ₂ O)	-0,0045(i/a) + 0,2142	0,889
○	²⁵² Cf	-0,0571(i/a) + 1,382	0,914
□	²⁴¹ Am-Be	-0,0774(i/a) + 2,022	0,881
*	²³⁸ Pu-Be	-0,0553(i/a) + 1,498	0,966

A calibração do monitor individual de albedo em campos de nêutrons monoenergéticos ou quase-monoenergéticos somente foi possível devido à participação deste “Sistema de Monitoração Individual de Nêutrons de Duas Componentes” na *Intercomparison on Measurements of the Quantity Personal Dose Equivalent H_p(d) in Mixed (Neutron-Gamma) Fields* (SCHUHMACHER *et al.*, 2004, MARTINS *et al.*, 2007c). Na primeira etapa desta intercomparação internacional, os monitores individuais foram irradiados em campos padrões de nêutrons, incluindo cinco feixes monoenergéticos descritos pela norma ISO 8529-1 (ISO, 2001). A irradiação no campo de nêutrons térmicos SIGMA do IRSN (*Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire*) permitiu a comparação com uma prévia irradiação no campo de nêutrons térmicos denominado Fluxo Térmico Padrão (FTP) do IRD. Os resultados destas calibrações são apresentados na Tabela 5.2 (MARTINS *et al.*, 2007b).

Tabela 5.2: FCLs, razão i/a e LID para fontes de nêutrons térmicos e monoenergéticas produzidas por aceleradores

Qualidade da Radiação	Laboratório de Irradiação	Instalação	d (cm)	FCL (mSv/mGy ⁶⁰ Co)	razão i/a x 100	LID (mSv)
Térmico	IRD	FTP	10	0,388	133	0,023
Térmico	IRSN	SIGMA*	50	0,186	869	0,016
70 keV	PTB	Acelerador	90	0,0747	5,76	0,0064
144 keV	PTB	Acelerador	75	0,198	4,52	0,017
565 keV	PTB	Acelerador	100	0,610	5,02	0,052
1,2 MeV	PTB	Acelerador	100	1,05	4,69	0,09
5 MeV	PTB	Acelerador	100	2,62	4,23	0,22

Nota: * Vide norma ISO 12789 (2000a)

Siglas: PTB - Physikalisch-Technische Bundesanstalt

d(cm) - Vide seção 3.4.2

Pode ser comprovado na Tabela 5.2 a não aplicabilidade do FIA em campos monoenergéticos: o valor médio da razão i/a x 100 apresentou-se um valor médio de 4,8, apesar da energia ter variado de 70 keV até 5 MeV. A título de visualização do formato da curva, considerando-se que para cada qualidade de radiação monoenergética foi irradiado somente 1 monitor, pode ser encontrada na Figura 5.2 a curva da resposta do FCL com a energia, desde 70 keV até 5 MeV.

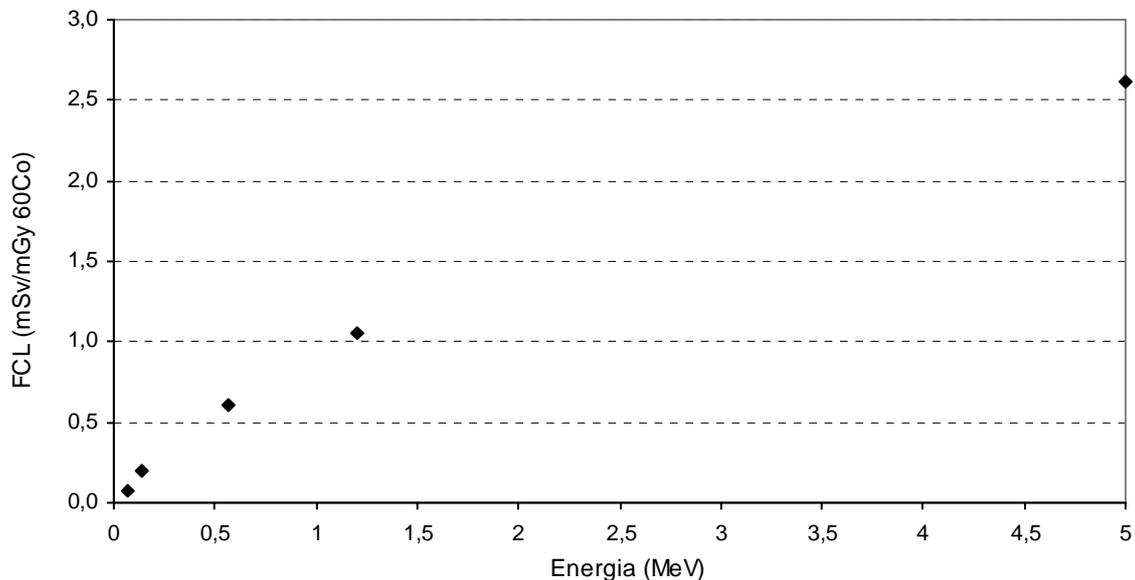


Figura 5.2: Relação entre o FCL e a energia de campos de nêutrons

5.2 Resultados dos Testes de Caracterização da ISO 21909

Para a realização dos testes de caracterização da ISO 21909, descritos na Tabela 2.1, foi empregada a fonte de ^{252}Cf pelo fato dela apresentar um formato puntiforme e um FCL próximo à unidade. Todas as irradiações com nêutrons foram realizadas no Salão de Baixo Espalhamento do LN/IRD na distância de 75 cm.

Em todos os testes da ISO em que foi necessário irradiar também com campos de fótons, foi empregado o irradiador de ^{137}Cs descrito na Tabela 3.1. Uma visualização do arranjo de irradiação simultânea com a fonte de ^{137}Cs de 4 monitores individuais em um simulador no LABIR/IRD é mostrada na Figura 5.3.



Figura 5.3: Visualização do arranjo experimental de irradiação com fonte ^{137}Cs (quatro monitores por simulador) no LABIR/IRD

Inicialmente, todos os testes da ISO 21909 foram concebidos para serem realizados com 8 monitores em cada grupo. Porém, à medida que se identificou que a principal dificuldade em se atender aos requisitos dos testes era a incerteza estatística

relacionada à medição e, em alguns casos, ao critério restrito de aceite e não por influência do parâmetro analisado no teste, aumentou-se a quantidade de monitores empregada.

O termo H_a (*apparent photon dose equivalent*), equivalente de dose aparente em fótons do $H_p(10)$ de nêutrons (vide também rodapé na Tabela 2.1), descritos em quase todos os testes da norma ISO 21909 (para a técnica TLD-albedo) pode ser associado à dose bruta de nêutrons (D_n) do algoritmo deste trabalho.

Os testes de caracterização da ISO 21909 não foram realizados na seqüência descrita nesta norma e apresentados a seguir; mas de acordo com a conciliação entre o valor da dose de nêutrons requerida para o teste e, principalmente, a disponibilidade para irradiação no Salão de Baixo Espalhamento. O código entre parêntesis nos subtítulos a seguir refere-se ao número do teste de caracterização da ISO apresentado na Tabela 2.1.

5.2.1 Homogeneidade do Lote (C.3.1)

Um grupo de 12 monitores foi irradiado com valores iguais de $H_p(10)$ de nêutrons e fótons totalizando 2 mSv. O H_a foi de 1,045 mSv. O coeficiente de variação do \bar{H}_a obtido de acordo com a equação C.1 foi:

$$CV = \frac{0,133 \text{ mSv}}{1,068 \text{ mSv}} = 0,1245$$

Atendendo-se ao requisito de $CV \leq 20\%$ (teste C.3.1 da Tabela 2.1).

5.2.2 Reprodutibilidade (C.3.2)

Um grupo de 12 monitores foi irradiado com valores iguais de $H_p(10)$ de nêutrons e fótons totalizando 2 mSv. O H_a foi de 1,045 mSv. Este procedimento foi repetido 10 vezes. Obtiveram-se resultados na faixa de 0,06 a 0,15, conforme apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Resultados dos testes de Reprodutibilidade (C.3.2)

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\bar{H}_{a,i}$	1,117	1,098	1,035	1,050	0,987	1,094	1,338	1,157	1,200	1,267	1,164	1,190
s_i	0,078	0,086	0,098	0,089	0,081	0,068	0,052	0,057	0,063	0,110	0,070	0,063
$I_{s,i}$	0,041	0,046	0,052	0,047	0,043	0,036	0,027	0,031	0,034	0,059	0,037	0,034
$\frac{s_i + I_{s,i}}{\bar{H}_{a,i}}$	0,11	0,12	0,15	0,13	0,13	0,09	0,06	0,08	0,08	0,13	0,09	0,08

Atendendo-se ao requisito de $CV \leq 20\%$ (teste C.3.2 da Tabela 2.1).

5.2.3 Linearidade (C.3.3)

Para atender ao critério $0,90 \leq \frac{\bar{H} \pm I_{i,j}}{H_{a,i,j}} \leq 1,10$, grupos de n monitores

foram irradiados com valores iguais de $H_p(10)$ de nêutrons e fótons totalizando uma das cinco faixas de dose: 1 mSv, 3 mSv, 10 mSv, 30 mSv, 100 mSv. Em algumas faixas foram empregados até 20 monitores, conforme arranjo de irradiação apresentado na Figura 3.11. Uma visualização deste arranjo de irradiação simultânea com fonte de nêutrons e 5 simuladores no LN/IRD é mostrado na Figura 5.4.



Figura 5.4: Arranjo experimental de irradiação simultânea com fonte de nêutrons de cinco simuladores (quatro monitores por simulador) no SBE do LN/IRD

O $H_{a,j}$ variou conforme a faixa de dose. Obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Resultados dos testes de Linearidade (C.3.3)

j	Faixa	$H_{a,j}$ (mSv)	n	\bar{H}_j (mSv)	I_j	$\frac{\bar{H}_j - I_j}{H_{a,j}}$	$\frac{\bar{H}_j + I_j}{H_{a,j}}$
1	1 mSv	0,562	20	0,581	0,027	0,99	1,08
2	3 mSv	1,567	20	1,657	0,064	1,02	1,10
3	10 mSv	5,225	20	5,497	0,184	1,02	1,09
4	30 mSv	15,67	20	15,14	0,796	0,91	1,02
5	100 mSv	53,76	12	51,57	3,518	0,89	1,03
5*	100 mSv	52,25	17	52,19	2,434	0,95	1,05

nota: *itálico* - refere-se ao resultado que não atendeu inicialmente ao requisito.

* - teste que necessitou ser repetido para melhorar a estatística e atender ao critério; porém houve perda no resultado de 3 monitores.

Atendendo-se ao requisito (teste C.3.3 da Tabela 2.1).

5.2.4 Limite Inferior de Detecção (C.3.4)

Para atender ao critério $t_n \cdot s \leq 0,30 \text{ mSv}$, um grupo de 12 monitores foi preparado e avaliado sem ser irradiado, em campos de nêutrons e/ou de fótons. Obteve-se o resultado de $2,201 \times 0,026 \text{ mSv} = 0,06 \text{ mSv}$. Atendendo-se ao requisito (teste C.3.4 da Tabela 2.1).

5.2.5 Desvanecimento (C.3.5)

Para atender ao critério $0,90 \leq \frac{\bar{H} \pm I_i}{H_{a,i}} \leq 1,10$, inicialmente, um grupo de

12 monitores foi irradiado com valores iguais de $H_p(10)$ em campos de nêutrons e fótons totalizando aproximadamente 1 mSv. O H_a foi de 0,522 mSv. Após um período de armazenamento de 90 dias em condições padrões, todos os monitores foram avaliados. Obteve-se o resultado de 1,02 e 1,24, respectivamente, para o limite inferior e superior do critério. Não se atendendo ao requisito.

Repetiu-se o teste com um grupo de 32 monitores. O grupo foi irradiado com valores iguais de $H_p(10)$ em campos de nêutrons e fótons totalizando aproximadamente 1 mSv. O H_a foi de 0,577 mSv. Após um período de armazenamento de 90 dias em condições padrões, todos os monitores foram avaliados. Obteve-se o resultado de $\frac{0,573 \text{ mSv} - 0,0336 \text{ mSv}}{0,577 \text{ mSv}} = 0,93$ e $\frac{0,573 \text{ mSv} + 0,0336 \text{ mSv}}{0,577 \text{ mSv}} = 1,05$, respectivamente, para o limite inferior e superior do critério. Atendendo-se ao requisito (teste C.3.5 da Tabela 2.1).

5.2.6 Sinal Residual (C.3.6)

Para atender ao critério $t_n \cdot s \leq 0,30 \text{ mSv}$, um grupo de 12 monitores foi irradiado com valores iguais de $H_p(10)$ em campos de nêutrons e fótons totalizando aproximadamente 20 mSv. Após serem avaliados, estes mesmos monitores foram preparados e avaliados sem serem irradiados, em campos de nêutrons e/ou de fótons. Obteve-se o resultado de $2,201 \times 0,018 \text{ mSv} = 0,04 \text{ mSv}$. Atendendo-se ao requisito (teste C.3.6 da Tabela 2.1).

5.2.7 Auto Irradiação (C.3.7)

Para atender ao critério $\bar{H}_i + I_i \leq 0,30$, um grupo de 12 monitores foi preparado sem serem irradiados, em campos de nêutrons e/ou de fótons. Após um período de armazenamento de 60 dias em condições padrões, onde a taxa de dose da radiação de fundo é conhecida, todos os monitores foram avaliados. Obteve-se o resultado de $0,029 \text{ mSv} + 0,012 \text{ mSv} = 0,04 \text{ mSv}$. Atendendo-se ao requisito (teste C.3.7 da Tabela 2.1).

5.2.8 Estabilidade da Resposta sob Diversas Condições Climáticas (C.3.8)

5.2.8.1 Efeito na Resposta do Armazenamento nas Condições Padrões de Teste (C.3.8.1)

Para atender ao critério $0,95 \leq \frac{\bar{H}_j \pm I_{i,j}}{H_{a,i,j}} \leq 1,05$, inicialmente dois grupos

de 12 monitores foram preparados e armazenados por 24 horas em condições padrões de teste.

O 1º grupo foi irradiado com valores iguais de $H_p(10)$ em campos de nêutrons e fótons totalizando aproximadamente 4 mSv. O H_a foi de 2,090 mSv. Depois de um período de armazenamento contínuo de 30 dias em condições padrões, o 2º grupo foi

irradiado da mesma forma que o 1º grupo. Após ambos os grupos terem sido mantidos por 24 horas em condições padrões de teste, todos os monitores foram avaliados. Obteve-se o resultado para o 1º grupo de 0,96 e 1,06, respectivamente para o limite inferior e superior do critério e o resultado para o 2º grupo de 1,00 e 1,17, respectivamente, para o limite inferior e superior do critério. Não se atendendo ao requisito para este teste.

De modo a se atender ao critério de 5%, repetiu-se o teste aumentando-se os dois grupos para 20 monitores. Ambos os grupos foram preparados e armazenados por 24 horas em condições padrões de teste. O 1º grupo foi irradiado com valores de $H_p(10)$ em campos de nêutrons e fótons totalizando aproximadamente 5,976 mSv. O H_a foi de 3,110 mSv. Após um período de armazenamento contínuo de 30 dias em condições padrões, o 2º grupo foi irradiado com valores de $H_p(10)$ em campos de nêutrons e fótons totalizando aproximadamente 6,057 mSv. O H_a foi de 3,534 mSv. Depois de um período de armazenamento de 24 horas em condições padrões de teste de ambos os grupos, todos os monitores foram avaliados.

Obteve-se o resultado para o 1º grupo de $\frac{3,080 \text{ mSv} - 0,108 \text{ mSv}}{3,110 \text{ mSv}} = 0,96$ e

$\frac{3,080 \text{ mSv} + 0,108 \text{ mSv}}{3,110 \text{ mSv}} = 1,03$, respectivamente, para o limite inferior e superior do

critério.

Para o 2º grupo, obteve-se o resultado de $\frac{3,530 \text{ mSv} - 0,133 \text{ mSv}}{3,534 \text{ mSv}} = 0,96$ e

$\frac{3,530 \text{ mSv} + 0,133 \text{ mSv}}{3,534 \text{ mSv}} = 1,04$, respectivamente, para o limite inferior e superior do

critério.

Atendendo-se ao requisito, para ambos os grupos (teste C.3.8.1 da Tabela 2.1).

5.2.8.2 Efeito na Resposta do Armazenamento em Altas Umidade e Temperatura (C.3.8.2)

Para atender ao critério $0,90 \leq \frac{\bar{H}_j \pm I_{i,j}}{H_{a,i,j}} \leq 1,10$, inicialmente dois grupos

de 16 monitores foram preparados e armazenados por 24 horas em condições padrões de teste.

O 1º grupo foi irradiado com valores iguais de $H_p(10)$ em campos de nêutrons e fótons totalizando aproximadamente 3 mSv. O H_a foi de 1,567 mSv. Ambos os

grupos foram armazenados por um período contínuo de 48 horas, com umidade $\geq 90\%$ e temperatura ambiente = $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, na “Câmara Climática de Temperatura e Umidade Controladas” descrita na seção 3.1.3, conforme pode ser visualizado na Figura 5.5.

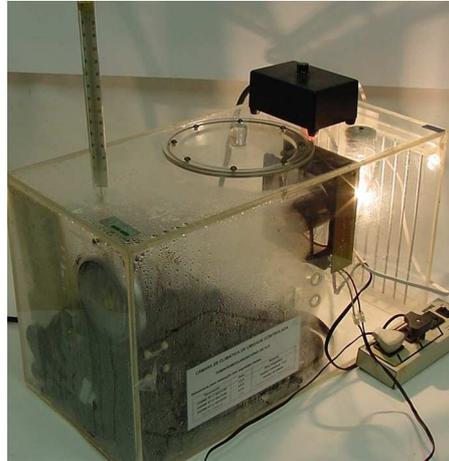


Figura 5.5: Visualização da “Câmara Climática de Temperatura e Umidade Controladas” durante realização do teste “Armazenamento por 48 horas: Umidade $\geq 90\%$ e Temperatura = $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ” (C.3.8.2) da ISO 21909

Posteriormente, o **2º** grupo foi irradiado da mesma forma que o **1º** grupo. Após ambos os grupos terem sido mantidos por 24 horas em condições padrões de teste, todos os monitores foram avaliados.

Obteve-se o resultado para o **1º** grupo de $\frac{1,646 \text{ mSv} - 0,085 \text{ mSv}}{1,567 \text{ mSv}} = 1,00$ e

$\frac{1,646 \text{ mSv} + 0,085 \text{ mSv}}{1,567 \text{ mSv}} = 1,10$, respectivamente, para o limite inferior e superior do critério.

Para o **2º** grupo, obteve-se o resultado de $\frac{1,627 \text{ mSv} - 0,096 \text{ mSv}}{1,567 \text{ mSv}} = 0,98$ e

$\frac{1,627 \text{ mSv} + 0,096 \text{ mSv}}{1,567 \text{ mSv}} = 1,10$, respectivamente, para o limite inferior e superior do critério. Atendendo-se ao requisito, para ambos os grupos (teste C.3.8.2 da Tabela 2.1).

5.2.9 Efeito da Luz sobre o Monitor (C.3.9)

5.2.9.1 Efeito na Dose Zero da Exposição à Luz por 24 Horas (C.3.9.1)

Para atender ao critério $|\bar{H}_{a,1} - \bar{H}_{a,2}| \pm I \leq 0,30$, dois grupos de 8 monitores foram preparados sem serem irradiados, em campos de nêutrons e/ou de fótons. O 1º grupo foi exposto à iluminação equivalente à luz solar, por um período de 24 horas com a temperatura mantida abaixo de 40°C, enquanto que o 2º grupo foi armazenado no escuro. Após 24 horas, todos os monitores foram avaliados. Os maiores valores de dose obtidos (0,02 mSv) foram para 2 monitores do 2º grupo mantidos no escuro. Obteve-se o resultado de $|0,003 \text{ mSv} - 0,007 \text{ mSv}| + 0,009 \text{ mSv} = 0,01 \text{ mSv}$ para o limite superior. Atendendo-se ao requisito (teste C.3.9.1 da Tabela 2.1).

5.2.9.2 Efeito na Resposta da Exposição à Luz por 168 Horas (C.3.9.2)

Para atender ao critério $0,90 \leq \frac{\bar{H}_1}{\bar{H}_2} \pm I \leq 1,10$, dois grupos de 20 monitores foram preparados e irradiados em campos de nêutrons. O H_a de ambos os grupos foi de 0,993 mSv. O 1º grupo foi exposto à iluminação equivalente à luz solar, por um período de 168 horas (1 semana) com a temperatura mantida abaixo de 40°C, enquanto que o 2º grupo foi armazenado no escuro. Após 24 horas, todos os monitores foram avaliados.

Obteve-se o resultado de $\frac{0,945}{0,949} - 0,028 = 0,97$ e $\frac{0,945}{0,949} + 0,028 = 1,02$,

respectivamente, para o limite inferior e superior do critério. Atendendo-se ao requisito (teste C.3.9.2 da Tabela 2.1).

5.2.10 Dependência Angular (C.3.10)

Para atender ao critério $0,70 \leq 0,25 \sum_{j=1}^4 \frac{R_j}{R_1} \pm I \leq 1,30$, grupos de 6

monitores foram irradiados com nêutrons com valores de $H_p(10)$ em torno de 1 mSv, para as incidências normal, $\pm 15^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$. Na Tabela 5.5 são apresentados os resultados parciais para cada ângulo.

Tabela 5.5: Resultados parciais de cada ângulo

j	Grupo	$H_p(10)$ (mSv)	N	R_j	I_j
1	0°	1,00	6	1,047	0,065
2	±15°	1,00	6	1,102	0,053
3	±45°	1,00	6	0,905	0,044
4	±60°	1,00	5*	1,143	0,163

* - houve perda de monitores na incidência de ±60°.

Obteve-se o resultado de $1,002 - 0,077 = 0,93$ e $1,002 + 0,077 = 1,08$, respectivamente, para o limite inferior e superior do critério. Atendendo-se ao requisito (teste C.3.10 da Tabela 2.1).

5.2.11 Resumo dos Testes da ISO

O resumo dos resultados de todos os testes da ISO 21909, descritos na Tabela 2.1, é apresentado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Resumo dos resultados obtidos para os testes da ISO 21909

Teste*	Descrição	# Monitores	Resultado Obtido
C.3.1	Homogeneidade do Lote	12	12,45% ≤ 20 %
C.3.2	Reprodutibilidade	12	0,06 a 0,15 < 0,2
C.3.3	Linearidade	20	1: 0,99 a 1,08
		20	3: 1,02 a 1,10
		20	10: 1,02 a 1,09
		12	30: 0,91 a 1,02
		17	100: 0,95 a 1,05
C.3.4	Limite Inferior de Detecção	12	0,06 mSv < 0,3 mSv
C.3.5	Desvanecimento	32	0,93 a 1,05
C.3.6	Sinal Residual	12	0,04 mSv < 0,3 mSv
C.3.7	Auto Irradiação	12	0,04 mSv < 0,3 mSv
C.3.8	Estabilidade da Resposta sob Diversas Condições Climáticas com:		
C.3.8.1	Armazenamento por 30 Dias nas Condições Climáticas Padrão de Teste	20 +20	1º: 0,96 a 1,03 2º: 0,96 a 1,04
C.3.8.2	Armazenamento por 48 horas: Umidade Relativa do Ar ≥ 90% e Temperatura Ambiente = 40°C ± 2°C	16 + 16	1º: 1,00 a 1,10 2º: 0,98 a 1,10
C.3.9	Efeito da Luz sobre o Monitor		
C.3.9.1	Efeito na Dose Zero da Exposição à Luz por 24h	8 + 8	lote = 0,01 mSv monitor [§] = 0,02 mSv
C.3.9.2	Efeito na Resposta da Exposição à Luz por 168h	20 + 20	0,97 a 1,02
C.3.10	Dependência Angular	40	0,93 a 1,08

Nota: * - referente ao código da Norma ISO 21909

§ - os maiores valores de dose referem-se a dois monitores mantidos no escuro

Durante a caracterização pela ISO 21909, a irradiação neutrônica mais longa de ser realizada foi a do teste de “Linearidade” (C.3.3) para o valor verdadeiro convencional (VC) de 100 mSv que durou quase 157 horas. O teste mais trabalhoso de ser realizado foi o de “Reprodutibilidade” (C.3.2) que envolveu 10 processos de tratamentos térmicos dos mesmos TLDs, irradiação dos mesmos monitores em campos neutrônicos e de fótons. Enquanto que o teste de “Armazenamento por 30 Dias nas Condições Climáticas Padrão de Teste” (C.3.8.1) foi o mais difícil de se atender ao seu critério, devido ao limite de aceitação ser muito restrito, de apenas 5%.

De uma maneira geral, a execução com sucesso dos testes de caracterização da norma ISO 21909 é extremamente difícil de ser realizada. Tanto que até a presente

data, não foi encontrado na literatura nenhuma outra instituição que tenha conseguido, à semelhança do presente trabalho, caracterizar um sistema de monitoração individual de nêutrons em qualquer uma das técnicas de medida abrangidas por esta norma (ISO, 2005): emulsões nucleares, detectores de traços, TLD-albedo, detectores de bolhas superaquecidas ou câmara de ionização. Uma crítica a esta norma já existe por outros autores (BEHRENS e AMBROSI, 2007).

Existem vários testes da ISO 21909 que necessitariam ser revistos. Os dois testes relacionados à “Estabilidade sobre Diversas Condições Climáticas” (série C.3.8) apresentam critério de aceite de 5% e 10%, respectivamente, para “Armazenamento por 30 Dias nas Condições Climáticas Padrão de Teste” (C.3.8.1) e “Armazenamento por 48 horas: Umidade Relativa do Ar \geq 90% e Temperatura Ambiente Padrão” (C.3.8.2). Porém, o teste “Homogeneidade do Lote” (C.3.1) apresenta 20% como critério de aceitação! Ou seja, somente a homogeneidade do lote acarretaria que os limites dos dois testes relacionados à estabilidade fossem de no mínimo 20%. Por outro lado, considerando-se que a homogeneidade do lote interfere em todos os outros testes, o limite do teste “Homogeneidade do Lote” (C.3.1) poderia ser mais restritivo. Adicionalmente, como a reprodutibilidade do sistema interfere em todos os outros testes, o limite do teste “Reprodutibilidade” (C.3.2) também poderia ser mais restritivo. Considerando-se que as fontes radioativas de nêutrons apresentam um campo misto de radiação (nêutrons e gama), todas as vezes que se realizam irradiações em campos de nêutrons, já existiria um campo de fótons a ser discriminado no cálculo da dose de nêutrons. Assim, o teste de “Reprodutibilidade” (C.3.2) poderia ser muito menos trabalhoso de ser realizado se fosse estruturado apenas com a irradiação de campos de nêutrons ao invés de campos mistos (nêutrons e gama). Continuando com a mesma linha de análise anterior, o teste da ISO 21909 “Exposição à Luz por 1 Semana” (C.3.9.2), da série “Efeito da Luz sobre o Monitor” (C.3.9), também necessitaria ter o seu critério de aceite modificado; ao invés dos atuais 10%, para no mínimo 20%.

Os testes da ISO 21909 relacionados ao LID (C.3.4 – Limite Inferior de Detecção, C.3.6 – Sinal Residual, C.3.7 – Auto-Irradiação e C.3.9.1 – Exposição à Luz por 24h) deveriam ter os seus critérios de aceite relacionados ao nível de registro de cada país e não a um valor fixo de 0,3 mSv, como estipulado em seus requisitos.

5.3 Resultados dos Testes de Caracterização do IRD

À semelhança dos testes da ISO 21909, os testes do IRD foram concebidos para serem realizados com 8 monitores em cada grupo. Da mesma forma, por causa da dificuldade em se atender a alguns requisitos dos testes em decorrência da

incerteza estatística relacionada à medição e, no caso do teste “Discriminação Nêutron-Gama” (4.3.7), ao seu critério restrito de aceite, aumentou-se a quantidade de monitores empregada.

À exceção do teste de “Linearidade” (4.3.5), quando para o VC de 100 mSv se empregou a fonte de ^{252}Cf , para todos os demais testes foi empregada a fonte de $^{241}\text{Am-Be}$. No teste de “Discriminação Nêutron-Gama” (4.3.7), quando foi necessário irradiar também com fótons, foi empregado o mesmo arranjo mostrado na Figura 5.4. Excetuando-se o teste de “Limite Inferior de Detecção” (4.3.2), em que o nível de confiança foi de 50%, em todos os demais foi de 95%.

Em todos os testes do IRD, excetuando-se o de “Discriminação Nêutron-Gama” (4.3.7), em que era possível irradiar os monitores numa certa faixa de dose, empregou-se o valor de $H_p(10)$ de 3,640 mSv, devido somente à disponibilidade para irradiação no Salão de Baixo Espalhamento. O código entre parêntesis nos subtítulos a seguir refere-se ao número do teste no regulamento do IRD apresentado na Tabela 2.2 e no Anexo B.

5.3.1 Reprodutibilidade (4.3.1)

Para atender aos critérios descritos na seção B.1 do Anexo B, um grupo de 12 monitores foi irradiado com nêutrons com valores iguais de $H_p(10)$ de 3,640 mSv. Este procedimento foi repetido 10 vezes. Para cada uma das irradiações, obtiveram-se resultados na faixa de 0,0415 a 0,0854, conforme apresentado na Tabela 5.7. Atendendo-se ao requisito de $CV \leq 15\%$ para cada uma das irradiações (teste 4.3.1 do Anexo B). Este requisito para cada uma das irradiações pode ser entendido como uma analogia ao teste de “Homogeneidade do Lote” (C.3.1) da ISO 21909.

Tabela 5.7: Resultados do teste de Reprodutibilidade do IRD para cada uma das irradiações

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
\bar{A}_i	3,548	3,348	3,727	3,659	3,569	3,716	3,727	3,674	3,719	3,746
s_i	0,1137	0,1283	0,1292	0,1738	0,1712	0,1875	0,1292	0,1456	0,1033	0,2178
I_i	0,0533	0,0602	0,0606	0,0816	0,0803	0,0880	0,0606	0,0683	0,0509	0,1022
$\frac{s_i + I_i}{\sum_{i=1}^{10} \frac{\bar{A}_i}{10}}$	0,0471	0,0563	0,0509	0,0698	0,0700	0,0742	0,0509	0,0582	0,0415	0,0854

A partir dos dados de cada uma das 10 irradiações, foram calculados os coeficientes de variação para cada um dos 12 monitores. Obtiveram-se resultados na faixa de 0,0483 a 0,0843, conforme apresentado na Tabela 5.8. Atendendo-se ao requisito de $CV \leq 15\%$ para cada um dos monitores (teste 4.3.1 do Anexo B).

Tabela 5.8: Resultados do teste de Reprodutibilidade do IRD para cada um dos monitores irradiados

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
\bar{A}_j	3,693	3,470	3,503	3,825	3,715	3,623	3,526	3,796	3,561	3,711	3,647	3,683
s_j	0,1331	0,1228	0,1904	0,1578	0,1819	0,1645	0,1303	0,2045	0,1743	0,1243	0,1148	0,2025
I_j	0,0710	0,0655	0,1015	0,0841	0,0970	0,0877	0,0695	0,1091	0,0929	0,0663	0,0612	0,1080
$\frac{s_j + I_j}{\bar{A}_j}$	0,0553	0,0543	0,0833	0,0633	0,0751	0,0696	0,0567	0,0826	0,0750	0,0513	0,0483	0,0843

5.3.2 Limite Inferior de Detecção (4.3.2)

Para atender ao critério descrito na seção B.2, um grupo de 12 monitores foi preparado e avaliado sem ser irradiado, em campos de nêutrons e/ou de fótons. Utilizando o FCL calculado para uma fonte de $^{241}\text{Am-Be}$ a 0,75 m, obteve-se o resultado de $0,695 \times 0,035 \text{ mSv} = 0,024 \text{ mSv}$. Atendendo-se ao requisito (teste 4.3.2 do Anexo B).

5.3.3 Estabilidade dos Monitores sob Diferentes Condições Ambientais (4.3.3)

5.3.3.1 Efeito na Resposta do Armazenamento nas Condições Padrões de Teste por 30 Dias (4.3.3a)

Para atender ao critério descrito na seção B.3, dois grupos de 8 monitores foram preparados e armazenados por 24 horas em condições padrões de teste.

O 1º grupo foi irradiado com nêutrons com valores iguais de $H_p(10)$ de 3,640 mSv. Depois de um período de armazenamento contínuo de 30 dias em condições padrões de teste, o 2º grupo foi irradiado da mesma forma que o 1º grupo. Após ambos os grupos terem sido mantidos por 24 horas em condições padrões de teste, todos os monitores foram avaliados.

Obteve-se o resultado para o 1º grupo de $\frac{3,454 \text{ mSv} - 0,1122 \text{ mSv}}{3,640 \text{ mSv}} = 0,918$
e $\frac{3,454 \text{ mSv} + 0,1122 \text{ mSv}}{3,640 \text{ mSv}} = 0,980$, respectivamente, para o limite inferior e superior do critério.

Para o 2º grupo, obteve-se o resultado de $\frac{3,710 \text{ mSv} - 0,2135 \text{ mSv}}{3,640 \text{ mSv}} = 0,961$
e $\frac{3,710 \text{ mSv} + 0,2135 \text{ mSv}}{3,640 \text{ mSv}} = 1,078$, respectivamente, para o limite inferior e superior do critério. Atendendo-se para ambos os grupos ao requisito (teste 4.3.3a do Anexo B).

5.3.3.2 Efeito na Resposta do Armazenamento nas Condições Padrões de Teste por 90 Dias (4.3.3b)

Para atender ao critério descrito na seção B.3, dois grupos de 8 monitores foram preparados e armazenados por 24 horas em condições padrões de teste.

O 1º grupo foi irradiado com nêutrons com valores iguais de $H_p(10)$ de 3,640 mSv. Depois de um período de armazenamento contínuo de 90 dias em condições padrões de teste, o 2º grupo foi irradiado da mesma forma que o 1º grupo. Após ambos os grupos terem sido mantidos por 24 horas em condições padrões de teste, todos os monitores foram avaliados.

Obteve-se o resultado para o 1º grupo de $\frac{3,236 \text{ mSv} - 0,1926 \text{ mSv}}{3,640 \text{ mSv}} = 0,836$
e $\frac{3,236 \text{ mSv} + 0,1926 \text{ mSv}}{3,640 \text{ mSv}} = 0,942$, respectivamente, para o limite inferior e superior do critério.

Para o 2º grupo, obteve-se o resultado de $\frac{3,819 \text{ mSv} - 0,1819 \text{ mSv}}{3,640 \text{ mSv}} = 0,999$
e $\frac{3,819 \text{ mSv} + 0,1819 \text{ mSv}}{3,640 \text{ mSv}} = 1,099$, respectivamente, para o limite inferior e superior do critério. Atendendo-se para ambos os grupos ao requisito (teste 4.3.3b do Anexo B).

5.3.3.3 Efeito na Resposta do Armazenamento em Alta Temperatura por 7 Dias (4.3.3c)

Para atender ao critério descrito na seção B.3, dois grupos de 8 monitores foram preparados e armazenados por 24 horas em condições padrões de teste.

O 1º grupo foi irradiado com nêutrons com valores iguais de $H_p(10)$ de 3,640 mSv. Para a realização do teste “Estabilidade sob Diferentes Condições Climáticas – Efeito na Resposta do Armazenamento em Alta Temperatura ($50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) por 7 Dias” (4.3.3c), os monitores foram mantidos numa estufa Thelco, modelo 26; conforme é apresentado na Figura 5.6.



Figura 5.6: Visualização da estufa durante realização do teste “Estabilidade sob Diferentes Condições Climáticas - Armazenamento por 7 Dias: Umidade Padrão e Temperatura Ambiente = $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ” (4.3.3c) do IRD

Depois do período de armazenamento, o 2º grupo foi irradiado da mesma forma que o 1º grupo. Após ambos os grupos terem sido mantidos por 24 horas em condições padrões de teste, todos os monitores foram avaliados.

Obteve-se o resultado para o 1º grupo de $\frac{3,123 \text{ mSv} - 0,1606 \text{ mSv}}{3,640 \text{ mSv}} = 0,814$ e $\frac{3,123 \text{ mSv} + 0,1606 \text{ mSv}}{3,640 \text{ mSv}} = 0,902$, respectivamente, para o limite inferior e superior do critério.

Para o 2º grupo, obteve-se o resultado de $\frac{3,260 \text{ mSv} - 0,0856 \text{ mSv}}{3,640 \text{ mSv}} = 0,872$ e $\frac{3,260 \text{ mSv} + 0,0856 \text{ mSv}}{3,640 \text{ mSv}} = 0,919$, respectivamente, para o limite inferior e superior do critério. Atendendo-se para ambos os grupos ao requisito (teste 4.3.3c do Anexo B).

5.3.3.4 Efeito na Resposta do Armazenamento em Alta Umidade por 30 Dias (4.3.3d)

Para atender ao critério descrito na seção B.3, dois grupos de 8 monitores foram preparados e armazenados por 24 horas em condições padrões de teste.

O 1º grupo foi irradiado com nêutrons com valores iguais de $H_p(10)$ de 3,640 mSv. Em seguida ambos os grupos foram armazenados por 30 dias com umidade > 90% e temperatura ambiente padrão, conforme pode ser visualizado na Figura 5.7. Neste teste 4.3.3d, foi empregada a “Câmara Climática de Temperatura e Umidade Controladas” descrita na seção 3.1.3.



(A)

(B)

Figura 5.7: Visualização da “Câmara Climática de Temperatura e Umidade Controladas” nas duas etapas do teste “Efeito na Resposta do Armazenamento em Umidade $\geq 90\%$ e Temperatura Ambiente Padrão por 30 dias” (4.3.3d) do IRD: (A) antes do início e (B) durante a realização do teste, com o ambiente interno com umidade > 90%

Depois do período de armazenamento, o **2º** grupo foi irradiado da mesma forma que o **1º** grupo. Após ambos os grupos terem sido mantidos por 24 horas em condições padrões de teste, todos os monitores foram avaliados.

$$\text{Obteve-se o resultado para o } \mathbf{1^\circ} \text{ grupo de } \frac{3,227 \text{ mSv} - 0,2524 \text{ mSv}}{3,640 \text{ mSv}} = 0,817$$

e $\frac{3,227 \text{ mSv} + 0,2524 \text{ mSv}}{3,640 \text{ mSv}} = 0,956$, respectivamente, para o limite inferior e superior do critério.

$$\text{Para o } \mathbf{2^\circ} \text{ grupo, obteve-se o resultado de } \frac{3,585 \text{ mSv} - 0,2304 \text{ mSv}}{3,640 \text{ mSv}} = 0,922$$

e $\frac{3,585 \text{ mSv} + 0,2304 \text{ mSv}}{3,640 \text{ mSv}} = 1,048$, respectivamente, para o limite inferior e superior do critério. Atendendo-se para ambos os grupos ao requisito (teste 4.3.3d do Anexo B).

5.3.4 Efeito da Luz sobre o Monitor (4.3.4)

5.3.4.1 Efeito da Exposição à Luz por 24 Horas na Dose Zero (4.3.4a)

Para atender ao critério descrito na seção B.4, dois grupos de 8 monitores foram preparados sem serem irradiados, em campos de nêutrons e/ou de fótons. O **1º** grupo é exposto à iluminação equivalente à luz solar, por um período de 24 horas com a temperatura mantida abaixo de 40°C, enquanto que o **2º** grupo é armazenado no escuro sem que a sua temperatura varie em mais do que 5% em relação ao **1º** grupo. Após 24 horas, todos os monitores foram avaliados.

Utilizando o FCL calculado para uma fonte de $^{241}\text{Am-Be}$ a 0,75 m, obteve-se o resultado de $|0,005 \text{ mSv} - 0,009 \text{ mSv}| + 0,012 \text{ mSv} = 0,016 \text{ mSv}$. Atendendo-se ao requisito (teste 4.3.4a do Anexo B).

5.3.4.2 Efeito da Exposição à Luz por 168 Horas na Resposta (4.3.4b)

Para atender ao critério descrito na seção B.4, dois grupos de 8 monitores foram preparados e irradiados em campos de nêutrons com valores de $H_p(10)$ de 3,640 mSv. O **1º** grupo é exposto à iluminação equivalente à luz solar, por um período de 168 horas com a temperatura mantida abaixo de 40°C, enquanto que o **2º** grupo é armazenado no escuro. Pode ser visualizado, na Figura 5.8, o arranjo de iluminação à luz do **1º** grupo com temperatura controlada.



Figura 5.8: Visualização do arranjo de iluminação com temperatura controlada do teste “Efeito de Exposição à Luz na Resposta” (4.3.4b) do IRD

Após 168 horas, os monitores de ambos os grupo foram avaliados. Obteve-se o resultado de $\frac{3,576}{3,431} - 0,0510 = 0,991$ e $\frac{3,576}{3,431} + 0,0510 = 1,093$, respectivamente, para o limite inferior e superior do critério. Atendendo-se ao requisito (teste 4.3.4b do Anexo B).

5.3.5 Linearidade (4.3.5)

Para atender ao critério descrito na seção B.5, quatro grupos de 12 monitores foram preparados e irradiados em campos de nêutrons com valores de $H_p(10)$ de uma das quatro faixas de dose: 0,2 mSv, 1 mSv, 10 mSv, 100 mSv. Para cada uma das faixas, obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9: Resultados dos testes de Linearidade do IRD

Grupo (i)	Faixa (VC _i)	n	\bar{A}_i (mSv)	$x_i = \bar{A}_i / VC_i$
1	0,2 mSv	12	0,196	0,979
2	1 mSv	12	0,955	0,955
3	10 mSv	12	10,418	1,042
4	100 mSv	12	108,92	1,089

Foram identificados o maior e o menor dentre os valores de x_i (x_{\max} e x_{\min}).

Obteve-se o resultado de $\frac{1,089 - 0,955}{1,089 + 0,955} = 0,0655$. Atendendo-se ao requisito (teste

4.3.5 do Anexo B).

5.3.6 Dependência Angular (4.3.6)

Para atender ao critério descrito na seção B.6, quatro grupos de 6 monitores foram preparados e irradiados em campos de nêutrons com valor de $H_p(10)$ de 3,640 mSv um dos quatro ângulos de incidência: normal, 30°, -30°, 60°. Na Tabela 5.10, são apresentados os resultados parciais para cada ângulo.

Tabela 5.10: Resultados parciais de cada ângulo para teste de Dependência Angular do IRD

Grupo (i)	Ângulo	n	\bar{A}_i (mSv)	Ij
1	0°	6	3,683	0,2038
2	30°	6	3,201	0,2823
3	-30°	6	3,317	0,1579
4	60°	6	3,421	0,3454

Obteve-se o resultado de $\frac{13,622}{14,732} - 0,062 = 0,863$ e

$\frac{13,622}{14,732} + 0,062 = 0,987$, respectivamente, para o limite inferior e superior do critério.

Atendendo-se ao requisito (teste 4.3.6 do Anexo B).

5.3.7 Discriminação Nêutron-Gama (4.3.7)

Para atender ao critério descrito na seção B.7, dois grupos de 8 monitores foram preparados e irradiados em campos de nêutrons com valores de $H_p(10)$ de 3,70 mSv. Somente o 2º grupo foi irradiado em campos de fótons com valores de $H_p(10)$ de 11,48 mSv. Obteve-se o resultado de 0,843 e 1,273, respectivamente, para o limite inferior e superior do critério. Não se atendendo ao requisito para este teste.

Repetiu-se o teste, aumentando-se os dois grupos para 12 monitores. Ambos os grupos foram preparados e irradiados em campos de nêutrons com valores de $H_p(10)$ de 3,64 mSv. Somente o 2º grupo foi irradiado em campos de fótons com valores de $H_p(10)$ de 11,00 mSv. Obteve-se o resultado de 0,732 e 1,005, respectivamente, para o limite inferior e superior do critério. Não se atendendo ao requisito para este teste.

Repetiu-se o teste, mantendo-se o 1º grupo com 12 monitores e aumentando-se o 2º grupo para 24 monitores. Ambos os grupos foram preparados e irradiados em campos de nêutrons com valores de $H_p(10)$ de 2,00 mSv. Somente o 2º grupo foi irradiado em campos de fótons com valores de $H_p(10)$ de 6,00 mSv. Obteve-se o

resultado de $\frac{1,959}{2,169} - 0,089 = 0,814$ e $\frac{1,959}{2,169} + 0,089 = 0,992$, respectivamente,

para o limite inferior e superior do critério. Atendendo-se ao requisito (teste 4.3.7 do Anexo B).

5.3.8 Resistência a Impactos (4.3.8)

Para atender ao critério descrito na seção B.8, um grupo de 10 monitores foi aleatoriamente preparado e avaliado sem ser irradiado, em campos de nêutrons e/ou de fótons. Cada um dos monitores foi solto em queda livre de uma altura de 1,5 m sobre uma superfície de concreto. Este procedimento foi repetido 3 vezes para cada monitor em teste, sem que tenha havido qualquer dano ao monitor ou aos seus TLDs. Atendendo-se ao requisito (teste 4.3.8 do Anexo B).

5.3.9 Resumo dos Testes do IRD

O resumo dos resultados de todos os testes do IRD, descritos na Tabela 2.2, é apresentado na Tabela 5.11

Tabela 5.11: Resumo dos Resultados Obtidos para os Testes do IRD

Teste*	Tipo de Teste	# Monitores	Resultado Obtido
4.3.1	Reprodutibilidade	12	por monitor: $8,43\% \leq 15\%$ por irradiação: $8,54\% \leq 15\%$
4.3.2	Limite Inferior de Detecção	12	$0,024 \text{ mSv} \leq 0,2 \text{ mSv}$
4.3.3	Estabilidade sob Diferentes Condições Climáticas		
4.3.3a	Armazenamento por 30 dias nas condições climáticas padrão de Teste	8 + 8	1º: 0,918 a 0,980 2º: 0,961 a 1,078
4.3.3b	Armazenamento por 90 dias nas condições climáticas padrão de Teste	8 + 8	1º: 0,836 a 0,942 2º: 0,999 a 1,099
4.3.3c	Armazenamento por 7 dias: H padrão e temperatura ambiente = $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$	8 + 8	1º: 0,814 a 0,902 2º: 0,872 a 0,919
4.3.3d	Armazenamento por 30 dias: H $\geq 85\%$ e Temperatura Ambiente $\approx 25^{\circ}\text{C}$	8 + 8	1º: 0,817 a 0,956 2º: 0,922 a 1,048
4.3.4	Efeito da Luz sobre o Monitor		
4.3.4a	Efeito da Luz sobre a DZ do Monitor	8 + 8	$0,016 \text{ mSv} \leq 0,2 \text{ mSv}$
4.3.4b	Efeito da Luz sobre a Resposta do Monitor	8 + 8	0,991 a 1,093
4.3.5	Linearidade	48	$6,55\% \leq 30\%$
4.3.6	Dependência Angular	24	0,863 a 0,987
4.3.7	Discriminação Nêutron-Gama	12 + 24	0,814 a 0,992
4.3.8	Resistência a Impactos	10	Nenhum dano ao monitor ou aos seus TLDs

Nota: * - referente ao código do regulamento do IRD.

Siglas: H – umidade relativa do ar; DZ – dose zero.

Na Tabela 5.11, apesar de estarem dentro do critério de aceite do teste de “Discriminação Nêutron-Gama”, os resultados obtidos neste teste apresentaram uma grande dispersão. Isto pode ser explicado pela grande dificuldade em se medir doses de nêutrons um terço menores do que doses de fótons em campos mistos (nêutrons e gama) (ZEMAN e SNYDER, 1978, LIU e SIMS, 1990, ANSI, 2001). As dispersões encontradas em outros testes podem ser explicadas pela menor quantidade de monitores empregada (em relação aos testes da ISO), o que aumenta a incerteza da medida.

Apesar dos testes de desempenho do IRD não serem oficiais como os da ISO 21909, eles têm aplicabilidade experimental por complementá-los. A faixa do teste

de “Linearidade” (4.3.5) começa em 0,2 mSv, em vez de 1 mSv como na ISO 21909. Aquele valor é igual ao nível de registro adotado no Brasil e muito mais próximo dos valores de doses de nêutrons encontrados ocupacionalmente. Além disso, os testes de desempenho do IRD relacionados ao LID (4.3.2 – Limite Inferior de Detecção e 4.3.4a – Efeito da Luz sobre a Dose Zero do Monitor) têm o seu critério de aceite como $\leq 0,2$ mSv; ou seja, no valor do nível de registro.

De todos os testes de caracterização do IRD, o mais difícil de ser realizado foi o teste de “Discriminação Nêutron-Gama” (4.3.7). Da primeira vez, ele foi realizado com um total de 16 monitores: 8 para cada grupo. Somente na 3ª tentativa, mantendo-se o 1º grupo com 12 monitores e aumentando-se a quantidade do 2º grupo para 24, conseguiu-se atender aos requisitos. Este teste do IRD necessita ter seu critério de aceite aumentado para, por exemplo, 30%. Pois somente o teste “Reprodutibilidade” (4.3.1) apresenta 15% como critério de aceitação, sem ter irradiação com fótons!

5.4 Discussão sobre a Implementação do Sistema

O dispêndio total de tempo realizando irradiações com fontes de nêutrons alcançou 504 horas para a caracterização pela norma ISO 21909 e 680 horas para a caracterização pelo regulamento do IRD. Além disso, somente em irradiações com fontes de nêutrons, já haviam sido despendidas 1615 horas no processo de desenvolvimento do monitor individual de nêutrons e de 2768 horas em todo o processo de calibração deste monitor. O menor tempo despendido na caracterização do monitor pela norma ISO 21909, deve-se ao fato que a fonte de ^{252}Cf apresentava uma alta fluência em relação à fonte de $^{241}\text{Am-Be}$ de 185 GBq empregada para os testes de desempenho do IRD. Nestes dispêndios de tempo, não estão incluídos aqueles necessários à arrumação do arranjo de irradiação no SBE, principalmente da disposição dos monitores de albedo sobre os simuladores, e a posterior arrumação deste salão, dispondo-a na condição original. Também não foram contabilizados os tempos despendidos nas duas partes da intercomparação. A análise do somatório de todo o tempo (5567 horas) despendido nas irradiações com nêutrons nos processos de desenvolvimento, calibração e caracterização, leva-nos a concluir que, sem a disponibilidade de campos de nêutrons padronizados, seria impossível a conclusão satisfatória destes processos. Por causa disto, a atividade de irradiação de monitores individuais ocupou 57% de todas as atividades do LN, no período entre 1995 e agosto de 2005 (como apresentado na seção 3.3.1); embora neste percentual também estejam incluídas irradiações realizadas para outros serviços de monitoração individual no mesmo período (FONSECA *et al.*, 2005).

Não foi contabilizado o somatório de tempo dependido nas irradiações com fótons nos processos de desenvolvimento, calibração e caracterização do monitor. Estima-se que em torno de 20 mil TLDs tenham sido avaliados durante este trabalho. Somente para execução do teste de “Reprodutibilidade” (C.3.2) da ISO 21909, por exemplo, foram avaliados 880 TLDs.

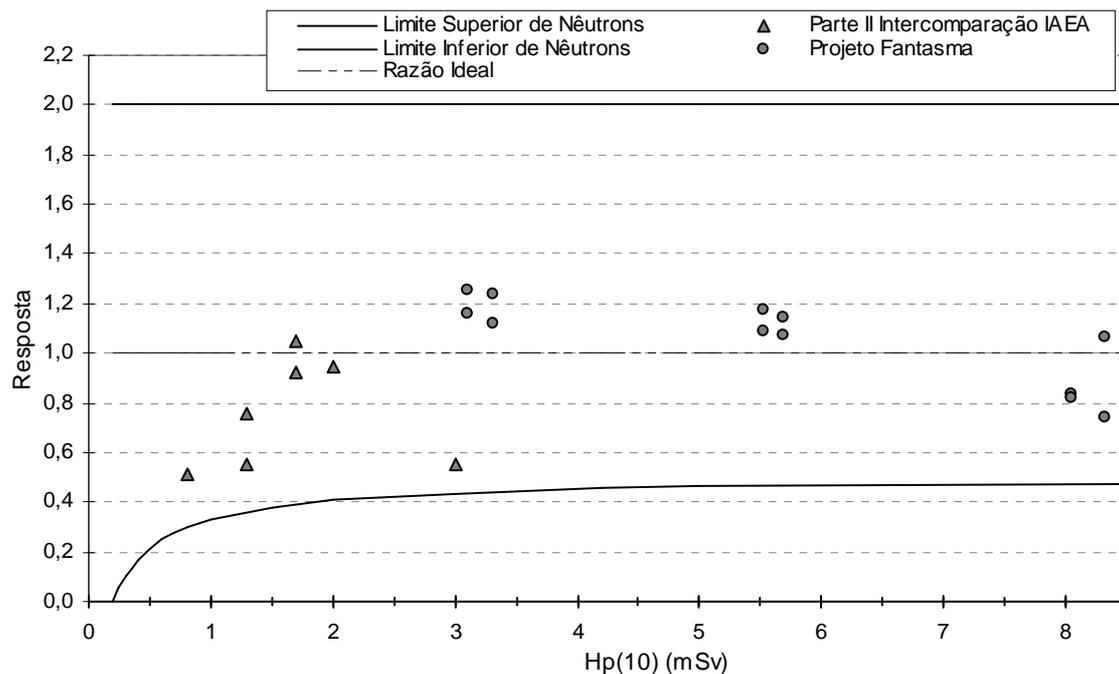
5.5 Validação do Sistema

Na parte II da *Intercomparison on Measurements of the Quantity Personal Dose Equivalent $H_p(d)$ in Mixed (Neutron-Gamma) Fields*, foi promovida a irradiação dos monitores individuais em campos de nêutrons simulando campos encontrados ocupacionalmente (ZIMBAL e SCHUHMACHER, 2005, MARTINS *et al.*, 2007c). O desempenho do sistema de monitoração na parte II desta intercomparação e no “Projeto Fantasma” (descrito na seção 2.2.5.3) está apresentado na Figura 5.9. Conforme descrito na seção 2.2.5.2, o limite superior e o limite inferior das curvas trombeta para monitoração individual de nêutrons são definidos, respectivamente, pelas equações 5.1 e 5.2:

$$H_{ls} = 2 \quad 5.1$$

$$H_{li} = 0 \quad \text{para } VC < NR$$

$$H_{li} = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot NR}{(NR + VC)}\right] \quad \text{para } VC \geq NR \quad 5.2$$



Campo de Radiação {Laboratório} (Parte II Comparação IAEA) ▲	VC H _p (10)	R	Campo de Radiação {IRD} (Projeto Fantasma) ●	VC H _p (10)	R
Reator Canel {IRSN}	3,00	0,55	²⁴¹ Am-Be	3,31	1,24
Reator Canel + W250 {IRSN}	1,50	*	²⁴¹ Am-Be	3,31	1,12
Nêutrons espalhados por um cone de sombra {PTB}	1,70	1,05	²⁴¹ Am-Be	5,69	1,07
²⁵² Cf (moderado) + espalhados por cone de sombra {PTB}	1,70	0,92	²⁴¹ Am-Be	5,69	1,14
²⁵² Cf (moderado)/ 0° {PTB}	2,00	0,95	²⁴¹ Am-Be	8,04	0,83
²⁵² Cf (moderado)/ ±75° {PTB}	1,30	0,75	²⁴¹ Am-Be	8,04	0,82
²⁵² Cf (moderado) + ¹³⁷ Cs / 60° {PTB}	0,80	0,51	²⁴¹ Am-Be	8,33	0,74
²⁵² Cf (moderado) + ¹³⁷ Cs / ±75° {PTB}	1,30	0,55	²⁴¹ Am-Be	8,33	1,07
			²⁴¹ Am-Be	5,53	1,08
			²⁴¹ Am-Be	5,53	1,18
			²⁴¹ Am-Be	3,11	1,16
			²⁴¹ Am-Be	3,11	1,25

Sigla: R (resposta) – razão entre o valor avaliado e o valor verdadeiro convencional

nota: * - leitura perdida.

Figura 5.9: Desempenho do monitor na parte II da *Intercomparison on Measurements of the Quantity Personal Dose Equivalent H_p(d) in Mixed (Neutron-Gamma) Field* e no Programa Fantasma do IRD

Cabe destacar que na parte II desta intercomparação, não foi informado em quais campos de nêutrons os monitores dos serviços de monitoração foram irradiados. Mesmo assim, apesar da extensa faixa de monitoração individual de nêutrons, de 0,0253 eV até 20 MeV, todos os resultados da parte II encontram-se dentro dos limites das curvas trombeta para nêutrons. Pode ser verificado, contudo, que existe uma tendência de subavaliação da dose de nêutrons quando o monitor é exposto a campos mistos de nêutrons e fótons. Na parte II da intercomparação, um dos monitores (nº 03) irradiado no “Reator Canel + W250 do IRSN” foi (supostamente) aberto e teve o par de TLDs de albedo perdido. Como descrito no algoritmo da Figura 4.11, sem a leitura do TLD-600 de albedo não é possível calcular a dose do usuário.

Desta forma, a validação do sistema apresentada na Figura 5.9 reforça a característica de excelente desempenho do sistema de monitoração individual de nêutrons tipo albedo de duas componentes. Estes resultados mostram que a incerteza global deste sistema é menor do que a tolerância aceita para a monitoração individual de nêutrons (curvas trombeta). Dos 30 sistemas de monitoração que participaram da parte II da *Intercomparison on Measurements of the Quantity Personal Dose Equivalent $H_p(d)$ in Mixed (Neutron-Gamma) Fields* apenas 6 deles, incluindo este sistema, conseguiram ter todas as suas respostas dentro das curvas trombeta (ZIMBAL e SCHUHMACHER, 2005).

Além disso, como pode ser visualizado na Figura 5.9, o sistema de monitoração individual de nêutrons tem apresentado excelente resultado no Projeto Fantasma do IRD. Todos os seus resultados têm se apresentado dentro das curvas trombeta.

Capítulo 6

CONCLUSÃO

O sistema de monitoração individual de nêutrons de corpo inteiro desenvolvido neste trabalho atendeu a todos os objetivos propostos. O monitor emprega como detectores dois pares de TLD-600 e TLD-700, um para a avaliação da componente de nêutrons incidentes e outro para a de nêutrons de albedo. Este sistema apresentou um LID de 0,09 mSv para campos não moderados de $^{241}\text{Am-Be}$, que é menor do que 0,17 mSv, como requerido. O único campo de nêutrons avaliado que não atendeu este requisito foi para o campo monoenergético de 5 MeV (acelerador), onde se obteve o valor de 0,22 mSv. Porém, do ponto de vista ocupacional, não existe problema de este monitor vir a ser usado na monitoração individual, pois nenhum trabalhador se expõe diretamente a feixes de acelerador.

O sistema foi calibrado em todos os campos padrão ISO disponíveis no Brasil ($^{252}\text{Cf}(\text{D}_2\text{O})$, ^{252}Cf , $^{241}\text{Am-B}$ e $^{241}\text{Am-Be}$) e em cinco campos monoenergéticos do PTB (70 keV, 144 keV, 565 keV, 1,2 MeV e 5 MeV). Além disso, dois campos térmicos, um do IRD e outro do IRSN, e uma fonte de $^{238}\text{Pu-Be}$ do IRD também foram utilizados para calibração.

O processo de caracterização do sistema de monitoração individual de nêutrons desenvolvido neste trabalho atendeu aos requisitos dos testes da norma ISO 21909 e do *draft* do regulamento técnico do IRD. A inexistência no Brasil de campos padrões de nêutrons de alta fluência acarretou em longos períodos de irradiação nos processos de calibração e caracterização. São poucos os países do mundo que apresentam tais campos. A infra-estrutura existente no Laboratório de Nêutrons, no Laboratório de Irradiações e no Laboratório de Dosimetria Termoluminescente do IRD revelou-se primordial na realização de todo este trabalho.

Este sistema foi testado para doses ocupacionais até 100 mSv, na faixa de energia de nêutrons térmicos até 5 MeV. Nestas condições, a incerteza global é menor do que os limites de tolerância aceitos para a monitoração individual de nêutrons. O monitor, portanto, é adequado na monitoração individual de todos os campos ocupacionais encontrados no Brasil: desde campos de nêutrons bem termalizados, campos encontrados em usinas nucleares tipo Angra I e II, até aqueles mais energéticos utilizando fontes de $^{241}\text{Am-Be}$, como os existentes na perfilagem nuclear de poços de petróleo.

Campos de nêutrons simulando campos ocupacionais foram usados para irradiação de monitores de nêutrons em uma intercomparação internacional promovida

pela AIEA. Dos trinta participantes, apenas seis conseguiram todos os resultados dentro dos limites de aceitação para monitoração individual de nêutrons. Um destes foi o desenvolvido neste trabalho, o que valida o sistema.

Este sistema foi implementado e encontra-se atualmente em uso pelo IRD na prestação de serviço de monitoração individual de nêutrons para cinco instituições. Os resultados obtidos no programa de controle da qualidade mensal deste serviço comprovam o bom desempenho deste sistema.

As enormes dificuldades na realização deste trabalho, notadamente na área de recursos laboratoriais, serviram como incentivo ao desenvolvimento de materiais e métodos em dosimetria termoluminescente, em calibração neutrônica e em monitoração individual de nêutrons (Anexo D).

Como continuação deste trabalho, sugere-se:

- 1) Calibrar o monitor nos campos monoenergéticos da ISO 8529-3 para os quais a resposta ainda não é conhecida: 2 keV, 24 keV, 250 keV, 2,5 MeV, 2,8 MeV, 14,8 MeV e 19 MeV, de modo a obter informações sobre a resposta energética do sistema em toda a faixa de medição. Para os demais campos monoenergéticos padrão ISO, a calibração já foi feita neste trabalho.
- 2) Simular, por meio de códigos computacionais baseados no método de Monte Carlo, a resposta do sistema, visando à obtenção teórica de FCLs. Os resultados deste trabalho servirão para validar a modelagem.
- 3) Discutir e modelar as incertezas do sistema. Os resultados dos testes de caracterização deste trabalho servem de base para a modelagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERTS, W.G., 1999, "Active Neutron Personal Dosimetry-Concepts and Recent Approaches". *Rad. Prot. Dos.*, v. 85, n. 1-4, pp. 21-26.
- ALBERTS, WG, AMBROSI, P, BÖHM, J, DIETZE, G, HOHLFELD, K, WILL, W., 1995, *New Doses Quantities in Radiation Protection*, PTB-DOS-23e. Braunschweig, Physikalisch-Technische Bundesanstalt.
- ALBERTS, W.G, BORDY, J.M., CHARTIER, J.L., JAHR, R., KLEIN, H., LUSZIK-BHADRA, M., POSNY, F., SCHUHMACHER, H., SIEBERT, B.R.L., 1996, "Neutron Dosimetry". *Radioprotection*, v. 31, n. 1, pp. 37-65.
- ALSMILLER Jr., R.G., BARISH, J., 1974, "The Calculated Response of 6LiF Albedo Dosimeters to Neutrons with Energies ≤ 400 MeV". *Health Phys.*, v. 26, n. Jan, pp. 13-28.
- AMALDI, E., FERMI, E., 1936, "On The Absorption and Diffusion of Slow Neutrons". *Physical Review*, v. 50, n. Nov., pp. 899-928.
- American National Standard Institute, 2001, *Personnel Dosimetry Performance – Criteria for Testing, ANSI/HPS N13.11*. McLean, ANSI.
- ANDERSON, M.E., CRAIN, S.L., 1979, "A Combination TL-Film Personnel Neutron Dosimeter". *Health Phys.*, v. 36, n. Jan, pp. 76-79.
- ATTIX, F.H., 1986, *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. New York, John Wiley & Sons.
- BAILEY, S., 2000, "Air Crew Radiation Exposure – An Overview". *Nuclear News*, n. Jan, pp. 32-40.
- BÉ, M-M., CHISTÉ, V., DULIEU, C., 2006, *Half-Lives, Tables of Recommended Values*. Gif-sur-Yvette, CEA-Laboratoire National Henri Becquerel.
- BEHRENS, R, AMBROSI, P., 2007, "Review of International Standards for Dosemeters". *Rad. Prot. Dos.*, advanced access published July 12, 2007.
- BOGGS, J.V., 1971, "Personnel Neutron Dosimetry Lawrence Livermore Laboratory Effort". In: *Proceedings of the 2nd AEC Workshop on Personnel Neutron Dosimetry* (printed as Report n° BNWL-1616), pp. 25-28, Richland, July.
- BÖHM, J, McDONALD, J.C., SWINTH, K.L., SELBY, J.M., THOMPSON, M.G., 1992, "The Accreditation Process as a Quality Assurance Method for Individual Monitoring". *Rad. Prot. Dos.*, v. 40, n. 1, pp. 5-8.
- BÖHM, J, LEBEDEV, V.N., McDONALD, J.C., 1994, "Performance Testing of Dosimetry Services and Its Regulatory Aspects". *Rad. Prot. Dos.*, v. 54, n. 3/4, pp. 311-319.
- BÖHM, J., ALBERTS, W.G., SWINTH, K.L., SOARES, C.G., McDONALD, J.C., THOMPSON, I.M.G., KRAMER, H.M., 1999, "ISO Recommended Reference Radiations for the

- Calibration and Proficiency Testing of Dosemeters and Dose Rate Meters Used in Radiation Protection”, *Rad. Prot. Dos.*, v. 86, n. 2, pp. 87-105.
- BORDY, J.M., LAHAYE, T., HOFLACK, C., 1998, “Dosimétrie Individuelle des Neutrons et CIPR 60”, *Clefs CEA*, n. 38, pp. 2-14.
- BORDY, J.M., STADTMANN, H., AMBROSI, P., BARTLETT, D.T., CHRISTENSEN, P., COLGAN, T., HYVÖNEN, H., 2000, “Performance Test of Dosimetric Services in the EU Member States and Switzerland for the Routine Assessment of Individual Doses (Photon, Beta and Neutron)”, *Rad. Prot. Dos.*, v. 89, n. 1-2, pp. 107-154.
- BORODIN, V.E., GOLOVACHIK, V.T., KORSHUNOVA, E.P., LEBEDEV, V.N., SANNIKOV, A.V., SPIROV, E.G., 1988, “Response of Albedo and Fission Track Detectors to Neutrons in the Energy Range from Thermal to 20 MeV”, *Kernenergie*, v. 31, n. 6, pp. 267-273.
- BRASIL. Resolução nº 7 de 21 de agosto de 1995a. Diário Oficial da União, Brasília, p. 13477-81, 1 de setembro de 1995. Seção I.
- BRASIL. Portaria DRS nº 1 de 25 de agosto de 1995b. Diário Oficial da União, Brasília, p. 15526, 4 de outubro de 1995. Seção I.
- BROWN, J.B.C., GAYTON, F.M., HALL, J.A., HARVEY, J.R., WELL, G.A.M., 1967, *Recommendations Concerning the Use of the Personnel Neutron Albedo Dosimeter*, British Report CEGB RD/B/N-828. Berkeley Nuclear Laboratory, Berkeley, England.
- BRUNSKILL, R.T., 1977, “Albedo-Type Neutron Dosimeter”, *Health Phys.*, v. 32, n. May, pp. 455.
- BUISMAN, A.S.K., 1988, “Experience With a Five Element Neutron Dosimeter”. In: Proceedings of the 7th International Congress of the IRPA, pp. 1601-1603, Sydney, Apr.
- BURGER, G., MORHART, A., 1977, “A Personnel Albedo Monitor for Neutrons”. In: *Proceedings of the 6th ERDA Workshop on Personnel Neutron Dosimetry*, pp. 32-39, Oak Ridge, July.
- BURGHARDT, B., PIESCH, E., 1982, “A Computer Assisted Evaluation Technique for Albedo Thermoluminescence Dosimeters”, *Rad. Prot. Dos.*, v. 2, n. 4, pp. 221-230.
- BURGHARDT, B., PIESCH, E., 1988, “Field Calibration Technique for Albedo Neutron Dosimeters”, *Rad. Prot. Dos.*, v. 23, n. 1/4, pp. 121-126.
- BUSUOLI, G., CAVALINI, A., CIVOLANI, O., LEMBO, L., 1976, “Dosimetri ad Albedo per la Dosimetria Personale Neutronica”, *Energia Nucleare*, v. 23, n. 1, pp. 10.
- CARVALHO, W. B. D., 1975, *Monitor Pessoal de Nêutrons Baseado na Técnica de Albedo*. Dissertação de Mestrado, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CHRISTENSEN, P., GRIFFITH, R.V., 1994, “Required Accuracy and Dose Thresholds in Individual Monitoring”, *Rad. Prot. Dos.*, v. 54, n. 3/4, pp. 279-285.
- Comissão Nacional de Energia Nuclear, 1988, *Diretrizes Básicas de Radioproteção*, Norma CNEN-NE-3.01, CNEN, Rio de Janeiro.

- Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2005a, *Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica*, Norma CNEN-NN-3.01, CNEN, Rio de Janeiro.
- Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2005b, *Restrição de Dose, Níveis de Referência Ocupacionais e Classificação de Áreas*, Posição Regulatória 3.01/004 rev. 01, CNEN, Rio de Janeiro.
- CUNHA, P.G., 1997, *Modelo para Avaliação das Incertezas na Monitoração Individual para as Irradiações Externas a Fótons*. Tese de D.Sc., IBCCF/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DA ROSA, L.A.R., MAURÍCIO, C.L.P., DIZ, R., BRITO, R.R.A., 1993, "Thermoluminescence Based Extremity and Neutron Individual Monitoring in Brazil". *Rad. Prot. Dos.*, v. 47, n. 1/4, pp. 435-438.
- DELGADO, A., MUÑIZ, J.L., GÓMEZ ROS, J.M., ROMERO, A.M., RODRIGUEZ, R., 2007, "On the Use of LiF TLD-600 in Neutron-Gamma Mixed Fields". *Rad. Prot. Dos.*, advanced access published June 19, 2007.
- D'ERRICO, F., BOS, A.J.J., 2004, "Passive Detectors for Neutron Personal Dosimetry: State of the Art", *Rad. Prot. Dos.*, v. 110, n. 1-4, pp. 195-200.
- DISTENFELD, C.H., 1971, "Summary of Personnel Neutron Dosimetry Investigations at BNL". In: *Proceedings of the 2nd AEC Workshop on Personnel Neutron Dosimetry* (printed as Report nº BNWL-1616), pp. 33-36, Richland, July.
- DOUGLAS, J.A., 1981, "Applications of TL Materials in Neutron Dosimetry". In: Oberhofer, M., Scharmman, A. (eds), *Applied Thermoluminescence Dosimetry*, chapter 12, Bristol, Adam Hilger Ltd.
- DOUGLAS, J.A., MARSHALL, M., 1978, "The Responses of Some TL Albedo Neutron Dosimeters", *Health Physics*, v. 35, n. Aug, pp. 315-324.
- ENDRES, G.W.R., 1971, *The Hanford Thermoluminescent Multipurpose Dosimeter*. In: 2nd AEC Workshop on Personnel Neutron Dosimetry (Edited by Unruth C.M.), Report nº BNWL-1616, Pacific Northwest Laboratories, Richland.
- Elektroschmelzwerk Kempten GmgH, 1996, *Ceramic Raw Materials: Carbides – Borides – Nitrides*. ESK, Kempten.
- Epoxtec Produtos Químicos Ltda. <http://www.epoxtec.com.br/show.php?area=8> (Moldes e Modelos). Acessado em 18/1/2008.
- FACURE, A. N.S.S., 2006, *Doses Ocupacionais Devido a Nêutrons em Salas de Aceleradores Lineares de Uso Médico*. Tese de D.Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- FAJARDO, P.W., MAURÍCIO, C.L.P., 1990, "Calibração do Dosímetro de Nêutrons de Albedo no Cíclotron do IEN". In: *Anais do 3º Congresso Geral de Energia Nuclear*, pp. 23-29, Rio de Janeiro, Abril.
- FALK, R., 1971, "Neutron Dosimetry at Rocky Flats", In: *Proceedings of the 2nd AEC Workshop on Personnel Neutron Dosimetry* (printed as Report nº BNWL-1616), pp. 42-50, Richland, July.

- FIX, J.J., WILSON, R.H., BAUMGARTNER, W.B., 1996, *Retrospective Assessment of Neutron Dosimetry for Workers at the Hanford site*. In: Report PNL-11196, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington.
- FONSECA, E.S., PEREIRA, W.W., LEITE, J.O., PATRÃO, K.C.S., 2005, “Metrologia de Nêutrons no Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes”, *Rev. Bras. Pesq. Des.*, v. 7, n. 1 (Março), pp. 113-119.
- GIBSON, J.A.B., 1988, “Individual Neutron Dosimetry”, *Rad. Prot. Dos.*, v. 23, n. 1/4, pp. 109-115.
- GLASSTONE, S., SESONSKE, A., 1963, *Nuclear Reactor Engineering*. Princeton, D. Van Nostrand Company.
- GOMAA, M.A., EID, A.M., SAYED, A.M., 1973, “Neutron Personnel Dosimetry with Film Badge and Fission Fragment Track Dosimeters”. In: *Proceedings of a Symposium on Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes*, v. 2, pp. 219-225, Vienna, Dec.
- GONÇALEZ, V., 2006, *Modificação de Resina Epoxídica com Poliéter e Poliéster e sua Utilização em Compósitos com Fibra de Carbono*. Dissertação de M.Sc., IMA/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- GRIFFITH, R.V., 1973, “Use of ^{10}B -Loaded plastic in Personnel Neutron Dosimetry”. In: *Proceedings of a Symposium on Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes*, v. 2, pp. 237-250, Vienna, Dec.
- GRIFFITH, R.V., 1988, “Review of the State of the Art in Personnel Neutron Monitoring with Solid State Detectors”, *Rad. Prot. Dos.*, v. 23, n. 1/4, pp. 155-160.
- GRIFFITH, R.V., HANKINS, D.E., GAMMAGE, R.B., TOMMASINO, L., WHEELER, R.V., 1979, “Recent Developments in Personnel Neutron Dosimeters – a Review”, *Health Phys.*, v. 36, n. March, pp. 235-260.
- GUNTER, R.J., 1994, *Evaluation of the Neutron Dosimeter Used by Martin Marietta Energy Systems, Inc., Ability to Meet the Requirements of the ANS for Personnel Dosimeters (Neutron Energies Less than 20 MeV) ANSI N319-1976*, Report ORNL/TM-12748, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge.
- HANKINS, D.E., 1972, *Factors Affecting the Design of Albedo-Neutron Dosimeters Containing Lithium Fluoride Thermoluminescent Dosimeters*, Report LA-4832, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico.
- HANKINS, D.E., 1973, “Design of Albedo-Neutron Dosimeters”. In: *Proceedings of a Symposium on Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes*, v. 2, pp. 15-29, Vienna, Dec.
- HANKINS, D.E., 1976, Evaluation of the Fast Neutron Dose Equivalent Using the Thermal Neutron Response of LiF TL Material, *Health Phys.*, v. 31, n. Aug., pp. 170-173.

- Harshaw/Bicron Radiation Measurement Products, 1993, *Harshaw/Bicron Manual 3500 - Manual TLD Reader (User's Manual)*. Saint-Gobain/Norton Industrial Ceramics Corporation, Solon, USA.
- HARVEY, J.R., HUDD, W.H.R., TOWNSEND, S., 1973, "Personal Dosimeter for Measuring the Dose from Thermal and Intermediate-Energy Neutrons and from Gamma and Beta Radiation". In: *Proceedings of a Symposium on Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes*, v. 2, pp. 199-218, Vienna, Dec.
- HARVEY, W.F., HOFFMAN, J.M., BLISS, J.L., BRAKE, R.J., 1993, "Personnel Neutron Dosimetry Improvements at Los Alamos National Laboratory", *Rad. Prot. Dos.*, v. 47, n. 1/4, pp. 391-395.
- HOY, J.E., 1972, *Personnel Albedo Neutron Dosimeter with Thermoluminescent ^6LiF and ^7LiF* , Report DP-1277, Savannah River Laboratory, Aiken, South Carolina.
- HYPERPHYSICS, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/albedo.html>. Albedo of the Earth. Acessado em 7/11/2003.
- Instituto de Radioproteção e Dosimetria, 1995a, *Critérios Gerais para Certificação de um Serviço de Monitoração Individual Externa*, Regulamento Técnico IRD-RT Nº 001.01/95, IRD, Rio de Janeiro, R.J.
- Instituto de Radioproteção e Dosimetria, 1995b, *Desempenho de Sistemas de Monitoração Individual Externa – Critérios e Condições*, Regulamento Técnico IRD-RT Nº 002.01/95, IRD, Rio de Janeiro, R.J.
- Instituto de Radioproteção e Dosimetria, 2001a, *Critérios Gerais para Certificação de Serviços de Monitoração Individual Externa para Nêutrons (Draft)*, Regulamento Técnico IRD-RT Nº 006.01/01, IRD, Rio de Janeiro, R.J. (documento restrito)
- Instituto de Radioproteção e Dosimetria, 2001b, *Desempenho de Sistemas de Monitoração Individual para Nêutrons – Critérios e Condições (Draft)*, Regulamento Técnico IRD-RT Nº 007.01/01, IRD, Rio de Janeiro, R.J. (documento restrito)
- International Atomic Energy Agency, 1985, *Neutron Monitoring for Radiological Protection*, Technical Report Series nº 252. Vienna, IAEA.
- International Atomic Energy Agency, 1990, *Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes*, Technical Report Series nº 318. Vienna, IAEA.
- International Atomic Energy Agency, 1999a, *Assessment of Occupational Exposure Due to External Sources of Radiation*, Safety Guide nº RS-G-1.3. Vienna, IAEA.
- International Atomic Energy Agency, 1999b, *Occupational Radiation Protection*, Safety Guide nº RS-G-1.1. Vienna, IAEA.
- International Atomic Energy Agency, 2001, *Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes*, Technical Report Series nº 403 (Supplement to Technical Report Series nº 318). Vienna, IAEA.

- International Commission on Radiological Protection, 1977, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 26. Oxford, Pergamon Press.
- International Commission on Radiological Protection, 1991, *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60. Oxford, Pergamon Press.
- International Commission on Radiological Protection, 1995, *Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation*, ICRP Publication 74. Oxford, ICRP.
- International Commission on Radiological Protection, 1997, *General Principles for Radiation Protection of Workers*, ICRP Publication 75. Oxford, Pergamon Press.
- International Commission on Radiation Units and Measurements, 1985, *Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources*, ICRU Report 39. Bethesda, ICRU Publications.
- International Commission on Radiation Units and Measurements, 1988, *Determination of Dose Equivalents from External Radiation Sources – Part 2*, ICRU Report 43. Bethesda, ICRU Publications.
- International Commission on Radiation Units and Measurements, 1992, *Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations*, ICRU Report 47. Bethesda, ICRU Publications.
- International Commission on Radiation Units and Measurements, 1993, *Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry*, ICRU Report 51. Bethesda, ICRU Publications.
- International Organization for Standardization, 1998, *Reference Neutron Radiations – Part 3: Calibration of Area and Personal Dosimeters and the Determination of Their Response as a Function of Neutron Energy and Angle of Incidence*, Standard ISO-8529-3. Geneva, ISO.
- International Organization for Standardization, 1999, *X and Gamma Reference Radiations for Calibrating Dosemeters and Doserate Meters and for Determining Their Response as a Function of Photon Energy – Part 3: Calibration of Area and Personal Dosimeters and the Measurement of Their Response as a Function of Energy and Angle of Incidence*, Standard ISO-4037-3. Geneva, ISO.
- International Organization for Standardization, 2000a, *Reference Neutron Radiations – Characteristics and Methods of Production of Simulated Workplace Neutron Fields*, Standard ISO-12789. Geneva, ISO.
- International Organization for Standardization, 2000b, *Reference Neutron Radiations – Part 2: Calibration Fundamentals of Radiation Protection Devices Related to the Basic Quantities Characterizing the Radiation Field*, Standard ISO 8529-2. Geneva, ISO.
- International Organization for Standardization, 2001, *Reference Neutron Radiations – Part 1: Characteristics and Methods of Production*, Standard ISO 8529-1. Geneva, ISO.

- International Organization for Standardization, 2002, *Radiation Protection – Passive Personal Neutron Dosimeters – Performance and Test Requirements*, Draft Standard ISO/DIS 21909. Geneva, ISO.
- International Organization for Standardization, 2005, *Radiation Protection – Passive Personal Neutron Dosimeters – Performance and Test Requirements*, Standard ISO 21909. Geneva, ISO.
- JULIUS, H.W., 1996, “Individual Monitoring for External Radiation, Some Conceptual and Practical Aspects”. In: *Proceedings of the 9th International Congress of the IRPA*, v. 1, pp. 313-320, Vienna, April.
- KAERI, <http://atom.kaeri.re.kr>. Table of Nuclides. Acessado em 27/12/2006.
- KARELIN, Y.A., GORDEEV, Y.N., KARASEV, V.I., RADCHENKO, V.M., SCHIMBAREV, Y.V., KUZNETSOV, R.A., 1997, “Californium-252 Neutron Sources”, *Appl. Radiat. Isot.*, v. 48, n. 10-12, pp. 1563-1566.
- KLEIN, H., LINDBORG, L., 1995, *Determination of the Neutron and Photon Dose Equivalent at Work Places in Nuclear Facilities of Sweden. An SSI-EURADOS Comparison Exercise, Part 1: Measurements and Data Analysis*, Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm.
- KNIGHT, A., MARSHALL, T.O., HARVEY, C.L., HARVEY, J., 1973, “Performance of Nuclear Track Emulsion and Albedo Dosimeters for Monitoring the Neutron Radiation from ²⁵²Cf Sources”. *Proceedings of a Symposium on Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes*, v. 2, pp. 171-181, Vienna, Dec.
- KNOLL, G.F., 1989, *Radiation Detection and Measurement*. 2ed. Hoboken, John Wiley & Sons.
- KOCHER, L.F., NICHOLS, L.L., ENDRES, G.W.R., SHIPLER, D.B., HAVERFIELD, A.J., 1973, “The Hanford Thermoluminescent Multipurpose Dosimeter”, *Health Phys.*, v. 25, n. Dec, pp. 567-573.
- KRON, T., 1995, “Thermoluminescence Dosimetry and Its Applications in Medicine – Part 2: History and Applications”, *Australasian Phys. & Eng. Sciences in Medicine*, v. 18, n. 1, pp. 1-25.
- Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, 2002, *Grandezas e Unidades para Radiação Ionizante (Recomendações e Definições)*. Rio de Janeiro, LNMRI-IRD.
- LAPPONI, J.L., 1997, *Estatística Usando o Excel 5 e 7*. São Paulo, Laponi Treinamento e Editora.
- LIU, J.C., JENKINS, T.M., McCALL, R.C., IPE, N.E., 1991, *Neutron Dosimetry at SLAC: Neutron Sources and Instrumentation*, Report SLAC-TN-91-3. Stanford Linear Accelerator Center, Stanford.
- LIU, J.C., SIMS, C.S., WEST, L., WELTY, T., 1990, “Angular Response Performance Study of a New Harshaw Neutron Albedo TLD”, *Rad. Prot. Dos.*, v. 30, n. 3, pp. 161-168.

- LIU, J.C., SIMS, C.S., 1990, "Characterisation of the Harshaw Albedo TLD and the Bubble Detectors BD-100R and BDS-1500", *Rad. Prot. Dos.*, v. 32, n. 1, pp. 21-32.
- LIU, J.C., SIMS, C.S., 1991, *Mixed Field Personnel Dosimetry, Part I: High Temperature Peak Characteristics of the Reader-Annealed TLD-600*, Report SLAC-PUB-5340. Stanford Linear Accelerator Center, Stanford.
- LIU, J.C., SIMS, C.S., AHMED, A.B., 1992, "A Proposed Four-Element Neutron-Photon-Beta Thermoluminescence Dosimeter". *Health Phys.*, v. 63, n. 3, pp. 316-323.
- LONE, M.A., SANTRY, D.C., INGLIS, W.M., 1980, "MeV Neutron Production from Thermal Neutron Capture in Li and B Compounds", *Nuclear Instruments and Methods*, v. 174, pp. 521-529.
- LORCH, E.A., 1973, "Neutron Spectra of $^{241}\text{Am/B}$, $^{241}\text{Am/Be}$, $^{241}\text{Am/F}$, $^{242}\text{Cm/Be}$, $^{238}\text{Pu}/^{13}\text{C}$ and ^{252}Cf isotopic Neutron Sources, *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, v. 24, pp. 585-591.
- LUSZIK-BHADRA, M., ALBERTS, W.G., DIETZ, E., GULDBAKKE, S., 1993, "Aspects of Combining Albedo and Etched Track Techniques for Use in Individual Neutron Monitoring", *Rad. Prot. Dos.*, v. 46, n. 1, pp. 31-36.
- MANFREDOTTI, C., ZANINI, A., ROLLET, S., ARMAN, G., 1989, "Simulation and Test of a New Albedo Personal Dosimeter for Neutrons", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, v. A284, pp. 464-475.
- MANO, E.B., 1991, *Polímeros como Materiais de Engenharia*. São Paulo, Editora Edgard Blücher.
- MARTINS, M.M., 2002a, *Formação de Lotes de TLDs* (instrução técnica LDT-IT-5.4-10). Rio de Janeiro, IRD/DEMIN/TLD. (documento restrito)
- MARTINS, M.M., 2002b, *Identificação, Manuseio, Armazenagem e Limpeza de TLDs* (instrução técnica LDT-IT-5.4-05). ver. 1, Rio de Janeiro, IRD/DEMIN/TLD. (documento restrito)
- MARTINS, M.M., MAURÍCIO, C.L.P., 2001, "Factors that Affected the Development of a New Albedo Individual Monitor at IRD". In: *Proceedings of the V Regional Congress on Radiation Protection and Safety*, CD-rom, trab-c 065fv.pdf, Recife, April.
- MARTINS, M.M., MAURÍCIO, C.L.P., 2006, *Instrução de Uso do Monitor Individual de Albedo*, revisão 3. IRD/DEMIN/TLD, Rio de Janeiro.
- MARTINS, M.M., MAURÍCIO, C.L.P., 2007, *Instrução de Uso do Monitor Individual de Albedo de 2 Componentes*, revisão 2. IRD/DEMIN/TLD, Rio de Janeiro.
- MARTINS, M.M., MAURÍCIO, C.L.P., CUNHA, P.G., ALMEIDA, C.E.V., FONSECA, E.S., 1995, "Potencial de Exposição a Nêutrons dos Trabalhadores Brasileiros". In *Anais do III Encontro Nacional de Aplicações Nucleares*, v. 2, pp. 1173-1177, Águas de Lindóia, Agosto.

- MARTINS, M.M., MAURÍCIO, C.L.P., FONSECA, E.S., 1996, "Factors Affecting Polyamide Prototypes Design of Albedo Dosimeters". In: *Proceedings of the 9th International Congress of the IRPA*, v. 4, pp. 384-386, Vienna, April.
- MARTINS, M.M., MAURÍCIO, C.L.P., FONSECA, E.S., 2005, *Monitor Individual de Nêutrons Passivo Tipo Albedo de Duas Componentes*, Depósito de Pedido de Patente de Modelo de Utilidade MU8500012-4, INPI.
- MARTINS, M.M., MAURÍCIO, C.L.P., CUMMINGS, J.B., SEDA, R.P.G., 2006, *Caixa para Armazenagem, Transporte e Irradiação de Detectores Luminescentes*, Depósito de Pedido de Patente de Invenção PI0603355-5, INPI.
- MARTINS, M.M., MAURÍCIO, C.L.P., GONÇALVES, S.A., ARANTES, R.R., 2007a, *Bandeja com Cavidades Raiadas para Tratamento Térmico de Detectores Luminescentes*, Depósito de Pedido de Patente de Invenção PI0704629-4, INPI.
- MARTINS, M.M., MAURÍCIO, C.L.P., PATRÃO, K.C.S., SILVA, A.X., 2007b, "Calibration of a TLD Albedo Individual Neutron Monitor". In: *Proceedings of the 2007 International Nuclear Atlantic Conference*, DVD-rom, paper 01_1147.pdf, Santos, September.
- MARTINS, M.M., MAURÍCIO, C.L.P., SILVA, A.X., 2007c, "TLD Albedo Dosimeter Performance on a Hp(10) Neutron Dose IAEA Intercomparison". In: *Proceedings of the 2007 International Nuclear Atlantic Conference*, DVD-rom, paper 02_1030.pdf, Santos, September.
- MARTINS, M.M., PEREIRA, W.P., BÓSSIO, F., 2007d, *Método e Dispositivo para Irradiação com Fontes de Nêutrons de Califórnia-252*, Depósito de Pedido de Patente de Modelo de Utilidade MU8700006-7, INPI.
- MAURÍCIO, C.L.P., 1987, *Dosimetria Individual de Nêutrons*, Nota Técnica IRD-CNEN-NT-014/87, IRD, Rio de Janeiro.
- MAURÍCIO, C. L. P., 2000, *Produção de Filmes de LiF para Aplicação em Dosimetria Termoluminescente*. Tese de D.Sc., PUC-RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MAURÍCIO, C.L.P., 2001, "Termoluminescência e Dosimetria Termoluminescente – Aplicação na Monitoração Individual". In: Maurício, C.L.P. (ed), *Monitoração Individual Externa*. Rio de Janeiro, IRD.
- McDONALD, J.C., AKABANI, G., LOESCH, R.M., 1993, "Intercomparison of High-Energy Neutron Personnel Dosimeters". In: *Proceedings of the Workshop on Measurement Quality Assurance for Ionizing Radiation*, pp. 159-164, Gaithersburg, March.
- McKEEVER, S.W.S., MOSCOVITCH, M., TOWNSEND, P.D., 1995, *Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and Uses*. 1^o ed. Ashford, Nuclear Technology Publishing.
- MEIRA, N. F., 2001, *Projeto e Caracterização de um Monitor Individual de Extremidade para Avaliação de Dose em Hp(0,07)*. Dissertação de Mestrado, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- MEJDAHL, V., 1967, "Thermoluminescence Dosimetry in Fast-Neutron Personnel Monitoring Using Body-Moderation". In: *Proceedings of a Symposium on Neutron Monitoring (IAEA-76/38)*, pp. 449-458, Vienna, August-September.
- MERCK & Co., Inc., 2001, *The Merck Index – An Encyclopedia of Chemicals, Drugs and Biologicals*. 13rd ed. Whitehouse Station, NJ, Merck Research Laboratories.
- NASH, A.E., JOHNSON, T.L., 1980, "Effect of Badge position on the Response of an Albedo Neutron Dosimeter", *Health Phys.*, v. 39, n. Dec, pp. 989-991.
- NASH, A.E., JOHNSON, T.L., ZEMAN, G.H., SNYDER, G.I., RIEL, G.K., WOO, K., WANG, C.Y., SCOFIELD, N.E., 1985, *The Response of an Albedo Neutron Dosimeter to Moderated AmBe and ²⁵²Cf Neutron Sources*, NRL Report 8909. Naval Research Laboratory, Washington, D.C.
- National Physical Laboratory. <http://www.npl.co.uk/server.php?Show=ConWebDoc.1578>. Acessado em 13/02/2008.
- OSBORN, J.C., ERSEZ, T., BRAOUDAKIS, G., 2006, "Radiation Shielding Design for Neutron Diffractometers Assisted by Monte Carlo Methods", *Physica B*, n. 385-386, pp. 1321-1323.
- PERKS, C.A., 1993, "Mixed Radiation Field Dosimetry with Thermoluminescence Materials Applied to Personal Dosimetry". In: Oberhofer, M., Scharmman, A. (eds), *Techniques and Management of Personnel Thermoluminescence Dosimetry Services*, chapter 6, Brussels and Luxembourg, Kluwer Academic Publishers.
- PETRE, S., 1992, *Dosimetrie Individuelle Neutronique par Detecteurs a Traces de Fission et Albedo dans les Centrales Nucleaires*. These Dr. Es. Sci. Techn., École Polytechnique Federale, Lausanne, France.
- Physikalisch Technische Werkstätten, 1998, *TLD Ofen*, Instruction Manual. PTW, Freiburg, Germany.
- PIESCH, E., 1977, "Progress in Albedo Neutron Dosimetry", *Nuclear Instruments and Methods*, v. 145, pp. 613-619.
- PIESCH, E. 1982, "Albedo Neutron Dosimetry", *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, v. 33, pp. 1061-1076.
- PIESCH, E., 1985, "Calibration Techniques for Personnel Dosemeters in Stray Neutron Fields", *Rad. Prot. Dos.*, v. 10, n. 1-4, pp. 159-173.
- PIESCH, E., BURGKHARDT, B., 1973, "LiF Albedo Dosimeters for Personnel Monitoring in a Fast-Neutron Radiation Field", In: *Proceedings of a Symposium on Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes*, v. 2, pp. 31-55, Vienna, Dec.
- PIESCH, E., BURGKHARDT, B., 1974, "An LiF Albedo Neutron Dosimeter for Personnel Monitoring in Mixed Radiation Fields". In: *Proceedings of the 4th Int. Conf. on Luminescence Dosimetry*, pp. 1123-1140, Krakow, Poland, August.
- PIESCH, E., BURGKHARDT, B., 1980, "Application of the TLD Albedo Technique for Monitoring and Interpretation of Neutron Stray Radiation Fields", *Nuclear Instruments and Methods*, v.175, n. 1, pp. 180-182.

- PIESCH, E., BURGKHARDT, B., 1988, "Routine Neutron Monitoring in the Federal Republic of Germany Using a Two-Component Albedo Dosimeter System". In: *Proceedings of the 7th International Congress of the IRPA*, v. 3, pp. 265-268, Sydney, April.
- PIESCH, E., BURGKHARDT, B., 1993, "Thermoluminescence and Personnel Dosimetry: Potential and Limits". In: Oberhofer, M., Scharmann, A. (eds), *Techniques and Management of Personnel Thermoluminescence Dosimetry Services*, chapter 5, Brussels and Luxembourg, Kluwer Academic Publishers.
- PIESCH, E., BURGKHARDT, B., VENKATARAMAN, G., 1982, "Study of the Phantom Distance Effect of Albedo Neutron Dosimeters", *Rad. Prot. Dos.*, v. 3, n. 1/2, pp. 39-45.
- PIESCH, E., BURGKHARDT, B., COMPER, W., 1985, "The Single Sphere Albedo System - a Useful Technique in Neutron Dosimetry", *Rad. Prot. Dos.*, v. 10, n. 1-4, pp. 147-157.
- PRESTON, H.E., PEABODY, C.O., 1973, "Measurement of Personnel Neutron Dose in Reactor and Associated Areas". *Proceedings of a Symposium on Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes*, v. 2, pp. 85-98, Vienna, Dec.
- PRÊTRE, S., 1973, "Personal Neutron Dosimeter, Based on Automatic Fission-Track and Spark Counting, for Routine and Emergency Use". In: *Proceedings of a Symposium on Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes*, v. 2, pp. 99-115, Vienna, Dec.
- RAMOS, R., 2004, *Modelagem de um Sistema Neutronográfico Baseado em uma Fonte de ²⁴¹Am-Be, Utilizando o Método de Monte Carlo*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- REGULLA, D.F., DRISCOLL, C.M.H., 1993, "Thermoluminescence Materials and Their Dosimetric Characteristics". In: Oberhofer, M., Scharmann, A. (eds.) *Techniques and Management of Personnel Thermoluminescence Dosimetry Services*, chapter 4, Brussels and Luxembourg, Kluwer Academic Publishers.
- SCHUCH, L. A., 1978, *Calibração de Monitores de Nêutrons com Moderadores e Aplicação na Determinação de Fatores de Calibração de Dosímetros de Albedo*. Dissertação de Mestrado, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SCHUHMACHER, H., SUÁRES, R.C., POCHAT, J-L. 2004, *Intercomparison on Measurements of the Quantity Personal Dose Equivalent $H_p(d)$ in Mixed (Neutron-Gamma) Fields – Analysis of Results from Part 1*. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- SCHWARTZ, R.B., EISENHAUER, C.M., 1980, *NUREG/ CR-1204, The Design and Construction of a D₂O-Moderated ²⁵²Cf Source for Calibrating Neutron Personnel Dosimeters Used at Nuclear Power Reactors*. Washington, D.C., National Bureau of Standards.
- SCHWARTZ, R.B., EISENHAUER, C.M., 1982, *NBS Special Publication 633, Procedures for Calibrating Neutron Personnel Dosimeters*. Washington, D.C., National Bureau of Standards.
- SEELMANN-EGGEBERT, W., PFENNIG, G, MÜNDEL, H., KLEWE-NEBENIUS, H., 1981, *Nuklidkarte - 5^o Auflage*, Kerforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Lage.

- SOHRABI, M., KATOUZI, M., 1991, "Design Characteristics of a Three-Component AEOI Neutron Albedo Neutron Dosimeter", *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, v. 19, n. 1-4, pp. 537-540.
- SOHRABI, M., KATOUZI, M., 1992, "The Role of Phantom Parameters on the Response of the AEOI Neutron Albedo Neutron Personnel Dosimeter", *Rad. Prot. Dos.*, v. 44, n. 1/4, pp. 281-285.
- STRAND, T., STORRUSTE, A., 1986, *Thermoluminescence Albedo-Neutron Dosimetry*, Report 86-26, University of Oslo, Oslo, Norway.
- STUDENÁ, J., PRŮŠA, J., TROUSIL, J., PROUZA, Z., 1989, "Comparison of the Dosimetric Properties of the Neutron Dosimeter of the ÚVVR with Albedo Dosimeter, and CR-39 Track Dosimeter from the Point of View of the National Personal Dosimetry Service in Czechoslovakia", *Kernenergie*. v. 32, n. 6, pp. 239-243.
- SWAJA, R.E., 1988, "Performance Characteristics of Neutron Personnel Dosimeters Used in the Oak Ridge Intercomparison Studies", *Rad. Prot. Dos.*, v. 23, n° 1/4, pp. 211-215.
- TANAKA, S.I., FURUTA, Y., 1977, "Revised Energy Responses of ^6LiF and ^7LiF Thermoluminescent Dosimeters to Neutrons", *Nucl. Instr. and Meth.*, v. 140, pp. 395-396.
- THOMAS, D.J., HORWOOD, N., TAYLOR, G.C., 1999, *Neutron Dosimeter Responses in Workplace Fields and the Implication of Using Realistic Neutron Calibration Fields*, Report NPL-R-CIRM-27, National Physical Laboratory, Teddington.
- TUYN, J.W.N., LANKSMANAN, A.R., 1984, "A Combination of TLD Albedo and Sulphur Activation Techniques for Fast Neutron Personnel Dosimetry", *Rad. Prot. Dos.*, v. 6, n. 1/4, pp. 237-240.
- TYMONS, B.J., TUYN, J.W.N., BAARLI, J., 1973, "System for Personnel Dosimetry in Mixed Radiation Fields". In: *Proceedings of a Symposium on Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes (IAEA-SM-167/20)*, v. 2, pp. 63-70, Vienna, Dec.
- UNRUH, C.M., BAUMGARTNER, W.V., KOCHER, L.F., 1967, "Personnel Neutron Dosimeter Developments". In: *Proceedings of a Symposium on Neutron Monitoring (IAEA-SM-76/17)*, pp. 433-448, Vienna, August-September.
- UNSCEAR, 2000, *UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, Volume I: Sources*. United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation, New York, USA.
- VAN DIJK, J.W.E., BORDY, J.M., VANHAVERE, F., WERNLI, C., ZAMANI-VALSIADOU, M., 2000, "A Catalogue of Dosimeters and Dosimetric Services Within EU Member States and Switzerland Able to Estimate External Radiation Doses as Personal Dose Equivalent", *Rad. Prot. Dos.*, v. 89, n° 1-2, pp. 53-105.
- WEINSTEIN, M., GERMAN, U., ALFASSI, Z.B., 2006, "On Neutron-Gamma Mixed Field Dosimetry with LiF:Mg,Ti at Radiation Protection Dose Levels", *Rad. Prot. Dos.*, v. 119, n. 1-4, pp. 314-318.

- YEH, S.H., CHOU, Y.Y., WENG, P.S., 1981, "The Albedo Dosimeter for Personnel Monitoring in Fast-Neutron Radiation Fields", *Hoken Butsuri*, v. 16, pp. 201-207.
- ZEMAN, G.H., SNYDER, G.I., 1978, "Neutron Dose Precision Using LiF TLD", *Health Phys.*, v. 36, n. 1, pp. 75-76.
- ZIMBAL, A., SCHUHMACHER, H., 2005, "Intercomparison on Measurement of the Quantity Personal Dose Equivalent $H_p(10)$ in Mixed (Neutron-Gamma) Fields – Analysis of Results from Phase 2". IAEA, Vienna (Austria).

ANEXO A

GRANDEZA PARA MONITORAÇÃO INDIVIDUAL DE NÊUTRONS

Uma grandeza física é uma propriedade de um objeto físico ou fenômeno a ser quantificado por medida ou por cálculo e que, freqüentemente, serve para modelar fenômenos físicos. Um sistema físico de grandezas é estabelecido a partir de um conjunto de grandezas tidas como básicas, de modo que todas as demais grandezas possam ser derivadas por relações simples: quocientes ou produtos (ICRU, 1993). Tais grandezas físicas devem:

- ✓ Estar diretamente relacionadas a padrões metrológicos.
- ✓ Ser extensamente aplicáveis em situações práticas.
- ✓ Não podem apresentar ambigüidade, que levem a equívocos sobre a sua natureza.
- ✓ Ser gerais.
- ✓ Ser necessárias, ou seja, sem nenhuma redundância.
- ✓ E acessíveis por medida ou cálculo.

Os conceitos e grandezas empregados em dosimetria e proteção radiológica estão apresentados nas publicações da ICRU e da ICRP. Em termos de medidas de proteção radiológica para nêutrons, a grandeza fundamental é fluência da partícula (ICRP, 1997). Na Figura A.1, está apresentada uma relação simplificada para visualização da conversão da grandeza fundamental em grandeza operacional para nêutrons (BÖHM *et al.*, 1999). As grandezas de proteção ou limitantes são a dose equivalente e a dose efetiva. Contudo, as rotinas de proteção radiológica exigem avaliações constantes e numerosas, tornando a determinação delas impraticável e desnecessária para a maioria dos trabalhadores (CUNHA, 1997).

A.1 Grandezas Operacionais

Grandezas operacionais para uso em monitoração de área e individual são grandezas originadas do equivalente dose. Para a maioria das situações de trabalho, estas grandezas devem fornecer uma aproximação razoável do VC; não devendo subestimá-lo, nem superestimá-lo em demasia (ICRU, 1988). A ICRU acredita ser altamente desejável que uma grandeza operacional seja diretamente aplicável a todos os tipos de radiação: alfa, beta, gama, nêutrons (ICRU, 1988).

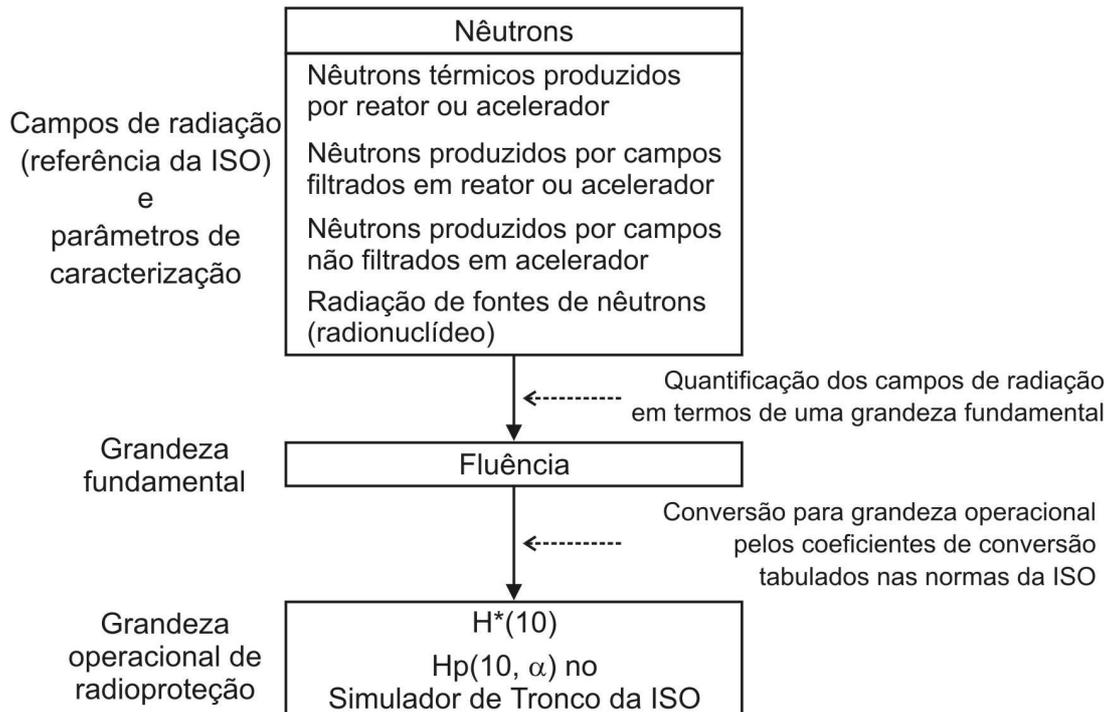


Figura A.1: Relação simplificada de conversão da grandeza fundamental em grandeza operacional de radioproteção para nêutrons

Atualmente, as grandezas operacionais estão baseadas no equivalente dose em um ponto de um simulador ou no corpo humano. Para isto, elas podem ser calculadas com base na fluência no ponto em questão (ICRU, 1993). Os conceitos de radiação fortemente ou fracamente penetrante são levados em consideração para definição das grandezas operacionais. Esta caracterização da radiação penetrante depende de quanto a grandeza equivalente de dose se encontra próxima dos seus valores limites. Na Figura A.1, a grandeza equivalente de dose está representada por $H_p(10)$ ou $H^*(10)$.

A.2 Equivalente de Dose Pessoal

Os monitores individuais de nêutrons devem medir o equivalente de dose pessoal na profundidade de 10 mm ($H_p(10)$) que foi a grandeza estabelecida para quantificar o risco relacionado a este tipo de radiação para a monitoração individual de nêutrons (LNMRI, 2002, ISO, 2005). A grandeza $H_p(d)$ é a dose dentro do tecido da ICRU, em uma profundidade apropriada, d , abaixo da superfície do ponto do corpo humano (ALBERTS *et al.*, 1995). Qualquer referência à grandeza H_p deve incluir obrigatoriamente uma especificação da profundidade d , expressa em milímetros (mm). Para radiações fortemente penetrantes, como a radiação neutrônica, interagindo no tronco emprega-se a profundidade de 10 mm. A unidade SI de $H_p(10)$ é o $J.kg^{-1}$, a qual é dado o nome especial de sievert (Sv).

O tecido da ICRU possui a densidade ou massa específica de $1\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ e a seguinte composição: 76,2% de oxigênio, 11,1% de carbono, 10,1% de hidrogênio e 2,6% de nitrogênio (ICRU, 1985, 1992). Para calibração na grandeza $H_p(10)$ de monitores individuais de corpo inteiro, tanto para fótons como para nêutrons, deve-se empregar um simulador que possua composição similar à do tecido da ICRU.

Para radiações fracamente penetrantes, o que não é o caso da radiação neutrônica, são empregadas as profundidades de 0,07 mm para a pele e de 3 mm para o cristalino. Nestes casos, a grandeza $H_p(d)$ seria representada por $H_p(0,07)$ e $H_p(3)$, respectivamente.

Anteriormente à edição dos regulamentos técnicos para certificação de sistemas de monitoração individual externa para nêutrons, a grandeza em uso no Brasil era o MADE (LNMRI, 2002). A maior limitação ao uso do MADE é que para uma mesma energia a dose máxima devido a nêutrons pode não ser aditiva com a dose devido a radiações gama, por não ocorrerem na mesma profundidade (MAURÍCIO, 1987).

ANEXO B

TESTES DE CARACTERIZAÇÃO DO IRD

A seguir é feita uma transcrição do Regulamento Nº 007 (IRD, 2001b). O código entre parêntesis nos subtítulos refere-se ao número do teste no regulamento do IRD.

B.1 Teste de Reprodutibilidade (4.3.1)

Prepare um grupo com n monitores. Irradie-os com uma fonte de nêutrons padrão de teste sem moderação, e avalie-os. Repita este procedimento dez vezes. O valor verdadeiro convencional (VC) deve ser exatamente o mesmo cada vez e da ordem de 5 mSv. Para cada monitor, determine A_{ij} , onde i se refere à i -ésima irradiação e j se refere ao j -ésimo monitor. Para cada uma das dez irradiações, calcule a média \bar{A}_i e o desvio padrão s_i , onde:

$$\bar{A}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n A_{ij} \quad \text{B.1}$$

Mostre que:

$$\frac{s_i + I_i}{10 \bar{A}_i} \leq 0,15 \quad \text{B.2}$$

onde I_i (intervalo de confiança de s_i) é calculado para o nível de confiança de 95%. Ou seja, que o CV seja menor ou igual que 15%.

Para cada um dos n monitores, determine o valor médio \bar{A}_j e o desvio padrão s_j , onde:

$$\bar{A}_j = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} A_{ij} \quad \text{B.3}$$

Mostre que para cada um dos n monitores:

$$\frac{s_j + I_j}{A_j} \leq 0,15 \quad \text{B.4}$$

onde I_j (intervalo de confiança de s_j) é calculado para o nível de confiança de 95%.

B.2 Teste de Limite Inferior de Detecção (4.3.2)

Prepare e avalie n monitores. Determine o valor avaliado A para cada monitor não irradiado e calcule a média dos valores avaliados \bar{A} utilizando o fator de calibração (FCL) calculado para uma fonte de $^{241}\text{Am-Be}$ a 0,75 m, e o desvio padrão da média $s_{\bar{A}}$, para todos os n monitores. Mostre que:

$$t_n \cdot s_{\bar{A}} \leq 0,20 \text{ mSv} \quad \text{B.5}$$

Onde 0,20 mSv é o limite inferior de detecção e t_n é o t de *Student* para $n-1$ graus de liberdade (n = número de monitores utilizados no teste) e nível de confiança de 50%.

B.3 Teste de Estabilidade dos Monitores sob Diferentes Condições Ambientais (4.3.2)

a. Prepare dois grupos de n monitores cada. Armazene ambos os grupos durante 24 horas sob condições padrões de teste. Irradie o grupo 1, com uma fonte de nêutrons padrão de teste sem moderação, com um VC entre 1 e 10 mSv de nêutrons. Após a irradiação do grupo 1, armazene ambos os grupos de monitores nas condições padrões de teste.

Após 30 dias, recolha ambos os grupos de monitores. Irradie o grupo 2 com o mesmo VC utilizado para o grupo 1. Armazene os dois grupos durante 24 horas em condições padrões de teste. Determine o valor avaliado A para cada monitor e calcule a média dos valores avaliados A_i e os desvios padrões s_i , para cada um dos dois grupos. Onde $i = 1$ ou 2 e o nível de confiança de 95%. Mostre que para cada um dos grupos:

$$0,85 \leq \frac{\bar{A}_i \pm I_i}{VC} \leq 1,15 \quad \text{B.6}$$

b. Repita os testes especificados em a para um período de armazenamento de 90 dias. Onde $i = 1$ ou 2 e o nível de confiança de 95%. Mostre que:

$$0,80 \leq \frac{\bar{A}_i \pm I_i}{VC} \leq 1,20 \quad \text{B.7}$$

c. Repita o teste especificado em **a** para um período de 7 dias de armazenamento em condições ambientais tais que a temperatura seja de $50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ e umidade relativa igual à do ambiente. Onde $i = 1$ ou 2 e o nível de confiança de 95%. Mostre que para cada um dos grupos:

$$0,75 \leq \frac{\bar{A}_i \pm I_i}{VC} \leq 1,25 \quad \text{B.8}$$

d. Repita o teste especificado no item **a** para um período de 30 dias de armazenamento em condições ambientais tais que a temperatura do ambiente seja de aproximadamente 25°C e a umidade relativa do ar de no mínimo 85%. Onde $i = 1$ ou 2 e o nível de confiança de 95%. Mostre que para cada um dos grupos:

$$0,75 \leq \frac{\bar{A}_i \pm I_i}{VC} \leq 1,25 \quad \text{B.9}$$

B.4 Teste de Efeito da Luz sobre o Monitor (4.3.4)

a. Efeito na dose zero:

Prepare dois grupos de n monitores cada. Exponha o grupo 1 à luz de 4 lâmpadas fluorescentes de 40 W, do tipo “luz do dia”, montadas paralelamente em uma única luminária, a uma distância de 1 m, durante 24 horas. Assegure-se que a temperatura dos monitores manter-se-á a menos de 40°C .

Armazene o grupo 2 no escuro, mantendo as demais condições ambientais idênticas às do grupo 1. Assegure-se que a temperatura dos monitores do grupo 2 não varie em mais do que 5% em relação à do grupo 1.

Após 24 horas, avalie todos os monitores. Determine o valor avaliado A para cada monitor, utilizando o fator de calibração local (FCL) calculado para uma fonte de $^{241}\text{Am-Be}$ a 0,75 m. Calcule a média dos valores avaliados \bar{A} para cada um dos dois grupos e seus respectivos desvios padrões, para o nível de confiança de 95%. Mostre que:

$$|\bar{A}_1 - \bar{A}_2| + I \leq 0,20 \text{ mSv} \quad \text{B.10}$$

b. Efeito na resposta:

Prepare e irradie, com uma fonte de nêutrons, dois grupos de n monitores cada. O VC deve ser entre 1 e 10 mSv. Repita o procedimento descrito no item **a** alterando o tempo de exposição à luz para 168 horas (uma semana). Determine o valor avaliado A para cada monitor e calcule as médias \bar{A}_i e desvios padrões dos valores avaliados, para cada um dos dois grupos, para o nível de confiança de 95%. Mostre que:

$$0,85 \leq \frac{\bar{A}_1}{A_2} \pm I \leq 1,15 \quad \text{B.11}$$

B.5 Teste de Linearidade (4.3.5)

Prepare quatro grupos contendo cada um n monitores, irradie-os com uma fonte de nêutrons padrão de teste sem moderação e avalie-os. As irradiações devem ser feitas com nêutrons com os seguintes VCi:

grupo 1: VC1 = 0,2 mSv,

grupo 2: VC2 = 1,0 mSv,

grupo 3: VC3 = 10 mSv,

grupo 4: VC4 = 100 mSv.

Determine o valor avaliado A para cada monitor. Calcule para cada grupo a média dos valores avaliados \bar{A}_i . Calcule a razão entre o valor avaliado médio e o VC

$x_i = \bar{A}_i / VC_i$, para cada grupo. Identifique o maior e o menor dentre os valores de x_i (x_{\max} e x_{\min}). Mostre que:

$$\frac{x_{\max} - x_{\min}}{x_{\max} + x_{\min}} \leq 0,30 \quad \text{B.12}$$

B.6 Teste de Dependência Angular (4.3.6)

Prepare quatro grupos, contendo cada um n monitores, irradie-os com uma fonte de nêutrons padrão de teste sem moderação, e avalie-os. As irradiações devem ser feitas com um VC entre 1 e 10 mSv, nas seguintes condições:

grupo 1: incidência normal (zero grau),

grupo 2: 30° em relação à normal,

grupo 3: -30° em relação à normal,

grupo 4: 60° em relação à normal.

Determine o valor avaliado A para cada monitor e calcule a média dos valores avaliados \bar{A}_i e os desvios padrões para cada um dos quatro grupos, para o nível de confiança de 95%. Mostre que:

$$0,80 \leq \frac{\sum_{i=1}^4 \bar{A}_i}{4\bar{A}_i} \pm I \leq 1,20 \quad \text{B.13}$$

B.7 Teste de Discriminação Nêutron-Gama (4.3.7)

Prepare dois grupos de n monitores, irradie-os com uma fonte de nêutrons padrão de teste sem moderação, com um VC_n entre 1 e 10 mSv. A seguir, irradie o grupo 2 com uma fonte de ^{137}Cs ou ^{60}Co com um VC_γ igual a três vezes o valor de VC_n .

Determine o valor avaliado A (para nêutrons) para cada monitor e calcule as médias \bar{A}_i e os desvios padrões dos valores avaliados para cada um dos dois grupos, para o nível de confiança de 95%. Mostre que:

$$0,80 \leq \frac{\bar{A}_2}{\bar{A}_1} \pm I \leq 1,20 \quad \text{B.14}$$

B.8 Teste de Resistência a Impactos (4.3.8)

O teste de robustez do monitor deve ser realizado do seguinte modo:

- a) Selecionar aleatoriamente 10 monitores completos de cada lote (com os TLDs);
 - b) Solte-os em queda livre de uma altura de 1,5 m sobre uma superfície de concreto.
- Repetir este procedimento 3 vezes para cada monitor em teste.

O suporte não deve sofrer rupturas em sua estrutura, os filtros (se houverem) não devem se desprender do mesmo e os TLDs não devem sofrer qualquer avaria ou deslocamento dentro do suporte.

ANEXO C

INFORMAÇÕES ESTATÍSTICAS RELACIONADAS ÀS MEDIDAS

C.1 Coeficiente de Variação

A definição do Coeficiente de Variação (CV) empregado nos testes de caracterização (IRD, 2001b, ISO, 2005) está apresentado na equação C.1.

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{C.1}$$

C.2 Distribuição do “t” de Student

A distribuição “t” de *Student* foi empregada na realização dos testes de desempenho da ISO 21909 (ISO, 2005) e do IRD (2001b). Os valores dos “t” empregados neste trabalho estão apresentados na Tabela C.1 (LAPPONI, 1997).

Tabela C.1: Distribuição do t de *Student* em função do número de medidas, n_i , que foram realizadas neste trabalho

n_i	t_{ni} (95%)	t_{ni} (50%)
3	4,303	-
4	3,183	-
5	2,776	-
6	2,571	-
8	2,365	-
10	2,262	-
11	2,228	-
12	2,201	0,695
16	2,131	-
17	2,120	-
20	2,093	-
24	2,069	-
32	2,040	-
40	2,023	-

ANEXO D

PRODUÇÃO CIENTÍFICA RELACIONADA A ESTE TRABALHO

Como conseqüência do esforço para superação destas dificuldades, quatro pedidos de patentes foram depositados no Instituto Nacional da Propriedade Industrial e dois artigos completos foram apresentados em um congresso internacional:

MARTINS, M.M., MAURÍCIO, C.L.P., FONSECA, E.S., 2005, *Monitor Individual de Nêutrons Passivo Tipo Albedo de Duas Componentes*, Depósito de Pedido de Patente de Modelo de Utilidade MU8500012-4, INPI.

MARTINS, M.M., MAURÍCIO, C.L.P., CUMMINGS, J.B., SEDA, R.P.G., 2006, *Caixa para Armazenagem, Transporte e Irradiação de Detectores Luminescentes*, Depósito de Pedido de Patente de Invenção PI0603355-5, INPI.

MARTINS, M.M., MAURÍCIO, C.L.P., GONÇALVES, S.A., ARANTES, R.R., 2007, *Bandeja com Cavidades Raiadas para Tratamento Térmico de Detectores Luminescentes*, Depósito de Pedido de Patente de Invenção PI0704629-4, INPI.

MARTINS, M.M., MAURÍCIO, C.L.P., PATRÃO, K.C.S., SILVA, A.X., 2007, "Calibration of a TLD Albedo Individual Neutron Monitor". In: *Proceedings of the 2007 International Nuclear Atlantic Conference*, DVD-rom, paper 01_1147.pdf, Santos, September.

MARTINS, M.M., MAURÍCIO, C.L.P., SILVA, A.X., 2007, "TLD Albedo Dosimeter Performance on a Hp(10) Neutron Dose IAEA Intercomparison". In: *Proceedings of the 2007 International Nuclear Atlantic Conference*, DVD-rom, paper 02_1030.pdf, Santos, September.

MARTINS, M.M., PEREIRA, W.P., BÓSSIO, F., 2007, *Método e Dispositivo para Irradiação com Fontes de Nêutrons de Califórnio-252*, Depósito de Pedido de Patente de Modelo de Utilidade MU8700006-7, INPI.