



**COPPE/UFRJ**

REQUISITOS DE ENERGIAS E PROPORÇÕES DE DOSES PARA ENSAIO E  
CALIBRAÇÃO DE DOSÍMETROS PESSOAIS ATIVOS EM CONDIÇÕES DE  
CAMPOS MISTOS

Ricardo Amorim Barbosa

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

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes.

Rio de Janeiro  
Abril de 2009

REQUISITOS DE ENERGIAS E PROPORÇÕES DE DOSES PARA ENSAIO E  
CALIBRAÇÃO DE DOSÍMETROS PESSOAIS ATIVOS EM CONDIÇÕES DE  
CAMPOS MISTOS

Ricardo Amorim Barbosa

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA 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. Ricardo Tadeu Lopes, D. Sc.

---

Prof. Edgar Francisco Oliveira de Jesus, D. Sc.

---

Prof. Akira Iwahara, D. Sc.

---

Prof. Marcelino José dos Anjos, D. Sc.

---

Prof. Luiz Tauhata, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2009

Barbosa, Ricardo Amorim

Requisitos de Energias e Proporções de Doses para Ensaio e Calibração de Dosímetros Pessoais Ativos em Condições de Campos Mistos / Ricardo Amorim Barbosa – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XII, 97 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

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

Referencias Bibliográficas: p. 71-74.

1. IEC 61526. 2. Campos mistos. 3. Dosímetro pessoal. I. Lopes, Ricardo Tadeu. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

Aos meus pais Waldir (*in memoriam*) e Maria de Lourdes, minha esposa Valquíria; e meus filhos Lara, Lucas e Laís.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao IRD e a todos os colegas pela oportunidade de realização desta tarefa.

Ao Prof. Ricardo Tadeu pelo apoio e colaboração.

Ao Prof. Tauhata pelo estímulo, colaboração e, sobretudo, compreensão.

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

REQUISITOS DE ENERGIAS E PROPORÇÕES DE DOSES PARA ENSAIO E  
CALIBRAÇÃO DE DOSÍMETROS PESSOAIS ATIVOS EM CONDIÇÕES DE  
CAMPOS MISTOS

Ricardo Amorim Barbosa

Abril / 2009

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Programa: Engenharia Nuclear

Campos mistos dificultam a determinação da dose durante a monitoração individual, uma vez que não existem requisitos de ensaio e calibração disponíveis. As comparações interlaboratoriais apontam as deficiências diante de campos mistos, sem estabelecer as configurações de energias e proporções de doses. Tanto a norma IEC 61526 como a ISO 4037-3 não provêm meios para se simular as condições reais de campos mistos. Esta pesquisa apresenta configurações de energias e doses para complementação dos testes especificados na norma IEC 61526. Utilizando o parâmetro nuclear intensidade de emissão foram definidas as configurações para simulação de campos mistos em laboratório. Além disso, foram desenvolvidas duas qualidades de radiações em faixa de energias não coberta pela norma ISO 4037-3. Com os resultados apresentados neste trabalho foi possível comprovar a condição de campos mistos de radiações como parâmetro de influência na medição de dose de indivíduos ocupacionalmente expostos. A contribuição deste trabalho foi a complementação das normas IEC 61526 e ISO 4037-3 no campo de ensaio de dosímetros ativos. 13 (treze) configurações de energias e proporções de doses foram definidas. Duas delas: uma de raios X e outra de raios gama, foram aplicadas em testes a 8 dosímetros ativos. Os resultados demonstraram que três dosímetros foram afetados pela presença de campos mistos, tanto em raios gama quanto em raios X. Já as duas qualidades N-360 e N-420 forneceram novos pontos de calibração na faixa 250 keV a 662 keV, que é uma lacuna na ISO 4037-3.

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

ENERGY AND PROPORTIONAL DOSE REQUIREMENTS TO ASSAY AND  
CALIBRATION OF ACTIVE PERSONAL DOSEMETERS IN CONDITIONS OF MIXED  
FIELDS

Ricardo Amorim Barbosa

April / 2009

Advisor: Ricardo Tadeu Lopes.

Department: Nuclear Engineering.

Mixed fields make interference at the dose determination for individual monitoring, because there are no requirements for assay and calibration for mixed fields conditions. International intercomparisons have indicated dosimeters problem with mixed fields but. IEC 61526 and ISO 4037-3 do not inform about simulate mixed fields at real conditions. This research introduces energy and dose configurations to complement IEC 61526 assays. Using the nuclear parameter emission intensity the energy and dose configurations were defined to simulate mixed fields conditions at the LNMRI-IRD/CNEN. Two radiations qualities within the gap of energy of ISO 4037-3 were defined and implanted. The results have shown the effect of mixed fields as influence parameter during dose evaluation in the individual monitoring. The contributions of this work were the IEC 61526 and ISO 4037-3 complementation in terms of active dosimeter assays. 13 configurations of energy and dose were defined. Two of them, one in X-ray and other in gamma were applied for 8 active dosimeters. The results have shown that 3 dosimeters were affected in the mixed field presence, in X-ray and gamma. The radiation qualities N-360 and N-420 have given newer points for calibration, within the range from 250 keV to 662 keV that is the ISO 4037-3 gap.

## ÍNDICE

	Página
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	
1.0 HISTÓRICO	1
1.1 GRANDEZA DE MEDIÇÃO	3
1.2 GRANDEZAS DE INFLUÊNCIA	3
1.3 CAMPOS MISTOS	4
1.4 REQUISITOS DE ENSAIO E CALIBRAÇÃO	5
1.5 COMPARAÇÕES INTERLABORATORIAIS	5
1.6 CONFIGURAÇÕES DE ENERGIAS E DOSES	6
1.7 PROPOSTAS DA PESQUISA	7
1.8 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA	9
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b>	
2.1 DEFINIÇÃO DE CAMPOS MISTOS DE RADIAÇÕES	10
2.2 INTRODUÇÃO AO CONCEITO DE GRANDEZA DE INFLUÊNCIA	12
2.3 CONSEQUÊNCIAS DA CONDIÇÃO DE CAMPOS MISTOS NO DESEMPENHO DOS DOSÍMETROS ATIVOS	13
2.4 RESULTADOS DE COMPARAÇÕES E ANÁLISE DE DESEMPENHO	15
2.5 MÉTODOS DE MELHORIA DO DESEMPENHO	16
2.6 CAMPOS MISTOS COMO GRANDEZA DE INFLUÊNCIA	16
2.7 NORMAS INTERNACIONAIS E SEUS REQUISITOS SOBRE CAMPOS MISTOS	17
<b>2.7.1 Requisitos de geração</b>	18
<b>2.7.2 Requisitos de qualidades de radiações</b>	21
<b>2.7.3 Requisitos de dosimetria</b>	21

2.7.4	Requisitos de ensaio (dependência energética) e calibração	21
2.7.5	Requisitos de ensaio e calibração de dosímetros pessoais ativos	22
2.7.6	Requisitos de dose	22
2.8	COMPOSIÇÃO DAS QUALIDADES DE RADIAÇÕES	23
2.9	FAIXAS DE DOSES PARA TESTES DOS DOSÍMETROS	23
2.10	PROPORÇÃO DE DOSES A QUE DEVEM SER SUBMETIDOS OS DOSÍMETROS	24
3	METODOLOGIA DA PESQUISA	
3.1	LEVANTAMENTO DAS ATIVIDADES EM QUE EXISTEM CONDIÇÕES DE CAMPOS MISTOS	25
3.2	DETERMINAÇÃO DAS RADIAÇÕES QUE COMPÕEM OS CAMPOS MISTOS	26
3.3	RELAÇÃO DE TODAS AS RADIAÇÕES UTILIZADAS NAS ATIVIDADES AVALIADAS NESTA PESQUISA	30
3.4	SELEÇÃO DAS RADIAÇÕES (ENERGIAS E INTENSIDADES DE EMISSÃO) RELEVANTES	30
3.5	QUALIDADES DE RADIAÇÕES ESTABELECIDAS POR NORMA (ISO 4037) PARA SIMULAR AS RADIAÇÕES SELECIONADAS	34
3.6	REQUISITOS DE ENERGIA	39
3.6.1	Seleção das qualidades de radiações da norma 4037	39
3.6.2	Determinação de energias fora das faixas de abrangência	39
3.6.3	Determinação das características das qualidades de radiações propostas	40

<b>3.6.4</b>	<b>Energia média das qualidades de radiações propostas</b>	40
3.7	CARACTERÍSTICAS DAS NOVAS QUALIDADES DE RADIAÇÕES	43
<b>3.7.1</b>	<b>Filtrações adicionais</b>	43
<b>3.7.2</b>	<b>Camada semi-redutora (CSR)</b>	46
3.8	REQUISITOS DE DOSES	48
3.9	REQUISITOS DE ENSAIO	50
<b>3.9.1</b>	<b>Critério de avaliação de ensaio e calibração dos dosímetros pessoais ativos</b>	50
<b>3.9.2</b>	<b>Configuração de energias e proporção de doses para ensaio dos dosímetros pessoais ativos</b>	51
3.10	REQUISITOS DE CALIBRAÇÃO	52
3.11	SELEÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES DE CAMPOS MISTOS PARA TESTES	52
		52
3.12	ESCOLHA DOS DOSIMETROS ATIVOS PARA TESTES	54
3.13	ARRANJO EXPERIMENTAL	55
<b>3.13.1</b>	<b>Ensaio em raios X</b>	55
<b>3.13.2</b>	<b>Ensaio em raios gama</b>	56
<b>3.13.3</b>	<b>Calibração em raios X</b>	57
<b>3.13.4</b>	<b>Calibração em raios gama</b>	58
3.14	EXECUÇÃO DOS TESTES	59
<b>3.14.1</b>	<b>Dosímetro de referência</b>	59
<b>3.14.2</b>	<b>Ensaio de campos mistos em raios X</b>	59
<b>3.14.3</b>	<b>Ensaio de campos mistos em raios gama</b>	59
<b>3.14.4</b>	<b>Calibração em raios X</b>	60

<b>3.14.5</b>	<b>Calibração em raios gama</b>	60
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	
4.1	RADIAÇÕES SELECIONADAS NA PESQUISA	61
4.2	CONFIGURAÇÃO DE ENERGIAS E PROPORÇÕES DE DOSES PROPOSTAS	61
4.3	QUALIDADES DE RADIAÇÕES DESENVOLVIDAS E IMPLEMENTADAS	61
4.4	TESTE DE INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE CAMPOS MISTOS DE RADIAÇÕES	62
<b>4.4.1</b>	<b>Campos mistos em raios X</b>	<b>62</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Campos mistos em raios gama</b>	<b>63</b>
4.5	CALIBRAÇÃO EM FEIXES DE RADIAÇÕES X E GAMA	64
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	68
<b>6</b>	<b>RECOMENDAÇÕES</b>	70
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	71
<b>APÊNDICE A</b>	DEFINIÇÕES	75
<b>APÊNDICE B</b>	FABRICANTES DE FILMES E TLDS	80
<b>APÊNDICE C</b>	RELAÇÃO DAS RADIAÇÕES PRESENTES NAS ATIVIDADES AVALIADAS	81
<b>APÊNDICE D</b>	PARÂMETROS NUCLEARES DO <sup>137</sup> Cs	84

<b>APÊNDICE E</b>	<b>CONFIGURAÇÃO DE ENERGIAS E PROPORÇÕES DE DOSES</b>	86
<b>APÊNDICE F</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DAS DUAS QUALIDADES DE RADIAÇÕES PROPOSTAS NESTA PESQUISA</b>	91
<b>APÊNDICE G</b>	<b>PLANILHAS DE INCERTEZAS CALCULADAS PARA OS TESTES</b>	95

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

### 1.0 HISTÓRICO

O Instituto de Radioproteção e Dosimetria-IRD, da Comissão Nacional de Energia Nuclear-CNEN, recebeu a designação de Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes-LNMRI por meio do Instituto Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial-Inmetro.

Entre as atividades desenvolvidas no LNMRI-IRD está a garantia de rastreabilidade das medições, efetuadas pelos Serviços de Monitoração Individual Externa-SMIE.

Esta rastreabilidade é oferecida por meio da calibração dos sistemas de monitoração individual, utilizados pelos SMIEs para avaliar as doses de radiações recebidas pelos indivíduos ocupacionalmente expostos às radiações. Estes trabalhadores da área nuclear portam dosímetros pessoais que registram os valores de dose, objeto de relatórios mensais emitidos pelos SMIEs.

Os sistemas de monitoração são compostos de dosímetros pessoais com detectores de TLD ou filme; equipamentos de processamento como: sistemas de revelação de filmes, leitoras de TLD e densitômetros. Além disso, existem algoritmos matemáticos que relacionam as respostas dos dosímetros irradiados durante as atividades, com as respectivas doses a que foram submetidos.

Os sistemas de monitoração atualmente em uso têm como base instrumentos conhecidos como dosímetros passivos. Estes são assim denominados por fornecerem os valores de dose apenas após o processamento do sinal emitido pelo detector: densidade ótica (filme) ou intensidade luminosa (TLD).

Todavia, vem crescendo a utilização de dosímetros eletrônicos que possibilitam a determinação instantânea da taxa de dose na área em que este está operando, além, é claro, da dose acumulada pelo trabalhador. Por isto estes instrumentos são conhecidos como dosímetros ativos.

Pela diminuição dos preços de custos destes instrumentos e praticidade na obtenção da dose durante a monitoração, estes instrumentos vêm ganhando espaço nas atividades de monitoração individual em outros países (GINJAUME *et al*, 2007, PRLIC *et al*, 2008, ISABELLE *et al*, 2008).

Entretanto, a presença de instrumentação com maior grau de sofisticação não garantiu a melhoria na qualidade da monitoração individual.

Os dosímetros passivos possuem, em sua grande maioria, elementos detectores de apenas dois tipos de materiais: filme e TLD. Os fabricantes destes materiais são mundialmente conhecidos e seus processos de fabricação muito bem divulgados e já testados ao longo de décadas em inúmeras pesquisas. No Anexo A encontramos nas Tabelas A.1 e A.2 os fabricantes de filmes e TLDs em uso pelos SMIEs na Europa, (LOPEZ PONTE *et al.*, 2004).

Diferentemente, os dosímetros ativos possuem detectores semi-condutores produzidos em grande escala por dezenas de fabricantes. Sendo assim, não é possível garantir a qualidade do detector instalado no dosímetro ativo (TOSHIYUKI *et al*, 2006, FOULON *et al*, 1999, REHAK, 2004).

Outro fato relevante é que os sistemas de monitoração baseados em dosímetros passivos têm seu desempenho atrelado ao projeto do porta-detector (*badge*), processamento do detector e elaboração do algoritmo, sob o controle dos responsáveis pelos SMIEs.

Por outro lado, o desempenho de sistemas de monitoração com base em dosímetros ativos passa a ser dependente da eletrônica de cada instrumento e, fundamentalmente, das interferências que possam ocorrer durante o registro de doses feito pelo dosímetro pessoal, principalmente pela variação de grandezas de influência.

Atualmente no Brasil os dosímetros ativos são usados como monitores individuais, ou seja: emitem sinal sonoro quando o limite de dose individual é ultrapassado e dão informação sobre o valor acumulado de dose de cada trabalhador. Inclusive, em alguns modelos é possível obter-se a hora em que determinado valor

máximo de dose foi alcançado, além do gráfico associando os valores de dose e a hora do dia de trabalho em que ocorreu a irradiação.

Nos laboratórios do LNMRI-IRD estes instrumentos são submetidos a testes de linearidade nas respostas para garantir seu desempenho nesta função.

Pela legislação atualmente em vigor no país, somente são considerados registros de doses de trabalhadores aqueles efetuados por sistemas de monitoração individual com base em dosímetros passivos.

### 1.1 GRANDEZA DE MEDIÇÃO

A grandeza operacional equivalente de dose individual,  $H_p(10)$ , foi recomendada no documento (ICRP 60, 1990) para uso em monitoração individual.

A própria grandeza veio a contribuir para as dificuldades da dosimetria pessoal em situações de campos mistos de radiações. Isto se deve ao fato da referida grandeza ter sido definida a 10 mm de profundidade no corpo humano.

Experimentalmente, as irradiações dos dosímetros são feitas em simuladores de tronco humano (fantoma). Este dispositivo de acrílico possui água em seu interior, de forma a simular a condição que um trabalhador, portando um dosímetro colocado em seu peito é exposto a um campo de radiação.

Logo, durante os testes e calibrações executados com os dosímetros obrigatoriamente este estará afixado a um fantoma.

As condições existentes nesta situação de irradiação são muito próximas das reais condições de monitoração individual, quando ocorre as interações das radiações com a matéria do fantoma.

### 1.2 GRANDEZAS DE INFLUÊNCIA

As grandezas de influência (VIM, 2007), como temperatura e pressão em medições com câmara de ionização, apesar de não serem o objeto da medição (mensurando), com certeza influenciam o resultado.

As grandezas de influência do tipo F podem mudar a resposta do instrumento, enquanto as do tipo S apenas acrescentam uma parcela do valor medido. Maiores detalhes são mostrados em 2.2.

### 1.3 CAMPOS MISTOS

Uma característica peculiar das atividades desenvolvidas na área nuclear é o contato físico, ou próximo disto, dos trabalhadores com fontes de diversas radiações de ampla faixa de energias.

Esta condição é conhecida na área de pesquisa da engenharia nuclear como campos mistos de radiações ionizantes (DELGADO, 2000).

Também existe consenso de que um campo de radiações compostos de diferentes direções de incidência (multi-direcional) das partículas poderia ser tratado como campo misto de radiações.

A presença de campos mistos de radiações é bastante comum nas atividades da área nuclear, e dificulta a determinação da dose durante a monitoração individual dos trabalhadores. Isto ocorre porque as irradiações dos dosímetros, em condições reais da atividades, são efetuadas simultaneamente por pelo menos duas das fontes de radiações. Nos casos de trabalhadores que executam ensaios não destrutivos, END, de soldas é comum a presença de radiações provenientes de fontes de  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{192}\text{Ir}$ , por exemplo. Neste caso o dosímetro estaria sendo exposto a, pelo menos, cinco energias diferentes: 296, 308, 317, 468 e 662 keV.

Com a utilização de dosímetros ativos esta situação, em tese, estaria resolvida com o processamento do sinal digital e apresentação de valores de doses próximos dos verdadeiros. Todavia por não serem testados em condições de campos mistos de radiações, não se pode garantir o funcionamento destes instrumentos nestas condições especiais, porém, não raras condições.

#### 1.4 REQUISITOS DE ENSAIO E CALIBRAÇÃO

No documento (IEC 61526, 2005), norma internacional para testes de dosímetros pessoais ativos, não há requisitos de energias nem para as proporcionalidades das doses. Ambos são fundamentais na configuração das condições de testes a que devem ser submetidos estes instrumentos, de modo a simular em laboratório as condições reais durante as atividades na área nuclear. No referido documento consta apenas um teste, contemplando apenas duas radiações componentes do campo misto, cujo limite de aceitação seria de 10% para a interferência causada por esta situação especial, porém, muito comum na monitoração individual.

Tampouco existem requisitos no documento ISO 4037-2 (1997), outra norma internacional, desta vez para calibração de dosímetros pessoais, de qualidades de radiações (energias) específicas para simular as condições de campos mistos de radiações. No referido documento apenas constam energias de referência para a calibração dos sistemas de monitoração individual; sem considerar, entretanto, a possibilidade da ocorrência de campos mistos de radiações. Neste documento apenas há a recomendação de que uma possível contaminação do feixe de referência por neutrons, beta ou mesmo fótons de outras energias deva ser contabilizado, avaliando esta influência na leitura do dosímetro. Mais uma vez não é apresentada uma solução satisfatória do problema, visto que a contaminação se daria no feixe de referência que não possui, necessariamente, relação com muitos dos campos de radiações encontrados nas atividades.

#### 1.5 COMPARAÇÕES INTERLABORATORIAIS

De modo a estabelecer padrões de desempenho e verificar a qualidade e, principalmente, a confiabilidade dos valores de doses relatadas pelos SMIEs, os organismos internacionais de metrologia e de regulação na área nuclear fazem uso de procedimentos de comparação interlaboratorial, em que são avaliados os

desempenhos de sistemas de monitoração, (AMBROSI *et al.*, 1994, KIM, *et al.*, 1999, ZORKO *et al.*, 2006). Apesar dos testes serem executados em laboratório, portanto em condições de referência, o que se busca nestas comparações é a avaliação do desempenho dos sistemas de monitoração nas reais condições de campo. Para isto, os organizadores fazem uso de configurações de energias e doses sem, no entanto, deixarem claro qual a ligação destas configurações com a realidade da monitoração individual.

Outra questão fundamental levantada nesta pesquisa é a forma de irradiação dos dosímetros sob teste. Na norma IEC 61526 foi proposta a irradiação em seqüência, ou seja: com uma fonte de cada vez.

Nesta pesquisa é proposta a irradiação simultânea dos dosímetros. Nesta condição haverá a competição de partículas durante a interação com o detector e, como visto em 1.1, com o corpo humano, aqui representado pelo fantoma.

## 1.6 CONFIGURAÇÕES DE ENERGIAS E DOSES

PRADHAN (2002) e BAKSHI *et al.* (2006) estudaram a distribuição de doses entre as radiações integrantes de determinados campos mistos.

Por isto é preciso enfatizar a importância do estabelecimento de um terceiro requisito na formulação das configurações de energia e dose: a proporção em que as doses de cada radiação ocorrem dentro de um campo misto.

Resultados de comparações interlaboratoriais, apesar de apontarem que os dosímetros pessoais possuem deficiências diante da ocorrência de campos mistos, não estabelecem as configurações de energias e proporções de doses de modo a garantir a eficácia dos testes. O que se observa é uma grande variação de quantidades de componentes, ampla faixa de energias e variadas proporções de doses nos campos mistos experimentais, para aplicação nas comparações interlaboratoriais.

Para determinação da proporção de doses das radiações a ser proposta nesta pesquisa foi utilizado parâmetro nuclear intensidade de emissão por desintegrações.

## 1.7 PROPOSTA DA PESQUISA

Os fatos relatados em 1.0 e 1.4 tornam fundamental o ensaio e calibração dos dosímetros ativos, o mais próximo da realidade das atividades da área nuclear onde são utilizados. Por isto é proposta nesta pesquisa a irradiação simultânea dos dosímetros, buscando o efeito da competição de partículas na interação com a matéria do detector do dosímetro e, como visto em 1.1, também com o corpo humano.

Neste sentido se faz necessária não só a configuração de energias e doses que simulem as condições de campo nas quais são utilizados diariamente os dosímetros pessoais. Também se torna importante definir a proporção em que devem ser ministradas as doses de radiações durante os testes. Para que estes testes efetivamente demonstrem as condições de uso dos dosímetros em termos de proteção radiológica dos trabalhadores.

Foram definidas as radiações de referência a serem utilizadas nos testes de influência de campos mistos. Estas radiações foram selecionadas de quatro atividades típicas da área nuclear:

- a) Radioterapia em hospitais e clínicas;
- b) Medicina nuclear em serviços de diagnósticos;
- c) END com radiações ionizantes em instalações radiativas; e
- d) Mineração e processamento de combustíveis em indústrias nucleares.

Durante este levantamento ficou evidente a necessidade de desenvolvimento e implantação no LNMRI-IRD/CNEN de duas novas qualidades de radiações para complementar a faixa existente, cuja lacuna entre 250 keV e 662 keV prejudica os

resultados obtidos na calibração de dosímetros ativos. Este foi o primeiro objetivo da pesquisa.

A partir do requisito de teste proposto no documento IEC 61526 (2005) foi alcançado o segundo objetivo desta pesquisa: comprovar a eficácia da irradiação simultânea dos dosímetros na determinação da influência de campos mistos de radiações.

Para isto foram avaliados 11 (onze) dosímetros ativos em duas configurações de energias e proporções de doses para verificar em que medida a presença de campos mistos afetam as respostas dos instrumentos. As configurações foram montadas com raios gama e raios X. Alguns dosímetros, de modelos populares na área nuclear, foram submetidos a estes testes com importantes resultados.

O terceiro objetivo da pesquisa foi efetuar a calibração dos dosímetros ativos aplicando os novos pontos de calibração obtidos com as qualidades de radiações aqui propostas.

Finalmente, com base na definição de grandezas de influência, mostradas em IEC 61526 (2005) e VIM (2007), confrontada com os resultados dos testes foi proposta a inclusão de campos mistos nesta classe de parâmetros que influenciam a resposta de um instrumento sem, contudo, serem o mensurando. Este foi o quarto objetivo da pesquisa.

A comparação de resultados entre os dosímetros ativos e dosímetros passivos, nos testes de influência de campos mistos, não foi objeto desta pesquisa.

Porém, devido à grande utilização deste tipo de dosímetro na monitoração individual existe interesse em estender os testes a estes tipos de instrumentos.

Da mesma forma, faz parte da continuação deste projeto a implementação das técnicas de simulação por Monte Carlo: por meio de simulação seria possível obter-se a configuração de energia-proporção de dose mais crítica a determinado dosímetro.

## 1.8 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa surgiu da deficiência de requisitos das normas de ensaio e calibração de dosímetros pessoais para utilização em condições de campos mistos de radiações.

Discute-se a inexistência de requisitos de energias e proporcionalidades de doses para ensaio e calibração dos instrumentos em condições reais, encontradas nas atividades monitoradas. Também é questionado o procedimento de irradiação dos dosímetros com componentes de campos mistos em separado quando, se sabe, a irradiação em condições de campo é simultânea.

Um objetivo preliminar desta pesquisa foi definir as radiações relevantes que compõem os campos mistos nas quatro atividades analisadas e associar as energias destas radiações às qualidades de radiações estabelecidas na norma internacional. Como resultado foram selecionadas 13 (treze) radiações relevantes que são encontradas nas quatro atividades da área nuclear avaliadas nesta pesquisa.

Como objetivos principais tivemos: desenvolver e implantar duas novas qualidades de radiações necessárias à complementação da faixa de energias para ensaio e calibração de dosímetros ativos; comprovar a eficácia da irradiação simultânea nos resultados dos ensaios de campos mistos; além de defender a condição de campos mistos de radiações como parâmetro de influência.

Os produtos advindos desta pesquisa foram:

- a) Especificação de configurações de energias e proporções de doses para os testes descritos na norma IEC 61526 (2005);
- b) Inclusão de duas qualidades de radiações na norma ISO 4037-3 (1999) para fins de calibração.

Nesta pesquisa os campos de radiações ionizantes foram denominados, simplesmente, “radiações”.

## Capítulo 2

### REVISÃO DA LITERATURA

#### 2.1 DEFINIÇÃO DE CAMPOS MISTOS DE RADIAÇÕES

Segundo DELGADO (2000), campos mistos são aqueles compostos por radiações de diferentes tipos de partículas ou energias, isto é, fótons e elétrons; fótons e nêutrons; ou mesmo nêutrons com diferentes energias adquirem certas características de campos mistos. Campos mistos são particularmente comuns, e, em certas situações as doses causadas por um dos componentes podem ser preponderantes, negligenciando-se assim as doses dos outros componentes.

Ainda segundo DELGADO (2000), quando não ocorre a condição descrita acima, a dosimetria de campos mistos de radiação para propósitos de radioproteção, isto é, para determinação da dose equivalente, apresenta alguma dificuldade, causada pela necessidade de identificar adequadamente a contribuição de cada componente. A ICRP em seu documento 60 (ICRP 60, 1990), propôs a grandeza dose absorvida,  $D$ , como a grandeza fundamental em proteção radiológica, introduzindo o fator de peso da radiação,  $W_r$ . Definindo a dose equivalente,  $H$ , como produto destes dois.

No documento acima é estabelecido:

“Quando o campo de radiação é composto de vários tipos de radiações de diferentes valores de  $W_r$ , a dose absorvida deve ser subdividida em blocos. Cada um com seu próprio valor de  $W_r$  e somadas para determinar a dose equivalente total”.

A Tabela 2.1 apresenta esta situação.

Então, o primeiro requisito para dosimetria de campos mistos, é de natureza conceitual, sendo necessária a determinação de cada dose absorvida causada por cada componente de diferente  $W_r$  do campo misto. Este requisito carece de um complexo sistema de monitoração, incluindo dosímetros específicos para cada componente de radiação. Ou, alternativamente, um único dosímetro, porém com capacidade de análise do campo misto e de seus componentes.

Tabela 2.1 – Valores de  $W_R$  de radiações ionizantes.

Radiação	$W_R$
Fótons	1
Elétrons	1
Neutrons:	
$E_n < 10 \text{ keV}$	5
$E_n \text{ 10 keV a 100 keV}$	10
$E_n > 100 \text{ keV a 2 MeV}$	20
$E_n > 2 \text{ MeV a 20 MeV}$	10
$E_n > 20 \text{ MeV}$	5
Protons $E_p > 2 \text{ MeV}$	5
partículas $\alpha$ e outras partículas pesadas	20

Campos mistos podem muito bem ser compostos por radiações de diferentes naturezas, mas com o mesmo  $W_R$ ; como campos beta-fóton, por exemplo.

Considerando a medição experimental das grandezas operacionais “equivalente de dose” nos campos mistos, alguns problemas aparecem e dificultam a medição da dose equivalente com um único detector. Devido às diferentes sensibilidades e, conseqüentemente, diferentes fatores de calibração para cada componente do campo, ou diferentes condições de medição, como radiações penetrantes e não penetrantes.

Dentre as situações e atividades onde campos mistos são observados, podemos citar: locais em plantas nucleares e relacionadas ao ciclo do combustível (indústria nuclear).

Campos mistos são encontrados em aceleradores de pesquisa e de medicina, e em vôos militares e civis, em grande altitude.

Em geral, existem soluções técnicas aceitáveis na monitoração de área para a maioria dos campos mistos encontrados. Em algumas aplicações, os métodos de

dosimetria pessoal estão em mais baixo estágio de desenvolvimento. Um exemplo é a monitoração pessoal com nêutrons, onde a situação é particularmente insatisfatória. Campos beta-gama e nêutron-gama são os mais frequentes e por isto os mais estudados.

Já ZIELCZYNSKI (2004), afirma que a dosimetria de campos mistos envolve todos os componentes das radiações. Um campo de radiação pode ser definido como distribuição de fluência versus energia e direção de todos os tipos de partículas. É muito difícil obter tal distribuição no caso de um campo complexo de radiações (campo misto). Mas é possível, em um caso genérico, citar a existência de diversos tipos de partículas atualmente conhecidas; além da grande faixa de energias.

O campo composto por fótons e nêutrons rápidos pode ser descrito por componentes de kerma. Qualquer radiação mista, absorvida num objeto irradiado, pode ser caracterizado pela função de distribuição de dose absorvida versus uma restrita ou irrestrita transferência linear de energia, LET.

O conhecimento preciso da distribuição é raramente necessário. Sendo o conhecimento de apenas dois dos componentes do campo, suficiente tanto para os propósitos da radioproteção quanto da radioterapia.

Estes componentes são as frações de dose de baixo LET,  $D_{low}$ , depositadas principalmente por elétrons (incluindo  $\delta$ -elétrons criados no caminho de partículas de alta energia) e frações de dose de alto LET,  $D_{high}$ , criados principalmente por íons. No caso de campos mistos simples, estas frações de doses são consideradas usualmente como componentes de gama e de nêutrons rápidos. Um novo método para determinação das componentes  $D_{low}$  e  $D_{high}$  usando uma câmara de recombinação foi apresentado no trabalho descrito acima.

## 2.2 INTRODUÇÃO AO CONCEITO DE GRANDEZA DE INFLUÊNCIA

A grandeza de influência é definida como sendo aquela que, apesar de não ser o mensurando, afeta o resultado da medição.

As grandezas de influência estão divididas em dois grupos:

- a) Grandeza de influência do tipo F são aquelas que alteram o valor da leitura, ao mudar a resposta do instrumento: energia das radiações; ângulo de incidência das radiações; e taxa de dose (em medições de dose); e
- b) Grandeza de influência do tipo S são aquelas que alteram o valor da leitura, ao introduzir um valor adicional, totalmente independente do valor original de leitura: interferência eletromagnética; microfonia etc.

### 2.3 CONSEQÜÊNCIAS DA CONDIÇÃO DE CAMPOS MISTOS NO DESEMPENHO DOS DOSÍMETROS ATIVOS

Conforme informado por SCHUHMACHER e FANTUZZI (2008), a dosimetria de campos mistos complexos de radiações nos ambientes de trabalho ainda precisa ser aperfeiçoada. Alguns dos exemplos seriam os campos posteriores às blindagens dos aceleradores de partículas, e àqueles campos existentes em aviões a altitudes de vôo, quando os eventos solares distorcem os campos de raios cósmicos naturais.

A grandeza operacional equivalente de dose individual,  $H_p(10)$ , foi recomendada no documento ICRP-60 (1990) para uso em monitoração individual com o objetivo de estimar a dose efetiva no indivíduo ocupacionalmente exposto às radiações.

A grandeza  $HP(10)$  foi definida a 10 mm de profundidade, num ponto imaginário, da esfera ICRU, cujo material é equivalente ao tecido humano.

Como a esfera ICRU é teórica e difícil concepção foi proposta em ICRP-60 (1990) que experimentalmente, as irradiações dos dosímetros fossem feitas em simuladores de tronco humano (fantoma).

Este dispositivo de acrílico, em forma de paralelepípedo de  $0,3 \times 0,3 \times 0,15 \text{ m}^3$ , possui água em seu interior, de forma a simular a condição que um trabalhador, portando um dosímetro colocado em seu peito é exposto a um campo de radiação.

Logo, durante os teste e calibrações executados com os dosímetros obrigatoriamente este estará afixado a um fantoma.

Durante as irradiações dos dosímetros acontecem os fenômenos de retro-espalhamento, atenuação e interações das radiações com a matéria: efeito foto-elétrico, Compton e formação de pares.

Uma outra característica desta grandeza é sua dependência energética e angular. Este fato torna ainda mais crítico o desempenho dos dosímetros ativos em condições de campos mistos de radiações, pois, a interação de duas radiações com o fantoma gera uma série de outras de amplo espectro de energias e farta distribuição direcional.

A Tabela 2.2 mostra em detalhes os fatores de conversão da grandeza  $H_p(10)$  a partir da grandeza kerma no ar. Na referida tabela pode ser observada a grande variação dos coeficientes de conversão de  $h_p(10)$  para kerma no ar, com a variação de ângulo de incidência e também com a mudança de energia da radiação. Esta variação dos fatores de conversão, se traduz em uma forte dependência energética e direcional da grandeza  $H_p(10)$ .

Conforme pode ser observado na Tabela 2.2, o fator de conversão é fortemente dependente da energia e direção de incidência da radiação. Esta dependência é realçada em feixes de raios X.

Tabela 2.2 - Fatores de conversão da grandeza  $H_p(10)$  a partir da grandeza kerma no ar (ISO 4037-3, 1999).

$h_{p,k} (10;N-40,\alpha) [Sv Gy^{-1}]$ :									
0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°
1,17	1,16	1,15	1,12	1,06	1,02	0,98	0,85	0,65	0,32

$h_{p,k} (10;N-60,\alpha) [Sv Gy^{-1}]$ :									
0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°
1,65	1,64	1,62	1,59	1,52	1,47	1,42	1,27	1,04	0,6

$h_{p,k} (10;S-Cs,\alpha) [Sv Gy^{-1}]$ :									
0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°
1,21	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,19	1,14	0,92

$h_{p,k} (10;S-Co,\alpha) [Sv Gy^{-1}]$ :									
0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°
1,15	1,15	1,15	1,15	1,16	1,16	1,16	1,14	1,12	0,96

## 2.4 RESULTADOS DE COMPARAÇÕES E ANÁLISE DE DESEMPENHO

Já em 1994 AMBROSI *et al* (1994) relatavam problemas com campos mistos, encontrados na primeira intercomparação, realizada pela IAEA em 1987, em termos da grandeza  $H_p(10)$ . O campo X-gama, a que foram submetidos 25 dosímetros de 18 diferentes países, foi constituído das qualidades de radiações H-60 (37 keV) e S-Cs (662 keV).

KIM *et al* (1999) também relatou problemas durante intercomparação de dosímetros pessoais realizada pela IAEA na Ásia. O pior resultado foi obtido com campo misto X-X com energia de 45 keV e 134 keV.

ZORKO *et al* (2006) obteve o valor de  $\pm 30\%$  para medições das doses em condições de campos mistos. Para feixe monoenergético a incerteza cai para  $\pm 10\%$ . Os testes foram realizados no intervalo de 40 keV a 1,2 MeV.

LOPEZ PONTE (2004) apresenta resultados de testes de dosímetros expostos a feixes monoenergéticos e de espectro estreito. Concluiu que os sistemas podem operar adequadamente nos feixes descritos acima. Entretanto falham na presença de campos mistos de radiação. A situação ideal seria de dosímetro multi-detector com boas características de respostas levantadas por ensaios, para específicas situações.

Em situação de campo misto, a qualidade R-F com 6,61 MeV é misturada a 80% de energia de 300 keV, com rotação de +80 e -80 °. Conclui ainda que dosímetros à base de filme tendem a mostrar piores resultados que TLD, em campos mistos. Provavelmente porque estes detectores possuem densidade próxima ao do tecido equivalente.

## 2.5 MÉTODOS DE MELHORIA DO DESEMPENHO

ZIELCZYNSKI (2004) formulou método para determinar dois componentes de radiação, suficiente para determinar as mais importantes grandezas para dosimetria de uso em radioproteção, radioterapia e radiobiologia, mesmo em campos complexos de radiação.

DIJK (2006) relata que várias ferramentas estão disponíveis aos serviços de monitoração para acessar e monitorar o desempenho dos sistemas de monitoração externa. O trabalho discute várias formas de estimar os parâmetros de desempenho dos sistemas nas condições reais de uso (campo misto). Obtendo incertezas de cerca 15%, tanto em observação de campo experimental como em simulações por método de Monte Carlo.

## 2.6 CAMPOS MISTOS COMO GRANDEZA DE INFLUÊNCIA

Nesta pesquisa se propõe a inclusão da condição de campos mistos de radiações como exemplo de grandeza de influência do tipo F ou S.

Esta situação está caracterizada pelos estudos realizados por ZIELCZYNSKI (2004) entre outros. Este sugeriu a decomposição dos campos mistos de duas componentes: as frações de dose de baixo LET,  $D_{low}$ , depositados principalmente por elétrons (incluindo d-electrons de alta energia) e frações de dose de baixo e alto LET,  $D_{high}$ , criados principalmente por íons.

## 2.7 NORMAS INTERNACIONAIS E SEUS REQUISITOS SOBRE CAMPOS MISTOS

Enquanto a norma ISO 4037 estipula requisitos sobre radiações de referência de raios X e gama para calibração de dosímetros e monitores na determinação das respostas destes instrumentos em razão da variação de energia dos fótons.

Na parte 1 desta norma estão especificadas as características e métodos de produção das radiações de referência para calibração para uso em radioproteção, de dosímetros e monitores de área, na faixa de kerma no ar de 10 mGy h<sup>-1</sup> a 10 Gy h<sup>-1</sup>; e na determinação das respostas destes instrumentos como função da energia de fótons.

Já na parte 2, esta norma descreve os métodos de dosimetria, das radiações de referência X e gama, para radioproteção, na faixa de energias de 8 keV até 1,3 MeV; e de 4 MeV até 9MeV.

A regulamentação de avaliação de desempenho destes tipos de instrumentos ficou a cargo da Norma IEC 61526 de 2005. Este documento faz referência a feixes de radiações de referência, mais precisamente qualidades de radiações; as quais estão estabelecidas na norma ISO 4037-3 de 1999.

Finalmente, na parte 4 da norma ISO 4037 estão descritos os métodos de ensaio e calibração de dosímetros pessoais.

Resumidamente, norma ISO 4037 é dividida em quatro partes, a saber:

- a) Características das radiações e métodos de produção, Parte 1;
- b) Dosimetria para radioproteção na faixa de 8 keV a 1,3 MeV e 4 MeV a 9 MeV, Parte 2;
- c) Calibração de monitores de área e dosímetros pessoais; e determinação de suas respostas com relação à energia e ângulo de incidência, Parte 3;

- d) Calibração de monitores de área e dosímetros pessoais em campos de raios X de baixa energia, Parte 4.

### 2.7.1 Requisitos de geração

Na norma ISO 4037-1 (1996) foi estipulada a faixa de taxas de kerma no ar variando de  $10 \mu\text{Gy h}^{-1}$  a  $10 \text{Gy h}^{-1}$ .

O referido documento ainda especifica métodos para determinação de resposta destes instrumentos, diante da variação da energia de fótons.

Os métodos para geração de quatro grupos de radiações de referência, para uma faixa particular de energias de fótons, são descritas em quatro seções. Nas quais também são definidas as características destas radiações. Os quatro grupos de radiações, doravante chamados de QUALIDADES DE RADIAÇÕES, estão listados abaixo:

- a) Na faixa de energia de 7 keV a 250 keV, com radiação X filtrada e contínua; e radiação gama de  $^{241}\text{Am}$ ;
- b) Na faixa de energia que vai de 8 keV a 100 keV, com fluorescência de raios X;
- c) Na faixa de 600 a 1.300 keV, com radiações gama de radionuclídeos; e
- d) Na faixa de 4 a 9 MeV, com radiação gama produzida em aceleradores e reatores.

Uma ilustração gráfica destas qualidades pode ser vista na Figura 2.1.

O espectro mais estreito, ou seja, aquele com menor resolução, deve ser utilizado para medições das variações de resposta do instrumento com a variação da energia de fótons. Providenciando para que as taxas de kerma no ar das séries sejam consistentes com a faixa do instrumento sob teste. As séries de alta taxa de kerma no ar são adequadas para determinação características de sobre resposta de alguns instrumentos (ISO 4037-1, 1996).

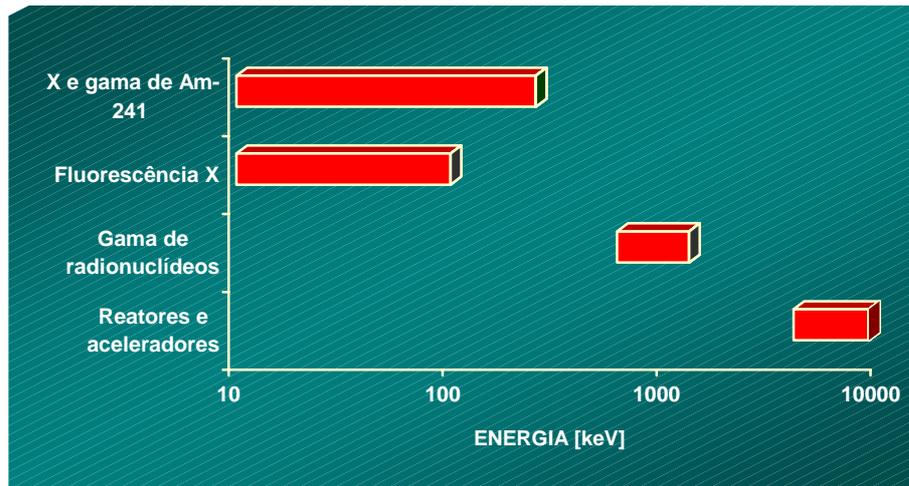


Figura 2.1 – Demonstração gráfica das qualidades de radiações (ISO 4037-1, 1996).

Para a série de menor taxa de kerma no ar, de espectro estreito e de espectro largo, um “laboratório de referência” deve verificar, por espectrometria, que o valor de energia média produzida está dentro de  $\pm 3\%$  e a resolução dentro de  $\pm 10\%$ , com relação aos valores estipulados em ISO 4037-1 (1996).

A ISO 4037-1 (1996) especifica as qualidades de radiação X filtrada, que estão reproduzidas na Tabela 2.3.

As qualidades de radiações a serem estabelecidas deverão atender aos requisitos de caracterização especificados em ISO 4037-1 (1996), quais sejam:

- a) Energia média,  $\bar{E}$ , em keV;
- b) Resolução,  $R_E$ , expressa em percentual;
- c) Camada semi-redutora (kerma no ar), em mm de alumínio ou cobre; e
- d) Coeficiente de homogeneidade,  $h$ .

Na prática, a qualidade de radiação obtida depende fundamentalmente de:

- alta tensão aplicada às extremidades do tubo de raios X,
- espessura e natureza da filtração total, e
- propriedades do alvo.

Tabela 2.3 – Especificações de radiações X filtradas (ISO 4037-1, 1996).

<b>NOME DA SÉRIE</b>	<b>RESOLUÇÃO, <math>R_E</math> [%]</b>	<b>COEFICIENTE DE HOMOGENEIDADE, <math>h</math> (valores aproximados)</b>	<b>VALORES TÍPICOS DE TAXA DE KERMA NO AR<sup>(1) (2)</sup> [Gy h<sup>-1</sup>]</b>
Baixa taxa de kerma no ar	18 a 22	1,0	$3 \times 10^{-4}$ <sup>(3)</sup>
Espectro estreito	27 a 31	0,75 a 1,0	$10^{-3}$ a $10^{-2}$ <sup>(3)</sup>
Espectro largo	48 a 57	0,67 a 0,98	$10^{-2}$ a $10^{-1}$ <sup>(3)</sup>
Alta taxa de kerma no ar	não especificada	0,64 a 0,86	$10^{-2}$ a 0,5

(1) à distância de 1m do tubo de raios X, com o tubo operando a 1mA.

(2) Sob condições de equilíbrio de partículas carregadas, o valor de kerma no ar é, aproximadamente, igual ao de dose absorvida no ar.

(3) Para energias médias menores que 30 keV, outros valores podem ser utilizados.

As principais características de um equipamento de raios X estão condensadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Características do equipamento de RX (ISO 4037-1, 1996).

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>VALOR</b>
Ripple de alta tensão	< 10 %
Material do alvo	tungstênio
Ângulo do alvo	$\geq 20^\circ$
Estabilidade de alta tensão	$\pm 1 \%$

Figura 2.2 mostra a resolução de espectro das qualidades de radiação de baixo kerma, espectro estreito e espectro largo.

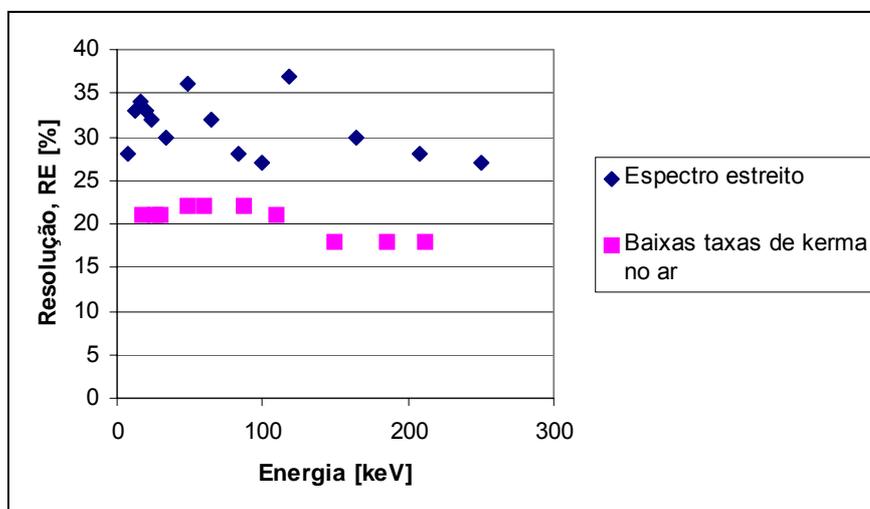


Figura 2.2 – Resolução de espectro das qualidades de radiação (ISO 4037-1, 1996).

### 2.7.2 Requisitos de qualidades de radiações

Os espectros mostrados em ISO 4037-1 (1996) são, em grande parte, calculados (ILES, 1987). Alguns exemplos de espectros, obtidos na prática, são fornecidos em PEAPLE *et al* (1989), SEELENTAG *et al* (1979), LAITANO *et al* (1990), READ e HAGREEN (1987) e BUEERMANN *et al* (2001).

### 2.7.3 Requisitos de dosimetria

Os procedimentos de dosimetria das fontes de radiações, a serem utilizadas nos testes de calibração de dosímetros pessoais, devem se baseados na norma ISO 4037-2 (1997), na faixa de energias que vão de 8 keV a 1,3 MeV e outra faixa de 4 MeV a 9 MeV.

### 2.7.4 Requisitos de ensaio (dependência energética) e calibração

A norma ISO 4037-3 (1999) descreve os procedimentos de calibração e ensaio (dependência energética) de dosímetros pessoais e monitores de área em termos das

grandezas operacionais, definidas na publicação ICRU-51 (1993) e recomendadas na ICRP-60 (1990).

A determinação das respostas de instrumentos de radioproteção é basicamente um processo dividido em três partes: primeiramente, uma grandeza básica como kerma no ar, é medida livre no ar, no ponto de teste. Então, a grandeza operacional apropriada é derivada pela aplicação do coeficiente de conversão que correlaciona a grandeza medida com a grandeza operacional escolhida. Finalmente, o instrumento a ser testado (dosímetro pessoal ou monitor de área) é colocado no ponto de teste, para determinação de sua resposta. Dependendo da grandeza medida pelo dosímetro pessoal sob teste, o instrumento é exposto às radiações preso a um fantoma (simulador de tronco) ou livre no ar. Para monitoração individual e de área, esta parte da 4037 descreve os métodos e coeficientes de conversão a serem utilizados na determinação da resposta de dosímetros pessoais e monitores de área, em termos das grandezas definidas pela ICRU-51 (1993) para fótons, segundo o documento ISO 4037-3 (1999).

### **2.7.5 Requisitos de ensaio e calibração de dosímetros pessoais ativos**

O documento IEC 61526 (2005), emitido pela International Electrotechnical Commission (IEC), é uma norma internacional aplicada a dosímetros ativos para medição da dose equivalente pessoal  $H_p(10)$  e  $H_p(0,07)$ , para as radiações X, gama, de nêutrons e beta.

Para as grandezas  $H_p(10)$  e  $H_p(10)$  (taxa), em feixes de raios X e gama, a faixa de energias de interesse vai de 20 keV até 1,5 MeV.

### **2.7.6 Requisitos de dose**

PRADHAN (2002) informa que raios X e gama constituem-se nas maiores contribuições de dose para o homem. Como fótons de várias energias são encontrados em diversas atividades, o estudo da resposta do dosímetro à variação de

energia constitui-se em importante aspecto da garantia da exatidão do valor de dose. Neste trabalho a resposta do dosímetro foi estabelecida de forma experimental para TLD.

No trabalho cima, foi observado que a contribuição devido à grandeza  $H_p(0,07)$  pode ser medida de forma mais exata que a grandeza  $H_p(10)$ . Em dosímetros exibindo alta dependência de energia, determinação da componente beta de  $H_p(0,07)$  passa a ser muito difícil em campos beta-fótons de energia menor que 100 keV.

BAKSHI *et al* (2006) desenvolveram algoritmo com o propósito de melhorar a exatidão na determinação da dose, especialmente em campos de raios X e gama. O algoritmo resultante, baseado nas taxas da resposta para fótons somente, foi testado para diferentes proporções das duas radiações em caso de campos mistos. Também foi testado em campos mistos de fótons e fótons com várias direções de incidência.

## 2.8 COMPOSIÇÃO DAS QUALIDADES DE RADIAÇÕES

A composição dos campos mistos de radiações, utilizados nas atividades de ensaio e calibração, deve atender aos requisitos definidos em 2.7.1, 2.7.2 e 2.7.3. Para isto, têm de ser utilizadas as qualidades de radiações especificadas na norma ISO 4037-3 (1999). Nesta norma foram definidas as qualidades de radiações de espectro estreito; espectro largo; espectro de alto kerma e espectro de baixo kerma que devem ser utilizados em ensaios e calibrações de instrumentos de radioproteção.

A composição experimental, dos campos mistos propostos nesta pesquisa, corresponderam a uma determinada atividade, devidamente avaliada neste projeto. Maiores detalhes no capítulo 3.

## 2.9 FAIXA DE DOSES PARA TESTES DOS DOSÍMETROS

A razão para utilização de grandezas operacionais é o fato de que a grandeza dose efetiva, como definida na publicação ICRP-60 (1990) não poder ser medida

diretamente. As grandezas operacionais possibilitam uma aproximação real, de forma conservativa, para a dose efetiva na maioria das radiações de fótons.

GARGIONI *et al* (2000) formularam as bases para medição das grandezas operacionais equivalente de dose individual,  $H_p(10)$ , e equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$ , em campos mistos de fótons, de alta energia, e elétrons; fora da condição de equilíbrio eletrônico. O objetivo deste trabalho foi o estudo da resposta de dosímetros de proteção radiológica, com respeito às grandezas operacionais, em função da variação da distribuição de fluência de elétrons relativo aos fótons de incidência. A faixa de energia do teste foi de 110 keV a 7 MeV.

O estudo acima apresentou os métodos para determinação de  $H_p(10)$  em campos mistos de fótons e elétrons de alta energia foram apresentados para o caso geral de não existência de equilíbrio de elétrons secundários na profundidade de referência de 10 mm.

## 2.10 PROPORÇÃO DE DOSES A QUE DEVEM SER SUBMETIDOS OS DOSÍMETROS

A princípio pensou-se fazer a composição das doses dos campos mistos de radiações, utilizados nos ensaios e calibrações a serem executados neste projeto, com os valores existentes nas atividades relacionadas. Haveria também que se relacionar as diversas ocorrências de exposição ocupacional, normalmente encontradas nas atividades. Isto se mostrou inviável.

Para determinação da proporção de doses das radiações a ser proposta nesta pesquisa foi utilizado um parâmetro nuclear: intensidade de emissão por desintegrações. Para isto foram utilizados os bancos de dados de duas instituições internacionais de renome: Laboratoire National Henri Becquerel (LNHB) e National Nuclear Data Center (NNDC).

## Capítulo 3

### METODOLOGIA DA PESQUISA

Neste capítulo serão descritos os procedimentos para identificação das fontes de radiações utilizadas nas quatro atividades analisadas. Seguida de uma análise das diversas partículas observadas e seleção das radiações consideradas relevantes, dentro do escopo desta pesquisa.

Apresentaremos propostas de novas qualidades de radiações visando complementar àquelas existentes na norma ISO 4037-3 (1999), sendo destacada a forma de escolha das qualidades de radiações a que serão submetidos os dosímetros pessoais ativos, de modo a simular, durante ensaio e calibração, as condições reais das atividades monitoradas.

Ao final terão sido descritos os requisitos de energia e dose propostos para simular as condições de campos mistos de radiações, existentes nas atividades em que os indivíduos ocupacionalmente expostos são monitorados, com uso de dosímetros pessoais.

#### 3.1 LEVANTAMENTO DAS ATIVIDADES EM QUE EXISTEM CONDIÇÕES DE CAMPOS MISTOS

Existem diversas atividades, no campo da energia nuclear, onde se faz uso de feixes de radiações ionizantes.

Nas atividades avaliadas neste projeto, que foram mostradas em 1.7; tem-se a ocorrência de amplo espectro de radiações, o que significa a existência de campos de radiações com ampla faixa de energias, multi-direcionais e com larga escala de doses. Esta situação caracteriza a condição de “campos mistos de radiações” como visto anteriormente.

As fontes de radiações (radionuclídeos em sua ampla maioria), utilizadas nas diversas atividades mencionadas acima, estão listadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Fontes de radiações encontradas nas atividades analisadas.

ATIVIDADE	RADIAÇÕES ENCONTRADAS														
Radioterapia	Sr-90	Cs-137	Ir-192	Co-60	RX										
Medicina nuclear	Tc-99m	I-131	Ga-67	Tl-201	Sm-153	F-18	I-123	I-125							
Industria convencional	Ir-192	Cs-137	Co-60	Am-241	Tm-170	Kr-85	Am/Be	RX							
Industria nuclear	Kr-85m	Kr-85	Kr-87	Kr-88	I-131	I-132	I-133	Xe-133m	Xe-133	I-134	I-135	Xe-135m	Xe-135	Série do urânio	Série do thorio

### 3.2 DETERMINAÇÃO DAS RADIAÇÕES QUE COMPÕEM ESTES CAMPOS MISTOS

Para determinação das radiações encontradas nas atividades listadas anteriormente, foram utilizadas bibliotecas existentes em sítios da internet; provenientes de instituições de reconhecida competência a nível internacional.

Sendo assim, na determinação das radiações ionizantes foram utilizados os bancos de dados do Laboratoire National Henri Becquerel – LNHB e do National Nuclear Data Center – NNDC.

Os campos de radiações são constituídos por partículas, com suas respectivas energias e intensidades de emissões.

A propósito, a medida da intensidade de emissão de partículas, neste caso de fótons, foi utilizada nesta pesquisa, para determinar a proporção dos valores de doses a que devem ser submetidos os dosímetros sob testes.

Nesta pesquisa estes campos de radiações foram denominados, simplesmente, “radiações”.

As radiações encontradas nas atividades selecionadas, associadas às radiações listadas na Tabela 3.1, foram identificadas como provenientes de partículas alfa, beta, nêutrons e fótons, sendo que os fótons identificados foram provenientes tanto de raios gama como de raios X.

Como consequência, para os critérios de seleção das radiações de interesse desta pesquisa foram estipulados os seguintes limites: energias com valor a partir de

30 keV e intensidade de emissão (para cada 100 emissões) a partir de 10%. Como resultado temos as Tabelas de 3.2 a 3.5.

As fontes de radiações, com suas respectivas energias e intensidades de emissões, utilizadas em atividades de radioterapia, dentro do escopo desta pesquisa, estão listadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Fontes de radiações utilizadas nas atividades de radioterapia.

FONTE DE RADIAÇÕES	EMISSOR	ENERGIA DE INTERESSE
		[keV] PARTÍCULA= ENERGIA (INTENSIDADE POR 100 DESINTEGRAÇÕES)
Sr-90	Beta	Beta= 196 (100)
Cs-137	Beta e gama	Beta= 174 (94) / gama= 662 (85)
Ir-192	Beta e gama	Beta= 162 (41); 210 (48) / gama= 296 (29); 308 (30); 317 (83); 468 (48)
Co-60	Beta e gama	Beta= 96 (100) / gama= 1173 (100); 1333 (100)
RX	X	4.000 a 18.000

As energias e intensidades das fontes de radiações utilizadas em atividades de medicina nuclear, dentro do escopo deste trabalho, estão listadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Fontes de radiações utilizadas nas atividades de medicina nuclear.

FONTE DE RADIAÇÕES	EMISSOR	ENERGIA DE INTERESSE
		[keV] PARTÍCULA= ENERGIA (INTENSIDADE POR 100 DESINTEGRAÇÕES)
Tc-99m	Eletron e gama	Eletron= 120 (9) / gama= 141 (89)
I-131	Beta e gama	Beta= 192 (89) / gama= 365 (81); 637 (9)
Ga-67	Eletron e gama	Eletron= 84 (28) / gama= 93 (38); 185 (21); 300 (17)
Tl-201	Eletron , X e gama	Eletron= 84 (16) / X= 69 (27); 71 (46); 80 (16) / gama= 168 (10)
Sm-153	Eletron, beta, X e gama	Eletron= 55 (42) / beta= 200 (30); 225 (49); 264 (20) / X= 42 (30); 47 (9) / gama= 103 (29)
F-18	Beta e gama	Beta= 249 (97) / gama= 511 (194)
I-123	Eletron, X e gama	Eletron= 127 (14) / X= 31 (13) / gama= 159 (83)
I-125	Eletron e X	Eletron= 31 (11) / X= 31 (21)

As energias e intensidades das fontes de radiações utilizadas em atividades de END em industria convencional, dentro do escopo deste trabalho, estão listadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Fontes de radiações utilizadas nas atividades de END em industria convencional.

FONTE DE RADIAÇÕES	EMISSOR	ENERGIA DE INTERESSE
		[keV] PARTÍCULA= ENERGIA (INTENSIDADE POR 100 DESINTEGRAÇÕES)
Ir-192	Beta e fóton	Beta= 162 (41); 210 (48) / gama= 296 (29); 308 (30); 317 (83); 468 (48)
Cs-137	Beta e fóton	Beta= 174 (94) / gama= 662 (85)
Co-60	Beta e fóton	Beta= 96 (100) / gama= 1173 (100); 1333 (100)
Am-241	Alfa, eletron e gama	Alfa= 5443 (13); 5486 (84) / eletron= 37 (31) / gama=60 (36)
Tm-170	Beta	Beta= 291 (18); 323 (82)
Kr-85	Beta	Beta= 251 (100)
Am/Be	Gama e neutron	Neutron / gama=60
RX	X	50 - 80
RX	X	80 - 120
RX	X	120 - 150
RX	X	150 - 250
RX	X	250 - 400

Finalmente, as energias e intensidades das fontes de radiações utilizadas em atividades de industria nuclear (reatores e ciclo de combustíveis), também dentro do escopo deste trabalho, estão listadas na Tabela 3.5.

A Tabela 3.5 está dividida em três principais segmentos: gases nobres e radioisótopos de importância radiológica; série do urânio e série do tório.

Tabela 3.5– Fontes de radiações utilizadas nas atividades de industria nuclear.

FONTE DE RADIAÇÕES	EMISSOR	ENERGIA DE INTERESSE
		[keV] PARTÍCULA= ENERGIA (INTENSIDADE POR 100 DESINTEGRAÇÕES)
Kr-85m	Beta e gama	Beta= 291 (78) / Gama= 151 (75); 305 (14)
Kr-85	Beta	Beta= 251 (100)
Kr-87	Beta e gama	Beta= 1501 (41); 1694 (31) / gama= 403 (50)
Kr-88	Beta e gama	Beta= 167 (67); 228 (9); 1235 (14) / gama= 196 (26); 835 (13); 1530 (11); 2196 (13); 2392 (35)
I-131	Beta e gama	Beta= 192 (89) / gama= 365 (81); 637 (9)
I-132	Beta e gama	Beta= 243 (13); 422 (19); 608 (12); 842 (19) / gama= 523 (16); 630 (13); 668 (99); 773 (76); 955 (18)
I-133	Beta e gama	Beta= 441 (83) / gama=530 (87)
Xe-133m	Eletron, X e gama	Eletron= 199 (64); 228 (21) / X= 30 (46); 34 (11) / gama= 233 (10)
Xe-133	Beta, eletron, X e gama	Beta=101 (99) / eletron= 45 (55) / X= 31 (39) / gama= 81 (38)
I-134	Beta e gama	Beta= 474 (30); 594 (16); 699 (11); 980 (13) / gama= 595 (11); 622 (11); 847 (95); 884 (65); 1072 (15); 1136 (9)
I-135	Beta e gama	Beta= 352 (22); 529 (24) / gama= 1132 (23); 1260 (29); 1678 (10)
Xe-135m	Eletron e gama	Eletron= 492 (15) / gama= 527 (80)
Xe-135	Beta e gama	Beta= 305 (96) / gama= 250 (90)
U-238	Alfa e eletron	Alfa= 4151 (22); 4198 (78) / eletron= 31 (16)
Th-234	Beta e eletron	Beta= 27 (19); 53 (70) / eletron= 71 (12)
Pa-234	Beta, eletron e gama	Beta= 137 (45); 194 (19) / eletron= 38 (18); 78 (32); 112 (11) / X= 95 (12); 98 (20) / gama= 131 (18); 883 (10); 946 (13)
U-234	Alfa e eletron	Alfa= 4722 (28);4774 (75) / eletron= 35 (21)
Th-230	Alfa e eletron	Alfa= 4621 (23); 4687 (76) / eletron= 48 (17)
Ra-226	Alfa	Alfa= 4784 (95)
Rn-222	Alfa	Alfa= 5490 (100)
Po-218	Alfa	Alfa= 6002 (100)
Pb-214	Beta, eletron e gama	Beta= 207 (49); 227 (42) / Eletron= 37 (12); 261 (10) / X= 77 (11) gama= 295 (19); 352 (38)
Bi-214	Beta e gama	Beta= 526 (17); 540 (18); 1270 (18) / gama= 609 (46); 1120 (15); 1765 (15)
Tl-210	Beta, eletron e gama	Beta= 677 (24); 880 (17); 1766 (12) / eletron= 70 (21); 80 (20) / gama = 296 (79); 800 (99); 1070 (12); 1210 (17); 1316 (21); 2430 (9)
Po-214	Alfa	Alfa= 7687 (100)
Pb-210	Eletron	Eletron= 30 (60); 43 (14)
Bi-210	Beta, alfa e gama	Beta= 389 (100) / Alfa= 4909 (36); 4946 (55) / gama= 266 (50); 305 (28)
Hg-206	Beta, eletron e gama	Beta= 332 (42); 451 (54) / eletron= 219 (10) / gama= 305 (31)
Po-214	Alfa	Alfa= 7687 (100)
Tl-206	Beta, eletron e gama	Beta= 538 (100) / eletron= 131 (11); 201 (10) / X= 71 (10); 73 (17) / gama= 216 (74); 266 (86); 453 (93); 457 (22); 687 (90); 1022 (69)
Pb-206	Gama	Gama= 344 (29); 516 (92); 537 (30); 803 (99); 881 (67) - FINAL
Th-232	Alfa e eletron	Alfa= 3947 (22); 4012 (78) / eletron= 45 (16)
Ra-228	Irrelevante	Betas , eletrons e RX abaixo do limite de interesse.
Ac-228	Beta, eletron e gama	Beta= 382 (30); 607 (12) / eletron= 37 (54); 53 (15) / gama= 338 (11); 911 (26); 969 (16)
Th-228	Alfa e eletron	Alfa= 5340 (27); 5423 (72) / eletron= 65 (19)
Ra-224	Alfa	Alfa= 5685 (95)
Rn-220	Alfa	Alfa= 6288 (100)
Po-216	Alfa	Alfa= 6778 (100)
Pb-212	Beta, eletron e gama	Beta= 94 (83); 172 (12) / eletron= 148 (32) / X= 75 (10); 77 (17) / gama= 239 (44)
Bi-212	Alfa e beta	Alfa= 6051 (25); 6090 (10) /// beta= 835 (55)
Tl-208	Beta e gama	Beta= 440 (25); 533 (22); 647 (49) / gama= 511 (23); 583 (85); 861 (12); 2615 (99)
Po-212	Alfa	Alfa= 8785 (100)

### 3.3 RELAÇÃO DE TODAS AS RADIAÇÕES UTILIZADAS NAS ATIVIDADES AVALIADAS NESTA PESQUISA.

Como relatado anteriormente, o objetivo desta pesquisa foi estabelecer requisitos de energia e dose para ensaio e calibração de dosímetros pessoais ativos em condições de campos mistos de fótons. Por conta disto, foram selecionadas apenas as energias consideradas relevantes à presente pesquisa, qual seja: radiações de fótons, com energias a partir de 30 keV e intensidades de emissão a partir de 10%, provenientes de raios X e gama.

Entretanto, o registro neste trabalho, das radiações provenientes de diversas outras partículas, servirá para ampliação do escopo da presente pesquisa, no futuro. Todas as fontes de radiações foram compiladas em ordem alfabética e ordem crescente de valores de energias médias, com suas respectivas intensidades de emissão registradas.

As tabelas com as relações de todas as radiações selecionadas, dentro do escopo desta pesquisa, nas quatro atividades avaliadas podem ser vistas no Apêndice C.

### 3.4 SELEÇÃO DAS RADIAÇÕES (ENERGIAS E INTENSIDADES EMISSÃO) RELEVANTES

A partir daqui o escopo desta pesquisa ficou restrito aos fótons emitidos pelas fontes de radiações e suas respectivas radiações (energia média e intensidade de emissão).

Com base nas Tabelas de 3.2 a 3.5, foi feita a seleção de grupo de radiações relevantes para a pesquisa proposta neste projeto.

Desta forma, foi obtido um conjunto representativo das condições de campos mistos de radiações presentes nas quatro atividades avaliadas.

A seguir estão as fontes de radiações utilizadas nas quatro atividades avaliadas neste projeto, quais sejam:

- a) Radioterapia:  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{60}\text{Co}$  e raios X;
- b) Medicina nuclear:  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{153}\text{Sm}$ ,  $^{18}\text{F}$ ,  $^{123}\text{I}$  e  $^{125}\text{I}$ ;
- c) Ensaio não destrutivo (END):  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{170}\text{Tm}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ , Am/Be e raios X; e
- d) Mineração e processamento de combustíveis:  $^{85\text{m}}\text{Kr}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{87}\text{Kr}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{133\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{134}\text{I}$ ,  $^{135}\text{I}$ ,  $^{135\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ , série do urânio e série do tório.

Começamos com as radiações presentes nas atividades de radioterapia, onde o uso de  $^{90}\text{Sr}$  e  $^{137}\text{Cs}$  foi praticamente descontinuado. Enquanto que os feixes de raios X têm sido utilizados apenas para controle de qualidade do desempenho das câmaras de ionização.

Em atividades de radioterapia, as unidades de tele-terapia, com fontes de  $^{60}\text{Co}$ , não tem tido aumento significativo em seu uso, sendo inclusive substituídas por aceleradores.

Quanto aos dispositivos de  $^{192}\text{Ir}$  para tratamento de braquiterapia, cuja utilização tem aumentando pouco, também tem sido substituída por aceleradores.

Então, a utilização de raios X de alta energia (aceleradores) tem tido incremento bastante significativo, como substituto das unidades de tele-terapia ( $^{60}\text{Cs}$ ) e de braquiterapia ( $^{192}\text{Ir}$ ). Por outro lado, as unidades de  $^{137}\text{Cs}$ , tem sido substituídas por dispositivos de braquiterapia ( $^{192}\text{Ir}$ ) ou aceleradores (raios X). No caso dos aplicadores oftalmológicos de  $^{90}\text{Sr}$  estes tiveram seu uso praticamente descontinuado.

Assim, selecionamos os radionuclídeos  $^{192}\text{Ir}$  e  $^{60}\text{Co}$ , cujas energias mais importantes, dentro do escopo desta pesquisa, são 296 keV, 308 keV, 317 keV e 468

keV provenientes do  $^{192}\text{Ir}$ ; além das energias de 1.173 keV e 1.333 keV provenientes do  $^{60}\text{Co}$ .

Na atividade de medicina nuclear, estão presentes os radionuclídeos  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{153}\text{Sm}$ ,  $^{18}\text{F}$ ,  $^{123}\text{I}$  e  $^{125}\text{I}$ .

Em medicina nuclear, temos a seguinte situação: O  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  está presente em cerca de 90% das atividades referentes a este método de diagnóstico. Enquanto que a solução de  $^{131}\text{I}$ , responde por cerca de 20% dos procedimentos terapêuticos. Com relação às fontes de  $^{18}\text{F}$ , este radionuclídeo participa com cerca de 15% das atividades deste tipo de diagnóstico.

Aqui foram selecionadas as energias de 141 keV do  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ; as energias de 365 keV e 637 keV do  $^{131}\text{I}$ ; além de 511 keV do  $^{18}\text{F}$ .

. Tomando como referência as energias dos radionuclídeos relacionados acima, estaremos cobrindo também os radionuclídeos ainda em uso em medicina nuclear, quais sejam:  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{153}\text{Sm}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{125}\text{I}$  e  $^{177}\text{Lu}$ .

Nas atividades relacionadas as END em indústria convencional, temos a seguinte situação: em END é comum a utilização de fontes radioativas de  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{170}\text{Tm}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ , Am/Be; além de equipamentos de raios X.

As fontes de  $^{192}\text{Ir}$  e  $^{137}\text{Cs}$  possuem maior participação neste tipo de atividade. Sendo que as de  $^{192}\text{Ir}$  são bastante utilizadas em gamagrafia industrial, enquanto que as de  $^{137}\text{Cs}$  costumam integrar muitos dispositivos de controle de processos.

Desta feita foram selecionadas as energias de 296 keV, 308 keV, 317 keV e 468 keV do  $^{192}\text{Ir}$ ; além de 662 keV do  $^{137}\text{Cs}$ .

Finalmente, foram analisados os radionuclídeos presentes nas atividades da indústria nuclear:  $^{85\text{m}}\text{Kr}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{87}\text{Kr}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{133\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{134}\text{I}$ ,  $^{135}\text{I}$ ,  $^{135\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ; além das séries do urânio e do tório.

Da mesma forma como efetuado para as três atividades anteriores, foram selecionadas as radiações de maior relevância, dentro do escopo desta pesquisa,

quais sejam:  $^{131}\text{I}$  e  $^{133}\text{Xe}$ . Estes dois radionuclídeos são monitorados continuamente, na contenção do reator, pelo Sistema de Monitoração de Radiações (SMR).

Assim, foram selecionadas as energias de 31 keV e 81 keV provenientes do  $^{133}\text{Xe}$ ; além das energias de 365 keV e 637 keV do  $^{131}\text{I}$ .

Podemos resumir os procedimentos efetuados até agora da seguinte maneira: a partir das radiações presentes nas atividades avaliadas, selecionamos àquelas que se enquadraram dentro dos critérios de energia ( $\geq 30$  keV) e intensidade de emissão ( $\geq 10\%$ ). Dentre aquelas selecionadas foram priorizadas as relevantes, em cada uma das atividades avaliadas.

A seguir, na Tabela 3.6, estão listadas as energias relevantes para o ensaio e calibração de dosímetros ativos, conforme a descrição sucinta acima.

Tabela 3.6 – Relação das energias relevantes para o ensaio e calibração de dosímetros ativos em condições de campos mistos de radiações.

<b>Radionuclídeos</b>	<b>Picos de Energias</b>	<b>Intensidade de Emissão (por 100 desintegrações)</b>
$^{133}\text{Xe}$	31	39
$^{133}\text{Xe}$	81	38
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	141	89
$^{192}\text{Ir}$	296	29
$^{192}\text{Ir}$	308	30
$^{192}\text{Ir}$	317	83
$^{131}\text{I}$	365	81
$^{192}\text{Ir}$	468	48
$^{18}\text{F}$	511	194
$^{131}\text{I}$	637	10
$^{137}\text{Cs}$	662	85
$^{60}\text{Co}$	1.173	100
$^{60}\text{Co}$	1.333	100

Observa-se então, na Tabela 3.6, que a faixa de energias em estudo nesta pesquisa vai de 31 keV a 1.333 keV.

Já as intensidades de emissões, segundo ainda a Tabela 3.6, vão de 10 % a 100 %.

### 3.5 QUALIDADES DE RADIAÇÕES ESTABELECIDAS POR NORMA (ISO 4037) PARA SIMULAR AS RADIAÇÕES SELECIONADAS

Nas atividades de calibração de instrumentos de medição das radiações ionizantes se faz uso de parâmetros dos feixes de radiações chamados qualidades de radiações.

Neste tópico estão descritos os procedimentos de seleção das qualidades de radiações, especificadas na norma ISO 4037-3 (1999), que atendem às necessidades de pontos de energias, para o ensaio e a calibração de dosímetros pessoais ativos.

Na Tabela 3.7 são apresentadas as especificações das quatro séries de qualidades de radiações, definidas na norma ISO 4037-1 (1996), para radiações provenientes de equipamentos de raios X.

Tabela 3.7 – Especificações das radiações X filtradas (ISO 4037-1, 1996).

NOME DA SÉRIE	RESOLUÇÃO, $R_E$ [%]	COEFICIENTE DE HOMOGENEIDADE, $h$ (valores aproximados)	VALORES TÍPICOS DE TAXA DE KERMA NO AR <sup>(1) (2)</sup> [Gy.h <sup>-1</sup> ]
Baixa taxa de kerma no ar	18 a 22	1,0	$3 \times 10^{-4}$ (3)
Espectro estreito	27 a 31	0,75 a 1,0	$10^{-3}$ a $10^{-2}$ (3)
Espectro largo	48 a 57	0,67 a 0,98	$10^{-2}$ a $10^{-1}$ (3)
Alta taxa de kerma no ar	não especificada	0,64 a 0,86	$10^{-2}$ a 0,5

(1) à distância de 1m do tubo de raios X, com o tubo operando a 1mA.

(2) Sob condições de equilíbrio de partículas carregadas, o valor de kerma no ar é, aproximadamente, igual ao de dose absorvida no ar.

(3) Para energias médias menores que 30 keV, outros valores podem ser utilizados.

Para atender às necessidades dos procedimentos de ensaio e calibração de dosímetros estão disponíveis cinco séries de qualidades de radiações, produzidas com feixes de raios X, conforme definição na norma ISO 4037-1 (1996): fluorescência de raios X, baixas taxas de kerma no ar, espectros estreitos, espectros largos e altas taxas de kerma no ar.

Também na referida norma foram definidos os radionuclídeos utilizados como fontes de radiações de referência:  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{241}\text{Am}$ .

A escolha de determinada série de qualidades de radiações depende da especificação de energia e de dose, ou taxa de dose, características do dosímetro ativo a ser submetido aos testes (ensaio ou calibração).

As qualidades de radiações provenientes da série de espectros estreitos são as mais convenientes para execução de ensaios e calibração dos dosímetros pessoais ativos. Porque estas qualidades permitem submeter estes dosímetros aos valores de energias e doses, além das taxas de doses, características das atividades avaliadas nesta pesquisa.

Na Tabela 3.8 estão descritas as principais características das qualidades de radiações da série de espectros estreitos, “narrow” (N). A energia média, do espectro, é determinada conforme descrito no Apêndice A.

Tabela 3.8 – Características da série de qualidades de espectros estreitos (ISO 4037-1, 1996).

QUALIDADE DE RADIAÇÃO [ISO 4037-3]	TENSÃO MÁXIMA <sup>(1)</sup> [kV]	ENERGIA MÉDIA [keV]	RESOLUÇÃO, RE [%]	FILTRAÇÃO ADICIONAL <sup>(2)</sup> [mm]				1° CSR <sup>(4)</sup> [mm]	ELEMENTO METÁLICO	2° CSR <sup>(4)</sup> [mm]	ELEMENTO METÁLICO
				Pb	Sn	Cu	Al <sup>(3)</sup>				
N-10	10	8	28	---	---	---	0,1	0,047	Al	0,052	Al
N-15	15	12	33	---	---	---	0,5	0,14	Al	0,16	Al
N-20	20	16	34	---	---	---	1,0	0,32	Al	0,37	Al
N-25	25	20	33	---	---	---	2,0	0,66	Al	0,73	Al
N-30	30	24	32	---	---	---	4,0	1,15	Al	1,30	Al
N-40	40	33	30	---	---	0,21	---	0,084	Cu	0,091	Cu
N-60	60	48	36	---	---	0,6	---	0,24	Cu	0,26	Cu
N-80	80	65	32	---	---	2,0	---	0,58	Cu	0,62	Cu
N-100	100	83	28	---	---	5,0	---	1,11	Cu	1,17	Cu
N-120	120	100	27	---	1,0	5,0	---	1,71	Cu	1,77	Cu
N-150	150	118	37	---	2,5	---	---	2,36	Cu	2,47	Cu
N-200	200	164	30	1,0	3,0	2,0	---	3,99	Cu	4,05	Cu
N-250	250	208	28	3,0	2,0	---	---	5,19	Cu	5,23	Cu
N-300	300	250	27	5,0	3,0	---	---	6,12	Cu	6,15	Cu

(1) - A diferença de potencial é obtida com carga aplicada ao equipamento.

(2) - Exceto para as 5 (cinco) mais baixas, onde a filtração inerente recomendada é de 1 mm Be, a filtração total é composta pela filtração adicional mais a filtração inerente ajustada para 4 mm de Al (4.2.3 da ISO 4037-1).

(3) - A filtração inerente recomendada é de 1,0 mm Be, mas outros valores podem ser utilizados. Desde que a energia média esteja dentro de  $\pm 5\%$  e que a resolução fique dentro de  $\pm 15\%$  dos valores listados na Tabela.

(4) - As CSR são medidas a 1,0 m de distância do tubo.

E na Tabela 3.9 são apresentadas as características das qualidades de radiações obtidas com uso de radionuclídeos.

Tabela 3.9 – Características da série de qualidades obtidas com fontes radioativas.

QUALIDADE DE RADIAÇÃO [ISO 4037-3]	RADIONUCLÍDEO	ENERGIA MÉDIA [keV]
S-Am	<sup>241</sup> Am	59,5
S-Cs	<sup>137</sup> Cs	662
S-Co	<sup>60</sup> Co	1.250

Com base nos valores de energias médias das qualidades de radiações, descritas nas Tabelas 3.8 e 3.9, foram associadas as energias das qualidades de radiações da série de espectros estreitos da norma ISO 4037-3 (1999) que cobrem as energias listadas na Tabela 3.6.

Os valores de energia média das qualidades de radiações, mostrados nas Tabelas 3.8 e 3.9, não são exatamente os valores de energia das radiações mostradas na Tabela 3.6.

Para ajustar a defasagem entre os valores de energias das qualidades de radiações e os valores de energias prioritários aos testes, foram estabelecidas faixas de abrangência para as qualidades de radiações mostradas nas Tabelas 3.8 e 3.9.

As faixas de abrangência foram definidas como sendo de  $\pm 20\%$  para raios gama e  $\pm 10\%$  para raios X. Este critério levou em conta o fato dos feixes de radiações gama serem extremamente estáveis; além de serem mono energéticos. Já os feixes de raios X dependem da estabilidade do equipamento, que é elétrico, que por sua vez depende, sobretudo, da estabilidade da rede elétrica durante a operação. Existe, ainda, o fato dos feixes de radiações dos equipamentos de raios X serem de amplo espectro de energias; o que aumenta a incerteza na determinação da energia média do espectro de raios X.

Desta forma, de acordo com os critérios descritos acima, foram estabelecidas as faixas de energias para cada uma das qualidades de radiações descritas na norma ISO-4037-3 (1999). As faixas de energias abrangidas pelas qualidades de radiações de espectros estreitos estão descritas na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 Faixas de abrangência das qualidades de radiações de espectros estreitos.

QUALIDADE DE RADIAÇÃO [ISO 4037-3]	ENERGIA MÉDIA [keV]	FAIXA DE ABRANGÊNCIA [keV]	
N-10	8	7	9
N-15	12	11	13
N-20	16	14	18
N-25	20	18	22
N-30	24	22	26
N-40	33	30	36
N-60	48	43	53
N-80	65	59	72
N-100	83	75	91
N-120	100	90	110
N-150	118	106	130
N-200	164	148	180
N-250	208	187	229
N-300	250	225	275

Por sua vez, as faixas de abrangência das qualidades de radiações de fontes radioativas são mostradas na Tabela 3.11.

Tabela 3.11– Faixas de abrangência das qualidades de radiações das fontes radioativas.

QUALIDADE DE RADIAÇÃO [ISO 4037-3]	ENERGIA MÉDIA [keV]	FAIXA DE ABRANGÊNCIA [keV]	
S-Am	59,5	48	71
S-Cs	662	530	794
S-Co	1.250	1.000	1.500

## 3.6 REQUISITOS DE ENERGIA

### 3.6.1 Seleção das qualidades de radiações da norma ISO 4037.

Das energias mostradas na Tabela 3.6 e nas Tabelas de 3.8 e 3.9 podemos fazer as considerações a seguir:

- 1) As energias de 31 keV e 81 keV do  $^{133}\text{Xe}$  são perfeitamente contempladas pelas qualidades de radiações N-40 e N-100, cujas energias médias são 33 keV e 83 keV, respectivamente;
- 2) As energias de 637 keV do  $^{131}\text{I}$  e 662 keV do  $^{137}\text{Cs}$  são ambas contempladas pela qualidade S-Cs;
- 3) Da mesma forma, as energias de 1.173 keV e 1.333 keV, ambas do  $^{60}\text{Co}$ , são, obviamente, atendidas pela qualidade de radiação S-Co;
- 4) Numa condição menos favorável, pode-se dizer que as qualidades N-200 e S-Cs não contemplam, mas seus limites na faixa de abrangência estão muito próximos das energias de 141 keV do  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  e de 511 keV do  $^{18}\text{F}$ , respectivamente;
- 5) Já as energias de 296 keV, 308 keV, 317 keV e 468 keV do  $^{192}\text{Ir}$  não são contempladas por qualquer uma das qualidades de radiações da norma ISO 4037-3, sequer ficam próximas dos limites das faixas de abrangência. O mesmo ocorre com a energia de 365 keV do  $^{131}\text{I}$ .

Na condição especificada no sub-item 4 acima, foram associadas qualidades de radiações considerando uma condição próxima do ideal.

### 3.6.2 Determinação de energias fora das faixas de abrangência

A limitação de valores de energias da norma ISO 4037-3 se explica pelo fato das qualidades de radiações terem sido desenvolvidas para implantação em

equipamentos de raios X, então utilizados nas décadas de 50 e 60. Àquela época, o valor máximo de alta tensão aplicada ao tubo de raios X era de 300 kV, como no equipamento Stabilipan II, fabricado pela Siemens e ainda em operação no LNMRI-IRD.

Portanto, existe uma lacuna de energias entre 250 keV (N-300) e 662 keV (S-Cs), onde não existe nenhuma qualidade de radiação estabelecida por qualquer norma.

No meio científico já se discute a viabilidade técnica de estabelecimento de novas qualidades de radiações, aproveitando o lançamento de equipamentos de raios X de 600 kV e até de 800 kV.

Para atender algumas das energias listadas na Tabela 3.6 que ficam justamente nesta lacuna de energias foi necessária a implantação de novas qualidades de radiações no LNMRI-IRD/CNEN.

### **3.6.3 Determinação das características das qualidades de radiações propostas**

Neste tópico estão descritos os procedimentos para determinação das características das qualidades de radiações propostas, como complemento daquelas especificadas na norma ISO 4037-3 (1999), visando cobrir a lacuna apresentada em 3.6.2.

Para isto, se fez necessária a análise das características apresentadas pelas qualidades de radiações estabelecidas na norma ISO 4037-3 (1999), e mostradas nas Tabelas 3.8 e 3.9.

### **3.6.4 Energia média das qualidades de radiações propostas**

Primeiramente foi necessária a estimativa do maior valor de energia média a ser obtida pelo equipamento de raios X Pantak 420 kV, disponível no LNMRI-IRD.

Para isto, foram utilizados os valores de potencial elétrico e de energia média de cada uma das qualidades de radiações, referentes à série de espectros estreitos, mostrados na Tabela 3.8.

Na Figura 3.1 é mostrada a curva de energia média das qualidades de radiações versus o potencial elétrico aplicado ao tubo de raios X.

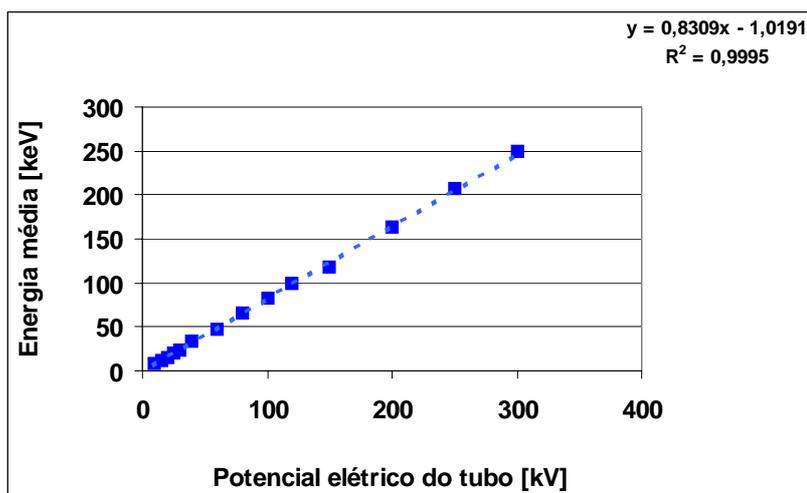


Figura 3.1 – Curvas de energia média *versus* potencial elétrico do tubo.

A regressão linear foi usada para descrever o comportamento da curva mostrada na Figura 3.1. Dessa forma, foram calculados os valores máximos de energia média, obtida com o referido equipamento: 348 keV para qualidades de espectros estreitos.

Acrescentando o ponto de 348 keV às faixas de abrangência descritas em 3.5, a abrangência deste ponto variaria de 313 keV a 383 keV.

A qualidade de radiação N-420 (348 keV) contemplaria parcialmente a energia de 308 keV do  $^{192}\text{Ir}$ . Já a energia de 317 keV, também do  $^{192}\text{Ir}$  estaria sendo perfeitamente contemplada por esta nova qualidade de radiação. O mesmo estaria ocorrendo com a energia de 365 keV do  $^{131}\text{I}$ .

Para atender a energia de 296 keV do  $^{192}\text{Ir}$  foi criada uma outra qualidade de radiação: N-360, com 298 keV de energia média.

Todavia, para atender toda a faixa de energias selecionadas em 3.6.2, ainda faltou contemplar a energia de 468 keV do  $^{192}\text{Ir}$ .

Os resultados até aqui obtidos podem ser observados, de forma sucinta, na Tabela 3.12 mostrada a seguir.

Tabela 3.12– Resumo das qualidades de radiações propostas nesta pesquisa.

FONTE DE RADIAÇÃO	ENERGIA [keV]	QUALIDADE ISO 4037-3	ENERGIA MÉDIA [keV]	FAIXA DE ENERGIA [keV]		DESVIO DO VALOR LIMITE DA FAIXA	
Xe-133	31	N-40	33	30	36	-4%	17%
Xe-133	81	N-100	83	75	91	-8%	13%
Tc-99m	141	<b>N-200</b>	164	148	180	<b>5%</b>	28%
Ir-192	296	<b>N-360</b>	298	268	328	-9%	<b>11%</b>
Ir-192	308	<b>N-420</b>	348	313	383	<b>2%</b>	24%
Ir-192	317	N-420	348	313	383	-1%	21%
I-131	365	N-420	348	313	383	-14%	5%
Ir-192	468	<b>L-420</b>	370	333	407	-29%	<b>-13%</b>
F-18	511	<b>S-Cs</b>	662	530	794	<b>4%</b>	55%
I-131	637	S-Cs	662	530	794	-17%	25%
Cs-137	662	S-Cs	662	530	794	-20%	20%
Co-60	1.173	S-Co	1250	1000	1500	-15%	28%
Co-60	1.333	S-Co	1250	1000	1500	-25%	13%

	Energias dentro dos limites das faixas de abrangência das qualidades de radiações da ISO 4037-3
	Energias próximas aos limites das faixas de abrangência das qualidades de radiações da ISO 4037-3
	Energias fora dos limites das faixas de abrangência das qualidades de radiações da ISO 4037-3

A visualização das faixas de abrangência pode ser observada no gráfico da Figura 3.2.

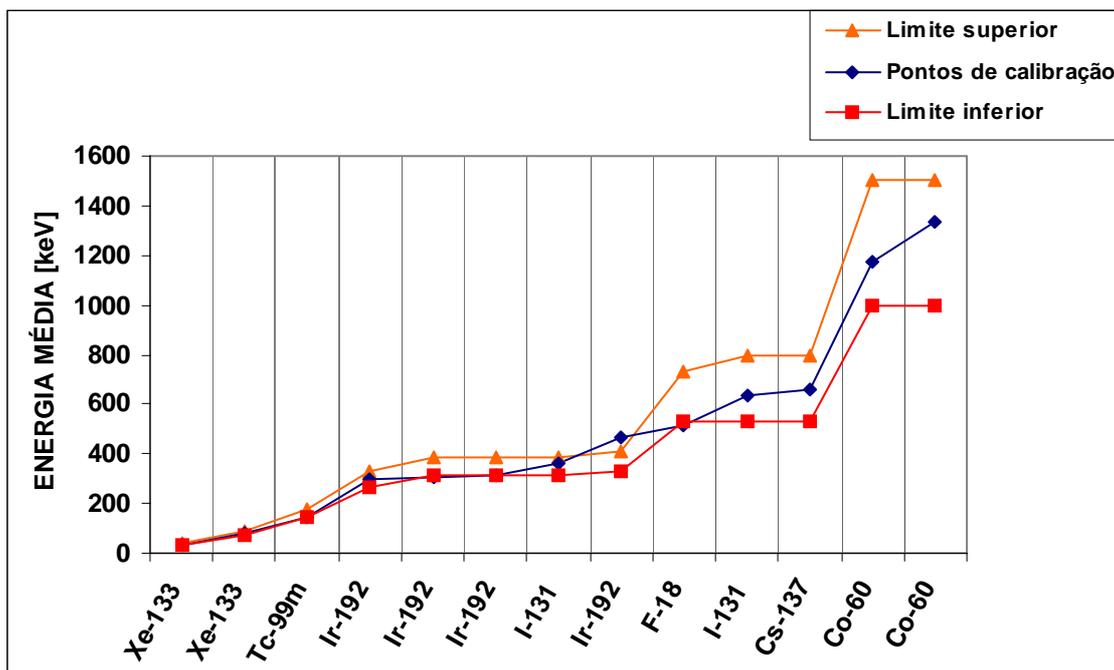


Figura 3.2 – Gráfico da faixa de abrangência.

### 3.7 CARACTERÍSTICAS DAS NOVAS QUALIDADES DE RADIAÇÕES

Foram então definidas as características das qualidades de radiações a serem implantadas: N-360 e N-420. Estas qualidades de radiações foram especificadas e implantadas, seguindo os critérios estabelecidos na norma ISO 4037-1 (1996).

#### 3.7.1 Filtrações adicionais

A filtração adicional consiste na quantidade de filtros metálicos, interpostos aos feixes de radiações, para modificar os espectros provenientes dos equipamentos de raios X, de modo a padronizar estes espectros.

Voltamos à Tabela 3.8 para observar as filtrações adicionais das qualidades de radiações da série de espectros estreitos. As qualidades N-120; N-200; N-250 e N-300 possuem filtração composta de mais de um filtro, sendo que a qualidade N-200 possui três componentes de filtração.

Na Figura 3.3 é mostrado o comportamento da energia média dos espectros com a variação da filtração interposta ao feixe.

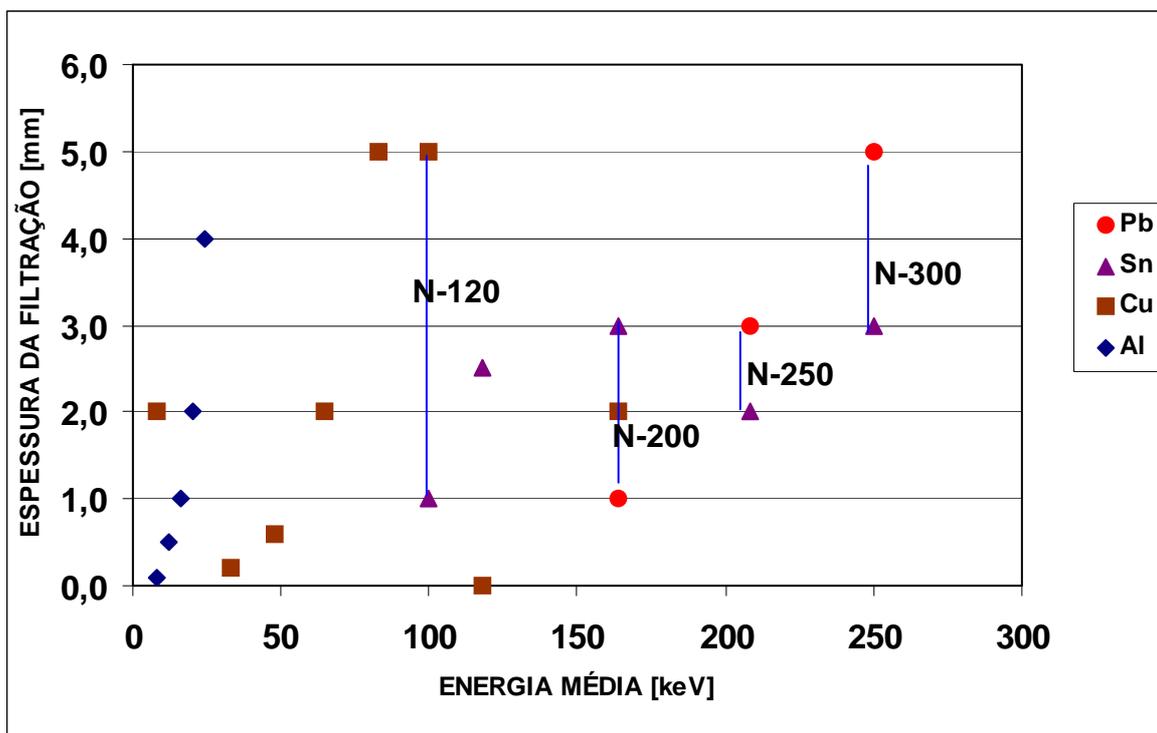


Figura 3.3 – Filtrações adicional *versus* energia média das qualidades de radiações da série de espectros estreitos.

O comportamento da variação de filtração adicional, conforme aumenta a energia média dos feixes de radiações, foi descrita por regressão polinomial. Com este recurso, foi possível estimar os valores das filtrações adicionais necessárias para obtenção das qualidades de radiações N-360 e N-420, a serem implantadas no LNMRI-IRD/CNEN.

A referida regressão para espectros estreitos pode ser observada na Figura 3.4.

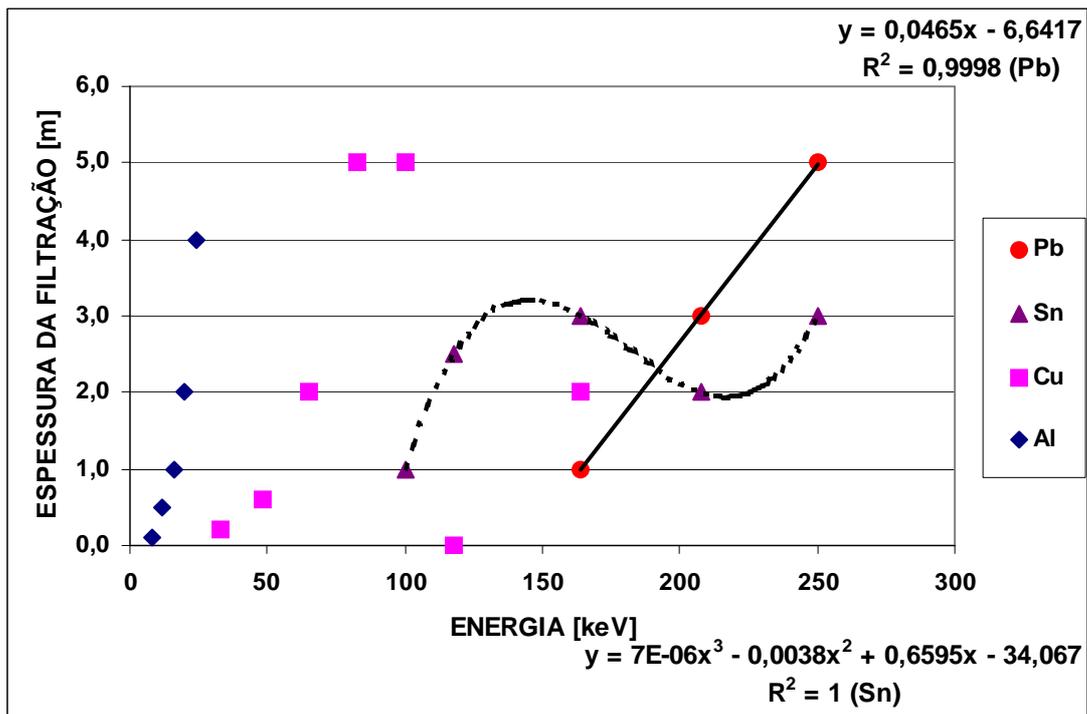


Figura 3.4 – Comportamento da variação das filtrações adicionais em qualidades de espectros estreitos.

No gráfico da Figura 3.4, a função que descreve a variação de filtração de chumbo é a seguinte:

$$y = 0,0465 x - 6,6417 \quad (3.1)$$

Onde:

y- valor da filtração adicional (chumbo); e

x – energia média da qualidade de radiação.

Já o comportamento da filtração de estanho possui a seguinte função:

$$y = 7 \cdot 10^{-06} x^3 - 0,0038 x^2 + 0,6595 x - 34,067 \quad (3.2)$$

A partir das funções 3.1 e 3.2 foi possível estimar os valores de filtrações necessários para a implantação das qualidades de radiações propostas nesta pesquisa: N-360 e N-420, cujas energias médias são, respectivamente, 298 keV e 348 keV.

Na Tabela 3.13 são mostradas as filtrações adicionais necessárias para implantação das duas qualidades de radiações propostas.

Tabela 3.13 – Filtração adicional das qualidades de radiações propostas.

MATERIAL	QUALIDADE DE RADIAÇÃO	ENERGIA MÉDIA [keV]	ESPESSURA DA FILTRAÇÃO [mm]
Pb	N-360	298	7,2
Sn	N-360	298	10,6
Pb	N-420	348	9,5
Sn	N-420	348	30,5

A qualidade N-360 possui diferença de potencial elétrico de 360 kV e filtração adicional de 7,2 mm de chumbo e 10,6 mm de estanho.

Enquanto a qualidade N-420 possui diferença de potencial elétrico de 420 kV e filtração adicional de 9,5 mm de chumbo e 30,5 mm de estanho.

### 3.7.2 Camada semi-redutora (CSR)

Os valores de CSR para espectro estreitos, apresentados na norma 4037-1 (1996), também estão reproduzidos na Tabela 3.8.

Os valores de 1ª CSR e 2ª CSR são determinados com alumínio para qualidades de radiações com energias médias entre 8 keV e 24 keV. Enquanto que para qualidades de radiações acima desta faixa, de 33 keV a 250 keV, os valores de 1ª CSR e 2ª CSR são determinados com cobre.

Na Figura 3.5 é mostrado o gráfico de valores de 1ª e 2ª CSR (alumínio e cobre) *versus* energia média das qualidades de radiações, para a série de espectros estreitos.

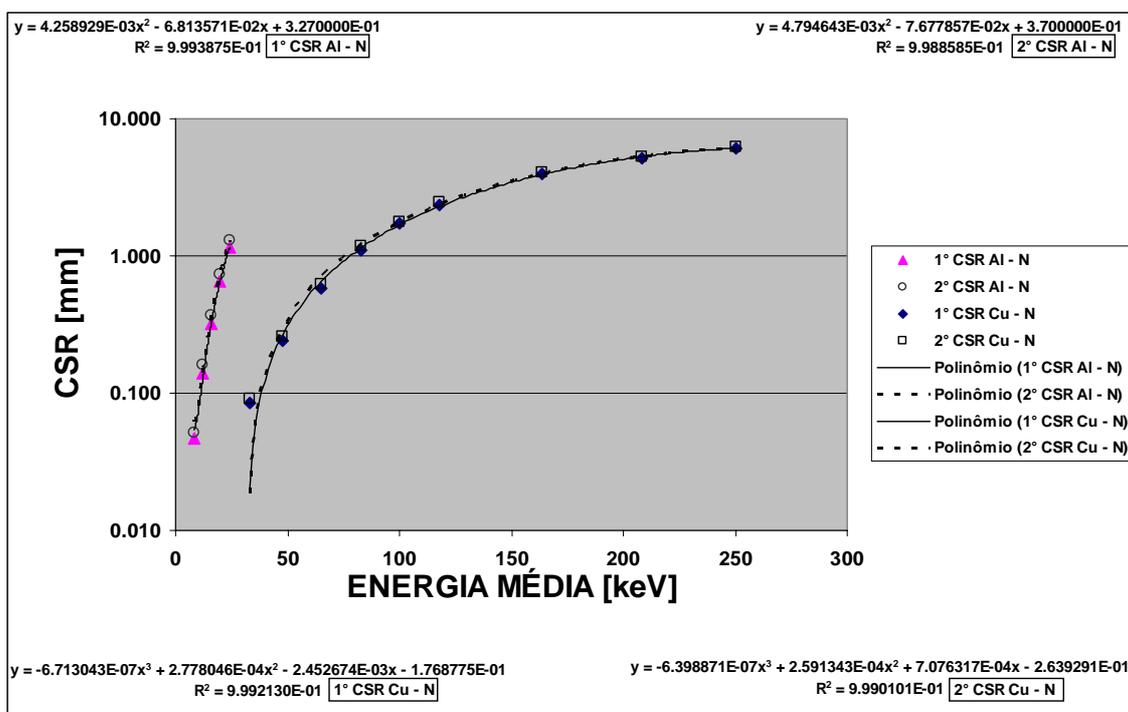


Figura 3.5 – Gráfico de valores de 1ª e 2ª CSR (alumínio e cobre) *versus* energia média das qualidades de radiações de espectros estreitos.

Pelas curvas de comportamento apresentadas nas Figura 3.5 foi possível estimar os valores de 1ª e 2ª CSR das qualidades de radiações propostas nesta pesquisa.

É importante destacar que os valores estimados de 1ª CSR e 2ª CSR servem como parâmetro para configurar as duas qualidades propostas. A partir das qualidades implantadas: kV e filtração adicional foram determinados os reais valores de 1ª CSR e 2ª CSR das duas qualidades.

No Apêndice F são encontradas as características das duas qualidades de radiações propostas.

### 3.8 REQUISITOS DE DOSES

No item anterior foram definidas as qualidades de radiações que compuseram as configurações de qualidades de radiações a que devem ser submetidos os dosímetros pessoais, durante a realização dos testes de influência de campos mistos.

Passamos então a buscar a segunda e última componente da configuração do teste de influência da presença de campos mistos de fótons: as proporções de doses entre as várias componentes dos campos de radiações utilizados nos testes.

Vimos que as informações referentes à intensidade de emissão (para cada grupo de 100 desintegrações) das radiações selecionadas nesta pesquisa foram obtidas junto ao NNDC. A título de ilustração, a planilha de dados do  $^{137}\text{Cs}$ , fornecida pelo NNDC, encontra-se no Apêndice D.

De modo a facilitar a elaboração da próxima Tabela, as atividades analisadas receberam os códigos mostrados na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 – Códigos das atividades analisadas.

CÓDIGO DA ATIVIDADE	ATIVIDADE
1	Radioterapia
2	Medicina nuclear
3	END (Ensaio não destrutivo)
4	Mineração e processamento de combustíveis (reatores e ciclo de combustíveis)

A intensidade de emissão das radiações selecionadas é mostrada na Tabela 3.15. Os dados obtidos até então foram condensados em uma única tabela, onde foi feita a associação das radiações selecionadas com as atividades onde são observadas.

Tabela 3.15 – Associação das radiações com as atividades.

ATIVIDADES	RADIONUCLÍDEOS	QUALIDADE ISO 4037-3	ENERGIA MÉDIA [keV]	INTENSIDADE [POR 100 DESINTERGRAÇÕES]
4	<sup>133</sup> Xe	N-40	33	39
4	<sup>133</sup> Xe	N-100	83	38
2	<sup>99m</sup> Tc	N-200	164	89
1 / 3	<sup>192</sup> Ir	N-360	298	29
1 / 3	<sup>192</sup> Ir	N-420	348	30
1 / 3	<sup>192</sup> Ir	N-420	348	83
2 / 4	<sup>131</sup> I	N-420	348	81
1 / 3	<sup>192</sup> Ir	L-420	370	48
2	<sup>18</sup> F	S-Cs	662	194
2 / 4	<sup>131</sup> I	S-Cs	662	10
3	<sup>137</sup> Cs	S-Cs	662	85
1 / 3	<sup>60</sup> Co	S-Co	1250	100
1 / 3	<sup>60</sup> Co	S-Co	1250	100

A primeira coluna se refere à atividade em que é encontrada determinada radiação, cujo código foi descrito na Tabela 3.14. Em segundo está o radionuclídeo emissor da radiação em estudo. Na terceira coluna está a qualidade de radiação, estabelecida pela norma ISO 4037-3 (1999), que possui energia média próximo ao valor de energia da radiação mencionada. Na quarta coluna está o valor de energia média da referida qualidade; e, finalmente, na quinta coluna está o valor de intensidade de emissão de cada radiação selecionada, com base nas informações colhidas no LNHB e NNDC.

A atividade codificada 1/3 significa que a radiação é encontrada tanto em atividades de radioterapia (1) em hospitais e clínicas, quanto de END (3) na indústria convencional.

O mesmo se sucede com a atividade 2/4, cujas radiações são comuns às atividades de medicina nuclear e mineração e processamento de combustíveis nucleares (reatores e ciclo de combustíveis), atividades 2 e 4, respectivamente.

### 3.9 REQUISITOS DE ENSAIO

#### 3.9.1 Critério de avaliação para ensaio e calibração dos dosímetros pessoais ativos.

Na norma IEC 61526 (2005) são apresentados os requisitos de testes para verificar a influência de campos mistos no desempenho de dosímetros pessoais ativos.

A variação relativa,  $\Delta_{hi,mix}$ , entre a soma de valores medidos pelo instrumento, quando submetido, separadamente, às duas radiações componentes de um campo misto; e a indicação total quando submetido a ambas simultaneamente.

(3.3)

$$\Delta_{hi,mix} = \frac{(H_{i,K} + H_{i,L}) - H_{i,K+L}}{H_{i,K+L}}$$

Onde:

$H_{i,K}$  e  $H_{i,L}$  são os valores indicados pelo instrumento quando irradiados, separadamente, com os valores verdadeiros convencionais de dose  $H_K$  e  $H_L$ , submetidos às duas condições de irradiações K e L (campos de radiações  $S_K$  e  $S_L$  de diferentes energias, ângulos de incidência ou mesmo diferentes tipos de radiações); e  $H_{i,K+L}$  é o valor indicado quando o instrumento foi submetido às duas radiações simultaneamente.

Na IEC 61526 (2005) foi estabelecido que o teste pode ser feito para qualquer valor de  $H_K$  e  $H_L$ , e qualquer combinação de campos de radiações  $S_L$  e  $S_K$ . Existe ainda a instrução de que qualquer não linearidade deve ser corrigida.

Também há a recomendação de que, quando diferentes dosímetros são utilizados para determinar  $H_{i,K}$ ,  $H_{i,L}$  e  $H_{i,K+L}$ , qualquer diferença nos fatores de calibração devem ser considerados. O uso de programas computacionais de simulação não só é permitido, como também recomendado para este tipo de teste (IEC 61526, 2005).

Segundo a norma, o desvio relativo na indicação do instrumento,  $\Delta_{hi, mix}$ , não deve exceder o valor de  $\pm 0,1$ . Neste caso, os requisitos para desempenho em condições de campos mistos podem ser considerados atendidos.

### **3.9.2 Configuração de energias e proporção de doses para ensaio dos dosímetros pessoais ativos.**

Para atender às instruções dos testes relatados na norma IEC 61526 (2005), foram montadas planilhas contendo as energias propostas nesta pesquisa, representadas por suas respectivas qualidades de radiações, incluindo aqui as duas qualidades desenvolvidas e implantadas nesta pesquisa (N-360 e N-420).

As Tabelas do Apêndice E descrevem as configurações de energias (qualidades de radiações) associadas à proporção de “doses” para formação de campos mistos.

Os dosímetros pessoais ativos devem ser submetidos aos referidos campos mistos em testes de influência, como forma de verificar a adequação ou não do desempenho destes dosímetros aos requisitos da norma IEC 61526 (2005).

Como já foi dito, os campos mistos propostos na norma IEC 61526 (2005) são compostos de apenas duas componentes. Coincidentemente, foi exatamente esta a quantidade de radiações selecionadas para as atividades 2 e 4, conforme mostrado na Tabela 3.15.

Os campos mistos presentes na atividade 2 pode ser simulado pela configuração N-200+S-Cs. O campo misto da atividade 4 seria representado por N-40+N-100. Já atividade 3 incluiria S-Cs e outra qualidade dentre N-360, N-420, L-420 e S-Co.

Por último temos que o conjunto de atividades de radioterapia e END (código 1/3), pode ser representada por outras 6 (seis) radiações.

### 3.10 REQUISITOS DE CALIBRAÇÃO

As qualidades de radiações estabelecidas na norma ISO 4037-3 (1999) servem para determinação da resposta do instrumento em função da energia de fótons e ângulo de incidência da radiação. Tais ensaios representam parte dos chamados “testes de tipo” onde os efeitos de grandezas de influências são examinados. As condições de referência estão na Tabela 3.16.

Tabela 3.16 - Condições de referência e condições padrão de teste para parâmetros radiológicos.

GRANDEZA DE INFLUÊNCIA	CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA	CONDIÇÕES PADRÃO DE TESTES
Energia de fótons	$^{137}\text{Cs}^{(a)}$	$^{137}\text{Cs}^{(a)}$
Ângulo de incidência da radiação	Orientação de referência	Orientação de referência $\pm 5^\circ$
Contaminação por elemento radioativo	Irrelevante	Irrelevante
Radiação de fundo	Taxa de equivalente de dose ambiente, $H^*(10)$ 0,1 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ ou menor na prática	Taxa de equivalente de dose ambiente, $H^*(10)$ menor que 0,25 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$

<sup>(a)</sup> Outra qualidade de radiação pode ser utilizada se a faixa de energia em que opera o instrumento sob teste não compreende a energia do  $^{137}\text{Cs}$ .

### 3.11 SELEÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES DE CAMPOS MISTOS PARA TESTES

Por questões de infra-estrutura não há como executar no LNMRI-IRD os testes em todas as configurações aqui propostas.

Entretanto existe a viabilidade técnica de se executar os testes em duas das configurações: N-40 (33 keV)+N-100 (83 keV) e S-Cs (662 keV)+S-Co (1250 keV). Estes campos mistos são encontrados em atividades da indústria nuclear (4) e END (3), respectivamente.

Nas Tabelas 3.17 e 3.18 estão as duas configurações a serem utilizadas em testes de dosímetros ativos para atender as condições de campos mistos nas atividades 4 e 3.

Tabela 3.17 – Configuração de campo misto existente em atividade de ciclo do combustível (industria nuclear).

<b>ATIVIDADE 4</b>		<b>DOSES [<math>\mu</math>Sv]</b>		
<b>CAMPOS DE RADIAÇÕES</b>		<b>Hp (10)</b>		
<b>S<sub>K</sub></b>	<b>S<sub>L</sub></b>	<b>H<sub>i,K</sub></b>	<b>H<sub>i,L</sub></b>	<b>H<sub>i,K+L</sub></b>
Qualidades		Proporção		
N-40	N-100	51%	49%	100%

A proporção indicada para formulação do campo misto experimental seria de 51% da taxa de dose a que seria exposto o dosímetro proveniente da radiação N-40 e ou outros 49% da taxa viria da qualidade de radiação N-100.

A configuração de campos mistos acima atende aos instrumentos utilizados nas atividades de mineração e processamento de combustíveis em indústrias nucleares (atividade 4).

Tabela 3.18 – Configuração de campo misto existente na atividade de END.

<b>ATIVIDADE 3</b>		<b>DOSES [<math>\mu</math>Sv]</b>		
<b>CAMPOS DE RADIAÇÕES</b>		<b>Hp (10)</b>		
<b>S<sub>K</sub></b>	<b>S<sub>L</sub></b>	<b>H<sub>i,K</sub></b>	<b>H<sub>i,L</sub></b>	<b>H<sub>i,K+L</sub></b>
Qualidades		Proporção		
S-Cs	S-Co	18%	21%	39%

Neste caso, a proporção do campo misto experimental seria de 18% da taxa de dose proveniente da radiação S-Cs e outros 21% da taxa de vir da qualidade de radiação S-Co.

Importante frisar que as proporções de doses mostradas na Tabela 3.18 se relacionam a todas as outras energias associadas à atividade 3, mostradas na Tabela 3.15: 298 keV, 348 keV e 370 keV.

Como o campo misto aqui utilizado terá apenas duas componentes, assumiremos valores iguais entre as taxas das duas qualidades.

A segunda configuração está relacionada às atividades de END, nas indústrias convencionais.

### 3.12 ESCOLHA DOS DOSÍMETROS ATIVOS PARA TESTE

Os dosímetros foram escolhidos entre os disponíveis para calibração no LNMRI-IRD. A não ser o dosímetro da marca Thermo e modelo Mk2, adquirido pelo IRD para servir de referência de desempenho.

Na Tabela 3.19 estão listadas as características dos quatro modelos utilizados nos testes.

Tabela 3.19 – Modelos de dosímetros ativos utilizados.

DOSÍMETRO MARCA E MODELO	CARACTERÍSTICAS DOS DOSÍMETROS				
	DETECTOR	PARTÍCULAS	GRANDEZA	FAIXA DE ENERGIA	FAIXA DE OPERAÇÃO
Termo Electron Corporation / EPD Mk 2.3	Fotodiodo	Fotón e beta	Hp(10)	15 keV a 10 MeV	0 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ a 4 $\text{Sv h}^{-1}$
Canberra / Dosicard / Eurisys Mesures / 41277	Fotodiodo	Fóton	Hp(10)	30 keV a 2 MeV	1 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ to 1 $\text{Sv h}^{-1}$
Thermo Scientific / Rad Eye PRD 42506/71	Nal(Tl)	Fóton	Hp(10)	30 keV a 1,3 MeV	Até 250 $\mu\text{Sv h}^{-1}$
Aloka / MyDose Alarm / ADM-112	Semi-condutor	Fóton	Hp(10)	40 keV a 3 MeV	0 a 300 $\text{mSv h}^{-1}$

### 3.13 ARRANJO EXPERIMENTAL

#### 3.13.1 Ensaio em raios X

Para efetuar os testes de influência de campos mistos em raios X foi montado um sistema de irradiação composto de dois tubos de raios X, conforme descrito a seguir:

Equipamento de raios X 300 kV da marca Siemens, modelo Stabilipan II e equipamento de raios X da marca Seifert com 320 kV.

A Figura 3.6 mostra o arranjo experimental para ensaio na configuração N-40+N-100.

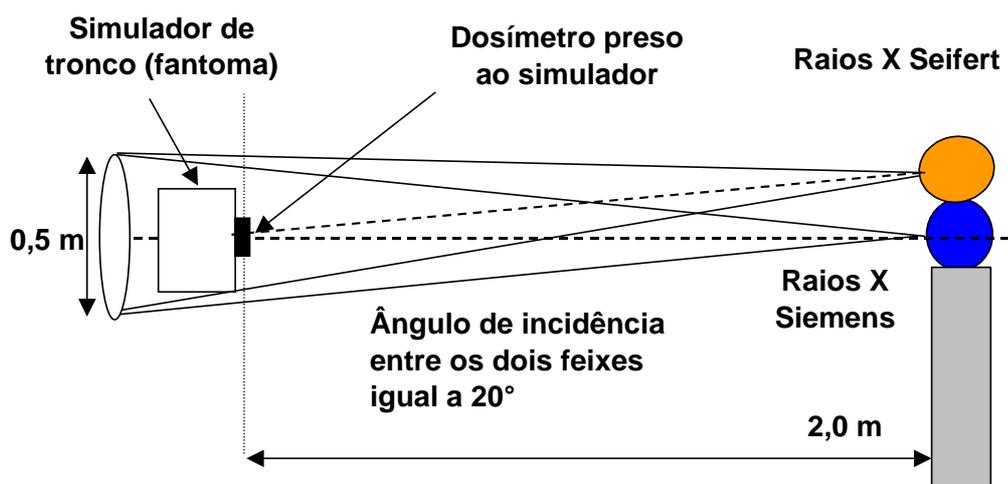


Figura 3.6 – Arranjo experimental para ensaio em raios X.

A irradiação foi efetuada a uma distância de 2 metros entre o foco do equipamento de raios X e o dosímetro sob testes, o diâmetro do campo foi de 0,50 m.

Por questões de limitação do espaço no arranjo experimental, o ângulo mínimo entre as direções de incidência dos feixes de raios X do Siemens e do Seifert ficou com 20°.

A seguir, na Tabela 3.20, são mostradas as duas qualidades de radiações, cada uma com três diferentes taxas de doses, componentes do campo misto experimental.

Tabela 3.20 – Componentes de campo misto experimental

CÓDIGO	QUALIDADE DE RADIAÇÃO	TAXAS DE Hp(10) [ $\mu\text{Sv h}^{-1}$ ]
SE-1	N-40 = 40 kV (33 keV) - 0,5 mA - 15 min - 0,20 mm Cu + 3,5 mm Al	386
SE-2	N-40 = 40 kV (33 keV) - 1,6 mA - 4,5 min - 0,20 mm Cu + 3,5 mm Al	1298
SE-3	N-40 = 40 kV (33 keV) - 4,2 mA - 1,7 min - 0,20 mm Cu + 3,5 mm Al	3493
SI-1	N-100 = 100 kV (83 keV) - (300-R1) - 2 mA - 0,85 dig - 5,0 mm Cu + 2,60 mm Al	375
SI-2	N-100 = 100 kV (83 keV) - (300-R1) - 10 mA - 0,84 dig - 5,0 mm Cu + 2,60 mm Al	1303
SI-3	N-100 = 100 kV (83 keV) - (300-R1) - 20 mA - 0,84 dig - 5,0 mm Cu + 2,60 mm Al	3473

Em seguida vem a Tabela 3.21 com as taxas disponíveis para cada configuração.

Tabela 3.21 – Taxas de doses disponíveis

CONFIGURAÇÃO	TAXAS DE Hp(10) [ $\mu\text{Sv h}^{-1}$ ]
SE-1 + SI-1	761
SE-2 + SE-2	2600
SE-3 + SI-3	6966

### 3.13.2 Ensaio em raios gama

Os testes de influência de campos mistos na configuração S-Cs+S-Co foram realizados no arranjo experimental mostrado na Figura 3.7.

Os equipamentos utilizados foram um irradiador colimado multi-fonte Buchler OB85, com fontes de radiação de  $^{241}\text{Am}$ ;  $^{226}\text{Ra}$ ;  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$ .

Em conjunto com o irradiador panorâmico multi-fonte Buchler OB34, com fontes de radiação de  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$ .

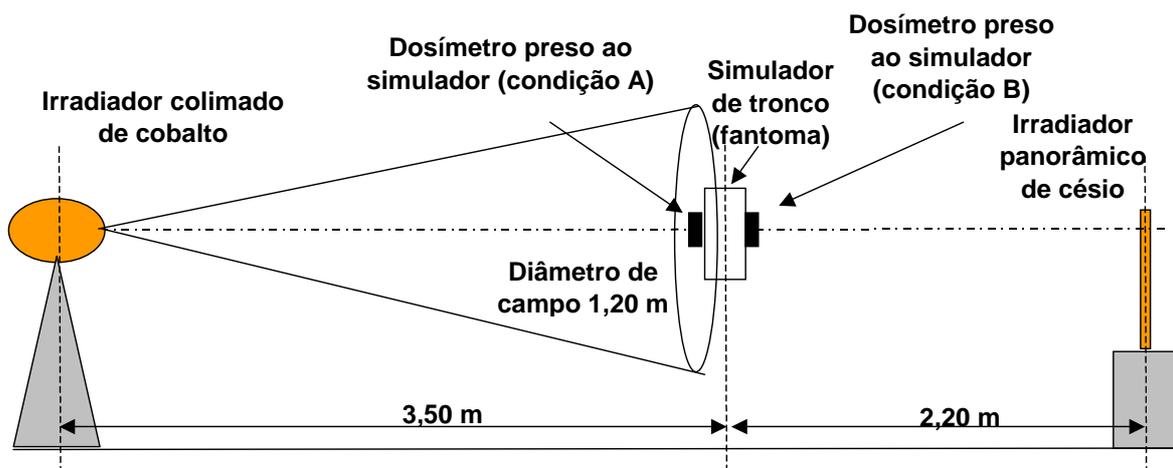


Figura 3.7 - arranjo experimental para os testes em raios gama.

Na Tabela 3.22 são mostradas as taxas de doses disponíveis no laboratório para ensaio de campos mistos na configuração S-Cs+S-Co.

Tabela 3.22 - Taxas de doses disponíveis no laboratório para ensaios em raios gama.

CÓDIGO	QUALIDADE DE RADIAÇÃO	TAXAS DE $H_p(10)$ [ $\mu\text{Sv h}^{-1}$ ]
S-Co-1	Co-60 - 1,50 m - campo de 0,50 m	336
S-Co-2	Co-60 - 2,50 m - campo de 0,85 m	121
S-Co-3	Co-60 - 3,50 m - campo de 1,20 m	62
Cs-137-1	Cs-137 - 4,20 m	19
Cs-137-2	Cs-137 - 3,20 m	33
Cs-137-3	Cs-137 - 2,20 m	70

### 3.13.3 Calibração em raios X

Na Figura 3.8 está mostrado o arranjo experimental para calibração dos dosímetros em feixes de raios X.

Para a calibração foi utilizado um equipamento de raios X da marca Pantak, modelo com tubo de 420 kV.

A distância de calibração foi de 2,50 m e o diâmetro do campo de radiação de 0,50 m.

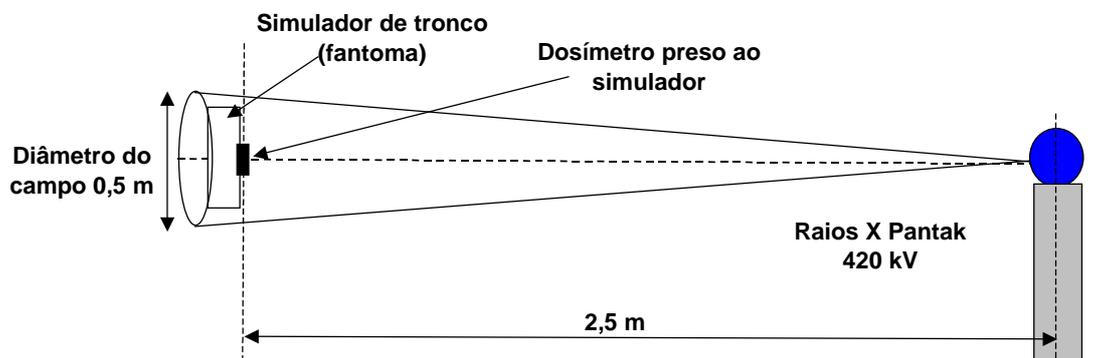


Figura – 3.8 – Arranjo experimental para calibração em raios X.

### 3.13.4 Calibração em raios gama

Na Figura 3.9 está mostrado o arranjo experimental para calibração dos dosímetros em feixes de raios gama.

Para a calibração foi utilizado um irradiador colimado multi-fonte da marca Buchler, modelo OB85 com fontes de  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$ .

A distância de calibração no laboratório do LNMRI-IRD é de 1,50 m e o diâmetro do campo de radiação foi de 0,50 m.

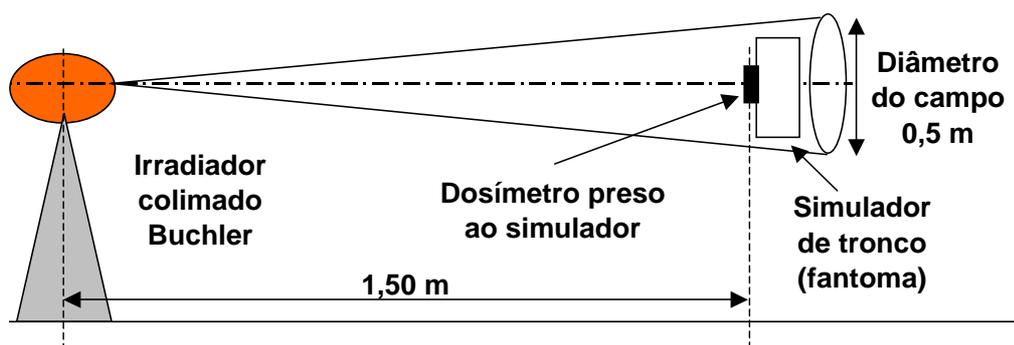


Figura – 3.9 – Arranjo experimental para calibração em raios gama.

Na Tabela 3.23 são mostradas as taxas de doses disponíveis para calibração.

Tabela 3.23 - taxas de doses disponíveis para calibração em raios gama.

CÓDIGO	QUALIDADE DE RADIAÇÃO	TAXAS DE Hp(10) [ $\mu\text{Sv h}^{-1}$ ]
S-Co	$^{60}\text{Co}$ - 1,50 m - campo de 0,50 m	336
S-Cs	$^{137}\text{Cs}$ - 1,50 m - campo de 0,50 m	1350

### 3.14 EXECUÇÃO DOS TESTES

#### 3.14.1 Dosímetro de referência

O testes executados com o dosímetro Thermo/Mk2 consistiu no levantamento da resposta deste instrumento em feixes de raios X e gama. Fabricado pela Thermo Electron Corporation, este instrumento, originado em projeto elaborado pelo NRPB da Inglaterra, é considerado um instrumento de excelência, conforme amplamente divulgado em diversas publicações (BOLOGNESE, 2004, AMBROSI, 2004, LUSZIK, 2007).

#### 3.14.2 Ensaio de campos mistos em raios X

Os dosímetros foram irradiados no arranjo experimental descrito em 3.15.1 em feixes de raios X de qualidades N-40 e N-100.

Os dosímetros foram irradiados primeiramente com feixes de qualidade N-40. Em seguida foram submetidos aos feixes de qualidade N-100. Finalmente, foram submetidos simultaneamente, às radiações provenientes dos dois feixes de radiações.

O valor de dose para irradiação dos dosímetros foi de 100  $\mu\text{Sv}$ .

#### 3.14.3 Ensaio de campos mistos em raios gama

Desta feita, os dosímetros foram irradiados em duas condições:

- Com a parte frontal voltada para a fonte de  $^{60}\text{Co}$ ; e
- Com a parte frontal voltada para a fonte  $^{137}\text{Cs}$ .

Em ambas a sistemática de irradiação foi a mesma:

Os dosímetros foram irradiados primeiramente com a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  e após com a fonte de  $^{60}\text{Co}$ . Logo em seguida foram expostos às duas fontes simultaneamente.

O valor de dose desta feita foi de apenas 10  $\mu\text{Sv}$  devido às limitações do equipamento que, por ser de uso de radioproteção, levaria cerca de 1 hora em cada medida para atingir a dose de 100  $\mu\text{Sv}$ .

#### **3.14.4 Calibração em raios X**

Durante o processo de calibração dos dosímetros, em feixes de raios X, os instrumento foram expostos aos feixes das qualidades, N-40; N-60; N-80; N-100; N-250; N-300; S-Cs e S-Co. Também foram utilizadas aquelas propostas neste projeto: N-360 e N-420.

Também desta vez o valor de dose foi de 100  $\mu\text{Sv}$ .

#### **3.14.5 Calibração em raios gama**

Aqui os dosímetros foram expostos a 1,50 m da fonte com campo de 0,50 m. Entretanto, desta vez, foi possível aplicar o mesmo valor de dose que o obtido nos feixes de raios X: 100  $\mu\text{Sv}$ .

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos durante o desenvolvimento da pesquisa de tese.

#### **4.1 RADIAÇÕES SELECIONADAS NA PESQUISA**

Como resultado preliminar podemos apontar as informações contidas na Tabela 3.15. Nela são mostradas as 13 (treze) radiações selecionadas, acompanhadas de suas respectivas intensidades de emissão.

#### **4.2 CONFIGURAÇÕES DE ENERGIAS E PROPORÇÃO DE DOSES PROPOSTAS**

Outro resultado preliminar deste projeto é apresentado no Apêndice E deste documento. Lá estão as configurações experimentais para simulação de campos mistos para as quatro atividades analisadas.

#### **4.3 QUALIDADES DE RADIAÇÕES DESENVOLVIDAS E IMPLANTADAS**

As duas qualidades de radiações desenvolvidas e implantadas no LNMRI-IRD têm suas características mostradas na Tabela 4.1.

Estas se somaram àquelas estabelecidas na ISO 4037-3 (1999) para a calibração dos 11 exemplares de dosímetros ativos utilizados.

Tabela 4.1 – Características das qualidades de radiações propostas nesta pesquisa.

QUALIDADE	TENSÃO MÁXIMA	ENERGIA MÉDIA	FILTRAÇÃO ADICIONAL	1ª CSR	2ª CSR
N-360	360 kV	298 keV	7,2 mm Pb + 10,6 mm Sn	7,29 mm Cu	7,61 mm Cu
N-420	420 kV	348 keV	9,5 mm Pb + 30,5 mm Sn	9,70 mm Cu	12,17 mm Cu

#### 4.4 TESTE DE INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE CAMPOS MISTOS DE RADIAÇÕES

Passamos a apresentar os resultados finais do teste de influência da presença de campos mistos na determinação de dose por dosímetros ativos, em campos de raios X e raios gama.

As planilhas de incertezas são mostradas no Apêndice G.

##### 4.4.1 Campos mistos em raios X

Na tabela 4.2 são apresentados os resultados do testes para configuração em raios X: N-40 + N-100.

Tabela 4.2 – Resultado do teste de campos mistos em raios X (N-40+N-100).

DOSÍMETRO FABRICANTE E MODELO	SÉRIE	$\Delta h_{i,mix}$	U
Canberra / Dosicard / Eurisys Mesures / 41277	U-1 # 02-0497	0,045	0,088
	U-2 # 02-0498	-0,040	0,038
	U-3 # 02-0499	0,009	0,008
Thermo Scientific / Rad Eye PRD 42506/71	Z-1 # 012838	0,031	0,035
	Z-2 # 012927	0,068	0,040
	Z-3 # 012937	0,050	0,038
Aloka / MyDose Alarm / ADM-112	W-1 # 98779	-0,037	0,109
	W-2 # 98815	0,034	0,046

O valor de  $\Delta h_{i,mix}$  deve ser menor ou igual que 0,1; segundo o exposto no item 8 na norma IEC 61526.

Todos os dosímetros submetidos aos testes foram aprovados nesta condição de teste. Todavia, analisando os resultados de cada um deles, observamos que os instrumentos Dosicard # 1, Radeye # 2 e Mydose # 1 apresentaram valores de incertezas expandidas associadas que comprometem seus desempenhos nos testes.

#### 4.4.2 Campos mistos em raios gama

Apresentamos a seguir os resultados dos testes realizados nos feixes de raios gama de  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$ , que são mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resultado dos testes de influência de campos mistos em raios gama.

DOSÍMETRO FABRICANTE E MODELO		SÉRIE	CONDIÇÃO DE IRRADIAÇÃO	$\Delta h_{i,mix}$ [tese]	U [%]
Cannberra / Dosicard / Eurisys Mesures / 41277	U-1 # 02-0497	A*	0,000	0,149	
		B**	0,000	0,038	
	U-2 # 02-0498	A*	-0,048	0,048	
		B**	0,000	0,000	
	U-3 # 02-0499	A*	0,000	0,068	
		B**	0,000	0,038	
Thermo Scientific / Rad Eye PRD 42506/71	Z-1 # 012838	A*	-0,003	0,009	
		B**	-0,010	0,008	
	Z-2 # 012927	A*	-0,037	0,091	
		B**	-0,010	0,008	
	Z-3 # 012937	A*	0,002	0,014	
		B**	-0,003	0,008	
Aloka / MyDose Alarm / ADM-112	W-1 # 98779	A*	0,041	0,103	
		B**	-0,042	0,087	
	W-2 # 98815	A*	0,003	0,082	
		B**	-0,044	0,043	
*A - dosímetro voltado para a fonte de cobalto e de costas para a fonte de cério.					
**B - dosímetro voltado para a fonte de cério e de costas para a fonte de cobalto.					

Mais uma vez os dosímetros Dosicard # 1, Radeye # 2 e Mydose # 1, apesar do desempenho satisfatório, apresentaram valores de incertezas expandidas associadas que comprometem seus desempenhos nos testes.

Importante salientar que os resultados comentados acima foram apresentados na condição A, ou seja: quando irradiados com o feixe de raios gama do  $^{60}\text{Co}$  frontalmente e com o feixe de raios gama do  $^{137}\text{Cs}$  pelo lado posterior dos dosímetros.

O dosímetro Mydose # 1 também apresentou desempenho insatisfatório na condição B, ou seja: com a irradiação frontal da fonte de  $^{137}\text{Cs}$  e posterior com a fonte de  $^{60}\text{Co}$ .

Como descrito anteriormente, o feixe de raios gama do  $^{60}\text{Co}$  é proveniente de um irradiador com feixe colimado. Já o feixe do  $^{137}\text{Cs}$  é produzido por um irradiador panorâmico, portanto com geometria de irradiação multi-direcional.

O feixe de raios gama do  $^{60}\text{Co}$  sendo colimado produz menor espalhamento que o feixe de  $^{137}\text{Cs}$ , proveniente de irradiação panorâmica. Todavia a contribuição de espalhamento dos feixes de cobalto provêm da interação com o fantoma, sendo dessa forma mais intensa na condição B, quando o dosímetro está de costas para a fonte de cobalto, tendo entre eles o fantoma. Sendo assim, não seria de se esperar que três dos onze dosímetros apresentassem resultados ruins na condição A.

#### 4.5 CALIBRAÇÃO EM FEIXES DE RADIAÇÕES X E GAMA

Apresentamos os resultados finais da calibração em raios X e gama.

A tabela 4.4 apresenta as respostas dos dosímetros quando expostos aos feixes de radiações X e gama no laboratório.

Tabela 4.4 – Respostas dos dosímetros durante calibração em raios X e gama

DOSÍMETRO		RESPOSTAS DOS DOSÍMETROS									
FABRICANTE E MODELO	SÉRIE	N-40	N-60	N-80	N-100	N-250	N-300	N-360	N-420	S-Cs	S-Co
Termo Electron Corporation / EPD Mk 2.3	D1 - 172079	0,95	0,82	0,96	1,02	1,14	1,15	1,10	1,04	1,00	0,84
	D2 - 174597	0,96	0,85	0,94	1,00	1,14	1,15	1,09	1,04	0,84	0,84
	D3 - 174602	0,97	0,88	0,95	1,00	1,12	1,12	1,08	1,02	0,84	0,85
Canberra / Dosicard / Eurisys Mesures / 41277	U1 - 02-0497	0,02	0,31	0,67	0,95	1,03	1,04	1,16	1,07	0,86	0,76
	U2 - 02-0498	0,05	0,42	0,81	1,13	0,84	0,87	1,04	0,95	0,86	0,78
	U3 - 02-0499	0,06	0,42	0,86	1,07	1,13	1,14	1,25	1,11	0,87	0,79
Thermo Scientific / Rad Eye PRD 42506/71	Z1 - 012838	0,01	0,17	0,38	0,55	1,10	1,08	1,07	0,85	0,96	0,96
	Z2 - 012927	0,08	0,18	0,38	0,63	1,00	1,07	1,14	0,91	0,99	0,97
	Z3 - 012937	0,08	0,22	0,50	0,76	1,16	1,18	1,30	1,02	1,09	0,94
Aloka / MyDose Alarm / ADM-112	W1 - 98779	0,01	0,29	0,64	1,00	0,90	0,92	0,91	0,90	0,69	0,66
	W2 - 98815	0,01	0,31	0,70	1,00	0,86	0,88	0,92	0,88	0,68	0,67

O valor de incerteza expandida, estimada para o processo de calibração de ativos no LNMRI-IRD é de  $\pm 5\%$  ( $k=2$ ). Dessa forma, a barra de erros apresentada no gráfico das respostas dos dosímetros foi de 2,5%.

Para facilitar a visualização foram colocados no gráfico apenas os valores médios de respostas entre os exemplares do mesmo modelo, conforme Figura 4.1.

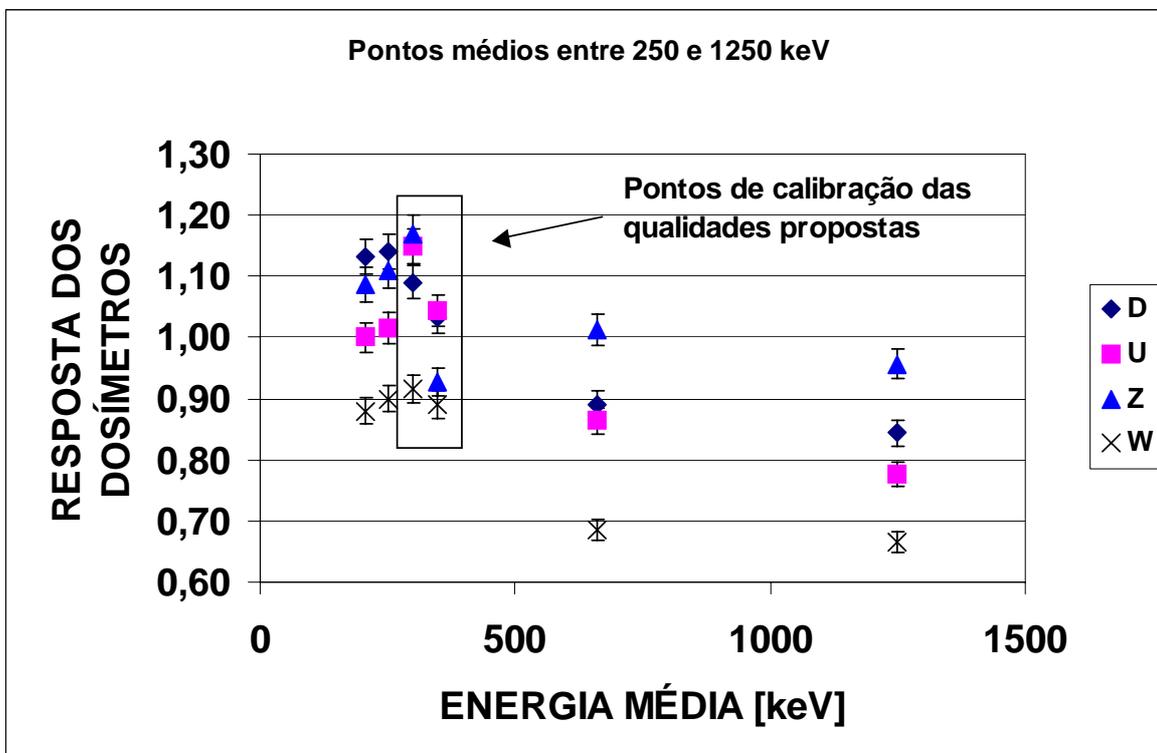


Figura 4.1 – Curvas de respostas dos dosímetros submetidos à calibração.

A região demarcada abrange os pontos de calibração que se tornaram possíveis de obter graças às novas qualidades de radiações propostas nesta pesquisa: N-360 (298 keV) e N-420 (348 keV).

Nesta região é possível observar que todos os dosímetros apresentaram mudança no comportamento de suas respostas.

Entretanto, o comportamento das respostas dos dosímetros EPD e My Dose pode ser considerada normal em vista da queda esperada nas respostas destes dosímetros, quando a energia aumenta em direção aos valores das energias do  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$ .

Já os dosímetros Dosicard e Radeye apresentaram variações bruscas nas curvas de suas respostas, completamente diferentes das dos demais instrumentos

submetidos aos mesmos testes. A comprovação de que as respostas obtidas são verdadeiramente características dos dosímetros Dosicard e Radeye foi obtida com a realização dos testes com três exemplares de cada um dos dois modelos. Sendo que a resposta aqui avaliada é a média das respostas dos três exemplares.

Se for feita uma análise do gráfico da Figura 4.1, subtraindo-se a nova região proposta nesta pesquisa, deixaria de ficar evidente as variações de respostas comentadas no parágrafo anterior. Sendo assim, podemos afirmar que os resultados acima demonstraram a eficácia dos novos pontos de energia propostos nesta pesquisa.

Acrescente-se a isto o fato de que a região onde estão os novos pontos abrange três das quatro principais energias do  $^{192}\text{Ir}$  quais sejam: 296 keV, 308 keV e 317 keV.

Esta situação indica que os dosímetros Dosicard e Radeye não estão registrando de forma correta as doses provenientes das radiações emitidas pelo  $^{192}\text{Ir}$ .

Como agravante desta situação, está o fato de que estamos analisando o desempenho de apenas quatro modelos de dosímetros ativos, entre os inúmeros modelos existentes no mercado. Certamente existem muitos instrumentos com desempenhos inferiores aos relatados aqui.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

As treze configurações de energias e proporções de doses, propostas nesta pesquisa, acrescentam aos requisitos de testes da norma IEC 61526 (2005) um conjunto de condições de teste que cobrem todas as quatro atividades avaliadas: radioterapia, medicina nuclear, END e mineração e processamento do combustível nuclear.

Todos os dosímetros apresentaram resultados abaixo do limite de 0,1 proposto na norma IEC 61526. Todavia, considerando as incertezas expandidas apresentadas pelos dosímetros Dosicard # 1, Radeye # 2 e Mydose # 1, podemos afirmar que os resultados comprometeram o desempenho destes instrumentos nos testes. É importante realçar que desempenho destes três instrumentos foi o mesmo, tanto nos testes de raios X quanto de raios gama. Sendo assim, as configurações experimentais de campos mistos, implantadas no LNMRI-IRD/CNEN: N-40+N-100 e S-Cs+S-Co demonstraram sua utilidade ao detectar falhas em três exemplares de dosímetros dos oito submetidos aos testes. Principalmente pelo fato dos dosímetros testados serem amplamente utilizados na área nuclear.

As duas qualidades de radiações desenvolvidas e implantadas no LNMRI-IRD/CNEN: N-360 e N-420 servirão para complementar a faixa de energias requeridas para calibração dos sistemas de monitoração, principalmente com respeito à atividade de radioproteção durante END com irradiadores de  $^{192}\text{Ir}$ . Estas qualidades mostraram sua utilidade com pontos de calibração na faixa de energias entre 250 keV e 662 keV, não cobertas pela norma ISO 4037-3 (1999). Como consequência, os dosímetros passam a avaliar melhor a energia de 298 keV, próxima de três energias do  $^{192}\text{Ir}$ .

Os resultados desta pesquisa cobriram as lacunas de requisitos das normas IEC 61526 (2005) e ISO 4037 (1999), a respeito de ensaio e calibração de sistemas de monitoração individual ao apresentar configurações de energias e proporções de doses.

Pelos resultados obtidos foi mostrada a importância da condição de campos mistos de radiações como parâmetro de influência.

## **CAPÍTULO 6**

### **RECOMENDAÇÕES**

Outra deficiência apontada por esta pesquisa entre os requisitos de testes da norma IEC 61526 (2005) é a falta de previsão para ocorrência de mais de duas componentes do campo misto de radiações, o que pode comprometer o resultado da avaliação de desempenho dos dosímetros. Podemos tomar como exemplo o caso do  $^{192}\text{Ir}$  e suas quatro energias presentes nas atividades de radioterapia e END.

Fica aqui apontada a necessidade de desenvolvimento de testes de influência de campos mistos com mais de duas componentes de radiações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBROSI P., BUCHHOLZ G., BÖHM J., GRIFFITH R.V., HERRMANN D. AND STRACHOTINSKY C., 1994, "Results of the IAEA Intercomparison for Individual Monitoring. Radiat. Prot. Dosim., n. 54, pp. 5-17.

AMBROSI, P. 2004. "Quality Factors for Photons: Measurement of photon energy and dose rate", Radiat. Prot. Dosim., v. 112, pp. 483 – 486.

BAKSHI A. K., SRIVASTAVA K, VARADHARAJAN G., PRADHAN A.S. AND KHER R. K., 2007, "Development of an algorithm for TLD badge system for dosimetry in the field of X and gamma radiation in terms of Hp(10)". Radiat. Prot. Dosim. V. 123, n. 2, pp. 148 - 155.

BOLOGNESE-MILSZTAJN, T., GINJAUME, M., LUSZIK-BHADRA, M., VANHAVERE, F., WAHL, W. AND WEEKS, A. 2004. "Active personal dosimeters for individual monitoring and other new developments", Radiat Prot Dosim., v. 112, pp. 141 – 168.

BUERMANN L., GARGIONI E. AND KRAMER H.M., 2001, "Mixed high energy photon and electron radiation fields for calibrating radiation protection dosimeters". Radiat. Prot. Dosim. v. 96, n. 1–3, pp. 213–218.

CODATA (2002). Recommended Values of the Fundamental Physical Constants. Committee on Data for Science and Technology.

DELGADO A., 2000, "Mixed Field Dosimetry". In: proceedings of IRPA-10. May. Hiroshima, Japan.

FOULON, F., ROUSSEAU, L., BABADJIAN, L., SPIRKOVITCH, S., BRAMBILLA, A. AND BERGONZO, P. "A New Technique for the Fabrication of Thin Silicon Radiation Detectors". IEEE Trans. Nucl. Sci., v. 46, n. 3, pp. 218-220.

GARGIONI E., BÜERMANN L. AND KRAMER H.M., 2000, "Measurement of H\*(10) and Hp(10) in Mixed High-Energy Electron and Photon Fields". In: proceedings of IRPA-10. May. Hiroshima, Japan.

GINJAUME, M., BOLOGNESE-MILSZTAJN, T., LUSZIK-BHADRA, M., VANHAVERE, F., WAHL, W. AND WEEKS, A. 2007. "Overview of active personal dosimeters for individual monitoring in the European Union". *Radiat. Prot. Dosim.* v. 125, n. 1-4, pp. 261 - 266.

ICRP-60 (1990): *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Elsevier Science Ltd, Amsterdam, The Netherlands.

ICRU-51 (1993): *Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry*. International Commission on Radiation Units & Measurements, Inc. Bethesda, MD 20841-3095 USA.

IEC 61526 (2005): *Radiation protection instrumentation – measurement of personal dose equivalents  $H_p(10)$  and  $H_p(0,07)$  for X, gamma, neutron and beta radiations*. Geneva, IEC – International Electrotechnical Commission.

ILES, W.J., 1987, Conversion coefficients from air kerma to ambient dose equivalent for the international standard organization – wide narrow and low series of reference filtered X radiation. NRPB Report R 206.

ISABELLE CLAIRAND, LARA STRUELENS, JEAN-MARC BORDY, JOSIANE DAURES, JACQUES DEBROAS, MARC DENOZIÈRES, LAURENT DONADILLE, JEAN GOURIOU, CHRISTIAN ITIÉ, PEDRO VAZ, AND FRANCESCO D'ERRICO. 2008. "Intercomparison of active personal dosimeters in interventional radiology". *Radiat. Prot. Dosim.*, v. 129, pp. 340 - 345.

ISO 4037-1 (1996): *X and gamma reference radiation for calibrating doseimeters de dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 1: Radiation characteristics and production methods*. Geneva, ISO – International Organization for Standardization.

ISO 4037-2 (1997): *X and gamma reference radiation for calibrating doseimeters de dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 2: Dosimetry for Radiation Protection over the Energy Ranges 8 keV to 1,3 MeV and 4 MeV to 9 MeV*. Geneva, ISO – International Organization for Standardization.

ISO 4037-3 (1999): *X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters de dose rate 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*. Geneva, ISO – International Organization for Standardization.

KIM J.-L., CHANG S.-Y. AND B.-H. KIM., 1999, “IAEA/RCA personal dosimeter intercomparison results for the KAERI TLD system”. *Radiat. Prot. Dosim.* v. 85, n. 1–4, pp. 153–157.

Laboratoire National Henri Becquerel – LNHB <<http://www.nucleide.org>>; <<http://laraweb.free.fr>>.

LAITANO, R.F., PANI, R., PELLEGRINI, R. AND TONI, M.P., 1990, Energy Distributions and air-kerma rates of ISO and BIPM Reference filtered X radiations. ENEA publication RT/AMB/90.

LOPEZ PONTE, M. A., CASTELLANI, C.M., CURRIVAN, I., VANDIJK, J. W. E., FALK, R., OLKO, P. AND WERNLI, C., 2004, “A catalogue of dosimeters and dosimetric services within Europe—an update”. *Radiat. Prot. Dosim.* v. 112, n. 1, pp. 45–68.

LUSZIK-BHADRA, M., PERLE, S. and MCDONALD, J.C. 2007. “Electronic personal dosimeters will replace passive dosimeters in the near future”, *Radiat. Prot. Dosim.*, n. 123, pp. 546 - 553.

National Nuclear Data Center – NNDC <<http://www.nndc.bnl.gov>>

PEAPLE, L.H.J., BIRCH, R. AND MARSHALL, M., 1989, Measurements of the ISO series of filtered radiation. United Kingdom Atomic Energy Authority, Report R 13424.

PRADHAN A.S., 2002, “Photon energy response of luminescence dosimeters and its impact on assessment of Hp(10) and hp(0.07) in mixed fields of varying energies of photons and beta radiation”. *Radiat. Prot. Dosim.* v. 101, n. 1–4, pp. 173–178.

PRLIC, I., SURIC MIHIC M., AND VUCIC, Z., 2008, “Active electronic personal dosimeter in interventional radiology”. *Radiat. Prot. Dosim.* v. 132, pp. 308 - 312.

READ, L.R. AND HAGREEN, M., 1987, The ISO narrow spectrum series of filtered X radiations at NPL. NPL report RS (ext) 92.

REHAK, P. 2004. "Silicon radiation detectors". IEEE Trans. Nuc. Sci. V. 51, n. 5 , pp. 2492-2497.

SCHUHMACHER, H. and FANTUZZI, E., 2008, "A co-ordinated network for radiation dosimetry (CONRAD): an overview". Radiat. Prot. Dosim. v. 131, n. 1, pp. 3-6.

SEELENTAG, W.W., PANZER, W., DREXLER, G., PLATZ, L. AND SANTNER, F., 1979, Catalogue of spectra for the calibration of doseimeters. GSF Bericht, Munich.

TOSHIYUKI ONODERA, KEITARO HITOMI, AND TADAYOSHI SHOJI. "Fabrication of Indium Iodide X- and Gamma-Ray Detectors". IEEE Trans Nucl. Sci. v. 53, n. 5, pp. 3055-3059.

VAN DIJK, J. W. E., 2006, "On the assessment of the performance of personal doseimeters and individual monitoring services". Radiat. Prot. Dosim. v. 120, n. 1-4, pp. 250-258.

VIM (2007): *Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia* - Portaria INMETRO nº 029 de 1995 – Rio de Janeiro.

ZIELCZYNSKI, M., 2004, "A new approach to the dosimetry of mixed radiation using a recombination chamber". Radiat. Prot. Dosim. v. 110, n. 1-4, pp. 267-271.

ZORKO, B., MILJANIC, S., VEKIC, B., ŠTUHEC, M., GOBEC, S. AND RANOGAJEK-KOMOR, M., 2006, "Intercomparison of dosimetry systems based on CaF<sub>2</sub>:Mn TL detectors". Radiat. Prot. Dosim. v. 119, n. 1-4, pp. 300-305.

## APÊNDICE A

### DEFINIÇÕES

Conforme descrito na norma ISO 4037 (1999), IEC 61526 (2005) e VIM (2007).

**Camada semi-redutora, CSR, (kerma no ar):** espessura de determinado material metálico que atenua o feixe de radiação de tal maneira que a taxa de kerma no ar fica reduzida à metade de seu valor original.

Nesta definição, as contribuições de todas as radiações espalhadas, além daquelas eventualmente presentes nos feixes, são consideradas excluídas.

**Característica de resposta:** é a relação entre um estímulo e a resposta correspondente, sob condições definidas.

Exemplo:

A força eletromotriz de um termopar como função da temperatura.

Observações:

- 1) A relação pode ser expressa na forma de uma equação matemática, uma tabela numérica ou um gráfico.
- 2) Quando o estímulo varia como uma função do tempo, uma forma de característica de resposta é a função de transferência (“transformada de Laplace” da resposta dividida pelo estímulo).

**Condições de referência:** são condições de uso, prescritas para ensaio de desempenho de um instrumento de medição ou para intercomparação de resultados de medições (VIM).

Observação: As condições de referência geralmente incluem os valores de referência ou as faixas de referência para as grandezas de influência que afetam o instrumento de medição.

Condições de referência representam um conjunto de grandezas de influência para as quais o fator de calibração do instrumento é válido, sem qualquer necessidade de correção.

Na norma ISO 4037-2 (1997), por exemplo, são estabelecidos os seguintes valores de referência:

- a) Temperatura ambiente: 293,15 K (20 °C);
- b) Pressão atmosférica: 101,325 kPa (1 atm); e

c) Umidade relativa no ar: 65%.

**Condições de utilização:** são condições de uso para as quais as características metrológicas especificadas de um instrumento de medição mantêm-se dentro de limites especificados.

Observação:

As condições de utilização geralmente especificam faixas ou valores aceitáveis para o mensurando e para as grandezas de influência.

Na norma ISO 4037-2 (1997), por exemplo, são estabelecidos os seguintes valores de faixas de utilização:

- a) Temperatura ambiente: 291,15 K a 295,15 K;
- b) Pressão atmosférica: 86 kPa a 106 kPa; e
- c) Umidade relativa: 30% a 75%.

Segundo informações contidas na referida norma, caso o instrumento opere fora destas faixas os resultados das medições podem ter seu valor de incerteza aumentado.

**END:** ensaios não destrutivos executados de tal maneira que não produzam dano ao item sob avaliação, como por exemplo: testes com fontes de radiações ionizantes ou ultra-som.

**Energia efetiva,  $E_{\text{eff}}$ , (de raios X numa faixa de energias):** Energia de raios X monoenergéticos que possuem a mesma CSR.

**Energia média de fótons,  $\bar{E}$ :** é a razão definida pela equação A.1:

(A.1)

$$\bar{E} = \frac{\int_0^{E_{\text{max}}} \Phi_E E dE}{\int_0^{E_{\text{max}}} \Phi_E dE}$$

Onde:

$\bar{\Phi}_E$  é a derivada da fluência  $\Phi_E$  dos fótons primários de energia  $E$  com respeito às energias entre  $E$  e  $E+dE$ , definida na equação A.2 como:

$$\Phi_E = \frac{d\Phi(E)}{dE}$$

Nesta pesquisa esta definição foi abreviada para energia média.

**Equivalente de dose individual, Hp(10):** é o equivalente de dose em tecido mole, conforme definido na publicação ICRU-51 (1993), em um ponto específico no corpo humano, na profundidade de 10 mm. A unidade de Hp(10) é em  $J.kg^{-1}$  com nome especial de Sv.

**Equivalente de dose individual, Hp(0,07):** é o equivalente de dose, conforme definido acima, porém em profundidade de 0,07 mm, ou seja: na superfície da pele.

**Espectro estreito:** espectro de raios X com filtração adicional bastante densa (Pb e Sn) de modo a eliminar as componentes de mais baixa energia. O código N vem da palavra “narrow” em inglês.

**Fator de calibração (da câmara de ionização associada a determinado dispositivo de medição):** representa a razão do valor verdadeiro convencional da grandeza medida pelo instrumento dividida pela indicação do instrumento, corrigida para as condições de referência estabelecidas.

**Grandeza ou parâmetro de influência:** é grandeza que não é o mensurando, mas que afeta o resultado da medição deste.

Exemplos:

- a) A temperatura de um micrômetro usado na medição de um comprimento;
- b) A frequência na medição da amplitude de uma diferença de potencial em corrente alternada;
- c) A concentração de bilirrubina na medição da concentração de hemoglobina em uma amostra de plasma sanguíneo humano;
- d) A indicação de um dosímetro, constituído de câmara de ionização não selada, é influenciada pela temperatura e pressão atmosférica no ambiente em que se encontra operando. Apesar de ser necessário o conhecimento destas duas grandezas para determinação da dose, a medição destas não é o objetivo principal da medição.

Idealmente, a calibração deveria ser executada em condições de referência. Como isto nem sempre é possível, um pequeno intervalo em torno dos valores de referência pode ser aplicado. Os desvios do fator de calibração sob condições de referência, causados por estes desvios deveriam ser, em princípio, corrigidos. Na prática, entretanto, a incerteza requerida serve de parâmetro para definir se a grandeza de influência deve ser tomada em conta, por meio de fatores de correção, ou mesmo seus efeitos podem ser incorporados à incerteza. Durante testes de tipo, todos os valores de grandezas de influência que não são objeto do teste, devem ser fixados dentro de faixas estabelecidas.

**Monitor:** instrumento usado para monitorar a estabilidade da taxa de kerma no ar durante a irradiação, ou para comparar valores de kerma no ar após sucessivas irradiações.

**Qualidade de radiação:** configuração de feixe de raios X, como kV e filtração adicional que padroniza o espectro de radiação.

**Resposta:** é razão entre a indicação do instrumento e o valor verdadeiro convencional da grandeza sendo medida.

Observação: a resposta geralmente varia com a distribuição de espectros e de direções das radiações incidentes.

**Testes de tipo:** teste de conformidade efetuado em um ou mais exemplares representativos da produção de um dado instrumento.

**Valor verdadeiro convencional:** é o valor atribuído a uma grandeza específica e aceito, às vezes por convenção, como tendo uma incerteza apropriada para uma dada finalidade.

Exemplos:

a) Em um determinado local, o valor atribuído a uma grandeza, por meio de um padrão de referência, pode ser tomado como um valor verdadeiro convencional;

b) O CODATA (2002) recomendou o valor para a constante de Avogadro como sendo  $A = 6,022\ 141\ 79 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ .

Observações:

1) “Valor verdadeiro convencional” é, às vezes, denominado valor designado, melhor estimativa do valor, valor convencional ou valor de referência. “Valor de referência”,

neste sentido, não deve ser confundido com “valor de referência” no sentido usado na observação do termo “Condições de referência”.

2) Frequentemente, um grande número de resultados de medições de uma grandeza é utilizado para estabelecer um valor verdadeiro convencional.

## APÊNDICE B

Tabela B.1 – Lista de fabricantes de filmes utilizados na Europa.

Fabricante	Tipo
Foma Bohemia Ltd (Cz)	Monitoring Film R10 +R2
Kodak (USA)	Kodak Type II Monitoring Film
Agfa (D)	Agfa PM

Tabela B.2 – Lista de fabricantes de TLD utilizados na Europa.

TLD-100	Thermo Electron (antiga Harshaw/Bicron NE)
GR-200	Beijing Shiyang Radiation Detector Works, China.
MCP-N	TLD Poland (antiga TLD Niewiadomski)
MTS-N	TLD Poland (former TLD Niewiadomski)
LiF	Não determinado
DTG-4	Produção Russa
LiF:Mg,Cu,P	Não determinado
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> :Mn	RADOS, Finlândia
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> :Mn 4 O <sub>7</sub> : Cu	Panasonic, Japão
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> :Cu,Ag,P	Vinca, Servia e Montenegro
MgB <sub>4</sub> O <sub>7</sub> : Dy,Na	Vinca, Servia e Montenegro
CaSO <sub>4</sub> :Dy	Não determinado
CaSO <sub>4</sub> :Tm	Panasonic, Japão
CaF <sub>2</sub>	Não determinado

## APÊNDICE C

Tabela C.1 – Relação de radiações presentes nas atividades avaliadas.

RADIONUCLÍDEO	EMISSOR	ENERGIA [keV]	INTENSIDADE [POR 100 DESINTERGRAÇÕES]	DOSE MeV/Bq-s
Ac-228	Beta, eletron e gama	338	11	0,0381
		911	26	0,235
		969	16	0,153
Am/Be	Gama e neutron	60	???	???
Am-241	Alfa, eletron e gama	60	36	0,02138
Bi-210	Beta, alfa e gama	266	50	0,133
		305	28	0,084
Bi-214	Beta e gama	609	46	0,281
		1120	15	0,1692
		1765	15	0,272
Co-60	Beta e gama	1173	100	1,1715
		1333	100	1,3323
Cs-137	Beta e gama	662	85	0,5631
F-18	Beta e gama	511	194	???
Ga-67	Eletron e gama	93	38	0,03621
		185	21	0,039518
		300	17	0,05
Hg-206	Beta, eletron e gama	305	31	0,94
I-123	Eletron, X e gama	31	13	0,00382
		159	83	0,1324
I-125	Eletron e X	31	21	0,00619
I-131	Beta e gama	365	81	0,364
		637	10	0,0559
I-132	Beta e gama	523	16	0,084
		630	13	0,084
		668	99	0,659
		773	76	0,584
		955	18	0,168
I-133	Beta e gama	530	87	0,461
I-134	Beta e gama	595	11	0,066
		622	11	0,066
		847	95	0,811
		884	65	0,575
		1072	15	0,160
		1136	10	0,103
I-135	Beta e gama	1132	23	0,256
		1260	29	0,362
		1678	10	0,160
Ir-192	Beta e gama	296	29	0,0850
		308	30	0,0916
		317	83	0,2618
		468	48	0,2238
Kr-85m	Beta e gama	151	75	0,1130
		305	14	0,0427

Tabela C.2 – Relação de radiações presentes nas atividades avaliadas.

<b>RADIONUCLÍDEO</b>	<b>EMISSOR</b>	<b>ENERGIA [keV]</b>	<b>INTENSIDADE [POR 100 DESINTERGRAÇÕES]</b>	<b>DOSE MeV/Bq-s</b>
Kr-87	Beta e gama	403	50	0,2
Kr-88	Beta e gama	196	26	0,051
		835	13	0,108
		1530	11	0,167
		2196	13	0,289
		2392	35	0,830
Pa-234	Beta, eletron e gama	95	12	0,0117
		98	20	0,0194
		131	18	0,0237
		883	10	0,0850
		946	13	0,1270
Pb-206	Gama	344	29	0,099
		516	92	0,480
		537	30	0,160
		803	99	0,800
		881	67	0,590
Pb-212	Beta, eletron e gama	75	10	0,00769
		77	17	0,01320
		239	44	0,10400
Pb-214	Beta, eletron e gama	77	11	0,0081
		295	19	0,0570
		352	38	0,1323
RX	X	4.000 a 18.000		
RX	X	50	???	
		80	???	
RX	X	80	???	
		100	???	
		120	???	
RX	X	120	???	
		150	???	
RX	X	150	???	
		200	???	
		250	???	
RX	X	250	???	
		300	???	
		350	???	
		400	???	
Sm-153	Eletron, beta, X e gama	42	30	0,01280
		47	10	0,00426
		103	29	0,03018

Tabela C.3 – Relação de radiações presentes nas atividades avaliadas.

<b>RADIONUCLÍDEO</b>	<b>EMISSOR</b>	<b>ENERGIA [keV]</b>	<b>INTENSIDADE [POR 100 DESINTERGRAÇÕES]</b>	<b>DOSE MeV/Bq-s</b>
Tc99m	Eletron e gama	141	89	0,1251
Tl-201	Eletron , X e gama	69	27	0,01500
		71	46	0,02600
		80	16	0,01030
		168	10	0,01674
Tl-206	Beta, eletron e gama	71	10	0,0071
		73	17	0,0123
		216	74	0,1600
		266	86	0,2285
		453	93	0,4210
		457	22	0,1020
		687	90	0,6200
		1022	69	0,7000
Tl-208	Beta e gama	511	23	0,1155
		583	85	0,4930
		861	12	0,1069
		2615	99	2,5925
Tl-210	Beta, eletron e gama	296	79	0,2300
		800	99	0,7913
		1070	12	0,1300
		1210	17	0,2000
		1316	21	0,2700
		2430	10	0,2200
U-235	Alfa e gama	144	11	0,01576
		186	57	0,10620
Xe-133	Beta, eletron, X e gama	31	39	0,01237
		81	38	0,03080
Xe-133m	Eletron, X e gama	30	46	0,01354
		34	11	0,00329
		233	10	0,02332
Xe-135	Beta e gama	250	90	0,225
Xe-135m	Eletron e gama	527	80	0,4222

## APÊNDICE D

Search parameters:

Nucleus:137CS

Results:

Dataset #1:

Authors: E. BROWNE, J. K. TULI Citation: Nuclear Data Sheets 108,2173 (2007)

Parent Nucleus	Parent E(level)	Parent J $\pi$	Parent T <sub>1/2</sub>	Decay Mode	GS-GS Q-value (keV)	Daughter Nucleus	Decay Scheme
<sup>137</sup> Cs 55	0.0	7/2+	30.08 y 9	$\beta^-$ : 100 %	1175.63 17	<sup>137</sup> Ba 56	

Beta-:

Energy (keV)	End-point energy (keV)	Intensity (%)	Dose ( MeV/Bq-s )
174.32 6	513.97 17	94.70 % 20	0.1651 4
334.65 8	892.13 20	5.8E-4 % 8	1.9E-6 3
416.26 8	1175.63 17	5.30 % 20	0.0221 8

Mean beta- energy: 187.1 keV 10, total beta- intensity: 100.0 % 3, mean beta- dose: 0.1871 MeV/Bq-s 12

Electrons:

	Energy (keV)	Intensity (%)	Dose ( MeV/Bq-s )
Auger L	3.67	7.40 % 10	2.72E-4 4
Auger K	26.4	0.78 % 3	2.06E-4 9
CE K	624.216 3	7.79 % 11	0.0486 7
CE L	655.668 3	1.402 % 20	0.00920 13
CE M	660.364 3	0.300 % 4	0.00198 3
CE N	661.404 3	0.0646 % 9	4.27E-4 6
CE O	661.637 3	0.00965 % 14	6.39E-5 9

Gamma and X-ray radiation:

	Energy (keV)	Intensity (%)	Dose ( MeV/Bq-s )
XR I	4.47	0.91 % 4	4.09E-5 19
XR $\text{K}\alpha_2$	31.817	1.99 % 5	6.34E-4 17
XR $\text{K}\alpha_1$	32.194	3.64 % 10	0.00117 3
XR $\text{K}\beta_3$	36.304	0.348 % 9	1.26E-4 3
XR $\text{K}\beta_1$	36.378	0.672 % 18	2.44E-4 6
XR $\text{K}\beta_2$	37.255	0.213 % 6	7.92E-5 21
	283.5 1	5.8E-4 % 8	1.64E-6 23
	661.657 3	85.10 % 20	0.5631 13

---

## APÊNDICE E

### CONFIGURAÇÃO DE ENERGIAS E PROPORÇÕES DE DOSES

---

Para atender às instruções dos testes relatados na norma IEC 61526 (2005), foram montadas as Tabelas de E.1 a E.13; as quais descrevem as configurações de energias e proporcionalidades de doses a que devem ser submetidos os dosímetros pessoais ativos, como forma de verificar a adequação ou não do desempenho de dosímetros pessoais ativos aos requisitos da norma IEC 61526 (2005).

Observa-se na referida norma que os teste propostos nesta fazem uso de apenas dois componentes de campos mistos.

Coincidentemente durante os procedimentos desta pesquisa foi exatamente esta a quantidade de radiações selecionadas para a maioria das atividades avaliadas.

Exceto para o conjunto de atividades de radioterapia e END (código 1/3), que foram contempladas com a presença de 7 (sete) radiações relevantes, dentro do escopo desta pesquisa.

Sendo assim, as ditas radiações foram associadas aos pares, conforme previsto na referida norma.

Os valores de doses propostos nesta pesquisa acompanharam a proporção observada, tanto no conjunto de atividades radioterapia-END (código 1/3), onde foram apontadas 7 (sete) radiações relevantes; como também com relação a todas as 13 (treze) radiações selecionadas nesta pesquisa.

#### E.1 RADIOTERAPIA E END

As Tabelas de E.1 a E.10 apresentam as duplas de radiações encontradas em conjunto nas atividades de radioterapia e END.

Tabela E.1 – Configuração de qualidade-dose a que devem ser submetidos os dosímetros pessoais ativos.

<b>ATIVIDADE 1 / 3</b>		<b>DOSES [<math>\mu</math>Sv]</b>		
<b>CAMPOS DE RADIAÇÕES</b>		<b>Hp (10)</b>		
<b>S<sub>K</sub></b>	<b>S<sub>L</sub></b>	<b>H<sub>i,K</sub></b>	<b>H<sub>i,L</sub></b>	<b>H<sub>i,K+L</sub></b>
Qualidades		Proporção		
N-360	N-420	6%	6%	12%

Tabela E.2 – Configuração de qualidade-dose a que devem ser submetidos os dosímetros pessoais ativos.

<b>ATIVIDADE 1 / 3</b>		<b>DOSES [<math>\mu</math>Sv]</b>		
<b>CAMPOS DE RADIAÇÕES</b>		<b>Hp (10)</b>		
<b>S<sub>K</sub></b>	<b>S<sub>L</sub></b>	<b>H<sub>i,K</sub></b>	<b>H<sub>i,L</sub></b>	<b>H<sub>i,K+L</sub></b>
Qualidades		Proporção		
N-360	N-420	6%	17%	23%

Tabela E.3 – Configuração de qualidade-dose a que devem ser submetidos os dosímetros pessoais ativos.

<b>ATIVIDADE 1 / 3</b>		<b>DOSES [<math>\mu</math>Sv]</b>		
<b>CAMPOS DE RADIAÇÕES</b>		<b>Hp (10)</b>		
<b>S<sub>K</sub></b>	<b>S<sub>L</sub></b>	<b>H<sub>i,K</sub></b>	<b>H<sub>i,L</sub></b>	<b>H<sub>i,K+L</sub></b>
Qualidades		Proporção		
N-360	L-420	6%	10%	16%

Tabela E.4 – Configuração de qualidade-dose a que devem ser submetidos os dosímetros pessoais ativos.

<b>ATIVIDADE 1 / 3</b>		<b>DOSES [<math>\mu</math>Sv]</b>		
<b>CAMPOS DE RADIAÇÕES</b>		<b>Hp (10)</b>		
<b>S<sub>K</sub></b>	<b>S<sub>L</sub></b>	<b>H<sub>i,K</sub></b>	<b>H<sub>i,L</sub></b>	<b>H<sub>i,K+L</sub></b>
Qualidades		Proporção		
N-360	S-Cs	6%	18%	24%

Tabela E.5 – Configuração de qualidade-dose a que devem ser submetidos os dosímetros pessoais ativos.

<b>ATIVIDADE 1 / 3</b>		<b>DOSES [<math>\mu</math>Sv]</b>		
<b>CAMPOS DE RADIAÇÕES</b>		<b>Hp (10)</b>		
<b>S<sub>K</sub></b>	<b>S<sub>L</sub></b>	<b>H<sub>i,K</sub></b>	<b>H<sub>i,L</sub></b>	<b>H<sub>i,K+L</sub></b>
Qualidades		Proporção		
N-360	S-Co	6%	21%	27%

Tabela E.6 – Configuração de qualidade-dose a que devem ser submetidos os dosímetros pessoais ativos.

<b>ATIVIDADE 1 / 3</b>		<b>DOSES [<math>\mu</math>Sv]</b>		
<b>CAMPOS DE RADIAÇÕES</b>		<b>Hp (10)</b>		
<b>S<sub>K</sub></b>	<b>S<sub>L</sub></b>	<b>H<sub>i,K</sub></b>	<b>H<sub>i,L</sub></b>	<b>H<sub>i,K+L</sub></b>
Qualidades		Proporção		
N-420	L-420	6%	10%	16%

Tabela E.7 – Configuração de qualidade-dose a que devem ser submetidos os dosímetros pessoais ativos.

<b>ATIVIDADE 1 / 3</b>		<b>DOSES [<math>\mu</math>Sv]</b>		
<b>CAMPOS DE RADIAÇÕES</b>		<b>Hp (10)</b>		
<b>S<sub>K</sub></b>	<b>S<sub>L</sub></b>	<b>H<sub>i,K</sub></b>	<b>H<sub>i,L</sub></b>	<b>H<sub>i,K+L</sub></b>
Qualidades		Proporção		
N-420	S-Cs	6%	18%	24%

Tabela E.8 – Configuração de qualidade-dose a que devem ser submetidos os dosímetros pessoais ativos.

<b>ATIVIDADE 1 / 3</b>		<b>DOSES [<math>\mu</math>Sv]</b>		
<b>CAMPOS DE RADIAÇÕES</b>		<b>Hp (10)</b>		
<b>S<sub>K</sub></b>	<b>S<sub>L</sub></b>	<b>H<sub>i,K</sub></b>	<b>H<sub>i,L</sub></b>	<b>H<sub>i,K+L</sub></b>
Qualidades		Proporção		
N-420	S-Co	6%	21%	27%

Tabela E.9 – Configuração de qualidade-dose a que devem ser submetidos os dosímetros pessoais ativos.

<b>ATIVIDADE 1 / 3</b>		<b>DOSES [<math>\mu</math>Sv]</b>		
<b>CAMPOS DE RADIAÇÕES</b>		<b>Hp (10)</b>		
<b>S<sub>K</sub></b>	<b>S<sub>L</sub></b>	<b>H<sub>i,K</sub></b>	<b>H<sub>i,L</sub></b>	<b>H<sub>i,K+L</sub></b>
Qualidades		Proporção		
L-420	S-Cs	10%	18%	28%

Tabela E.10 – Configuração de qualidade-dose a que devem ser submetidos os dosímetros pessoais ativos.

<b>ATIVIDADE 1 / 3</b>		<b>DOSES [<math>\mu</math>Sv]</b>		
<b>CAMPOS DE RADIAÇÕES</b>		<b>Hp (10)</b>		
<b>S<sub>K</sub></b>	<b>S<sub>L</sub></b>	<b>H<sub>i,K</sub></b>	<b>H<sub>i,L</sub></b>	<b>H<sub>i,K+L</sub></b>
Qualidades		Proporção		
L-420	S-Co	10%	21%	31%

## E.2 MEDICINA NUCLEAR

A Tabela E.11 apresenta as 2 (duas) radiações selecionadas nas atividades de medicina nuclear.

Tabela E.11 – Configuração de qualidade-dose a que devem ser submetidos os dosímetros pessoais ativos.

<b>ATIVIDADE 2</b>		<b>DOSES [<math>\mu</math>Sv]</b>		
<b>CAMPOS DE RADIAÇÕES</b>		<b>Hp (10)</b>		
<b>S<sub>K</sub></b>	<b>S<sub>L</sub></b>	<b>H<sub>i,K</sub></b>	<b>H<sub>i,L</sub></b>	<b>H<sub>i,K+L</sub></b>
Qualidades		Proporção		
N-200	S-Cs	31%	69%	100%

## E.3 END

Por sua vez, a Tabela E.12 apresenta 2 (duas) das radiações selecionadas nas atividades de END.

Tabela E.12 – Configuração de qualidade-dose a que devem ser submetidos os dosímetros pessoais ativos.

<b>ATIVIDADE 3</b>		<b>DOSES [<math>\mu</math>Sv]</b>		
<b>CAMPOS DE RADIAÇÕES</b>		<b>Hp (10)</b>		
<b>S<sub>K</sub></b>	<b>S<sub>L</sub></b>	<b>H<sub>i,K</sub></b>	<b>H<sub>i,L</sub></b>	<b>H<sub>i,K+L</sub></b>
<b>Qualidades</b>		<b>Proporção</b>		
<b>S-Cs</b>	<b>S-Co</b>	<b>18%</b>	<b>21%</b>	<b>39</b>

#### E.4 INDÚSTRIA NUCLEAR

Já na Tabela E.13 são apresentadas as duas radiações selecionadas nesta pesquisa, dentro da atividade relacionada à mineração e processamento de combustíveis (reatores e ciclo de combustíveis).

Tabela E.13 – Configuração de qualidade-dose a que devem ser submetidos os dosímetros pessoais ativos.

<b>ATIVIDADE 4</b>		<b>DOSES [<math>\mu</math>Sv]</b>		
<b>CAMPOS DE RADIAÇÕES</b>		<b>Hp (10)</b>		
<b>S<sub>K</sub></b>	<b>S<sub>L</sub></b>	<b>H<sub>i,K</sub></b>	<b>H<sub>i,L</sub></b>	<b>H<sub>i,K+L</sub></b>
<b>Qualidades</b>		<b>Proporção</b>		
<b>N-40</b>	<b>N-100</b>	<b>51%</b>	<b>49%</b>	<b>100%</b>

## APÊNDICE F

### CARACTERÍSTICAS DAS DUAS QUALIDADES DE RADIAÇÕES PROPOSTAS NESTA PESQUISA

Na Tabelas a seguir estão as características principais das qualidades de radiações, com base na norma ISO 4037 (1999): filtrações adicionais, necessárias para padronização dos feixes de radiações; e camada semi-redutora para assegurar que o feixe tenha a mesma energia efetiva do estabelecido em norma.

#### F.1 FILTRAÇÃO ADICIONAL DAS QUALIDADES DE RADIAÇÕES

Os valores de filtrações adicionais das qualidades de radiações desenvolvidas nesta pesquisa estão apresentadas na Tabela F.1.

Tabela F.1 – Filtração adicional das qualidades de radiações propostas.

MATERIAL	QUALIDADE DE RADIAÇÃO	ENERGIA MÉDIA [keV]	ESPESSURA DA FILTRAÇÃO [mm]
Pb	N-360	298	7,2
Sn	N-360	298	10,6
Pb	N-420	348	9,5
Sn	N-420	348	30,5

A qualidade N-360 possui diferença de potencial elétrico de 360 kV e filtração adicional de 7,2 mm de chumbo e 10,6 mm de estanho.

Enquanto a qualidade N-420 possui diferença de potencial elétrico de 420 kV e filtração adicional de 9,5 mm de chumbo e 30,5 mm de estanho.

## F.2 CAMADA SEMI-REDUTORA (CSR)

Os valores de camada semi-redutora, também das duas qualidades de radiações propostas, são aqui apresentados.

Foram feitas estimativas dos valores que depois foram determinados seguindo o procedimento em norma.

### F.2.1 CSR CALCULADAS

Na Tabela F.2 são mostrados os valores de 1ª e 2ª CSR calculados para as qualidades desenvolvidas.

Tabela F.2 – Valores de 1ª e 2ª CSR calculados para as qualidades desenvolvidas.

MATERIAL	QUALIDADE DE RADIAÇÃO	ENERGIA MÉDIA keV	CSR [mm]
1ª CSR	N-360	298	7,73
2ª CSR	N-360	298	7,79
1ª CSR	N-420	348	9,22
2ª CSR	N-420	348	9,28

### F.2.2 CSR MEDIDAS

Com base nas qualidades de radiações propostas, foram determinados os valores de 1ª e 2ª camadas semi-redutoras (CSR) para implantação no LNMRI-IRD/CNEN.

Para isto, foram seguidas as instruções contidas na norma ISO 4037-1 (1996).

Na Figura F.1 é mostrado o gráfico de percentual de absorção do feixe de radiações *versus* filtração aplicada da qualidade N-360.

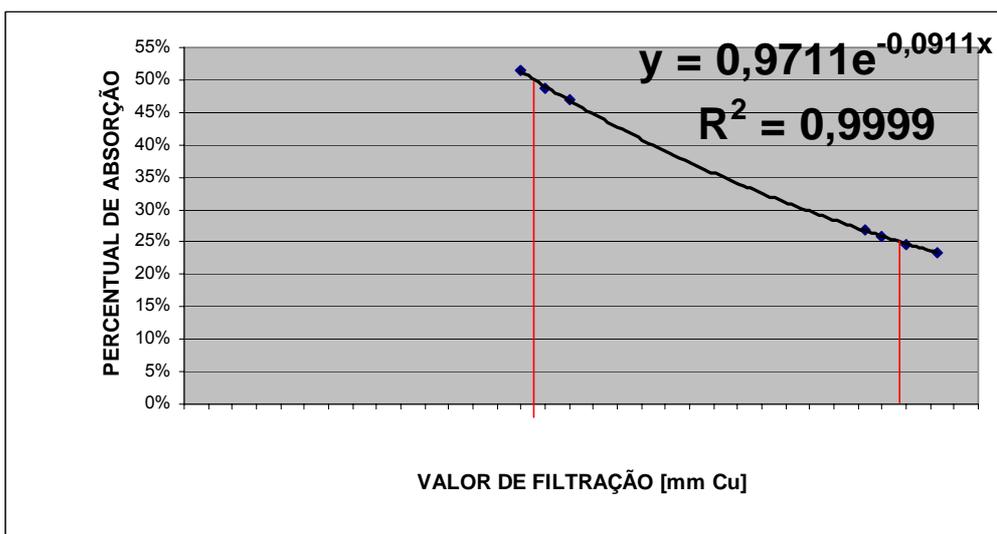


Figura F.1 – Gráfico de percentual de absorção do feixe de radiações *versus* filtração aplicada da qualidade N-360.

Na Tabela F.3 são mostrados os valores de 1ª e 2ª CSR determinados para a qualidade de radiação N-360.

Tabela F.3 – valores de 1ª e 2ª CSR da qualidade de radiação N-360.

CSR	SOLUÇÃO DE EQUAÇÃO $y=ae^{-bx}$		CSR ESTIMADA NESTA PESQUISA	DESVIO
	a	0,9711	0,5149	
	b	0,0911	-0,6638	
1ª CSR (mm Cu)			7,29	7,73
	a	0,9711	0,2574	
	b	0,0911	-1,3570	
2ª CSR (mm Cu)			14,90	7,79
			7,61	-2,3%

Já na Figura F.2 é mostrado o gráfico de percentual de absorção do feixe de radiações *versus* filtração aplicada da qualidade N-420.

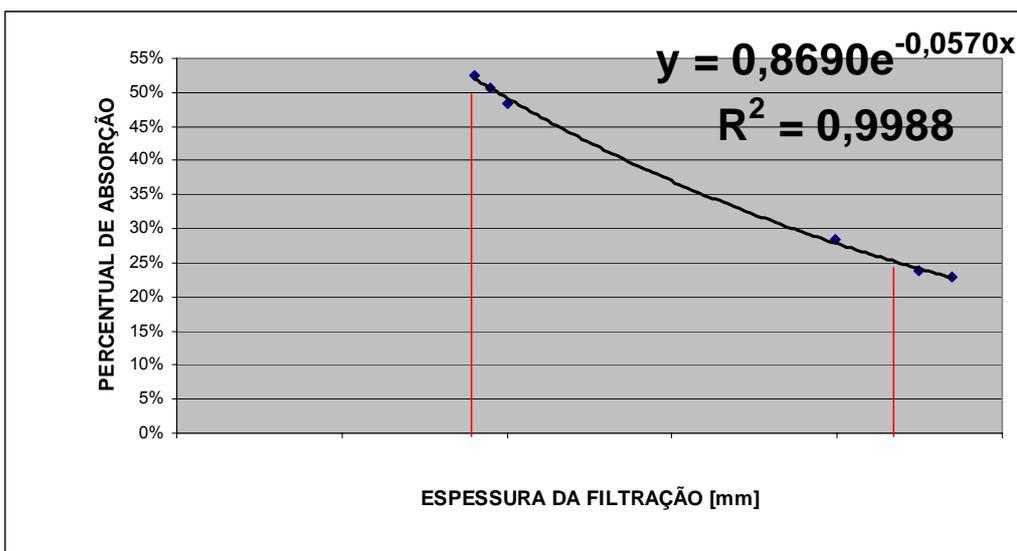


Figura F.2 – Gráfico de percentual de absorção do feixe de radiações *versus* filtração aplicada da qualidade N-420.

Na Tabela F.4 são mostrados os valores de 1ª e 2ª CSR da qualidade de radiação N-420.

Tabela F.4 – Valores de 1ª e 2ª CSR determinados para a qualidade de radiação N-420.

CSR	SOLUÇÃO DE EQUAÇÃO $y=ae^{-bx}$		CSR ESTIMADA NESTA PESQUISA	DESVIO	
	a	b			
1ª CSR (mm Cu)	a	0,8690	0,5753	9,22	5,2%
	b	0,0570	-0,5528		
2ª CSR (mm Cu)	a	0,8690	0,2877	9,28	31,1%
	b	0,0570	-1,2459		
			21,87		
			12,17		

## APÊNDICE G

Tabela G.1 – Planilha de incertezas do dosímetro Dosicard em gama na condição A.

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO								
S <sub>(i)</sub>	FONTE DE INCERTEZA	VALOR ±	Unidade	Distr.	DIV.	C <sub>(i)</sub>	u(i) (Admencional)	V, Veff
1	Hi,K	0,00000	Admensional	normal	1,00	0,0714286		
2	Hi,L	0,33333	Admensional	normal	1,00	0,0714286	0,023810	
3	Hi,K+L	0,00000	Admensional	normal	1,00	-0,0714286		
4								
5								
6								
7								
8	U (S-Co + <sup>137</sup> Cs) - A	-0,048 ± 0,048						
9								
10								
uc Incerteza padrão Combinada							0,02381	
<b>U Incerteza padrão Expandida (95,45%)</b>					<b>k=</b>	<b>2,00</b>	<b>0,047619048</b>	

Tabela G.2 – Planilha de incertezas do dosímetro Dosicard em gama na condição B.

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO								
S <sub>(i)</sub>	FONTE DE INCERTEZA	VALOR ±	Unidade	Distr.	DIV.	C <sub>(i)</sub>	u(i) (Admencional)	V, Veff
1	Hi,K	0,00000	Admensional	normal	1,00	0,0681818		
2	Hi,L	0,00000	Admensional	normal	1,00	0,0681818		
3	Hi,K+L	0,00000	Admensional	normal	1,00	-0,0650826		
4								
5								
6								
7								
8	U (S-Co + <sup>137</sup> Cs) - B	0,000 ±						
9								
10								
uc Incerteza padrão Combinada								
<b>U Incerteza padrão Expandida (95,45%)</b>					<b>k=</b>	<b>2,00</b>		

Tabela G.3 – Planilha de incertezas do dosímetro RadEye em gama na condição A.

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO								
S <sub>(i)</sub>	FONTE DE INCERTEZA	VALOR ±	Unidade	Distr.	DIV.	C <sub>(i)</sub>	u(i) (Admencional)	V, Veff
1	Hi,K	0,05774	Admensional	normal	1,00	0,0714286	0,004124	
2	Hi,L	0,05508	Admensional	normal	1,00	0,0714286	0,003934	
3	Hi,K+L	0,08819	Admensional	normal	1,00	-0,0714286	-0,006299	
4								
5								
6								
7								
8	Z (S-Co + <sup>137</sup> Cs) - A	0,002 ± 0,014						
9								
10								
uc Incerteza padrão Combinada							0,00850	
<b>U Incerteza padrão Expandida (95,45%)</b>					<b>k=</b>	<b>2,00</b>	<b>0,01699006</b>	

Tabela G.4 – Planilha de incertezas do dosímetro RadEye em gama na condição B.

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO								
S <sub>(i)</sub>	FONTE DE INCERTEZA	VALOR ±	Unidade	Distr.	DIV.	C <sub>(i)</sub>	u(i) (Admencional)	V, Veff
1	Hi,K	0,03333	Admensional	normal	1,00	0,0681818	0,002273	
2	Hi,L	0,01667	Admensional	normal	1,00	0,0681818	0,001136	
3	Hi,K+L	0,05774	Admensional	normal	1,00	-0,0650826	-0,003758	
4								
5								
6								
7								
8	Z (S-Co + <sup>137</sup> Cs) - B	-0,003 ±		0,008				
9								
10								
uc Incerteza padrão Combinada							0,00454	
<b>U Incerteza padrão Expandida (95,45%)</b>					<b>k=</b>	<b>2,00</b>	<b>0,009072107</b>	

Tabela G.5 – Planilha de incertezas do dosímetro MyDose em gama na condição A.

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO								
S <sub>(i)</sub>	FONTE DE INCERTEZA	VALOR ±	Unidade	Distr.	DIV.	C <sub>(i)</sub>	u(i) (Admencional)	V, Veff
1	Hi,K	0,00000	Admensional	normal	1,00	0,0714286		
2	Hi,L	0,00000	Admensional	normal	1,00	0,0714286		
3	Hi,K+L	0,57735	Admensional	normal	1,00	-0,0714286	-0,041239	
4								
5								
6								
7								
8	W (S-Co + <sup>137</sup> Cs) - A	0,003 ±		0,082				
9								
10								
uc Incerteza padrão Combinada							0,04124	
<b>U Incerteza padrão Expandida (95,45%)</b>					<b>k=</b>	<b>2,00</b>	<b>0,08247861</b>	

Tabela G.6 – Planilha de incertezas do dosímetro MyDose em gama na condição B.

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO								
S <sub>(i)</sub>	FONTE DE INCERTEZA	VALOR ±	Unidade	Distr.	DIV.	C <sub>(i)</sub>	u(i) (Admencional)	V, Veff
1	Hi,K	0,00000	Admensional	normal	1,00	0,0681818		
2	Hi,L	0,00000	Admensional	normal	1,00	0,0681818		
3	Hi,K+L	0,33333	Admensional	normal	1,00	-0,0650826	-0,021694	
4								
5								
6								
7								
8	W (S-Co + <sup>137</sup> Cs) - B	-0,044 ±		0,043				
9								
10								
uc Incerteza padrão Combinada							0,02169	
<b>U Incerteza padrão Expandida (95,45%)</b>					<b>k=</b>	<b>2,00</b>	<b>0,04338843</b>	

Tabela G.7 – Planilha de incertezas do dosímetro Dosicard em X.

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO								
S <sub>(i)</sub>	FONTE DE INCERTEZA	VALOR ±	Unidade	Distr.	DIV.	C <sub>(i)</sub>	u(i) (Admencional)	V, Veff
1	Hi,K	0,0000	Admensional	normal	1,00	0,0087		
2	Hi,L	0,3333	Admensional	normal	1,00	0,0087	0,002907	
3	Hi,K+L	0,3333	Admensional	normal	1,00	-0,0088	-0,002932	
4								
5								
6								
7								
8	U (N-40 + N-100) - Dosímetro U (tese)	0,009	±	0,008				
9								
10								
uc Incerteza padrão Combinada							0,00413	
<b>U Incerteza padrão Expandida (95,45%)</b>					<b>k=</b>	<b>2,00</b>	<b>0,008258102</b>	

Tabela G.8 – Planilha de incertezas do dosímetro Rad Eye em X.

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO								
S <sub>(i)</sub>	FONTE DE INCERTEZA	VALOR ±	Unidade	Distr.	DIV.	C <sub>(i)</sub>	u(i) (Admencional)	V, Veff
1	Hi,K	0,0145	Admensional	normal	1,00	0,0498	0,000723	
2	Hi,L	0,3512	Admensional	normal	1,00	0,0498	0,017472	
3	Hi,K+L	0,0577	Admensional	normal	1,00	-0,0513	-0,002962	
4								
5								
6								
7								
8	U (N-40 + N-100) - Dosímetro Z (tese)	0,031	±	0,035				
9								
10								
uc Incerteza padrão Combinada							0,01774	
<b>U Incerteza padrão Expandida (95,45%)</b>					<b>k=</b>	<b>2,00</b>	<b>0,035472165</b>	

Tabela G.9 – Planilha de incertezas do dosímetro MyDose em X.

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO								
S <sub>(i)</sub>	FONTE DE INCERTEZA	VALOR ±	Unidade	Distr.	DIV.	C <sub>(i)</sub>	u(i) (Admencional)	V, Veff
1	Hi,K	0,0000	Admensional	normal	1,00	0,0108		
2	Hi,L	4,3333	Admensional	normal	1,00	0,0108	0,046763	
3	Hi,K+L	2,6667	Admensional	normal	1,00	-0,0104	-0,027742	
4								
5								
6								
7								
8	U (N-40 + N-100) - Dosímetro W (tese)	-0,0370	±	0,109				
9								
10								
uc Incerteza padrão Combinada							0,05437	
<b>U Incerteza padrão Expandida (95,45%)</b>					<b>k=</b>	<b>2,00</b>	<b>0,108744641</b>	