Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Nos últimos 50 anos (ZAMBONI, 2007), com o desenvolvimento da tecnologia nuclear aplicada na área da pesquisa, da medicina e indústria, cresceu significativamente o número de trabalhadores potencialmente expostos à campos de radiação. Em virtude disso, cresce a necessidade do emprego de monitores de ambientes adequados aos tipos de radiações e faixas de energias a que estão submetidos, tendo por consequência o aumento da demanda por calibração e pelo controle metrológico desses instrumentos.

A monitoração de nêutrons é uma realidade nas três áreas de maior desenvolvimento já citadas, seja como radiação principal ou subproduto. Essas áreas desenvolvem atividades onde há a presença de fontes de radiação de nêutrons como, por exemplo, na geração de energia nuclear, na aplicação de feixes de elétrons de altas energias de aceleradores lineares, no controle de qualidade e análise de materiais (neutrongrafia), na prospecção de petróleo, com medidores industriais (BESSA,2007). Os nêutrons são produzidos por meio da fissão ou fusão de núcleos atômicos ou de reações nucleares.

Nas práticas industriais de perfilagem de petróleo, as exposições ocupacionais merecem mais atenção devido a intensidade e a quantidade das fontes radioativas utilizadas. As empresas que atuam em perfilagem de petróleo utilizam fontes de nêutrons compostas de ^{241}Am-Be, com atividades entre 550 a 740 GBq, para realizar o ensaio de perfilagem nuclear, concentrando nos últimos vinte anos, 60% de todas as fontes de nêutrons no Brasil (MARTINS *et al.,* 2008).

Dispor de um sistema de monitoração de nêutrons que garanta a confiabilidade e rastreabilidade da medição é requisito importante para todas as intalações ou práticas que envolvam o uso de radiações ionizantes. Sendo assim, consta nos ítem 5.6.3 e 5.6.4 da norma CNEN NN 3.01 Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica, respectivamente, que

> " Para fins de monitoração e verificação do cumprimento dos requisitos de proteção radiológica, o titular deve dispor de procedimentos e instrumentação suficientes e adequados. A instrumentação deve ser corretamente mantida e, quando aplicável, testada e calibrada em intervalos apropriados, usando-se como referência padrões rastreáveis aos padrões nacionais ou internacionais."

> " O titular deve manter registros dos resultados das monitorações e da verificação do cumprimento dos requisitos pertinentes, incluindo os registros de testes e calibrações".

A norma técnica ISO/IEC 17025:2005 (ABNT, 2005) adotada no país para a obtenção do reconhecimento da competência de laboratórios de calibração e de ensaios, recomenda em seu ítem 5.6.1 que todo equipamento utilizado em ensaios, deve ser calibrado antes de entrar em serviço, para que tenha efeito significativo sobre a validade do ensaio.

O Laboratório de Nêutrons (LN) é o responsável pela calibração dos equipamentos e padronização primária das fontes de nêutrons no Brasil. Atualmente, ele integra o Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI), vinculado ao Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD) da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). A partir da padronização das fontes é possível empregá-las na calibração dos equipamentos e observar o comportamento dos mesmos diante de diversos espectros. O processo de calibração dos monitores de áreas para nêutrons é feito a partir de fontes de nêutrons isotópicas cujos espectros estão referenciados na norma ISO-8529-1 ou a partir de

fontes isotópicas padronizadas em um laboratório primário de nêutrons (FONSECA *et al.*, 2005).

Os monitores de área para nêutrons são empregados para determinação da taxa de equivalente de dose ambiente em áreas com indivíduos ocupacionalmente expostos a campos de nêutrons.

1.2 Motivação

A motivação do tema escolhido está associada à necessidade que o usuário de monitores de área para nêutrons, têm de reconhecer a importância de um equipamento bem calibrado e que mantenha suas características para garantir confiabilidade nos resultados gerados, sabendo avaliar o intervalo de tempo "adequado" para a calibração e desta forma reduzir riscos e custos desnecessários.

1.3 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo identificar o perfil dos clientes do laboratório de calibração de monitores de área para nêutrons do LN para orientá-los quanto a existência de métodos para controle do período de calibração. Este estudo será baseado no histórico de calibrações dos monitores que deram entrada no ano de 2006 até outubro de 2011.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho está organizado em 5 capítulos, onde no capítulo seguinte serão abordados os fundamentos teóricos necessários para o entendimento da interação dos nêutrons com a matéria e os tipos de monitores de área para nêutrons mais utilizados. Ainda no capítulo 2, são citados os métodos existentes para determinar o período de

calibração de um monitor de área para nêutrons. No capítulo 3, a metodologia é descrita para cada etapa de aquisição de dados. No capítulo 4, os resultados são apresentados e discutidos. Finalmente, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões sobre o estudo do historico de calibrações dos monitores.

Capítulo 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Fontes de nêutrons

A contribuição da exposição natural a nêutrons na atmosfera da Terra varia com a atividade solar, a latitude e altitude, alcançando valores máximos entre 6000 e 11000 metros, faixa de operação dos aviões comerciais (UNSCEAR, 2000). Devido ao fato de não ser localizado, mas difundido no planeta seu fluxo ao nível do mar é considerado desprezível.

As fontes de nêutrons mais utilizadas são:

Reatores nucleares – Os nêutrons são produzidos pelo processo de reação em cadeia da fissão do ^{235}U. Os nêutrons rápidos produzidos por fissão sofrem colisões com átomos leves (moderadores), perdendo energia até se tornarem térmicos. Após termalizados, os nêutrons produzem novas fissões. No reprocessamento do combustível nuclear, o decaimento dos radioisótopos presentes no material induz reações nucleares com outros elementos, produzindo nêutrons.

Aceleradores de partículas – Os aceleradores podem produzir nêutrons através de reações indiretas. Um exemplo mais simples deste caso acontece quando um elétron é acelerado em direção a um alvo primário dando origem, por *bremsstrahlung*, a fótons que incidem sobre um alvo secundário aonde produzem nêutrons via reação (γ,n). Uma outra forma de produzir nêutrons é a partir de uma partícula acelerada que colide com um núcleo leve de deutério, trítio, berílio ou lítio dando origem a um núcleo composto que libera um nêutron. O feixe de nêutrons produzido é monoenergético e as duas reações mais usadas são :$^{2}H(d,n)^{3}He$ e $^{3}H(d,n)^{4}He$ (ZAMBONI, 2007).

Os nêutrons produzidos em aceleradores são utilizados em experimentos de física nuclear e produção de radionuclídeos.

Fontes radioisotópicas - Podem ser produzidas por reações nucleares do tipo (α, n) ou (γ, n) ou ainda por fissão espontânea. Essas fontes são provenientes de radioisótopos e por serem de meia-vida longa possuem um fluxo de nêutrons constante, o que é uma vantagem quando utilizadas para calibração. Um exemplo de fontes de referência são as fontes isotópicas de amerício-berílio, amerício-boro e califórnio-252 que possuem seus espectros listados na norma ISO 8529, Figura 1,2 e 3 .

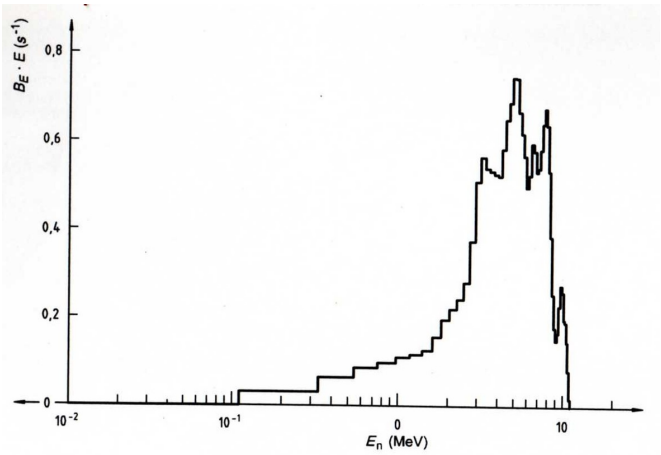

Figura 1. Espectro da fonte de ^{241}Am-Be (ISO 8529-1, 2001)

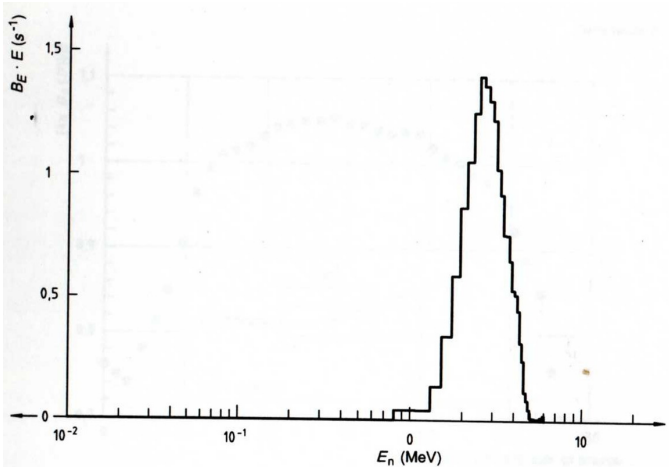

Figura 2. Espectro da fonte de ^{241}Am-B (ISO 8529-1, 2001).

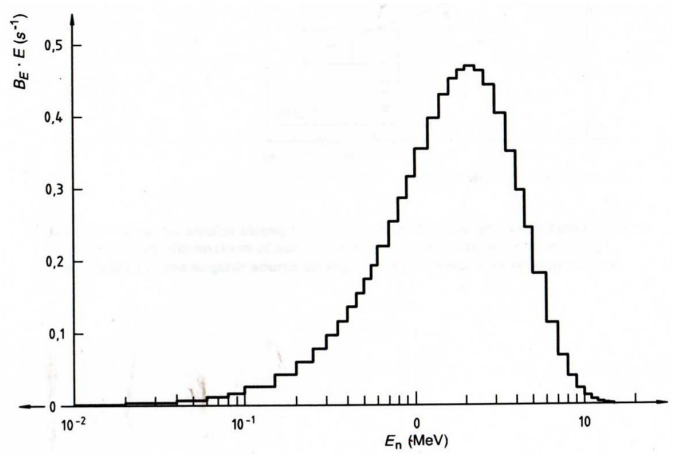

Figura 3. Espectro da fonte de ^{252}Cf (ISO 8529-1, 2001).

A fonte de califórnio-252 , espectro apresentado na Figura 4, também pode ser definida como referência em um meio moderador com água pesada (ISO 8529-1, 2001).

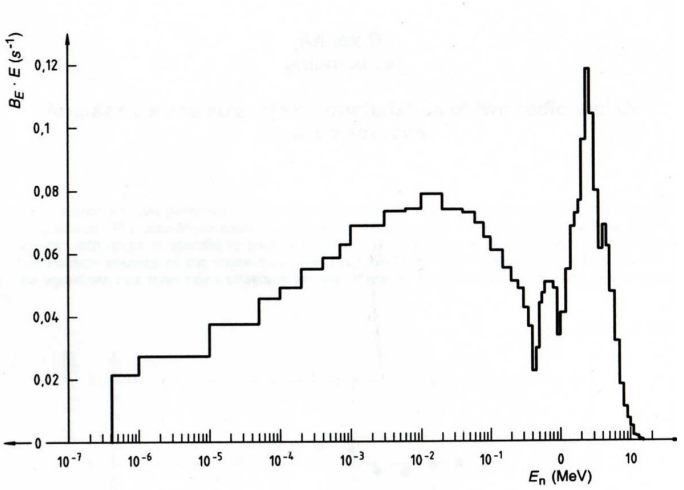

Figura 4. Espectro da fonte de de ^{252}Cf no meio moderador com água pesada (ISO 8529-1, 2001)..

Certas fontes isotópicas como a plutônio-berílio não possuem referência na ISO, porém, as informações a respeito de seu espectro podem ser encontradas no documento da IAEA (IAEA, 2001).

A fonte isotópica de ^{241}Am-Be é a mais utilizada comercialmente por causa de sua meia vida longa, 433 anos, e pela pouca emissão de radiação gama, se comparada com outras fontes de nêutrons (SZABO e BOUTAINE, 1997).

O Americio decai pela emissão de fótons de 59,5 keV e de partículas alfa. As partículas alfa interagem com o Berilio e geram os nêutrons. O espectro energético da fonte de ^{241}Am-Be compreende nêutrons com energias entre 100 keV e 10 MeV.

No trabalho desenvolvido por SOUTO (2007) sobre a montagem e caracterização de um dosímetro de nêutrons ele descreve as principais aplicações comerciais das fontes de ^{241}Am-Be, em:

• Medição de umidade

Medidores nucleares com fontes de nêutrons são úteis para detecção de líquidos e medidas de teor de umidade. O método de medida é baseado na moderação ou frenagem de nêutrons rápidos e a umidade contida no meio é medida em termos da taxa de contagem do detector. As maiores aplicações desta técnica encontram-se na:

Indústria – Com o controle de qualidade de materiais e processos e medida da quantidade de gás em reservatórios.

Exploração de recursos minerais – Com o propósito de medir porosidade ou densidade, uma fonte de nêutrons é inserida dentro de poços de perfilagem. Os nêutrons são moderados e espalhados por elementos hidrogenados contidos no meio. A taxa de nêutrons detectada corresponde à quantidade de hidrogênio presente no local, que é correlacionada com a porosidade ou densidade.

• Radiografía industrial

Na prática da radiografia industrial, as fontes radioativas são utilizadas para controle de qualidade e análise de materiais. O ensaio consta de uma varredura do material na área de interesse. Falhas ou fissuras são detectadas pela variação na taxa de contagem

dos detectores. Em geral são utilizadas fontes de radiação gama, todavia fontes de nêutrons, como o ^{241}Am-Be também são empregadas para esta finalidade quando o material a ser examinado apresentar alta seção de choque para nêutrons.

2.2 A interação dos nêutrons com a matéria

Quando um nêutron sofre a interação, é com um núcleo do material absorvedor em conseqüência da neutralidade de sua carga. Por este motivo são classificados como partículas indiretamente ionizantes. Assim como a radiação eletromagnética, os nêutrons não interagem com a matéria por meio de forças *coulombianas*, precisam chegar suficientemente próximos do núcleo para sofrer a ação das forças nucleares. Podem, portanto, penetrar profundamente no material alvo sem sofrer interações. Quando interagem diretamente com os núcleos do material que está sendo atravessada, os nêutrons desaparecem e podem dar origem a radiações secundárias, como partículas carregadas pesadas e radiação gama.

A forma de interação dos nêutrons com a matéria se dá principalmente através através da seguinte formulação geral simplificada,

$$n + X = Y + g \qquad (1)$$

onde n é o nêutron incidente, X é o núcleo-alvo, Y é um núcleo-produto e g é um produto da interação.

Durante do processo de interação, podem ocorrer espalhamento ou absorção. A interação do tipo espalhamento pode ocorrer de duas maneiras (KNOLL, 1989):

a) Espalhamento elástico (n,n): Neste processo a estrutura do núcleo alvo não sofre alterações e a interação acontece por uma simples transferência de energia cinética e de quantidade de movimento do sistema (**nêutron + núcleo-alvo**) que se conserva, ou seja,

não há excitação do núcleo-alvo. Este processo é de fundamental importância na detecção de nêutrons rápidos, que ao colidir com núcleos de ^{1}H podem perder até 100% da sua energia, gerando um próton de recuo capaz de ionizar o meio.

b) Espalhamento inelástico (n,n'): O núcleo alvo permanece inalterado, o nêutron incide sobre um núcleo, o qual absorve parte da sua energia cinétíca e passa para um estado excitado, devendo decair com a emissão de um ou mais fótons (γ).

Os nêutrons incidentes podem também ser absorvidos pelo núcleo alvo, modificando sua estabilidade e composição isotópica. A energia cinética não é conservada, pois uma parte dela excita o núcleo que depois volta ao estado fundamental. Estando o núcleo no estado excitado, outros fenômenos podem ocorrer como:

a) Captura radioativa (n,γ), (n,α) e (n,p): Processo pelo qual um núcleo alvo absorve um nêutron, habitualmente de baixa energia, emitindo um fóton (γ). Do mesmo modo, o núcleo alvo pode absorver o nêutron e este emitir uma partícula (α) ou um próton.

b) Captura radioativa (n,2n) e (n,3n) ou interações nucleares com a produção de particulas carregadas: Neste tipo de processo o núcleo captura um nêutron e emite uma ou mais partículas carregadas. Embora mais provável para núcleos leves interagindo com nêutrons rápidos, este processo também pode ocorrer, com grande secção de choque, com nêutrons térmicos, como nas reações $^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$ e $^{6}Li(n,\alpha)^{3}H$, por exemplo, muito úteis na detecção de nêutrons nessa faixa de energia por produzirem partículas altamente ionizantes (α).

c) Fissão nuclear: Neste caso o núcleo-alvo, de um átomo pesado, após absorver um nêutron, é quebrado em dois ou mais núcleos menores, chamados *fragmentos de fissão* com a liberação de altas energias, mais um certo número de nêutrons (usualmente entre 2 e 3). Este processo normalmente só ocorre com alguns núcleos, como o ^{235}U ou o ^{239}Pu, por exemplo.

Outro fator que deve ser considerado é que para um determinado tipo de núcleo-alvo, as probabilidades relativas de ocorrência destes fenômenos mudam drasticamente com a energia cinética dos nêutrons incidentes. Como não foi encontrado, na literatura, uma referência única para classificação do nêutrons quanto a sua energia:, podemos classificá-los como (ATTIX , 1986) :

Térmicos - nêutrons com velocidade correspondente ao movimento dos átomos e moléculas em temperatura ambiente. Da alta velocidade são levados ao nível térmico por moderação em material hidrogenado como por exemplo a parafina e o polietileno. Os nêutrons térmicos têm energia de aproximadamente $E < 1$ eV.

Epitérmicos - nêutrons no intervalo intermediário da termalização $1 \text{ eV} < E < 1$ keV.

Rápidos - nêutrons com energia $0{,}1 \text{ MeV} < E < 15 \text{ MeV}$.

2.3 A detecção de nêutrons

A detecção de nêutrons não é tão simples devido as fontes de nêutrons gerarem também radiação gama, que podem interferir na leitura da medida, logo um sistema detector deve ser capaz de discriminar essas interferências (ZAMBONI,2007) .

Os nêutrons são detectados indiretamente quando interagem com vários tipos de núcleos atômicos gerando reações nucleares que têm como consequência a liberação de partículas carregadas. Nos detectores de nêutrons essas partículas carregadas produzem sinais elétricos e esses sinais são proporcionais ao campo neutrônico. Os sinais são, por sua vez, processados por dispositivos eletrônicos, onde sua forma é alterada e amplificada.

Os materiais utilizados para detecção de nêutrons podem estar nas diferentes fases: sólida, líquida ou gasosa embora não sejam muitos os materiais que possam ser utilizados para detecção, devido às características especiais desses materiais.

Para cada tipo de detector, existe vantagens e desvantagens.

Um dos problemas que os detectores apresentam é a discriminação dos estados de energia dos nêutrons, ou seja, os detectores apresentam, boa resposta para avaliar o fluxo total dos nêutrons, mas não conseguem quantificar a energia dos mesmos de forma acurada.

Para empregar o detector adequado é necessário ter o conhecimento da faixa de energia dos nêutrons gerados. O que pode não ser muito fácil devido a faixa de energia ser muito ampla. Os nêutrons com energia nas faixas térmica e epitérmica são detectados, pelo método:

a) Detecção instantânea da carga elétrica dos produtos da reação dos nêutrons com elementos leves. Reação $^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$ devido à alta seção de choque da reação e do comportamento 1/v da seção de choque do ^{10}B, onde v é a velocidade do nêutron, sendo possível determinar a indicação imediata da medição de nêutrons através da fluência ou equivalente de dose. Este é o princípio dos detectores proporcionais os tipos mais comuns de monitor de área capaz de discriminar raios (γ).

b) Detecção dos produtos gerados pela reação de captura radioativa de nêutrons (n,γ) ou fissões nucleares induzidas. Os elementos fissionáveis que possuem alta seção de choque nas reações com nêutrons térmicos são: U^{233}, U^{235}, U^{238} e Pu^{239}. A detecção pode ocorrer com detectores termoluminescentes ou detectores a gás.

As seções de choque para reações nucleares induzidas por nêutrons rápidos são consideravelmente menores do que comparadas às reações com nêutrons térmicos . Dessa forma, em alguns casos, os nêutrons rápidos primeiro são moderados e posteriormente são detectados.

2.4 Tipos de detectores de nêutrons

a) Câmara de Ionização

A câmara de ionização é um tipo de detector a gás que possui como princípio de operação a coleta de cargas formadas pela ionização do gás, ou mistura gasosa, contida em seu volume sensível. Quando uma tensão positiva é aplicada ao anodo os elétrons se movem em direção a ele e os íons carregados positivamente se moverão em direção à parede do tubo (catodo), produzindo um sinal elétrico de saída de magnitude dependente da tensão aplicada, da geometria do detector e do gás de preenchimento. Estes parâmetros determinam se o detector opera na região de ionização (KNOLL, 1989).

Dependendo do campo de aplicação e de sua construção (câmaras seladas com moderadores) associada a uma eletrônica, os elétrons e íons podem ser coletados sob a forma de corrente ou de pulso. A Figura 5 abaixo mostra um esquema de um detector a gás.

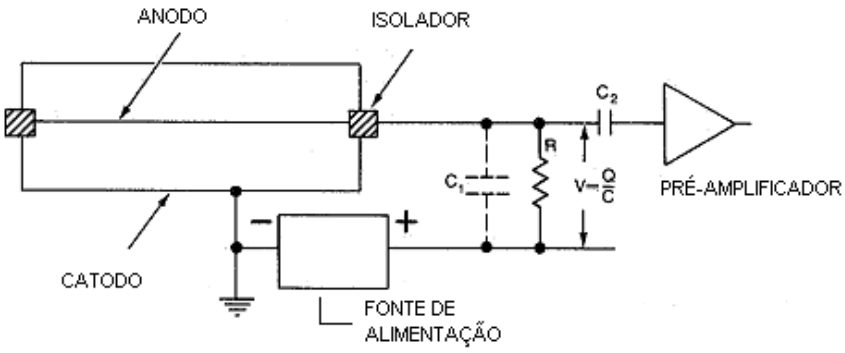

Figura 5. Diagrama de um detector a gás

b) Proporcional BF_3 e ^3H

O detector proporcional é um detector a gás, que opera em modo pulso, e o mais utilizado na detecção de nêutrons por ser de fácil operação e manipulação. Pode ser preenchido com uma variedade de gases. Entre os gases mais utilizados destacam-se, o BF_3 com reação $^{10}B(n, \alpha)^7Li$ como foi comentado na sessão *2.3 a* e o ^3He com reação $^3He(n, p)^3H$, ambos com alta secção de choque de captura para nêutrons térmicos. No caso do ^3He, o nêutron causa uma fragmentação do núcleo em um núcleo de trítio, ^3H, e um próton, ^1H, liberando uma energia de 765 keV. Para o ^{10}B, o núcleo divide-se em um núcleo de hélio (partícula α) e núcleo de lítio liberando uma energia de 2310 keV. Nesta reação, raios gama também são produzidos quando o núcleo de lítio é deixado em um estado excitado e posteriormente decai emitindo um raio gama de 480 keV. Aproximadamente 6% de freqüência, o núcleo de lítio é deixado no estado fundamental, de modo que 2790 keV de energia é depositada no detector (KNOLL, 1989). De maneira geral, os detectores de ^3He e BF^3 possuem boa eficiência para nêutrons térmicos, e probabilidade de interação para raios gama baixa, porém , os detectores preenchidos com ^3He são melhores em resolução, possuem mistura de gás uniforme e podem operar em altas pressões com melhor eficiência de detecção, entretanto, o gás BF^3 é mais barato em se comparado ao ^3He.

Os detectores proporcionais operam na região do esquema abaixo, Figura 6. Para a faixa de tensão aplicada nesta região, as cargas secundárias, que não foram produzidas pela radiação inicial, são duplicadas em relação aos íons originais. A quantidade de carga produzida é multiplicada por M que gera um pulso proporcional à energia da radiação incidente. Devido a este fator que amplifica o sinal gerado, os detectores proporcinais são mais vantajosos em relação às câmaras de ionização.

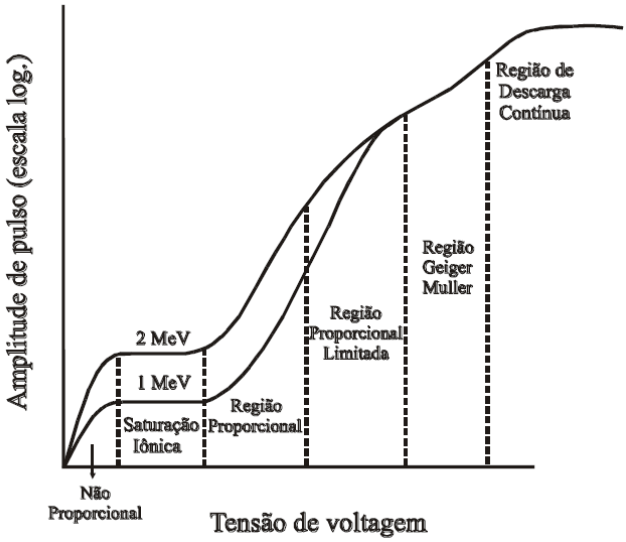

Figura 6. Região de operação dos detectores de radiação (APOSTILA, Metrologia de Radionuclídeos IRD)

c) Cintiladores

Recentemente, cintiladores plásticos, resultantes da combinações de diferentes tipos, conhecidos como phoswich (phosphor sandwich) têm sido muito utilizado na detecção de partículas carregas. A radiação interage com o material, produzindo, no mesmo, excitações e ionizações que, ao decair produzem radiação na faixa de freqüências da luz visível. Esta radiação é absorvida por efeito fotoelétrico no fotocatodo e os elétrons livres produzidos são multiplicados na fotomultiplicadora até terem intensidade suficiente para produzir o pulso de dezenas a centenas de mV de altura.

Um dos tipos mais comuns de cintiladores são moléculas orgânicas em geral dissolvidas em soluções que posteriormente são polimerizadas para a produção de um sólido (plástico). A Tabela 01 apresenta algumas propriedades dos cintiladores indicados para nêutons.

Tabela 01. Propriedades de alguns cintiladores orgânicos. A emissão de luz % é em relação ao antraceno (RIBAS, 2011).

CRISTAL	MATERIAL	DENSIDADE	ÍND DE REFRAÇ	LUZ	INDICAÇÕES
CRISTAL	Antraceno	1,25	1,62	100	α, β, γ e n rápidos
PLASTICO	NE102	1,03	1,58	65	α, β, γ e n rápidos
LIQUIDO	NE213	0,87	1,51	78	n rápidos

A caraterística mais importante para os detectores cintiladores é o tempo de decaimento dos estados excitados. Esse método é o mais aplicado para detecção e espectrometria quando o fluxo de nêutrons está compreendido em uma larga faixa de energia.

O bom cintilador deve converter o máximo de radiação em fluorescência.

2.5 Caraterísticas de um bom detector

A eficiência de um detector de nêutrons é definida como a fração dos nêutrons incidentes cuja interação com o detector resulta numa contagem. E esta, depende do tamanho, da forma do detector e da direção de incidência dos nêutrons. Além disso, também deve ser avaliado o tempo de resposta do detector, sua resistência mecânica e durabilidade.

Os detectores mais utilizados para monitoração ambiental são os detectores a gás.

2.6 Monitores de área para nêutrons

Em geral os monitores de área para nêutrons são construídos com três componentes fundamentais: moderador, detector e uma eletrônica associada. O princípio físico desses

monitores se baseia na incidência de nêutrons em um material denominado moderador que apresentam alta secção de choque (probabilidade de interação) para desacelerar o nêutron incidente. Os materias hidrogenados, como por exemplo a parafina e o polietileno são considerados bons moderadores porque possuem alta densidade e excelentes qualidades físicas (FERNÁNDEZ, 1996).

Os monitores de área para nêutrons foram projetados para ter uma resposta aproximadamente isotrópica, ou seja, ter uma resposta que seja o mais independente possível da energia do nêutron e do ângulo de incidência. No entanto, devido às dificuldades de projetar monitores com essa característica isotrópica, eles são todos deficientes em termos de energia e dependência angular para certas medidas. Cada instrumento tem uma direção de referência específica, que é cuidadosamente selecionada para evitar a modificação da resposta pela eletrônica, baterias e cabos, que são componentes dos detectores.

Os monitores de área para nêutrons são aplicados rotineiramente para determinar o equivalente de dose ambiente onde pessoas estão ocupacionalmente expostas, definir áreas de controle e monitorar níveis de taxa de dose.

Dois tipos de monitores de área para nêutrons são apresentados na Figura 7 abaixo.

a)

b)

Figura 7. **a)** Proporcional BF_3 Ludlum Modelo 12-4 nêutron **b)** Cintilador modelo 42-41 Prescila Probe.

2.7 O LN e a calibração dos monitores de área para nêutrons

O Laboratório de Nêutrons (LN), criado em 1973, é um dos laboratórios de pesquisa do Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI) do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD). O LN é o laboratório de referência na área de metrologia de nêutrons, sendo responsável pela guarda dos seguintes padrões: Fonte de AmBe (Padrão Brasileiro de Fluência de Nêutrons) e Banho de Sulfato de Manganês (Sistema Absoluto de Padronização Primária, doado pelo BIPM ao INMETRO).

O procedimento de calibração de monitores de área para nêutrons no LN é realizado de acordo com as recomendações da norma ISO 8529-1, com uso de fontes isotópicas de espectros referenciados na mesma norma e que são padronizadas pelo próprio LN, garantindo assim a rastreabilidade metrológica.

Sua infraestrutura laboratorial com cerca de 300 m^2, dispõem dos seguintes laboratórios: Baixo Espalhamento (LBE); Fluxos Térmicos (LFT); Medição de Fluência (LMF); Métodos Computacionais (LMC) e Armazenamento de Fontes (LAF).

O Laboratório de Baixo Espalhamento (LBE) foi construído de forma a minimizar o espalhamento e diminuir as incertezas na calibração dos instrumentos. O LBE possui dimensões laterais de 7,0 x 18 x 6 m^3 e 2,20 m de altura do chão à plataforma, onde são posicionados os equipamentos a serem calibrados e a fonte para irradiação (Figura 8). O piso é feito de concreto e as paredes laterais são de poliestireno expandido revestido com aço (Figura 9).

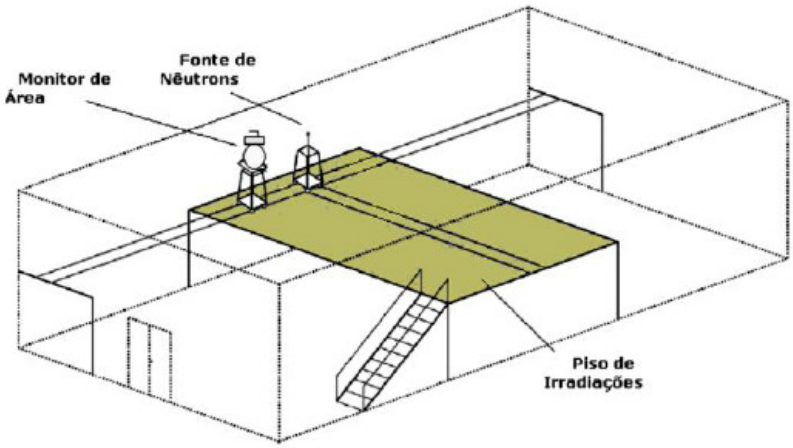

Figura 8. Setup de calibração de um monitor de área no LBE

Figura 9. Novo Laboratório de Baixo Espalhamento (LBE)

A calibração dos monitores de área no LBE consiste na comparação dos valores indicados pelo instrumento com o valor de referência de equivalente de dose ambiente H*(d) que é uma grandeza operacional para monitoração de área em ambientes de trabalho, sendo o produto da dose absorvida em um ponto pelo fator de qualidade da radiação, correspondente ao que seria produzido em uma esfera de tecido equivalente de 30 cm de diâmetro, na profundidade *d* (CNEN NN 3.01 PR 3.01/002:2011).

Após os monitores serem calibrados, estes são liberados pelo LN acompanhados de um certificado, informando se o equipamento precisou de ajustes durante a calibração ou se não foi necessário, estando o equipamento em conformide. Caso ele apresente algum defeito o laboratório emite um relatório de não conformidade do equipamento e este é devolvido para o cliente que providenciará sua manutenção. Somente após o conserto voltará para ser calibrado. Um modelo do certificado apresenta-se no Anexo 1 .

2.8 Como determinar os intervalos de calibração

A Norma ABNT NBR ISO/DIS 17025, recomenda em seu ítem 5.6.1 que todo equipamento utilizado em ensaios, deve ser calibrado antes de entrar em serviço, para que tenha efeito significativo sobre a validade do ensaio, mas não determina um período de calibração. Isto deverá ser feito pelo usuário.

Identificar o período adequado para calibração passa a ser uma ação preventiva para o desempenho do equipamento, garantindo que não haja a deterioração das medidas realizadas e que não seja utilizado fora das condições especificadas pelo fabricante.

Para que o usuário possa gerenciar seus sistemas de medição, este deve utilizar-se de alguns métodos informais ou práticos de estimação.

De acordo com a Norma NBR 10012, um grande número de fatores influencia a freqüência de calibração. Os mais importantes, são:

- tipo de equipamento
- recomendações do fabricante
- dados de tendência conseguidos por registros de aferições anteriores
- registro histórico de manutenção e assistência técnica
- extensão e severidade de uso

- tendência a desgaste e derivação
- freqüência de verificação cruzada com outros equipamentos de medição, em especial, padrões de medição
- freqüência e formalismo das aferições em uso
- condições ambientais (temperatura, umidade , vibração e etc)
- exatidão pretendida da medição
- conseqüências de um valor medido incorretamente ser aceito como correto devido a defeito do equipamento

De modo geral, não se pode ignorar o custo ao se determinar os intervalos de comprovação, tornando-se este, portanto um fator limitador.

O intervalo entre duas calibrações consecutivas de um mesmo instrumento é referente ao intervalo de comprovação. Esta frequência é estabelecida através dos fatores (CAMARGO, 2008):

- Análise da tendência conforme dados de calibrações anteriores;
- Comparação com a periodicidade de equipamentos similares;
- Exatidão da medida;
- Histórico de uso e manutenções;
- Tipo de instrumento e periodicidade recomendada pelo fabricante.

O procedimento mais comum na determinação no intervalo de calibração é baseado no histórico de calibrações. E no caso de equipamentos novos, o intervalo também pode ser estipulado pela incerteza na medição recomendada pelo fabricante.

Existem vário métodos propostos para ajustar intervalos de calibração em função das condições de tolerância do equipamento (PATRÃO,2011). Alguns desses métodos serão descritos na sessão 2.9.

2.9 Métodos para ajuste dos intervalos de calibração

Em função da necessidade de se ter um critério para a periodicidade das calibrações, desenvolveu-se, ao longo do tempo, alguns métodos, onde quatro deles serão descritos a seguir. São eles, assim denominados pela literatura (NCSL,1989; TAMS,1986).

a) Método A1;

b) Método A2;

c) Método A3;

d) Método de Schumacher

Método A1 – Usado para ajustar o intervalo de calibração, em função das condições do instrumento apresentado na calibração, ou seja, de conformidade do instrumento, para o uso pretendido. Por exemplo, se um instrumento é novo, a primeira coisa a fazer é calibrá-lo e estipular uma periodicidade de calibração (ABNT NBR ISO/DIS 17025). Nesta, se o instrumento está em conformidade com os critérios de aceitação, ele retorna ao setor produtivo. Em caso negativo, o mesmo irá, para a manutenção e após para a calibração.

No gerenciamento das calibrações, pelo Método A1, a periodicidade entre as calibrações pode ser ajustada. O intervalo entre as calibrações dos instrumentos é ajustado, levando-se em consideração dois fatores: a condição de conformidade do instrumento na calibração e um grau de confiabilidade de medição (RTRJ,1991).

Para estabelecer o ajuste existem duas condições de conformidade:

1) quando o instrumento é calibrado e os desvios apresentados estão dentro da tolerância especificada;

2) os desvios apresentados estão fora da tolerância especificada (NCSl,1989). Assim, neste método quando o grau de confiabilidade for estabelecido para ser de

aproximadamente 95% e o instrumento estiver na condição 1, o intervalo de calibração é aumentado, utilizando um fator "**a**". Se o instrumento estiver na condição 2, o intervalo de calibração é diminuído, utilizando-se um fator "**b**".

Quando o instrumento está em conformidade, o fator "**a**" é estabelecido igual a 0,1 , o que representa que o intervalo de calibração poderá ser aumentado em 10 %, ou seja, se o intervalo é de 35 dias, este passará para 39 dias. Quando o instrumento não está e conformidade o fator "b" é estabelecido igual a 0,55 , o que representa que o intervalo será diminuído em 55 %, ou seja, se o intervalo é de 35 dias, passará para 19 dias. A Tabela 02 mostra um exemplo de aplicação deste método.

Tabela 02. Exemplo de aplicação do método A1

Intervalo atual (dias)	Intervalo sugerido pelo método	
	Aumentar p/ (dias)	Reduzir p/ (dias)
35	39	19
70	77	39
105	116	58
140	154	77
175	193	96
210	231	116
245	270	135
280	308	154
315	347	173
350	385	193

Método A2 – Este também é definido em função da conformidade do instrumento. Neste caso utiliza-se um plano de ajuste, levando-se em consideração a amplitude da variação dos desvios encontrados fora da tolerância (NCSL,1989;TAMS,1986).

Assim, são utilizado três códigos para identificar o grau de especificação dos desvios encontrados, sendo eles, 0 , 1 e 2. Para um nível de confiança de aproximadamente 90% o intervalo de calibração é ajustado conforme fator apresentado na Tabela 03. Se, por exemplo, para um instrumento, o intervalo de calibração inicial for de 35 dias, este poderá ser aumentado em 1,81%, passando, então, para 36 dias, caso o desvio encontrado esteja dentro do critério de aceitação (código 0). Se o desvio encontrado estiver fora do critério de aceitação, porém, menor do que duas vezes o valor especificado, este poderá ser diminuído em 12,94% (código 1), exemplo, o intervalo passará para 30 dias. Se o desvio encontrado estiver fora do critério de aceitação, porém, maior do que duas vezes o valor da especificação, este poderá ser diminuído em 20,63% (código 2), exemplo, o intervalo passará para 28 dias.

Tabela 03. Código e fator para ajuste do intervalo de calibração pelo Método A2

Código	Descrição	Fator
0	Para instrumentos que apresentam desvios dentro das especificações	+ 1,81%
1	Para instrumentos que apresentam desvios fora das especificações, apresentando valores menores que duas vezes suas especificações.	-12,94%
2	Para instrumentos que apresentam desvios fora das especificações, apresentando valores maiores que duas vezes suas especificações.	- 20,60%

Método A3 – Neste o intervalo é ajustado após a consideração da situação do instrumento apresentado na última calibração e nas duas calibrações anteriores. Através de

uma classificação dos valores que estão dentro e fora das especificações, se analisa e se estabelece o ajuste dos períodos em intervalos semanais (NCSL,1989). A Tabela 04 apresenta as ações a serem realizadas no estabelecimento do ajuste do intervalo de calibração. Conforme mostra a Tabela 05, a periodicidade poderá continuar a mesma, aumentar, reduzir ou reduzir drasticamente. A Tabela 05 mostra um exemplo de aplicação deste método.

Tabela 04. Ações para o estabelecimento do ajuste, conforme Método A3.

Ação	Situação das calibrações		
	Atual	Última	Anterior
Continuar	in	new	
	in	out	new
	in	out	in
	in	in	out
	in	out	out
	out	new	
	out	in	new
	out	in	in
Aumentar	in	in	new
	in	in	in
Reduzir	out	in	out
Reduzir drasticamente	out	out	new
	out	out	in
	out	out	out

Onde, in (dentro da tolerância); out (fora da tolerância) e new (instrumento novo)

Supondo ainda que o histórico deste instrumento apresenta, nas três últimas calibrações, conformidade com os requisitos, pela Tabela 04, deve-se aumentar o intervalo

de calibração, sendo que, o método sugere, por exemplo, para um intervalo de 175 dias, um acréscimo de 35 dias, passando a ser de 245 dias.

Tabela 05. Exemplo de aplicação do Método A3

Intervalo Atual (dias)	Intervalo sugerido pelo método		
	Aumentar p/ (dias)	Reduzir p/ (dias)	Reduzir drasticamente p/ (dias)
35	70	35	35
70	105	35	35
105	140	70	70
140	210	105	70
175	145	140	105
210	315	175	105
245	350	210	140
280	420	245	140
315	420	280	175
350	525	315	175

Método de Schumacher – Aplicando este método os instrumentos são classificados conforme as condições em que se encontram, levando-se em consideração a histórico de calibraçòes no qual são registradas as condições das revalidações (Godfrey,1984). São utilizadas as notações:

A (Avaria): designa problema que possa prejudicar um ou mais parâmetros do instrumento. Como exemplo, as reclamações de usuários e tolerâncias.

C (Conforme): designa conformidade comprovada durante a revalidação.

F (Fora de Tolerância – Não-Conforme): o instrumento funciona bem, mas fora da tolerância especificada.

As tolerâncias alteradas segundo os dados acima podem levar as classificações ***A*** ou ***F***. Com as informações obtidas, nas fichas históricas, pode-se formar juízo a respeito do desempenho dos instrumentos. Por exemplo, um instrumento "conforme" não vai ficar mais "conforme" apenas pelo fato de ter sido revalidado, pode ocorrer que, em conseqüência da revalidação desnecessária, o instrumento venha a ser avariado.

A seqüência de ***C*** (Conforme) na ficha histórica indica que o instrumento esteve sempre "conforme" e a conclusão é imediata. A calibração não é necessária, podendo o ciclo de calibração ser aumentado.

Por razões semelhantes, a seqüência de ***A*** (Avaria) indica a existência de problemas. É visível que o ciclo deve ser reduzido e que, ao mesmo tempo, seja pesquisada a causa do problema. Além dessas situações aparecerão casos intermediários, como alternância entre A (Avaria), C (Conforme) e F (Fora de Tolerância). Sendo este o caso, as informações registradas nas fichas vão permitir a tomada de decisão a respeito da duração dos ciclos.

A Tabela 06 exemplifica os casos com pelo menos dois ciclos anteriores ao atual. Com base no desempenho anterior e na condição atual, podem-se tomar as seguintes decisões:

- E (Aumentar): indica que a duração deve ser aumentada.
- D (Diminuir): indica que a duração deve ser diminuída.
- M (Máxima Redução): indica a redução de ciclos até a duração mínima.
- P (Permanece): indica que permanece o mesmo ciclo.
- N (Novo): indica um novo ciclo

Tabela 06. Exemplos de tomadas de decisões, baseada na condição do equipamento e em ciclos anteriores.

Ciclos Anteriores	Condição de recebimento		
	A	F	C
CCC	P	D	E
NCC	P	D	E
ACC	P	D	P
CN	M	M	P
CA	M	M	P
NC	P	M	P
NN	M	M	P
NA	M	M	P
AC	P	D	P
AN	M	M	P
AA	M	M	P

A Tabela 07 mostra um exemplo de aplicação do método de Schumacher. Supondo-se que um instrumento é calibrado com uma periodicidade de 175 dias e verificando-se que nos ciclos anteriores e na calibração atual o instrumento está conforme (C), logo pela Tabela 06 o intervalo poderá ser aumentado. O método sugere um acréscimo de 7 dias. Na atual situação o intervalo passa a ser de 203 dias.

Neste método o intervalo poderá ser diminuído até um limite; atingindo a máxima redução, o autor recomenda retirar o instrumento fora de uso.

Tabela 07. Exemplo de aplicação do método Schumacher.

Intervalo Atual (dias)	Intervalo sugerido pelo método		
	Aumentar p/ (dias)	Reduzir p/ (dias)	Máxima redução (dias)
35	49	28	28
70	91	63	42
105	126	98	63
140	168	126	91
175	203	161	112
210	245	189	140
245	280	224	161
280	315	252	175
315	343	287	182
350	364	315	189

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Metodologia

O método utilizado para fazer o levantamento dos monitores de área para nêutrons foi a identificação estatística do histórico de calibrações destes monitores registrado no programa AUTOLAB do Laboratório de Nêutrons (LN) do Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI) do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD). Estre programa, que consiste de um banco de dados, nos permite adicionar filtros de informações, tais como: laboratório pretendido, tipo de monitores, datas de entrada e saída de equipamentos, fontes de calibração, informando ainda se o equipamento foi aprovado ou não na sua última avaliação.

Inicialmente foram coletados os tipos de clientes, identificando sua distribuíção por estado brasileiro com a finalidade de estimar o campo de aplicação dos monitores de área.

Em uma segunda etapa, tendo um total de 853 calibrações realizadas entre os anos de 2006 até 2011, foi calculada a média de tempo que se leva para recalibrar o monitor e em seguida agrupando-os. Para melhor entendimento, os períodos de calibração foram separados mensalmente.

Finalizando a avaliação do histórico de calibrações, os monitores foram agrupados por campo de aplicação e avaliados separadamente quanto aos tempos de calibração.

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Aspectos gerais sobre a distribuição dos monitores de área de nêutrons

Do número total de 56 instalações que utilizam monitores de área, avaliados pelo LN, observamos na Figura 10 os três estados que concentram o maior número de equipamentos, podendo ser um indicador de atividades associadas à exposição de campos de nêutrons distribuídas no Brasil

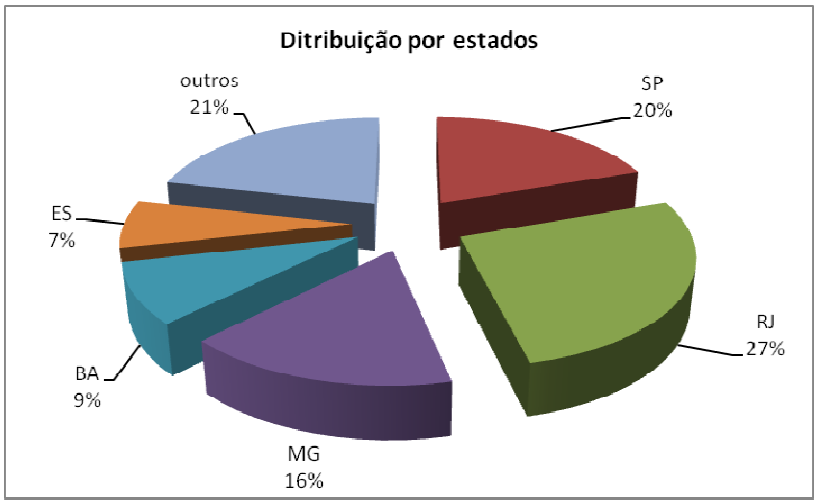

Figura 10. Distribuição dos monitores de área de nêutrons no Brasil.

Em seguida, Figura 11, do total de instalações, podemos classificar os campos de atuação e constatar que a maior clientela está relacionada às atividades na área de petróleo e gás correspondenda à 40%. .

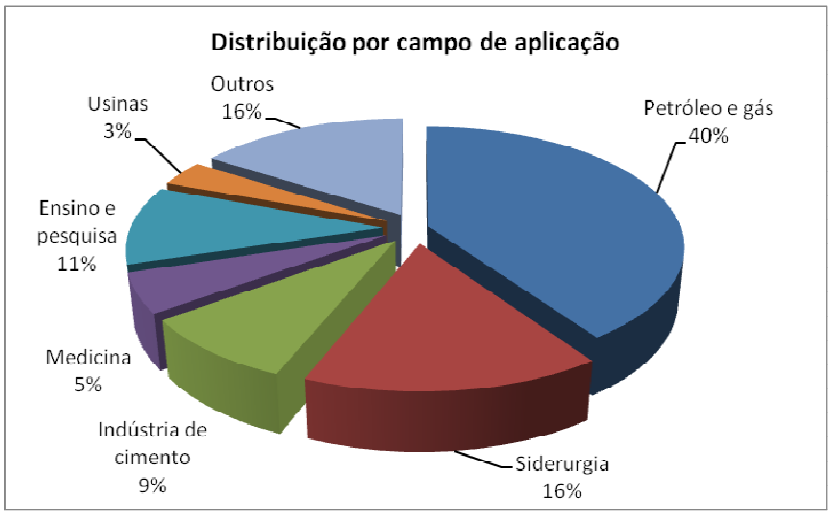

Figura 11. Percentual do campo de atuação dos clientes do LN

Foram feitas 853 calibrações no período de fevereiro de 2006 a novembro de 2011, sendo que 176 monitores foram calibrados uma única vez .

A Tabela 08 representa a média do intervalo de tempo que os monitores de todos os campos de aplicação levaram para serem calibrados.

Tabela 08. Média do tempo de calibração dos monitores de área de nêutrons

Media do tempo de calibração (meses)	**Desvio Médio (meses)**
15,2	5,3

Para identificamos uma tendência do tempo de calibração dos monitores, lenvantamos uma curva apresentada na Figura 12 onde identificamos uma tendência por parte das empresas em adotar o período de 1 ano para seus monitores de área. Com uma leve variação em torno de 18 meses.

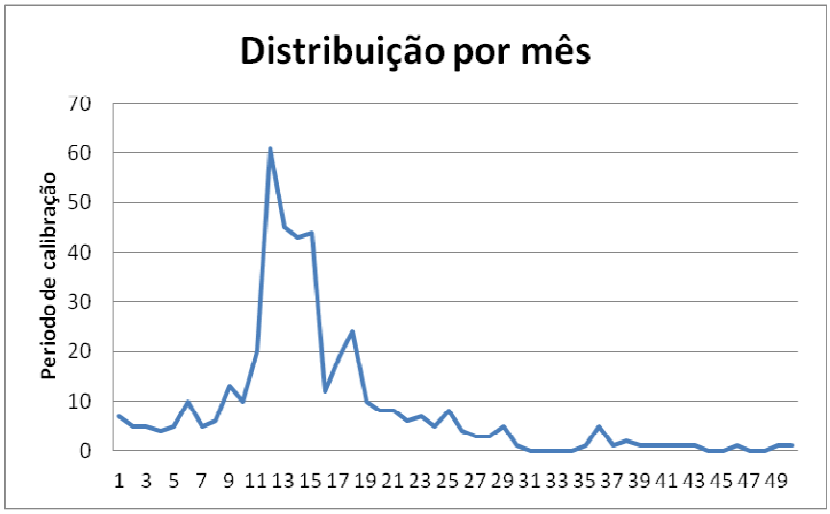

Figura 12. Tendência para o tempo de calibração dos monitores de área de nêutrons

Notadamente, na Figura 13 pode-se observar que o campo de petróleo e gás, é o que possui o maior número de monitores de área e devido a diferença significativa de 59 % em relação ao segundo maior campo (pesquisa), poderia esconder as tendências de calibração dos serviços menores.

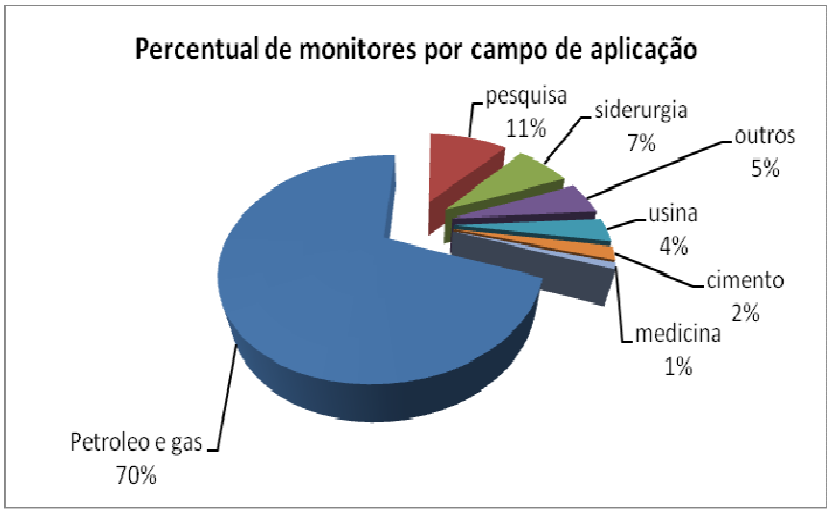

Figura 13. Distribuição do percentual de 410 monitores de área de nêutrons calibrados para cada campo de atuação

4.2 Aspectos específicos de recalibração em cada campo de atuação

Ao analisarmos o histórico de calibrações separadamente para cada campo de atuação procuramos identificar a tendência do período de calibração adotado para os diferentes tipos de serviços.

Os monitores que deram entrada somente uma única vez no banco de dados do LN foram descartados, pois estamos interessados no tempo que uma empresa leva para retornar o seu monitor ao laboratório.

O período compreendido entre a ultima calibração até a data de levantamento das infomações foi descartado, porque entende-se que este ainda encontra-se em aberto.

As Figuras seguintes apresentam a tedência do período de calibração.

Como os dados referente ao número de calibrações eram mínimos para os campos de medicina, estes não foram apresentados.

Na Figura 14 podemos observar que a tendência do tempo de calibração dos monitores de área utilizados nas indústrias cimentícias é de 1 ano ou de 17 meses.

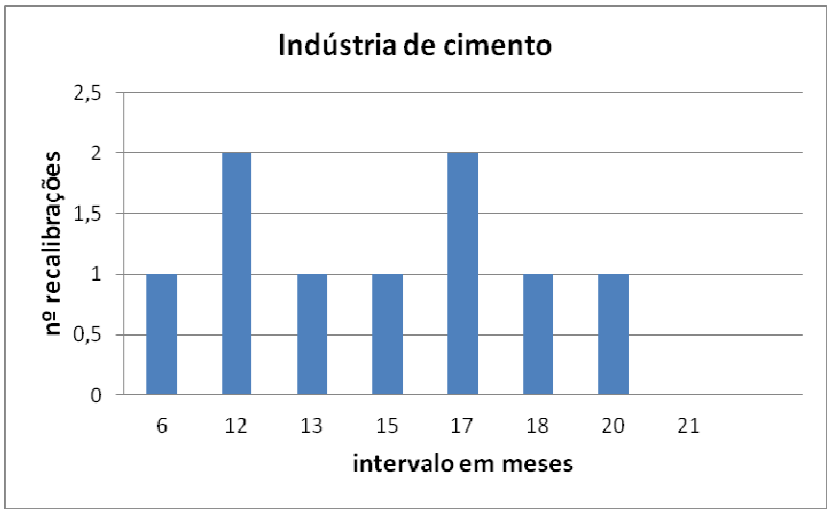

Figura 14. Tendência do período de calibração dos monitores de área de nêutrons para um total de 17 contagens na Indústria de cimento.

A segui, na Figura 15 observa-se a tendência de 1,5 ano para as calibrações de monitores empregados nas usinas, período muito próximo ao da indústria cimentícia.

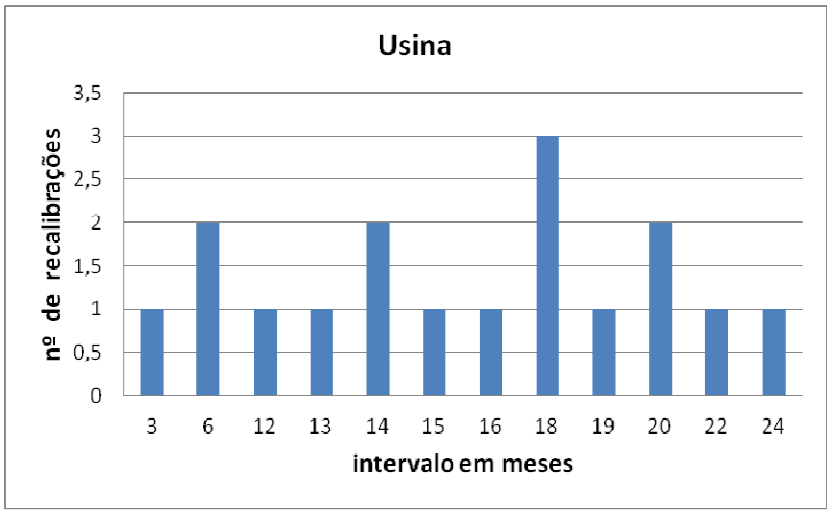

Figura 15. Tendência do período de calibração dos monitores de área de nêutrons para um total de 17 contagens das Usinas de Angra.

Na classificação de outros serviços, Figura 16, estão incluídas as empresas de papel e celulose, de vidros que utilizam os medidores nucleares e as empresas de auditorias e treinamento. Estas apresentam o maior número de calibrações no intervalo de 1 ano ou de 16 meses.

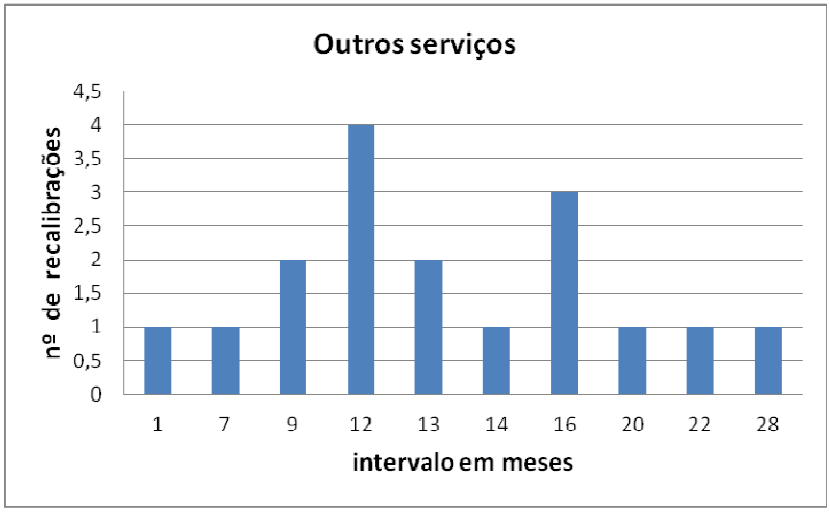

Figura 16. Tendência do período de calibração dos monitores de área de nêutrons para um total de 17 contagens utilizados nas empresas de papel e celulose, de vidros e auditorias.

Os monitores utilizados no campo da siderurgia apresentam um período menor de calibrações igual a 9 meses, Figura 17.

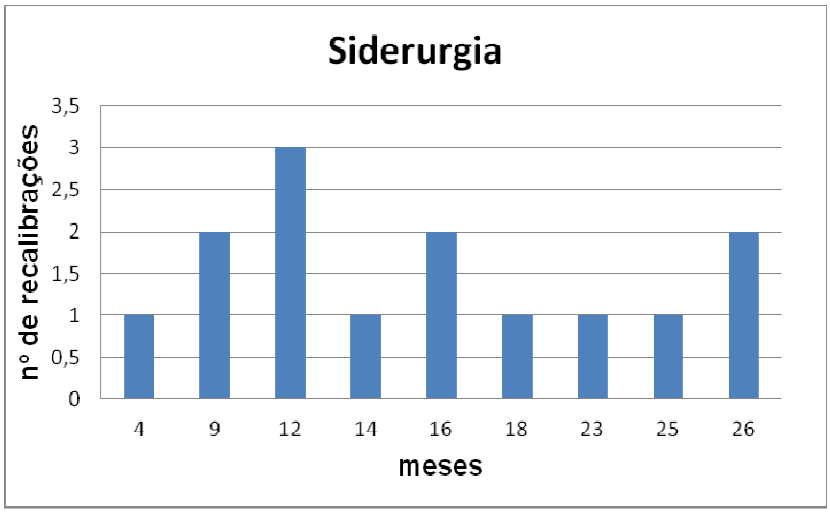

Figura 17. Tendência do período de calibração dos monitores de área de nêutrons para um total de 14 contagens nas Siderúrgicas.

Quanto aos monitores empregados em pesquisa, Figura 18 , nota-se que o número de calibrações para os períodos de 6, 12 e 15 meses são os mais frequentes.

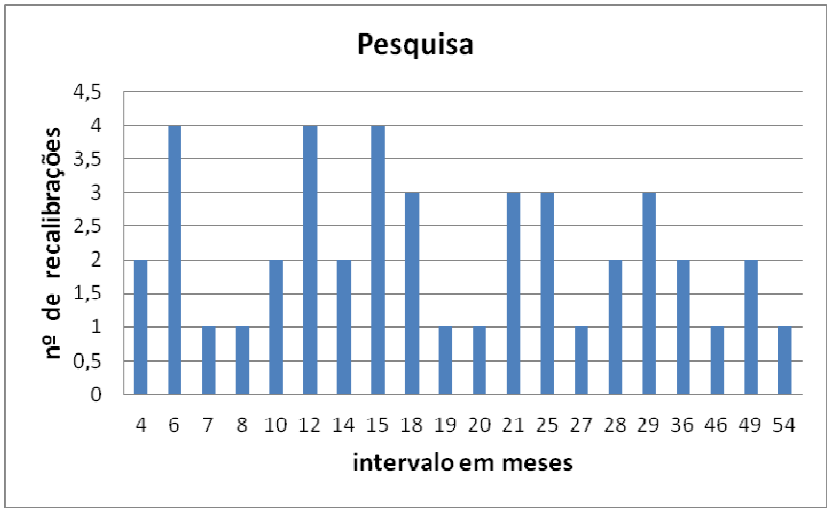

Figura 18. Tendência do período de calibração dos monitores de área de nêutrons para um total de 43 contagens utilizados em Pesquisa.

No campo e que concentra o maior número, 336 monitores de área para nêutrons, Figura 19, verifica-se a tendência de 1 ano ou 18 meses para as calibrações dos equipamentos.

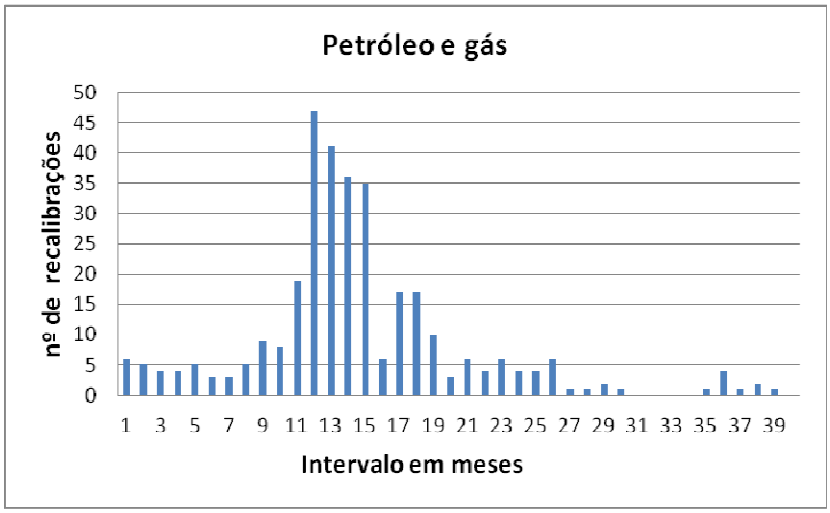

Figura 19. Tendência do período de calibração dos monitores de área de nêutrons utilizados nos atividades de Petróleo e gás.

Analisando os gráficos acima, notamos uma tendência em se adotar intervalos de 12 meses ou 18 meses entre as calibrações, para todos os tipos de serviços, característica mais acentuada é vista nas atividades que envolvem petróleo e gás, com exceção dos aparelhos utilizados nas usinas, que apresentaram uma tendência maior para o intervalo de 18 meses.

Os monitores empregados nas atividades de pesquisa, tendo como clientes : CNEN, IPEN, CDTN e outros, são os que apresentaram a maior irregularidade nos períodos de calibração

Capítulo 5

CONCLUSÕES

O estudo do histórico de calibrações demonstra um comportamento padrão e sistemático do período de calibração para monitores de área de nêutrons por parte dos clientes. Em quase todas as atividades relacionadas, mesmo sendo aplicados em diferentes ambientes, submetidos a fluxo de nêutrons distintos, os equipamentos são submetidos à calibração no intervalo de tempo de aproximadamente 1 ano. Esta tendência pode ser entendida como uma forma de atender as exigências perante uma visita das comissões de supervisão da CNEN.

O perfil dos clientes do LN é em 70% de monitores utilizados na indústrias de petróleo e gás, com previsão do aumento da demanda por calibrações nos próximos anos, visto o desenvolvimento do Brasil nesta área. E por este motivo faz-se necessário a divulgação, o treinamento e aperfeiçoamento dos usuários destes monitores para que através dos métodos existentes de identificação do desempenho do equipamento, saibam avaliar o intervalo adequado de calibração para melhor gerenciar seus sistemas de medição como uma ação preventiva para o desempenho do equipamento e redução de custos.

demontra representando um comportamento .

Capítulo 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, **NBR ISO/IEC 17025**: Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, RJ, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993, **NBR ISO 10012-1**: Requisitos de Garantia da Qualidade para Equipamentos de Medição. Rio de Janeiro,RJ, ABNT.

ATTIX, F.H.; ROESCH, W.C.; TOCHILIN, E., **Radiation Dosimetry** - Vol. 1. 3* Ed. New York: Academic, 1968.

BESSA, A.C.M.,2007, **Intercomparação de câmaras de ionização em feixes padrões de raios x, níveis radioterapia, radiodiagnóstico e radioproteção.** Dissertação de mestrado, IPEN,São Paulo, Brasil.

CAMARGO, V.A.;KISHIMOTO, E.T.;MORAES,J.C.T.B.,2008,"Determinação de periodicidade de calibração de instrumentos de medição de um laboratório de ensaios de equipamentos eletrodomésticos". **Congresso da Qualidade em Metrologia**, São Paulo, SP, Brasil, 09-12 Junho.

FERNÁNDEZ, F., BOUASSOULET,T., DOMINGO, C., LUGUERA, E., BAIXELAS,C.,1996, "Response of a CR-39 Fast Neutron Dosimeter with a Polyethylene Converter Improved with Makrofol ", **Radiation Prot Dosimetry**, v 66, pp. 343-347.

FONSECA, E.S.,PEREIRA,W.W.,LEITE,J.O.,PATRÃO,K.C.S.,2005,"Metrologia de Nêutrons no Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes", **Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento**, v.7, n.1(Março), pp 113-119.

GODFREY, J., "Air Force Metrology & Calibration Policy on Part Number Calibration Interval Analysis by Exponential Probability Distribution", **Aerospace Guidance and Metrology Center**, jun 1984.7p.

IAEA, 2001, **“ Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation protection purposes”**, International Atomic Energy Agency. Technical Reports Series n° 403.

International Commission on Radiological Units and Measurements, 1985, **Determination of dose equivalents resulting from external radiation sources**. ICRU Report 39. Washington-USA.

International Organization for Standardization, 2000a, **Reference Neutron Radiations – Part 2**: Calibration Fundamentals of Radiation Protections Devices Related to the Basic Quantities Characterizing the Radiation Field, Standard ISO8529-1. Geneva.

International Organization for Standardization, 2001, **Reference Neutron Radiations – Part 1**: Characteristics an Methods of Production, Standard ISO8529-1. Geneva.

CNEN, **Fatores de ponderação para as grandezas de proteção radiológicas.** IRD Posição Regulatória 3.01/002:2011.

KNOLL,F.G.,1989, **Radiation Detection and Measurement**. 2 ed. New York, Wiley & Sons

MARTINS, J.E., 2008 , **Physics for Radiation Protection – a handbook** .2 ed. Germany, Wiley. VCH, Wenhein .

MARTINS,M.M.,2088, **Desenvolvimento e caracterização de um sistema de monitoração individual de nêutrons tipo albedo de duas componentes usando detectores termoluminescentes.** Tese de Doutorado em Engenharia Nuclear, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro

NCSL, National Conference of Standards Laboratories, "Establishment and Adjustment of Calibration Intervals", **Recommended Practice n.º 1**, november 1989.

PATRÃO,K.C.S., FONSECA, E.S.,PEREIRA,W.W.,2011,“Avaliação do intervalo de calibração dos monitores de área de nêutrons utilizados na industria de petroleo e gás”, **Congresso da Qualidade em Metrologia**, São Paulo.

RTRJ, Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro, 1991, 29p., **Manual de Qualidade para Laboratório**, Rio de Janeiro: Inmetro.

RIBAS,R.V.,2011, **Instrumentação Nuclear**, Instituto de Física, Departamento de Físca Nuclear/USP, São Paulo .

SALGADO,A.P.,2011, **Avaliação da resposta dos monitores de área para nêutrons em campo de radiação gerado por um acelerador clínico de 15 MV**. Dissertação de mestrado, IRD/CNEN, Rio de Janeiro.

SOUTO, B. E.,2007, **Projeto, montagem e caracterização de um dosímetro para radiação de nêutrons ,** Dissertação de mestrado, IPEN,São Paulo, Brasil.

SOUZA, L.R.,2011, **Desenvolvimento de um sistema portátil para teste de monitores de área para nêutrons.** Dissertação de mestrado, IRD/CNEN, Rio de Janeiro.

SZABO, J. L.,BOUTAINE, J. L. "Some examples of industrial uses of neutron sources". **Radiation Protection Dosimetry** 1997, 70: 193-196.

UNSCEAR,2000, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, v 1: Sources. United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation, New York,USA.

ZAMBONI, C.B.,2007, **Fundamentos da Física de Nêutrons**. 1 ed. São Paulo, SP, Livraria da Física.

ANEXO A

O LN e a calibração dos monitores de área para nêutrons.

Certificado de calibração dos monitores de área .

IRD - Instituto de Radioproteção e Dosimetria
LNMRI - Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes

Certificado de Calibração

Identificação do certificado

Certificado Nº: LNMRI /2011	Data da Calibração: 10/03/2011	OS Nº: /2011	Página: 1/2

Identificação do cliente

Razão Social:
Área/Setor:
Endereço:

Tipo:	Monitor de área	Tipo:	Proporcional He3
Fabricante:	Ludlum Measurements Inc.	Fabricante:	Ludlum Measurements Inc.
Modelo:	15 (0-500)	Modelo:	42-14 H
Número de Série:	2 3	Número de Série:	PR 64

Condições ambientais durante a calibração

Temperatura: 23,0 ± 0,5 ºC Pressão: 101,3 ± 0,5 kPa Umidade relativa do ar: 50 ± 5 %

Geometria de calibração

Eixo longitudinal do instrumento coincidente com o feixe de radiação de referência.

Ponto de referência

Centro geométrico do detector.

Procedimento de calibração

O instrumento foi calibrado em um campo de radiação ionizante de referência gerado pelo padrão, sendo suas leituras tomadas em pontos ao longo da amplitude da faixa de sua escala.

Padrão utilizado

Descrição:	Espectro:	Modelo:	Série:
Fonte de nêutrons	Am-241/Be-9	SN 4	80

Data de emissão do certificado: Rio de Janeiro, 9 de novembro de 2011.

Executante Responsável técnico

Estes resultados referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições especificadas no texto deste Certificado, não sendo extensivo a quaisquer outros instrumentos. Sua reprodução só poderá ser completa e dependerá da autorização formal do LNMRI.

Laboratório Designado pelo INMETRO. Integrante da Rede de Laboratórios de Dosimetria Padrão Secundário da AIEA
Centro de Colaboração da Organização Mundial de Saúde para Dosimetria das Radiações

Av. Salvador Allende, s/nº - Recreio dos Bandeirantes - CEP 22780-160 – Rio de Janeiro – RJ
Tel.: (21)2173-2862 - Fax: (21)2173-2863 – e-mail: cliente@ird.gov.br

IRD - Instituto de Radioproteção e Dosimetria
LNMRI - Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes

Certificado de Calibração

Identificação do certificado

Certificado Nº: LNMRI	/2011	Data da Calibração: 10/03/2011	OS Nº:	/2011	Página: 2/2

Resultados

Taxa de equivalente de dose ambiente (MADE)	Faixas calibradas (cpm)	Indicação média do instrumento		Incerteza expandida para 95,45 % (cpm)	Fator de abrangência (k)
		Antes do ajuste (cpm)	Sem ou após o ajuste (cpm)		
20 µSv/h	X1 (20%)	119	100	13	2,16
50 µSv/h	X1 (50%)	225	238	19	2,02
80 µSv/h	X1 (80%)	314	356	29	2,02
200 µSv/h	X10 (20%)	700	890	79	2,04
500 µSv/h	X10 (50%)	1700	2360	189	2,00
800 µSv/h	X10 (80%)	3000	3800	304	2,00
2,00 mSv/h	X100 (20%)	8000	8000	692	2,00
5,00 mSv/h	X100 (50%)	24800	24800	1984	2,00
5,00 mSv/h	X1000 (5%)	20000	20000	2926	2,00

Laboratório onde foi realizada a calibração: Laboratório de Nêutrons - LN/LNMRI.

Estes resultados referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições especificadas no texto deste Certificado, não sendo extensivo a quaisquer outros instrumentos. Sua reprodução só poderá ser completa e dependerá da autorização formal do LNMRI.

Laboratório Designado pelo INMETRO. Integrante da Rede de Laboratórios de Dosimetria Padrão Secundário da AIEA
Centro de Colaboração da Organização Mundial de Saúde para Dosimetria das Radiações

Av. Salvador Allende, s/nº - Recreio dos Bandeirantes - CEP 22780-160 – Rio de Janeiro – RJ
Tel.: (21)2173-2862 - Fax: (21)2173-2863 – e-mail: cliente@ird.gov.br