



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

**APLICAÇÃO DE METODOLOGIA DE TESTES DE
DESEMPENHO PARA MONITORES PORTÁTEIS DE
RADIAÇÃO**

VÍTOR VÍVOLO

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

**Orientadora:
Dra. Linda V.E. Caldas**

**São Paulo
2000**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

**APLICAÇÃO DE METODOLOGIA DE TESTES DE
DESEMPENHO PARA MONITORES PORTÁTEIS DE
RADIAÇÃO**

VÍTOR VÍVOLO



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

Orientadora:
Dra. Linda V.E. Caldas

São Paulo
2000

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP IPEN

COMISSÃO NA1

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a minha orientadora, Dr^a Linda V. E. Caldas, que partilhou seu escasso tempo disponível, entre suas ocupações acadêmicas e profissionais, coordenando, sugerindo, comentando e analisando os diversos aspectos do desenvolvimento deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos:

À Dr^a Maria da Penha A. Potiens, pelos comentários e sugestões, apoio na análise de certificados de calibração e fornecimento de documentação e formulários utilizados nas medidas realizadas neste trabalho.

À Sra. Ana Maria S. Silva e Srta. Tereza de M. S. Vasconcelos, pelo fornecimento de documentação, certificados e liberação de equipamentos para realização dos ensaios.

Ao Sr. Valdir de S. Carvalho e Sr. Eliomar J. G. de Cerqueira, pelo auxílio nos ensaios realizados nas instalações do Bunker e calibração dos equipamentos utilizados nos testes.

Ao Sr. Marcos Xavier, pelo auxílio nos ensaios realizados no laboratório de calibração com radiação beta e empréstimo de equipamentos para realização de ensaios.

Ao Sr. Claudinei T. Cescon e ao Sr. Gelson P. dos Santos, pelo fornecimento de dados para elaboração de inventário de equipamentos e pelo empréstimo de equipamentos e instalações de laboratório para realização de testes.

Ao M. Sc. Alessandro M. da Costa e a Sra. Adriana C. de A. Lima, pelo apoio e solução de problemas na área de informática.

À Dr^a Leticia L. C. Rodrigues, pela permissão de utilização dos laboratórios do Departamento de Metrologia das Radiações do IPEN, para a realização dos ensaios.

Ao IPEN, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, pela infra-estrutura oferecida para realização deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro parcial.

A todos aqueles que de um modo ou de outro colaboraram com este trabalho.

APLICAÇÃO DE METODOLOGIA DE TESTES DE DESEMPENHO PARA MONITORES PORTÁTEIS DE RADIAÇÃO

Vítor Vívolo

RESUMO

Uma série de testes de desempenho foram aplicados a instrumentos monitores portáteis de radiação do tipo Geiger-Müller, câmara de ionização e cintilador, comumente utilizados no Brasil. Foi estabelecida uma metodologia de testes para serem aplicados aos equipamentos monitores portáteis de radiação novos e aos que já foram reparados (manutenção corretiva). Os testes incluem a verificação das dependências energética e angular, ensaio de saturação, resposta a outras radiações ionizantes, além de ensaios das características não radiológicas como variação da resposta com a tensão das baterias (por se tratarem de equipamentos portáteis), ensaio de orientação do instrumento (efeito de geotropismo), deriva de zero elétrico e determinação dos erros intrínsecos dos mostradores dos equipamentos.

**APPLICATION OF A TYPE TEST METHODOLOGY FOR RADIATION
SURVEY METERS**

Vitor Vívolo

ABSTRACT

A series of type tests recommended by international standards was applied to gamma radiation monitoring survey meters (Geiger-Müller type, ionization chambers and a scintillator) commonly used in Brazil. The objective was to establish a routine test methodology to be applied to new and to repaired instruments. The tests included the verification of energy and angular dependences, overload characteristics tests, response to other ionizing radiations, and of non radiological characteristics as variation of response with the battery voltage, orientation of assembly, zero drift and intrinsic errors in exposure rate indication.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	1
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
2.1 Interação da radiação com a matéria	5
2.1.1 Radiação ionizante	5
2.1.2 Interação de fótons com a matéria	6
2.2 Detectores de radiação	7
2.2.1 Detector tipo Geiger-Müller	7
2.2.2 Detector de cintilação	12
2.2.3 Detector tipo câmara de ionização	17
2.3 Calibração de instrumentos	24
2.4 Testes de desempenho	27
2.4.1 Testes de pré-uso	27
2.4.2 Testes para verificação das condições operacionais	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 Equipamentos testados	32
3.2 Sistemas e fontes de radiação	33
3.3 Sistemas auxiliares	35

4	RESULTADOS	37
4.1	Estudo das características radiológicas	37
4.1.1	Dependência energética de monitores portáteis	37
4.1.2	Dependência angular de monitores portáteis	40
4.1.3	Ensaio de estouro de escala ("Saturação")	45
4.1.4	Erro intrínseco dos instrumentos	47
4.1.5	Resposta a outras radiações ionizantes	49
4.1.5.1	Resposta à radiação beta	49
4.1.5.2	Resposta à radiação X	53
4.2	Estudo das características não radiológicas	56
4.2.1	Efeito de geotropismo	56
4.2.2	Variação da leitura com a tensão da bateria	60
4.2.3	Deriva de zero elétrico	64
5	CONCLUSÕES	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
	ANEXOS	76

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente aumento da aplicação da radiação ionizante na Indústria, Medicina e Agricultura, sob a forma principalmente 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.

A eletrônica é uma ferramenta importante na metrologia da radiação nuclear (uma das primeiras áreas onde os dispositivos eletrônicos foram utilizados com sucesso, além das áreas de comunicações e telecomunicações). Sem os instrumentos eletrônicos a maioria dos problemas relativos às medidas de campos de radiação para fins de pesquisa, controle de emissão de material radioativo no meio ambiente (processos industriais que utilizam material radioativo), assim como em proteção radiológica, permaneceriam sem solução⁽¹⁾.

Entre esses instrumentos eletrônicos estão os chamados "monitores de radiação", utilizados em Radioproteção. 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⁽²⁻⁴⁾, de forma a garantir a confiabilidade nos resultados das medidas obtidas.

Essa confiabilidade pode ser assegurada por meio da calibração dos monitores portáteis de radiação (em campos padrões de radiação X, gama, etc.), de onde se obtém o fator de calibração⁽⁵⁾.

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

Atualmente o Laboratório de Calibração de Instrumentos do IPEN dispõe de fontes emissoras de radiação gama de ^{60}Co e ^{137}Cs , com diversas atividades, fontes emissoras de radiação beta de $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, ^{204}Tl e ^{147}Pm , um sistema de raios X (60 kV), para calibração de dosímetros clínicos (radiação X e gama) e de monitores portáteis (radiação gama e beta) utilizados segundo normas e recomendações internacionais⁽⁶⁻¹²⁾.

São oferecidos serviços de calibração de instrumentos tanto para o IPEN como para instituições externas. Como controle de qualidade dos serviços prestados, desde 1980 o Laboratório vem participando das intercomparações anuais promovidas pelo Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, Instituto de Radioproteção e Dosimetria/CNEN, Rio de Janeiro.

A intercomparação é um dos melhores procedimentos para o programa da garantia da qualidade em determinada área de atuação⁽¹³⁾, particularmente na Medicina Nuclear e em Laboratórios de Calibração de Instrumentos, porque não somente a calibração do instrumento é verificada mas também toda a série de medidas, incluindo o desempenho do pessoal que opera os instrumentos.

O número de equipamentos calibrados pelo Laboratório de Calibração do IPEN vem aumentando ao longo dos últimos anos; em 1999 foram cerca de 1650 monitores portáteis e em 2000 deverá ser atingida a cifra de aproximadamente 1800. Destes, muitos já sofreram alterações consideráveis, como a troca do próprio tubo Geiger-Müller, nem sempre substituído por outro do mesmo modelo.

A consequência imediata é a variação da dependência energética do detector e a descaracterização do equipamento pela marca e pelo modelo.

Os monitores portáteis de radiação por serem constituídos de componentes e circuitos eletrônicos muito sensíveis (capacidade de medir sinais elétricos muito pequenos, por exemplo: 10^{-12} A) e de precisão (componentes selecionados com pequeno desvio no seu valor nominal, ou desvios menores de 1 %), necessitam de condições elétricas e ambientais favoráveis para o seu bom funcionamento.

Dentre elas pode-se citar: temperatura ambiente constante; baixa umidade relativa do ar; imunidade a ruídos (locais com baixas interferências de campos elétricos e/ou magnéticos), etc.

Variações nas condições ambientais (temperatura, umidade relativa do ar, etc.) ou condições elétricas (tensão de alimentação, etc.) nos monitores portáteis de radiação podem afetar os circuitos eletrônicos dos mesmos, alterando o ponto de operação⁽¹⁴⁾ dos circuitos implementados com semicondutores (transistores, circuitos integrados, etc.). Para aplicações específicas, monitores de radiação com características especiais devem ser utilizados.

Na manutenção corretiva de monitores portáteis de radiação devem ser utilizados componentes eletro-eletrônicos com características no mínimo equivalentes àquelas especificadas pelo fabricante⁽¹⁵⁾.

Periodicamente, durante a vida útil do instrumento, deverão ser realizados testes, para verificar se os mesmos preservam suas características operacionais, originais de fábrica, uma vez que podem ser afetados pelo envelhecimento de seus componentes (peças), ou após sofrerem reparos ou manutenção corretiva, com substituição de peças e componentes⁽¹⁵⁾.

As características operacionais de um equipamento podem ser definidas por meio de testes especiais, que indicam quão próximas do esperado estão as leituras realizadas pelo instrumento nas condições reais de operação⁽¹⁵⁾.

Os testes podem incluir a determinação de algumas ou de todas as características denominadas radiológicas ou não radiológicas⁽¹⁶⁾ que podem afetar a precisão das medidas em condições operacionais como: variação da resposta com a energia da radiação, direção do feixe de radiação, além de temperatura, umidade, tempo de estabilização do instrumento, etc⁽¹⁷⁻¹⁹⁾. Os critérios e os métodos para a realização dos ensaios e testes de desempenho dos monitores portáteis de radiação seguem normas e recomendações americanas^(20,21) e internacionais⁽²²⁾.

Os testes de desempenho (*Type Tests*) deveriam ser aplicados aos equipamentos novos, antes do seu uso; são os testes de pré-uso. No entanto, a legislação atualmente em vigor no País não exige este procedimento das empresas fabricantes dos equipamentos de medida de radiação.

Os procedimentos de calibração e os testes de desempenho periódicos devem ser realizados anualmente⁽¹⁵⁾, ou ao menos a cada 14 meses^(22,23), ou após o equipamento ter recebido manutenção corretiva, segundo recomendações internacionais^(22,23). Desse modo, o estabelecimento de uma rotina de testes de desempenho dos instrumentos que sofreram manutenção corretiva ao longo do tempo (cerca de 20% dos equipamentos calibrados no Laboratório de Calibração do IPEN-LCI) permitirá o levantamento das alterações nas características originais dos mesmos, com relação à radiação, às características elétricas, ambientais e construtivas, e às especificações técnicas expressas nos manuais de operação.

O objetivo deste trabalho é o estabelecimento de uma metodologia de testes de desempenho para ser aplicada aos monitores portáteis de radiação gama que são muito utilizados nos serviços e nas rotinas operacionais de Radioproteção.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Interação da radiação com a matéria

2.1.1 Radiação ionizante

Qualquer forma de radiação que tenha energia suficiente para causar a liberação de um ou mais elétrons de um átomo é denominada radiação ionizante. As formas comuns de uso na medicina são os raios X, gama e os elétrons, que também são utilizados na área industrial (gamagrafia, etc) e nos laboratórios de calibração de equipamentos monitores de radiação.

Todas as radiações possuem energia, como no caso das partículas em movimento, ou por sua própria natureza, como é o caso das radiações eletromagnéticas. Ao atravessar um meio (interagindo com a matéria), a radiação transfere sua energia (total ou parcialmente) para os átomos e moléculas deste meio. A transferência da energia de uma partícula ou de um fóton para os átomos do material absorvente (meio) ocorre por mecanismos de ionização e excitação.

Um processo de interação no qual resulte a remoção de um elétron, de um átomo ou molécula, deixando-o com uma carga resultante positiva é denominado ionização. No entanto, a adição de energia a um sistema atômico ou molecular irá elevá-lo do estado normal de energia ao estado de excitação.

De um modo geral, quando partículas carregadas ou radiação eletromagnética atravessa a matéria, o mecanismo predominante da perda de energia é a interação delas com os elétrons do meio (material). No caso das partículas carregadas, isto é facilmente evidenciado a partir da dispersão que elas apresentam ao interagir com a matéria: no caso das partículas pesadas (prótons, partículas alfa, etc.) são pouco desviadas de sua direção original quando interagem, perdendo energia. Os elétrons, por sua vez, são desviados em ângulos muito maiores. Estas perdas de energia resultantes de colisões com núcleos são várias ordens de grandeza menores que aquela que ocorre na interação com os elétrons. Isto não ocorre com os nêutrons, pois eles interagem quase que exclusivamente com os núcleos dos átomos.

2.1.2 Interação de fótons com a matéria

Entre os mecanismos principais de interação de fótons (raios gama ou X) com a matéria pode-se citar três: o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares. A probabilidade de ocorrência de um desses processos é determinada pela energia do fóton incidente e pelo número atômico do meio (material). Na interação entre um fóton e a matéria são emitidos ou criados elétrons ou pósitrons que ionizam os átomos do meio.

O efeito fotoelétrico é uma interação entre um fóton e um elétron orbital das camadas mais internas do átomo. O fóton é absorvido pelo átomo e um elétron é ejetado. A energia cinética do elétron ejetado é igual à energia do fóton menos a energia de ligação do elétron. A energia de ligação de um elétron é a energia que deve ser fornecida a ele para removê-lo do átomo.

O efeito Compton consiste na colisão entre um fóton e um elétron (que pode ser considerado livre) das camadas mais externas do átomo.

Um elétron deste tipo pode ser considerado livre quando a energia do fóton incidente é muito maior que a energia de ligação do elétron. A energia cinética do elétron espalhado depende do ângulo de espalhamento. Nesse processo o fóton não é absorvido e, portanto, continua interagindo com os outros elétrons.

O processo de produção de pares elétron-pósitron ocorre quando a energia do fóton incidente é maior que pelo menos duas vezes a massa de repouso do elétron, isto é, 1,022 MeV. Neste processo, um fóton perde toda a sua energia em uma colisão com o núcleo, criando um par elétron—pósitron, com uma certa energia cinética.

2.2 Detectores de radiação

Um detector de radiação consiste de um dispositivo que, quando colocado em um meio onde exista um campo de radiação, seja capaz de indicar a sua presença. A interação do meio detector com a radiação pode ocorrer por diversos processos pelos quais as radiações diferentes podem interagir com o material utilizado para se medir ou se indicar as características dessas radiações. Normalmente um detector de radiação é constituído de um elemento ou material sensível à radiação e de um sistema que transforma esses efeitos em um valor relacionado a uma grandeza de medição dessa radiação⁽²⁴⁾.

2.2.1 Detectores tipo Geiger-Müller

Estes detectores a gás constituem os tipos de detectores mais utilizados, sendo empregados desde as experiências iniciais com feixes de radiação.

São denominados detectores a gás pois são preenchidos com gás (com características conhecidas e adequadas à finalidade de medir campos de radiação) em seu interior, que tem como função ser o elemento detector da radiação.

Basicamente, um detector a gás é constituído de um cilindro condutor revestido de material condutor, que funciona como catodo, e um filamento central denominado anodo. O volume do detector (cilindro) é preenchido por gás ou uma mistura de gases, a uma pressão relativamente baixa (menor que a pressão atmosférica).

Entre o catodo e o anodo é aplicada uma diferença de potencial, geralmente da ordem de centenas de Volts (um campo elétrico é gerado). O processo de detecção da radiação tem início quando uma partícula, carregada ou não, atravessa o gás no interior do cilindro, ocorrendo uma ionização e os pares de íons formados são coletados pelos eletrodos (anodo e catodo), produzindo a corrente de ionização.

A **Figura 2.1** mostra o esquema básico de um detector a gás.

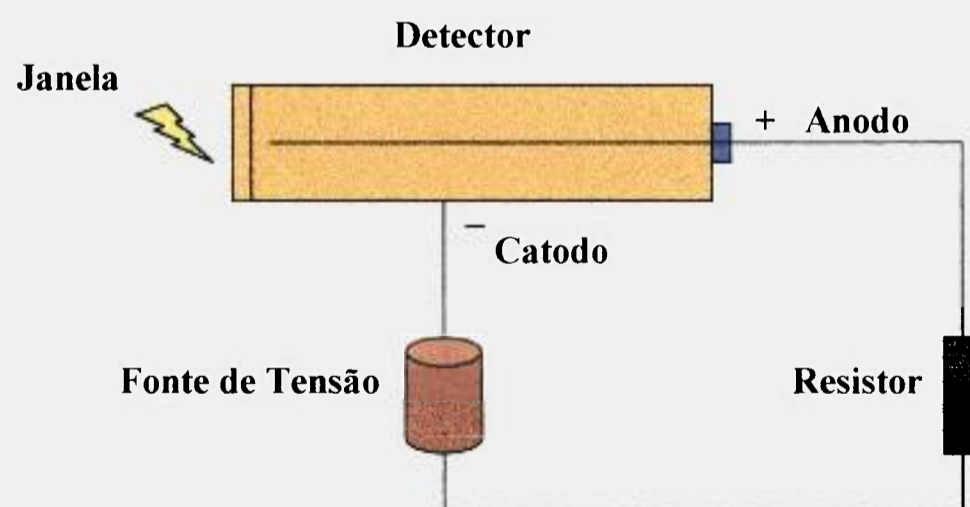


Figura 2.1: Esquema básico de um detector a gás.

Os detectores Geiger-Müller foram introduzidos em 1928 e têm como principais características a simplicidade de construção (circuitos relativamente simples), boa sensibilidade, custo baixo e facilidade de manutenção, sendo empregados largamente nas monitorações de área.

Neste tipo de equipamento, o sinal obtido independe do tipo de partícula incidente e da energia da mesma, devido à faixa de tensão aplicada entre os eletrodos para operação do detector.

A faixa de tensão aplicada possibilita o surgimento de um campo elétrico entre os eletrodos (anodo e catodo) do elemento detector (cilindro onde está contido o gás) capaz de fornecer energia suficiente para os pares de íons produzidos, de forma que, ao se deslocarem para os respectivos eletrodos, esses pares de íons produzam mais ionização. Este processo é conhecido como "multiplicação de cargas", fenômeno que independe do tipo de partícula e da sua energia.

Para cada partícula que interage com o volume sensível do detector, é criado um número da ordem de 10^9 a 10^{10} pares de íons (o detector opera pelo princípio de efeito avalanche⁽²⁵⁾). Devido ao efeito de multiplicação de cargas, a amplitude do pulso de saída formado no detector é de cerca de alguns volts (são pulsos de mesma amplitude, ou seja, este detector não é capaz de identificar a energia da radiação que gerou este pulso de saída), de modo que não existe a necessidade do uso de circuitos pré-amplificadores nos monitores portáteis de radiação que utilizam este elemento detector.

A resposta do detector tipo Geiger-Müller para radiação gama ocorre de forma indireta (interação da radiação incidente com as paredes do detector), por meio de radiação secundária (elétrons gerados nas paredes do detector) que atinge o volume sensível do detector.

Existem tubos Geiger-Müller de várias formas e tamanhos, elaborados com diversos materiais (tanto a janela do tubo como o seu corpo), podendo ainda serem compensados ou não.

Os tubos denominados compensados não são adequados para a detecção de raios X gerados a potenciais menores que 50 keV⁽²⁶⁾. Os tubos Geiger-Müller, de um modo geral, apresentam alta dependência energética, principalmente para energias baixas (abaixo de 0,1 MeV) e para energias intermediárias (de 0,1 a 1,0 MeV)⁽²⁷⁾.

Uma limitação deste tipo de detector é o seu "tempo morto", que corresponde ao período de tempo mínimo entre duas interações para que o sistema de medida (tubo e circuitos eletrônicos) seja capaz de distingui-las e processá-las.

As condições de saturação de um monitor de radiação devem ser sempre levadas em consideração. Muitas vezes um instrumento passa repentinamente a apresentar uma indicação de leitura nula ou muito menor que o valor anteriormente lido (esperado); isto pode freqüentemente ser uma indicação que equipamento saturou e não uma indicação de que o mesmo se encontra danificado (ou defeituoso).

Um modo de se verificar esta ocorrência é voltar à condição de medida inicial e observar novamente o comportamento da indicação da leitura do equipamento. Se ela aumentar atingindo o fundo de escala (final da escala), ou estiver próximo dele, e passar para um valor menor (diminuição do valor da leitura, enquanto o esperado é que ela aumente), provavelmente ultrapassou-se a faixa de medida (ou de operação) do instrumento e ele entrou em saturação⁽²⁸⁾.

Alguns equipamentos utilizam dois tubos Geiger-Müller, um para operar em taxas de exposição baixas e outro com volume bem menor que o primeiro tubo para operar em taxas de exposição altas.

Neste tipo de detector, a conversão da taxa de interações para uma indicação de leitura é feita por meio da contagem do número de pulsos que ocorrem em um determinado intervalo de tempo. Quanto maior este intervalo de tempo, maior será o número de interações que serão consideradas para a medição e, conseqüentemente, menor a flutuação estatística que a medição irá apresentar⁽²⁸⁾.

Devido a sua alta eficiência na detecção de partículas, os detectores do tipo Geiger-Müller, além de serem utilizados na monitoração de área, são também muito utilizados como detectores de contaminação de superfície.

A **Figura 2.2** mostra um diagrama em blocos simplificado de um monitor portátil de radiação com elemento detector do tipo Geiger-Müller.

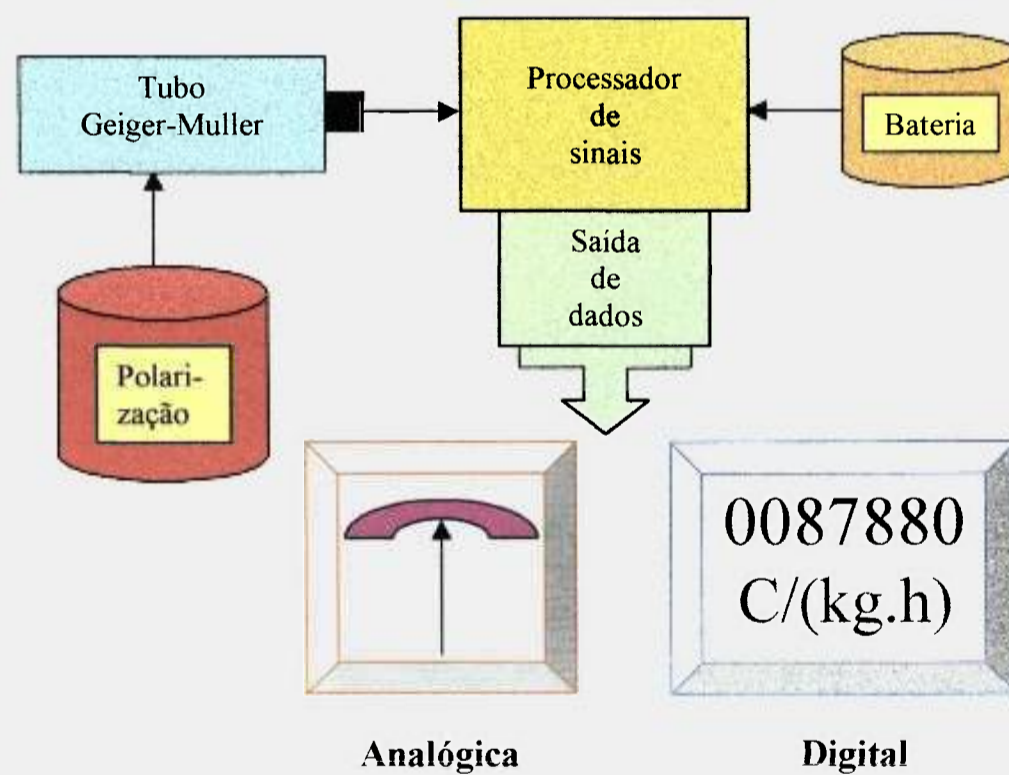


Figura 2.2: Diagrama em blocos de um monitor de radiação do tipo Geiger-Müller.

Os monitores portáteis de radiação do tipo Geiger-Müller são encontrados comercialmente em diferentes configurações; dentre elas pode-se citar: monitores com sonda detectora externa (tubo Geiger-Müller inserido na sonda), monitores com tubo interno (tubo inserido na caixa do equipamento), etc. As sondas externas podem ainda conter tampas removíveis ou capas deslizantes (móveis).

Desse modo pode-se medir campos de radiação gama na presença de radiação beta. O monitor de radiação poderá medir campos de radiação beta quando o obturador de sua sonda estiver aberta.

No entanto, deve-se sempre verificar no manual de operação do equipamento que deve ser fornecido pelo fabricante, se o equipamento é adequado para as medidas que se deseja realizar, inclusive verificando quais são as faixas de operação do monitor de radiação e suas limitações.

2.2.2 Detectores de cintilação

Um dos métodos de detecção nuclear mais antigos faz uso de cintilação. Existem relatos de que Rutherford e seus colaboradores utilizaram esta técnica em seus experimentos de estudo de espalhamento de campos de radiação.

O desenvolvimento dos detectores de cintilação mais modernos teve início em 1947 por meio dos experimentos realizados com sucesso por Coltman e Marshall, utilizando uma válvula fotomultiplicadora para a contagem da cintilação de luz de um cristal quando submetido à radiação alfa, beta e gama. Os monitores de radiação do tipo cintilador são utilizados largamente como detectores de partículas nucleares. Isto se deve particularmente ao fato de que o meio de detecção em um cintilador é um meio mais denso (cristal), provocando uma boa eficiência de detecção.

Os cristais com propriedades cintiladoras são confeccionados em diversos tamanhos (áreas grandes para detecção da radiação, espessuras diferentes) e geometrias adequadas, que tornam este tipo de detector um dos melhores detectores para medida de campos de radiação gama⁽²⁹⁾.

Os detectores de cintilação são elementos detectores de radiação desenvolvidos com base nas propriedades que algumas substâncias possuem de absorver a energia cedida pelas radiações ionizantes e convertê-las em luz. Por esse princípio tais materiais são denominados cintiladores. A produção de fótons devido à radiação incidente nos materiais cintiladores é proporcional à energia da radiação, e a eficiência de detecção irá variar com o tipo de radiação e com o material utilizado como cintilador.

Os materiais cintiladores podem ser classificados como: cristais de materiais orgânicos; inorgânicos; materiais orgânicos dissolvidos em sólidos ou líquidos orgânicos; substâncias gasosas; plásticos com propriedades de cintilação, etc. Neste trabalho foi estudado um monitor de radiação com um cristal cintilador inorgânico de iodeto de sódio dopado com tálio.

É importante frisar que as características dos materiais empregados para confecção de cintiladores não são equivalentes ao tecido humano ou ao ar, principalmente no caso dos detectores inorgânicos. Estes não são, comumente, empregados em monitores de taxas de exposição ou de dose, pois suas aplicações são em geral na espectrometria.

A rede cristalina de um material inorgânico define os estados de energia do material, inclusive influenciando nos mecanismos de cintilação do material. Os elétrons dentro de materiais semicondutores ou isolantes têm disponíveis somente algumas bandas discretas de energia que podem ocupar.

Desse modo existem três bandas de energia denominadas banda de valência, banda de condução e banda proibida (intermediária).

A banda de condução representa aqueles elétrons que possuem energia suficiente que os permite migrar livremente pela estrutura cristalina. Por conseguinte, na banda denominada banda de valência estão os elétrons ligados à rede cristalina (como se estivessem armadilhados em espaços ou trincheiras/lacunas da rede cristalina), por outro lado na banda proibida os elétrons nunca são encontrados.

Determinadas substâncias (convenientes ou adequadas) podem ser introduzidas na rede cristalina do material (mesmo em pequenas quantidades); desse modo são criados espaços, chamados armadilhas, dentro da denominada banda proibida. Quando tais substâncias são introduzidas nos materiais utilizados como material cintilador diz-se que o material cintilador foi ativado (dopado) por tais substâncias.

Se os elétrons da banda de valência receberem energia suficiente da radiação incidente no cristal cintilador, ocuparão os níveis de energia criados pela presença da substância ativadora. No processo de desexcitação destes elétrons, eles retornarão aos níveis de energia que ocupavam na banda de valência (níveis de energia menores), emitindo radiação com energia correspondente à diferença de energia que ocupavam na banda de valência e o nível de energia que o elétron ocupou no estado (posições ou lacunas) criado pelo material ativador.

Desse modo, esta energia resultante será emitida na forma de fótons, que serão propagados pela estrutura cristalina. A quantidade de fótons produzidos será proporcional à energia da radiação incidente no cristal cintilador e a eficiência de detecção variará com esta mesma radiação e também com o material empregado como cintilador. Um sistema de detecção do tipo cintilador é constituído basicamente dos seguintes componentes: cristal com propriedades de cintilação; válvula fotomultiplicadora e circuitos eletrônicos para o processamento adequado dos sinais. A **Figura 2.3** mostra um diagrama de blocos de um sistema de medida da radiação com um detector do tipo cintilador.

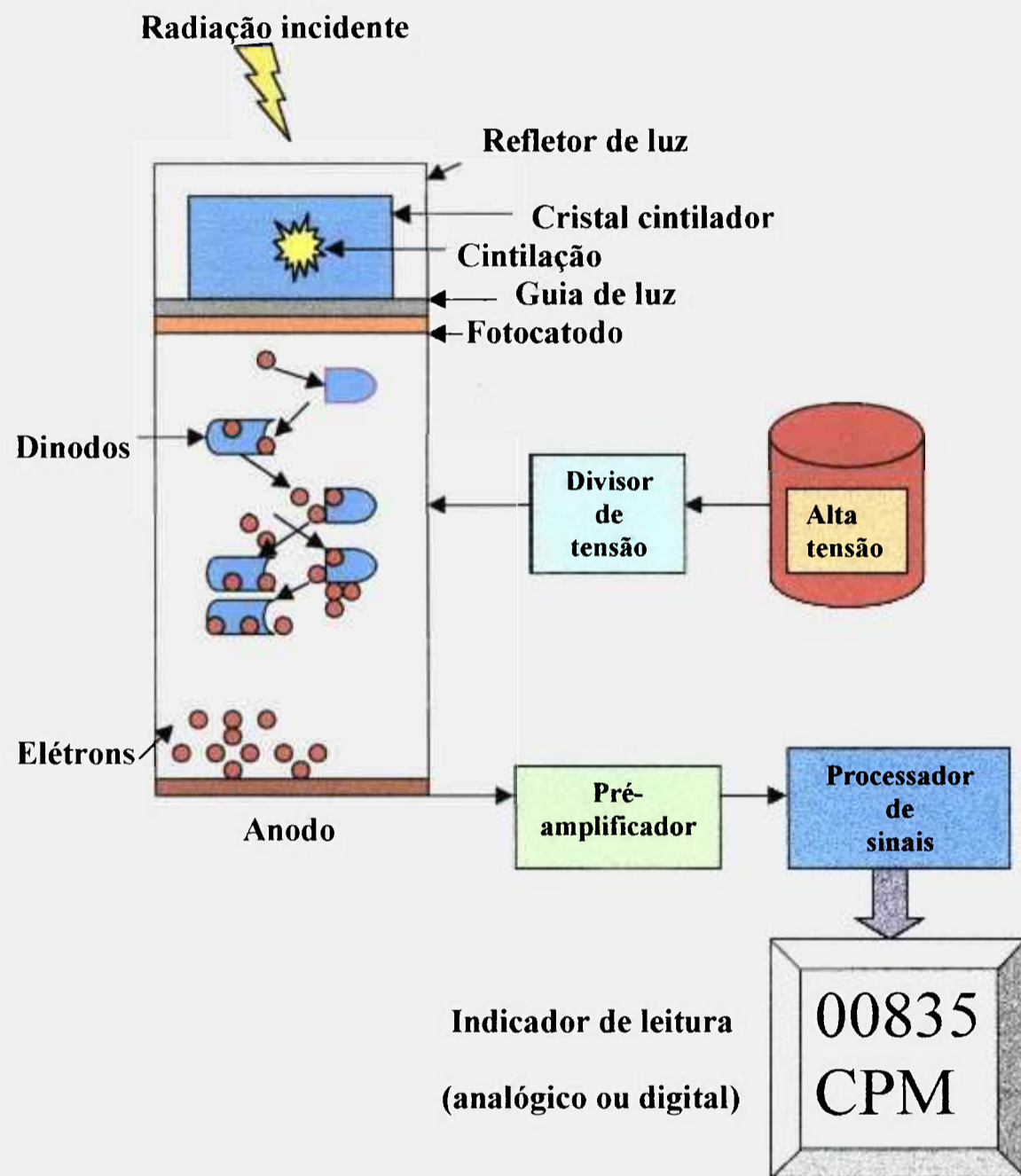


Figura 2.3: Diagrama de blocos de um sistema detector do tipo cintilador.

Os monitores portáteis de radiação que utilizam elementos detectores do tipo cintilador são compostos basicamente por duas partes principais que são: uma sonda cintiladora (cristal, fotomultiplicadora e divisor de tensão) e um módulo eletrônico de processamento dos sinais (pré-amplificador, formador de pulso e discriminador, contadores de pulsos e indicador de leitura).

A **Figura 2.3** mostra que o processo de medida da radiação tem início quando uma partícula nuclear ou campo de radiação incide no material detector (cristal cintilador) na qual como consequência são produzidos fochos (*flash*) de luz, em seu interior.

Os fótons são enviados ao fotocatodo (material que libera os elétrons; um campo elétrico forte é formado entre anodo e catodo, devido à alta tensão aplicada) onde arrancam elétrons do mesmo. Os fótons produzidos no cristal pela interação da radiação incidente no cristal são da ordem de algumas centenas; desse modo o número de elétrons gerados no fotocatodo é muito pequeno. Por isso o sinal de saída é muito pequeno para ser processado adequadamente.

Para que os elétrons possam formar sinais adequados para serem processados, eles são multiplicados várias vezes por meio de um sistema interno da válvula fotomultiplicadora denominado de dinodos. São placas polarizadas com diferença de potencial alta (geralmente de dezenas ou centenas de volts), proporcionando a multiplicação dos elétrons.

Os elétrons, após terem sido multiplicados, são conduzidos ao anodo (eletrodo de potencial oposto ao catodo) da válvula fotomultiplicadora. O anodo adequadamente polarizado (por meio de resistores e capacitores) produzirá um sinal ou pulso de corrente proporcional a energia da radiação incidente que será enviado a entrada do sistema pré-amplificador. Neste pré-amplificador, o sinal proveniente da fotomultiplicadora ganha mais amplitude, o que permite a diferenciação em relação ao ruído eletrônico do sistema e de outros ruídos interferentes indesejáveis.

O sinal então é enviado ao módulo processador de sinal, onde ele é devidamente formado (o formato do sinal é modificado para ser lido pelos circuitos eletrônicos analógicos e/ou contadores digitais), depois é enviado aos circuitos de leitura de saída (analógica ou digital).

A **Figura 2.4** mostra um monitor de radiação utilizando uma sonda cintiladora como elemento detector de radiação.

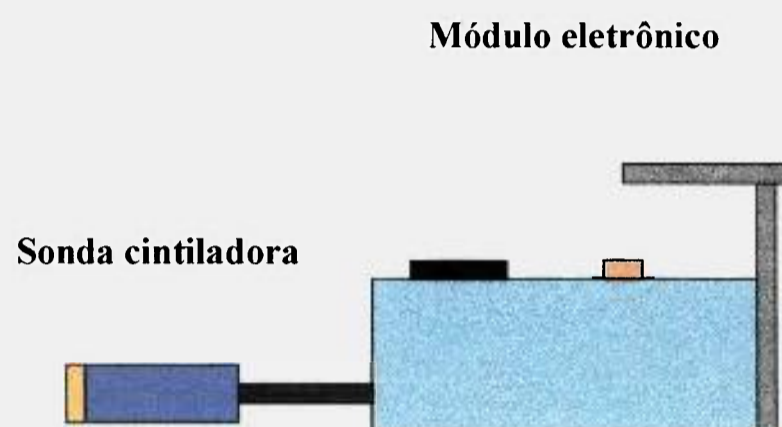


Figura 2.4: Monitor portátil de radiação utilizando sonda cintiladora

2.2.3 Detectores tipo câmara de ionização

Durante muitos anos, a dosimetria das radiações esteve diretamente relacionada com a prática da radiologia. Com o objetivo de se controlar a quantidade de radiação, liberada pelas máquinas de raios X então existentes, foram desenvolvidos diversos tipos de sistemas detectores.

Em meados dos anos 30, devido à alta sensibilidade, à boa estabilidade e à boa reprodutibilidade, que fazem parte de suas características operacionais, a câmara de ionização tornou-se o instrumento principal para a detecção de radiação X⁽²⁵⁾.

Atualmente, apesar do surgimento de outros sistemas de medida, a câmara de ionização ainda é considerada o instrumento mais prático e preciso para medidas de taxas de exposição e de dose absorvida.

No Brasil, nos últimos anos, diversas câmaras de ionização foram projetadas e construídas para diferentes aplicações, apresentando bons resultados⁽³⁰⁻³²⁾. As câmaras de ionização possuem basicamente um eletrodo coletor central e uma parede de material apropriado que delimita uma cavidade preenchida por um gás.

A **Figura 2.5** mostra o diagrama de blocos de um sistema monitor de radiação utilizando uma câmara de ionização como elemento detector.

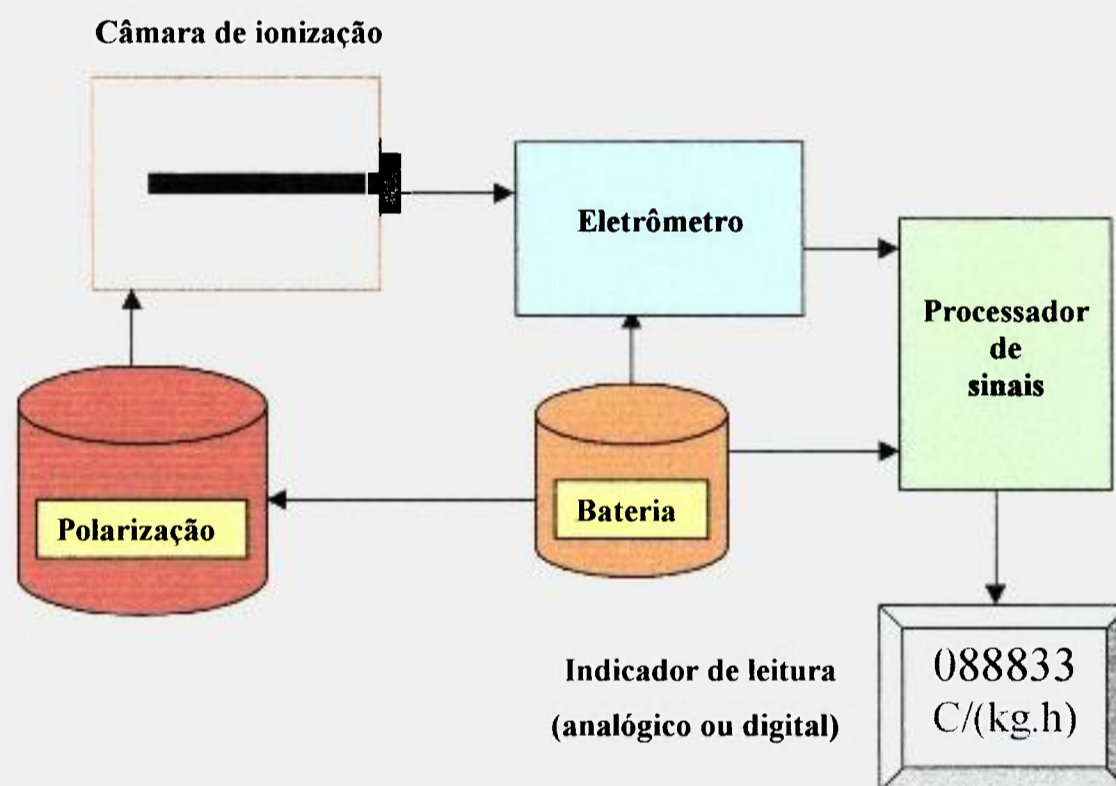


Figura 2.5: Diagrama de monitor de radiação com câmara de ionização.

Quando convenientemente construídas, utilizando o ar como elemento detector gasoso, as câmaras de ionização são capazes de medir diretamente a grandeza exposição. Para cada par de íon gerado pela partícula incidente no interior do volume sensível do detector gasoso, um sinal elétrico é coletado.

A carga coletada (sinal elétrico) é muito baixa, normalmente da ordem de pico-amperes (10^{-12} A), e precisam ser utilizados amplificadores para o sinal poder ser convenientemente processado. Em função de sua grande estabilidade ao longo do tempo (da ordem de 0,1 % de variação ao longo de muitos anos), as câmaras de ionização são muito utilizadas também como instrumentos de referência para calibração de equipamentos.

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 pode discriminar a energia da radiação e distinguir os diferentes tipos de partículas por meio da altura do sinal produzido. Desse modo, é necessário acoplar às câmaras módulos de amplificação de pulsos. Estes circuitos devem conter filtros para eliminar os ruídos indesejáveis.

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 da dose absorvida.

Normalmente as câmaras de ionização não são seladas, ou seja, o ar em seu interior é o mesmo do ambiente. Entretanto, existem ainda as câmaras de ionização seladas, que contêm um gás (sob alta pressão) em seu interior. No caso das câmaras não seladas é necessário que se faça correção de suas leituras para a densidade do ar, ou seja, para a temperatura e a pressão ambientais, por meio de fatores multiplicativos.

A correção da leitura de uma câmara de ionização para variações de temperatura e pressão deve ser feita utilizando-se:

$$f_{T,p} = (273,15 + t) \times P \times [(273,15 + T) \times p]^{-1}$$

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 de referência de 20 °C e 101,3 kPa, respectivamente.

O valor de referência da umidade relativa do ar é normalmente de 50 %. Porém, segundo Loevinger & Chappell⁽³³⁾, "como a dependência da corrente de ionização da umidade é pequena, nenhuma normalização é necessária se a umidade relativa do ar ambiente estiver entre 10 e 70 % durante o procedimento de calibração".

As câmaras de ionização mais conhecidas são: câmara de ar livre, que são consideradas do tipo padrão primário, ou seja, determinam a exposição de forma absoluta; câmaras cavitárias, utilizadas na determinação da exposição no ar, em feixes de fótons de energias altas; câmaras dedais, muito utilizadas como padrões secundários e em medidas rotineiras; e as câmaras de extrapolação, recomendadas para a detecção de radiação beta.

A maioria das câmaras de ionização apresentam dependência energética alta 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 suficientemente finas para evitar esta atenuação⁽³⁴⁾, ou que estas câmaras sejam feitas de material que tenha propriedades equivalentes ao ar. Normalmente materiais de baixo número atômico, têm propriedades de equivalência ao ar, tais como alumínio ou plástico.

As câmaras adequadas para detectar radiações de energias baixas são as chamadas câmaras de ionização de placas paralelas, ou ainda denominadas 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 coletados. São utilizadas como padrões secundários e ainda para medidas rotineiras da exposição produzida por campos de raios X de energias baixas⁽³⁵⁾.

No presente trabalho foram utilizados campos de radiação X de energias baixas e campos de radiação gama de energias baixas, médias e altas, além de campos de radiação beta de energia alta.

As câmaras citadas até o momento precisam ser acopladas a um instrumento denominado eletrômetro, empregado na medida das correntes produzidas nas câmaras de ionização. Os conjuntos de câmaras de ionização acopladas aos eletrômetros são denominados dosímetros⁽³⁶⁾. Sendo empregados em Radioterapia, são denominados dosímetros clínicos. Segundo recomendações internacionais⁽²⁾, nos casos em que o eletrômetro fizer parte do sistema dosimétrico, este deve ser calibrado conjuntamente com a câmara de ionização, ou seja, a câmara deve estar acoplada ao eletrômetro. Excetuando-se estes casos, o eletrômetro e a câmara de ionização podem ser calibrados separadamente^(36,37).

As calibrações feitas com câmaras de ionização ocorrem em uma geometria fixa de referência, onde parte do cabo de conexão é exposto à radiação. Entretanto, quando uma geometria diferente é necessária nas várias situações que ocorrem por exemplo na dosimetria clínica, tamanhos diferentes de cabo podem ser irradiados. Desse modo, pode ocorrer uma alteração significativa das medidas realizadas com o sistema (câmara de ionização + eletrômetro), fornecendo resultados incorretos. Avaliações deste tipo já foram feitas por Campos e Caldas^(38,39) em câmaras cilíndricas.

Para fins de monitoração de área, são empregadas câmaras de ionização portáteis. Estas câmaras possuem vários tamanhos e formatos diferentes, e não necessitam ser acopladas a eletrômetros externos (possuem eletrômetro internamente). As câmaras de ionização podem ainda possuir capas de equilíbrio eletrônico, que são ajustadas dependendo da faixa de energia em que os equipamentos estão sendo utilizados.

A condição de equilíbrio eletrônico está diretamente ligada à definição da grandeza exposição.

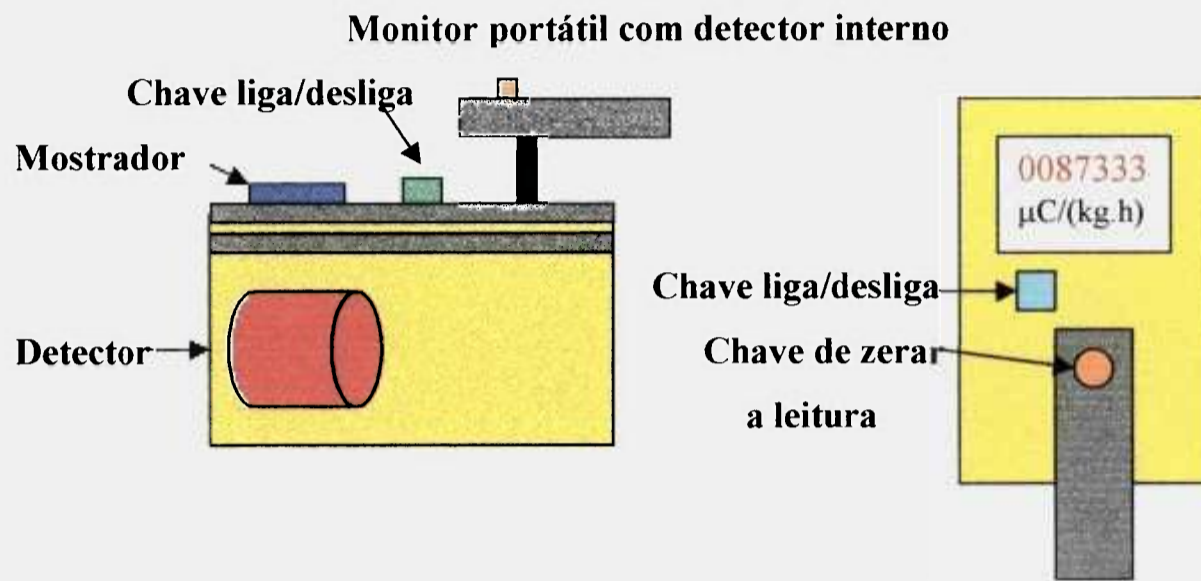
De acordo com a definição, os elétrons produzidos pela interação da radiação com a matéria (fótons) devem perder toda a sua energia por meio de interações num volume específico de ar, e as cargas de mesmo sinal devem ser somadas.

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 (volume sensível do elemento detector) podem entrar neste volume e ser considerados na soma total das cargas produzidas⁽⁴⁰⁾.

Se as cargas produzidas (descontadas as cargas perdidas) forem compensadas pelas cargas a mais consideradas, existe a condição de equilíbrio eletrônico, necessária para a definição de exposição⁽⁴⁰⁾.

Desse modo, "as capas de equilíbrio eletrônico" das câmaras de ionização são utilizadas somente para campos de radiação de energias altas, de forma a atenuar os fótons e proporcionar a condição de equilíbrio eletrônico desejada. As capas de equilíbrio eletrônico não são utilizadas quando os instrumentos medem feixes de radiação de energias baixas.

A **Figura 2.6** apresenta dois tipos de monitores portáteis de radiação com elemento detector do tipo câmara de ionização com sonda externa ou detector interno.



Monitor portátil com detector externo

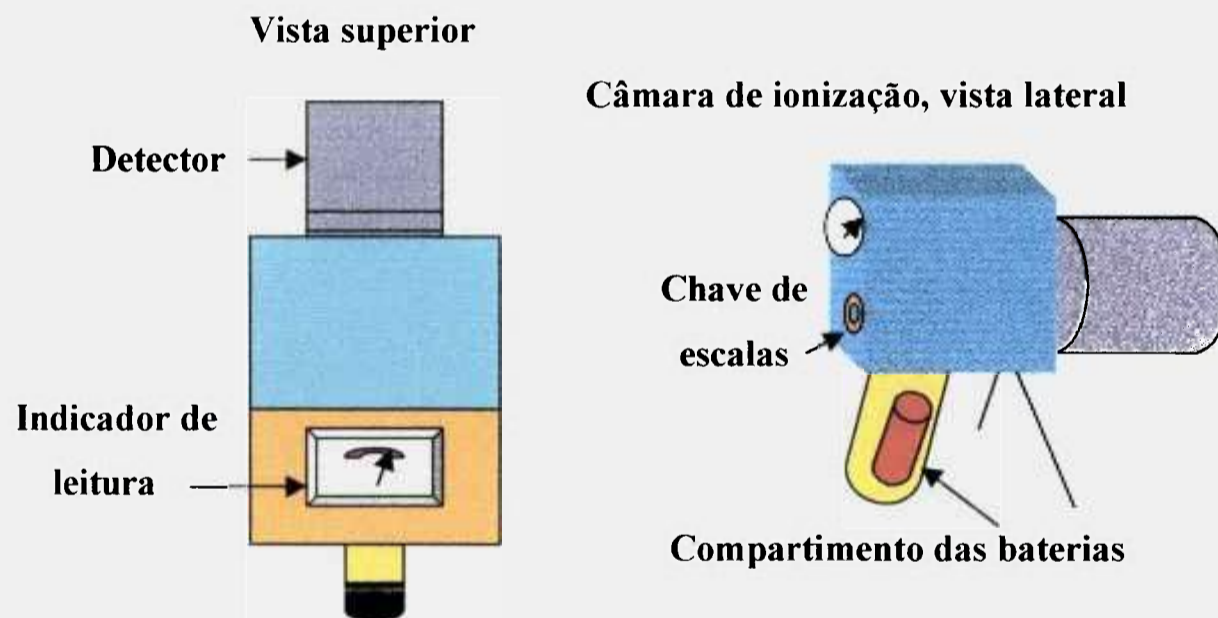


Figura 2.6: Monitores portáteis de radiação com detector do tipo câmara de ionização (interno ou externo).

2.3 Calibração de instrumentos

“Calibrar um equipamento monitor de radiação” significa determinar sua resposta a uma exposição ou taxa de exposição conhecida (ou a uma taxa de dose absorvida), envolvendo o uso de pelo menos um instrumento de referência ou instrumento padrão^(2,3).

O termo “calibração” pode também ser 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 acusar⁽⁴¹⁾.

Por meio da calibração obtém-se um fator multiplicativo, que converte um valor indicado (corrigido para as condições denominadas de referência) para o que se denomina de “valor real” de uma grandeza medida, sendo chamado “fator de calibração”. Para cada escala de um monitor de radiação pode-se obter um fator de calibração diferente.

Os monitores portáteis de radiação devem ser calibrados periodicamente, após receberem manutenção corretiva, antes mesmo 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 ele não está contaminado com material radioativo e se apresenta boas condições operacionais, ou de funcionamento, as quais devem estar de acordo com as características que constam no seu manual de operação fornecido pelo fabricante do equipamento.

Os principais objetivos de um sistema de calibração são⁽⁴⁾:

- Garantir que o equipamento funcione adequadamente;
- No caso de equipamentos que não possuem ajuste do ponto de calibração, garantir que sejam revelados os erros nas suas medidas. Quando o equipamento apresentar a possibilidade

- de ajuste, o procedimento de calibração pode levar a uma verificação na precisão das leituras por ele realizadas;
- Fornecer informações aos usuários dos equipamentos quanto as suas características mais importantes;
 - Permitir o estabelecimento de campos padrões de radiação para realização de testes de desempenho com os monitores portáteis de radiação (novos ou em uso).

As calibrações realizadas internacionalmente são referenciadas a padrões de medida absoluta. Por esse fato e ainda devido ao grande número de solicitações de calibração de monitores portáteis de radiação, criou-se uma rede de laboratórios padrões, classificados como primários, secundários e regionais, sob o apoio e supervisão da *Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA)* e da *Organização Mundial de Saúde (WHO)*. No Brasil o Laboratório Padrão Secundário (SSDL) está localizado no Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), no Rio de Janeiro e é o Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes.

Os instrumentos de medida de campos de radiação, utilizados como padrões (instrumentos que possuem desempenho e estabilidade altos, utilizados apenas para a calibração de outros instrumentos), também são classificados, de acordo com o laboratório em que foram calibrados. Desse modo, existem os instrumentos denominados padrões primários, secundários ou terciários. Existem ainda os instrumentos denominados "padrões nacionais", que são aqueles reconhecidos por uma decisão nacional oficial para representar os valores, num país, de todos os outros padrões de uma certa grandeza.

O "instrumento de campo" é aquele que possui estabilidade e desempenho apropriados para ser utilizado em medidas de rotina no "campo" (nos laboratórios de medida de campos de radiação, indústria, etc.).

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 técnicas^(4,41), a saber:

- Uso de campos de radiação com propriedades bem conhecidas;
- Uso de campos de radiação com propriedades menos bem conhecidas; neste 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 (atividade, geometria, energia, etc.) de uma fonte de radiação padrão secundário, determinando-se a seguir os valores da grandeza a ser medida no instrumento a ser calibrado, que correspondam a leituras entre 20 e 80 % de sua escala⁽⁵⁾. Alguns fatores, como a presença de grande quantidade de radiação espalhada, podem tornar difícil a especificação do campo de radiação. Neste caso, a calibração deve ser feita pela segunda técnica, onde o instrumento de referência é colocado no campo de radiação e suas leituras são registradas. Em seguida, o instrumento a ser calibrado 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 outra depois de se tomar as leituras do instrumento sob calibração. Este procedimento é o da técnica da substituição, e deve ser seguido para a calibração de instrumentos com raios X, sendo uma técnica comum tanto em nível Radioproteção quanto em nível Radioterapia^(3,4,41).

Existem, ainda, outros procedimentos de calibração de instrumentos como: calibração *tip-to-tip*, calibração no ar ou num simulador; calibração direta ou indireta, etc. Para este trabalho empregou-se a técnica de campos de radiação bem conhecidos para a calibração dos monitores portáteis de radiação gama utilizados nos testes realizados.

2.4 Testes de desempenho

Os monitores portáteis de radiação são largamente utilizados na monitoração de áreas controladas e supervisionadas, sendo seu emprego de grande valia para as tarefas e rotinas realizadas nestas áreas. A confiabilidade das medidas realizadas pelos equipamentos é essencial para a segurança física dos usuários dos instrumentos e do patrimônio, assim como para o meio ambiente. Desse modo, o estabelecimento de um procedimento rotineiro de verificação das condições operacionais dos instrumentos é necessário, de modo a garantir a qualidade das medidas realizadas pelo equipamento.

A verificação das características operacionais dos monitores portáteis de radiação é realizada por meio de testes de desempenho. Eles podem ser entendidos como um conjunto de procedimentos (ensaios e testes) que permitem avaliar atualmente as condições operacionais dos equipamentos.

2.4.1 Testes de pré-uso

Os fabricantes de monitores portáteis de radiação devem fornecer dados ou informações sobre o desempenho eletro-eletrônico, estrutura mecânica, etc. destes instrumentos.

Quando os ensaios são realizados antes do primeiro uso do equipamento ou mesmo antes de sua comercialização, são denominados testes de pré-uso. Este tipo de teste é uma forma de verificação do desempenho do equipamento, ou melhor, das características operacionais de seu projeto. Estes ensaios podem fornecer indícios se o equipamento apresenta falhas potenciais (tendência de apresentar defeitos em um curto espaço de tempo).

Os testes de pré-uso permitem a avaliação de algumas características operacionais dos monitores portáteis de radiação como: linearidade da resposta; variação da resposta do equipamento com a energia da radiação medida; resposta para taxas de exposição altas, etc.

2.4.2 Testes para verificação das condições operacionais

As condições operacionais necessárias aos equipamentos (monitores portáteis de radiação) utilizados como instrumentação em serviços e procedimentos rotineiros de radioproteção são descritas em diversas publicações internacionais (normas, comitês, relatórios, etc.). Desse modo deve-se utilizar a publicação mais adequada ao ensaio que se necessita realizar em termos de verificação do desempenho dos monitores portáteis de radiação.

O usuário de um monitor portátil de radiação poderá estabelecer uma aplicação mais específica para o seu equipamento. Para uma utilização mais específica de um monitor portátil de radiação suas características operacionais devem ser muito bem conhecidas (como tipo de radiação que está apto a medir, faixa de operação, e limitações e/ou restrições de uso, etc.)

Para garantir que um monitor portátil de radiação tenha um bom desempenho elétrico, mecânico e operacional, além do conhecimento de suas características operacionais e de suas limitações e/ou restrições de uso, são necessárias verificações periódicas (inclusive após manutenções corretivas, etc.) de suas condições operacionais por meio de testes de desempenho.

Além dos testes de desempenho, as recalibrações e a manutenção corretiva adequada podem garantir o pleno funcionamento do equipamento, aumentando a sua vida útil (período de tempo em que o equipamento realiza medidas com alto grau de confiabilidade, dentro de suas características

operacionais determinadas no projeto inicial do fabricante).

Para a realização dos testes de verificação das condições operacionais dos monitores portáteis de radiação ou os denominados testes de desempenho, uma consideração deve ser feita aos equipamentos novos ou que ainda não foram utilizados: serão considerados testados e aprovados em ensaios realizados pelos fabricantes que devem garantir que eles foram aprovados, ou seja, o fabricante deve certificar que o instrumento está operando corretamente ou dentro de suas características operacionais de projeto.

Esta avaliação que deveria ser realizada pelo fabricante é descrita por Zuerner e Kathren⁽⁴²⁾. Eles relataram o comportamento ou a alteração das características operacionais dos equipamentos de acordo com a sua configuração (desenho, tipo de estrutura mecânica, dimensão das partes componentes, etc.).

Um teste de desempenho pode incluir a avaliação de algumas ou de todas as características dos monitores portáteis de radiação. As características operacionais são divididas em características radiológicas e não radiológicas⁽¹⁶⁾.

As características não radiológicas em geral testadas são:

- Efeito de geotropismo;
- Deriva de zero elétrico;
- Variação da leitura do equipamento com a tensão das baterias;
- Variação da leitura do aparelho com as condições ambientais (temperatura, pressão, umidade relativa do ar);
- Variação da leitura do equipamento na presença de campos eletromagnéticos, rádio-frequência, som e vibração, efeitos de impactos, etc.;
- Construção mecânica do equipamento (caixa, sonda, etc.), condições de segurança (isolação elétrica, cabos, chaves,

etc.), peso (não excessivo), facilidade de utilização e superfície com facilidade de descontaminação.

Os três primeiros testes foram realizados neste trabalho.

Características radiológicas frequentemente testadas:

- Dependência energética;
- Dependência angular;
- Resposta a outras radiações ionizantes;
- Erro intrínseco da leitura do equipamento;
- Estouro de escala ou saturação (também denominado ensaio de segurança).

Todos os ensaios mencionados para características radiológicas foram realizados neste trabalho.

É conveniente observar que alguns dos ensaios relativos aos testes de desempenho de monitores portáteis de radiação devem ser realizados periodicamente, principalmente devido ao envelhecimento das partes e componentes (eletro-eletrônicos) dos equipamentos; a substituição de peças (após uma manutenção corretiva) pode afetar ou alterar a calibração do equipamento.

Deve-se frisar que um conjunto de testes de desempenho difere de uma recalibração periódica (normalmente realizada anualmente) ou de uma simples verificação de funcionamento do equipamento com uma fonte radioativa de teste de operação (*check source*).

Os testes de desempenho podem ser realizados pelo próprio usuário, por um laboratório independente, etc., desde que sejam realizados por um corpo técnico devidamente capacitado e habilitado.

Podem ser criados outros ensaios além dos anteriormente mencionados, de acordo com as necessidades de utilização ou usos específicos dos monitores portáteis de radiação. Para esses casos especiais uma nova calibração ou recalibração do equipamento deve ser realizada prevendo a nova situação.

Para garantir a confiabilidade das leituras realizadas com os monitores de radiação, torna-se necessário o estabelecimento de uma sistemática de testes de desempenho de instrumentos medidores de radiação. Este procedimento permite obter um mapeamento da situação atual das características eletro-mecânicas dos mesmos, de modo a se corrigir ou propor a solução das deficiências apresentadas.

É importante frisar que os monitores portáteis de radiação são compostos por dispositivos detectores de radiação assim como por circuitos eletrônicos muito sensíveis, que, além de terem seu desempenho afetado pelas grandezas ensaiadas nos testes deste trabalho, podem também tê-lo afetado pelo acúmulo de umidade⁽⁴³⁾, sujeira e vapores indesejáveis.

Os equipamentos que utilizam câmaras de ionização (não seladas) como elementos detectores de radiação empregam em seus circuitos anéis de guarda⁽⁴⁴⁾ para minimizar os efeitos causados pela umidade, como por exemplo fugas de corrente^(43, 45).

Os ensaios a serem realizados neste trabalho consistem na verificação das características físicas, elétricas e mecânicas dos instrumentos de medida de radiação, que por meio das respostas angulares, de energia e outras grandezas relevantes, assegurarão a capacidade de transferência da calibração⁽⁴⁶⁾.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Equipamentos testados

Para identificação dos equipamentos durante os testes, eles receberam um código, levando-se em conta o tipo e modelo do elemento detector, conforme descrito na **Tabela 3.1**.

Tabela 3.1: Relação dos Monitores Portáteis de Radiação Testados.

Marca	Modelo	Tipo	Quantidade	Código
Ludlum	3	Geiger-Müller	7	A1,A2,A3,A4,A5, A8 e A9
Nortron	NDG 1000 A	Geiger-Müller	1	A6
IPEN	PI 760	Geiger-Müller	1	A7
Victoreen	450 P	Câmara de Ionização	7	C1,C2,C3,C4,C7, C8 e C9
Nardeaux	Babyline 81	Câmara de Ionização	2	C5,C6
Victoreen	Thyac III	Cintilador	1	T1

As câmaras de ionização da marca Victoreen utilizadas nos testes são do tipo selado (não necessitam de correções para temperatura e pressão, devido à densidade do ar permanecer constante no interior do elemento detector⁽⁴⁷⁾) enquanto as da marca Nardeaux são do tipo não selado.

As medidas realizadas por estas últimas devem ser corrigidas para as condições de referência de temperatura e pressão ($20,0 \pm 0,1$) °C e ($101,3 \pm 0,1$) kPa, e devem ser operadas com umidade relativa do ar em torno de 50 %. Todos os equipamentos utilizados nos ensaios foram previamente calibrados com radiação gama proveniente das fontes de ^{60}Co e ^{137}Cs .

As taxas de exposição contidas nas tabelas de dados dos testes estão expressas em mR/h, pois todos os equipamentos testados neste trabalho apresentam estas unidades, ou seja, a unidade de leitura dos aparelhos é mR/h, ao invés das unidades do Sistema Internacional (SI), onde se tem que 1 R é igual a $2,58 \times 10^{-4} \text{ C.kg}^{-1}$.

3.2 Sistemas e fontes de radiação

I. Irradiador da STS Steuerungstechnik & Strahlenschutz GmbH, Alemanha, modelo OB85, com fontes emissoras de radiação gama de ^{60}Co , ^{137}Cs e ^{241}Am . A **Tabela 3.2** mostra as fontes emissoras de radiação gama do irradiador STS e suas atividades.

Tabela 3.2: Fontes de Radiação Gama do Irradiador STS, e suas Atividades (GBq).

Fonte de Radiação Gama	Atividade (GBq)	Data de Referência
^{137}Cs	651	Novembro/2000
^{60}Co	18,0	Novembro/2000
^{241}Am	7,3	Novembro/2000
^{226}Ra	0,4	Novembro/2000

- II. Sistema de radiação X de energias baixas, constituído por um gerador Rigaku Denki Co. Ltd., Japão, tipo Geigerflex (potencial constante), acoplado a um tubo Philips, Holanda, modelo PW 2184/00, com janela de 1 mm de Berílio e alvo de Tungstênio. A tensão de operação do sistema vai de 20 a 60 kV e a corrente do tubo pode variar entre 2 e 80 mA. Sua potência máxima é de 3,0 kW. O sistema possui um obturador do feixe (*shutter*), marca Physikalisch-Technische Werkstätten (PTW), modelo 6801. O sistema monitor é composto por uma câmara de transmissão PTW, modelo Tch 7786/k tipo 24390, série 2882, acoplada ao eletrômetro PTW, modelo DUO/4, série 21142-301086. Neste sistema estão implantadas qualidades de radiação para a calibração de monitores portáteis (nível radioproteção), com energias de 33 e 48 keV. A **Tabela 3.3** mostra as qualidades de feixes de raios X, nível radioproteção, utilizadas nos testes⁽⁴⁸⁾.
- III. Sistema irradiador padrão secundário com fontes emissoras de radiação beta da Buchler GmbH & Co., Alemanha, modelo Beta-Sekundär – Standard BSS, constituído de fontes emissoras de radiação beta (fontes calibradas) de $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$, ^{204}Tl e ^{147}Pm ; um porta-fonte; e uma unidade de controle de tempo de irradiação. A **Tabela 3.4** mostra as fontes de radiação beta do sistema irradiador Buchler com suas atividades.
- IV. Fonte de ^{137}Cs , Graetz, modelo NW 125, com atividade de 200 kBq (novembro/2000).
- V. Fonte de ^{226}Ra , Amersham/Searle, modelo 184100, com atividade de 32,9 kBq (novembro/2000).

Tabela 3.3: Qualidades de Feixes de Raios X, Nível Radioproteção, implantadas no Laboratório de Calibração do IPEN⁽⁴⁸⁾, conforme a Norma ISO 4037-1 para Espectro Estreito.

Tensão (kV)	Corrente (mA)	Filtração Adicional (mm Al)	Camada Semi-Redutora (mm Cu)	Energia Efetiva (keV)	Taxa de Exposição (R/h)
40	20,0	4,21	0,086	33,0	1,64
60	10,0	4,57	0,232	48,0	1,33

Tabela 3.4: Sistema Irradiador Buchler, com Fontes de Radiação Beta e suas Atividades (MBq).

Fonte de Radiação Beta	Energia Média (keV)	Atividade (MBq)	Data de Referência
⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y	800	1,14x10 ³	Novembro/2000
⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y	800	45,9	Novembro/2000
¹⁴⁷ Pm	60	32,8	Novembro/2000
¹⁴⁷ Pm	60	2,7	Novembro/2000
²⁰⁴ Tl	240	2,7	Novembro/2000
²⁰⁴ Tl	240	0,49	Novembro/2000

3.3 Sistemas auxiliares

- I. Fonte de tensão contínua ajustável de 0 a 60 V e de corrente de 0 a 250 mA, marca Hewlett & Packard, modelo 6217 A.
- II. Circuito interno de imagem, composto por câmera de vídeo, Vigitronic, modelo 260, e monitor de vídeo, Philco, modelo PB/12A7.

- III. Microcomputador Microtec, modelo PC Pentium 100 MHz.
- IV. Impressora HP, modelo 695 C.
- V. Termômetro Incotherm, de mercúrio, com intervalo de medida entre -10 e +40°C.
- VI. Barômetro Veränderlich, modelo Domatic, Alemanha, com intervalo de medida entre 96 e 104 kPa e precisão de 0,1 kPa.
- VII. Higrômetro Präzision-Faden, Alemanha, com intervalo de medida entre 0 e 100% e com precisão de 1% de umidade relativa do ar.
- VIII. Multímetro Wavetek, modelo 2030, 4 ½ dígitos.

Para os estudos da dependência energética e angular, e do ensaio de estouro de escala (*Overload* ou Saturação), foram utilizados os sistemas e as fontes de radiação I e sistemas auxiliares II, III, IV, V, VI e VII relacionados no item 3.2.

Os sistemas e as fontes de radiação II, IV e V e os sistemas auxiliares I, II, III, IV, V, VI, VII e VIII foram empregados nos estudos de efeito de geotropismo, resposta a outras radiações e variação da medida com a carga da bateria. Para o ensaio de resposta à radiação beta foi utilizado o sistema e fontes de radiação III e os sistemas auxiliares II, III, IV, V, VI e VII.

Os laboratórios são climatizados, isto é, possuem sistemas de ar condicionado e desumidificadores.

4 RESULTADOS

Os ensaios apresentados representam os resultados somente dos equipamentos testados, que podem ter sofrido manutenção corretiva ou alteração no seu comportamento ao longo do tempo de uso; não houve um controle sobre a situação do equipamento anterior aos ensaios. Desse modo percebe-se a importância de se realizar testes de desempenho, para verificação do comportamento atual dos monitores portáteis de radiação.

4.1 Estudo das características radiológicas

4.1.1 Dependência energética de monitores portáteis

A dependência energética de um monitor portátil de radiação pode ser entendida como a variação na resposta do instrumento em função da energia da radiação, para um mesmo tipo de radiação e taxa de dose absorvida referenciada ao tecido ou no ar, em princípio, para todo o intervalo de energias em que o equipamento foi projetado para medir. Deve-se manter o valor da taxa de exposição constante^(15,49). Os detectores foram submetidos à radiação gama de fontes de ^{60}Co e ^{137}Cs provenientes do irradiador, devidamente alinhado com o sistema de posicionamento do equipamento, composto por uma mesa com altura ajustável, sobre um trilho metálico onde se pode variar a distância entre a fonte de radiação e o equipamento, mantendo o centro do elemento detector sempre

alinhado com o feixe de radiação. As distâncias utilizadas para os ensaios de dependência energética dos detectores Geiger-Müller variaram de 117,5 a 190,5 cm, para as câmaras de 120,5 a 271,5 cm e para o cintilador de 106,5 a 155,0 cm. A utilização das diferentes distâncias leva em conta o número de escalas dos equipamentos que foram testados. Algumas escalas não puderam ser calibradas por falta de condições técnicas (necessitando de taxas de exposição de até 500 R/h, no caso das câmaras de ionização).

O detector cintilador foi calibrado com a fonte de ^{137}Cs do irradiador STS, conforme recomendado pelo fabricante. Todos os outros equipamentos foram calibrados com a fonte de ^{60}Co , seguindo as recomendações dos respectivos fabricantes.

As qualidades de radiação que devem ser empregadas neste ensaio são fornecidas pela norma ISO 4037-1979 (E)⁽¹⁰⁾. A **Tabela 4.1** mostra os resultados obtidos nos testes de dependência energética dos monitores portáteis de radiação.

Tabela 4.1: Dependência Energética dos Monitores Portáteis de Radiação.

Detector de radiação	Taxa de exposição real ^{60}Co (mR/h)	Taxa de exposição medida ^{60}Co (mR/h)	Taxa de exposição real ^{137}Cs (mR/h)	Taxa de exposição medida ^{137}Cs (mR/h)	Varição entre as taxas de exposição medidas (%)
A1	100,5	100,0	100,2	80,0	25,0
A2	100,5	100,0	100,2	80,0	25,0
A3	100,5	100,0	100,2	75,0	33,3
A4	100,5	100,0	100,2	80,0	25,0
A5	100,5	100,0	100,2	75,0	33,3
A6	48,4	42,6	48,6	35,8	19,0
A7	50,4	51,0	50,0	38,8	31,0
C1	253,0	246,0	250,9	227,0	8,4
C2	253,0	260,0	250,9	240,0	8,3
C3	253,0	230,0	250,9	218,0	5,5
C4	252,0	256,0	251,0	240,0	6,7
C5	50,3	56,4	50,4	55,7	1,3
C6	50,3	51,7	50,4	52,6	1,0
T1*	400×10^3	$184,3 \times 10^3$	400×10^3	400×10^3	117,0

*Leituras em cpm, pois a escala de leitura se apresenta nesta unidade.

As taxas de exposição reais foram obtidas com uma incerteza menor ou igual a 5 %. O desvio padrão máximo percentual das medidas dos equipamentos A1 a A6 foi de 5,0 %, e para A7 de 3,0 %; para os equipamentos C1, C4 e C6, foi de 2,0 % e para C2 de 1,5 %; para os equipamentos C3 e C5, foi de 1,8 %, e no caso do cintilador de 6 %.

Os valores da variação percentual entre as taxas de exposição mostrados na **Tabela 4.1** foram obtidos por:

$$\Delta x (\%) = [(taxa \text{ de exposição real} / taxa \text{ de exposição medida}) - 1] \times 100$$

Pode-se observar que a maior dependência energética ocorre com o detector do tipo cintilador⁽⁵⁰⁾, chegando a 117,0 % para as fontes de ⁶⁰Co e ¹³⁷Cs. No caso das câmaras de ionização, a maior variação chegou em 8,4 %. Os detectores do tipo Geiger-Müller atingiram até 33,3 % de dependência energética. De acordo com a NBR 10011-1987⁽⁴⁹⁾, a indicação do instrumento para radiações com energias entre 50 keV e 3 MeV não deve diferir em mais de ± 25 % dentro deste intervalo de energias. Todos os aparelhos atendem ao recomendado pela norma, à exceção dos detectores: A3, A5, A7 e T1.

Segundo o fabricante do cintilador, uma variação de até 90 % seria esperada, porém uma variação de 117 % permite concluir que o equipamento pode estar apresentando algum problema na sonda detectora ou no seu módulo eletrônico. Esta mudança no comportamento do equipamento foi constatada porque o ensaio de dependência energética foi aplicado ao mesmo. Os manuais de instruções dos equipamentos, A1 a A5, A7, A8, A9 não mencionam a dependência energética deles para fontes de ⁶⁰Co e ¹³⁷Cs, para fins de comparação. Para o equipamento A6, existe um gráfico no manual de instruções onde foi verificado o índice de ± 10 % de dependência energética; para os equipamentos C1 a C4 e C7 a C9, de ± 8 %, obtida por meio da curva que consta no manual. No caso dos equipamentos C5 e C6, o valor obtido é ± 10 % (curva do manual de instruções).

Os ensaios comprovaram que as câmaras de ionização estão de acordo com as especificações constantes em seu manual de instruções. No caso do cintilador, como ele ultrapassou o valor de variação fornecido pelo fabricante, pode-se evidenciar a existência de algum problema com o aparelho. Para os equipamentos do tipo Geiger-Müller não foram fornecidos parâmetros pelos fabricantes, para comparação de dados.

4.1.2 Dependência angular de monitores portáteis

Se os instrumentos portáteis de medida de radiação são utilizados sob condições de falta de uniformidade de irradiação do volume sensível do seu elemento detector (próximo à fonte ou a um feixe de radiação), a resposta do equipamento poderá variar significativamente com a geometria da fonte, a geometria do detector, e ainda com a distância entre a fonte e o detector⁽¹⁷⁾.

A indicação à radiação incidente pode se alterar com a mudança de ângulo da direção formada entre o elemento detector e o feixe de radiação incidente em seu volume sensível. Devem ser realizados testes e verificações periódicas da dependência angular dos detectores portáteis^(22,23). O ensaio deve ser feito com a energia mais baixa possível, mas não inferior a 50 keV, compatível com as características de resposta do instrumento⁽⁴⁹⁾. Os monitores portáteis foram posicionados no banco de calibração, na posição de calibração, ou seja, com o feixe de raios gama incidindo sobre toda a sonda detectora, atingindo o centro geométrico do elemento detector; nesta situação os equipamentos se encontram sobre a mesa de calibração no plano horizontal (paralelos à superfície da mesa), sendo esta a posição adotada como de ângulo 0°.

A partir da posição de calibração convencionou-se um sentido de rotação do detector para a direita (45 e 90°), ou sentido horário, que corresponde à mudança de direção do ângulo formado entre o feixe de radiação gama e o

detector. O mesmo procedimento foi adotado para o sentido anti-horário. Estes testes permitem a verificação do comportamento do detector em situação normal de uso.

Por se tratarem de equipamentos portáteis e de campo, ao serem manuseados e estando em operação, a direção formada entre o detector e o campo de radiação a ser medido poderá variar com o balanço da mão e desse modo o valor da medida pode ser alterado em função da direção formada entre o detector e o feixe de radiação que está sendo medido.

Para a realização dos testes utilizou-se a fonte de ^{241}Am do irradiador STS, com atividade de 7,3 GBq (energia de 60 keV); o uso de fontes gama de energias baixas permite que se verifique o grau de sensibilidade do detector à radiação de fundo ou de outras origens que podem afetar o bom funcionamento do equipamento; os materiais utilizados para recobrir o detector (sonda) podem afetar as medidas de fontes de radiação de energias baixas, podendo barrar estes feixes, ou modificando os valores obtidos na leitura.

A **Figura 4.1** mostra como foram realizados os ensaios de dependência angular dos monitores portáteis de radiação relativo à posição dos equipamentos e a fonte de radiação gama utilizada nos testes.

A **Tabela 4.2** mostra os resultados dos testes de dependência angular dos monitores portáteis de radiação.

Direções da fonte radioativa de ^{241}Am utilizadas nos testes

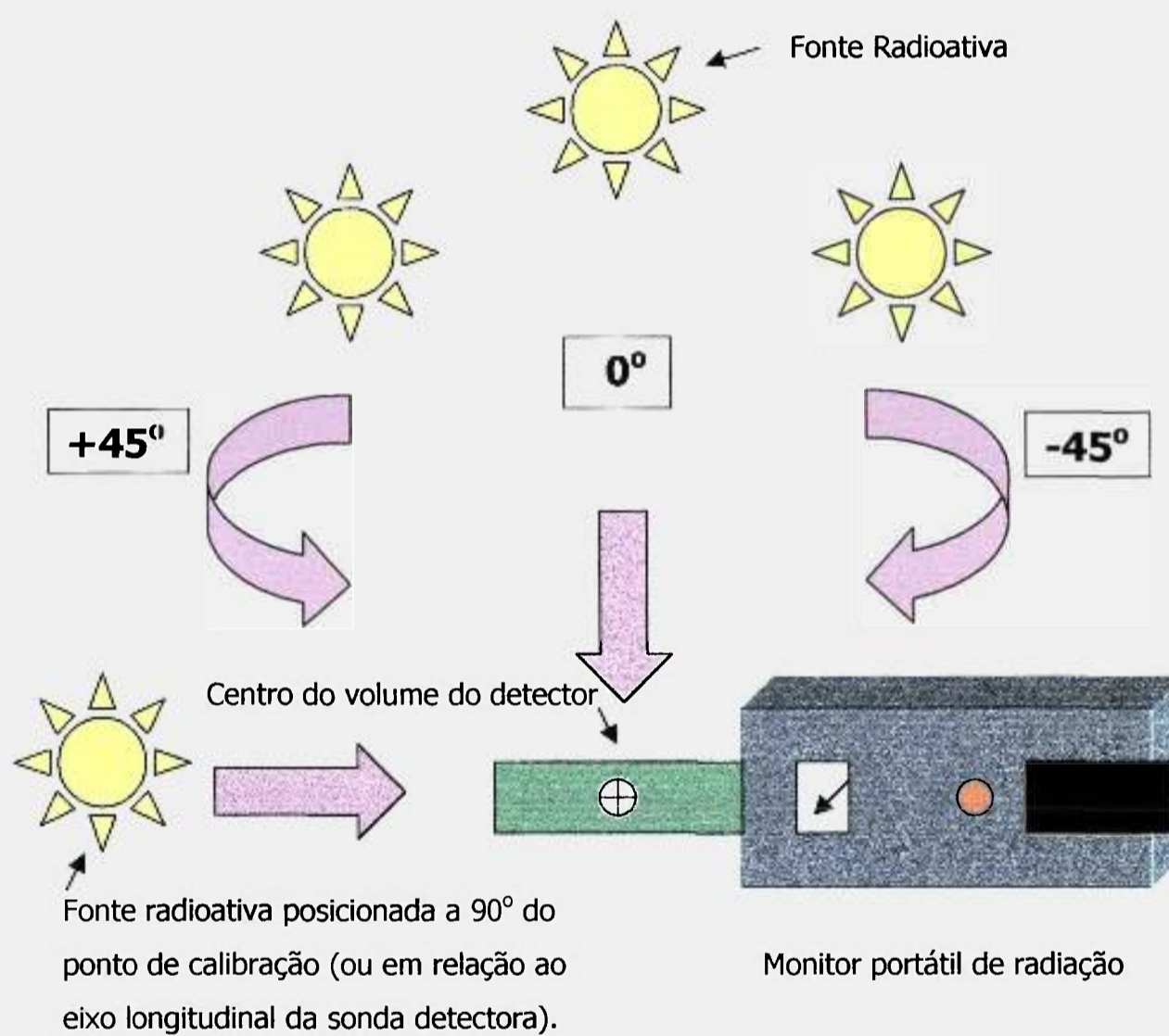


Figura 4.1: Esquema de posicionamento da fonte e dos monitores portáteis de radiação para os testes de dependência angular.

Tabela 4.2: Dependência Angular dos Monitores Portáteis de Radiação em Relação à Posição de Calibração (ângulo de 0°). Medidas de Taxa de Exposição (mR/h).

Detector de radiação	Posição de calibração (âng. 0°)	Rotação sentido horário (âng. 45°)	Rotação sentido anti-horário (âng. 45°)	Direção perpendicular (âng. 90°)	Varição da leitura entre 0 e 90° (%)
A1	1,46	0,86	0,88	0,29	403
A2	1,56	0,96	0,98	0,32	387
A3	1,64	1,04	1,06	0,40	310
A4	1,52	1,02	1,00	0,33	360
A5	1,33	0,73	0,76	0,25	432
A6	1,50	1,17	1,15	0,11	1260
A7	0,76	0,53	0,52	0,22	245
C1	0,96	0,87	0,86	0,84	14,3
C2	0,91	0,82	0,83	0,81	12,3
C3	1,05	0,92	0,92	0,91	15,4
C4	0,98	0,90	0,89	0,88	11,3
C5	4,86	4,43	4,53	4,26	14,1
C6	4,61	4,24	4,20	4,03	14,4
T1*	400x10 ³	370x10 ³	380x10 ³	300x10 ³	33,3

*Leituras em cpm, pois a escala de leitura do equipamento se encontra nesta unidade.

O desvio padrão máximo percentual das leituras do equipamento A1 foi de 3,5 %, A2 de 2,8 %, e no caso de A3, C2 e C3 foi de 3,0 %. Para A4 e C4 o desvio padrão percentual foi de 2,5 %, A5 de 3,9 %, dos instrumentos C5 e C6 foi de 2,0 %, A6 de 1,7 %, A7 de 7,0 %, C1 de 3,6 %, e no caso do cintilador (T1) foi de 6,0 %.

Dos valores obtidos na **Tabela 4.2**, verifica-se que os detectores Geiger-Müller apresentam as maiores dependências angulares, atingindo valores de até 1260 % de desvio na indicação da leitura para um ângulo de 90° formado entre o eixo longitudinal do detector e o feixe de radiação, e de cerca de 75 % de desvio na indicação da leitura em um ângulo de 45°.

Segundo a norma IEC 395⁽²²⁾, a indicação à radiação incidente, segundo um ângulo não superior a 45° com relação à direção de calibração, não deve ser menor do que 80% da indicação obtida segundo a direção de calibração; para um ângulo máximo de 90°, a indicação não deve ser menor do que 50 % da indicação obtida segundo a direção de calibração. Verifica-se que os detectores portáteis do tipo Geiger-Müller não atendem ao recomendado pela norma IEC 395⁽²²⁾, uma vez que atingiram até 1260 % de desvio na medida enquanto é permitida uma variação máxima de 50 % (para um ângulo de 90°).

A dependência angular das câmaras de ionização atingiu cerca de 15,4 % (para um ângulo de 90°) e no caso do cintilador cerca de 33,3 % de variação para 90°, de modo que somente as câmaras de ionização e o cintilador atenderam ao recomendado pela norma⁽²²⁾, ou seja, uma variação máxima de leitura do instrumento de ± 50 %, para um ângulo máximo de até 90° e de até ± 20 % de variação na leitura, para uma variação de ângulo máxima de $\pm 45^\circ$. Desse modo, foram aprovados neste ensaio as câmaras de ionização e o cintilador, para os ângulos de 45° e 90°.

Os ensaios de dependência angular mostraram que para fontes emissoras de radiação gama de energias baixas (cerca de 60 keV), os detectores do tipo Geiger-Müller ensaiados não são adequados (variação na leitura de até 1260 %); isso se deve ao tipo do elemento detector (características construtivas) e principalmente ao tipo de material utilizado na confecção da sonda detectora (ferro, alumínio de diferentes espessuras), que funciona como uma blindagem para fontes de radiação de energias baixas, afetando sensivelmente as leituras efetuadas pelo equipamento. As câmaras de ionização e o cintilador obtiveram bons resultados neste ensaio.

Somente os manuais dos equipamentos C1 a C6 fornecem informações sobre dependência angular, por meio de curvas, onde C1 a C4 figuram com ± 2 % de variação para 45° e ± 8 % para 90°, e ainda C5 e C6, com variações de $\pm 2,5$ % e 25 %, respectivamente. As câmaras de ionização, apesar de terem

atendido ao recomendado pela norma⁽⁴⁹⁾, não atingiram os valores recomendados por seu manual de instruções; somente as câmaras C5 e C6 atenderam ao recomendado pelo manual de instruções para variação de ângulo de 90°.

4.1.3 Ensaio de estouro de escala ("Saturação")

O teste de estouro de escala faz parte dos ensaios denominados de "Condições de Segurança". Para taxas de exposição correspondendo a indicações acima do limite superior de qualquer faixa nominal, o mostrador do instrumento deve acusar estouro de escala⁽⁴⁹⁾.

Os ensaios de estouro de escala ou saturação são necessários para a verificação das condições de segurança dos equipamentos; permitem avaliar se o equipamento responde a taxas de exposição altas de forma instantânea, permitindo que o equipamento indique uma situação de anormalidade, como uma situação de exposição acidental do usuário a taxas de exposição excessivas, ou acima dos limites de leitura do equipamento, alertando o usuário para uma situação de risco pessoal e patrimonial. É imprescindível a realização periódica deste ensaio, e caso o equipamento não seja aprovado, esta situação deve ser notificada ao usuário, para a tomada de providências, como conserto ou substituição de peças, se for o caso. Neste ensaio foi utilizado o irradiador com a fonte de ¹³⁷Cs, onde os instrumentos foram submetidos a taxas de exposição 10 vezes maiores que os respectivos fundos de escala por cerca de 5 minutos.

Este ensaio já faz parte dos procedimentos adotados nas rotinas de calibração de equipamentos portáteis de radiação do Laboratório de Calibração de Instrumentos do IPEN.

Os equipamentos que utilizam câmara de ionização como elemento detector não puderam ser testados, por falta de condições técnicas⁽⁴⁷⁾, pois eles

necessitam de taxas de exposição muito altas para a realização de ensaio de estouro de escala, e o sistema utilizado para o teste não possui condições de fornecer taxas de exposição tão altas. As câmaras de ionização operam com taxas de exposição mais altas (característica construtiva dos seus elementos detectores), em relação aos detectores Geiger-Müller.

A **Tabela 4.3** mostra os resultados dos ensaios de estouro de escala de detectores portáteis de radiação.

Tabela 4.3: Ensaios de Estouro de Escala de Monitores Portáteis do tipo Geiger-Müller e Cintilador.

Detector de radiação	Taxa de exposição (R/h)	Resultado
A1	2,0	aprovado
A2	2,0	aprovado
A3	2,0	aprovado
A4	2,0	aprovado
A5	2,0	aprovado
A6	1,0	aprovado
A7	10,0	aprovado
T1	1,0	aprovado

Dos dados obtidos da **Tabela 4.3** pode-se ver que os equipamentos foram testados com valores de taxa de exposição diferentes, dependendo do modelo do aparelho, porque eles possuem escalas de indicação de radiação com fundo de escala (limite de leitura) também diferentes. Deste modo, as taxas de exposição empregadas no ensaio tiveram de ser adequadas a cada fundo de escala de cada modelo de aparelho, ou melhor, compatível com a escala dos mesmos.

Todos os equipamentos testados da **Tabela 4.3** foram considerados aprovados. A incerteza nas taxas de exposição não foi superior a 5 %.

O manual de instruções do equipamento A6 só define o estado de saturação, não indicando o valor dela para o aparelho. Para o detector T1 o ponto

de saturação (da sonda, pois o equipamento pode utilizar diferentes modelos delas) está em 35 R/h (segundo o manual da sonda empregada no ensaio); os equipamentos C1 a C4 indicam a condição de saturação (*over-range*), mas os manuais não mencionam o valor de taxa de exposição, onde esta condição ocorre; no caso de C5 e C6, os manuais também indicam quando há a condição de saturação (por meio de luz de advertência no painel). Os manuais dos demais equipamentos não contêm informações relativas a ensaios de saturação.

4.1.4 Erro intrínseco dos instrumentos

O erro intrínseco de um instrumento de medida da radiação, ou melhor, de um monitor portátil de radiação, pode ser entendido como o erro da indicação da leitura do mesmo, quando está operando em condições ideais, ou de referência⁽⁴⁹⁾.

O valor do erro intrínseco é dado em termos percentuais, pela diferença entre o valor da taxa de exposição medida pelo instrumento e a taxa de exposição da fonte utilizada no ensaio, dividida pela taxa de exposição da fonte.

A fonte de radiação gama de ⁶⁰Co foi empregada neste ensaio. Para este ensaio, o valor da taxa de exposição verdadeira deve ser conhecida com uma exatidão igual ou melhor que $\pm 5\%$ ⁽⁴⁹⁾.

Todos os equipamentos que foram ensaiados possuem escalas de leitura linear, segundo recomenda a Norma IEC 395⁽²²⁾ para testes de desempenho de monitores portáteis de radiação com escala linear: o ensaio deve ser realizado em todas as faixas nominais no mínimo em três pontos, a cerca de 30, 50 e 75 % do limite superior de cada faixa nominal. Para equipamentos com escalas logarítmicas, este ensaio deve ser realizado no mínimo em dois pontos de cada década de todas as faixas nominais. Segundo a norma⁽⁴⁹⁾, o erro intrínseco

máximo admissível deve estar dentro de $\pm 10\%$.

A **Tabela 4.4** apresenta os valores obtidos para o ensaio de erro intrínseco da leitura dos monitores portáteis de radiação.

Dos dados obtidos verifica-se que somente os equipamentos A6 e T1 não estão de acordo com o recomendado pela norma⁽⁴⁹⁾. Este ensaio pode auxiliar na detecção de falhas operacionais ou potenciais apresentadas pelos equipamentos.

Tabela 4.4: Erro Intrínseco da Leitura dos Monitores Portáteis de Radiação

Equipamento	Erro Intrínseco da Leitura (%)
A1	2,5
A2	5,0
A3	4,4
A4	3,0
A5	7,2
A6	10,2
A7	5,5
C1	6,7
C2	10,0
C3	8,5
C4	3,9
C5	9,8
C6	6,6
T1	10,7

Segundo os manuais de instrução dos equipamentos A1 a A6 e C1 a C4, estes equipamentos admitem um erro intrínseco da leitura de $\pm 5\%$ (da indicação de fundo de escala), enquanto os equipamentos A7 e T1, com $\pm 10\%$, e ainda os equipamentos C5 e C6 com $\pm 9\%$.

Os equipamentos A1 a A4, A7, C4 e C6 atenderam ao recomendado pelo manual de instruções e pela norma⁽⁴⁹⁾. Os equipamentos A6 e T1 não atenderam ao recomendado pela norma⁽⁴⁹⁾ nem pelo manual de instruções. Os equipamentos A5, C1 a C3 e C5 atenderam somente ao recomendado pela norma.

6.1.5 Resposta a outras radiações ionizantes

Os instrumentos devem ser projetados de forma a impedir, tanto quanto possível, durante a medida de feixes de radiação gama a influência de outras radiações ionizantes⁽⁴⁹⁾. Estas outras radiações podem afetar a precisão da medida em campos mistos. A contribuição na leitura de radiações não desejáveis pode ser pequena, mas isto pode causar certos problemas em algumas aplicações, principalmente se esta contribuição não for bem conhecida ou prevista, como nêutrons induzindo leitura em um instrumento projetado para medida de radiação gama⁽⁵¹⁾.

Todos os instrumentos foram, anteriormente a este teste, calibrados com radiação gama.

6.1.5.1 Resposta à radiação beta

Quando o monitor portátil é utilizado para a medida da taxa de exposição da radiação gama na presença de radiação beta, as partículas beta mais energéticas podem penetrar no volume sensível do detector. A energia mínima da partícula beta capaz de penetrar no volume sensível do detector deve ser fornecida pelo fabricante.

Se o detector possui uma capa removível sobre uma janela fina, as espessuras de ambas devem ser fornecidas pelo fabricante⁽⁴⁹⁾.

Para a realização dos ensaios deve ser empregada uma fonte de $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$, ou outra fonte que emita partículas beta com energia máxima de 2 MeV (por exemplo ^{238}U), coberta com um absorvedor com 50 mg/cm^2 de espessura, e colocada aproximadamente a 30 cm da superfície do detector⁽⁴⁹⁾. Caso o detector

possua uma capa removível sobre uma janela fina, este ensaio deve ser feito com e sem capa.

A resposta do instrumento à radiação beta deve ser fornecida em termos do quociente entre o valor da taxa de dose absorvida devido à radiação beta no ar no ponto de medição e a indicação do instrumento, em unidades de $(\text{Gy}\cdot\text{C}^{-1}\cdot\text{kg})$.

Desse modo pode-se definir um fator F_b (fator para indicação de radiação beta), que representa a capacidade do instrumento de indicar a presença da radiação beta num campo de radiação que está sendo medido pelo equipamento.

Deve-se notar que quanto menor o valor de F_b , para uma mesma fonte emissora de radiação beta, maior será a capacidade do instrumento de identificar a presença de radiação beta em um campo de radiação.

Os ensaios foram realizados com os equipamentos posicionados a uma distância de 30 cm das fontes beta (distância entre a fonte e o centro do volume sensível do elemento detector dos equipamentos). Foram utilizadas nos ensaios duas fontes emissoras de radiação beta: $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ (45,9 MBq), e ^{204}Tl (0,49 MBq).

Dos equipamentos testados, somente o cintilador (T1) não possui capa removível.

A **Tabela 4.5** apresenta os valores obtidos de F_b para os ensaios de resposta à radiação beta dos monitores portáteis de radiação, sem a capa que recobre as sondas detectoras.

Tabela 4.5: Fatores de Indicação de Radiação Beta (F_b) dos Monitores Portáteis de Radiação (sem a Capa Removível), após Calibração Prévia com Radiação Gama

Fonte	$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$	^{204}Tl
Equipamento	F_b (Gy.C ⁻¹ .kg)	F_b (Gy.C ⁻¹ .kg)
A6	201	371
A7	126	389
C5	38	65
T1	-	-

Dos dados obtidos da **Tabela 4.5** verifica-se que os menores valores de F_b são do equipamento C5, demonstrando que a câmara de ionização apresentou a melhor indicação de radiação beta. O fator F_b é dado na mesma unidade que o fator de calibração para radiação beta, desse modo, quanto menor o valor de f_b obtido, menor será o valor de correção a se aplicar na leitura efetuada pelo equipamento (a leitura do equipamento está mais próxima do valor verdadeiro ou real da taxa ou dose).

As câmaras de ionização com uma janela de entrada fina (do elemento detector) são utilizadas para a medida de taxas de dose equivalente⁽⁵²⁾.

Os outros equipamentos (A6 e A7) se mostraram muito pouco eficientes na detecção da radiação beta. O equipamento T1, por não possuir janela removível, não foi considerado para este ensaio.

A **Tabela 4.6** apresenta os valores obtidos de F_b para os ensaios de resposta à radiação beta dos monitores portáteis de radiação, com a capa que recobre as sondas detectoras.

Tabela 4.6. Fatores de Indicação de Radiação Beta (F_b) dos Monitores Portáteis de Radiação (com a Capa Removível), após Calibração Prévia com Radiação Gama.

Fonte	$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$	^{204}Tl
Equipamento	F_b ($10^3 \text{ Gy.C}^{-1}.\text{kg}$)	F_b ($10^3 \text{ Gy.C}^{-1}.\text{kg}$)
A6	-	-
A7	23	-
C5	0,18	-
T1	21	-

Dos dados obtidos da **Tabela 4.6** verifica-se que o menor valor de F_b é do equipamento C5, demonstrando que a câmara de ionização apresentou a melhor indicação da presença de campo de radiação beta, mesmo com a capa colocada. O equipamento A6 não acusou a presença de radiação beta, os equipamentos A7 e T1 se mostraram muito pouco eficientes na detecção da radiação beta, neste ensaio com a utilização de capa removível. Os equipamentos A7, C5 e T1 acusaram a presença da radiação beta somente para a fonte emissora de $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$; isto deve-se ao fato que a fonte de $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ tem energia média de 0,80 MeV, enquanto que a fonte de ^{204}Tl tem energia efetiva menor, de apenas 0,24 MeV.

O valor medido pelo detector T1 foi de apenas quatro vezes o valor da radiação de fundo.

Segundo o catálogo da sonda dos equipamentos A1 a A5 e A8 e A9, a sonda responde a campos de radiação beta de energias maiores que 200 keV; no caso do equipamento A7, o catálogo da sonda menciona que ela mede campos de radiação alfa, beta e gama (janela do detector com 1,5-2,0 mg/cm²). Segundo o manual de instruções do equipamento A6, o aparelho detecta radiação X e gama. Os manuais dos equipamentos C1 a C4 mencionam que eles respondem à radiação beta com energias maiores que 1 MeV (mas não são calibrados para este tipo de radiação). Os equipamentos C5 e C6 devem responder à radiação beta,

porém em condições especiais de geometria (o tamanho e a geometria da fonte devem ser compatíveis com as dimensões das câmaras). O catálogo da sonda do equipamento T1 menciona somente que ele está apto a medir radiação gama com energias maiores que 60 keV.

Dos resultados obtidos, verifica-se que as câmaras de ionização com capas removíveis são as mais adequadas para a detecção de radiação beta (com as paredes de material e espessura adequadas); o cintilador e os detectores do tipo Geiger-Müller não são adequados para medida deste tipo de radiação. Verifica-se a importância da utilização de detectores adequados ao tipo de radiação que se deseja medir.

4.1.5.2 Resposta à radiação X

Os equipamentos foram ensaiados em feixes de raios X, nas qualidades ISO 4037-1⁽¹²⁾, cujas características constam da **Tabela 3.3**, espectro estreito de 60 kV (10 mA) e taxa de exposição de $343 \mu\text{C}/\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ (1,33 R/h), e 40 kV (20 mA) com taxa de exposição de $423 \mu\text{C}/\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ (1,64 R/h), ambas obtidas a 2m do alvo (centro do tubo de raios X). Os equipamentos foram submetidos à radiação com as tampas das respectivas sondas fechadas. Os desvios padrões máximos percentuais das taxas de exposição foram de 0,6 % para 40 kV, e 0,7 % para 60 kV.

Na **Tabela 4.7** é apresentada a resposta dos monitores portáteis de radiação para feixes de radiação X, após calibração prévia com radiação gama.

Tabela 4.7. Resposta à Radiação X dos Monitores Portáteis de Radiação, com as Tampas das Sondas Fechadas.

Taxas de Exposição para 40 kV: 1,64 R/h e para 60 kV: 1,33 R/h.

Detector de radiação	Taxa de exposição medida Raios X 40 kV (mR/h)	Desvio da leitura real (%)	Taxa de exposição medida Raios X 60 kV (mR/h)	Desvio da leitura real (%)
A1	11,0	$14,8 \times 10^3$	166,0	701
A2	14,0	$11,6 \times 10^3$	190,0	600
A3	17,0	$9,5 \times 10^3$	200,0	565
A4	25,0	$6,5 \times 10^3$	196,0	578
A5	20,0	$8,1 \times 10^3$	175,0	660
A6	46,0	$3,5 \times 10^3$	73,0	$1,7 \times 10^3$
A7	10,0	$16,3 \times 10^3$	36,0	$3,6 \times 10^3$
C1	$12,1 \times 10^2$	35,5	$11,3 \times 10^2$	17,7
C2	$12,4 \times 10^2$	32,3	$10,3 \times 10^2$	29,1
C3	$14,0 \times 10^2$	17,1	$12,7 \times 10^2$	4,7
C4	$15,5 \times 10^2$	5,8	$13,7 \times 10^2$	-2,9
C5	$18,0 \times 10^2$	-8,9	$16,0 \times 10^2$	-16,9
C6	$16,0 \times 10^2$	2,5	$14,0 \times 10^2$	-5,0

Os desvios percentuais máximos dos equipamentos para este ensaio foram: para os equipamentos A1 a A6 de 5,5 %, A7 de 3,0 %, C1, C4 e C6 de 2,0 %, C2 de 1,5 %, C3 de 1,8 % e C5 de 1,6 %. As medidas foram realizadas com as tampas das sondas fechadas, conforme procedimento de calibração com feixes de radiação gama.

O instrumento T1 não foi ensaiado, pois as escalas de medida que ele possui não permitem a leitura de taxas de exposição altas, como no ensaio de 1,64 R/h e 1,33 R/h relativas às qualidades ISO de 40 kV e de 60 kV (respectivamente). O detector cintilador tem como característica principal a sua sensibilidade alta, que é necessária em equipamentos utilizados para a medida de contaminação (de roupas, superfícies), onde tais condições operacionais são imprescindíveis.

Os detectores tipo Geiger-Müller apresentaram desvio nas medidas

efetuadas de até $16,3 \times 10^3$ %, enquanto as câmaras C1 a C3 mostraram valores de desvios máximos de 35,5, 32,3 e 17,1 % respectivamente, indicando que estas câmaras de ionização e estes detectores Geiger-Müller não estão adequados para esta faixa de energia, nas condições deste ensaio.

As câmaras C3, C4 e C6 apresentaram os menores valores de desvio de medida, com 4,7, 2,9 e 2,5 % respectivamente. São os detectores recomendados para esta faixa de energia.

Foram também realizados testes com radiação X com a tampa da sonda aberta dos seguintes equipamentos: A6 a A9; C5 a C9 e T1. Os equipamentos A6 a A9 (monitores do tipo Geiger-Müller) e T1 (tipo cintilador) indicaram leitura de fundo de escala (ou valor da leitura acima da leitura máxima que o equipamento pode medir).

Os equipamentos do tipo câmara de ionização (C5 a C9) indicaram aproximadamente a mesma leitura com e sem a sua capa removível (conforme esperado para radiações de energias baixas). As câmaras de ionização C1 a C4 e C7 a C9 possuem o elemento detector interno (câmara de ionização dentro do equipamento), tendo como capa a própria caixa plástica do equipamento, que não pode ser removida.

A Norma NBR 10011⁽⁴⁹⁾ recomenda que os instrumentos devem ser projetados de forma a impedir (blindar), tanto quanto possível, a influência de outras radiações ionizantes durante a medida de um campo de radiação gama. Desse modo, é conveniente quantificar a influência destas radiações ionizantes nos equipamentos a serem utilizados nas medidas de feixes de radiação gama, por meio de determinação de fatores de calibração. No caso das câmaras de ionização, como elas possuem um desempenho alto na leitura de radiação gama e X, são reprovadas neste tipo de ensaio, pois possuem baixa capacidade de blindar a radiação X, que poderia interferir na leitura das câmaras de ionização, quando realizando medidas de campos de radiação gama, na presença de radiação X.

Os resultados dos ensaios de resposta a outras radiações ionizantes mostram a importância de se utilizar o equipamento mais adequado para a intensidade e tipo de campo de radiação que se deseja medir. Verifica-se que a resposta à radiação beta e X difere muito de um tipo de detector para outro, onde se tem que as câmaras de ionização (que possuem janela com capa removível) são as mais adequadas para a medida destes tipos de campos de radiação.

Segundo o manual de instruções do equipamento A6, ele detecta este tipo de radiação (X); no tocante aos equipamentos C1 a C4 e C7 a C9, de acordo com o manual eles medem campos de radiação X, com energias maiores que 25 keV; os equipamentos C5 e C6 podem detectar fótons com energias entre 10 keV e 10 MeV; para os demais equipamentos nada é mencionado com relação a leitura de radiação X por eles. As câmaras de ionização são os equipamentos que obtiveram os melhores resultados no ensaio, demonstrando portanto serem os mais adequados para a medida de campos de radiação X (é preciso conhecer o intervalo de energias em que elas operam e a sua dependência energética, principalmente quando sob radiação de energias baixas). Os detectores do tipo Geiger-Müller e o cintilador utilizados no ensaio não são adequados para a detecção destes campos, conforme verificado por meio dos resultados obtidos. As câmaras de ionização atenderam ao mencionado no manual de instruções.

4.2 Estudo das características não radiológicas

4.2.1 Efeito de geotropismo

Para qualquer orientação do instrumento, quando exposto à radiação gama, a indicação não deve diferir da indicação obtida com o instrumento segundo a orientação de referência do fabricante. Durante este ensaio a geometria de irradiação deve permanecer constante⁽⁴⁹⁾. Neste tipo de teste

deseja-se verificar a influência do campo gravitacional terrestre sobre a leitura do equipamento, ou seja, dependendo da direção formada entre o eixo longitudinal do equipamento e o solo (plano terrestre), a leitura pode ser alterada. Como ensaio deve-se variar a direção do equipamento, anotando-se em seguida, para cada direção, o valor da taxa de exposição indicado.

Para garantir que a geometria de irradiação permaneça constante, uma fonte de ^{226}Ra de baixa atividade (32,9 MBq) foi fixada diretamente na sonda, alinhada com o centro geométrico do volume sensível do elemento detector. Desse modo a taxa de exposição emitida pela fonte de ^{226}Ra permanece constante, a menos do decaimento radioativo da fonte.

Após a fixação da fonte radioativa junto ao detector, o equipamento foi movimentado nas direções vertical (com o detector virado para cima e para baixo), na direção horizontal (paralelo ao plano do chão, ou posição em que os aparelhos são calibrados, como apoiados sobre uma mesa), direção horizontal porém tombado à direita (com a lateral direita do aparelho apoiado sobre a mesa e o indicador do mesmo formando um ângulo de 90° com o plano vertical), do mesmo modo com o equipamento virado para a esquerda na direção horizontal. Como último ensaio, os equipamentos foram virados com o indicador na posição como se estivessem com o indicador (leitor), ou a face superior do mesmo, apoiado sobre a superfície de uma mesa.

A **Figura 4.2** mostra como foram realizados os ensaios de efeito de geotropismo dos monitores portáteis de radiação, relativos a posição e direção dos equipamentos em relação ao plano horizontal ou paralelo ao plano do solo terrestre (direção adotada como 0°).

A **Tabela 4.8** fornece os dados obtidos dos testes dos efeitos de geotropismo dos monitores portáteis de radiação, utilizando-se a fonte de ^{226}Ra (selada, leve, de fácil fixação na sonda detectora).

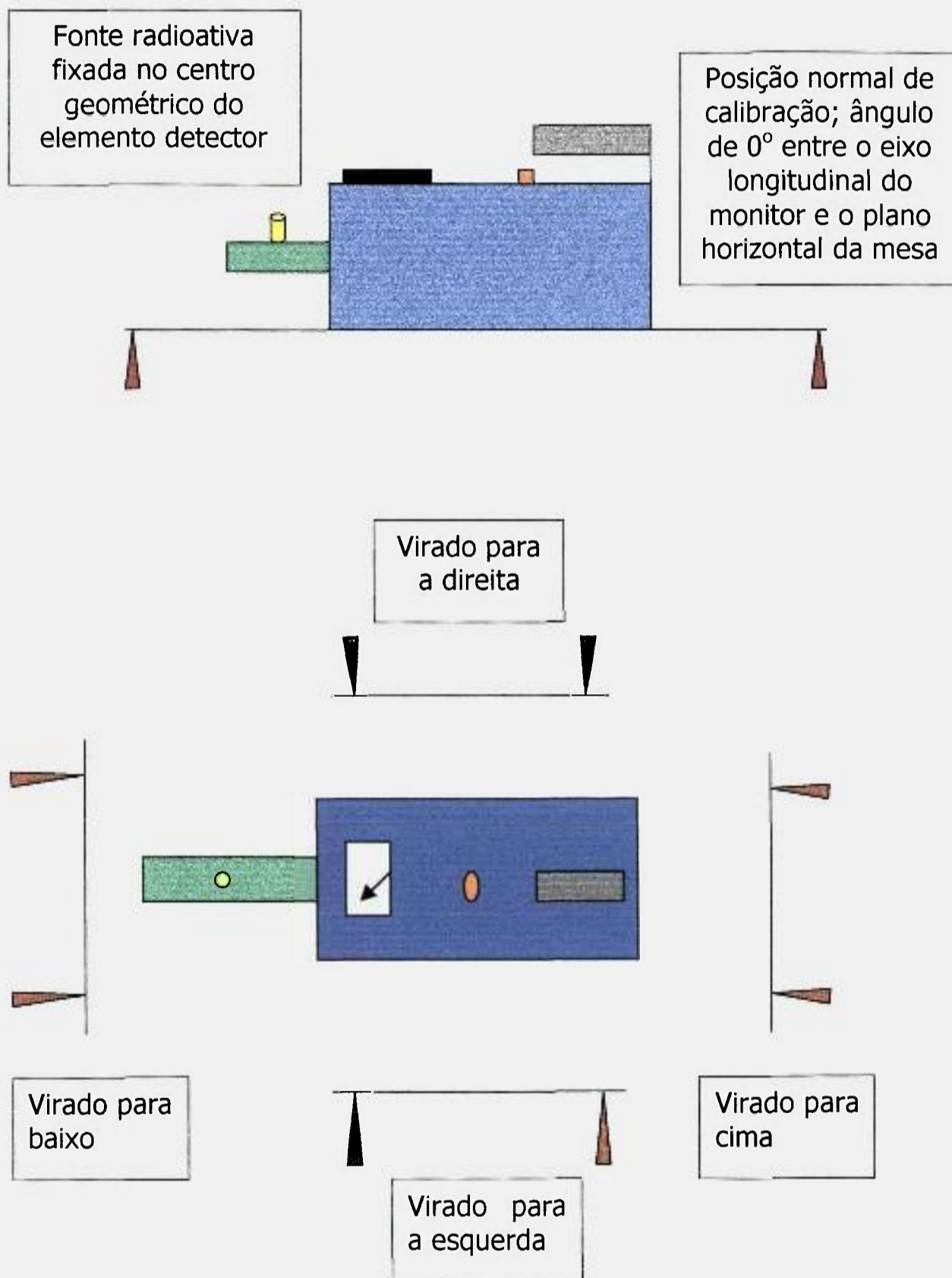


Figura 4.2: Posição dos equipamentos em relação ao plano do solo terrestre (direção adotada como de 0°), nos testes de geotropismo.

Tabela 4.8: Efeito de Geotropismo sobre os Monitores Portáteis de Radiação.
Medidas de Taxa de Exposição (mR/h).

Detector de radiação	Posição normal de calibração	Virado à direita (âng.90°)	Virado à esquerda (âng.90°)	Vertical para cima	Vertical para baixo	Virado para baixo	Varição máxima na leitura (%)
A1	1,690	1,710	1,670	1,680	1,660	1,640	3,0
A2	1,450	1,450	1,420	1,430	1,390	1,360	6,6
A3	1,590	1,620	1,510	1,530	1,460	1,460	8,9
A4	1,750	1,760	1,670	1,730	1,680	1,650	6,1
A5	1,900	1,890	1,870	1,860	1,830	1,780	6,7
A6	0,370	0,370	0,330	0,360	0,330	0,330	12,1
A7	0,200	0,180	0,200	0,220	0,190	0,210	11,1
C1	0,309	0,292	0,297	0,292	0,309	0,308	5,8
C2	0,282	0,273	0,279	0,286	0,302	0,288	6,6
C3	0,294	0,293	0,299	0,305	0,297	0,297	3,6
C4	0,278	0,270	0,276	0,279	0,279	0,277	3,0
C5	0,380	0,380	0,380	0,390	0,400	0,380	5,2
C6	0,430	0,420	0,430	0,410	0,420	0,400	7,5
T1*	178,5	206,5	171,5	185,5	182,0	168,0	13,6

*Leituras em 1×10^3 cpm, pois a escala de leitura do equipamento se apresenta nesta unidade.

Dos dados da **Tabela 4.8** nota-se que as medidas efetuadas pelas câmaras C1 a C6 diferem das outras medidas em ordem de grandeza. Isto se deve ao fato de que estas câmaras possuem seleção automática de escala de leitura, de modo que o operador não pode interferir na mudança da escala; o aparelho faz um auto-ajuste da escala. Os equipamentos A6 e A7 possuem valores de fundo de escala diferentes dos demais equipamentos, de modo que foi escolhida uma escala mais adequada para a realização do ensaio deles, diferindo as suas leituras dos demais aparelhos. Verifica-se que um detector do tipo Geiger-Müller possui variação de até 12,1 %, o cintilador variação de 13,6 %, e as câmaras de ionização variações de até 7,5 %.

De acordo com a norma NBR 10011-1987⁽⁴⁹⁾, para qualquer orientação do instrumento, quando exposto à radiação gama, a indicação não deve diferir mais que ± 10 % da indicação obtida com o instrumento segundo a orientação de referência do fabricante.

Verifica-se que, à exceção dos equipamentos A6, A7 e T1 (12,1, 11,1 e 13,6 %), todos os restantes se adequaram ao recomendado pela norma. Estes ensaios podem auxiliar na detecção de falhas operacionais ou potenciais apresentadas pelos equipamentos.

Os desvios padrões máximos percentuais para as leituras dos equipamentos foram: A1 de 4,2 %, A2 de 5,7 %, A3, A4 e C5 de 3,7 %, A5 de 2,7 %, A6 e A7 de 6,0 %, C1 de 7,3 %, C2 e C3 de 7,0 %, C4 de 6,8 %, C6 de 4,0 % e T1 de 0,5 %.

Nos manuais de operação e de instruções dos equipamentos, não consta nenhuma informação alusiva à resposta deles para este tipo de ensaio.

4.2.2 Variação da leitura com a tensão da bateria

Como os equipamentos em estudo são portáteis, deve-se ter cuidados especiais com as baterias que fornecem a energia elétrica necessária para o funcionamento autônomo deles. O tipo mais adequado de bateria (tamanho, tensão nominal, etc.) deve ser sempre indicado pelo fabricante do aparelho.

A verificação periódica da tensão das baterias é necessária para se conhecer sua situação atual, ou seja, para se verificar se ainda estão em bom estado.

Deve haver no equipamento uma marcação em escalas analógicas, que indique o estado das baterias para o qual o desempenho do equipamento não seja afetado. Para mostradores digitais, deve existir uma indicação do estado "não adequado" das baterias por meio de um dispositivo visual ou sonoro. As baterias devem ser substituíveis individualmente e a polaridade claramente assinalada no instrumento⁽⁴⁹⁾.

Para a realização deste ensaio, as baterias dos equipamentos foram substituídas por fontes de tensão contínua, que executam a mesma função das baterias com a vantagem de permitirem o ajuste do valor da tensão a ser fornecida ao monitor portátil de radiação. Após retiradas as baterias, a fonte de tensão contínua da marca HP foi conectada ao monitor de radiação por meio de dois cabos.

Desse modo, a tensão de alimentação dos equipamentos foi variada e foram efetuadas medidas da corrente de consumo e da tensão de alimentação deles, por meio do multímetro Wavetek.

Utilizou-se a fonte de radiação gama de ^{137}Cs , com 206 kBq de atividade, para se obter a medida devido à radiação, após efetuada a alteração da tensão de alimentação do equipamento para os valores de tensão nominal (fornecida pelo fabricante, ou que consta nos manuais do aparelho), e tensões máxima e mínima. Estas correspondem às deflexões máxima e mínima do ponteiro do equipamento na posição de verificação do estado de bateria do aparelho na escala apropriada.

Isto significa que a tensão de alimentação do aparelho será ajustada conforme a deflexão do ponteiro sobre a escala de teste de bateria, ou quando estiver na posição de tensão mínima (ou indicação de bateria ruim) e quando estiver na indicação de tensão máxima (ou indicação de bateria boa) e um pouco acima da tensão normal de operação.

A fonte de ^{137}Cs foi posicionada a 10 cm do aparelho, cuja indicação da presença de feixe de radiação pelo equipamento deve ser cerca de 2/3 do fundo de escala da menor faixa de leitura do aparelho, conforme recomendado pela norma NBR 10011-1987⁽⁴⁹⁾.

Os valores obtidos foram registrados para avaliação do desvio na leitura com a variação da tensão de alimentação do equipamento. Deseja-se saber o quanto são afetadas as medidas devido à radiação realizadas com o monitor de

radiação, quando a sua tensão de alimentação variar.

A **Tabela 4.9** apresenta os dados dos testes de variação da leitura dos monitores portáteis de radiação com a tensão da bateria.

Tabela 4.9: Variação da Leitura de Monitores Portáteis de Radiação com a Tensão da Bateria

Detector de radiação	Tensão de operação (nominal/máx/min) (V)	Corrente de operação (nominal/máx/min) (mA)	Variação da leitura da taxa de exposição com a tensão de alimentação (máx/min) (%)
A1	3,0 / 3,7 / 2,2	10,0 / 10,0 / 12,0	4,7 / 17,4
A2	3,0 / 3,9 / 2,2	11,0 / 15,0 / 10,0	8,0 / 12,3
A3	3,0 / 3,8 / 2,4	12,0 / 13,0 / 10,0	6,3 / 10,6
A4	3,0 / 3,9 / 2,3	10,0 / 12,0 / 11,0	5,9 / 4,8
A5	3,0 / 3,8 / 2,0	9,0 / 14,0 / 10,0	11,4 / 7,9
A6	6,0 / 7,7 / 5,4	21,0 / 30,0 / 20,0	11,5 / 2,9
A7	6,0 / 6,5 / 4,5	12,0 / 18,0 / 10,0	4,5 / 11,0
C1	9,0 / 10,0 / 5,3	20,0 / 20,0 / 20,0	3,7 / 2,2
C2	9,0 / 10,0 / 4,8	8,0 / 9,0 / 5,0	1,3 / 16,3
C3	9,0 / 10,0 / 5,2	20,0 / 20,0 / 20,0	0,3 / 1,2
C4	9,0 / 10,0 / 5,1	19,0 / 21,0 / 18,0	1,6 / 9,3
C5	6,0 / 6,6 / 5,4	30,0 / 31,0 / 27,0	5,8 / 10,6
C6	6,0 / 6,6 / 5,5	28,0 / 30,0 / 25,0	7,3 / 10,1
T1	3,0 / 3,7 / 2,4	51,0 / 53,0 / 46,0	6,0 / 13,0

Da **Tabela 4.9** constata-se que, de um modo geral, os maiores desvios nas leituras ocorrem quando a tensão de alimentação está próxima do seu valor mínimo. No caso dos detectores tipo Geiger-Müller, os desvios das medidas foram de até 11,5 % para a tensão de alimentação máxima e 17,4 % para tensão mínima. No caso das câmaras de ionização obteve-se 7,3 % para tensão de alimentação máxima e 16,3 % para mínima.

O cintilador mostrou que a leitura do instrumento sofre pequena variação com a alteração da tensão de alimentação, com cerca de 6,0 % de desvio na leitura para tensão máxima de alimentação do equipamento e 13,0 %, com tensão

mínima.

O desvio padrão máximo percentual das leituras de tensão e corrente elétricas efetuadas pelo multímetro foi de 1,0 %.

O desvio padrão máximo percentual referente às leituras efetuadas pelos monitores de radiação ensaiados foi: A1 a A6 de 8 %, A7 de 6 %, C1 a C4 de 4,5 %, C5 e C6 de 7 % e T1 de 5 %.

Segundo a norma NBR 10011⁽⁴⁹⁾, o desejável é que a indicação da radiação não difira em mais que ± 10 % do valor medido com a tensão nominal em condições extremas de variação, ou tensão de alimentação máxima ou mínima. Dos dados obtidos da **Tabela 4.9** verifica-se que somente os equipamentos A4, C1, C3 e C4 foram aprovados nos testes realizados.

Um problema a ser levantado é o tipo de bateria a ser escolhido para utilização no equipamento; se a bateria for do tipo alcalina encontrada comercialmente, ela possui cerca de 0,2 volts a mais que as pilhas ou baterias do tipo comum (tensão nominal de 1,5 volts). Isso causa um aumento na tensão de alimentação do equipamento, que no caso de aparelhos que operam com um conjunto de baterias tem-se a somatória das tensões das pilhas (num conjunto de 4 pilhas tem-se um total de 0,8 volts a mais alimentando o aparelho, ou cerca de 15 % a mais de tensão num aparelho que opera com 6 volts). Verifica-se dos resultados do ensaio que alguns equipamentos chegam a variar até cerca de 17,4 % quando a tensão das baterias são alteradas.

Os maiores erros de leitura ocorrem quando as tensões das baterias estão abaixo do seu valor nominal (1,5 volts); isto pode ocorrer no caso de baterias parcialmente descarregadas (com pouca carga e tensão inferior à tensão nominal). Este ensaio é muito importante, pois não há atualmente, entre os fabricantes, uma padronização das tensões nominais entre pilhas alcalinas em relação às pilhas comuns.

O comportamento dos monitores portáteis de radiação testados quanto à variação de leitura com a tensão das baterias mostram que as suas condições de funcionamento podem ser afetadas com a variação da tensão das baterias.

O manual de instruções dos equipamentos A1 a A5 menciona que a variação na leitura é menor que 3 % entre os limites do teste de bateria, e menor que 15 % de variação na leitura até o final das baterias; para o equipamento A6 é mencionado que a variação na sua leitura é menor que 15 % (para toda indicação de faixa verde no teste de bateria do equipamento); o manual dos equipamentos C1 a C4 apenas advertem para o uso de baterias novas ao se calibrar os equipamentos. Para os demais equipamentos nada é citado em seus manuais, com relação à variação de leitura com a tensão da bateria.

Comparando-se os resultados obtidos neste trabalho com as recomendações do fabricante, pode-se verificar que os equipamentos A1 a A3, A5 não atendem nem ao recomendado pela norma, nem ao recomendado pelo manual de instruções. O equipamento A4 atende somente ao recomendado pela norma enquanto o equipamento A6 atende somente ao recomendado pelo manual de instruções. Os equipamentos C1, C3 e C4 atendem ao recomendado pela norma. Os demais equipamentos não atendem ao recomendado pela norma⁽⁴⁹⁾.

4.2.3 Deriva de zero elétrico

A posição da indicação zero do equipamento, que deve ser ajustado após 30 minutos de funcionamento em condições padrões de ensaio, não deve diferir em mais do que ± 2 % do limite superior de qualquer faixa nominal após 4 h de funcionamento. Todos os equipamentos foram submetidos ao ensaio de deriva de zero elétrico.

O ensaio consistiu em se ligar os equipamentos e por 30 minutos

permaneceram medindo a radiação de fundo. Após a fase de estabilização dos aparelhos, procedeu-se ao ajuste do ponto de indicação de zero deles, lembrando que alguns dos monitores não permitiam o ajuste (é o caso dos equipamentos que o realizavam de modo automático: monitores com leitor digital). Depois do ajuste inicial, os equipamentos permaneceram ligados por mais 4 h medindo a radiação de fundo. Terminado este tempo, procedeu-se a uma nova verificação e os valores obtidos foram anotados.

Todos os equipamentos foram considerados aprovados, uma vez que não apresentaram alterações significativas. Apenas os equipamentos A1 (do tipo Geiger-Müller) e C5 (do tipo câmara de ionização não selada) apresentaram cerca de 0,1 % de variação no ajuste de zero, o que de fato também não interfere nas leituras efetuadas pelos equipamentos citados. Estes ensaios podem auxiliar na detecção de falhas operacionais ou potenciais apresentadas pelos equipamentos. Desse modo, constata-se que os equipamentos testados estão dentro das recomendações da norma NBR 10011⁽⁴⁹⁾.

Os equipamentos C1 a C4 possuem ajuste automático de zero elétrico; segundo o manual de instruções, após vários minutos de operação, o ponto de zero elétrico pode variar até cerca de 0,04 mR/h; os equipamentos C5 e C6, não excedendo 24 h de uso contínuo, podem sofrer um desvio residual na escala de 1 mR/h devido à presença de cargas estáticas nas partes de isolamento alta; para os demais equipamentos não há informações em seus manuais relativas ao comportamento de deriva de zero elétrico.

5 CONCLUSÕES

A implantação de uma metodologia de testes de desempenho de monitores portáteis de radiação consiste no desenvolvimento, implementação e aplicação de testes e ensaios, que permitem aferir o comportamento dos instrumentos. Permitem a verificação de falhas potenciais nos equipamentos, e ainda a formação de uma base de dados com informações que podem permitir uma comparação de resultados de desempenho durante a vida útil do aparelho. Foram selecionados e utilizados equipamentos monitores de radiação de fabricação nacional e importados, comumente utilizados no Brasil, por clínicas, indústrias e hospitais, empregados em procedimentos rotineiros de radioproteção. Dos resultados obtidos dos ensaios, pode-se verificar que nenhum dos equipamentos testados obteve aprovação em todos os ensaios realizados (dentro das condições específicas dos ensaios).

Nos testes de dependência energética foram aprovadas todas as câmaras de ionização ensaiadas; no entanto, três detectores do tipo Geiger-Müller não atenderam ao recomendado pela norma NBR 10011 ($\pm 25\%$ de dependência energética), enquanto o cintilador obteve o pior resultado, ou seja, 117% de dependência energética. Segundo o fabricante do cintilador uma variação de até 90% seria esperada, porém uma variação de 117% permite concluir que o equipamento pode estar apresentando algum problema na sonda detectora ou no seu módulo eletrônico. Esta mudança no comportamento do equipamento foi constatada devido ao ensaio de dependência energética ser aplicado ao mesmo. Os ensaios de dependência angular mostraram que para fontes emissoras de radiação gama de energias baixas (cerca de 60 keV), os detectores do tipo Geiger-Müller ensaiados não são adequados (variação na leitura de até 1260%); isso se

deve ao tipo do elemento detector (características construtivas) e principalmente ao tipo de material utilizado na confecção da sonda detectora (ferro e alumínio de diferentes espessuras), que funciona como uma blindagem para fontes de radiação de energias baixas, afetando sensivelmente as leituras efetuadas pelo equipamento. As câmaras de ionização e o cintilador obtiveram bons resultados neste ensaio.

Os ensaios de estouro de escala, ou saturação, são necessários para a verificação das condições de segurança dos equipamentos, pois permitem avaliar se o equipamento responde a altas taxas de exposição de forma instantânea, permitindo que o equipamento indique uma situação de anormalidade, como situação de exposição acidental do usuário a taxas de exposição excessivas, ou acima dos limites de leitura do equipamento, alertando o usuário para uma situação de risco pessoal e patrimonial. É imprescindível a realização periódica deste ensaio. Os resultados dos ensaios de resposta a outras radiações ionizantes mostram a importância de se utilizar o equipamento mais adequado para a intensidade e tipo de campo de radiação que se deseja medir. Verifica-se que a resposta à radiação beta e X difere muito de um tipo de detector para outro, onde se tem que as câmaras de ionização (que possuem janela com capa removível) são as mais adequadas para a medida destes tipos de campos de radiação. O comportamento dos monitores portáteis de radiação verificados nos ensaios de variação de leitura com a tensão das baterias mostram que as condições de funcionamento deles podem ser afetadas com a variação da tensão das baterias. Os ensaios como deriva de zero elétrico, efeito de geotropismo e erro intrínseco dos instrumentos podem auxiliar na detecção de falhas operacionais ou potenciais apresentadas pelos equipamentos.

Desse modo os testes de desempenho são de suma importância, pois funcionam como um *check-up* periódico do funcionamento perfeito dos monitores portáteis de radiação, evidenciando possíveis falhas operacionais e principalmente informando o usuário sobre seu funcionamento e limitações de uso. Os equipamentos podem sofrer alterações significativas no seu funcionamento,

devido ao envelhecimento de circuitos (*drift*), com variação do ponto de operação dos circuitos eletro-eletrônicos, além de deterioração dos contatos de chaves, soquetes, partes mecânicas, devido principalmente à oxidação, ao mau-contato, à corrosão, etc. Por se tratarem de equipamentos portáteis, estão ainda sujeitos a envelhecimento precoce devido a choques mecânicos, condições ambientais (temperatura, umidade, pressão, etc.). A relevância dos testes de desempenho é salientada uma vez que a legislação atual do País não prevê a realização deles por parte dos fabricantes de equipamentos monitores de radiação, assim como pelos usuários e/ou laboratórios de calibração de equipamentos.

Dos ensaios realizados verifica-se que as câmaras de ionização obtiveram 75 % de aprovação, enquanto que os detectores do tipo Geiger-Müller obtiveram 63 % e o cintilador obteve 50 %. As diferenças nos índices de aprovação nos ensaios são devidos principalmente aos tipos diferentes de elementos detectores, às configurações diferentes dos equipamentos testados e às condições operacionais (envelhecimento, oxidação de componentes, alteração dos circuitos, substituição de sondas, etc.). Denota-se assim a importância da realização periódica destes testes, para a verificação das condições operacionais dos monitores portáteis de radiação.

Cabe salientar que existem instituições como o NRPB (National Radiological Protection Board) da Inglaterra, que realizam os testes de desempenho em monitores portáteis de radiação (inclusive para diferentes marcas e modelos), sendo os resultados encontrados na forma de publicações, diversos equipamentos foram ensaiados.

A metodologia de testes de desempenho abordada neste trabalho será implantada no Laboratório de Calibração de Instrumentos do IPEN (LCI). Serão aplicados alguns ou todos os ensaios realizados, conforme estudos e condições a serem determinadas na ocasião de implantação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. KOWALSKI, E. ***Nuclear electronics***. New York : Springer-Verlag, Berlin, 1970.
2. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Calibration of dose meters used in radiotherapy***. IAEA, Vienna, 1979 (Technical reports series no.185).
3. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Calibration of dosimeters used in radiotherapy***. IAEA, Vienna, 1994 (Technical reports series no.374).
4. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Handbook on calibration of radiation protection monitoring instruments***. IAEA, Vienna, 1971 (Technical reports series no.133).
5. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. ***Direct reading, personal dose equivalent and/or dose equivalent rate monitors for X, gamma and high energy beta radiation***. Geneva, 1989 (Review of Draft).
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Calibration of radiation protection monitoring instruments***, IAEA, Vienna, 1996.(Review of Technical reports series no.133, Draft).
7. EKERL, H.; NAHRSTEDT, U. The GSF secondary standard dosimetry laboratory for photon and beta radiation, ***GSF Report 785***, Strahlen-und Umweltforschung mbH, München, 1981.

8. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ***X and gamma reference radiations for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy. Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as function of energy and angle of incidence.*** ISO, Geneva, Aug. 1997.(ISO/DIS 4037-3).
9. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Absorbed dose determination in photon and electron beams,*** IAEA, Vienna, 1997. (Technical reports series no.277).
10. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ***X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose ratemeters and for determining their response as a function of photon energy.*** ISO, Geneva, 1979. [ISO 4037-(E)].
11. SEELENTAG, W. W.; PANZER,W.; DREXLER, G.; PLATZ, L.; SANTNER, F. A catalogue of spectra for the calibration of dosimeters, ***GSF- Bericht 560,*** Strahlen-und Umweltforschung mbH, München, 1979.
12. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ***X and gamma reference for calibrating dosimeters and dose ratemeters and for determining their response as a function of photon energy. Part 1: Characteristics of the radiation and their methods of production .*** ISO, Geneva, Jan. 1994 (ISO/DIS 4037-1).
13. COSTA, A.M. ***Métodos de calibração e de intercomparação de calibradores de dose utilizados em serviços de medicina nuclear.*** São Paulo: 1999. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

14. MILLMAN, J.; HALKIAS, C.C. ***Eletrônica: dispositivos e circuitos***. São Paulo McGraw Hill, 1981.
15. AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. ***Radiation protection instrumentation test and calibration portable survey instruments***. ANSI, New York, Dec.1997 (ANSI N323A:1997).
16. AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. ***Radiation protection instrumentation test and calibration***. ANSI, New York, Sep. 1977 (ANSI N323: 1978).
17. SWINTH, K.L.; KENOYER, J.L.Evaluation of health physics instrument performance. ***IEEE Trans. Nucl. Scien.***, v. 32, p. 923-924, 1985.
18. SWINTH, K.L.; MERWIN, S.E.; KATHREN, R.L.; KENOYER, J.L. The accuracy of survey meter readings. In: ANNUAL MEETING OF THE HEALTH PHYSICS SOCIETY, Jun. 29-Jul. 3, 1986, Pittsburgh, PA. ***Proceedings...***, v.3, p.217, Pittsburgh, 1986.
19. SWINTH, K.L.; ROBERSON, P.L.; MACLELLAN, J.A. Improving health physics measurement by performance testing. ***Health Phys.***, v.55, p.197-198, 1988.
20. AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. ***Performance specifications for health physics instrumentation-portable instrumentation for use in normal enviromental conditions***. 1994 (ANSI N42.17A).
21. AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. ***Performance specifications for health physics instrumentation-portable instrumentation for use in extreme enviromental conditions***. ANSI, New York, 1994 (ANSI N42.17C).

22. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. ***Portable X and gamma radiation exposure rate meters and monitors for use in radiological protection.*** Geneva, 1972 (IEC395).
23. HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. ***The examination and testing of portable radiation instruments for external radiations,*** London, 1990. (Technical report series no. 49).
24. TAUHATA, L.; SALATI, I.P.A.; PRINZIO, R.D.; PRINZIO, A.R.D. Fundamentos de radioproteção e dosimetria. Brasil. In: REGIONAL TRAINING COURSE FOR CALIBRATION AND MAINTENANCE OF ELECTROMETERS AND CHAMBERS EXISTING IN LATIN AMERICA REGION, Março 8-12, 1999, Rio de Janeiro, ***Proceedings...***Rio de Janeiro: IRD-CNEN, 1999.
25. KNOLL, G.F. ***Radiation detection and measurements.*** 2nd ed. New York : John Willey & Sons, 1989.
26. BURGESS, P. H. Determination of the suitability of energy compensated Geiger-Müller tubes for measurement of X radiation transmitted through shielding. ***Radiat. Prot. Dosim.,*** v. 16, n. 3, p. 243-246, 1986.
27. 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.
28. BECKER, P. H. B. O uso de monitores portáteis de radiação. Brasil. In: REGIONAL TRAINING COURSE FOR CALIBRATION AND MAINTENANCE OF ELECTROMETERS AND CHAMBERS EXISTING IN LATIN AMERICA REGION, March 8-12, 1999, Rio de Janeiro, ***Proceedings...***Rio de Janeiro: IRD-CNEN, 1999.

29. NICHOLSON, P. W. ***Nuclear electronics***. London : John Wiley & Sons, 1st ed., 1974.
30. ALBUQUERQUE, M. P. P; CALDAS L. V. E. ***Projeto, construção e calibração de câmaras de ionização de placas paralelas para radiação X***. São Paulo: 1999. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/Univ. de São Paulo.
31. CAMPOS, C. A. A. L. ***Construção, calibração e testes de uma câmara de ionização para medidas de exposição na região de 40 a 1250 keV***. Rio de Janeiro : 1982. Dissertação (Mestrado) – Univ. Estadual do Rio de Janeiro.
32. DIAS, S. K. ***Desenvolvimento de uma câmara de extrapolação como instrumento de referência para dosimetria de radiação beta***. São Paulo, 1996. Tese (Doutoramento) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/Univ. de São Paulo.
33. LOVINGER, R. & CHAPPELL, S. E. ***The SSDL calibration certificate for a field instrument***. In: IAEA Training seminar on calibration procedure in SSDLs, Vienna, June, 1983.
34. HORTON, J. L. ***Quality assurance program***. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc., 1987. (Handbook of radiation therapy physics).
35. 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).
36. SILVA, T. A. ***Comparação experimental entre fatores de calibração totais e parciais***. Rio de Janeiro: 1981. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro

37. CALDAS, L. V. E.; ALBUQUERQUE, M. P. P.; XAVIER, M. Calibration techniques for components of clinical dosimeters. *Appl. Radiat. Isot.*, v. 45 (1), p.31-33, 1994.
38. CAMPOS, L. L.; CALDAS, L. V. E. Induced effects in ionization chambers cables for photon and electron irradiation. *Med. Phys.*, v. 18, p.522-526, 1991.
39. CAMPOS, L. L.; CALDAS, L. V. E. Absorbed dose dependence of correction factors for ionization chamber cable irradiation effects. *Phys. Med. Biol.*, v. 36, p. 339-344, 1991.
40. ATTIX, F. H. *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. New York : John Wiley & Sons, 1986.
41. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Calibration of radiation protection monitoring instruments*. IAEA, Vienna, 2000 (Safety reports series no. 16).
42. ZUERNER, L.V., and KATHERN, R.L. *Evaluation program for portable radiation monitoring instruments*. New York : C.A. Willys and J.S. Handloser Eds. V. 2, p.325-350, 1972.
43. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Controle da qualidade de dosímetros clínicos*. Rio de Janeiro, 1985. (ABNT-20:02.007-001).
44. BOAG, J. W. Ionization Chambers. In: KASE, K. R.; BJÄRNGARD, B. E.; ATTIX, F. H. *The dosimetry of ionizing radiation*, New York, NY: Academic, v.2, p.169-243, 1987.
45. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *Medical electrical equipment, dosimeters with ionization chamber as used in radiotherapy*. Geneva, 1996. (IEC-731).

46. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. ***Determination of dose equivalents resulting from external radiation sources.*** Bethesda, 1991 (ICRU-39).
47. KUHAR, M. ***Comunicação Pessoal*** ; Engenheiro do Departamento de Suporte Técnico da Inovision Radiation Measurements Inc., Ohio, USA, Outubro. 2000.
48. OLIVEIRA, E.C. ***Estabelecimento de campos padrões de raios X de energias baixas (nível radioproteção) para calibração de instrumentos.*** São Paulo: 1995. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Universidade de São Paulo.
49. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Medidores e monitores portáteis de taxa de exposição de raios X e gama, para uso em radioproteção.*** Rio de Janeiro, Set. 1987 (ABNT NBR 10011).
50. HALL, B. ***Comunicação Pessoal*** ; Engenheira do Departamento de Suporte Técnico da Ludlum Measurements Inc., Texas, USA, Maio. 2000.
51. NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. ***Calibration of survey instruments used in radiation protection for the assessment of ionizing radiation fields and radioactive surface contamination.*** Bethesda, 1991 (NCRP112).
52. INTERNATIONAL COMMISSION OF RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. ***Dosimetry of external beta radiation for radiological protection.*** Bethesda, march. 1994 (RC on Beta Dosimetry-Draft).

ANEXO 1

**IPEN-CNEN/SP Laboratório de Calibração de Instrumentos-LCI
São Paulo**

Ensaio: Dependência Energética

Identificação do equipamento:

Data: / /

Marca	Modelo	Número de série	Número do patrimônio	Sonda	Número da reserva

Nome do proprietário do equipamento: _____

Endereço do proprietário: _____

Radiação de fundo:

L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	Média	Uni.

Condições Ambientais	Valor medido	Unidade
Temperatura		
Umidade		
Pressão		

Identificação do Laboratório: _____

Fonte	Escala	Distância

Fonte	Taxa	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	Méd.	Uni.

Fonte = fonte radioativa.

Escala = escala do aparelho.

Distância = distância fonte-detector (cm).

Taxa = taxa de exposição utilizada.

L = leitura do equipamento

Méd. = valor médio das leituras efetuadas.

Uni. = unidade utilizada no ensaio.

REALIZADO POR: _____

ANEXO 2

**IPEN-CNEN/SP Laboratório de Calibração de Instrumentos - LCI
São Paulo**

Ensaio: Dependência Angular

Identificação do equipamento:

Data: / /

Marca	Modelo	Número de série	Número do patrimônio	Sonda	Número da reserva

Nome do proprietário do equipamento: _____

Endereço do proprietário: _____

Radiação de fundo:

L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	Média	Uni.

Condições Ambientais	Valor medido	Unidade
Temperatura		
Umidade		
Pressão		

Identificação do Laboratório: _____

Âng.	Fonte	Esc.	Dist.	Taxa	Méd.	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	Uni.
0h																
45d																
45e																
90																

0h = posição normal de calibração (ângulo de 0°, paralelo ao banco de calibração).

45d = virado à direita (ângulo de 45°, em relação à direção de calibração).

45e = virado à esquerda (ângulo de 45°, em relação à direção de calibração).

90 = virado perpendicularmente (ângulo de 90°, em relação à direção de calibração).

Âng. = ângulo em que o equipamento é posicionado.

Fonte = fonte radioativa.

Esc. = escala do aparelho.

Dist. = distância fonte detector (cm).

Taxa = taxa de exposição utilizada.

L = leitura do equipamento

Méd. = valor médio das leituras efetuadas.

Uni. = unidade utilizada no ensaio.

REALIZADO POR _____

ANEXO 3

IPEN-CNEN/SP Laboratório de Calibração de Instrumentos-LCI São Paulo

Ensaio: Resposta à Radiação Beta

Identificação do equipamento: _____

Data: / /

Marca	Modelo	Número de série	Número do patrimônio	Sonda	Número da reserva

Nome do proprietário do equipamento: _____

Endereço do proprietário: _____

Radiação de fundo:

L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	Média	Uni.

Condições Ambientais	Valor medido	Unidade
Temperatura		
Umidade		
Pressão		

Identificação do Laboratório: _____

Fonte	Escala	Distância

Fonte	Taxa	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	Méd.	Uni.

Fonte = fonte radioativa.

Escala = escala do aparelho.

Distância = distância fonte detector (cm).

Taxa = taxa de exposição utilizada.

L = leitura do equipamento

Méd. = valor médio das leituras efetuadas.

Uni. = unidade utilizada no ensaio.

REALIZADO POR: _____

ANEXO 4

IPEN-CNEN/SP Laboratório de Calibração de Instrumentos-LCI São Paulo

Ensaio: Resposta à Radiação X

Identificação do equipamento:

Data: / /

Marca	Modelo	Número de série	Número do patrimônio	Sonda	Número da reserva

Nome do proprietário do equipamento: _____

Endereço do proprietário: _____

Radiação de fundo:

L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	Média	Uni.

Condições Ambientais	Valor medido	Unidade
Temperatura		
Umidade		
Pressão		

Identificação do Laboratório: _____

Energia	Escala	Distância

Taxa	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	Méd.	Uni.

Energia = energia da radiação (keV).

Escala = escala do aparelho.

Distância = distância fonte detector (cm).

Taxa = taxa de exposição utilizada.

L = leitura do equipamento

Méd. = valor médio das leituras efetuadas.

Uni. = unidade utilizada no ensaio.

REALIZADO POR: _____

ANEXO 5

IPEN-CNEN/SP Laboratório de Calibração de Instrumentos - LCI

São Paulo

Ensaio: Variação da Leitura com a Tensão da Bateria

Identificação do equipamento:

Data: / /

Marca	Modelo	Número de série	Número do patrimônio	Sonda	Número da reserva

Nome do proprietário do equipamento: _____

Endereço do proprietário: _____

Radiação de fundo:

L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	Média	Uni.

Condições Ambientais	Valor medido	Unidade
Temperatura		
Umidade		
Pressão		

Identificação do Laboratório: _____

Condições Técnicas:

Condição	Carga	Fonte	Escala	Distância	Taxa
A	Máxima				
B	Mínima				
C	Normal				

	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	Média	V/I
A												
B												
C												

Máxima = indicação de tensão de bateria máxima (volts).

Mínima = indicação de tensão de bateria mínima (volts).

Normal = tensão de bateria normal, indicada pelo fabricante do equipamento.

Fonte = fonte radioativa.

Escala = escala do aparelho.

Distância = distância fonte detector (cm).

V/I = tensão de alimentação aplicada ao equipamento (V) em volts, e respectivo consumo de corrente elétrica (I) em amperes.

Taxa = taxa de exposição utilizada.

Uni. = unidade utilizada

L = leitura do equipamento

Média = valor médio das leituras efetuadas

REALIZADO POR: _____

ANEXO 6

IPEN-CNEN/SP Laboratório de Calibração de Instrumentos - LCI
São Paulo

Ensaio: Deriva de Zero Elétrico

Identificação do equipamento:

Data: / /

Marca	Modelo	Número de série	Número do patrimônio	Sonda	Número da reserva

Nome do proprietário do equipamento: _____

Endereço do proprietário: _____

Radiação de fundo:

L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	Média	Uni.

Condições Ambientais	Valor medido	Unidade
Temperatura		
Umidade		
Pressão		

Identificação do Laboratório: _____

Ajus.	Fon.	Esc.	Dist.	Taxa	Méd.	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	Uni.
t0	Bg															
t4,5	Bg															

Ajus. = ajuste do zero elétrico do aparelho (quando permitir).

Bg. = radiação de fundo.

t0 = ajuste inicial do zero elétrico, após aquecimento de 30min, medindo radiação de Bg.

t4,5 = verificação final do ajuste realizado, após 4h30, medindo radiação de Bg.

Fon. = fonte radioativa.

Esc. = escala do aparelho.

Dist. = distância fonte detector (cm).

Taxa = taxa de exposição utilizada.

L = leitura do equipamento

Méd. = valor médio das leituras efetuadas.

Uni. = unidade utilizada no ensaio.

REALIZADO POR: _____

ANEXO 7

IPEN-CNEN/SP Laboratório de Calibração de Instrumentos - LCI
São Paulo

Ensaio: Efeito de Geotropismo

Identificação do equipamento:

Data: / /

Marca	Modelo	Número de série	Número do patrimônio	Sonda	Número da reserva

Nome do proprietário do equipamento:

Endereço do proprietário:

Radiação de fundo:

L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	Média	Uni.

Condições Ambientais	Valor medido	Unidade
Temperatura		
Umidade		
Pressão		

Identificação do Laboratório: _____

Pos.	Fonte	Esc.	Dist.	Taxa	Méd.	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	Uni.
Nor.																
Dir.																
Esq.																
Cim.																
Bax.																
Pon.																

Nor.= posição normal de calibração (ângulo de 0°, com plano terrestre).

Dir.= posição tombado à direita (rotação de 90°).

Esq.= posição tombado à esquerda (rotação de 90°, sentido oposto ao anterior).

Cim.= posição de 90°, em relação ao plano de calibração (sonda virada para cima).

Bax.= posição de 90°, em relação ao plano de calibração (sonda virada para baixo).

Pon.= posição normal de calibração (ângulo de 0°, com plano terrestre, com mostrador virado para baixo).

REALIZADO POR: _____