



CNEN/SP

ipen Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares

AUTARQUIA ASSOCIADA A UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

ESTABELECIMENTO DE CAMPOS PADRÕES DE RAIOS-X DE ENERGIA BAIXAS, NÍVEL radioproteção, PARA CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS

ELIANE CARMO OLIVEIRA

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear.

Orientador:
Dr. Linda V. E. Caldas

São Paulo
1995

048e

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**ESTABELECIMENTO DE CAMPOS PADRÕES DE
RAIOS-X DE ENERGIAS BAIXAS, NÍVEL
RADIOPROTEÇÃO, PARA CALIBRAÇÃO DE
INSTRUMENTOS**

ELIANE CARMO OLIVEIRA



Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear.

Orientadora: Dra. Linda V. E. Caldas

SÃO PAULO

1995

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Agradeço

À Dra. Linda V. E. Caldas pela orientação e oportunidade de desenvolver este trabalho;

Ao Sr. Marcos Xavier, do Serviço de Calibração e Dosimetria, pelas sugestões e companherismo durante o desenvolvimento deste trabalho;

Ao Sr. José Carlos Sabino, da Oficina Mecânica do IPEN, pela confecção dos filtros adicionais, conjunto de colimadores e respectivo suporte do sistema de calibração de raios-X;

Ao Srs. Claudinei T. Cescon e Víctor Vivolo, da Divisão de Eletrônica do IPEN, pelo auxílio na solução dos problemas apresentados pelos equipamentos;

Aos Srs. Paulo E. de O. Lainetti e José Antônio B. de Souza, do Departamento de Tecnologia do Combustível, pelo fornecimento de material para a confecção dos filtros adicionais das qualidades de campos nível Radioproteção;

Aos pesquisadores Manoel Ramos e Margareth Araújo, do Instituto de Radioproteção e Dosimetria, pela calibração do sistema de medida utilizado na implantação das qualidades de campos nível Radioproteção;

À Prof. Dra. Marília T. Cruz, do Instituto de Física da Universidade de São Paulo, pelo empréstimo da câmara de ionização utilizada na determinação das taxas de exposição das qualidades de campos nível Radioproteção implantadas;

Ao CNPq pelo auxílio financeiro;

Aos meus irmãos e sobrinha, pelo carinho;

Aos amigos sempre presentes.

**ESTABELECIMENTO DE CAMPOS PADRÕES DE RAIOS-X DE
ENERGIAS BAIXAS, NÍVEL RADIOPROTEÇÃO, PARA
CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS**

Eliane Carmo Oliveira

RESUMO

Foram estabelecidas sete qualidades de campos padrões de raios-X de energias baixas, nível Radioproteção, no Laboratório de Calibração do IPEN. Estes campos de radiação reproduzem cinco das qualidades implantadas no National Physical Laboratory, Inglaterra, com energias entre 16 e 38 keV, e duas qualidades recomendadas pela International Standard Organization, com energias de 33 e 48 keV. As condições de calibração de instrumentos, nível Radioterapia, entre 14 e 21 keV, também foram testadas. Foi estudada a dependência energética de tipos diferentes de monitores de radiação portáteis, como câmaras de ionização e detectores Geiger-Müller.

**ESTABLISHMENT OF STANDARD LOW ENERGY X-RAYS
FIELDS, RADIOPROTECTION LEVEL, FOR CALIBRATION OF
INSTRUMENTS**

Eliane Carmo Oliveira

ABSTRACT

Seven standard low energy X-rays fields were established, Radioprotection level, at the Calibration Laboratory of IPEN. Five of the standard calibration qualities used at the National Physical Laboratory, England, with energies between 16 and 38 keV, and two recommended by the International Standard Organization, with energies of 33 and 48 keV, were reproduced. The calibration conditions, Radiotherapy level, from 14 to 21 keV, were also verified. Different portable radiation monitors as ionization chambers and Geiger-Müller detectors were studied in relation to their energy dependence.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	1
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	
2.1 Produção de raios-X e qualidades dos campos produzidos	4
2.1.1 Efeito Fotoelétrico	11
2.1.2 Efeito Compton	11
2.2 Medida da Radiação	12
2.2.1 Câmaras de Ionização	13
2.2.2 Detectores Geiger-Müller	18
2.3 Calibração de Instrumentos	19
2.4 Procedimentos de Calibração	21
2.5 Determinação do Fator de Calibração	23
3 MATERIAIS E MÉTODOS	
3.1 Sistema de Raios-X de Energias Baixas (60 kV)	26
3.2 Sistemas de Medida	28
3.3 Instrumentos Auxiliares	29
4 TESTES PRELIMINARES	
4.1 Testes de Estabilidade e de Corrente de Fuga dos Sistemas de Medida Utilizados	30
4.1.1 Testes de Estabilidade a Curto e a Longo Prazos	30
4.1.2 Teste de Corrente de Fuga	34

4.2	Teste de Repetibilidade da Câmara Monitora	35
4.3	Variação da Resposta da Câmara Monitora com a Corrente Aplicada ao Tubo de Raios-X	35
4.4	Uniformidade dos Campos de Radiação Produzidos	37
4.5	Contribuição da Radiação Espalhada às Medidas Obtidas	45
5	QUALIDADES DE CAMPOS NÍVEL RADIOTERAPIA	
5.1	Reprodução das Qualidades de Campos Nível Radioterapia	48
5.2	Determinação dos Fatores de Calibração para o Sistema de Medida A, para as Qualidades de Campos Nível Radioterapia	53
5.3	Calibração dos Sistemas de Medida C e D nos Campos de Raios-X de Energias Baixas Nível Radioterapia	55
6	QUALIDADES DE CAMPOS NÍVEL RADIOPROTEÇÃO	
6.1	Escolha das Qualidades de Campos a serem Implantadas	57
6.2	Alterações Necessárias no Sistema de Calibração	59
6.2.1	Confecção do Suporte e Respectivos Colimadores	60
6.2.2	Confecção dos Filtros Adicionais Referentes às Qualidades de Campos Nível Radioproteção	62
6.3	Determinação das CSRs das Qualidades de Campos NPL Implantadas	66
6.4	Qualidades de Campos ISO de Energias Baixas Nível Radioproteção	69
6.5	Determinação das Taxas de Exposição e dos Fatores de Calibração para o Sistema de medida E, para as Qualidades de Campos Implantadas, Nível Radioproteção	72

**7 CALIBRAÇÃO E TESTES DE INSTRUMENTOS,
NÍVEL RADIOPROTEÇÃO**

7.1	Calibração e Testes de Câmaras de Ionização	78
7.2	Calibração e Testes de Detectores Geiger-Müller	86
7.3	Testes realizados com Canetas Dosimétricas	92

8 CONCLUSÕES 97

APÊNDICE	100
----------------	-----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
----------------------------------	-----

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente aumento da aplicação da radiação ionizante na Indústria, Medicina e Agricultura, sob a forma de irradiadores, equipamentos de raios-X e fontes não-seladas, vem aumentando, conseqüentemente, a utilização de instrumentos que permitem medir os efeitos diretos e indiretos provocados pela radiação, com o objetivo de controlá-los. Entre esses instrumentos estão os chamados "monitores de radiação", utilizados em Radioproteção, e os "dosímetros clínicos", utilizados em Radioterapia. A utilização e os propósitos para os quais se aplicam esses instrumentos exigem que suas respostas estejam dentro de limites aceitáveis de exatidão, de acordo com recomendações internacionais específicas^{14,15,17,20}, de forma a garantir a confiabilidade nos resultados das medidas obtidas.

Essa confiabilidade pode ser assegurada através da calibração dos instrumentos, de onde se obtém o fator de calibração, que é um fator multiplicativo que converte o valor indicado nos instrumentos para o que se chama de "valor real" da grandeza medida.

Os procedimentos utilizados para a calibração variam de acordo com o tipo de instrumento a ser calibrado, com o tipo de radiação (alfa, beta, gama ou X) e a energia da radiação que este instrumento irá detectar e, ainda, com o propósito para o qual o instrumento será utilizado (monitoração pessoal ou de área, por exemplo).

O Laboratório de Calibração de Instrumentos do IPEN é constituído de vários laboratórios com as seguintes finalidades:

1. Calibração de dosímetros clínicos, nível Radioterapia, com radiação gama de ^{60}Co e ^{137}Cs ;
2. Calibração de dosímetros clínicos, nível Radioterapia, com raios-X (60 kV);
3. Calibração de monitores portáteis, nível Radioproteção, com radiação gama de ^{60}Co e ^{137}Cs ;
4. Calibração de instrumentos, níveis Radioterapia e Radioproteção, com radiação beta de ^{147}Pm , ^{204}Tl e $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$; e
5. Calibração de instrumentos, nível Radioproteção, com radiação alfa de ^{241}Am , ^{239}Pu , ^{238}Pu , ^{244}Cm e ^{233}U .

No caso da utilização de sistemas de raios-X para calibração de instrumentos, o mesmo sistema pode ser usado em procedimentos de calibração níveis Radioterapia e Radioproteção. Neste caso, devem ser considerados alguns fatos, tais como¹⁵:

1. Enquanto que em procedimentos de Radioterapia são utilizadas altas taxas de exposição, em Radioproteção tais taxas são bem menores. Sendo assim, para se obter taxas menores torna-se necessário aplicar correntes menores ao tubo de raios-X, utilizar filtração adicional mais espessa e distâncias de calibração mais longas;
2. Os instrumentos utilizados em Radioproteção têm volumes maiores que aqueles utilizados em Radioterapia, e, portanto, o campo de radiação produzido deve ter diâmetro maior, que é obtido por meio de colimadores maiores;
3. Devido à necessidade de se calibrar os instrumentos a distâncias maiores para produzir taxas de exposição menores, a sala de calibração deve possuir dimensões maiores como forma de reduzir a radiação espalhada produzida nas paredes e no teto.

A complementação da calibração de instrumentos utilizados em propósitos de Radioproteção com raios-X de energias baixas é de grande importância para os usuários dos instrumentos, porque eles terão oportunidade de efetuar medidas mais confiáveis no seu campo de trabalho, conhecendo-se a dependência energética dos instrumentos em questão. Alguns instrumentos podem apresentar variações de resposta de 50 % ou mais, dependendo da faixa de energia dos campos de radiação que irão detectar.

Além disso, a necessidade de se conhecer o comportamento dos instrumentos para campos de energias baixas pode ser explicada quando se considera a produção de radiação espalhada em paredes, teto e chão, nos próprios locais de operação onde está situado o equipamento ou a fonte responsável pela radiação. Normalmente, o espectro da radiação espalhada produzido apresenta uma faixa mais larga de energia, que pode variar de poucos keV até a energia máxima apresentada pelo feixe primário produzido. Outro fato importante a ser considerado é a presença de radiação de fuga, que pode ser constatada ao se realizar uma monitoração de área para verificar as condições de radioproteção no local de trabalho. Neste caso, o feixe primário produzido, ao atravessar uma parede, é atenuado e, dependendo de sua energia, também pode produzir um campo de radiação com espectro mais largo de energia nas salas vizinhas àquela onde está localizado um dos tipos de equipamentos mencionados.

O estudo da dependência energética de um instrumento também pode se tornar interessante após um serviço de manutenção. Conhecendo sua dependência energética, pode-se constatar se ocorreu a troca de um tubo Geiger-Müller por um outro tubo com características muito diferentes daquelas apresentadas pelo tubo original, o que pode alterar o comportamento de tal instrumento, normalmente apresentado em manual.

O objetivo deste projeto é estabelecer os campos padrões de raios-X de energias baixas, nível Radioproteção, calibrar, testar e estudar a dependência energética de instrumentos (monitores portáteis).

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo serão apresentados alguns aspectos teóricos e experimentais básicos sobre a utilização de sistemas de raios-X para a calibração de instrumentos, além de definições de alguns termos, apresentação de sistemas de medida utilizados na implantação de campos de raios-X, procedimentos de calibração e tipos de detectores a gás que se pretende calibrar.

2.1 Produção de Raios-X e Qualidades dos Campos Produzidos

Os raios-X são produzidos por transições eletrônicas internas, onde o excesso de energia é eliminado na forma de radiação eletromagnética monoenergética (raios-X característicos), ou sempre que um material for bombardeado por um feixe de elétrons com alta velocidade.

Todo tubo de raios-X é constituído por um catodo e um anodo, como mostra a Figura 2.1, localizados numa ampola de vidro na qual se produz vácuo. O catodo consiste de um filamento constituído de material de alto número atômico, geralmente tungstênio. Quando este filamento é aquecido, os elétrons são liberados de sua superfície e são acelerados pela diferença de potencial entre o catodo e o anodo, também chamado de alvo do tubo.

Já que no espaço entre o catodo e o anodo é produzido alto vácuo, os elétrons não colidem com as moléculas de gás ao atravessá-lo e, sendo assim, esses elétrons adquirem altas velocidades. Quando são bruscamente freados pelo anodo, produzem raios-X, que são denominados radiação de frenamento ou “Bremsstrahlung”, em todas as direções. Pelo menos metade desses elétrons são absorvidos no próprio alvo; o restante constitui o que se chama de “feixe primário”. A maior parte da energia dos elétrons é convertida em calor que deve ser removido do anodo por um sistema de refrigeração a óleo ou a água.

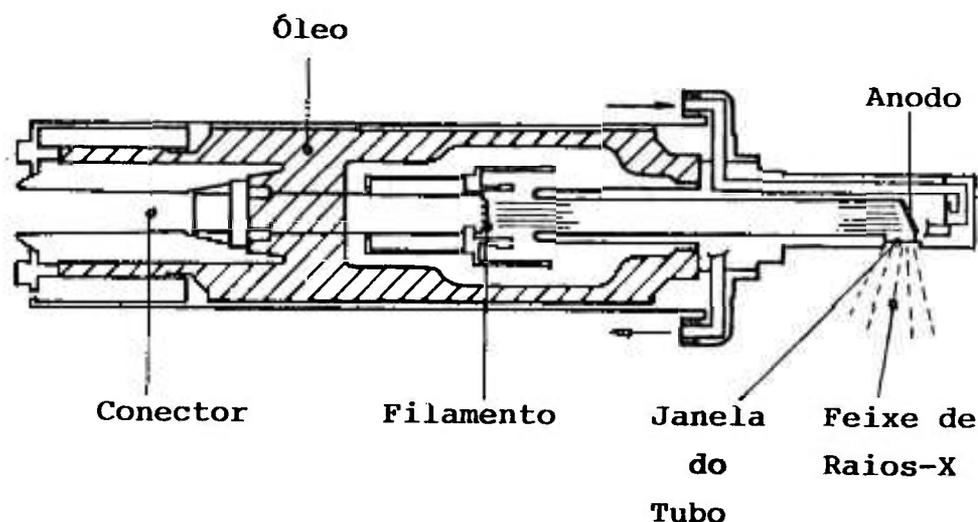


Figura 2.1 - Esquema básico de um tubo de raios-X

Para entender a operação do circuito de um tubo de raios-X é necessário saber que a corrente do tubo depende da tensão aplicada, para uma determinada excitação do filamento. Quando se aplica uma tensão baixa ao tubo, a corrente produzida é pequena devido aos efeitos da carga espacial. Ao redor do filamento é formada uma nuvem de elétrons que tende a repelir os elétrons liberados de volta ao filamento, a menos que se aplique uma tensão suficiente entre o catodo e o anodo para expulsar os elétrons e empurrá-los em direção ao anodo assim que eles são produzidos. Ao aumentar a tensão, os efeitos da carga espacial diminuem fazendo com que o fluxo de elétrons liberados do filamento aumente e

os elétrons sejam atraídos para o anodo. Finalmente, ao se aumentar ainda mais a tensão, a região de saturação é atingida. Esta região é definida como aquela em que todos os elétrons liberados são atraídos para o anodo. Para alcançar a estabilidade na operação de um tubo de raios-X, a corrente utilizada para excitar os elétrons deve ser mantida constante.

Existem dois tipos de tubos para a produção de raios-X: aqueles que produzem feixes de raios-X fluorescentes ou característicos e aqueles que produzem os feixes de raios-X fortemente filtrados. No caso de feixes de raios-X fluorescentes utiliza-se um material para o alvo (folha fina) para a produção de fluorescência, o qual é posicionado a 45° do feixe principal; o feixe de raios-X fluorescente resultante é detectado a 45° da folha, totalizando um ângulo de 90° entre o feixe principal e o produzido.

Para o segundo tipo de tubo, que normalmente opera com potencial constante, o espectro teórico resultante mostra uma variação linear com a energia, cujo valor máximo no espectro corresponde à situação em que a energia cinética adquirida pelo elétron acelerado é toda utilizada para produzir o fóton. Porém, na prática, a filtração inerente, composta pelo alvo, pela janela do tubo e pelo sistema de refrigeração, absorve a parte dos fótons de raios-X de menor energia do espectro. Neste trabalho foi utilizado o segundo tipo de tubo de raios-X apresentado (potencial constante).

O espectro de raios-X varia de máquina para máquina, ou seja, mesmo com tubos de características iguais, e com raios-X produzidos pela mesma tensão aplicada, alguns efeitos podem provocar grandes diferenças entre os espectros produzidos. Isto ocorre de forma mais pronunciada com feixes de fótons de energias baixas, devido a diferenças do efeito de atenuação no ar³⁹.

Logo, conclui-se que é necessário determinar as características de cada sistema, já que o tipo de espectro resultante da filtração inerente tem pouca validade prática devido à distribuição da energia dos fótons. Para se obter um espectro de maior utilidade são adicionados filtros ao feixe de raios-X, para modificar o espectro final como, por exemplo, os feixes de raios-X utilizados em

Radioterapia, onde são irradiadas camadas profundas e semi-profundas do tecido humano (nível de profundidade em que está localizado o tumor), sem aumentar excessivamente a dose na superfície do tecido pelos fótons de menor energia. Estes filtros devem ser confeccionados com material de alta pureza (99,99%), e normalmente são de alumínio (para tubos de raios-X abaixo de 100 kV) ou cobre (para tubos acima de 100 kV ou em conjunto com os filtros de alumínio para tubos abaixo de 50 kV)¹³. Com a adição desses filtros, o espectro resultante, mais estreito, fornece taxas de exposição menores e, portanto, mais úteis para a calibração de instrumentos utilizados em Radioterapia e Radioproteção, por exemplo.

Portanto, no caso dos feixes de raios-X fortemente filtrados, as filtrações inerente e adicional constituem o que se denomina de filtração total do feixe. Todas estas filtrações constituem parâmetros importantes na especificação de um feixe e devem ser levados em consideração durante a reprodução do mesmo. A Figura 2.2 mostra o espectro contínuo modificado pelo acréscimo das filtrações inerente e total.

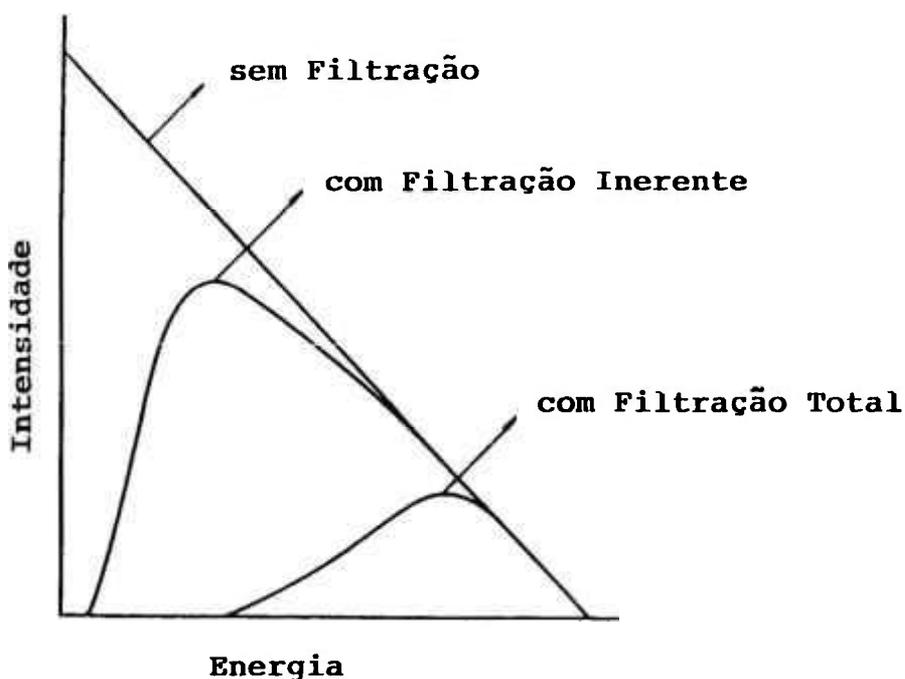


Figura 2.2 - Espectros contínuos típicos de raios-X¹⁷

Conclui-se que o conhecimento completo de um feixe de raios-X num ponto de interesse deve incluir não só a grandeza medida, mas também informações sobre a qualidade da radiação, que diz respeito à distribuição espectral da energia do feixe produzido, ou seja, ao poder de penetração deste feixe. A qualidade de um feixe de raios-X de energias baixas ou médias, utilizados em propósitos de Radioterapia, é normalmente expressa em termos da camada semi-redutora, e para feixes de raios-X utilizados em propósitos de Radioproteção pode ser dada em termos de sua energia equivalente¹⁵. A qualidade de um feixe de raios-X é necessária, por exemplo, para o cálculo da dose absorvida, para a conversão de uma grandeza dosimétrica em outra, para a calibração de instrumentos e para os projetos de equipamentos radiológicos.

A Camada Semi-Redutora (CSR) "é a espessura de material absorvedor que atenua o feixe de radiação de forma que sua intensidade seja reduzida à metade de seu valor inicial"²⁶. Nesta definição a contribuição da radiação espalhada não deve ser considerada^{14,22}.

A determinação da CSR de um feixe de raios-X é feita através da construção da curva de atenuação $\ln(I_d) = f(d)$, onde I_d é a intensidade transmitida através de um filtro ou absorvedor de espessura d ²³. Da curva de atenuação determina-se, diretamente, a primeira e a segunda CSRs. A segunda CSR é aquela que atenua o feixe de radiação de tal forma que sua intensidade seja reduzida a 25 % de seu valor inicial. O quociente entre a primeira e a segunda CSRs é denominado "Coeficiente de Homogeneidade", h . Na determinação da CSR, o valor encontrado deve estar entre, no máximo, ± 2 % (nível Radioterapia) e ± 5 % (nível Radioproteção), para que os campos de raios-X produzidos sejam considerados de mesma energia efetiva, segundo as recomendações internacionais específicas^{14,23}. Porém, para qualidades de campos produzidas com tubos operando abaixo de 50 kV, as diferenças encontradas entre valores de CSR reproduzidos podem ser ainda maiores³⁹.

Os materiais utilizados como filtros adicionais e como absorvedores, para a determinação das CSRs, segundo as recomendações internacionais, devem

apresentar uma pureza de, no mínimo, 99,9 %, porém, segundo Piubéli³⁴, “a determinação da CSR em feixes de energias baixas (24 a 50 kV) com absorvedores comerciais, cuja pureza varia entre 98,7 e 98,9 %, não introduz erros significativos na determinação da taxa de exposição”. A Figura 2.3 mostra um exemplo de curva de atenuação.

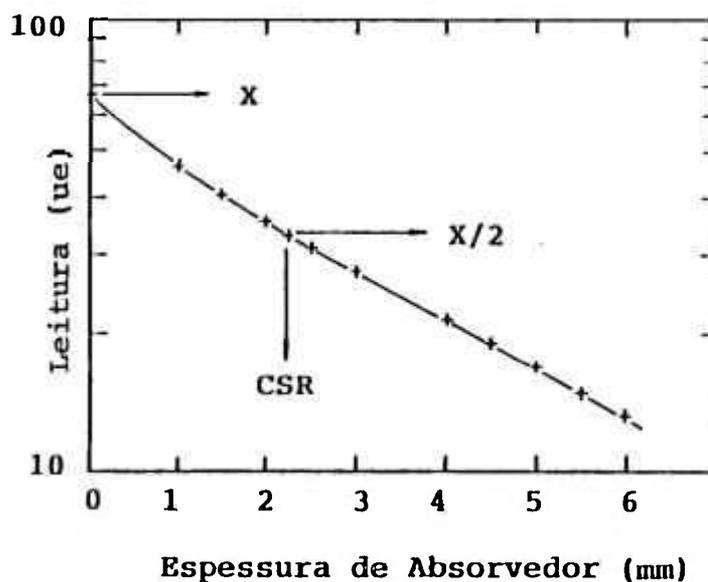


Figura 2.3 - Método de determinação da CSR por interpolação^{14,15}

A Energia Equivalente, também conhecida como Energia Efetiva, é definida como a energia de um feixe de raios-X monoenergético que possui a mesma CSR do feixe de raios-X em questão^{14,15,23,39}.

Existem ainda dois outros fatores importantes que devem ser considerados, mas que não fazem parte da determinação da qualidade do campo de radiação. Estes fatores podem influenciar o valor da CSR obtido. São eles: a uniformidade do campo e a radiação espalhada.

A uniformidade deve ser verificada em toda a extensão do campo de radiação no plano normal ao feixe de raios-X para assegurar que não ocorram variações significantes durante a irradiação dos instrumentos que serão calibrados¹⁷. Os limites máximos permissíveis de variação na uniformidade de campos de raios-X utilizados na calibração de instrumentos estão entre $\pm 1\%$

(nível Radioterapia) e $\pm 5\%$ (nível Radioproteção), segundo recomendações internacionais^{14,23}.

Quanto à radiação espalhada, que pode ser produzida pelos próprios componentes do sistema de calibração, sua contribuição às medidas realizadas deve obedecer aos mesmos limites impostos à uniformidade do campo de radiação, para cada propósito (Radioterapia e Radioproteção, respectivamente), já que sua contribuição pode aumentar o valor da CSR determinado e, por conseguinte, a energia do campo de radiação. Existem vários métodos para se verificar a presença da radiação espalhada. Neste trabalho, os métodos utilizados são aqueles recomendados pela ISO^{22,23}. Esses métodos serão descritos durante a apresentação dos resultados obtidos nessa verificação.

Com relação à interação com a matéria, os raios-X são classificados como radiação eletromagnética, assim como os raios gama, por não possuírem carga e massa em repouso. Os mecanismos de interação da radiação eletromagnética dependem de sua energia. Nesses mecanismos, os fótons são absorvidos ou desviados de sua trajetória original através de uma única interação, denominada "ionização primária", através da qual um elétron é arrancado de um átomo por diferentes processos. Esse elétron liberado, chamado de "elétron secundário", pode possuir quase tanta energia quanto o fóton inicial e, por sua vez, produzirá novas ionizações até consumir toda a sua energia. Em outras palavras, pode-se dizer que a ionização da matéria, quando atravessada por fótons, é consequência dos elétrons secundários, já que cada fóton em princípio produz muito poucas ionizações, ou às vezes só uma ionização.

Os processos pelos quais os fótons interagem com a matéria são: efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares. Para a faixa de energia estudada, os processos de interação predominantes são o efeito fotoelétrico e o efeito Compton; portanto, somente estes processos serão apresentados aqui, de forma sucinta.

2.1.1 Efeito Fotoelétrico

Neste processo de interação, um fóton de energia $h\nu$ interage com um átomo de forma que um elétron seja removido. Este elétron irá adquirir uma energia cinética igual a $(h\nu - E_i)$, onde E_i é a energia de ligação referente à camada eletrônica da qual o elétron foi removido. O fóton desaparece e em seu lugar surge um "fotoelétron" e um átomo excitado, que voltará a seu estado fundamental quando um outro elétron ocupar a "lacuna" gerada pela ejeção do elétron que a ocupava. Neste instante, ocorre a produção de raio-X característico, que será emitido do material absorvedor como radiação fluorescente ou como radiação característica espalhada. A probabilidade da absorção fotoelétrica depende da energia do fóton incidente e do número atômico (Z) do material absorvedor²⁶.

2.1.2 Efeito Compton

Este processo de interação ocorre entre o fóton da radiação eletromagnética incidente e um elétron do material absorvedor. Neste processo, o fóton incidente é defletido de um ângulo θ , em relação à direção inicial. O fóton transfere parte de sua energia ao elétron (inicialmente em repouso), que é, então, chamado de elétron de recuo. O ângulo de espalhamento varia com a energia do fóton incidente. A probabilidade de ocorrência do efeito Compton por átomo do absorvedor depende do número de elétrons disponíveis como alvos, ou seja, depende do número atômico (Z) deste absorvedor, e, portanto, aumenta linearmente com Z ²⁶.

2.2 Medida da Radiação

Existem diversos tipos de detectores utilizados nas medidas da radiação, que podem ser caracterizados pela natureza da interação da radiação com o mesmo. A escolha do detector varia de acordo com os propósitos para os quais se pretende utilizá-lo. Entre os diversos tipos têm-se os detectores a gás, os detectores à cintilação, os detectores de nêutrons e os detectores semicondutores. Neste trabalho, serão estudados somente os detectores a gás e dentre eles, somente as câmaras de ionização e os detectores Geiger-Müller, que são os tipos de instrumentos mais utilizados em procedimentos de Radioterapia e de Radioproteção, respectivamente.

O princípio de funcionamento de um detector a gás baseia-se na ionização produzida em seu volume sensível quando da passagem de uma partícula, carregada ou não. Essa ionização pode ser produzida diretamente, no caso de partículas carregadas, ou indiretamente, no caso de partículas não carregadas. Neste trabalho, os processos de detecção ocorrem através da ionização indireta, já que serão utilizados feixes de raios-X. Esta ionização indireta corresponde à ionização originada pelos íons produzidos quando da passagem de uma partícula não carregada na matéria.

Os detectores podem ser classificados quanto ao seu regime de operação, que pode ser do tipo pulso, no caso em que se tem um sinal individual produzido para cada partícula incidente, ou do tipo nível médio, onde o que se mede é um sinal que representa um efeito médio de muitas interações ocorridas no volume sensível do detector.

Um detector a gás é constituído, basicamente, de um cilindro condutor revestido de material condutor, que funciona como catodo. O filamento central representa o anodo. O volume do detector é preenchido por gás ou por uma mistura de gases, a uma pressão relativamente baixa. Entre o catodo e o anodo é aplicada uma diferença de potencial. Quando uma partícula, carregada ou não, atravessa o gás no interior do cilindro, ocorre a ionização e os pares de íons

formados são coletados nos dois eletrodos. A este detector também é acoplado um amplificador de sinal. A Figura 2.4 mostra o esquema básico de um detector a gás.

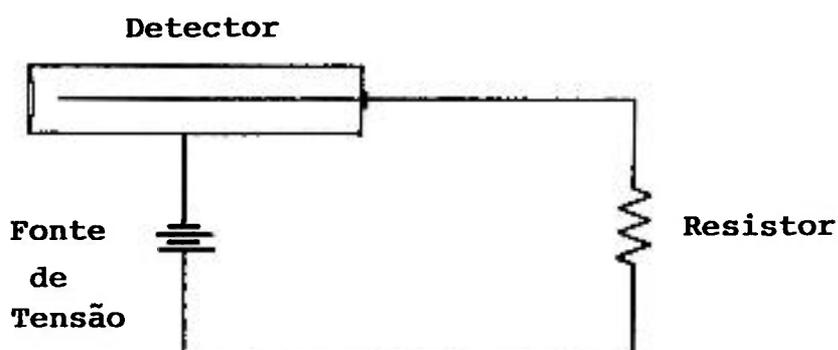


Figura 2.4 - Esquema básico de um detector a gás

2.2.1 Câmaras de Ionização

As câmaras de ionização têm o princípio de funcionamento mais simples de todos os tipos de detectores a gás, cuja operação normal é baseada na coleta de todas as cargas produzidas por ionização direta. A quantidade de pares de íons produzidos depende da energia da radiação ser maior ou menor, ou mais ou menos ionizante; desta forma, a câmara discrimina a energia da radiação e distingue os diferentes tipos de partículas através da altura do sinal produzido. As câmaras de ionização também produzem pulsos de saída muito pequenos (porque apenas a carga produzida é coletada) e, deste modo, poderão ser confundidos com o ruído eletrônico. Sendo assim, torna-se necessário acoplar às câmaras módulos de amplificação de pulsos.

Por apresentarem medidas mais precisas, as câmaras de ionização são usadas como instrumentos padrões primários e secundários, e são amplamente utilizadas na dosimetria de raios-X, particularmente na medida de exposição e na determinação indireta de dose absorvida.

A escolha dos materiais, das dimensões e das formas de uma câmara de ionização depende da finalidade para a qual a mesma será utilizada (para medir exposição ou dose absorvida, por exemplo), bem como do tipo de radiação a ser detectada e de sua energia; logo, conclui-se que existem vários tipos de câmaras de ionização. Além disso, as câmaras normalmente não são seladas, ou seja, o ar em seu interior é o mesmo do ambiente. Por isso é necessário que se faça a correção de suas leituras para a densidade do ar, ou seja, para a temperatura e a pressão ambientais, através de fatores multiplicativos. A umidade também pode afetar as leituras obtidas com esses instrumentos, produzindo uma corrente denominada "corrente de fuga", o que torna necessário o controle da umidade no ambiente do laboratório através de aparelhos de ar-condicionado e desumidificadores. Além disso, costuma-se manter as câmaras, quando não estão sendo utilizadas, em desumidificadores contendo sílica. A correção da leitura de uma câmara de ionização para as variações de temperatura e pressão deve ser feita utilizando-se o fator de correção determinado pela seguinte expressão¹⁴:

$$F_{T,p} = \frac{(273,15 + t) \times P}{(273,15 + T) \times p} \quad (2.1)$$

onde $F_{T,p}$ é o fator de correção de temperatura e pressão, t e p são a temperatura e pressão ambientes, e T e P são a temperatura e pressão padrões.

Normalmente, os valores de T e P são tomados como referências e iguais a 20°C e $101,3\text{ kPa}$, respectivamente. O valor de referência da umidade relativa normalmente é 50% . Porém, segundo Loevinger & Chappell²⁸, "como a dependência da corrente de ionização da umidade é pequena, nenhuma

normalização é necessária se a umidade relativa estiver entre 10 e 70 % durante o procedimento de calibração”.

Como já foi visto anteriormente, existem vários tipos de câmaras de ionização. Dentre eles tem-se dois tipos de câmaras que são consideradas do tipo padrão primário, ou seja, determinam a exposição de forma absoluta, não necessitando de calibração, e obedecem a princípios básicos da Teoria de Dosimetria da Radiação. São elas as Câmaras de Ar Livre, cuja utilização está restrita a energias menores que 300 keV, e as Câmaras de Ionização do Tipo Cavitário, que são utilizadas na determinação da exposição no ar, em feixes de fótons de energias altas.

Tem-se, ainda, a Câmara de Ionização Tipo Dedal, que une os princípios de funcionamento das câmaras de ar livre e cavitária, o que permite a determinação da exposição no intervalo de 40 keV a 3 MeV, utilizando apenas um instrumento de medida. Essa câmara não é um padrão primário, porque não mede a exposição segundo sua definição física. Logo, ela é muito utilizada como padrão secundário, pois pode ser padronizada em intervalos de energia em relação às câmaras primárias, ou pode ser utilizada também em medidas rotineiras.

Uma câmara utilizada na determinação da dose absorvida superficial de um material sob irradiação é a Câmara de Extrapolação. Essa câmara permite medir a dose absorvida em função da espessura da camada de ar em seu interior variando-se a distância entre seus eletrodos. Através da medida da ionização produzida por unidade de volume de ar, em função da distância entre os eletrodos, obtém-se uma medida precisa da dose absorvida sob determinada espessura de material de sua janela. Essa câmara é especialmente recomendada para a detecção de radiações pouco penetrantes como a radiação beta.

A maioria das câmaras de ionização apresentam alta dependência energética para raios-X de energias baixas devido à atenuação do feixe em suas próprias paredes. Portanto, para estas energias, o ideal é utilizar-se câmaras de ionização cujas paredes sejam finas o suficiente para evitar esta atenuação¹², ou

que estas câmaras sejam feitas de material que tenha propriedades equivalentes ao ar. Normalmente, esta equivalência é encontrada para materiais de baixo número atômico (tais como alumínio ou plástico). As câmaras especialmente projetadas para detectar radiações de energias baixas são as chamadas Câmaras de Ionização de Placas Paralelas ou Superficiais. Neste tipo de câmara, os eletrodos são distanciados entre si de aproximadamente 5 mm, o que garante que todos os íons produzidos dentro de seu volume sensível sejam coletados⁴. Estas câmaras são utilizadas tanto como padrões secundários como para medidas rotineiras da exposição produzida por campos de raios-X de energias baixas. Portanto, neste trabalho, na implantação das qualidades dos campos padrões foi utilizado somente este tipo de câmaras, com volumes diferentes.

Todas as câmaras de ionização apresentadas até o momento precisam ser acopladas a um instrumento denominado Eletrômetro, utilizado na medida das correntes produzidas nas câmaras de ionização. Um mesmo eletrômetro pode ser acoplado a várias câmaras de ionização, dependendo da ordem de grandeza da corrente produzida na câmara e da escala do eletrômetro. Desta forma, um mesmo eletrômetro pode formar vários sistemas de medida quando associado a câmaras de ionização diferentes, tanto quanto ao tipo (câmaras dedal e de placas paralelas, por exemplo) como quanto ao volume (câmaras de placas paralelas de volumes diferentes, utilizadas para diferentes propósitos - Radioterapia ou Radioproteção, por exemplo).

Normalmente, as câmaras de ionização acopladas aos eletrômetros são denominados Dosímetros⁴¹. Quando esses dosímetros são utilizados para propósitos de Radioterapia, são denominados de Dosímetros Clínicos.

Existem ainda as câmaras de ionização portáteis, utilizadas para a monitoração de área. Estas câmaras possuem várias formas e tamanhos, e não necessitam ser acopladas a eletrômetros externos. Além disso, possuem escalas para medidas de exposição ou dose ou, ainda, para medida de taxas dessas

grandezas. Podem apresentar, ainda, capas de equilíbrio eletrônico, que são ajustadas dependendo da faixa de energia na qual estão sendo utilizadas.

A condição de equilíbrio eletrônico está diretamente ligada à definição da grandeza Exposição. De acordo com esta definição, os elétrons produzidos por fótons devem perder toda sua energia por meio de ionizações num volume específico de ar, e a carga total de mesmo sinal deve ser somada. Entretanto, alguns elétrons produzidos neste volume específico depositam sua energia fora deste mesmo volume, produzindo cargas que não serão consideradas na soma total. Por outro lado, os elétrons produzidos fora do volume específico podem entrar neste volume e ser considerados na soma total das cargas produzidas. Se as cargas perdidas forem compensadas pelas cargas a mais consideradas, existe a condição de equilíbrio eletrônico, necessária para a definição de Exposição, cuja unidade de medida atual, que faz parte do Sistema Internacional, é C/kg. Porém, a unidade antiga de medida, o Roentgen, ainda é muito utilizada, e não faz parte do Sistema Internacional.

Portanto, pode-se concluir que as capas de equilíbrio eletrônico são utilizadas somente para campos de radiação de altas energias; para atenuar os fótons e proporcionar a condição de equilíbrio eletrônico desejada. Neste trabalho, porém, não será necessário utilizar tais capas, já que o estudo foi realizado com energias baixas.

Um outro tipo de câmara de ionização é a caneta dosimétrica, utilizada quando se deseja medir a exposição ou a dose durante um curto período de tempo ou nos casos em que se deseja manter uma observação contínua nas situações em que há variações nas medidas obtidas. A vantagem deste instrumento é que ele fornece a medida da exposição ou dose, de forma direta e rápida. Estes instrumentos são normalmente utilizados para a monitoração individual, e neste caso, deve-se considerar o retroespalhamento provocado pelo próprio usuário, já que ele é posicionado à frente e encostado em seu corpo, à altura do tórax. A principal desvantagem das canetas dosimétricas está no fato de que alguns fatores (como temperaturas altas ou excesso de umidade) podem provocar variações nas medidas obtidas.

2.2.2 Detectores Geiger-Müller

Os detectores Geiger-Müller são os detectores mais utilizados em monitorações de área devido a seu baixo custo, boa sensibilidade, dimensões e circuitos simples (necessitam de pequenos amplificadores de sinal, por exemplo).

Nesse tipo de instrumento o sinal obtido independe do tipo de partícula incidente e da energia da mesma, devido à faixa de tensão aplicada entre os eletrodos em que esse tipo de detector opera. A faixa de tensão aplicada possibilita que seja gerado um campo elétrico entre os eletrodos capaz de fornecer energia suficiente para os pares de íons produzidos de forma que, ao se dirigirem para os respectivos eletrodos, esses pares de íons produzam mais ionizações, e assim por diante. Este processo é conhecido como “multiplicação de cargas”, fenômeno que, como já foi dito, independe tanto do tipo de partícula como de sua energia.

Existem tubos Geiger-Müller de vários tamanhos e formas, constituídos de diversos materiais (tanto o corpo como a janela do tubo), compensados ou não. Os tubos compensados não são os mais adequados para a detecção de raios-X gerados a potenciais menores que 50 kV⁶. Independentemente desse fato, geralmente, todos os tipos de tubos Geiger-Müller apresentam alta dependência energética, principalmente para energias baixas (abaixo de 0,1 MeV) e intermediárias (entre 0,1 e 1,0 MeV)².

2.3 Calibração de Instrumentos

“Calibrar um Instrumento” significa determinar sua resposta a uma exposição ou taxa de exposição conhecida (ou a uma dose ou taxa de dose absorvida), envolvendo o uso de pelo menos um instrumento de referência ou padrão¹⁴.

O termo “calibração” também é definido como uma determinação quantitativa, sob um conjunto controlado de condições padrões, de uma indicação dada por um instrumento em função de um valor de uma grandeza que este instrumento deve acusar¹⁶.

Através da calibração obtém-se um fator multiplicativo, que converte o valor indicado (corrigido para as condições de referência) para o que se chama de “valor real” da grandeza medida, denominado “fator de calibração”. Para cada escala de um instrumento de medida pode-se obter um fator de calibração diferente.

A calibração de um instrumento pode ser feita periodicamente, após conserto do instrumento, antes de expirar o período de validade da calibração periódica, ou a pedido do usuário. Antes da calibração do instrumento ser realizada, deve-se verificar se o instrumento não está contaminado com material radioativo e se ele apresenta boas condições de funcionamento, as quais devem estar de acordo com o seu manual.

Os objetivos principais de um sistema de calibração são¹⁷:

1. Garantir que um instrumento esteja funcionando devidamente;
2. No caso de um instrumento sem ajuste de calibração, garantir que sejam revelados os erros nas suas medidas. Quando o instrumento apresentar a possibilidade de ajuste, esse fato pode levar a um aperfeiçoamento na precisão do mesmo;
3. Submeter o instrumento a testes, como resposta em função da energia e direção da radiação, efeitos ambientais, etc;

4. Fornecer informações aos usuários quanto às características mais importantes dos instrumentos;
5. Fornecer campos padrões de radiação para testes de novos instrumentos (testes de desempenho).

Todas as calibrações realizadas internacionalmente são referenciadas a padrões de medida absoluta. Por isso e devido ao aumento das solicitações de calibração de instrumentos utilizados, criou-se uma rede de laboratórios padrões, classificados como primários, secundários e regionais, sob o apoio da *Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA)* e da *Organização Mundial de Saúde (WHO)*. Como exemplo de laboratórios padrões primários temos o *Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)*, da Alemanha, e o *National Physical Laboratory (NPL)*, da Inglaterra.

O Brasil possui um Laboratório Padrão Secundário (SSDL), localizado no Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), no Rio de Janeiro, e um Laboratório Regional no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), em São Paulo. Ambos possuem sistemas de referência de mesmo nível (secundário).

Os instrumentos de medida, utilizados como padrões (instrumentos de desempenho e estabilidade altos, usados apenas para a calibração de outros instrumentos), também são classificados, segundo o laboratório em que foram calibrados. Desta forma, existem os instrumentos padrões primários, secundários e terciários. Existe também o instrumento conhecido como "padrão nacional", que é aquele reconhecido por uma decisão nacional oficial para representar o valor, num país, de todos os outros padrões de uma certa grandeza. Finalmente, tem-se o "instrumento de campo", que é aquele que possui desempenho e estabilidade apropriados para uso em medidas de rotina no "campo".

2.4 Procedimentos de Calibração

Os procedimentos de calibração variam de acordo com a aplicação dos instrumentos. No caso da calibração de instrumentos utilizados em propósitos de Radioproteção, existem basicamente duas técnicas¹⁷, a saber:

1. Uso de campos de radiação com propriedades bem conhecidas;
2. Uso de campos de radiação com propriedades menos bem conhecidas. Nesse caso, a calibração é feita pela técnica da substituição.

No primeiro caso, o campo de radiação pode ser definido a partir do conhecimento de certos parâmetros de uma fonte de radiação padrão secundário, ou seja, determinam-se os valores da grandeza a ser medida no instrumento a ser calibrado que correspondam a leituras entre 20 e 80% de sua escala²⁰. Alguns fatores, como a presença de grande quantidade de radiação espalhada, podem tornar difícil a especificação do campo. Neste caso, a calibração deve ser feita pela segunda técnica, onde o instrumento a ser calibrado é colocado no campo de radiação e suas leituras registradas. Em seguida, o instrumento de referência substitui o primeiro e as leituras obtidas são comparadas entre si. Normalmente, o instrumento de referência é colocado no campo duas vezes, uma antes e uma depois de se tomar as leituras do instrumento a ser calibrado. Este procedimento é denominado "Calibração pela Técnica da Substituição", e deve ser usada para a calibração de instrumentos com raios-X. Esta é uma técnica comum para a calibração de instrumentos com raios-X, tanto em Radioproteção quanto em Radioterapia^{15,17}.

Existem, ainda, outros procedimentos de calibração de instrumentos utilizados em Radioterapia, que variam de acordo com as instalações e disposições dos laboratórios de calibração, e com os tipos de instrumentos a serem calibrados. São eles: Calibração "Tip to Tip", Calibração no Ar ou num Simulador, Calibração Indireta ou Direta, e Calibração num SSDL ou num Hospital¹⁵. Cada método possui vantagens e desvantagens, e o laboratório de calibração pode escolher um dos métodos em algumas ocasiões e outros métodos em outras ocasiões.

As grandezas físicas mais utilizadas na dosimetria dos campos de radiação, em Radioterapia são: exposição, kerma e dose absorvida. Já em Radioproteção, as grandezas utilizadas são kerma e exposição, porém, após a inclusão de quatro novas grandezas pela *International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU)*, baseadas na definição de Dose Equivalente, H (Dose Equivalente Ambiente e Dose Equivalente Direcional, para monitoração de área, e Dose Equivalente Individual, Penetrante e Superficial, para monitoração pessoal), os procedimentos de calibração sofreram algumas alterações. Tais procedimentos passaram a ser diferenciados para os instrumentos utilizados na monitoração individual e para aqueles utilizados na monitoração de área.

Segundo a publicação ICRU 43¹⁸, os instrumentos utilizados na monitoração individual devem ser calibrados utilizando-se um simulador, que nada mais é que um sólido de material equivalente ao tecido humano, de composição e densidade similares, com o objetivo de considerar a contribuição do retroespalhamento na leitura obtida pelo instrumento. Entretanto, para simplificar os procedimentos de calibração, tais instrumentos podem ser calibrados no ar, desde que sejam aplicados fatores de correção que considerem a contribuição do retroespalhamento no corpo do usuário nas medidas obtidas¹⁶. Já aqueles utilizados para a monitoração de área devem ser calibrados no ar. Porém, a conclusão a que se chegou é que há a necessidade de se estabelecer a padronização dos procedimentos de calibração internacionalmente, para assegurar interpretações idênticas das medidas obtidas⁵.

Apesar da inclusão das novas grandezas, as grandezas normalmente utilizadas em procedimentos de calibração de instrumentos utilizados em propósitos de Radioproteção (exposição ou kerma, para fótons), continuam sendo utilizadas nos laboratórios nacionais, pois ainda não existem padrões primários que permitam definir as novas grandezas de forma absoluta. Neste caso, a transformação para as novas grandezas pode ser feita aplicando-se coeficientes de conversão¹⁸.

2.5 Determinação do Fator de Calibração

O Fator de Calibração, F_c , é definido como o valor verdadeiro de uma grandeza, V , dividido pela leitura, L , (corrigida, se necessário), obtida pelo instrumento a ser calibrado^{15,16}, ou $F_c = V \times L^{-1}$.

Alguns laboratórios, ao invés de fornecerem fatores de calibração, fornecem fatores de correção. A diferença é que o fator de correção é um número adimensional dado para um instrumento cuja escala é marcada em unidades físicas de grandezas utilizadas nos procedimentos de calibração (exposição, kerma ou dose absorvida), e o fator de calibração é um número com dimensões físicas, dado pelo quociente da grandeza física pelo sinal do instrumento, que pode ser dado em carga ou em unidades de escala (ue) do instrumento. Enquanto o fator de correção é dado em porcentagem da unidade, o fator de calibração é dado em unidades tais como R/C ou R/ue²⁸.

O fator de calibração deve sempre ser apresentado junto com sua incerteza associada. A precisão de uma medida obtida com um instrumento depende de alguns fatores, como o número de leituras realizadas, a incerteza associada às leituras durante a determinação da camada semi-redutora de uma qualidade de campo, e não só dos parâmetros inerentes à imprecisão do próprio instrumento. Além disso, outras grandezas também influenciam as respostas obtidas, como, por exemplo, a temperatura e a pressão ambiente, mencionadas anteriormente. Algumas grandezas, porém, podem influenciar apenas alguns tipos específicos de instrumentos, tais como a luz, que pode sensibilizar filmes usados como dosímetros, mas dificilmente irá prejudicar um instrumento que possui um tubo Geiger-Müller como detector²⁷.

Há muitas ocasiões em que uma menor precisão é suficiente. Isto só depende da situação a ser analisada. Por exemplo, no caso de áreas nas quais se sabe que os limites de dose a trabalhadores nunca são ultrapassados, não há necessidade de que a precisão na determinação das doses seja tão alta. Caso

contrário, todas as doses devem ser determinadas com a maior precisão possível¹⁷.

Também deve-se ter em mente que todos os instrumentos padrões e de referência devem apresentar fatores de calibração determinados com a maior precisão possível, já que é a partir desses instrumentos que se determinam os fatores de calibração daqueles instrumentos utilizados em operações de rotina, seguindo a cadeia metrológica.

Com relação à determinação dos fatores de calibração propriamente ditos, deve-se dizer que, em muitos casos, estes fatores são obtidos através de Curvas de Calibração, por interpolação²⁹. Isso significa que muitos instrumentos podem ser utilizados em diferentes faixas de energia, porém, não há necessidade que um laboratório de calibração tenha definida exatamente toda a faixa de energia na qual este instrumento pode ser utilizado. Se este laboratório possui fatores de calibração definidos para algumas energias dessa faixa, por meio da confecção das curvas de calibração, que nada mais são que os gráficos dos fatores de calibração em função da energia da radiação, consegue-se determinar o fator de calibração para uma certa energia, interpolando-se o ponto referente a esta energia na curva e verificando-se o fator de calibração correspondente. Um exemplo de uma Curva de Calibração é mostrada na Figura 2.5.

Para um instrumento portátil, pode-se dizer que a obtenção de seu fator de calibração dá-se de forma direta, ou seja, a partir da própria definição de fator de calibração. Entretanto, para a determinação do fator de calibração de um dosímetro clínico para uma certa energia, deve-se considerar, também, o fator de calibração do eletrômetro, caso a câmara e o eletrômetro tenham sido calibrados separadamente^{8,41}. A determinação do fator de calibração, nesse caso, é feita, portanto, utilizando-se a expressão:

$$F_C = F_{T,p} \times F^C \times F^E \quad (2.2)$$

onde F_C é o fator de calibração do dosímetro, $F_{T,p}$ é o fator de correção de temperatura e pressão, F^C é o fator de calibração da câmara de ionização e F^E é o fator de calibração do eletrômetro.

Embora os efeitos inerentes à conexão de uma câmara de ionização a um eletrômetro (cargas geradas por torção no cabo e corrente de fuga) sejam solucionados com a calibração do dosímetro, na calibração individual de seus constituintes este efeito torna-se crítico, já que os fatores de calibração dos mesmos só têm sentido se a influência de tal efeito for desprezível, qualquer que seja esta conexão. Isto significa que a equação 2.2 deve ser analisada para cada tipo de dosímetro⁴¹.

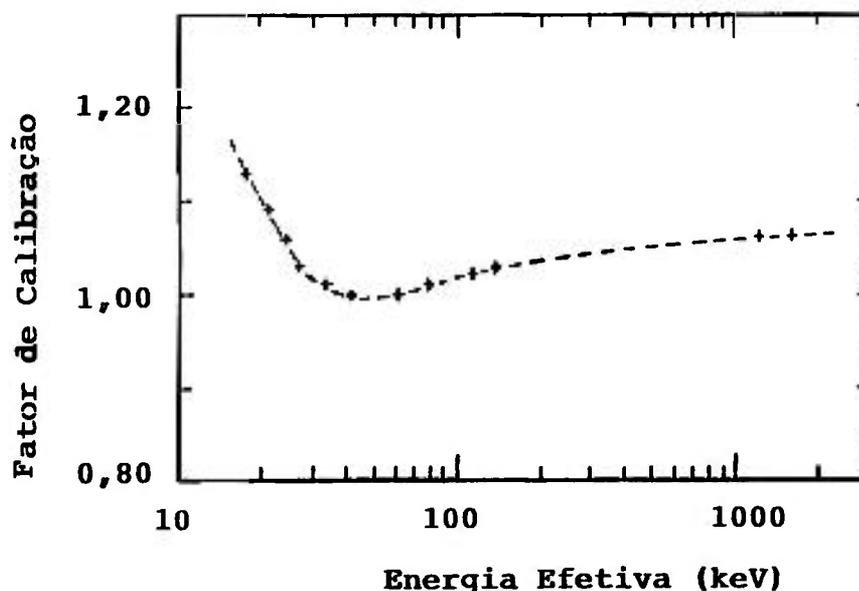


Figura 2.5 - Curva de calibração de uma câmara de ionização²⁹

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os componentes do sistema de calibração de raios-X de energias baixas do Laboratório de Calibração do IPEN, os sistemas de medida utilizados nos testes e a implantação das qualidades de campos padrões.

3.1 Sistema de Raios-X de Energias Baixas (60 kV)

A Figura 3.1 apresenta o esquema do sistema de calibração de raios-X de energias baixas (60 kV) do Laboratório de Calibração do IPEN. Este sistema é constituído por:

1. Gerador *Rigaku Denki Co. Ltd.*, tipo *Geigerflex* (potencial constante), acoplado a um tubo *Philips*, modelo *PW2184/00*, com janela de 1 mm de Berílio e alvo de Tungstênio. A corrente e a tensão variam entre 2 e 80 mA e entre 20 e 60 kV, respectivamente. Sua potência máxima de operação é de 2,5 kW;
2. Obturador de feixe de radiação ("shutter"), marca *Physikalisch-Technische Werkstätten (PTW)*, modelo *6801* (série n^o 2736), com transmissão menor que 0,1 %. Este "shutter" possui um cronômetro que controla o intervalo de tempo durante o qual o mesmo se mantém aberto;
3. Câmara monitora, *PTW*, modelo *Tch 7786/k*, tipo *24390* (série n^o 2882), com janela de grafite. Esta câmara está acoplada ao eletrômetro *PTW*, modelo *DU0/4* (série n^o 21142-301086), que possui contadores analógico e digital para a determinação da medida obtida;

4. Sistema de colimação, formado por um conjunto de dois colimadores (C_1 e C_2), um suporte de colimadores (C_3), e um suporte de absorvedores para medida de CSR (C_4). No suporte C_3 podem ser ajustados colimadores de diâmetros diferentes, possibilitando variar o diâmetro do campo entre 3 e 17 cm, a 50 cm do alvo (posição de calibração dos dosímetros utilizados em Radioterapia). Os colimadores C_1 e C_2 , e o suporte de colimadores C_3 , são fixos, enquanto que o suporte de absorvedores C_4 só é ajustado para a determinação experimental das CSRs;
5. Tubo laser tipo Hélio-Neon, marca Opto, modelo SNB 16 (série n° 0410688), alinhado com o centro do sistema de colimação. Sua função principal é auxiliar o posicionamento dos instrumentos.

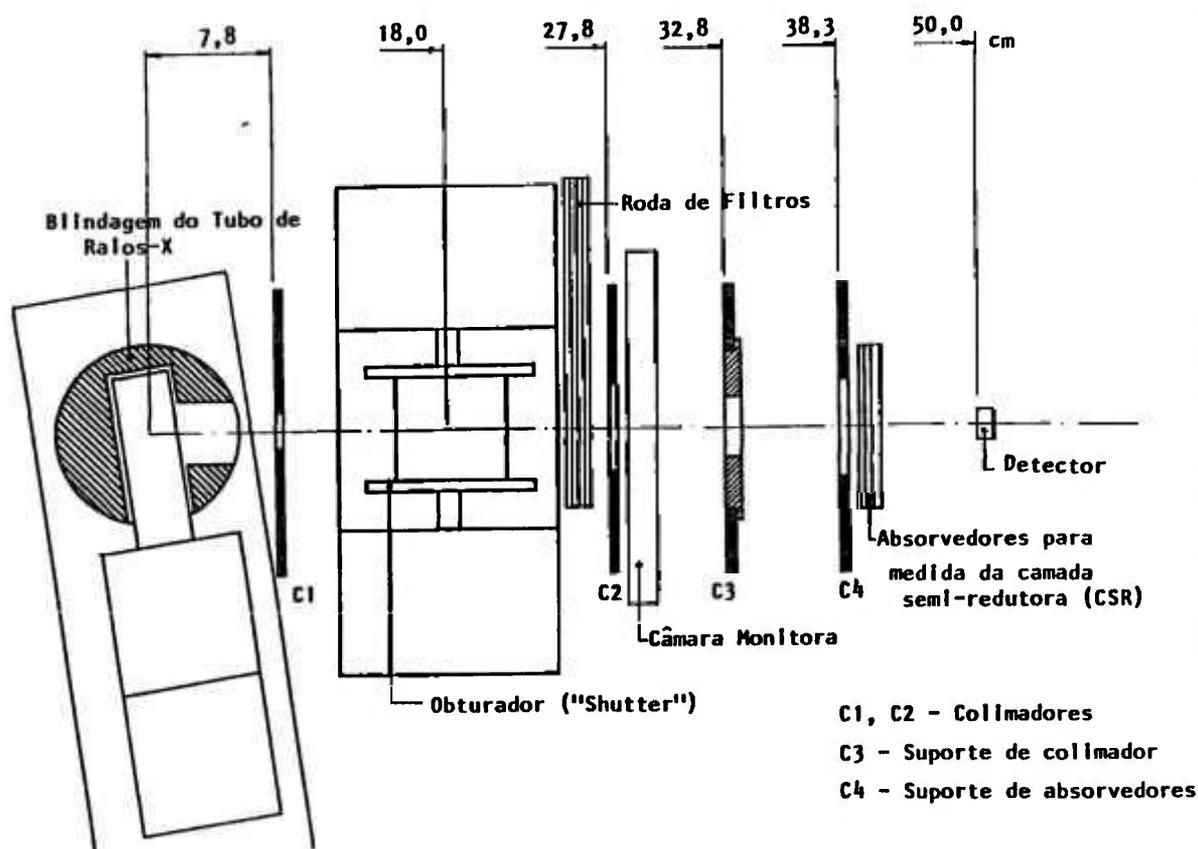


Figura 3.1 - Sistema de calibração de raios-X de energias baixas (60 kV) do IPEN

3.2 Sistemas de Medida

- **SISTEMA A:** Câmara de ionização tipo superficial, modelo 2536/3B ($0,3 \text{ cm}^3$, série n° R171358), da *Nuclear Enterprises (NE)*, acoplada ao eletrômetro, também da *NE*, modelo 2560 (série n° 139). Este conjunto constitui o sistema padrão secundário do Laboratório de Calibração do IPEN. Possui, ainda, certificado de calibração³¹, nível Radioterapia, do National Physical Laboratory (NPL), e participa anualmente das intercomparações organizadas pelo IRD (SSDL-RJ);
- **SISTEMA B:** Câmara de transmissão fabricada por Austerlitz e col.³, no IRD, acoplada ao eletrômetro modelo *Baldwin Farmer*, modelo 2502/3 (série n° 330), da *NE*;
- **SISTEMA C:** Câmara de ionização tipo superficial, modelo 2502/3 ($0,03 \text{ cm}^3$, série n° 171054), acoplada ao eletrômetro *Baldwin Farmer*, modelo 2502/3 (série n° 330), ambos da *NE*. Este é um sistema padrão terciário, usado em calibrações rotineiras, nível Radioterapia;
- **SISTEMA D:** Câmara de ionização tipo superficial *IPEN* ($0,6 \text{ cm}^3$), acoplada ao eletrômetro *Baldwin Farmer*, modelo 2502/3 (série n° 330), da *NE*. A câmara em questão foi desenvolvida por Albuquerque¹, no Laboratório de Calibração do IPEN;
- **SISTEMA E:** Câmara de ionização tipo cilíndrica, modelo 2511/3 (600 cm^3 , série n° 174), acoplada ao eletrômetro *Baldwin Farmer*, modelo 2502/3 (série n° 330), ambos da *NE*. Este sistema é referenciado ao padrão nacional do IRD, nível Radioproteção.

Todas as câmaras que compõem os sistemas de medida apresentados são do tipo não selado, portanto as medidas obtidas são corrigidas pelo fator $F_{T,p}$, segundo a expressão 2.1, apresentada no Capítulo 2.

3.3 Instrumentos Auxiliares

Na verificação da uniformidade do campo de raios-X foi utilizado um densitômetro *Macbeth Ortho Diffuse Density*, modelo TD 904 (série n° 4818-E).

As condições de temperatura e umidade relativa são controladas por um sistema de ar condicionado Consul, modelo 4500 (18000 BTU) e um desumidificador marca Fargon, modelo Desumidair.

Os valores de temperatura e umidade foram obtidos num termômetro "Mercúrio" (0-40; 0,2 °C) e num higrômetro *Präzisions-Faden*, respectivamente. O valor da pressão foi obtido num barômetro *Precision Aneroid Barometer MK 2*, modelo M2236, range 900-1050 mb (série n° A364), marca *Negretti & Zambra (Croydon)*.

4 TESTES PRELIMINARES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos testes feitos com os sistemas de medida utilizados no decorrer do trabalho e aqueles realizados com o próprio sistema de raios-X de energias baixas, com o objetivo de verificar as boas condições de funcionamento dos mesmos.

4.1 Testes de Estabilidade e de Corrente de Fuga dos Sistemas de Medida Utilizados

Como forma de verificar as condições de funcionamento dos sistemas de medida utilizados, além de estabelecer os limites máximos de variação nas respostas obtidas com os mesmos, foram realizados os testes de rotina conhecidos como Testes de Estabilidade a Curto e a Longo Prazos e Teste de Corrente de Fuga.

4.1.1 Testes de Estabilidade a Curto e a Longo Prazos

Nestes testes, a câmara de ionização é exposta a uma fonte de radiação padrão, e a medida a considerar é o intervalo de tempo necessário para a obtenção de uma indicação de referência do eletrômetro. Recomenda-se que, para realizar qualquer teste, o sistema de medida deve ser ligado ao menos 15 minutos antes de seu início, para que o mesmo se estabilize²¹. Em todos os testes e medidas realizadas, os sistemas foram ligados 30 minutos antes do início das medidas.

Todas as medidas obtidas, além da correção para as condições ambientais de referência, foram ainda corrigidas considerando-se o decaimento radioativo da fonte de controle. Esta correção é feita através da expressão:

$$f_D = \exp[(-\ln 2/T_{1/2}) \times \Delta t] \quad (4.1)$$

onde f_D é o fator de correção para o decaimento da fonte de radiação; $T_{1/2}$ é a meia-vida do isótopo da fonte utilizada; Δt é o intervalo de tempo decorrido entre a última e a primeira medidas consideradas na verificação da estabilidade do sistema de medida analisado.

Admitiu-se que 12 leituras consecutivas correspondam a uma medida (toma-se o valor médio). Portanto, cada uma dessas medidas corresponde ao Teste de Estabilidade a Curto Prazo (ou Teste de Repetibilidade). Os desvios padrões percentuais estabelecidos por recomendações internacionais são $\pm 0,3\%$, para instrumentos de referência, e variam entre $\pm 0,7$ e $\pm 1,0\%$ para instrumentos de campo^{21,30}, utilizados para propósitos de Radioterapia. Para os instrumentos de referência e de campo utilizados em Radioproteção, os desvios padrões percentuais estabelecidos variam entre $\pm 0,5$ e $\pm 1,0\%$ ^{16,36}.

Realizando os testes de repetibilidade periodicamente, ao longo do tempo, sempre sob as mesmas condições geométricas, obtém-se o que se chama de Teste de Estabilidade a Longo Prazo. Esta estabilidade pode ser verificada através de um gráfico cronológico, onde se registra a variação das medidas obtidas mensalmente, por exemplo, comparadas com a medida de referência, que é a média das 10 primeiras medidas realizadas com o sistema. Desta forma, pode-se verificar a tendência das medidas obtidas com o sistema, dentro dos intervalos máximos permissíveis de variação, estabelecidos pelas normas específicas (já mencionados).

Os testes de repetibilidade e de estabilidade a longo prazo vêm sendo realizados rotineiramente com todos os sistemas de medida utilizados desde o período em que foram adquiridos pelo Laboratório de Calibração do IPEN. Tais sistemas vêm apresentando medidas cujos valores máximos dos desvios padrões percentuais estão dentro dos limites máximos permissíveis estabelecidos.

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam os gráficos de estabilidade a longo prazo obtidos para as 20 medidas consecutivas realizadas com os sistemas de medida D e E, respectivamente, como exemplo. Analisando-se estas figuras, nota-se que o comportamento geral dos dois sistemas de medida apresentaram-se satisfatórios e dentro dos limites de variação máxima estabelecidos.

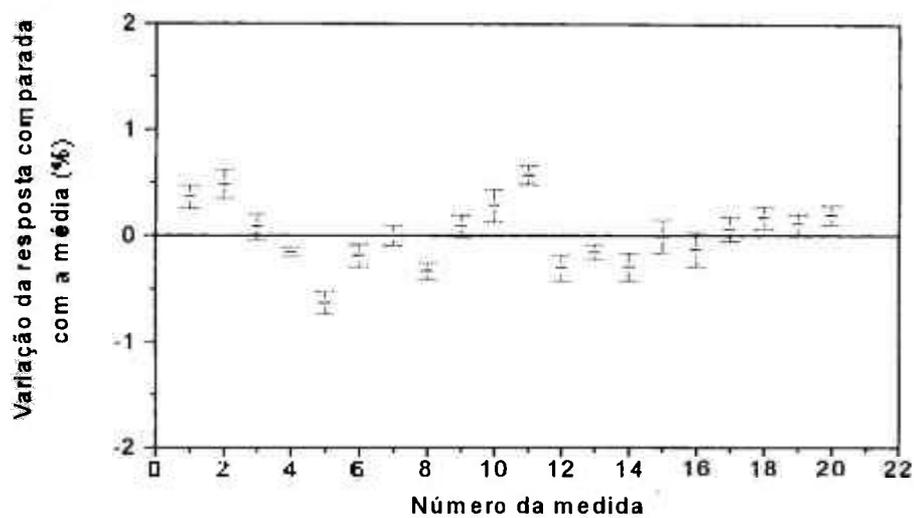


Figura 4.1 - Estabilidade a longo prazo do sistema de medida D

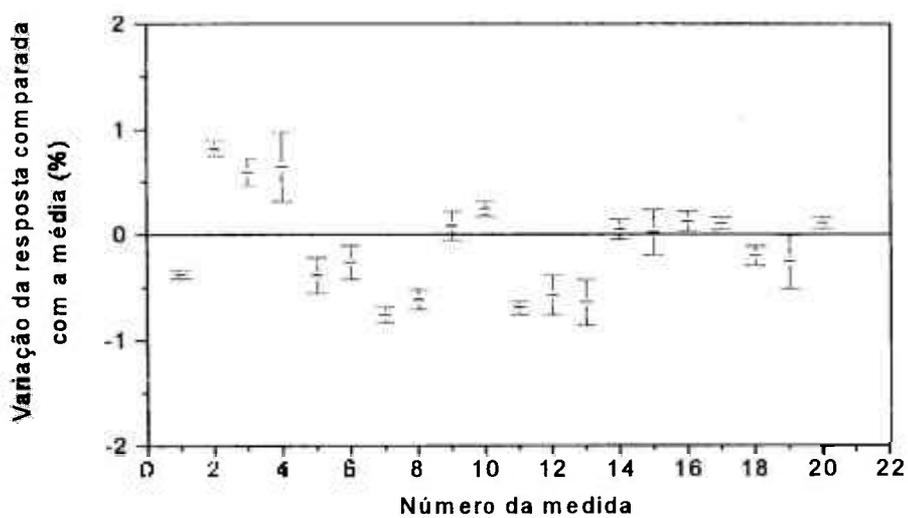


Figura 4.2 - Estabilidade a longo prazo do sistema de medida E

4.1.2 Teste de Corrente de Fuga

O Teste de Corrente de Fuga consiste em se verificar se o sistema de medida acusa a produção de algum sinal (ou leitura) que não seja produzido por ionização no volume sensível da câmara. Essa é, na verdade, a própria definição de corrente de fuga. Ela pode ser produzida no eletrômetro, no cabo ou em seus conectores, na haste da câmara ou mesmo na própria câmara.

A determinação da corrente de fuga pode ser realizada antes ou após a irradiação do sistema de medida, obtendo-se uma leitura após o período de seu pré-aquecimento. A medida da corrente de fuga deve ser feita durante um período pelo menos cinco vezes maior que o tempo de irradiação a ser utilizado em cada leitura do teste de repetibilidade³⁶, num ambiente livre de radiação. Segundo as recomendações internacionais, o valor da corrente de fuga deve ser no máximo igual a $\pm 0,5\%$, para instrumentos de referência, e a $\pm 1,0\%$ para instrumentos de campo²¹, do valor da menor taxa de exposição a que forem submetidos em cada leitura do teste de repetibilidade. A determinação do valor de corrente de fuga é feita através do quociente da diferença entre os valores das leituras inicial e final durante o período em que tal medida é realizada, pelo intervalo de tempo correspondente.

As medidas de corrente de fuga realizadas com os sistemas de medida de referência utilizados têm-se mantido dentro dos limites estabelecidos. Isto é esperado, já que as câmaras de ionização, os cabos de conexão ao eletrômetro, assim como os próprios eletrômetros são mantidos em locais secos, para evitar a produção de cargas devido à presença de umidade, que pode ser um dos principais responsáveis pela produção da corrente de fuga. Para os sistemas de medida D e E, os valores máximos de corrente de fuga obtidos foram 0,2 e 0,3 %, respectivamente. Os outros sistemas de medida apresentaram resultados similares.

4.2 Teste de Repetibilidade da Câmara Monitora

Esse teste foi realizado irradiando-se a câmara monitora com uma fonte padrão de ^{90}Sr , 33 MBq (1988), fabricada pela PTW, modelo 8821 (série n^o 8921-906). Essa fonte foi posicionada externamente, em relação ao centro da câmara, e foram feitas três séries de medidas, cada uma com 10 leituras, constituindo-se nos testes de repetibilidade, já que essas séries de medidas foram realizadas sempre nas mesmas condições, e pelo mesmo observador⁹. Cada leitura corresponde ao intervalo de tempo necessário para que o eletrômetro acoplado à câmara registre um certo número de dígitos pré-determinado.

As leituras variaram entre 88,23 e 195,35 s. As medidas, que correspondem à média de 10 leituras consecutivas, variaram entre 96,36 e 118,40 s, para as três séries de medidas, sendo que o desvio padrão percentual, determinado para cada série de medidas, variou de 1,6 a 23,0 %. Por apresentar desvios tão altos, concluiu-se que, pelo fato da atividade da fonte padrão utilizada ser muito baixa, o intervalo de tempo utilizado para a pré-irradiação da câmara monitora (30 minutos) era insuficiente para que o sistema se estabilizasse. A confiabilidade no sistema formado pela câmara monitora foi, então, obtida através do teste apresentado a seguir.

4.3 Variação da Resposta da Câmara Monitora com a Corrente Aplicada ao Tubo de Raios-X

Para verificar as condições de funcionamento da câmara monitora, foi estudada a influência da variação da corrente aplicada ao tubo de raios-X nas leituras obtidas por três sistemas de medida: Sistema A, Sistema B e o sistema formado pela câmara monitora acoplada ao seu eletrômetro, descrito no item 3.1. Dessa forma, qualquer alteração sofrida pelo feixe de raios-X deveria ser acusada pelos três sistemas.

Cada leitura corresponde, também nesse caso, ao intervalo de tempo necessário para que o eletrômetro acoplado à câmara monitora acusasse 400 dígitos. Nesse instante, lê-se a quantidade de dígitos (ou unidades de escala, ue) acusados pelos outros dois eletrômetros. Os números de dígitos lidos, designados por "N", são convertidos em taxa de número de dígitos, ou $\dot{N} = N/\Delta t$, onde Δt é o intervalo de tempo de leitura, em minutos, fornecido pelo cronômetro acoplado ao obturador do feixe de radiação. A unidade de \dot{N} é, portanto, ue/min.

Cada medida corresponde a uma série de 10 leituras nos três sistemas, para cada variação de corrente. A variação da leitura obtida em função da variação da corrente aplicada ao tubo de raios-X, para cada sistema, é mostrada na Figura 4.3. O desvio padrão percentual máximo obtido nas medidas não ultrapassou a 0,9%.

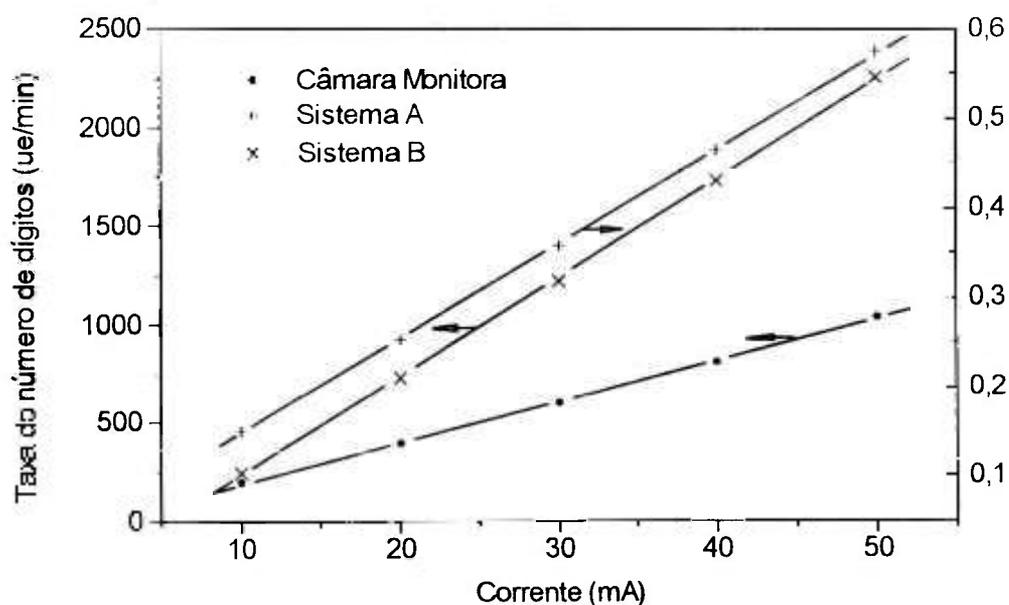


Figura 4.3 - Resposta dos sistemas de medida em função da corrente aplicada ao tubo de raios-X

O maior desvio padrão percentual obtido nas cinco séries de leituras foi do sistema de medida formado pela câmara monitora (2,54 %) e o menor, do sistema de medida A (0,28 %). Tais valores são desprezíveis se for considerada a taxa de exposição a que foram submetidos. Além disso, observa-se que o gráfico obtido para o sistema de medida formado pela câmara monitora reproduz a linearidade obtida para os outros dois sistemas A (padrão primário) e B, provando a confiabilidade nas medidas obtidas com o sistema de medida formado pela câmara monitora.

4.4 Uniformidade dos Campos de Radiação Produzidos

Segundo as recomendações internacionais^{14,22}, a uniformidade do campo de radiação não deve variar mais que 1,0 % para a calibração de instrumentos utilizados em Radioterapia, e 5,0 % para a calibração de instrumentos utilizados em Radioproteção, em toda a extensão que será utilizada para se irradiar o instrumento a ser calibrado. O campo de radiação deve, ainda, apresentar dimensões tais que possa irradiar completa e uniformemente o instrumento a ser calibrado, nos dois casos. A consequência destas recomendações é que para cada instrumento deve ser escolhido um diâmetro de campo cuja variação na uniformidade esteja dentro dos limites de variação especificados; caso contrário, devem ser aplicados fatores de correção nas medidas obtidas para corrigir os efeitos provocados pela não-uniformidade³⁷.

Existem dois métodos mais utilizados para se verificar a uniformidade do campo de radiação. Nestes métodos é feito um mapeamento ao longo de duas linhas perpendiculares entre si e pertencentes a um mesmo plano normal ao eixo central do foco do tubo de raios-X. No primeiro método, o mapeamento é feito medindo-se a taxa de exposição com uma câmara de ionização posicionada no ar. A posição desta câmara é, então, variada sobre as duas linhas perpendiculares entre si até se atingir uma região em que a taxa de exposição sofre um decréscimo acentuado (50 %), denominada "Região de Penumbra". No segundo método, expõe-se à radiação um filme radiográfico que, pelo seu

enegrecimento, delimitará a zona do campo incidente e de sua penumbra. As medidas, nesse caso, são realizadas com um densitômetro óptico.

Nos dois métodos, todas as leituras obtidas são normalizadas em relação ao ponto central do campo de radiação, que é tomado como referência. Em seguida, essas leituras normalizadas são utilizadas na construção de uma curva, em função da posição de medida. Geralmente, as leituras obtidas decrescem simetricamente em todas as direções que circundam o eixo central do campo de radiação. Entretanto, três fatores podem alterar esta distribuição³⁴:

1. *Emissão direcional (Efeito Heel)*: existe uma direção predominante quanto à emissão de raios -X em qualquer ponto do alvo. Esse efeito produz um aumento da taxa de exposição do catodo para o anodo^{14,30};
2. *Ângulo do alvo*: o ângulo entre o alvo e a direção de propagação do feixe afeta a distribuição da taxa de exposição ao longo do plano perpendicular ao eixo do feixe;
3. *Auto-absorção pelo alvo (Efeito Calcanhar)*: os raios-X são gerados em profundidades diferentes no alvo e, conseqüentemente, sofrem atenuação também em graus diferentes, o que também provoca uma diminuição da taxa de exposição do catodo para o anodo.

Através da verificação do tamanho do campo de radiação produzido e de sua uniformidade, conclui-se que o sistema de raios-X pode ser utilizado para propósitos de calibração de instrumentos, mesmo não obedecendo à condição de ajuste recomendada pela IAEA¹⁴.

A verificação da uniformidade do campo de radiação produzido foi feita através dos dois métodos descritos, para duas qualidades de campo de raios-X, nível Radioterapia, referentes à maior (50 kV) e à menor (25 kV) energias de campos produzidas, e os resultados obtidos foram comparados entre si.

No primeiro método, o mapeamento foi feito utilizando-se o Sistema C de medida. A câmara foi posicionada a 50,0 cm do alvo do tubo de raios-X do sistema de raios-X. A posição da câmara foi variada em intervalos de 1,0 cm tanto na direção horizontal quanto na direção vertical. Cada medida corresponde

ao resultado médio de três leituras consecutivas. As curvas resultantes são mostradas nas Figuras 4.4a (Plano Horizontal) e 4.4b (Plano Vertical), para as duas qualidades estudadas.

Analisando-se essas curvas, nota-se que o campo resultante obedece aos limites de uniformidade estabelecidos pelas recomendações internacionais, para os dois propósitos de calibração, numa extensão de 10 cm, a 50 cm do alvo do tubo de raios-X. Este tamanho de campo é suficiente para se irradiar os instrumentos que serão calibrados. O desvio padrão percentual máximo, obtido nas séries de leituras, foi igual a 3,0 %.

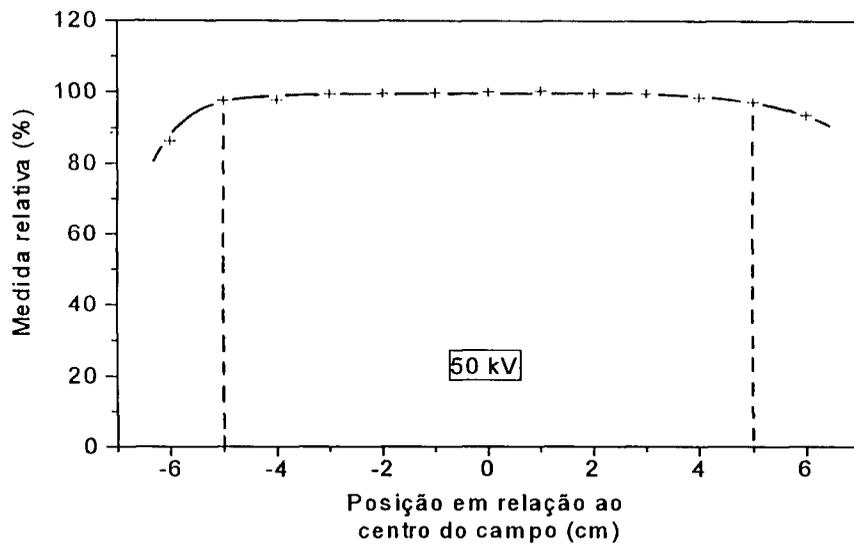
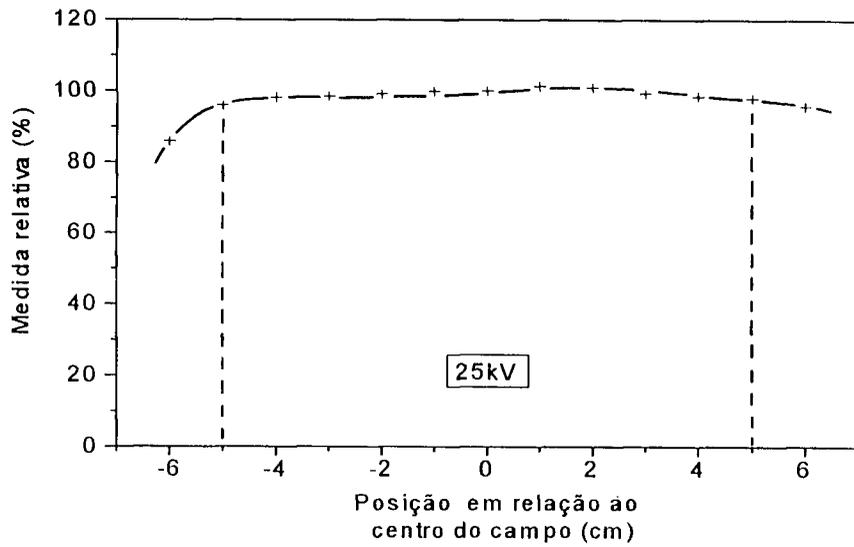


Figura 4.4a - Uniformidade do campo de raios-X, obtida com o sistema de medida C, no plano horizontal, para diferentes qualidades

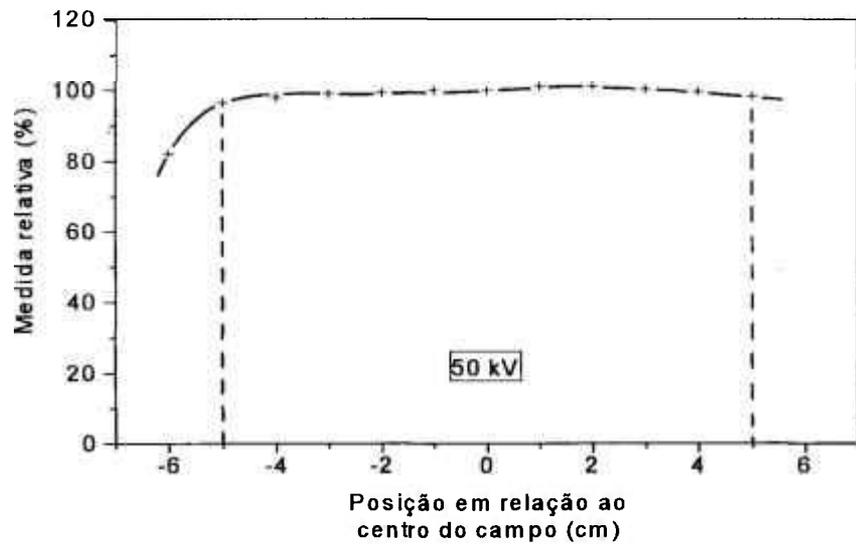
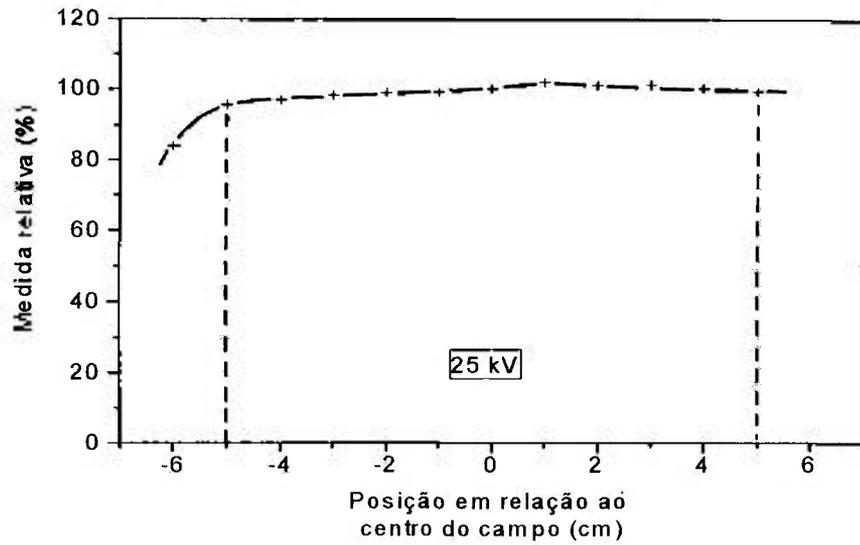


Figura 4.4b - Uniformidade do campo de raios-X, obtida com o sistema de medida C, no plano vertical, para diferentes qualidades

No segundo método, foram irradiados dois filmes radiográficos, posicionados a 50,0 cm do foco do tubo de raios-X, com as mesmas qualidades com as quais a câmara foi irradiada. O mapeamento do campo foi feito através das leituras de densidade óptica (DO), em intervalos de 1,0 cm, tanto na direção horizontal quanto na vertical, das mesmas linhas perpendiculares nas quais foram feitas as leituras com a câmara de ionização. As curvas para a análise da uniformidade do campo de radiação são apresentadas nas Figura 4.5a (Plano Horizontal) e 4.5b (Plano Vertical). Nota-se que os resultados obtidos coincidem com aqueles obtidos no primeiro método, embora este método seja menos sensível. Não foi possível determinar o desvio padrão das leituras, já que, para cada região, só foi realizada uma leitura, devido à sua dimensão (1,0 x 1,0 cm²).

Analisando todas as curvas, nota-se que as variações obtidas na uniformidade do campo obedecem aos limites recomendados em toda a sua extensão, tanto para Radioterapia quanto para Radioproteção.

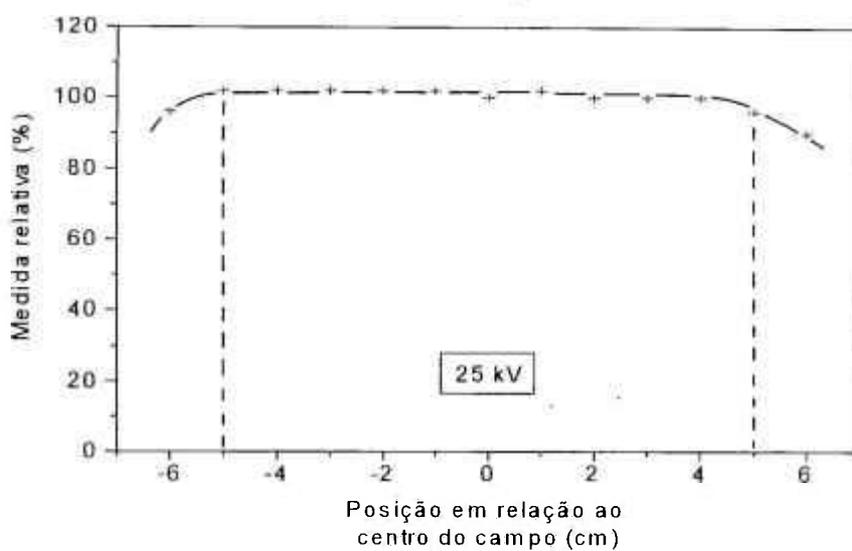


Figura 4.5a - Uniformidade do campo de raios-X obtida com filmes, no plano horizontal, para diferentes qualidades

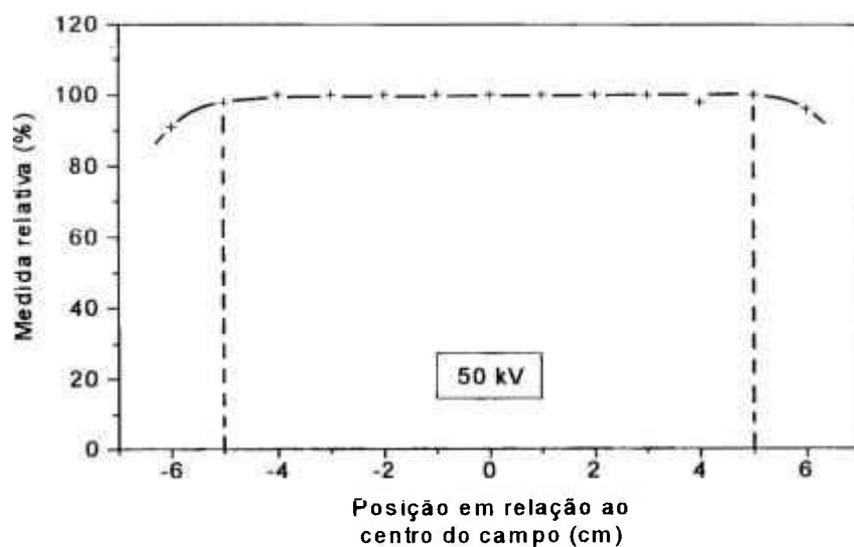


Figura 4.5b - Uniformidade do campo de raios-X obtida com filmes, no plano vertical, para diferentes qualidades

4.5 Contribuição da Radiação Espalhada às Medidas Obtidas

As recomendações internacionais^{14,30} estabelecem que nas medidas a contribuição da radiação espalhada não deve ser considerada. Para o caso de calibração de instrumentos utilizados em propósitos de Radioproteção, tal contribuição não deve ultrapassar 5,0 %²².

A verificação da radiação espalhada deve ser feita somente com instrumentos de alta sensibilidade. Neste caso, as câmaras de ionização de volume maior são indicadas; portanto foi utilizado o sistema de medida E, cuja câmara de ionização apresenta um volume de 600 cm³.

Segundo a norma ISO 4037²², a contribuição da radiação espalhada pode ser determinada através de dois métodos:

1 - Verificação da Lei do Inverso do Quadrado da Distância

Após a correção para o efeito da atenuação do ar, a taxa de exposição deve ser proporcional ao inverso do quadrado da distância entre o alvo do tubo de raios-X e o instrumento de medida. A presença da radiação espalhada no campo resultará no desvio do cumprimento desta lei.

A câmara foi posicionada de forma que o centro de sua janela coincidissem com o centro do conjunto de colimação do sistema de calibração de raios-X. Não foi utilizado nenhum colimador, com o objetivo de se verificar o efeito no maior campo possível.

Neste primeiro método, a câmara foi irradiada com a qualidade de campo, nível Radioterapia, correspondente à menor energia efetiva, referente a 25 kV. Isto foi feito para:

1. Verificar o efeito máximo da atenuação do ar poderia alterar a Lei do Inverso do Quadrado da Distância, já que esta qualidade de campo corresponde à menor energia efetiva de campo produzida, nível Radioterapia, e

2. Definir a melhor distância alvo-instrumento para a calibração de instrumentos utilizados em propósitos de Radioproteção.

A posição da câmara foi variada entre 75 cm e 200 cm, em intervalos de 25 cm, sempre na posição central do campo de radiação. Para cada distância alvo-câmara foram feitas três leituras, onde o valor médio foi tomado como a medida resultante. O maior desvio percentual obtido para tais medidas foi 1,0 %.

Todas as medidas foram normalizadas para aquelas obtidas à distância de 200 cm e corrigidas para o efeito de atenuação do ar, considerando-se o coeficiente de atenuação linear total, obtido através de tabela fornecida pelo ICRU 17¹⁹. A Figura 4.6 apresenta os resultados obtidos. Nesta figura nota-se que o desvio máximo da Lei do Inverso do Quadrado da Distância é de 2,8 %, que está dentro do limite de tolerância de 5,0 % estabelecido pela ISO.

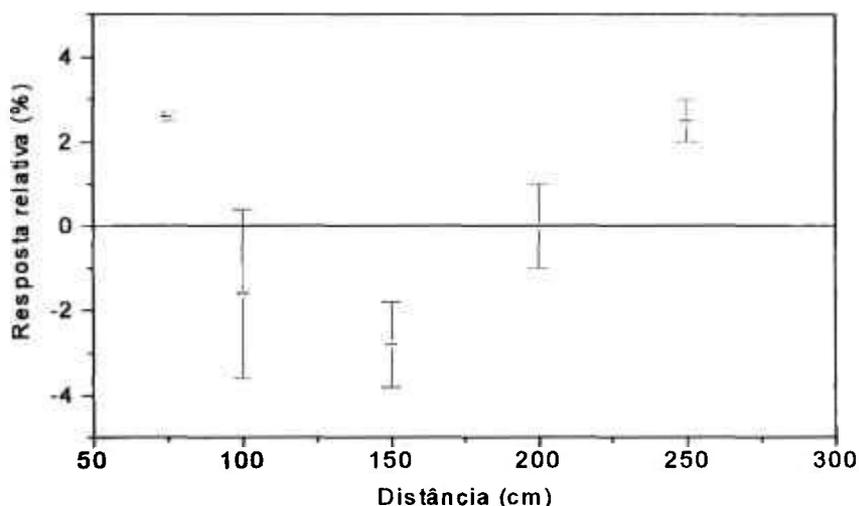


Figura 4.6 - Verificação experimental da Lei do Inverso do Quadrado da Distância, com o sistema de medida E, para a qualidade de campo referente a 25 kV, nível Radioterapia

2 - Medida da Taxa de Exposição fora do Campo de Radiação

Neste caso, as medidas devem ser feitas no centro do campo, nas posições que definem o raio do campo e nas posições correspondentes a duas vezes o raio do campo, lateralmente.

A posição que define o raio do campo é aquela na qual a taxa de exposição cai a 50 % daquela determinada em sua posição central, denominada "Região de Penumbra". É necessário definir-se o início desta região pois, se a câmara de ionização ou outro instrumento estiver posicionado no campo de radiação de forma que apenas uma parte de seu volume sensível seja irradiado, haverá uma perda considerável de ionizações que irá alterar as medidas obtidas¹¹. A posição correspondente a duas vezes o raio do campo é considerada como a região que está fora do campo de radiação.

Neste segundo método, a câmara de ionização foi irradiada com a qualidade de campo referente a 50 kV, que corresponde a maior energia efetiva de campo produzida, nível Radioterapia. As medidas devem ser tomadas para cada posição em que foi feita a experiência para se verificar a validade da Lei do Inverso do Quadrado da Distância.

A câmara de ionização foi posicionada a 75 cm do alvo do tubo de raios-X e as medidas obtidas foram normalizadas para aquela obtida na posição central do campo de radiação. A região de penumbra do campo foi definida, simetricamente, a 9 cm do centro do campo, pois nesta posição as medidas caíram para 51 % do valor na posição central. A 18 cm do centro do campo, as medidas obtidas foram 0,4 e 0,5 %, em cada extremo, do valor obtido na posição central, que estão abaixo do limite de 5 % estabelecido pela ISO 4037²².

Conclui-se, portanto, que não há presença de radiação espalhada a esta distância do alvo do tubo de raios-X, e, desta forma, não há necessidade de se repetir estas medidas para distâncias maiores. Além disso, também conclui-se que não há necessidade de se repetir as experiências para outras qualidades de campo.

5 QUALIDADES DE CAMPOS NÍVEL RADIOTERAPIA

Neste capítulo serão apresentados os resultados da reprodução das qualidades de campos de raios-X de energias baixas, nível Radioterapia, implantadas no Laboratório de Calibração do IPEN.

5.1 Reprodução das Qualidades de Campos Nível Radioterapia

Em 1982 foram implantadas no Laboratório de Calibração do IPEN três qualidades de campos, nível Radioterapia, reproduzindo três qualidades do NPL, referentes a 25, 40 e 50 kV²⁵. Numa época posterior, foram implantadas mais duas qualidades de campos, referentes a 30 e 45 kV.

Devido a problemas técnicos, não foi possível utilizar o sistema de calibração por um período de aproximadamente um ano. Para se confirmar os valores das CSRs obtidos anteriormente, assim como para se verificar a confiabilidade de tal sistema antes da implantação das qualidades de campos nível Radioproteção, as qualidades de campos nível Radioterapia foram reproduzidas, utilizando-se o sistema de medida D para a obtenção das medidas experimentais, com a câmara de ionização posicionada a 50 cm do alvo do tubo de raios-X.

Utilizou-se a técnica denominada “Extrapolação para Campos Infinitamente Pequenos” (ou de Diâmetro Igual a Zero), determinando-se a curva de transmissão de cada qualidade de campo para diâmetros de campos cada vez menores, com o objetivo de se determinar as CSRs sem a influência da radiação espalhada produzida no ar ou em qualquer componente do sistema de calibração.

Para cada espessura de absorvedor de alumínio utilizado, foram realizadas três leituras consecutivas, cujo valor médio foi tomado como a medida resultante. A intensidade do feixe transmitida através dos absorvedores utilizados foi determinada em relação à medida obtida sem absorvedor; o maior desvio padrão percentual encontrado nas medidas realizadas foi igual a 1,5 %, para as qualidades de campo referentes a 40 e 50 kV. A partir destas medidas, foram construídas as curvas de transmissão, e determinadas a primeira e a segunda CSRs, por interpolação, para cada qualidade de campo.

A reta de extrapolção para campos infinitamente pequenos resultou da determinação de quatro curvas de transmissão para cada qualidade de campo, referentes a quatro diâmetros de colimadores diferentes, variando entre 2,0 e 4,4 cm. A Figura 5.1 mostra a determinação da primeira e da segunda CSRs pelo método da extrapolção para campos infinitamente pequenos, para a qualidade de campo referente a 25 kV, como exemplo. Nesta figura, as retas resultantes são obtidas por regressão linear, e a primeira e segunda CSRs são determinadas pela intersecção de suas respectivas retas no eixo das ordenadas. Cada ponto das retas correspondem aos valores da primeira e segunda CSRs determinadas para diferentes diâmetros de colimador utilizado, e, conseqüentemente, para cada diâmetro de campo.

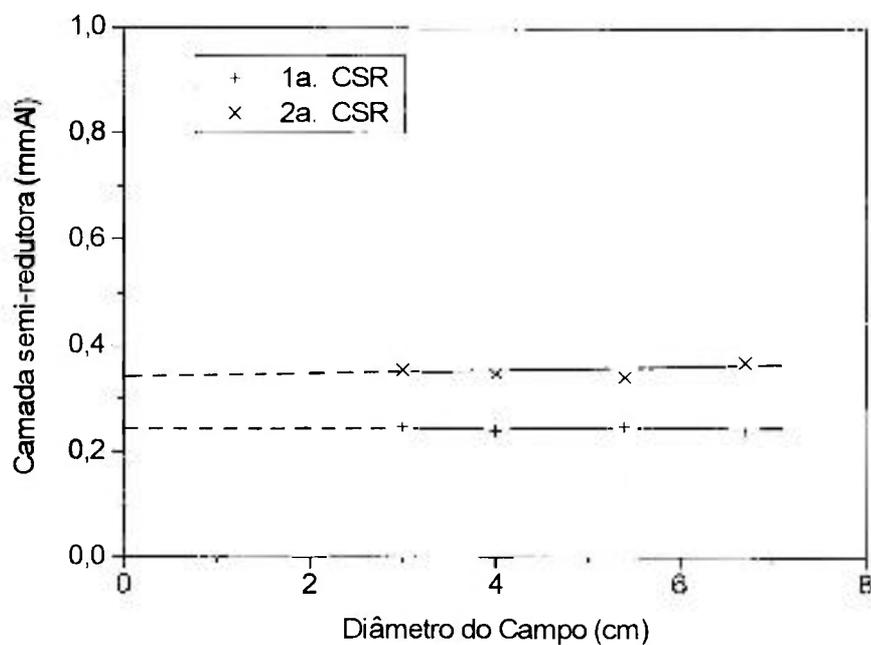


Figura 5.1 - Determinação das primeira e segunda camadas semi-redutoras através do método de "Extrapolção para Campos Infinitamente Pequenos", para a qualidade de campo de raios-X, nível Radioterapia, referente a 25 kV

A Tabela 5.1 apresenta as qualidades de campos NPL em comparação com aquelas implantadas no sistema de calibração de raios-X do IPEN.

Tabela 5.1 - Características dos campos de raios-X de energias baixas, nível Radioterapia, NPL e IPEN

Tensão (kV)	NPL ³¹		Tensão (kV)	IPEN	
	F. A. ^(a) (mmAl)	1 ^a CSR (mmAl)		F. A. ^(a) (mmAl)	1 ^a CSR (mmAl)
25	0,44	0,25	25	0,44	0,25
32	0,47	0,35	30	0,54	0,36
40,4	0,68	0,50	40	0,68	0,53
42	0,74	0,70	45	0,73	0,59
49,5	1,02	1,00	50	1,02	0,89

^(a) F. A. = Filtração Adicional

As diferenças entre os valores das tensões NPL e IPEN são devidas ao fato do gerador acoplado ao tubo de raios-X do IPEN não permitir o “ajuste fino” do valor da tensão aplicada ao tubo. Tais diferenças, juntamente com aquelas existentes entre os valores das respectivas filtrações adicionais utilizadas, alteram os espectros resultantes, e portanto as energias efetivas dos campos de radiação produzidos. Logo, as qualidades de campos referentes a 30 e 45 kV, que apresentam diferenças de 6,3 e 7,1 %, respectivamente, entre as tensões aplicadas nos laboratórios NPL e IPEN, e 15,0 % e 1,3 % entre as respectivas filtrações adicionais, não podem ser consideradas como tendo as mesmas energias efetivas (no caso específico da qualidade de campo referente a 45 kV, o fator determinante para esta conclusão foi a diferença encontrada entre os valores das tensões aplicadas ao tubo de raios-X e não a diferença entre as filtrações adicionais). O maior desvio padrão percentual determinado para as espessuras das filtrações adicionais foi 1,5 %, para a qualidade de campo referente a 30 kV.

Segundo as recomendações internacionais¹⁵, para que duas qualidades de campos, nível Radioterapia, sejam consideradas idênticas, os valores de suas CSRs não devem apresentar diferença maior que $\pm 2\%$ entre si. Observando a Tabela 5.1, nota-se que a única qualidade de campo implantada no Laboratório de Calibração do IPEN, nível Radioterapia, que pode ser considerada idêntica àquela implantada no NPL é a qualidade de campo referente a 25 kV, já que esta apresenta as menores diferenças entre os parâmetros IPEN e NPL que definem uma qualidade de campo de raios-X. O maior desvio padrão percentual associado à determinação das CSRs foi igual a 3,0 %, para a qualidade de campo referente a 25 kV.

As segundas CSRs foram também determinadas no caso do IPEN, com um desvio padrão percentual máximo igual a 6,5 % para a qualidade de campo referente a 25 kV, porém o NPL não fornece seus valores no certificado e, portanto, não há como comparar os valores obtidos.

Quanto ao coeficiente de homogeneidade, segundo o ICRU 17¹⁹, “quando uma porção significativa dos raios-X produzidos é devida à emissão característica, o conceito de coeficiente de homogeneidade deixa de ser utilizado. Isto acontece para tubos de raios-X com janela de berílio, alvo de tungstênio, que operam com tensões abaixo de 50 kV e com baixa filtração. Nesta situação, o efeito da radiação característica emitida pela camada L do alvo de tungstênio é significativa, e a transmissão da radiação característica emitida pela camada L, ao atravessar a janela de berílio, produz campos relativamente homogêneos. Aumentado a filtração de alumínio, a homogeneidade do campo tende a aumentar.”

Já segundo Loevinger & Chappell²⁸, para caracterizar um feixe de raios-X, além da tensão aplicada ao tubo, da filtração adicional e da primeira CSR, pode-se utilizar a segunda CSR ou o coeficiente de homogeneidade. Desta forma, optou-se por apresentar as características das qualidades de campos implantadas no Laboratório de Calibração do IPEN, incluindo a segunda CSR, como mostra a Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Características das qualidades de campos nível Radioterapia implantadas no Laboratório de Calibração do IPEN

Tensão (kV)	Filtração Adicional (mmAl)	Energia Efetiva (keV)	1 ^a . CSR (mmAl)	2 ^a . CSR (mmAl)
25	0,44	14,3	0,25	0,34
30	0,54	15,5	0,36	0,54
40	0,68	17,7	0,53	0,81
45	0,73	18,7	0,59	0,99
50	1,02	21,2	0,89	1,40

O próximo passo, então, é determinar os fatores de calibração das qualidades de campos nível Radioterapia para o sistema de medida A (padrão secundário NPL), e, a partir destes fatores, as respectivas taxas de exposição, aplicando-os às medidas obtidas com este sistema de medida.

5.2 Determinação dos Fatores de Calibração para o Sistema de Medida A, para as Qualidades de Campos Nível Radioterapia IPEN

O sistema padrão secundário (sistema de medida A) do Laboratório de Calibração do IPEN foi calibrado no Laboratório NPL. A partir dos fatores de calibração fornecidos pelo certificado³¹, cuja incerteza máxima associada é de 1,5 %, construiu-se a curva da Figura 5.2, e determinou-se, segundo recomendação internacional²⁹, os fatores de calibração para as qualidades de campos nível Radioterapia implantadas no IPEN, por interpolação, em função das respectivas CSRs. No certificado fornecido pelo NPL, os fatores de calibração são denominados "Fatores de Multiplicação" e são adimensionais.

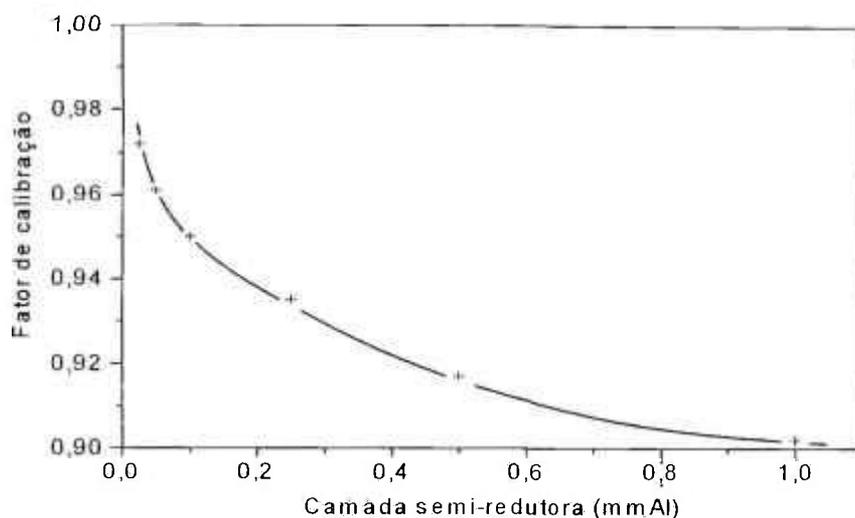


Figura 5.2 - Curva de calibração do sistema de medida A, obtida a partir do certificado de calibração fornecido pelo NPL³¹

A Tabela 5.3 apresenta os fatores de calibração obtidos para o sistema de medida A, para as qualidades de campo nível Radioterapia, implantadas no IPEN, através da Figura 5.2, e as respectivas taxas de exposição.

Tabela 5.3 - Fatores de calibração obtidos para as qualidades de campos nível Radioterapia IPEN, para o sistema de medida A, e respectivas taxas de exposição determinadas a 50 cm do alvo do tubo de raios-X, para um campo de diâmetro igual a 7,0 cm

Tensão (kV)	F. A. ^(a) (mmAl)	Energia Efetiva (keV)	F _c ^(b)	Taxa de Exposição ^(c) (R/min)	(mC/kg.min)
25	0,44	14,3	0,934	1,42	0,366
30	0,54	15,5	0,928	1,51	0,387
40	0,68	17,7	0,915	2,12	0,547
45	0,73	18,7	0,913	2,40	0,619
50	1,02	21,2	0,904	2,00	0,516

^(a) F. A. = Filtração Adicional

^(b) F_c = Fator de Calibração

^(c) Taxas de Exposição determinadas para 1 mA

Analisando-se a Tabela 5.3, nota-se que a dependência energética apresentada pelo sistema de medida A para a faixa de energia estudada é de 3,3 %.

5.3 Calibração dos Sistemas de Medida C e D nos Campos de Raios-X de Energias Baixas, Nível Radioterapia

A calibração dos sistemas de medida C e D foi feita para as qualidades de campo referentes a 25, 40 e 50 kV. O método de calibração utilizado foi o da substituição. Desta forma, obteve-se primeiro as medidas com o sistema padrão secundário (sistema A), depois com os sistemas C e D, e, novamente com o sistema A. As câmaras de ionização foram posicionadas uma a uma no centro do campo, a 50 cm do alvo do tubo de raios-X, num campo de diâmetro igual a 8,0 cm, reproduzindo a situação em que o sistema de medida A foi calibrado no NPL. Todas as medidas foram corrigidas para as condições ambientais de referência (20 °C, 101,3 kPa e 50 % de umidade).

Para todas as qualidades de campo, o número de dígitos do eletrômetro da câmara monitora foi ajustado para 1000. O intervalo de tempo de pré-aquecimento e estabilização de cada sistema de medida foi de 30 min e para o sistema de calibração de raios-X, 15 min. Foram tomadas cinco leituras para cada sistema, cuja média corresponde a uma medida. Para o sistema de medida A deve-se considerar, ainda, um fator de correção da escala do eletrômetro, que é igual a 100. Os maiores desvios padrões percentuais das medidas para cada sistema foram 0,4 % para o sistema de medida C, na qualidade de campo referente a 40 kV, e 0,2 % para o sistema de medida D, na qualidade de campo referente a 25 kV.

Os fatores de correção para as qualidades de campo referentes a 25, 40 e 50 kV dos sistemas de medida C e D são determinados através do quociente entre as taxas de exposição determinadas para o sistema A e as medidas obtidas para os respectivos sistemas de medida, para cada qualidade de campo. Na Tabela 5.4 são apresentados os fatores de calibração obtidos.

Tabela 5.4 - Fatores de calibração obtidos para os sistemas de medida C e D para as qualidades de campo IPEN, nível Radioterapia

Tensão (kV)	Energia Efetiva (keV)	Fator de Calibração			
		Sistema C (R/ue) (10 ⁻⁴ C/kg.ue)		Sistema D (R/ue) (10 ⁻⁴ C/kg.ue)	
25	14,3	1,06	2,73	1,11	2,86
40	17,7	1,05	2,71	1,14	2,94
50	21,2	1,04	2,68	1,15	2,97

Analisando os fatores de calibração determinados para as qualidades de campo de energias baixas, nível Radioterapia, nota-se que a dependência energética obtida entre a maior e a menor energia para os sistemas de medida C e D foram 2 e 3,5 %, respectivamente. Para uma câmara de ionização similar àquela que compõe o sistema de medida D, Caldas⁷ determinou uma dependência energética igual a 2,9 %, para a faixa de energia de 14 a 21 keV.

6 QUALIDADES DE CAMPOS NÍVEL RADIOPROTEÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos utilizados na escolha e implantação das qualidades de campos de energias baixas, nível Radioproteção, além das alterações necessárias no sistema de calibração de raios-X original para se alcançar tal objetivo.

6.1 Escolha das Qualidades de Campos a serem Implantadas

Através de consultas a referências relativas à calibração de instrumentos utilizados em propósitos de Radioproteção, foram “definidas” quais qualidades de campos poderiam ser implantadas no sistema de calibração de energias baixas do Laboratório de Calibração do IPEN, de acordo com suas características (tensão e corrente máximos aplicáveis).

Até recentemente, poucos laboratórios internacionais apresentavam qualidades de campos de raios-X de energias baixas para propósitos de calibração de instrumentos utilizados em Radioproteção. Dentre estes laboratórios, destacam-se o Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), da Alemanha, e o NPL, da Inglaterra. O NPL reproduziu em seus laboratórios algumas das qualidades de campos PTB, considerando o fato de que a ISO 4037 sofreria uma revisão para a inclusão de qualidades de campos com energias a partir de 8 keV, segundo Rossiter³⁸. Neste trabalho, como não havia qualidades de campos de energias baixas padronizadas internacionalmente até o momento

da decisão de quais qualidades de campos implantar, optou-se por reproduzir as qualidades de campos nível Radioproteção implantadas no NPL, já que o Laboratório de Calibração do IPEN possui dois padrões secundários calibrados por este laboratório.

As características (tensão, filtração adicional e CSR) destas qualidades de campos foram obtidas diretamente junto ao NPL, que são apresentadas na Tabela 6.1. Para estas qualidades de campos, o NPL determinou uma taxa de kerma no ar igual, aproximadamente, a 5 mGy.h^{-1} , a 2,0 m do alvo do tubo de raios-X e para uma corrente de 10 mA^{33} . O equipamento utilizado no NPL é constituído por um gerador de energias baixas de raios-X, acoplado a um tubo *Machlett OEG-50A*, com filtração inerente de 1 mmBe.

Para verificar se a 2,0 m o sistema de medida a ser utilizado no IPEN para a implantação de tais qualidades (sistema de medida E) teria sensibilidade suficiente para detectar a taxa de exposição obtida em tais circunstâncias, foram feitas medidas da taxa de exposição para a qualidade de campo, nível Radioterapia, referente à menor energia, quando foi observado o cumprimento da Lei do Inverso do Quadrado da Distância, como já foi explicado no Capítulo 4, item 4.5.

Porém, além de tal medida, foi necessário considerar o fato de que, para qualidades de campos nível Radioproteção, a filtração total é maior, já que as taxas de exposição são menores, e, ainda, que o feixe produzido é atenuado pela camada de ar correspondente a tal distância; então, neste caso, o resultado obtido em tal medida diminui, o que limita ainda mais a sensibilidade do sistema de medida a ser utilizado. Por isto, as câmaras de ionização utilizadas para as medidas de CSR em feixes de raios-X, nível Radioproteção, além de baixa dependência energética e boa reprodutibilidade, devem ter um grande volume sensível para compensar a baixa densidade de ionização produzida.

A desvantagem deste tipo de câmaras, neste caso, é que elas, devido à alta sensibilidade, não permitem a realização de medidas sem levar em conta a contribuição da radiação espalhada⁴². Como foi constatado que a contribuição da radiação espalhada está abaixo dos limites recomendados, foi possível utilizar o sistema de medida E.

Tabela 6.1 - Série NPL de qualidades de campos usada para calibrações, nível Radioproteção³³

Tensão (kV)	Energia Efetiva (keV)	Filtração Adicional		1ª CSR (mmAl)
		(mmAl)	(mmCu)	
20	16	0,92		0,35
25	20	1,70		0,64
30	24	2,70		1,03
40	31	2,80	0,07	2,00
50	38	1,10	0,23	3,30

6.2 Alterações Necessárias no Sistema de Calibração

Após a decisão de quais qualidades de campos seriam implantadas, houve a necessidade de verificar quais alterações deveriam ser feitas no sistema de calibração de raios-X de energias baixas do IPEN para se alcançar tal objetivo. Estas alterações ficaram restritas à inclusão de um suporte de colimadores, possibilitando uma melhor definição do diâmetro do campo na posição de calibração, e à roda de filtros, na qual deveriam ser ajustados os filtros adicionais correspondentes a cada qualidade de campo.

6.2.1 Confeção do Suporte e Respective Colimadores

Para a confecção do conjunto formado pelo suporte e seus respectivos colimadores verificou-se, em primeiro lugar, o diâmetro máximo do campo produzido pelo sistema de colimação original. Este sistema era, até então, formado por dois colimadores principais, posicionados a 7,8 e 27,8 cm do alvo, um suporte de colimadores, posicionado a 32,8 cm do alvo, e ainda por um suporte de absorvedores utilizados somente para a determinação de CSRs, posicionado a 38,3 cm do alvo (Figura 3.1). Os diâmetros destes colimadores variam entre 2,7 e 11,0 cm, sendo o segundo colimador o responsável pela definição do campo de diâmetro máximo, a qualquer distância do alvo, com diâmetro igual a 7,0 cm. A 2,0 m do alvo do tubo de raios-X, o diâmetro de campo fornecido por este colimador é de 52,6 cm.

A partir deste resultado, foram estabelecidos quais seriam os diâmetros de campos desejados para a calibração de instrumentos utilizados em Radioproteção. As normas referentes calibração de instrumentos com este propósito estabelecem que o diâmetro do campo na posição de calibração deve ser suficiente para irradiar apenas o instrumento a ser calibrado, para evitar a contribuição da radiação espalhada nas medidas obtidas.

Mesmo sabendo que, a esta distância do alvo, a contribuição da radiação espalhada é desprezível para a faixa de energia utilizada (Capítulo 4, item 4.5), resolveu-se delimitar o diâmetro do campo na posição de calibração. Os diâmetros de campos desejados a 2,0 m do alvo do tubo de raios-X eram 15, 20, 25, 30 e 40 cm, já se levando em conta os tipos de instrumentos e procedimentos de calibração que seriam utilizados.

Finalmente, através de cálculos por semelhança de triângulos, foram definidos os diâmetros do suporte e do conjunto de cinco colimadores que forneceriam os diâmetros de campos desejados a 2,0 m do alvo. O suporte de colimadores teria um diâmetro igual a 37,8 cm, e os colimadores, diâmetros variando entre 11,2 e 30 cm. O suporte seria posicionado a 50 cm da posição determinada para a calibração de instrumentos nível Radioproteção (ou a 1,5 m

do alvo do tubo de raios-X), como forma de produzir um campo bem definido na posição de calibração.

A confecção do novo suporte e respectivos colimadores foi feita na Oficina Mecânica do IPEN. Foram utilizados, para a confecção deste conjunto, chapas de ferro, com 0,5 cm de espessura. Os colimadores possuem forma circular, como todos os outros colimadores que formam o sistema de colimação.

Assim, o sistema de calibração de raios-X de energias baixas passou a ter um sistema de colimação formado por dois colimadores principais, um suporte de absorvedores utilizado somente para a determinação das CSRs das qualidades de campos implantadas, e dois conjuntos de colimadores. O primeiro é fixo, posicionado após a câmara de transmissão, a 32,8 cm do alvo, e é responsável pela definição do diâmetro do campo na posição referente calibração de instrumentos utilizados em propósitos de Radioterapia; o segundo, posicionado a 1,5 m do alvo, é responsável pela definição do diâmetro do campo a 2,0 m do alvo (posição de calibração de instrumentos utilizados em propósitos de Radioproteção), e é ajustado somente quando utilizado para este propósito.

A Tabela 6.2 apresenta os dois conjuntos de colimadores e os respectivos diâmetros de campos produzidos nas posições de calibração, nível Radioterapia e nível Radioproteção.

Tabela 6.2 - Conjuntos de colimadores, e respectivos diâmetros, que compõem o sistema de calibração de raios-X de energias baixas

<u>Radioterapia</u>		<u>Radioproteção</u>	
Diâm. do Colimador (cm)	Diâm. do Campo (cm)	Diâm. do Colimador (cm)	Diâm. do Campo (cm)
2,0	3,0	11,2	15,0
2,3	3,5	15,0	20,0
2,6	4,0	18,7	25,0
3,5	5,4	22,5	30,0
4,4	6,7	30,0	40,0
5,2	8,0	37,5	50,0
7,1	11,0		

6.2.2 Confeção dos Filtros Adicionais Referentes às Qualidades de Campos Nível Radioproteção

As normas internacionais relativas à implantação de qualidades de campos de raios-X recomendam que o material utilizado na confecção da filtração adicional e dos absorvedores utilizados na obtenção da curva de transmissão para a determinação das CSRs devem ter um grau de 99,9 % de pureza^{13,22}. Porém, segundo informações obtidas com fabricantes de chapas de alumínio, soube-se que no Brasil não se produz material com tal grau de pureza; e o Laboratório de Calibração do IPEN, apesar de possuir alguns filtros de alumínio e cobre importados, de alta pureza e com pequenas espessuras, que faziam parte da roda de filtros original do equipamento de raios-X, não possuía material suficiente para todas as qualidades a serem implantadas.

O problema da falta de material para a confecção dos filtros e absorvedores necessários foi resolvido pela Divisão de Desenvolvimento do Combustível (MCP), pertencente ao Departamento de Tecnologia do Combustível (MC) do IPEN (que utiliza chapas de alumínio com 99,7 % grau de pureza e 4 mm de espessura para a produção de varetas que acondicionam os elementos combustíveis utilizados no reator do IPEN), que forneceu o material necessário, sob a forma de chapas com espessuras variando entre 0,2 e 4,0 mm.

A Divisão de Desenvolvimento do Combustível (MCP) também forneceu um laudo²⁴ da avaliação química das impurezas encontradas no material, onde se mostrou que o grau de todas as impurezas encontradas estão dentro dos limites máximos estabelecidos. Além disso, foi feita uma análise da homogeneidade da espessura dos filtros, numa amostragem do material já cortado nas especificações desejadas. Esta análise foi feita através da medida da espessura em treze pontos dos filtros, com um micrômetro de alta precisão, cuja variação máxima obtida para toda a amostragem foi igual a 1,2 % para os filtros de menor espessura (0,20 mm), o que foi considerado satisfatório para os propósitos em questão.

Para algumas qualidades, houve a necessidade de se lixar alguns filtros de alumínio para diminuir sua espessura. Mesmo assim, houve uma preocupação em se manter a homogeneidade destes filtros, sendo o controle de qualidade feito no próprio Laboratório de Calibração, através de medidas da espessura em cinco pontos desses filtros com um micrômetro comum, marca *Mitutoyo* (0-25; 0,01 mm). O valor da espessura de cada filtro foi tomado como a média das cinco leituras realizadas. A Tabela 6.3 apresenta a variação na medida das espessuras e dos respectivos desvios padrões percentuais obtidos, para 95 % de nível de confiança.

A tolerância na determinação da espessura dos filtros utilizados como filtração adicional e como absorvedores na determinação de CSRs é $\pm 5\%$, segundo a ISO 4037²². Analisando-se, portanto, a Tabela 6.3 nota-se que os resultados obtidos estão dentro do limite estabelecido.

Tabela 6.3 - Espessura dos filtros e absorvedores utilizados na implantação das qualidades de campos nível Radioproteção

Quantidade de Filtros	Material	Varição na Medida das Espessuras (mm)	Desvios Padrões Percentuais Máximos (%)
1 (MCP)	Alumínio	4,012	0,26
1 (MCP)	Alumínio	1,182	0,47
7 (MCP)	Alumínio	1,100 a 1,132	0,78
2 (MCP)	Alumínio	1,022	0,54
1 (MQC)	Alumínio	0,906	0,75
1 (RODA)	Alumínio	0,523	0,65
5 (MCP)	Alumínio	0,494 a 0,535	1,16
1 (RODA)	Alumínio	0,402	1,40
3 (MCP)	Alumínio	0,404 a 0,406	2,70
1 (MCP)	Alumínio	0,201	1,40
1 (RODA)	Cobre	0,198	1,71
1 (RODA)	Cobre	0,100	0
1 (RODA)	Cobre	0,030	0

MCP : material fornecido pela Divisão de Desenvolvimento do Combustível (MCP)

RODA: material do sistema original (roda de filtros)

Para se obter as filtrações adicionais estabelecidas pelo NPL, foi feita uma combinação entre os filtros, e a incerteza na espessura total obtida para cada filtração foi determinada por propagação de erros. A Tabela 6.4 apresenta as filtrações adicionais para as qualidades de campos nível Radioproteção, implantadas no IPEN, em comparação com aquelas implantadas no NPL. O desvio padrão percentual obtido na determinação da filtração adicional variou entre 0,24 e 1,32 %.

Tabela 6.4 - Filtrações adicionais das qualidades de campos de energias baixas, nível Radioproteção, implantadas nos Laboratórios NPL e IPEN

Tensão (kV)	Filtração Adicional			
	(mmAl)	<u>NPL</u> (mmCu)	(mmAl)	<u>IPEN</u> (mmCu)
20	0,92		0,92	
25	1,70		1,70	
30	2,70		2,70	
40	2,80	0,07	4,92	
40	2,80	0,07	1,83	0,10
50	1,10	0,23	1,12	0,23

Analisando-se a Tabela 6.4, nota-se que todas as qualidades de campos implantadas no IPEN, exceto aquela referente a 40 kV, reproduzem, com um erro máximo de 1,8 %, a filtração adicional usada no NPL. Com relação à qualidade referente a 40 kV, houve dificuldade em se conseguir um filtro de cobre com espessura igual a 0,07 mm. Portanto, utilizando-se a equivalência de filtros de cobre e de alumínio, foram feitas duas tentativas de reprodução da filtração adicional utilizada no NPL para esta tensão. O teste para se verificar qual das duas filtrações seria mais eficiente, será descrito no item 6.5 deste capítulo.

6.3 Determinação das CSRs das Qualidades de Campos NPL Implantadas

A determinação das CSRs para cada qualidade de campo implantada foi feita como no caso da determinação das CSRs das qualidades de campos nível Radioterapia, ou seja, através da obtenção da curva de transmissão, variando-se a espessura de absorvedores. As CSRs das qualidades de campos nível Radioproteção implantadas foram determinadas, a princípio, para um único diâmetro de campo (12 cm), a 2,0 m do alvo do tubo de raios-X e para uma corrente igual a 10 mA, como no NPL, já que a ISO/DIS 4037-1²³ recomenda que a técnica de extrapolação para campos infinitamente pequenos deve ser utilizada apenas para a determinação de CSR de tubos de raios-X com tensão acima de 100 kV. O diâmetro de campo igual a 12 cm foi “escolhido” porque o diâmetro da câmara de ionização utilizada para estas medidas (sistema de medida E) apresenta um diâmetro igual a 11,3 cm.

Porém, para a determinação das CSRs das qualidades de campos referentes a 20 e 50 kV, correspondentes à menor e à maior energias efetivas, respectivamente, resolveu-se utilizar a técnica de Extrapolação para Campos Infinitamente Pequenos, apenas para verificar a variação das CSRs com o diâmetro do campo. Neste caso, determinou-se as CSRs para quatro diâmetros de campos diferentes, combinando-se os colimadores posicionados no primeiro e no segundo suportes do sistema de colimação. A Figura 6.1 apresenta as curvas de extrapolação para campos infinitamente pequenos obtidas para as qualidades de campos referentes a 20 e 50 kV, respectivamente.

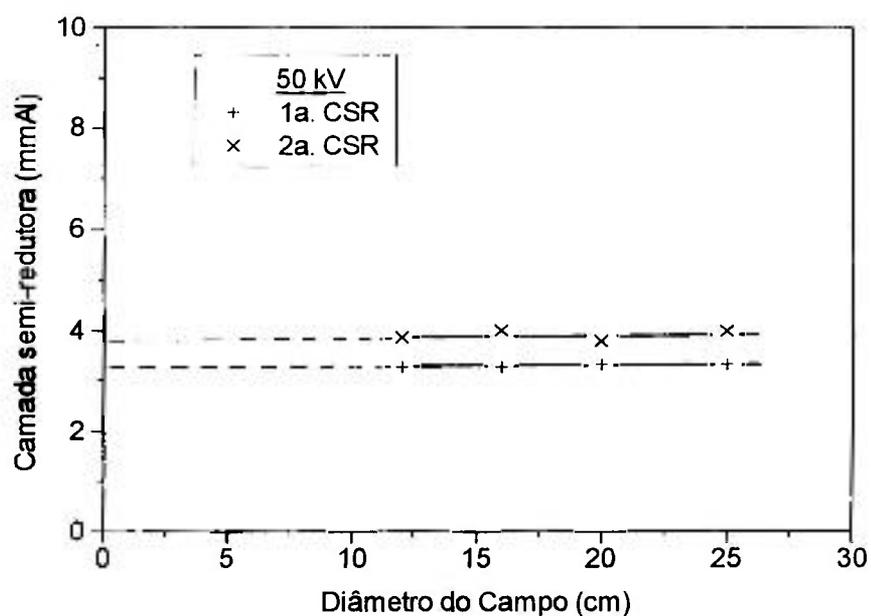
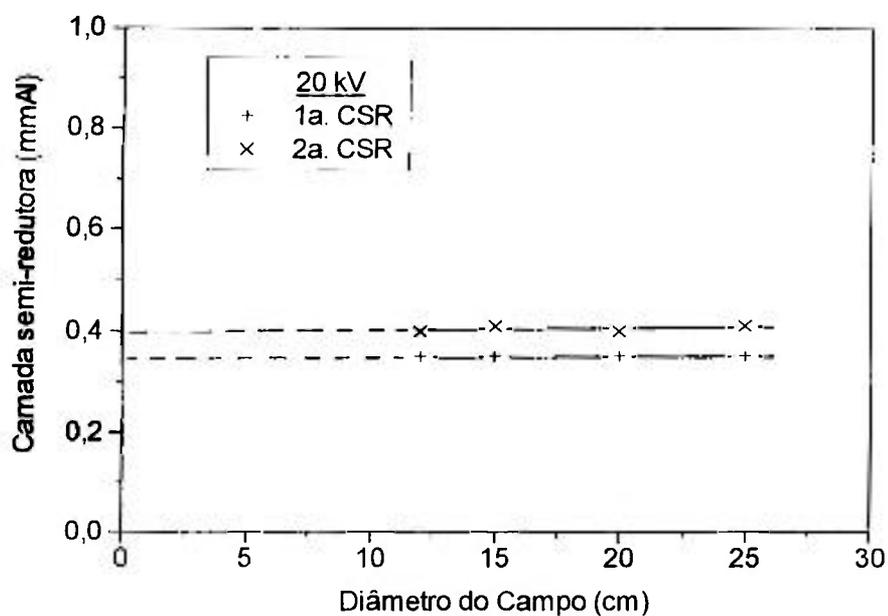


Figura 6.1 - Determinação da primeira e segunda camadas semi-redutoras (CSR), com o sistema de medida E, pelo Método da Extrapolação para Campos Infinitamente Pequenos, para as qualidades de campos, nível Radioproteção, referentes a 20 e 50 kV

Analisando-se a Figura 6.1, observa-se que na determinação das CSRs para as duas qualidades de campos, pode-se dizer que os valores obtidos para os diferentes diâmetros de campos das CSRs permaneceram praticamente constantes, independentemente do diâmetro de campo utilizado, o que prova, mais uma vez, que a radiação espalhada para a faixa de energia estudada não é significativa. Todos os valores de CSRs obtidos para as qualidades de campos implantadas, nível Radioproteção, foram comparados aqueles do NPL, como mostra a Tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Comparação entre os valores das primeiras CSRs das qualidades de campos nível Radioproteção, dos laboratórios NPL e IPEN

Tensão (kV)	1ª CSR NPL (mAl)	1ª CSR IPEN (mAl)
20	0,35	0,35
25	0,64	0,66
30	1,03	1,02
40	2,00	1,95
40	2,00	1,95
50	3,30	3,20

Comparando-se os valores das CSRs obtidos, nota-se que a variação máxima foi igual a 3,1 %, para as qualidades de campos referentes a 25 e 50 kV, que está dentro do limite de 5,0 % recomendado pela ISO/DIS 4037-1²³. Sendo assim, pode-se concluir que as qualidades de campos implantadas no IPEN podem ser consideradas idênticas, ou seja, de mesma energia efetiva daquelas implantadas no NPL. O desvio percentual máximo encontrado na determinação das CSRs foi igual a 1,5 %. A Tabela 6.6 apresenta as características finais das qualidades de campos, nível Radioproteção, implantadas no Laboratório de Calibração do IPEN.

Tabela 6.6 - Qualidades de campos, nível Radioproteção, implantadas no sistema de calibração de raios-X de energias baixas (60 kV) do Laboratório de Calibração do IPEN

Tensão (kV)	Filtração Adicional (mmAl) (mmCu)		Energia Efetiva (keV)	1 ^a CSR (mmAl)	2 ^a CSR (mmAl)
20	0,92		16	0,35	0,40
25	1,70		20	0,66	0,72
30	2,70		24	1,02	1,32
40	4,92		31	1,95	2,35
40	1,83	0,10	31	1,95	2,35
50	1,12	0,23	38	3,27	3,83

No caso da determinação das CSRs da qualidade de campo referente a 40 kV, nota-se que para as duas filtrações adicionais utilizadas, o valor das CSRs obtidos foram os mesmos, e, comparando-os com aquele determinado pelo NPL, obtém-se uma diferença de 2,5 %, que está dentro do limite de variação de 5,0 % recomendado pela ISO/DIS 4037-1²³. Portanto, a utilização de uma ou outra filtração adicional é indiferente.

6.4 Qualidades de Campos ISO de Energias Baixas, Nível Radioproteção

Além das qualidades de campos da série NPL, foram ainda implantadas duas qualidades de campos ISO, referentes a 40 e 60 kV, da série "Espectro Estreito", cujas energias efetivas são 33 e 48 keV, respectivamente^{16,23}.

Porém, para estas qualidades de campos, além das respectivas filtrações adicionais, a série ISO utiliza ainda um filtro de 4 mmAl, localizado após a

filtração adicional, para reduzir a radiação de fluorescência produzida na filtração adicional utilizada, cujo material é o cobre²³.

A Tabela 6.7 apresenta as qualidades ISO e aquelas implantadas no IPEN, com os respectivos valores das CSRs. Os valores das CSRs obtidos pela ISO são determinados a 1,0 m do alvo do tubo de raios-X. No IPEN, as CSRs das qualidades ISO implantadas foram obtidas a 2,0 m do alvo do tubo de raios-X, através das respectivas curvas de transmissão, para um diâmetro de campo igual a 12 cm, e uma corrente aplicada ao tubo de raios-X de 20 mA, para a qualidade referente a 40 kV, e 10 mA, para a qualidade referente a 60 kV. Tais correntes foram aplicadas de forma que as leituras no eletrômetro do sistema de medida E fossem obtidas na faixa entre 20 e 80 % de sua escala.

Tabela 6.7 - Características das qualidades de campos ISO, nível Radioproteção, em comparação com as mesmas qualidades de campos reproduzidas no IPEN

Tensão (kV)	F. A. ^(a) (mmCu)	ISO		F. A. ^(a) (mmCu)	IPEN	
		1 ^a . CSR (mmCu)	2 ^a . CSR (mmCu)		1 ^a . CSR (mmCu)	2 ^a . CSR (mmCu)
40	0,21	0,084	0,091	0,21	0,086	0,088
60	0,60	0,240	0,260	0,57	0,232	0,317

^(a)F. A. = Filtração Adicional

Analisando-se os resultados mostrados na Tabela 6.7, nota-se que, para a qualidade de campo referente a 40 kV, a filtração adicional utilizada para tal qualidade de campo no Laboratório de Calibração do IPEN é idêntica àquela utilizada pela ISO, e nos valores das primeira e segunda CSRs determinados, as variações obtidas foram, respectivamente, 2,4 e 3,3 %.

Para a qualidade de campo referente a 60 kV, a filtração adicional utilizada no IPEN é pouco menor que aquela utilizada pela ISO (5 %), porque não havia filtros de cobre suficientes disponíveis, com a espessura de 0,01 mm, para

completar a espessura de 0,60 mm desejada e, além disso, a Oficina Mecânica do IPEN não possui um laminador que consiga diminuir a espessura de um filtro de cobre até este valor desejado. Neste caso, a variação obtida entre os valores das primeira e segunda CSRs ISO e IPEN foi igual a 3,3 e 22 %, respectivamente.

Segundo Read³⁷, a determinação dos parâmetros das qualidades ISO, pertencentes à série filtrada, apresenta algumas dificuldades quanto à precisão com que tais parâmetros são determinados. A incerteza maior obtida para a segunda CSR é devida ao seguinte fato: como a filtração adicional utilizada é menor, tem-se uma contribuição maior de fótons de menor energia no espectro desta qualidade de campo. Estes fótons aumentam a taxa de exposição, o que torna necessário uma maior espessura de absorvedor para reduzir a taxa de exposição inicial a 25 %. De qualquer forma, como a primeira CSR obtida apresentou uma variação dentro do limite recomendado, considerou-se que esta qualidade apresenta uma energia efetiva próxima àquela determinada pela ISO. As incertezas associadas às primeira e segunda CSRs variaram entre 1,6 e 8,0 %, respectivamente, enquanto que as incertezas associadas à determinação das espessuras das filtrações adicionais foram 2,4 e 0,9 %, para as qualidades de campos referentes a 40 e 60 kV, respectivamente.

As taxas de exposição para as qualidades de campos ISO implantadas foram determinadas com a câmara de ionização padrão secundário, marca ÖFS, modelo *LS01* (série n^o 105), pertencente ao IRD, acoplada ao eletrômetro *Keithley*, modelo *617* (série n^o 360959), pertencente ao IPEN, cujos valores obtidos, para um diâmetro de campo igual a 25 cm, a 2,0 m do alvo foram $1,21 \times 10^{-4} \text{ C.}(kgh)^{-1}$, para 40 kV e $1,93 \times 10^{-4} \text{ C.}(kgh)^{-1}$, para 60 kV. Os desvios padrões percentuais obtidos na determinação destas taxas de exposição foram 0,06 % para a qualidade de campo referente a 40 kV, e 0,07 % para a qualidade de campo referente a 60 kV, para cinco leituras consecutivas, com 95 % de nível de confiança.

6.5 Determinação das Taxas de Exposição e dos Fatores de Calibração para o Sistema de Medida E, para as Qualidades de Campos Implantadas, Nível Radioproteção

O sistema de medida E não possui fatores de calibração para as qualidades de campos, nível Radioproteção, implantadas. Este sistema foi, então, calibrado em relação àquele formado pela câmara padrão secundário para as qualidades ISO, cujos fatores de calibração obtidos foram $3,41 \times 10^{-4} \text{ C.kg}^{-1}/\text{ue}$, para a qualidade de campo referente a 40 kV, e, $3,15 \times 10^{-4} \text{ C.kg}^{-1}/\text{ue}$, para a qualidade de campo referente a 60 kV³⁵, com desvios padrões percentuais iguais a 0,10 e 0,11 %, respectivamente. Aplicando-se estes fatores às medidas obtidas, correspondentes a três leituras consecutivas com o sistema de medida E, num campo de diâmetro igual a 12 cm, determinou-se as respectivas taxas de exposição, iguais a $2,11 \times 10^{-5} \text{ C.(kgh)}^{-1}$ para 40 kV, e $3,44 \times 10^{-5} \text{ C.(kgh)}^{-1}$ para 60 kV, cujos desvios padrões percentuais determinados por propagação de erros foram 0,25 e 0,15 %, respectivamente, para um nível de confiança de 95 %.

A câmara de ionização que compõe o sistema de medida E apresenta uma curva fornecida pelo fabricante, na qual estão incluídos os fatores de correção para as mesmas qualidades ISO que foram implantadas no IPEN. Relacionando-se os fatores experimentais obtidos com aqueles fornecidos pelo fabricante, para cada qualidade ISO, e tomando-se a qualidade correspondente a 60 kV como referência, determinou-se os fatores de calibração para as qualidades de campos NPL implantadas.

A Tabela 6.8 apresenta os fatores de calibração do sistema de medida E obtidos por interpolação, e as respectivas taxas de exposição, para um campo de diâmetro igual a 12 cm, por unidade de corrente. As taxas de exposição foram determinadas aplicando-se os fatores de calibração às medidas obtidas com o sistema de medida E, cujo resultado corresponde à média de três leituras consecutivas. Nestas medidas, o maior desvio padrão percentual obtido não ultrapassou 1,0%, para um nível de confiança igual a 95,0 %.

Tabela 6.8 - Fatores de calibração obtidos para as qualidades de campos nível Radioproteção IPEN, para o sistema de medida E, e respectivas taxas de exposição determinadas a 2,0 m do alvo do tubo de raios-X, para um campo de diâmetro igual a 12 cm

Tensão (kV)	Energia Efetiva (keV)	Fator de Calibração (mR/ue)	Fator de Calibração ($\mu\text{C}/(\text{kg.h.ue})$)	Taxa de Exposição ^(a) (mR/h)	Taxa de Exposição ^(a) (mC/kg.h)
20	16	1,49	0,384	450	0,116
25	20	1,45	0,374	447	0,115
30	24	1,42	0,366	286	0,074
40	31	1,35	0,348	455	0,117
40	31	1,35	0,348	432	0,111
50	38	1,29	0,333	445	0,115
40(ISO)	33	1,32	0,341	82	0,021
60(ISO)	48	1,22	0,315	133	0,034

^(a)Taxas de Exposição determinadas para 1 mA

Para comparar os resultados obtidos, foi utilizada uma câmara de ionização pertencente ao Instituto de Física da Universidade de São Paulo, marca *NE*, modelo 2575C (série n^o 394), volume 600 cm³, equivalente ao volume da câmara do sistema E, que apresenta fatores de calibração para qualidades NPL de energias baixas³². Esta câmara foi acoplada ao eletrômetro NE 2502/3, formando um sistema de medida.

Repetiu-se o procedimento anterior, e determinou-se os fatores de calibração deste novo sistema de medida para as qualidades ISO, cujos valores obtidos foram $1,21 \times 10^{-5} \text{ C}/(\text{kg.nC})$, para 40 kV, e $1,22 \times 10^{-5} \text{ C}/(\text{kg.nC})$, para 60 kV. Relacionando estes fatores de calibração, com aqueles obtidos diretamente da curva de dependência energética fornecida pelo certificado da câmara 2575C, foram obtidos os demais fatores de calibração para as qualidades de campo de energias baixas NPL. Com estes fatores de calibração, aplicados às medidas obtidas, foram determinadas as taxas de exposição para as

respectivas qualidades de campos. Cada medida também corresponde a três leituras consecutivas, e o desvio padrão percentual máximo obtido foi igual a 2,0 %. A Tabela 6.9 apresenta os fatores de calibração e as respectivas taxas de exposição, por unidade de corrente, para as qualidades de campos implantadas, nível Radioproteção.

Tabela 6.9 - Fatores de calibração obtidos para as qualidades de campos nível Radioproteção IPEN, para o sistema de medida formado pela câmara de ionização 2575C, e respectivas taxas de exposição determinadas a 2,0 m do alvo do tubo de raios-X, para um campo de diâmetro igual a 12 cm

Tensão (kV)	Energia Efetiva (keV)	Fator de Calibração (mR/ue) (10^{-5} C/kg.ue)		Taxa de Exposição ^(a) (mR/h) (mC/kg.h)	
20	16	50,13	1,293	454	0,117
25	20	50,08	1,292	427	0,110
30	24	49,22	1,270	286	0,074
40	31	48,08	1,240	456	0,118
40	31	48,08	1,240	459	0,118
50	38	47,51	1,226	447	0,115
40(ISO)	33	46,90	1,210	82	0,021
60(ISO)	48	47,23	1,218	133	0,034

^(a)Taxas de Exposição determinadas para 1 mA

A Figura 6.2 apresenta a curva de dependência energética da câmara de ionização 2511/3, fornecida pelo fabricante, e a curva de dependência energética da câmara 2575C fornecida pelo NPL. Esta curva de dependência energética da câmara 2575C foi obtida através do certificado de calibração fornecido pelo NPL³², onde os fatores de calibração são dados em unidades de mR/ue, cuja incerteza associada é de 1,5 %. Na curva do fabricante da câmara 2511/3 são fornecidos fatores de correção, e a incerteza associada não é especificada.

Pode-se notar que a câmara 2511/3 apresenta uma dependência energética pronunciada (aproximadamente 45 %) entre 15 e 100 keV, enquanto que a câmara 2575C apresenta uma dependência energética menor (aproximadamente 10 %) no mesmo intervalo de energia. Além disso, segundo Cross & Rossiter¹⁰, este tipo de câmara apresenta uma incerteza associada de 0,6 % nos procedimentos de calibração, nível Radioproteção, para a faixa de energia de 8 a 38 keV.

A Tabela 6.10 apresenta a diferença obtida entre as taxas de exposição determinadas para os dois sistemas de medida utilizados. Na determinação destas taxas, foram considerados os fatores de calibração do eletrômetro acoplado às câmaras, conforme a expressão 2.2, apresentada no Capítulo 2.

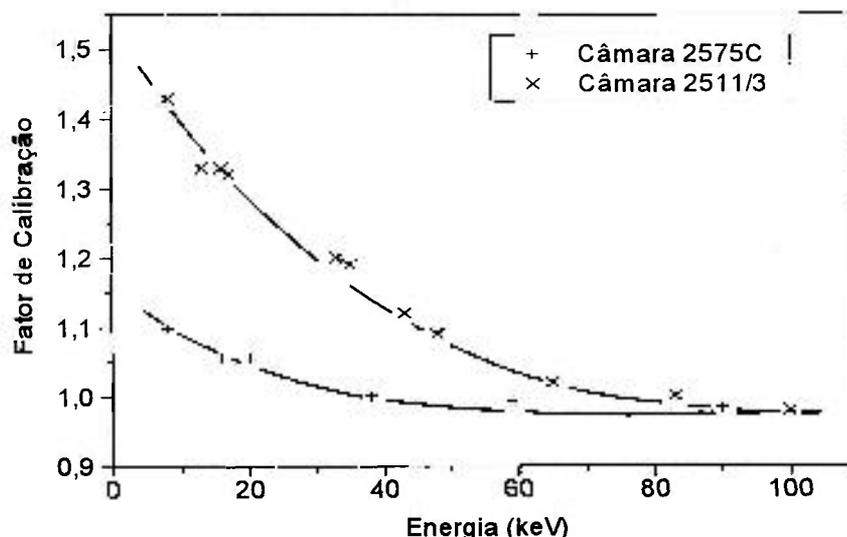


Figura 6.2 - Curvas de dependência energética das câmaras de ionização utilizadas na determinação das taxas de exposição para as qualidades nível Radioproteção

Tabela 6.10 - Diferença entre as taxas de exposição determinadas para os sistemas de medida formados pelas câmaras de ionização 2511/3 (sistema de medida E) e 2575C

Tensão (kV)	Filtração Adicional (mmAl)	Filtração Adicional (mmCu)	Energia Efetiva (keV)	Taxa de Exposição ^(a) (mR/h)		Diferença (%)
				C. I. 2511/3	C. I. 2575	
20	0,92		16	450	454	0,9
25	1,70		20	447	427	4,5
30	2,70		24	286	286	0
40	4,92		31	455	456	0,2
40	1,83	0,10	31	432	459	6,0
50	1,12	0,23	38	445	447	0,4
40(ISO)		0,21	33	82	82	0
60(ISO)		0,57	48	133	133	0

^(a)Taxas de Exposição determinadas para 1 mA

Analisando-se a Tabela 6.10, observa-se que as maiores variações foram obtidas para as qualidades referentes a 25 e 40 kV, com filtração adicional de 1,832 mmAl + 0,100 mmCu. No caso da qualidade referente a 40 kV, como os valores das CSRs obtidos para as duas filtrações adicionais utilizadas coincidiram, pode-se desprezar aquela para a qual foi obtida a maior variação na determinação da taxa de exposição. Já no caso da qualidade referente a 25 kV, concluiu-se que a variação de 4,5 % está associada às incertezas das medidas realizadas. De qualquer forma, esta variação está dentro do limite de 5,0 %, normalmente recomendado na determinação de resultados obtidos em medidas realizadas em qualidades de campos de raios-X, nível Radioproteção.

7 CALIBRAÇÃO E TESTES DE INSTRUMENTOS UTILIZADOS EM RADIOPROTEÇÃO

Após a implantação das qualidades de campos de raios-X de energias baixas nível Radioproteção e a determinação de suas respectivas taxas de exposição, alguns dos detectores a gás mais utilizados para este propósito, câmaras de ionização e detectores Geiger-Müller, previamente calibrados com radiação gama de ^{60}Co ou ^{137}Cs , foram testados para a faixa de energia implantada.

Todos os instrumentos testados apresentam escalas em unidades de exposição, portanto, neste trabalho, esta grandeza foi utilizada na realização dos testes e apresentação dos resultados. As medidas foram obtidas nas unidades do sistema antigo de exposição (Roentgen - R, múltiplos ou submúltiplos), já que todos os instrumentos testados apresentam escalas nessas unidades.

Os instrumentos foram posicionados no ar, de forma que o centro de seu volume sensível coincidissem com o ponto referente à distância de 2,0 m do alvo do tubo de raios-X. No caso dos testes realizados com canetas dosimétricas, que também podem ser utilizadas como dosímetros individuais, as medidas foram obtidas no ar e na presença de um simulador de Lucite de 30x30x15 cm³.

Uma das principais dificuldades encontradas na obtenção das medidas é que nem todos os instrumentos respondem a toda a faixa de energia implantada (16 a 48 keV). Muitas vezes, a medida apresenta-se fora da faixa recomendada de 20 a 80 % da escala, devido a sua própria constituição, que atenua os feixes de energias baixas.

Para efeito de estudo, foram calibrados e testados nove câmaras de ionização e cinco detectores do tipo Geiger-Müller, de fabricantes e modelos diferentes. Um destes detectores (Eberline) apresenta dois tubos Geiger-Müller, que são acoplados como sondas externas e possuem curvas de dependência energética distintas. Foram, ainda, testadas, seis canetas dosimétricas, também de fabricantes diferentes. O sistema de medida E foi utilizado como referência.

7.1 Calibração e Testes de Câmaras de Ionização

As câmaras de ionização portáteis são instrumentos muito utilizados em monitoração de área por não apresentarem dependência energética tão acentuada quanto os detectores Geiger-Müller.

A Tabela 7.1 apresenta as características das câmaras de ionização testadas e calibradas, no presente trabalho, com as qualidades de campos de raios-X de energias baixas, nível Radioproteção.

Tabela 7.1 - Câmaras de ionização testadas e calibradas no presente trabalho

Câmara	Fabricante	Modelo
A	Bicron	RSO-5 TM
B	Nardeux	Babyline 31
C	Nardeux	Babyline 81
D ₁	Victoreen	450
D ₂	Victoreen	450
E	Victoreen	470
F	Victoreen	470A
G	Victoreen	471
H	Victoreen	471 RF

As câmaras B e C apresentam as mesmas características físicas (tamanho e materiais de que são constituídas). As câmaras D₁ e D₂ são idênticas, de "lotes" diferentes. As câmaras E e F também possuem características iguais e são mais conhecidas por "Câmaras Panoramic". A câmara H é uma versão da câmara G, diferindo apenas numa janela adicional de magnésio, o que faz com que estas câmaras apresentem comportamentos diferentes de dependência energética para energias baixas. A maior variação obtida na repetibilidade das câmaras de ionização testadas foi igual a 1,5 %.

A Tabela 7.2 apresenta os fatores de calibração obtidos para as câmaras de ionização para as qualidades de Radioproteção implantadas.

Tabela 7.2 - Fatores de calibração obtidos para câmaras de ionização para as qualidades de campos nível Radioproteção, em unidades antigas, mR/(h.ue)

Câmara	Energia (keV)						
	16	20	24	31	33	38	48
A	1,171	1,163	1,043	1,036	0,995	1,013	0,897
B	0,916	0,976	0,819	0,835	0,536	0,785	0,610
C	1,011	1,030	0,990	0,929	0,884	0,908	0,853
D ₁	1,128	1,120	1,032	1,022	1,037	0,957	1,045
D ₂	1,210	1,202	1,092	1,034	1,012	1,011	1,008
E	0,980	0,858	0,813	0,802	0,745	0,811	0,864
F	0,508	0,532	0,497	0,502	0,500	0,503	0,512
G	0,939	1,002	0,917	0,908	0,837	0,852	0,816
H	1,957	1,902	1,546	1,444	1,344	1,290	1,108

Como já foi dito anteriormente, os instrumentos testados apresentam escalas na unidade antiga de taxa de exposição; desta forma, a apresentação dos fatores de calibração também em unidades antigas torna a avaliação das medidas obtidas mais rápida e direta para os usuários de tais equipamentos. Porém, estes fatores de calibração também são fornecidos nas unidades do Sistema Internacional (Tabela 7.3), utilizando o fator de conversão: $1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$.

Tabela 7.3 - Fatores de calibração obtidos para câmaras de ionização para as qualidades de campo nível Radioproteção, em unidades do Sistema Internacional, $\mu\text{C}/(\text{kg.h.ue})$

Câmara	Energia (keV)						
	16	20	24	31	33	38	48
A	0,321	0,300	0,269	0,267	0,257	0,261	0,231
B	0,236	0,252	0,211	0,215	0,138	0,202	0,157
C	0,261	0,266	0,255	0,240	0,228	0,234	0,220
D ₁	0,291	0,289	0,266	0,264	0,267	0,247	0,270
D ₂	0,312	0,310	0,308	0,268	0,261	0,261	0,260
E	0,253	0,221	0,210	0,207	0,192	0,209	0,223
F	0,131	0,137	0,128	0,129	0,129	0,130	0,132
G	0,242	0,258	0,236	0,234	0,216	0,220	0,210
H	0,505	0,491	0,399	0,372	0,347	0,333	0,286

A partir dos fatores de calibração da Tabela 7.2, foram determinadas as respostas relativas das câmaras de ionização para cada qualidade de campo implantada, nível Radioproteção, que foram normalizadas para o valor obtido para a qualidade de campo referente a 60 kV, correspondente à maior energia de campo implantada (48 keV, qualidade ISO).

Com estes dados, foram construídas as respectivas curvas de dependência energética, mostradas nas Figuras 7.1 a 7.5. O termo “Resposta Relativa” (L) refere-se ao inverso do fator de calibração, ou seja, $L = F_c^{-1}$.

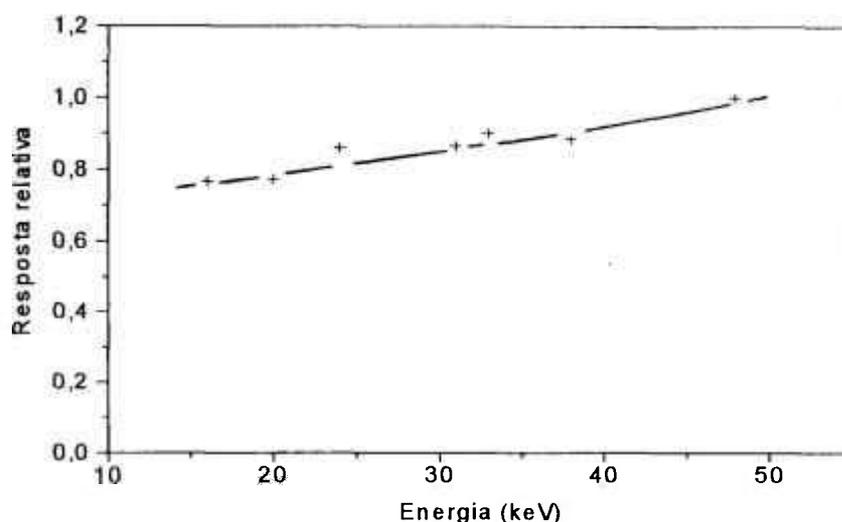


Figura 7.1 - Dependência energética da câmara de ionização Bicron, modelo RSO-5™ (Câmara A, escala 5000 mR/h)

Analisando a Figura 7.1, nota-se que a câmara A apresentou uma dependência energética de aproximadamente 22 % para a faixa de energia estudada, contra 30 % apresentada em curvas desse tipo de instrumento, fornecidas pelo fabricante. Esta diferença está dentro de limites aceitáveis, já que, para a construção da curva típica são testados vários instrumentos do mesmo tipo, enquanto que no caso em questão, a dependência energética foi determinada para um instrumento específico.

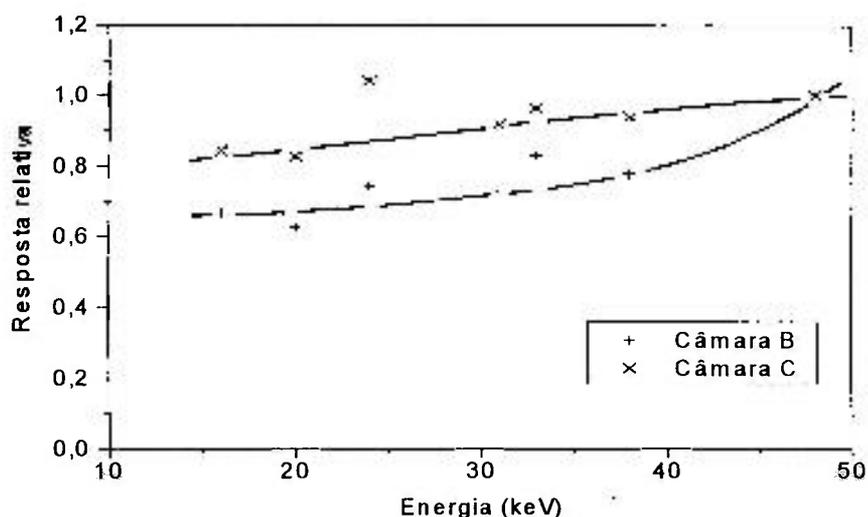


Figura 7.2 - Dependência energética das câmaras Nardeux, modelos Babyline 31 e Babyline 81 (Câmaras B e C, escala 10 R/h)

As câmaras de ionização B e C apresentam características físicas iguais quanto ao tamanho e materiais de que são constituídas, por isso, resolveu-se apresentar suas curvas de dependência energética no mesmo gráfico.. Supõe-se que a diferença encontrada entre as curvas de dependência energética obtidas é devida a componentes eletrônicos diferentes utilizados. Analisando-se a Figura 7.2, nota-se que as duas câmaras de ionização apresentam comportamentos semelhantes para a faixa de energia estudada, porém, a câmara B apresenta uma dependência energética maior (33 %) do que a câmara C (16 %); neste caso, a câmara de ionização C é a mais recomendada para ser utilizada na faixa de energia em questão.

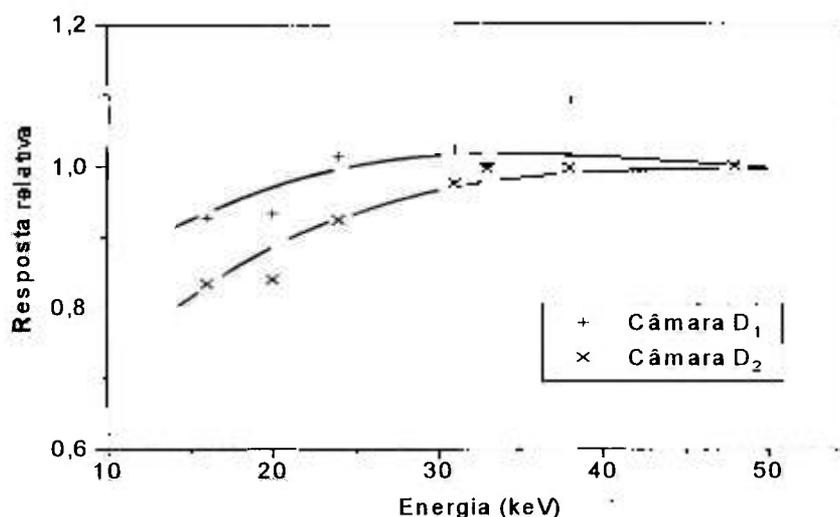


Figura 7.3 - Dependência energética das câmaras Victoreen, modelo 450 (Câmaras D₁ e D₂, escala digital automática de 0 a 50 R/h)

As câmaras D₁ e D₂ também apresentam comportamentos semelhantes de dependência energética para a faixa de energia estudada, o que era esperado, já que estas câmaras são do mesmo tipo e modelo. A curva deste tipo de câmara, fornecida pelo fabricante, apresenta uma dependência energética de 15 % para a faixa de energia de 20 a 50 keV. Nas curvas experimentais apresentadas na Figura 7.3 nota-se que a dependência energética obtida para as câmaras D₁ e D₂ é igual a, aproximadamente, 17 % (16,5 e 16,7 %, respectivamente). A diferença encontrada entre os valores de dependência energética determinados experimentalmente e aquele fornecido pelo fabricante não pode ser considerada significativa.

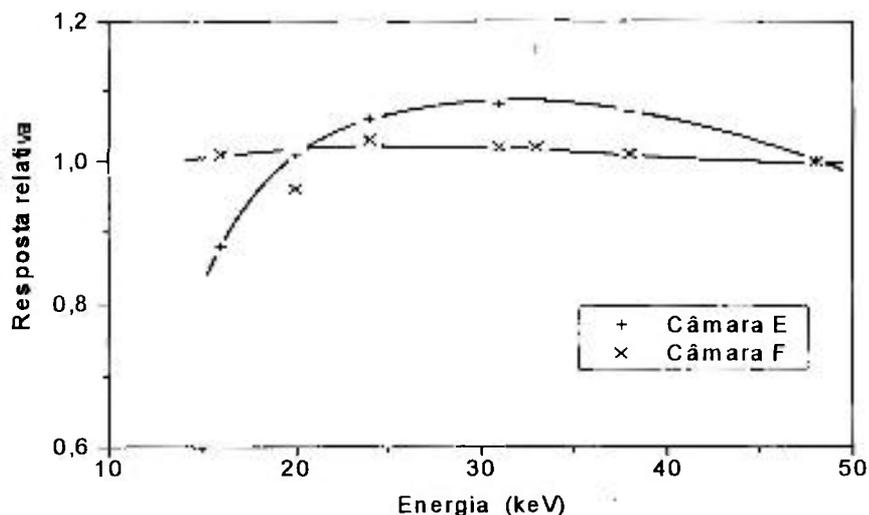


Figura 7.4 - Dependência energética das câmaras de ionização Victoreen, modelos 470 e 470A (Câmaras E e F, escala 10 R/h)

As câmaras Victoreen tipo "Panoramic" testadas, assim como no caso das câmaras Babyline, também apresentam as mesmas características externas, portanto as curvas de dependência energética experimentais obtidas foram apresentadas no mesmo gráfico. Neste caso, a dependência energética da câmara F (7,0 %) é menor do que da câmara E (aproximadamente 28 %), para a faixa de energia estudada. A da câmara E fornecida pelo fabricante apresenta o mesmo comportamento apresentado pela curva experimental, porém com uma dependência energética menor que aquela obtida experimentalmente (3,0 %), para a faixa de energia estudada. Para a câmara F não foi possível comparar o resultado experimental com a curva fornecida pelo fabricante, por falta deste dado.

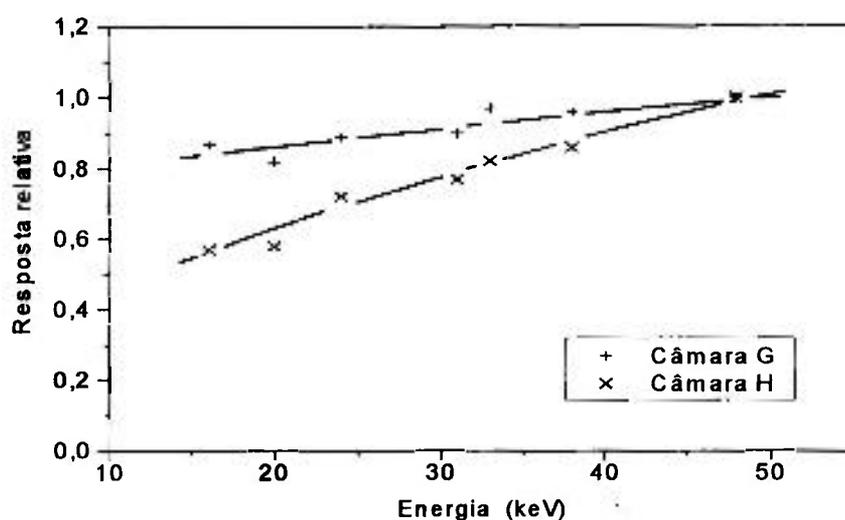


Figura 7.5 - Dependência energética das câmaras de ionização Victoreen, modelos 471 e 471 RF (Câmaras G e H, escala 10 R/h)

Analisando-se as curvas de dependência energética obtidas para as câmaras G e H, nota-se que a câmara G apresenta uma dependência energética menor para a faixa de energia estudada do que a câmara H (aproximadamente 13 e 43 %, respectivamente), o que é confirmado pelas especificações fornecidas pelo fabricante.

7.2 Calibração e Testes de Detectores Geiger-Müller

As características dos detectores Geiger-Müller testados e calibrados nas qualidades de campos de raios-X de energias baixas, nível Radioproteção, são apresentadas na Tabela 7.4.

Tabela 7.4 - Detectores Geiger-Müller testados e calibrados para as qualidades de campos de energias baixas, nível Radioproteção

Detector	Fabricante	Modelo
A	Dosemeter	3510
B ₁	Eberline	HP 270
B ₂	Eberline	HP 290
C	Nortron	NDG50R-A
D	Nortron	NMR-1000
E	Victoreen	Minimonitor II

A Tabela 7.5 apresenta os fatores de calibração obtidos para os detectores Geiger-Müller para as qualidades de Radioproteção implantadas

Tabela 7.5 - Fatores de Calibração obtidos para detectores Geiger-Müller para as qualidades de campos nível Radioproteção, em unidades antigas, mR/(h.ue)

Detector	Energia (keV)						
	16	20	24	31	33	38	48
A	2812	1039	322	91	59	38	12,4
B ₁	24,6	47,5	15,3	68,1	3,84	42,1	1,80
B ₂	16,5	24,6	6,41	20,8	14,3	10,9	6,58
C	336	339	11,8	3,9	2,6	2,1	1,14
D	6,25	4,47	2,98	1,82	1,41	1,07	0,58
E	257	29,2	7,90	2,39	-	1,21	0,66

Analisando os fatores de calibração mostrados na Tabela 7.5, nota-se que estes fatores são bem maiores que aqueles obtidos para as câmaras de ionização, mostrados na Tabela 7.2. Isto confirma o que foi dito anteriormente a respeito da alta dependência energética dos detectores Geiger-Müller, principalmente para energias baixas. No caso dos detectores estudados, sua constituição também deve ser considerada, pois esta pode alterar as respostas obtidas, devido à atenuação do feixe nas próprias paredes do instrumento. A Tabela 7.6 apresenta os mesmos fatores de calibração obtidos em unidade do Sistema Internacional, C/((kg.h.ue).

Tabela 7.6 - Fatores de Calibração obtidos para detectores Geiger-Müller para as qualidades de campos nível Radioproteção, em unidades do Sistema Internacional, C/(kg.h.ue)

Detector	Energia (keV)						
	16	20	24	31	33	38	48
A	0,725	0,268	0,083	0,023	0,015	0,010	0,003
B ₁	0,006	0,012	0,004	0,018	0,001	0,011	0,0005
B ₂	0,004	0,006	0,002	0,005	0,004	0,003	0,002
C	0,087	0,087	0,003	0,001	0,001	0,001	0,003
D	0,002	0,001	0,001	0,005	0,0004	0,0003	0,0001
E	0,066	0,007	0,002	0,0006	-	0,0009	0,0002

As curvas de dependência energética dos monitores testados, quando apresentadas nos respectivos manuais, geralmente iniciam em 50 keV. Logo, não foi possível comparar os resultados obtidos com os dos fabricantes. Normalmente, os detectores Geiger-Müller apresentam alta dependência energética, e o comportamento geral destas curvas são semelhantes, independentemente do tipo do tubo; porém, o fato do tubo Geiger-Müller ser compensado pode modificar o comportamento geral das curvas de dependência energética apresentadas².

Para o detector Eberline, testado, foram obtidas duas curvas, pois este instrumento tem dois tubos Geiger-Müller (HP 270 e HP 290), acoplados externamente, dependendo da faixa de energia com que se vai trabalhar.

As curvas experimentais são apresentadas nas Figuras 7.6 a 7.10, onde todos os fatores de calibração foram normalizados para aquele obtido para a qualidade de campo referente a 48 keV, como para as câmaras de ionização. A repetibilidade das medidas obtidas com os detectores Geiger-Müller testados variou entre 3,3 e 16 %.

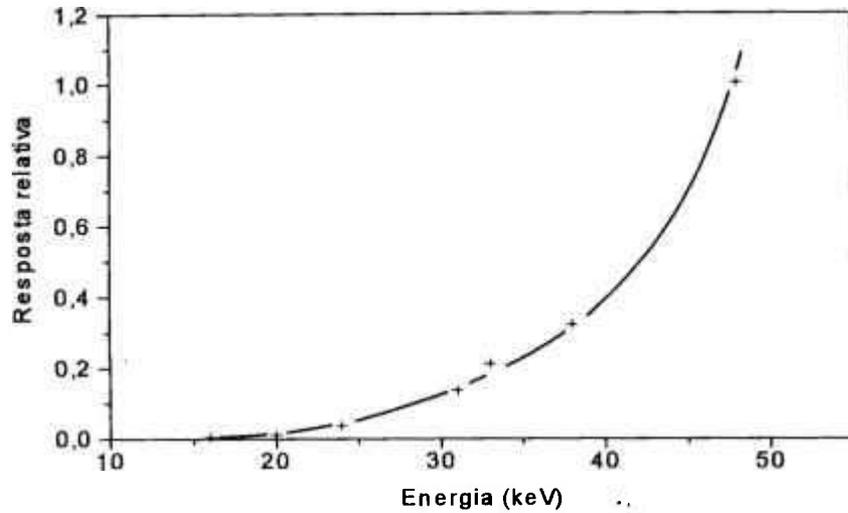


Figura 7.6 - Dependência Energética do Detector Geiger-Müller Dosemeter, modelo 3510 (Detector A, escala 1 mR/h)

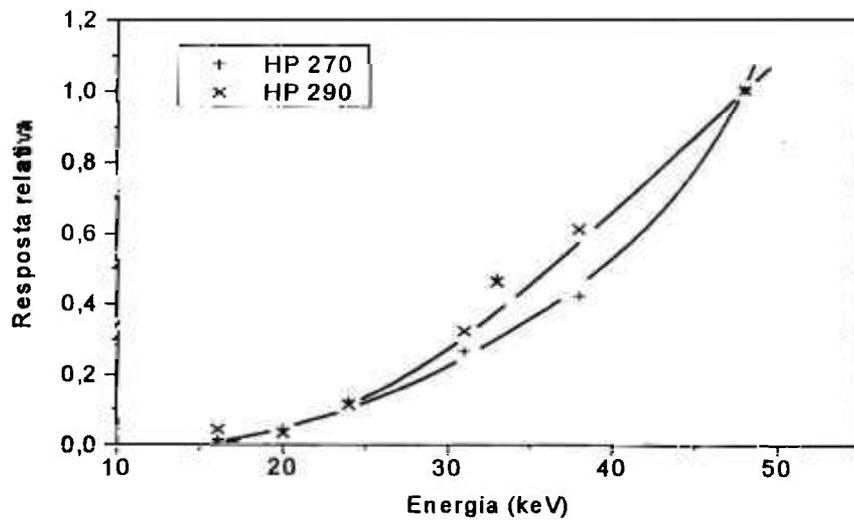


Figura 7.7 - Dependência energética do detector Eberline, com os tubos Geiger-Müller modelos HP 270 e HP 290 (Detector B, escala 1R/h)

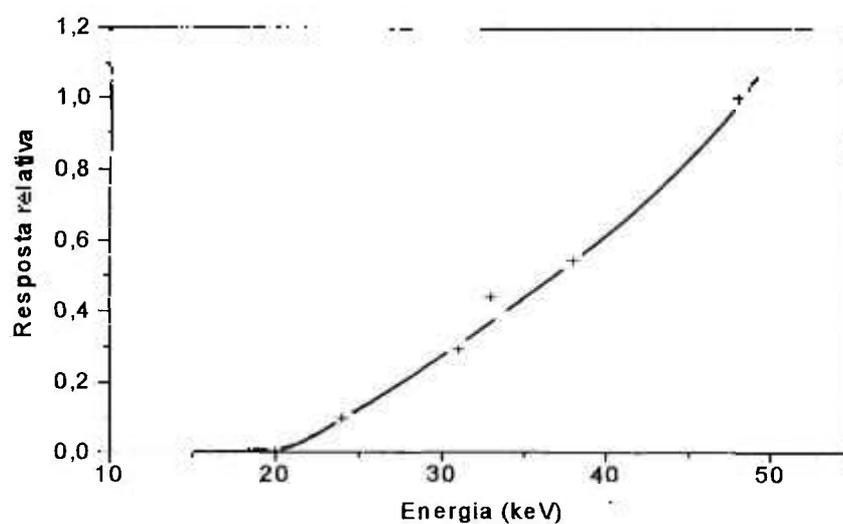


Figura 7.8 - Dependência energética do detector Nortron NDG-50R-A (Detector C, escala 1 R/h)

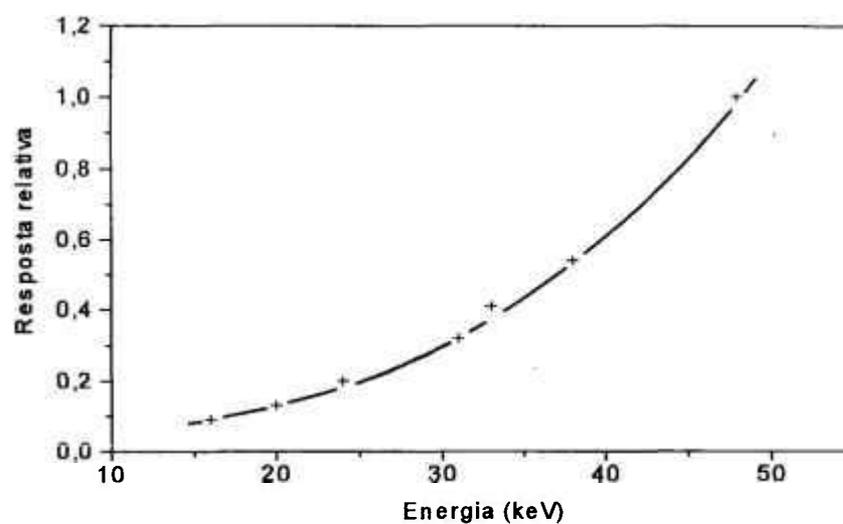


Figura 7.9 - Dependência energética do detector Nortron NMR-1000 (Detector D, escala 1 R/h)

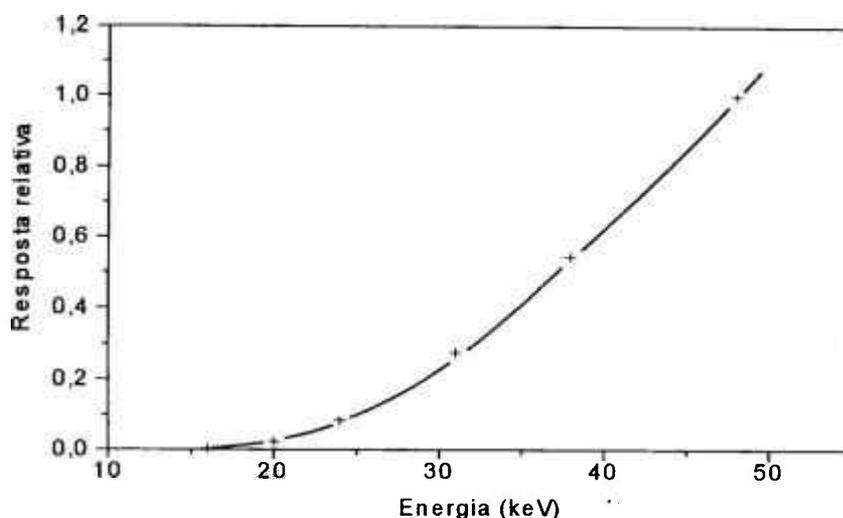


Figura 7.10 - Dependência energética do monitor Victoreen, Minimonitor II (Detector E, escala 100 mR/h)

Ao analisar as curvas obtidas para os detectores testados, nota-se que todos os instrumentos apresentam aproximadamente a mesma dependência energética para a faixa de energia estudada (100 %). Porém, analisando de forma geral, conclui-se que o detector Nortron, NMR-1000 foi o que apresentou melhor comportamento para a faixa de energia estudada, já que ele conseguiu detectar até o campo correspondente à menor energia implantada (16 keV), enquanto que os demais detectores só começaram a detectar a radiação a partir do campo de radiação correspondente a 24 keV.

De qualquer forma, comparando-se os resultados obtidos com as câmaras de ionização com aqueles obtidos com os detectores Geiger-Müller, conclui-se que as primeiras são as mais indicadas para a detecção de campos de radiação de energias baixas.

7.3 Testes Realizados com Canetas Dosimétricas

Além dos testes realizados com monitores portáteis, o comportamento de seis canetas dosimétricas, de três fabricantes distintos, (duas de cada), utilizadas como monitores individuais, foi estudado. Estas canetas apresentam características físicas distintas. As canetas Dosemeter são constituídas de corpo composto por alumínio, aço inoxidável e plástico, as canetas PHY apresentam corpo "revestido" por material plástico, porém a região que delimita o volume sensível é constituída de alumínio. Já as canetas Victoreen apresentam corpo em chapa de níquel aluminizada. As canetas Victoreen são as únicas recomendadas pelo fabricante para a faixa de energia das qualidades de campos nível Radioproteção implantadas. A Tabela 7.7 apresenta mais algumas características das canetas testadas. Nestes testes, as canetas foram irradiadas apenas com as qualidades de campos de raios-X de energias baixas NPL implantadas.

Tabela 7.7 - Características das canetas dosimétricas submetidas a raios-X de energias baixas, qualidades NPL (nível Radioproteção)

Fabricante	Modelo	Fundo de Escala	Caneta
Dosemeter	862	200 mR	A
Dosemeter	862	200 mR	B
PHY	SEQ6-0,2rad	200 mrad	C
PHY	SEQ6-0,2rad	200 mrad	D
Victoreen	541L	200 mR	E
Victoreen	541L	200 mR	F

As canetas foram posicionadas duas a duas, no ar, distantes 8 cm entre si, de forma que a distância entre o alvo do tubo de raios-X e o ponto referente ao centro do volume sensível das mesmas fosse igual a 2,0 m, e irradiadas num campo de 25,0 cm de diâmetro. Cada medida obtida equivale à média de cinco leituras consecutivas. Desta forma, foi possível verificar a repetibilidade para

cada caneta, cujos valores do desvio padrão percentual variaram entre 0 e 12,0 %, para as canetas Dosemeter, 1,4 e 15 % para as canetas PHY e 1,5 e 3,7 % para as canetas Victoreen.

Com relação ao estudo de dependência energética realizado, os resultados são apresentados sob a forma de curvas, em função das respostas relativas obtidas, como foi feito para as câmaras de ionização e para os detectores Geiger-Müller testados. As Figuras 7.11, 7.12 e 7.13 apresentam as curvas de dependência energética obtidas para as canetas Dosemeter, PHY e Victoreen, respectivamente. Todas as respostas relativas obtidas foram normalizadas para a qualidade de campo referente a 50 kV (38 keV).

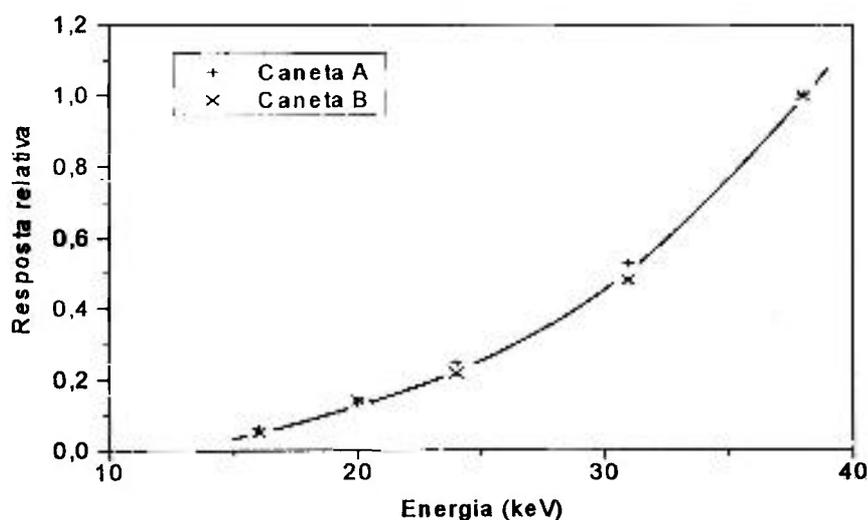


Figura 7.11 - Dependência energética das canetas Dosemeter, para as qualidades de campos de raios-X de energias baixas NPL, nível Radioproteção

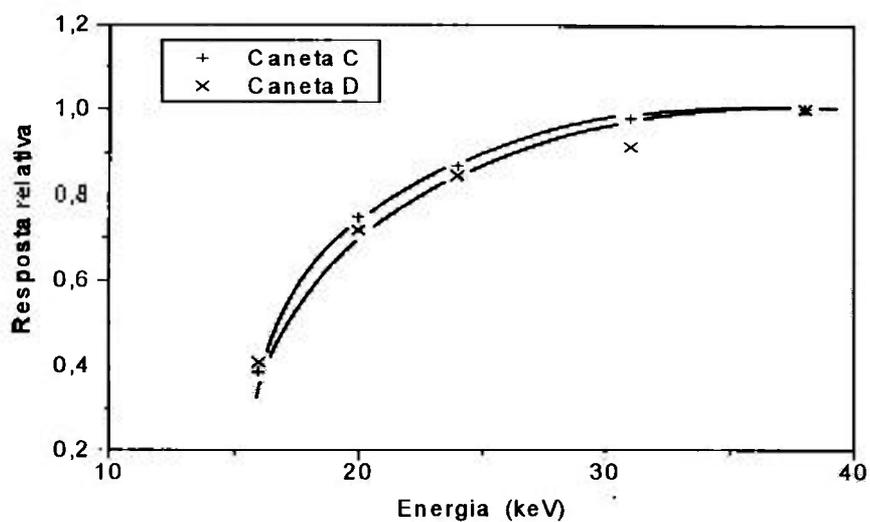


Figura 7.12 - Dependência energética das canetas dosimétricas PHY, para as qualidades de campos de raios-X de energias baixas, nível Radioproteção

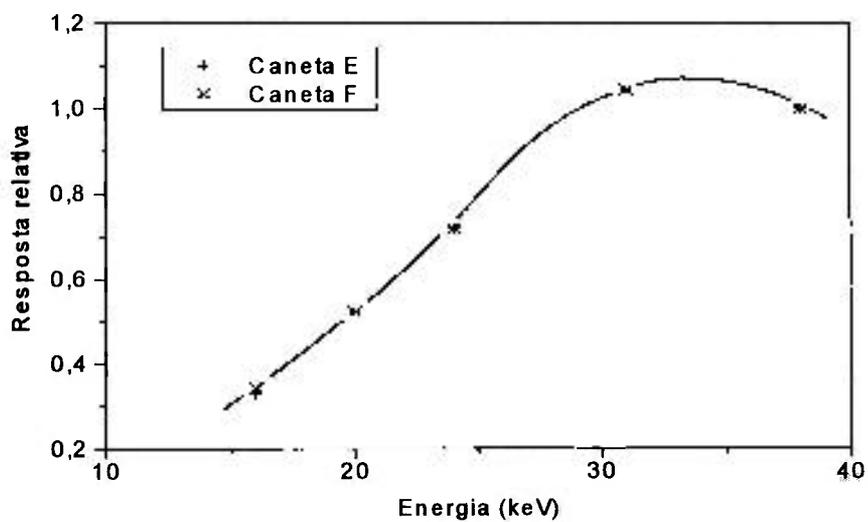


Figura 7.13 - Dependência energética das canetas Victoreen, para as qualidades de campos de raios-X de energias baixas, nível Radioproteção

Analizando-se as três curvas de dependência energética obtidas, nota-se que as canetas Dosemeter apresentaram a maior dependência energética para a faixa de energia estudada (aproximadamente 98 %), contra 60 e 70 %, aproximadamente, obtidos para as canetas PHY e Victoreen, respectivamente. Selbach⁴⁰ desenvolveu um estudo similar para diversos tipos de instrumentos, incluindo uma caneta dosimétrica, para a qual foi obtida apenas 20 % de dependência energética, para a faixa de energia de 20 a 38 keV; porém não foi especificado o tipo da caneta utilizada em seu estudo.

Conclui-se, portanto, que a caneta dosimétrica, mesmo sendo um tipo de câmara de ionização, apresenta dependência energética da ordem daquela obtida para detectores Geiger-Müller, o que a torna útil apenas para detectar a radiação e não medir a radiação na faixa de energia utilizada, num trabalho de monitoração.

Foi ainda realizado um estudo da contribuição do retroespalhamento nas medidas obtidas com as canetas dosimétricas, devido à presença de um simulador de Lucite de 30x30x15 cm³. Este estudo foi realizado, porque, após a inclusão das novas grandezas pelo ICRU¹⁸, houve algumas alterações nos procedimentos de calibração de instrumentos, sendo que uma destas alterações diz respeito à necessidade de se calibrar instrumentos utilizados em monitorações individuais na presença de simuladores para considerar, nas medidas obtidas, o retroespalhamento produzido no corpo do usuário, como já foi explicado no Capítulo 1.

Este estudo foi realizado para as qualidades de campos NPL referentes à menor e à maior energias (16 e 38 keV, respectivamente), apenas para as canetas dosimétricas PHY e Victoreen, nas mesmas condições de irradiação do estudo anterior, com exceção da inclusão do simulador. As canetas Dosemeter não se mostraram sensíveis à faixa de energia em questão, ou seja, as medidas obtidas com e sem simulador não apresentaram diferenças significativas (menores que 1 %).

As medidas foram normalizadas para aquelas obtidas no ar, ou seja, foram determinadas as razões entre as medidas obtidas com e sem simulador, para cada caneta dosimétrica e para cada energia de campo, e os resultados finais correspondem aos respectivos Fatores de Correção para o Retroespalhamento, que são apresentados na Tabela 7.8.

Tabela 7.8 - Fatores de correção para o retroespalhamento das medidas obtidas com canetas dosimétricas para qualidades de campos de raios-X de energias baixas, nível Radioproteção, com simulador

Fatores de Correção para o Retroespalhamento			
Caneta	Fabricante	16 keV	38 keV
C	PHY	1,441	1,175
D	PHY	1,414	1,154
E	Victoreen	1,031	1,339
F	Victoreen	1,039	1,325

Analisando-se a Tabela 7.8, nota-se que as canetas PHY mostraram-se mais sensíveis às alterações nas medidas obtidas com a presença do simulador, pois acusaram uma contribuição de retroespalhamento média de 42 % para a menor energia e 16 % para a maior energia, enquanto que as canetas Victoreen acusaram contribuições médias iguais a 3,5 e 33 %, respectivamente.

8 CONCLUSÕES

A implantação de campos padrões de raios-X de energias baixas, nível Radioproteção, tem como objetivos principais a calibração e a realização de testes de dependência energética em instrumentos utilizados para este propósito. A verificação experimental da variação das leituras fornecidas pelos instrumentos com a energia de campo de radiação em que são expostos, torna-se importante quando se considera o fato do desconhecimento de alguns usuários quanto a esta variação.

Porém, antes da implantação destes campos padrões de raios-X, foi necessário assegurar que todos os resultados obtidos estariam dentro dos limites aceitáveis de variação estabelecidos para laboratórios de calibração. Esta segurança foi obtida com a realização de alguns testes preliminares, tanto nos sistemas de medida utilizados na determinação experimental dos parâmetros, que definem a qualidade de um feixe de raios-X, quanto no sistema de raios-X em que as qualidades de campos foram implantadas.

Na primeira fase de desenvolvimento deste trabalho, foram realizados os Testes de Estabilidade a Curto e a Longo Prazos e os Testes de Corrente de Fuga em todos os sistemas e medida. Nestes testes, os resultados obtidos estão dentro dos limites de variação recomendados internacionalmente.

Nos testes realizados no sistema de raios-X, os resultados mais importantes foram aqueles que determinaram a uniformidade dos campos de radiação produzidos e a contribuição da radiação espalhada às medidas obtidas.

A uniformidade dos campos de radiação produzidos apresentou-se dentro de um limite de 99,0 %, numa extensão de 10 cm de diâmetro de campo, a 50 cm do alvo do tubo de raios-X, dimensão que é suficiente para os propósitos em questão. Com relação aos resultados obtidos na verificação da contribuição da radiação espalhada, pode-se concluir que ela é desprezível, pois os valores obtidos se mostraram abaixo dos limites estabelecidos internacionalmente.

Os resultados obtidos na reprodução das qualidades de campos nível Radioterapia confirmou, mais uma vez, a confiabilidade em todos os sistemas de medida envolvidos na implantação das qualidades de campos nível Radioproteção, objetivo principal do presente trabalho.

Na implantação das sete qualidades de campos padrões nível Radioproteção, sendo cinco do National Physical Laboratory (16 a 38 keV) e duas recomendadas pela International Organization for Standardization (33 e 48 keV), foram determinadas as características principais do sistema de raios-X, ou seja, filtrações adicionais, camadas semi-redutoras e respectivas taxas de exposição no ar. Os parâmetros das qualidades de campos determinados se apresentaram dentro dos limites de variação recomendados internacionalmente.

Nos testes realizados com nove câmaras de ionização e cinco detectores Geiger-Müller, pode-se observar que as primeiras se mostraram mais sensíveis à faixa de energia estudada (16 a 48 keV). Para as câmaras de ionização, a dependência energética variou entre 7 e 43 %, enquanto que para os detectores Geiger-Müller, a dependência foi de aproximadamente 100 % para todos os modelos testados.

Com relação aos testes realizados com as canetas dosimétricas, conclui-se que estas podem ser utilizadas para energias baixas, porém apenas para detectar a radiação, já que apresentaram alta dependência energética (entre 60 e 98 %). Desta forma, assim como os detectores Geiger-Müller, estes instrumentos não são recomendados para a faixa de energia estudada.

Considerando-se os resultados apresentados, conclui-se que o estudo da dependência energética de instrumentos utilizados em Radioproteção, para energias baixas, é de grande importância, pois é a partir dele que se poderá conscientizar os usuários dos instrumentos de que as medidas obtidas devem ser corrigidas, através da utilização de fatores de calibração, ou de fatores de correção de dependência energética, de forma que os resultados apresentados estejam o mais próximo possível dos valores reais das taxas de exposição, a que estes instrumentos são expostos.

APÊNDICE

PROCEDIMENTO DE ROTINA PARA CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS (MONITORES PORTÁTEIS), NÍVEL RADIOPROTEÇÃO, EM CAMPOS DE RAIOS-X DE ENERGIAS BAIXAS

A calibração de instrumentos em campos de raios-X de energias baixas envolve sua exposição ao campo de radiação produzido, cujo diâmetro deve ser suficiente para irradiá-los completa e uniformemente.

No caso da calibração de instrumentos em campos de raios-X de energias baixas, nível Radioproteção, utiliza-se a Técnica da Substituição. Nesta técnica o instrumento a ser calibrado é colocado no campo de radiação, obtendo-se uma série de leituras consecutivas, que são registradas. Essas leituras são comparadas com aquelas obtidas com um instrumento de referência ou padrão, que é exposto ao campo de radiação, nas mesmas condições, antes e depois da obtenção das leituras com o instrumento que se deseja calibrar.

O procedimento de calibração consta das seguintes etapas:

1. Realizar os Testes de Repetibilidade e de Corrente de Fuga com o instrumento de referência;
2. Verificar as condições do instrumento a ser calibrado (Testes de Bateria, de Repetibilidade e de Corrente de Fuga);
3. Posicionar o instrumento de referência a 2,0 m do alvo do tubo de raios-X, de forma que o eixo central do campo de radiação coincida com o eixo central de seu volume sensível, e irradiá-lo com a mesma qualidade

de campo e nas mesmas condições (posição, diâmetro do campo) que serão utilizadas para calibrar o instrumento, tomando 10 leituras consecutivas que devem ser corrigidas para a temperatura e pressão ambientais, considerando-se os valores de referência de 20 °C e 101,3 kPa. Esta correção deve ser feita utilizando-se o fator multiplicativo, dado por:

$$F_{T,p} = \frac{(273,15 + t) \times P}{(273,15 + T) \times p}$$

onde $F_{T,p}$ é o fator de correção de temperatura e pressão, t e p são a temperatura e pressão ambientais, e T e P são a temperatura e a pressão de referência. Além disso, a umidade relativa do ar deve ser mantida próxima a 50 %, utilizando-se aparelhos de ar condicionado e desumidificadores. A medida resultante, ou seja, a taxa de exposição " \dot{X}_1 " deve ser determinada a partir da média das 10 leituras consecutivas multiplicada pelo fator de calibração correspondente, acompanhada de seu desvio padrão;

3. Posicionar o instrumento a ser calibrado obedecendo as mesmas condições do instrumento de referência, e registrar o mesmo número de leituras consecutivas tomadas com este instrumento. Para cada qualidade de campo utilizada para calibrar o instrumento deve ser aplicada uma corrente ao tubo de raios-X de forma que as leituras obtidas correspondam a 50 % de sua escala. As condições ambientais devem ser registradas, e, no caso das câmaras de ionização não seladas, todas as leituras obtidas devem ser corrigidas para a temperatura e a pressão ambientais, como no caso do instrumento de referência. A medida resultante (L) também deve ser tomada como a média das leituras consecutivas, acompanhada de seu desvio padrão;
4. Repetir o procedimento exposto no item 2 com o instrumento de referência, obtendo-se a taxa de exposição " \dot{X}_2 ". A taxa de exposição resultante (\bar{X}) deverá ser tomada como a média das medidas inicial (\dot{X}_1) e final (\dot{X}_2) determinadas com este instrumento;
5. Determinar o fator de calibração do instrumento sob teste, que resulta da razão entre o valor da grandeza, determinado com o instrumento de referência ou padrão, e a medida obtida com o instrumento que se deseja calibrar:

$F_C = X \cdot L^1$. O Fator de Calibração deve ser acompanhado de sua incerteza associada, que deve ser determinada considerando-se cálculos de propagação de erros;

6. Caso seja necessária a verificação da linearidade da escala testada, para uma determinada qualidade de campo, deve-se variar a corrente aplicada ao tubo de raios-X, de forma que as leituras obtidas variem entre 20 e 80 % desta escala.

Seguem exemplos de formulários para registro dos dados experimentais.

LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS

Registro de Leituras Obtidas em Campos de Raios-X de Energias Baixas, Nível Radioproteção

Data:

Proprietário:

Instrumento

Fabricante:

Modelo:

Série:

Condições de Calibração:

Distância Alvo - Instrumento:

Diâmetro do Campo:

Umidade do Ar:

Qualidades dos Feixes e Fatores de Calibração do Instrumento de Referência:

Tensão kV	Filtração Adicional		Energia Efetiva keV	1ª CSR		Fator de Calibração R.ue ⁻¹
	mmAl	mmCu		mmAl	mmCu	
20	0,92		16	0,35		
25	1,70		20	0,66		
30	2,70		24	1,02		
40	4,92		31	1,95		
50	1,12	0,23	38	3,27		
40 (ISO)		0,21	33		0,086	
60 (ISO)		0,57	48		0,232	

$$F_{T,p} = \frac{(273,25 + t) \times 101,325}{(273,15 + 20) \times p}$$

$F_{T,p}$ = Fator de correção para temperatura e pressão

$$F_c = X \cdot L^{-1}$$

F_c = Fator de calibração

CSR = Camada semi-redutora

ue = Unidade de escala do instrumento

LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS

Registro de Leituras Obtidas em Campos de Raios-X de Energias Baixas,
Nível Radioproteção, com o Instrumento de Referência ou Padrão

INSTRUMENTO PADRÃO

Fabricante: _____

Modelo: _____

Série: _____

Qualidade: _____ kV

1ª CSR: _____

1) Antes da calibração do instrumento sob teste

T °C	p kPa	Tempo s	Câmara Monitora ue	Corrente mA	Leitura ue	Taxa de Leitura Corrigida ue.s ⁻¹

$\bar{X}_1 =$ _____ $s =$ _____ $s\% =$ _____

2) Depois da calibração do instrumento sob teste

T °C	p kPa	Tempo s	Câmara Monitora ue	Corrente mA	Leitura ue	Taxa de Leitura Corrigida ue.s ⁻¹

$\bar{X}_2 =$ _____ $s =$ _____ $s\% =$ _____

LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS

REGISTRO DE DADOS DO INSTRUMENTO SOB TESTE

Qualidade: _____ kV 1ª CSR: _____

T °C	p kPa	Tempo s	Câmara Monitora ue	Corrente mA	Leitura ue	Taxa de Leitura Corrigida ue.s ⁻¹

L = _____ s = _____ S_% = _____

LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS

Resultados

Proprietário:

Instrumento

Fabricante:

Modelo:

Série:

Tensão kV	Inst. de \hat{X}_1 R.min ⁻¹	Referência \hat{X}_2 R.min ⁻¹	\bar{X} R.min ⁻¹	Leitura do Instrumento ue.min ⁻¹	Fator de Calibração R.ue ⁻¹
20					
25					
30					
40					
50					
40 (ISO)					
60 (ISO)					

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALBUQUERQUE, M. P. P. *Projeto, construção e calibração de câmaras de ionização de placas paralelas para radiação X*. São Paulo: 1989.
Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.
- [2] ALLARD, D. J.; NAZARALI, A. M.; CHABOT, G. E. The N-16 gamma radiation response of Geiger-Müller tubes. In: INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION, May 17-22, 1992, Montreal.
*Proceedings...*Montreal: IRPA, 1992. p. 652-655.
- [3] AUSTERLITZ, C.; SIBATA, C. H.; ALMEIDA, C. E. A graphite transmission ionization chamber. *Med. Phys.*, v. 14, n. 6, p. 1056-1059, 1987.
- [4] BATISTELLA, M. A. & CALDAS, L. V. E. *Dependência energética de uma câmara de ionização de placas paralelas em campos padrões de radiação X e gama*. São Paulo: 1988. (IPEN-Pub-207).
- [5] BOTTER-JENSEN, L. & JENSEN, P. H. Determination of scattered gamma radiation in the calibration of the environmental dose rate meters. *Radiat. Prot. Dosim.*, v. 42, n. 4, p. 291-299, 1992.
- [6] BURGESS, P. H. Determination of the suitability of energy compensated Geiger-Müller tubes for the measurement of X radiation transmitted through shielding. *Radiat. Prot. Dosim.*, v. 16, n. 3, p. 243-246, 1986.

- [7] CALDAS, L. V. E. A sequential Tandem system of ionization chambers for effective energy determination of X radiation fields. *Radiat. Prot. Dosim.*, v. 36, n. 1, p. 47-50, 1991.
- [8] CALDAS, L. V. E.; ALBUQUERQUE, M. P. P.; XAVIER, M. Calibration techniques for components of clinical dosimeters. *Appl. Radiat. Isot.*, v. 45, n. 1, p. 31-33, 1994.
- [9] CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR.
Conceitos básicos de medição - Conceitos sobre incerteza da medição e sobre avaliação de instrumentos de medida. 25 de Março, 1991. (SA-TR-01/91)
- [10] CROSS, C. & ROSSITER, M. J. *Non-random uncertainties in the calibration of protection-level secondary standards.* Middlesex: National Physical Laboratory, Dec. 1988. (NPL Report RS(EXT)110).
- [11] ENGLER, M. J. & JONES, G. L. Small-beam calibration by 0,6- and 0,2-cm³ ionization chambers. *Med. Phys.*, v. 11, n. 6, p. 822-826, 1984.
- [12] HORTON, J. L. *Quality Assurance Program.* Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc., 1987. (Handbook of Radiation Therapy Physics).
- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Absorbed dose determination in photon and electron beams.* 1987. (TECHNICAL REPORTS SERIES No. 277).
- [14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Calibration of dose meters used in radiotherapy.* 1979. (TECHNICAL REPORTS SERIES No. 185).

- [15] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Calibration of dosimeters used in Radiotherapy*. 1994. (TECHNICAL REPORTS SERIES No. 374).
- [16] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Calibration of radiation protection monitoring instruments*. 1988. (Safety Series Draft Purposal).
- [17] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Handbook on calibration of radiation protection monitoring instruments*. 1971. (TECHNICAL REPORTS SERIES No. 133).
- [18] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. *Determination of dose equivalents from external radiation sources - Part 2*. Dec. 15, 1988. (ICRU REPORT 43).
- [19] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. *Radiation dosimetry X rays generated at potentials of 5 to 150 kV*. Mar. 15, 1970. (ICRU REPORT 17).
- [20] INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION. *Draft - Direct reading, personal dose equivalent and/or dose equivalent rate monitors for X, gamma and high energy beta radiation*. 1989.
- [21] INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION - IEC STANDARD. *Medical electrical equipment dosimeters with ionization chambers as used in Radiotherapy*. Nov. 3, 1982. (731 © CEI 1982).

- [22] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *X and γ reference radiations for calibrating dosimeters and dose ratemeters and for determining their response as a function of photon energy.* May 15, 1979. (ISO 4037-1979(E)).
- [23] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *X and γ reference radiations for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy. PART 1: Characteristics of the radiations and their methods of production [Revision of first edition (ISO 4037:1979)].* Jan. 15, 1994. (Draft International Standard ISO/DIS 4037-1).
- [24] INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. Laudo Técnico. *Controle de Componentes Estruturais. Supervisão de Combustíveis para Reatores de Pesquisa - Controle de Componentes Estruturais.* Jun., 1992. (CCES 002/93).
- [25] JACOMINO, V. M. F. *Determinação das características de campos de raios- X de energia baixa.* São Paulo: 1982. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.
- [26] KHAN, F. M. *Interactions of Ionizing Radiation.*, Minnesota: Williams & Wilkins, 1994. (The Physics of Radiation Therapy).
- [27] KRAMER, H. M. Radiation protection dosimeters - calibration and requirements. In: MEDICAL RADIATION PROTECTION PRACTICE WITHIN THE EEC, Dec. 5, 1990, London. *Proceedings* ...London: BIR, 1990. p. 43-46

- [28] LOEVINGER, R. & CHAPPELL, S. E. The SSDL Calibration Certificate for a field instrument. In: IAEA Training Seminar on Calibration Procedure in SSDLs, Vienna, June, 1983.
- [29] MASSEY, J. B. Manual de dosimetria en radioterapia. Organismo Internacional de Energia Atomica, Viena, 1971. (TECHNICAL REPORTS SERIES No. 110).
- [30] NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. *Dosimetry of x-ray and gamma-ray beams for radiation therapy in the energy range 10 keV to 50 MeV*. Dec. 15, 1981. (NCRP REPORT No. 69).
- [31] NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. Certificate of Calibration of an X-ray Exposure-Meter. Middlesex, Jan. 16, 1980. (D833).
- [32] NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. Certificate of Calibration of an X-ray Exposure-Meter. Middlesex, Jul. 17, 1984. (D1738).
- [33] NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. Protection-level x-ray and gamma-ray calibrations. Middlesex, Oct., 1990. (DRSA Dh 003).
- [34] PIUBÉLI, S. L. *Influência da pureza de absorvedores comerciais na determinação da energia efetiva e da CSR em feixes de raios-X de 24 a 50 kV*. Rio de Janeiro: 1989. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Fluminense.
- [35] RAMOS, M. M. O. Comunicação pessoal.

- [36] RAMOS, M. M. & FREITAS, L. C. Controle de qualidade do sistema de calibração de monitores de área do LNMRI. In: I FÓRUM DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM SAÚDE, Nov. 20-24, 1992, Caxambu. *Proceedings...* Caxambu: ABFM, 1992. p. 608-611.
- [37] READ, L. R. & HAGREEN, M. *The ISO Spectrum Series of Filtered X-Radiations at NPL*. Middlesex, Aug. 1987. (NPL Report RS(EXT)92).
- [38] ROSSITER, M. J.; WILLIAMS, T. T.; LIVINGSTON, S. Investigation of new low-energy X-ray qualities for Protection-Level Calibrations. *Radiat. Prot. Dosim.*, v. 42, n. 1, p. 37-40, 1992.
- [39] SEELENTAG, W. W.; PANZER, W.; DREXLER, G.; PLATZ, L.; SANTNER, F. *A Catalogue of spectra for the calibrations of dosimeters*. München: Neuherberg (Germany, FR), Gesellschaft fuer Strahlen - und Umweltforschung mbH., Mar. 1979. (GSF Bericht 560).
- [40] SELBACH, H. J.; HOHLFELD, K.; KRAMER, H. M. Calibration of personal dosimeters for X and gamma radiation in front of different phantoms. *Radiat. Prot. Dosim.*, v. 28, n. 1/2, p. 69-72, 1989.
- [41] SILVA, T. A. *Comparação Experimental entre Fatores de Calibração Totais e Parciais*. Rio de Janeiro: 1981. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [42] SILVA, T. A.; BARBOSA, R. A.; BARROSO, M. S. F. *Medida da Camada Semi-redutora em Qualidades de Feixes de Raios-X a Nível de Radioproteção*. Rio de Janeiro: 1980. Instituto de Radioproteção e Dosimetria