INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

ESTUDO E LEVANTAMENTO DE PARÂMETROS PARA MONTAGEM DE UM LABORATÓRIO DE PRODUÇÃO DE FONTES RADIOATIVAS UTILIZADAS NA VERIFICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS

ERICA GAUGLITZ

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

Orientadora:
Dra. Maria Elisa Chuery Martins Rostelato

São Paulo

2010

Aos meus pais Francisco (*in memoriam*) e Terezinha
Por todo apoio que recebi.

“Um Cientista em seu laboratório não é um mero técnico: ele também é uma criança que confronta fenômenos naturais que o impressionam como se eles fossem contos de fadas ".
Marie Curie

“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina.”
Cora Coralina

“A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein

“A confiança é um ato de fé, e esta dispensa raciocínio.”

Carlos Drummond de Andrade

“Há um silêncio dentro de mim. E esse silêncio tem sido a fonte de minhas palavras."

Clarice Lispector

“Não basta dirigir-se ao rio com a intenção de pescar peixes; é preciso levar também a rede.”

Provérbio chinês

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin

“O campo da derrota não está povoado de fracassos, mas de homens que tombaram antes de vencer.”
Abraham Lincoln

AGRADECIMENTOS

À Dra. Maria Elisa Chuery Martins Rostelato, pela confiança e orientação na realização deste trabalho.

Ao IPEN, especialmente ao Centro de Tecnologia das Radiações, representado pelo Dr. Wilson Aparecido Parejo Calvo, gerente do CTR.

Ao Msc. Hélio Rissie Nagatomy, pelas contribuições e auxilio nas medições das fontes, confiança, incentivo e amizade.

À Dra. Kátia Aparecida Fonseca Hilário pela valiosa ajuda e esclarecimentos em proteção radiológica.

Ao Dr. Almy Anacleto Rodrigues da Silva pelas contribuições e esclarecimentos na realização deste trabalho.

Ao Dr. Carlos Alberto Zeituni pelas discussões e esclarecimentos referentes a normas e padronizações para instalação do laboratório.

Ao José Laércio de Carvalho pelo monitoramento radiológico durante a realização das medidas linearidade.

A Dra. Eneida da Graça Guilherme e Dra. Adir Janete Godoy dos Santos, pela amizade, incentivo, respeito e compreensão que perpetuam desde os tempos da faculdade.

Ao Msc. Gustavo Bernardes Fanaro pelas sugestões, pelo incentivo e compreensão em todos os momentos.

Aos meus amigos e colegas do IPEN: Heveline, Amanda, Robson, Romério, Kelly, Danilo, Patrícia, Eduardo, Renato, Michel, João, Marcelo e Carla.

Aos amigos que me acompanharam e apoiaram, em toda a trajetória para a concretização deste trabalho: Daniela Dutra, Fernanda Lima, Juliana Gody, Marcia Ribeiro, Michele Rocha, Patrícia Sanae.

A minha família em especial a minha mãe Terezinha, irmã Daniela, meu cunhado Ronaldo, minha sobrinha Anna, as minhas tias e tios Inês, Nair, Ciro e Nelson.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram com a realização deste trabalho.

ESTUDO E LEVANTAMENTO DE PARÂMETROS PARA MONTAGEM DE UM LABORATÓRIO DE PRODUÇÃO DE FONTES RADIOATIVAS UTILIZADAS NA VERIFICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS

ERICA GAUGLITZ

RESUMO

Este trabalho apresenta o levantamento de parâmetros para implementação adequada e segura de pisos, portas, janelas, bancadas, capelas entre outros, de um laboratório radioquímico. A disposição de cada item segue orientações de guias, normas nacionais da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e internacional da Agencia Internacional de Energia Atômica (IAEA), com objetivo de garantir a proteção radiológica do trabalhador e do ambiente. A disposição adequada dos itens do laboratório radioquímico, garante a qualidade e segurança na produção de fontes radioativas seladas de ^{57}Co ^{137}Cs e ^{133}Ba com atividades 185, 9.3 e 5.4 MBq respectivamente. Estas fontes são utilizadas na verificação de medidores de atividade, equipamento que todo Centro de Medicina Nuclear deve ter disponível segundo recomendações da norma CNEN-NN-3.05 "Requisitos de Radioproteção e Segurança para Serviços de Medicina Nuclear" para verificação da atividade de radiofármacos que serão administrados nos pacientes para fins de diagnóstico e terapia.

Um medidor de atividade fora adquirido pelo laboratório de produção de fontes, com o qual foram realizados os testes de precisão, exatidão, reprodutibilidade e linearidade, que devem apresentar resultados dentro dos limites estabelecidos na norma CNEN-NN-3.05.

Palavras chaves: Laboratório radioquímico, medidor de atividade e fontes radioativas seladas.

STUDY AND SURVEY OF ASSEMBLING PARAMETERS TO A RADIOACTIVE SOURCE PRODUCTION LABORATORY USED TO VERIFY EQUIPMENTS

ERICA GAUGLITZ

ABSTRACT

This paper presents a survey of parameters for the proper and safe flooring, doors, windows, fume hoods and others, in a radiochemical laboratory. The layout of each item follows guidelines and national standards of the National Commission of Nuclear Energy (CNEN) and the International Atomic Energy Agency (IAEA), aiming to ensure the radiological protection of workers and environment.

The adequate items arrangement in the radiochemical laboratory ensures quality and safety in the production of ^{57}Co ^{137}Cs and ^{133}Ba radioactive sealed sources, with activities 185, 9.3 and 5.4 MBq, respectively. These sources are used to verify meter activity equipment and should be available throughout the Nuclear Medicine Center, following the recommendations of CNEN-NN-3.05 standard "Requirements for Radiation Protection and Safety Services for Nuclear Medicine", to verify the activity of radiopharmaceuticals that are administered in patients, for diagnosis and therapy.

Verification of measuring activity equipment will be used to perform accuracy, reproducibility and linearity tests, which should show results within the limits specified in the standard CNEN-NN-3.05.

Key words: radiochemical laboratory, measuring activity and sealed radioactive sources.

SUMÁRIO

PÁGINA

1 INTRODUÇÃO 12

2 OBJETIVOS 15

3 REVISÃO DA LITERATURA 16

3.1 Laboratórios de Marie e Pierre Curie 17

3.2 Proteção Radiológica 19

3.2.1 Grandezas e Unidades Empregadas em Radioproteção 21

3.2.1.1 Atividade 21

3.2.1.2 Dose 22

3.2.1.3 Contaminação Radioativa 24

3.3 Normas 24

3.3.1 Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica (CNEN-NN-3.01) 24

3.3.2 Requisitos de Radioproteção e Serviços de Medicina Nuclear (CNEN-NN-3.05) 25

3.3.3 Licenciamento de Instalações Radioativas (CNEN-NE-6.02) 26

3.3.4 Gerência de Rejeitos Radioativos em Instalações Radioativas (CNEN-NE-6.05) 28

3.3.5 Proteção radiológica- Fontes Radioativas Seladas- Requerimentos Gerais e Classificação (ISO 2919) 29

3.3.6 Proteção radiológica- Fontes radioativas seladas – Métodos de testes de estanqueidade (ISO 9978) 31

3.3.7 Iluminância de Interiores (NBR 5413) 33

3.3.8 Equipamento de Proteção Individual- EPI (NR-6) 34

3.3.9 Atividades e Operações Insalubres (NR-15) 34

3.3.10 Atividades e Operações Perigosas (NR-16) 35

3.3.11 Ergonomia (NR-17) 35

3.3.12 Proteção Contra Incêndio (NR-23) 36

3.3.13 Sinalização de Segurança (NR-26) 36

3.4 Fontes Radioativas Sólidas 38

3.5 Detectores a Gás 39
3.6 Medidores de Atividade 40
3.7 Conceitos Metrológicos 42
3.7.1 Exatidão e Precisão 43
3.7.2 Reprodutibilidade 44
3.7.3 Linearidade 44
3.8 Distribuição t-Student 45
4. REQUISITOS FÍSICOS LABORATORIAIS 46
4.1 Piso 46
4.2 Parede 48
4.3 Janelas 48
4.4 Portas 48
4.5 Bancadas 49
4.6 Pia 51
4.7 Capela 52
4.8 Iluminação 54
4.9 Equipamentos de Monitoração e Proteção Individual 54
4.10 Testes em Medidores de Atividade 54
4.10.1 Testes de Precisão e Exatidão 55
4.10.2 Teste de Reprodutibilidade 56
4.10.3 Teste de Linearidade 57
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 59
5.1 Piso 59
5.2 Parede 59
5.3 Porta 59
5.4 Pia 60
5.5 Bancada 61

5.6 Capela 61
5.7 Equipamento de monitoração individual e de área 63
5.8 Medidor de atividade 65
5.8.1 Testes de Exatidão e Precisão 65
5.8.2 Testes de Reprodutibilidade 66
5.8.3 Testes de Linearidade 68
6. CONCLUSÕES 71
ANEXO A 72
ANEXO B 74
ANEXO C 76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 78

LISTA DE FIGURAS

PÁGINA

FIGURA 1 - Esquema do experimento de Rutherford. 16
FIGURA 2 - Galpão da Escola de Física e Química. 17
FIGURA 3 - Marie Curie e Pierre no laboratório. 18
FIGURA 4 - Operárias na fábrica de relógios. 19
FIGURA 5 – Decaimento radioativo. 22
FIGURA 6 - Fontes radioativas sólidas produzidas no IPEN 39
FIGURA 7 - Faixas de tensão de detectores gasosos. 40
FIGURA 8 - Esquema de um medidor de atividade 42
FIGURA 9 - Diferenças entre exatidão e precisão. 44
FIGURA 10 - Distribuição normal e distribuição t de Student. 45
FIGURA 11 - Símbolo internacional da radiação ionizante 49
FIGURA 12 - Bancada do tipo central ou castelo. 50
FIGURA 13 - Bancada do tipo península. 50
FIGURA 14 - Bancada do tipo murada. 51
FIGURA 15– Entrada de ar do laboratório má posicionada 53
FIGURA 16 – Entrada de ar do laboratório posicionada corretamente 53
FIGURA 17 - Fontes radioativas seladas ^{57}Co, ^{137}Cs e ^{133}Ba. 55
FIGURA 18 - Fonte de ^{131}I. 58
FIGURA 19 - Porta do laboratório. 60
FIGURA 20 - Pia do laboratório. 60
FIGURA 21 - Capela de exaustão do laboratório. 62
FIGURA 22 - Teste de velocidade do fluxo de ar. 62
FIGURA 23 - Caixa de retenção do conteúdo radioativo descartado. 63
FIGURA 24 - Dosímetros de pulso e tórax 64
FIGURA 25 - Automess-Teletector. 64
FIGURA 26 - Medidor de atividade Capintec CRC 15R 65
FIGURA 27 - Teste de reprodutibilidade da fonte de ^{137}Cs 68
FIGURA 28 - Gráfico da linearidade da fonte de ^{131}I. 70

LISTA DE TABELAS

PÁGINA

TABELA 1- Clínicas cadastradas por estado junto CNEN no Brasil. 12
TABELA 2 – Valores para fator de qualidade 23
TABELA 3 - Limites de doses anuais. 25
TABELA 4 - Classificação de fontes seladas de acordo com a performance para utilização ... 30
TABELA 5 - Classificação de desempenho das fontes seladas 31
TABELA 6 - Seleção dos métodos de testes de vazamento 32
TABELA 7 – Fatores determinantes da iluminância adequada. 33
TABELA 8 - Atividades das fontes radioativas solidas e meias vidas 38
TABELA 9 – Classificação dos revestimentos de alto desempenho 47
TABELA 10 - Medidas de atividade das fontes de referência. 66
TABELA 11 - Medidas de reprodutibilidade da fonte de ^{137}Cs. 67
TABELA 12 - Medidas de linearidade da fonte de ^{131}I 69

1 INTRODUÇÃO

A história da medicina nuclear e dos laboratórios radioquímicos, inicia-se com a própria história das radiações. Descoberta por Röetgen e estudada por Becquerel, Pierre e Marie Curie e Rutherford no final do século XIX e nos primeiros anos do século XX. A medicina nuclear se fortaleceu após a Segunda Guerra Mundial com o desenvolvimento dos reatores nucleares que possibilitaram a produção de radionuclídeos em maior escala[1-5].

No Brasil com a criação da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) em 1956, órgão responsável por estabelecer limites de dose e critérios para manipulação, aquisição, estocagem e liberação de rejeitos radioativos no Brasil e o vigor da norma CNEN-NN-3.05 "Requisitos de radioproteção e segurança para serviços de medicina nuclear" de 1996 veio o estabelecimento de critérios para funcionamento seguro e com qualidade destes serviços[6,7,8]. Esta norma orienta quanto à disposição física dos serviços de medicina nuclear e relaciona os equipamentos que nela fazem-se necessário para fins de diagnóstico e terapia, dentre eles podemos ressaltar o uso de medidores de atividade utilizados para verificação da atividade de um radiofármaco que será administrado em um paciente[7]. Para garantir o adequado funcionamento dos medidores de atividade, são estipulados ensaios normatizados pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) e a CNEN utilizando-se fontes radioativas seladas de ^{57}Co, ^{137}Cs e ^{133}Ba. Os testes avaliam a exatidão, precisão, reprodutibilidade e linearidade da resposta do equipamento[7,8].

Segundo dados da revista Scientific American Brasil, em 2002 mais de dois milhões de pessoas foram beneficiadas com uso de radiofármacos, o que evidencia a necessidade de um controle de qualidade rigoroso, nas avaliações dos equipamentos utilizados[9]. Para que os pacientes não venham a receber doses menores do que as necessárias e tenham que fazer um novo exame ou até mesmo para que não recebam doses excessivas. Em outubro de 2007 havia 281 clínicas de medicina nuclear cadastradas junto a CNEN, sendo que este número ultrapassado em janeiro de 2010 chegando a 335 clínicas cadastradas (TAB. 1)[10].

TABELA 1- Clínicas cadastradas por estado junto CNEN no Brasil[10].

Estado (UF)	Número de Clínicas
AL	5
AM	1
BA	11
CE	7
DF	7
ES	10
GO	6
MA	4
MG	36
MS	3
MT	4
PA	6
PB	3
PE	11
PI	1
PR	28
RJ	44
RN	4
RS	32
SC	10
SE	2
SP	98
TO	2

A implementação de um laboratório radioquímico, visa atender as necessidades deste mercado disponibilizando sua produção nacional, objetivando a redução dos custos relacionados à importação.

A disposição física dos laboratórios radioquímicos denominados "laboratórios quentes", por neles haver o uso de materiais radioativos, não é radicalmente diferente dos laboratórios químicos convencionais, o que existe é uma preocupação maior com a proteção radiológica do trabalhador e do ambiente, garantindo assim que os níveis de radiação sejam mantidos tão baixos quanto razoavelmente alcançável de acordo com principio ALARA (as

low as reasonably achievable)[11]. Assim, quando se inicia o projeto de um laboratório radioquímico, diversos fatores devem ser considerados como[12].

a) avaliação do seu posicionamento em relação à estrutura do lugar onde ele estará disposto ou será construído;
b) a quantidade e escala de materiais radioativos que serão recebidos, produzidos e dispensados;
c) quais os tipos de materiais a serem manipulados e em que níveis de atividade;
d) seu plano de proteção radiológica;
e) o número de funcionários necessários para o trabalho e os equipamentos de proteção individual e de monitoramento necessários;
f) disposição de pias, bancadas, janelas, portas entre outros;
g) o gerenciamento de seus rejeitos;
h) equipamentos de análise e monitoração e
i) sistema de qualidade.

Estes fatores devem ser considerados antes do inicio da construção ou reforma de um laboratório já existente.

2 OBJETIVOS

- Efetuar estudo e o levantamento de parâmetros físicos e estruturais para montagem de um laboratório radioquímico, objetivando a produção de fontes radioativas seladas de ^{57}Co, ^{133}Ba e ^{137}Cs que são utilizadas para verificação de medidores de atividade disponíveis em Serviços de Medicina Nuclear.

- Adequar o laboratório radioquimico do Centro de Tecnologia das Radiações-CTR/IPEN, as normas vigentes, que orientam quanto à proteção física do trabalhador e a proteção do ambiente, ao licenciamento junto a CNEN, ao gerenciamento de seus rejeitos, bem como a toda disposição física.

- Realizar testes de precisão, exatidão, reprodutibilidade e linearidade no medidor de atividade já disponível no laboratório, utilizando fontes radioativas seladas de referência.

3 REVISÃO DA LITERATURA

A história nuclear teve seu início a partir do descobrimento dos raios x por Willian Conrad Röentgen em 1895. A partir desta descoberta foi que o físico francês Antonie Henri Becquerel em 1896, após efetuar uma série de testes com substâncias fluorescentes e fosforescentes, anunciou que um sal de urânio, com o qual realizava seus experimentos, emitia radiações espontaneamente e que essas radiações apresentavam a propriedade de velar chapas fotográficas mesmo quando estas estavam envolvidas em papel preto[3-5].

Em 1899, Ernest Rutherford, colocou uma amostra de material radioativo dentro de um recipiente de chumbo o qual continha um orifício e uma placa de sulfeto de zinco à frente e duas placas polarizadas com cargas distintas entre eles. Devido ao fato da radiação produzir um ponto brilhante na placa, Rutherford constatou que o feixe luminoso apresentava três tipos de radiações: alfa, beta e gama (FIG.1)[4,5].

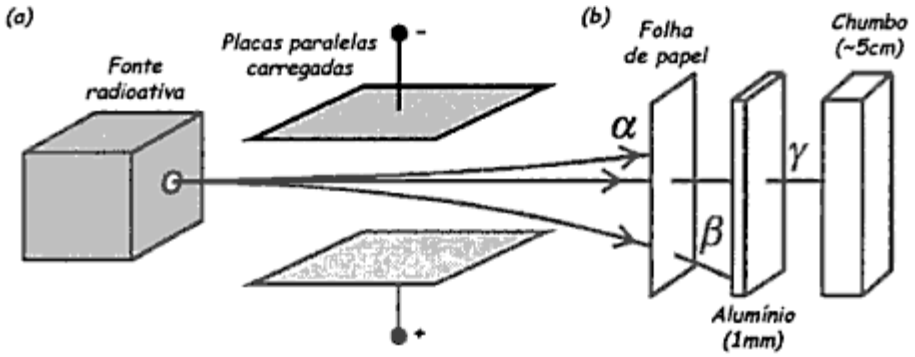


FIGURA 1 - Esquema do experimento de Rutherford[5].

A radiação α é constituída por núcleos de hélio, com dois prótons e dois nêutrons, a radiação β é constituída por elétrons que podem ser freados por alguns milímetros

de material sólido ou líquido, já a radiação γ é uma onda eletromagnética de alta energia, muito penetrante e por isso atravessa com mais facilidade a maioria dos materiais[4, 5].

3.1 Laboratórios de Marie e Pierre Curie

A descoberta dos raios X ganhou notoriedade no século XIX, entretanto, poucos cientistas deram atenção à radioatividade. Nessa época Marie Curie desconhecia as causas e os efeitos da radioatividade, mas queria trabalhar com algo totalmente novo, onde pudesse fazer realizar pesquisas práticas em laboratório, em lugar das tediosas pesquisas em bibliotecas[15].

Em 16 de dezembro de 1987, Marie e Pierre Curie começaram a trabalhar em um grande galpão utilizado para dissecação de animais na Escola Municipal de Física e Química Industrial de Paris[15-17]. O local não possuía um sistema de ventilação para conter os vapores tóxicos e o teto apresentava goteiras (FIG.2 e FIG. 3)[16].

FIGURA 2 - Galpão da Escola de Física e Química[16].

Acostumada com laboratórios modernos, Marie teria descrito o lugar da seguinte forma:

"Alguma coisa entre um estábulo e um depósito de batatas. Se não tivesse visto a mesa de trabalho ou a aparelhagem química, pensaria que era uma brincadeira"[16].

FIGURA 3 - Marie Curie e Pierre no laboratório[17].

As pesquisas eram intensas, Marie e Pierre passavam horas no galpão e chegavam inclusive a preparar e fazer as refeições no local. Ambos estavam frustrados por não terem um local adequado, Marie comentou:

"Se tivéssemos um laboratório mais sofisticado, teríamos descoberto mais coisas e nossa saúde não estaria tão prejudicada"[17].

A oportunidade de ganhar dinheiro surgiu ao patentear o processo industrial que utilizavam para extração de sais de urânio, porém, não era vista com bons olhos por ambos, como diversos cientistas da época, eles acreditavam que a pesquisa deveria ser desinteressada, e realizada com fim em si mesma e sem gerar lucros materiais[17].

3.2 Proteção Radiológica

Os efeitos nocivos da radiação foram estudados com maior intensidade em 1924 na cidade de Nova York devido aos casos de câncer em jovens que utilizavam maquiagem que continha rádio na formulação e em Nova Jersey devido ao aparecimento de lesões em operárias que trabalhavam pintando painéis e ponteiros luminosos de relógios com tinta a base de composto de rádio (FIG.4)[3].

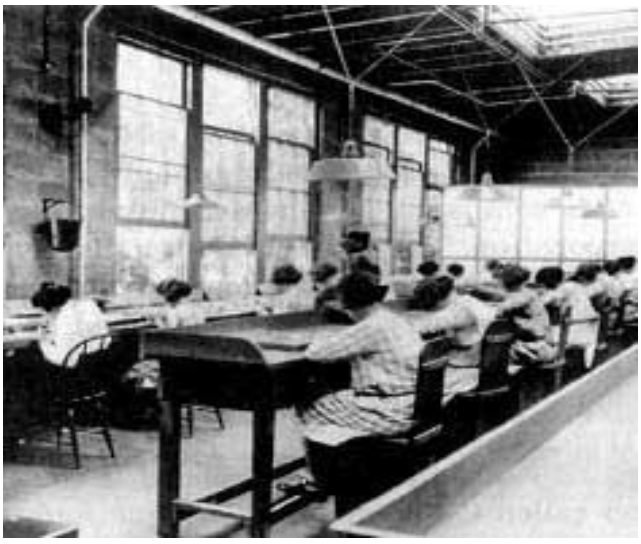


FIGURA 4 - Operárias na fábrica de relógios[3].

Vários funcionários de Marie morreram de anemia e leucemia durante a década de 20 e a própria Marie já apresentava sintomas, inclusive de anemia, zumbidos no ouvido e exaustão crônica.

A escola onde trabalhava não pesquisou os problemas de saúde associados ao rádio. As regras da instituição eram de economizar água, gás, eletricidade, não fumar no laboratório, trocar de roupa antes de sair do laboratório e respirar profundamente ar fresco ao sair.

Quando os funcionários de Marie morriam, ela os culpava por não terem respirado bastante ar puro ao saírem do laboratório. Marie Curie morreu aos 67 anos, com uma febre desconhecida e dores no corpo, suspeitas da sua manipulação com os tais elementos radioativos descobertos com seu marido[3].

Com a suspeita da relação entre a alta exposição a materiais radioativos e mortes por câncer, a comunidade científica criou um novo ramo da ciência, a proteção radiológica, com a finalidade de proteger os indivíduos, regulamentando e limitando o uso das radiações em condições aceitáveis[3].

A principal finalidade da proteção radiológica é proteger a pessoa e seu ambiente dos efeitos nocivos das radiações ionizantes e das substâncias radioativas e ao mesmo tempo possibilitar a raça humana de desfrutar os benefícios associados ao uso da energia atômica. Assim em 1928, foi estabelecida uma comissão de peritos, a ICRP – International Commission on Radiological Protection, órgão científico responsável por elabora recomendações sobre ao uso seguro de materiais radioativos e da radiações ionizantes[3].

Existem três princípios de radioproteção, estabelecidos em normas nacionais e internacionais que levam a condução do uso da radiação de forma segura, são elas[4, 18,19].

a) Justificação: qualquer prática envolvendo radiação ionizante ou irradiação de pessoas com radiação ionizante, deve ser justificada em relação a outras alternativas e produzir um benefício positivo para a sociedade, ou seja, o benefício em si supera qualquer possível dano associado ao emprego da radiação ionizante, levando em conta fatores sociais e econômicos, entre outros.

b) Otimização: com exceção de práticas terapêuticas em medicina, quaisquer outras exposições à radiação devem ser otimizadas, ou seja, deve ser tão baixas quanto razoavelmente exeqüível – ALARA (as low as reasonably achievable), levando-se em consideração fatores sociais e econômicos.

A otimização de Proteção Radiológica consiste em fazer o valor de (X + Y) mínimo para que o benefício líquido seja máximo, onde X é o custo da proteção radiológica e Y o custo do detrimento causado pela radiação

c) Limitação de Dose: de acordo com a filosofia de limitação da dose individual, nenhum trabalhador sujeito a radiações deve se exposto à radiação sem que:

- seja necessário;
- tenha conhecimento dos riscos radiológicos associados ao seu trabalho e
- esteja adequadamente treinado para o desempenho seguro das suas funções.

Os limites anuais para trabalhadores e indivíduos do público encontram-se estabelecidos na norma CNEN-NN-3.01..

3.2.1 Grandezas e Unidades Empregadas em Radioproteção

Algumas grandezas são exclusivamente empregadas no campo da proteção radiológica e apresentam fatores de ponderação que permitem considerar diferentes tipos de energia de radiação que incide sobre um corpo, levando em conta a radiosensibilidade relativa dos diferentes tipos de tecidos do organismo[19,20].

3.2.1.1 Atividade

A atividade é medida em desintegrações por unidade de tempo (FIG.5). A fórmula que a expressa está representada abaixo:

$$A = dN/dt \qquad (1)$$

Onde: N é o número de átomos da amostra que confere transformações por unidade de tempo dt.

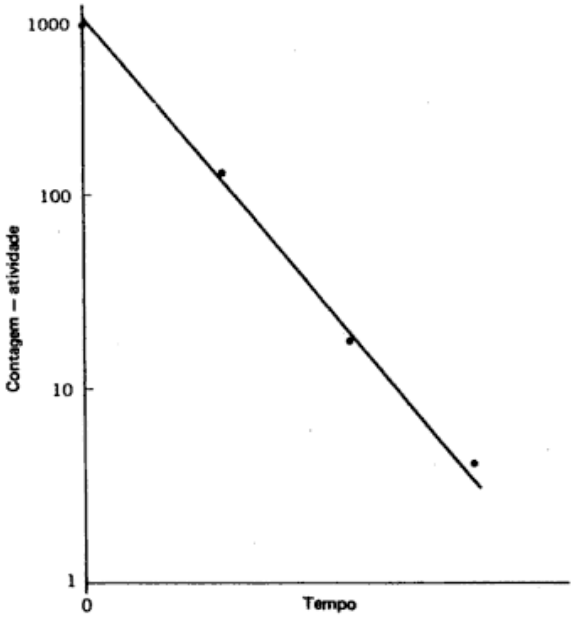


FIGURA 5 – Decaimento radioativo[21].

A unidade atual da atividade é o becquerel (Bq) e 1 Bq corresponde a uma desintegração por segundo. A unidade antiga, porém ainda empregada, é o curie (Ci) que corresponde a $3{,}7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo.

A atividade de uma substancia pode ser afetada pela radiação de fundo dos raios cósmicos ou pelo decaimento de minérios nos matérias de construção ou no subsolo[4].

3.2.1.2 Dose

O conceito de dose é utilizado em farmacologia para designar a quantidade de uma substancia aplicada em um ser vivo por unidade de peso do corpo humano para se obter um certo efeito biológico. Na proteção radiológica o objetivo é determinar o efeito causado por uma dose de radiação ionizante[3,4,13].

A dose de radiação recebida por um indivíduo pode ser avaliada por meio das seguintes grandezas:

a) **Exposição:** é simbolizada pela letra X e refere-se a uma medida da habilidade ou capacidade dos raios X em produzir ionizações no ar. A unidade é o coulomb por kilograma (C/kg)

b) **Dose absorvida:** é simbolizada pelo símbolo D e definida como a quantidade de energia depositada pela radiação ionizante na matéria, num determinado volume. Ela é válida para todos os tipos de radiação ionizante (X, γ, α, β) e qualquer tipo de material absorvedor.

c) **Dose equivalente:** é simbolizada pela letra H. Ela considera fatores como o tipo de radiação ionizante, a energia e a distribuição da radiação no tecido, para poder avaliar os possíveis danos biológicos. A letra D expressa à dose absorvida num ponto de interesse do tecido ou órgão e Q é um fator de qualidade da radiação no ponto de interesse que assume valores específicos (TAB.2).

$$H = D \cdot W_r \qquad (2)$$

d) **Dose equivalente efetiva:** é simbolizada pela letra H_E é uma grandeza que expressa à soma dos produtos de todas as doses equivalentes H pelos respectivos fatores de ponderação W_t do órgão ou tecido irradiado. O valor de H_E pode ser expresso como:

$$H_E = \sum W_T \cdot H_T \qquad (3)$$

TABELA 2 – Valores para fator de qualidade[4].

Tipo de Radiação	**Fator de Qualidade (Q)**
Raios-X, Raios Gama, Elétrons	1
Prótons de alta energia	10
Nêutrons de energia desconhecida	20
Partículas Alfa, produtos de fissão	20

3.2.1.3 Contaminação Radioativa

O contato de um material radioativo (fontes não seladas) ou que tenha perdido a selagem pode vir a contaminar um indivíduo, uma superfície ou um material[3]. Existem dois tipos de contaminação: de superfície quando o contaminante radioativo está localizado na superfície dos objetos, nas áreas de trabalho ou na pele das pessoas e a contaminação "fixa" quando não for transferível de uma superfície contaminada para a outra não contaminada.

3.3 Normas

Para uma instalação nuclear entrar em operação, é necessário que ela siga as orientações do órgão competente no campo nuclear, no caso do Brasil da Comissão Nacional de Energia Nuclear. As principais normas para obtenção do licenciamento da instalação encontram-se citadas a seguir, e outras normas necessárias para disposição estrutural e de segurança de uma laboratório.

3.3.1 Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica (CNEN-NN-3.01)

Esta norma de janeiro de 2005 estabelece os requisitos básicos de proteção radiológica das pessoas em relação à radiação ionizante. Seus requisitos aplicam-se às exposições ocupacionais, exposições médicas e exposições do público, em situações de exposições normais ou exposições potenciais. Os limites de dose anuais permitidos para os indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) e os indivíduos do público são apresentados na (TAB. 3)[22].

TABELA 3 - Limites de doses anuais[a][22].

Grandeza	Órgão	Indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE)	Indivíduo do público
Dose efetiva	Corpo inteiro	20 mSV[b]	1 mSv[c]
	Cristalino	150 mSv	15 mSv
Dose equivalente	Pele [d]	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	-

[a] Para fins de controle administrativo efetuado pela CNEN, o termo dose anual deve ser considerado como dose no ano calendário, isto é, no período decorrente de janeiro a dezembro de cada ano.

[b] Média ponderada em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano.

[c] Em circunstâncias especiais, a CNEN poderá autorizar um valor de dose efetiva de até 5 mSv em um ano, desde que a dose efetiva média em um período de 5 anos consecutivos, não exceda a 1 mSv por ano.

[d] Valor médio em 1 cm^2 de área, na região mais irradiada.

Os valores de dose efetiva aplicam-se à soma das doses efetivas, causadas por exposições externas, com as doses efetivas comprometidas, causadas por incorporações ocorridas no mesmo ano. Para mulheres grávidas ocupacionalmente expostas, as tarefas devem ser controladas de maneira que seja improvável que, a partir da notificação da gravidez, o feto receba dose efetiva superior a 1 mSv durante o período de gestação restante. Indivíduos com idade inferior a 18 anos não podem estar sujeitos a exposições ocupacionais.

3.3.2 Requisitos de Radioproteção e Serviços de Medicina Nuclear (CNEN-NN-3.05)

Esta norma de abril de 1996 aplica-se aos serviços de medicina nuclear (SMN), nos quais são utilizados radiofármacos para fins de diagnóstico e terapia. Os laboratórios radioquímicos não estão contemplados nesta norma, porém é importante citá-la, porque são estipulados os testes que devem ser realizados nos medidores de atividade (curiômetro), que é utilizado para avaliação da medida da atividade do radiofármaco que será administrado no paciente[7].

Entre outras deliberações a norma estipula o número de funcionários capacitados que os serviços de medicina nuclear devem possuir, os equipamentos para avaliação de diagnóstico e terapia juntamente com suas respectivas calibrações, as dependências, plano de radioproteção e seu respectivo gerenciamento de rejeitos.

Os testes de verificação para os medidores de atividade devem ser realizados utilizando-se fontes radioativas seladas com atividades conhecidas. Estes testes são:

a) Teste de exatidão: realizados semestralmente, com fontes de ^{57}Co, ^{133}Ba, ou ^{137}Cs, sendo permitidos desvios percentuais de até 10%, com uma confiabilidade de 90%;
b) Teste de precisão: realizados semestralmente, com fontes de ^{57}Co, ^{133}Ba, ou ^{137}Cs, sendo permitidos desvios percentuais de até 5%, com uma confiabilidade de 95%.
c) Teste de reprodutibilidade: realizados anualmente, com fonte de ^{57}Co ou ^{133}Ba, sendo permitido um desvio percentual de até 5%, com uma confiabilidade de 95%.
d) Teste de linearidade: realizados semestralmente, com fonte de ^{99m}Tc, sendo permitida uma variação máxima de $\pm$ 20%.

Os resultados obtidos nos testes devem constar em um sistema de registro, no qual deverá haver a discriminação da data de sua realização, o nome profissional que realizou o teste e o visto do supervisor de radioproteção.

3.3.3 Licenciamento de Instalações Radioativas (CNEN-NE-6.02)

Esta norma de julho de 1998 estabelece todo o processo de licenciamento que uma instalação radioativa deve submeter junto ao órgão, sendo as atividades relacionadas com a localização, construção, operação e modificações[23].

A norma classifica as instalações radioativas da seguinte forma:

1) Instalações que utilizam fontes seladas, sendo esta classificada como:

a) Grupo I: instalações que utilizam fontes seladas de grande porte em processos industriais induzidos por radiação.

b) Grupo II: instalações que utilizam fontes seladas em equipamentos para fins de radioterapia e radioagrafia industrial.
c) Grupo III: Instalações que utilizam fontes seladas para fins que não outros citados nos itens a e b.

2) Instalações que utilizam fontes não seladas, sendo estas classificadas como:

a) Grupos IV, V ou VI: instalações onde se manipulam, utilizam ou se armazenam radionuclídes cujas classes e limites de atividade total são expostos na tabela 1 da norma, a qual leva em consideração dentre outros fatores a classificação dos radionuclídeos de acordo com sua radiotoxicidade.

3) Instalações que utilizam aceleradores de partículas

a) Grupo IX: instalações que utilizam aparelhos de raios x ou aceleradores de partículas de grande porte.
b) Grupo X: instalações que utilizam aparelhos que não citados no item a.

O laboratório de produção de fontes radioativas seladas, pertence ao grupo VI, devendo então passar pelo processo de concessão de licença de operação seguindo as etapas:

a) Aprovação prévia, que refere-se ao ato administrativo pelo qual a CNEN aprova a viabilidade do local proposto para uma instalação radioativa;
b) Licença de construção: refere-se a um ato administrativo pelo qual a CNEN permite a construção da instalação após verificar sua viabilidade técnica e também o conceito de segurança do projeto e sua compatibilidade com aprovação prévia;
c) Autorização para aquisição de material radioativo e para operação: atos administrativos em que a CNEN autoriza a efetivação de determinada atividade necessária ao funcionamento da instalação.

3.3.4 Gerência de Rejeitos Radioativos em Instalações Radioativas (CNEN-NE-6.05)

O objetivo desta é estabelecer critérios gerais e requisitos básicos relativos à gerência de rejeitos radioativos nas instalações radioativas, que inclui como parte do processo para obtenção do seu licenciamento. De acordo com a norma gerência de rejeitos radioativos (ou simplesmente gerência) é um conjunto de atividades administrativas e técnicas envolvidas na coleta, segregação, manuseio, tratamento, acondicionamento, transporte, armazenamento, controle e deposição de rejeitos radioativos[24].

Alguns termos importantes são classificados na norma como:

a) Contaminação Radioativa (ou simplesmente Contaminação): a presença indesejável de materiais radioativos em qualquer material, meio ou local e
b) Descontaminação: remoção ou redução da contaminação radioativa, com objetivo de reduzir a radioatividade a níveis estabelecidos pela CNEN.

A norma classifica os rejeitos em categorias segundo o estado físico, natureza da radiação, concentração e taxa de exposição bem como em rejeitos líquidos, sólidos e gasosos e também orienta a realização da segregação dos rejeitos no mesmo local em que forem produzidos, levando em conta as seguintes características:

a) sólidos líquidos ou gasosos;

b) meia vida curta ou longa ($T_{1/2} > 60$ dias);

c) compactáveis ou não compactáveis;

d) orgânicos ou inorgânicos;

e) putrescíveis ou patogênicos, se for o caso;

f) outras características perigosas (explosividade, combustibilidade, inflamabilidade, piroforicidade, corrosividade e toxicidade química).

Os recipientes para segregação, coleta ou armazenamento provisório devem ser adequados às características físicas, químicas, biológicas e radiológicas dos rejeitos para os quais são destinados. Os veículos utilizados em transporte interno de rejeitos devem possuir meios de fixação adequados para os recipientes de modo a evitar danos aos mesmos[24].

A eliminação de rejeitos líquidos, sólidos e/ou gasosos de uma instalação, deve obedecer determinados limites estabelecidos na norma.

3.3.5 Proteção radiológica- Fontes Radioativas Seladas- Requerimentos Gerais e Classificação (ISO 2919)

Esta norma internacional de 15 de fevereiro de 1999 aplica-se a classificação das fontes radioativas seladas com base em teste de desempenho, produção de ensaios, certificação e de marcação[25].

As fontes seladas são materiais radioativos permanentemente selados em uma ou várias cápsulas e/ou associada com um material ao que está intimamente ligado. Essa cápsula e/ou materiais devem ser suficientemente fortes para manter a estanqueidade da fonte selada nas condições de uso e desgaste para o qual foi concebido.

A norma orienta a realização de um conjunto de testes, que o fabricante de fontes radioativas seladas deve efetuar para classificar suas fontes. Os testes dividem-se em vários grupos como: temperatura, pressão, impacto, vibração e punção, devendo ser realizados em diferentes graus de severidade (TAB.4). Os valores aplicados variam de 1 a 6, sendo que testes com valor 1 não são realizados, conforme orienta (TAB.5).

As fontes radioativas seladas que serão produzidas no Centro de Tecnologia das Radiações (CTR), classificam-se em fontes de calibração com atividade maior que 1 MBq, vide (TAB.4).

Os radionuclídeos utilizados para produção das fontes radioativas seladas pertencem ao grupo B de média toxicidade, sendo que o ^{137}Cs pertence ao subgrupo B1 que tem níveis de atividade lixiviáveis de 1 a 30 TBq e não lixiviáveis de 10 a 300 TBq e ^{57}Co ao

subgrupo B2, que possui níveis de atividade de 10 a 300 TBq para lixiviáveis e 100 a 3000 TBq para não lixiviáveis, o ^{133}Ba não está incluso em nenhum grupo e subgrupo desta norma.

TABELA 4 - Classificação de fontes seladas de acordo com a performance para utilização[25].

Fontes Seladas		**Classe das fontes seladas, dependendo do teste**				
		Temperatura	**Pressão**	**Impacto**	**Vibração**	**Punção**
Radiografia Industrial	Fonte Selada	4	3	5	1	5
	Fonte a ser usada em equipamento	4	3	4	1	3
	Radiografia	3	2	3	1	2
Médica	Teleterapia gama	5	3	5	2	4
	Braquiterapia[1)]	5	3	2	1	1
	Aplicador em superfície[2)]	4	3	3	1	2
Indicador gama (média e alta energia)	Fonte desprotegida	4	3	3	3	3
	Fonte no equipamento	4	3	2	3	2
Medidor beta e fontes para baixa energia gama ou análise por fluorescência de raio-x [2)]		3	3	2	2	2
Medidor de poço de petróleo		5	6	5	2	2
Medidor de densidade e umidade portátil		4	3	3	3	3
Aplicações gerais de fontes de nêutron (excluindo inicializador de reator)		4	3	3	2	3
Fontes de calibração com atividade > 1 MBq		**2**	**2**	**2**	**1**	**2**
Fontes Irradiação gama	Categoria I [2)]	4	3	3	2	3
	Categorias II,III e IV[3)]	5	3	4	2	4
Geradores de íons[3)]	Cromatografia	3	2	2	1	1
	Eliminadores de estáticos	2	2	2	2	2
	Detectores de fumaça	3	2	2	2	2

[1)] As fontes desta natureza podem estar sujeitas a severas deformações no uso. Os fabricantes e os usuários podem formular ensaios adicionais.

[2)]Excluindo fontes gasosas.

[3)] "Fontes em equipamentos ou um grupo de fontes podem ser testadas.

TABELA 5 - Classificação de desempenho das fontes seladas[25].

Teste	Classe						
	1	2	3	4	5	6	X
Temperatura	Sem ensaio	-40°C (20 min) +80°C (1h)	-40°C (20 min) +180°C (1h)	-40°C (20 min) +400°C (1h) choque térmico a 20°C	-40°C (20 min) +600°C (1h) e choque térmico a 20°C	-40°C (20 min) +800°C (1h) e choque térmico a 20°C	Ensaio especial
Pressão externa	Sem ensaio	25 kPa absoluto até atmosférico	25 kPa absoluto até 2 MPa absoluto	25 kPa absoluto até 7 MPa absoluto	25 kPa absoluto até 70 MPa absoluto	25 kPa absolutos até 170 MPa absoluto	Ensaio especial
Impacto	Sem ensaio	50 g de1 m ou energia equivalente	200 g de 1 m ou energia equivalente	2 kg de 1 m ou energia equivalente	5 kg de 1 m de energia equivalente	20 kg de 1 m de energia equivalente	Ensaio especial
Vibração	Sem ensaio	3 vezes de 10 min 25 a 500 Hz a 49 m/s² (5 gn)[1)]	3 vezes 10 min 25 a 50 Hz a 49 m/s² (5 g_n)[1)] e 50 a 90 Hz a 0,635 mm de amplitude de pico a pico e de 90 a 500 Hz com 98 m/s² (10 g_n)[1)]	3 vezes 30 min 25 a 80 Hz com 1,5 mm de amplitude de pico a pico e 80 a 2.000 Hz a 196 m/s² (20 g_n) [1)]	Não utilizado	Não utilizado	Ensaio especial
Punção	Sem ensaio	1 g de 1 m ou energia equivalente	10 g de 1 m de energia equivalente	50 g de 1 m de energia equivalente	300 g de 1 m de energia equivalente	1 kg de 1 m de energia equivalente	Ensaio especial

[1)] Amplitude de aceleração máxima

3.3.6 Proteção radiológica- Fontes radioativas seladas – Métodos de testes de estanqueidade (ISO 9978)

Esta norma é aplicada na produção e controle de fontes radioativas seladas, aplicando-se especificamente a testes para avaliação de vazamento nas fontes[26]. No anexo A da norma é apresentada uma tabela com recomendações para que o usuário possa tomar como

guia na escolha do método mais conveniente ao tipo de fonte que irá produzir. As fontes radioativas sólidas de ^{57}Co, ^{137}Cs e ^{133}Ba pertencem à classificação "A" (TAB. 6).

TABELA 6 - Seleção dos métodos de testes de vazamento[26].

Tipos de Fontes	Testes para produção de fontes		Testes para classificação de fontes	
	Preferido	**Segundo Método**	**Preferido**	**Segundo Método**
A- fontes seladas contendo material radioativo A1- Janela única e fina, por exemplo, detectores de fumaça A2- Fontes de referência de baixa atividade, por exemplo, encapsuladas em plástico.	**Imersão (5.1)**	**Vazamento (5.3)**	**Imersão (5.1)**	**Vazamento (5.3)**
A3- Fontes encapsuladas uma ou duas vezes (excluindo Trítio e Radio) para medição, radiografia e Braquiterapia	Imersão (5.1) Hélio (6.1)	Bolhas (6.2)	Imersão (5.1) Hélio (6.1)	Bolhas (6.2)
A4- Fontes encapsuladas uma ou duas vezes de Rádio e outras fontes gasosas	Emanação gasosa (5.2)	Imersão (5.1)	Emanação gasosa (5.2)	Imersão (5.1)
A 5- Fontes encapsuladas duas vezes para teleterapia e fontes de alta atividade de irradiação	Hélio (6.1)	Vazamento (5.3.2)	Imersão (5.1) Hélio (6.1)	Bolhas (6.2)
B- Fontes simuladas seladas Dos tipos A3, A4 e A5			Imersão (5.1) Hélio (6.1)	Bolhas (6.2)
C- Fontes seladas do tipo "Dummy"			Imersão (5.1) Hélio (6.1)	Bolhas (6.2)

A norma denomina quatro tipos de testes de imersão:

a) Teste de imersão em liquido quente;

b) Teste de imersão em liquido fervente;

c) Teste de imersão com um liquido cintilador;

d) Teste de imersão a temperatura ambiente.

As fontes são consideradas estanques, se a atividade detectada não excederem 0,2 KBq (≈ 5nCi).

O segundo método, testes de vazamento pode ser realizado de duas maneiras:

a) Teste de teste de esfregaço a úmido
b) Teste de esfregaço a seco.

A fonte é considerada estanque se a atividade detectada não exceder 0,2 KBq.

3.3.7 Iluminância de Interiores (NBR 5413)

Esta norma estabelece os valores de iluminâncias médias mínimas em serviços para iluminação artificial em interiores, onde se realizem atividades de comércio, indústria, ensino, esporte e outras[27].

A unidade de medida adotada pela norma é o lux que corresponde a incidência perpendicular de 1 lúmen, ou seja, o fluxo luminoso em uma superfície de 1 m^2. Para cada tipo de atividade são estipulados diversos níveis de iluminância que devem ser escolhidos levando-se em consideração diversos fatores como mostra (TAB.7):

TABELA 7 – Fatores determinantes da iluminância adequada[27].

Características da tarefa e do observador	**Peso**		
	-1	0	+1
Idade	Inferior a 40 anos	44 a 55 anos	Superior a 55 anos
Velocidade e precisão	Sem importância	Importante	Crítica
Refletância do fundo da tarefa	Superior a 70%	30 a 70%	Inferior a 30%

Para escolha da iluminância adequada devem ser somados os pesos correspondentes a cada característica da tarefa do operador que pode variar de -1, 0 ou +1), posteriormente deve-se fazer a soma dos três valores correspondentes a idade, velocidade e

precisão e refletância do fundo da tarefa, assim, se o valor obtido for igual a -2 ou -3, deve-se adotar a iluminância inferior do grupo, se a soma for +2 ou +3, deve-se usar a iluminância superior e para outros casos adota-se a iluminância média[27].

3.3.8 Equipamento de Proteção Individual- EPI (NR-6)

Esta norma regulamentadora do Ministério de Trabalho e Emprego (MTE) considera Equipamento de Proteção Individual (EPI), todo dispositivo ou produto, de uso individual utilizado pelo trabalhador, destinado à proteção de riscos suscetíveis de ameaçar a segurança e a saúde no trabalho[28].

Segundo a norma, a empresa é obrigada a fornecer aos empregados gratuitamente, EPI adequado ao risco, em perfeito estado de conservação e funcionamento, nas seguintes circunstâncias:

a) sempre que as medidas de ordem geral não ofereçam completa proteção contra os riscos de acidentes do trabalho ou de doenças profissionais e do trabalho;

b) enquanto as medidas de proteção coletiva estiverem sendo implantadas;

c) para atender a situações de emergência.

Todo EPI deverá apresentar em caracteres indeléveis e bem visíveis, o nome comercial da empresa fabricante, o lote de fabricação e o número do Certificado e Aprovação (CA) ou, no caso de EPI importado, o nome do importador, o lote de fabricação e o número do CA.

3.3.9 Atividades e Operações Insalubres (NR-15)

A atividade insalubre é aquela que está acima dos limites de tolerância. Nesta norma regulamentadora, a atividade insalubre é definida como sendo a concentração ou

intensidade máxima ou mínima, relacionada com a natureza e o tempo de exposição ao agente, que não causará dano à saúde do trabalhador, durante a sua vida laboral[29].

Nos Anexos 1, 2, 3, 5, 11 e 12 desta norma são estabelecidos os limites de tolerância para cada finalidade sendo:

a) Anexo 1: Limites de Tolerância para Ruído Contínuo ou Intermitente;
b) Anexo 2: Limites de Tolerância para Ruídos de Impacto;
c) Anexo 3: Limites de Tolerância para Exposição ao Calor;
d) Anexo 5: Radiações Ionizantes;
e) Anexo 11: Agentes Químicos cuja Insalubridade é Caracterizada por Limite de Tolerância e Inspeção no Local de Trabalho;
f) Anexo 12: Limites de Tolerância para Poeiras Minerais.

Os limites de tolerância para radiações ionizantes segundo a norma devem ser seguidos pela norma CNEN-NE-3.01 ou daquela que venha a substituí-la.

3.3.10 Atividades e Operações Perigosas (NR-16)

A norma regulamentadora NR-16 considera como atividades e operações perigosas[30]:

a) Atividades e operações perigosas com explosivos;
b) Atividades e operações perigosas com inflamáveis;
c) Atividades e operações perigosas com radiações ionizantes ou substancias radioativas.

Nela são assegurados ao trabalhador adicional de periculosidade.

3.3.11 Ergonomia (NR-17)

Esta norma regulamentadora visa a estabelecer parâmetros que permitam a adaptação das condições de trabalho às características psicofisiológicas dos trabalhadores, de

modo a proporcionar um máximo de conforto, segurança e desempenho eficiente[31]. As condições de trabalho incluem aspectos relacionados ao levantamento, transporte e descarga de materiais, ao mobiliário, aos equipamentos e às condições ambientais do posto de trabalho e à própria organização do trabalho.

3.3.12 Proteção Contra Incêndio (NR-23)

Esta norma orienta quanto à proteção de incêndios, ao número de saídas suficientes em caso de incêndio, equipamentos suficientes para combate ao fogo e pessoas treinadas para utilizá-los corretamente[32].

Alguns aspectos importantes da norma referem-se a orientações de largura mínima das portas sendo de 1,20 m, bem como localização de extintores de incêndio, tipos de extintores específicos para cada tipo de fogo sendo estes também classificados na norma como sendo de classe A para materiais de fácil combustão com a propriedade de queimarem em sua superfície e profundidade, classe B para os inflamáveis, produtos que queimam somente em sua superfície, não deixando resíduos, como óleo, graxas, vernizes, tintas, gasolina; classe C que ocorrem em equipamentos elétricos energizados como motores, transformadores, quadros de distribuição, fios, entre outros e os de classe D para elementos pirofóricos como magnésio, zircônio, titânio.

3.3.13 Sinalização de Segurança (NR-26)

Esta norma tem por objetivo fixar as cores que devem ser usadas nos locais de trabalho para prevenção de acidentes, identificando os equipamentos de segurança, delimitando áreas, identificando as canalizações empregadas nas indústrias para a condução de líquidos e gases e advertindo contra riscos. A utilização de cores não dispensa o emprego de outras formas de prevenção de acidentes. O uso de cores deverá ser o mais reduzido possível, a fim de não ocasionar distração, confusão e fadiga ao trabalhador[33].

As cores adotadas pela norma são:

a) Vermelho: deverá ser usado para distinguir e indicar equipamentos e aparelhos de proteção e combate a incêndio.
b) Amarelo: utilizada em canalizações, deve-se utilizar o amarelo para identificar gases não liquefeitos.
c) Branco: passarelas e corredores de circulação, por meio de faixas (localização e largura); direção e circulação, por meio de sinais; localização e coletores de resíduos; localização de bebedouros; áreas em torno dos equipamentos de socorro de urgência, de combate a incêndio ou outros equipamentos de emergência; áreas destinadas à armazenagem; zonas de segurança.
d) Preto: empregado para indicar as canalizações de inflamáveis e combustíveis de alta viscosidade (ex: óleo lubrificante, asfalto, óleo combustível, alcatrão, piche, etc.).
e) Azul: utilizado para indicar "Cuidado!", ficando o seu emprego limitado a avisos contra uso e movimentação de equipamentos, que deverão permanecer fora de serviço.
f) Verde: é a cor que caracteriza "segurança".
g) Laranja: deverá ser empregado para identificar canalizações contendo ácidos; partes móveis de máquinas e equipamentos; partes internas das guardas de máquinas que possam ser removidas ou abertas; faces internas de caixas protetoras de dispositivos elétricos; faces externas de polias e engrenagens; botões de arranque de segurança; dispositivos de corte, borda de serras, prensas.
h) Púrpura: deverá ser usada para indicar os perigos provenientes das radiações eletromagnéticas penetrantes de partículas nucleares.
i) Lilás: para indicar canalizações que contenham álcalis. As refinarias de petróleo poderão utilizar o lilás para a identificação de lubrificantes.
j) Cinza: Cinza claro - deverá ser usado para identificar canalizações em vácuo;

   Cinza escuro - deverá ser usado para identificar eletrodutos.

k) Alumínio: deve ser utilizado em canalizações contendo gases liquefeitos, inflamáveis e combustíveis de baixa viscosidade (ex. óleo diesel, gasolina, querosene, óleo lubrificante, etc.).
l) Marrom: pode ser adotado, a critério da empresa, para identificar qualquer fluído não identificável pelas demais cores.

3.4 Fontes Radioativas Sólidas

As fontes radioativas sólidas são fontes de materiais radioativos imobilizadas em resina equivalente a água com distribuição homogênea em solução aquosa com densidade ao redor de 1g/cm^3; similar a da água. Estas fontes geralmente são emissores gama com energia ao redor de 100 keV a 700 keV com tempo de meia vida longo[34,35] (TAB.8).

TABELA 8 - Atividades das fontes radioativas solidas e meias vidas[8]

Radionuclídeo	Energia-fóton Principal (keV)	Tempo de Meia vida	Atividade MBq
^{57}Co	122	271 dias	185
^{133}Ba	81 e 356	10,7 anos	9,3
^{137}Cs	662	30 anos	7,4

Os radionuclídeos recomendados para aplicação como fontes seladas para verificação dos medidores de atividade são ^{57}Co, ^{133}Ba e ^{137}Cs[7,8].

Estas fontes já foram desenvolvidas no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) e o método utilizado para produção destas fontes baseia-se no procedimento Sahagia[35], método que consiste em obter uma matriz sólida de poliacrilamida, a partir de uma solução aquosa de acrilamida polimerizada, quando exposta a uma alta dose em irradiador de ^{60}Co (FIG. 6).

FIGURA 6 - Fontes radioativas sólidas produzidas no IPEN[34].

Os procedimentos para produção e validação destas fontes devem atender aos critérios estabelecidos nas normas ISO 2919 e ISO 9978[25,26,34].

3.5 Detectores a Gás

Os detectores gasosos estão entre os mais antigos detectores de radiação e tem grande importância para os serviços de medicina nuclear, com uso de medidores de atividade[36].

Foram estudadas seis regiões de tensão, porém somente as regiões II, III e IV foram utilizadas para desenvolver detectores, sendo estes identificados pela tensão em que funcionam (FIG. 7)[37]. Na região I a tensão aplicada produz um campo elétrico muito fraco não sendo capaz de atrair pares de íons para os eletrodos antes de se recombinarem em átomos neutros.

Na região II a carga coletada mantém-se constante em relação à tensão porque a taxa de recombinação é zero e não são produzidas novas cargas. Nesta região a altura do pulso é proporcional a energia transferida na câmara pela radiação incidente, esta região é chamada de região de ionização. A região III produz uma ionização secundária, uma vez que os íons negativos primários, produzidos pela partícula ionizante, são acelerados e adquire energia cinética suficiente para ionizarem outras moléculas do gás, esta região tem nome de região proporcional, onde trabalham os detectores proporcionais. Na região IV o campo elétrico dentro do contador é tão forte que um simples par elétron-íon gerado na câmara é suficiente para iniciar uma reação em cadeia de pares elétron-ion, esta região é chamada região de Geiger Müller. Se a tensão aplicada for superior ao valor máximo da região IV um simples evento de

ionização inicia uma descarga contínua no gás e na região V a tensão é tão alta (>1000V) sendo capaz de produzir corrente independente de fonte radioativa, por isto, estas devem ser evitadas porque danificam o detector[37,38,39,40].

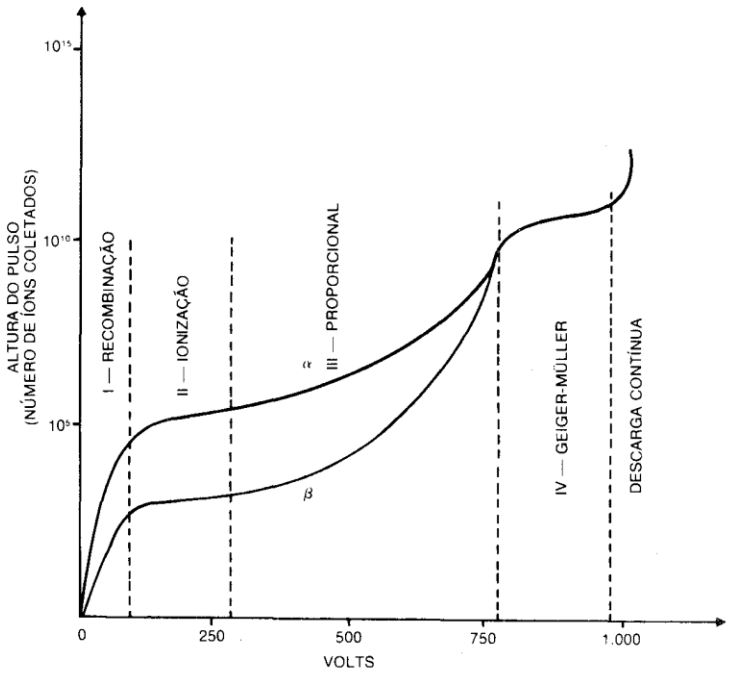


FIGURA 7 - Faixas de tensão de detectores gasosos[38].

3.6 Medidores de Atividade

Os medidores de atividade, nada mais são do que câmaras de ionização que atuam na região II de até 300 V.

Na literatura podemos encontrar outras definições para os medidores de atividade como: calibradores de dose, activímetro e curiômetros termo este adotado pela CNEN na norma CNEN-NN-3.05[7,42].

Este equipamento propicia de forma rápida a medida da atividade dos radiofármacos para fins de diagnóstico e terapia[36,43].

Os medidores de atividade podem ser divididos em três partes (FIG.8)[43]:

a) **Câmara de ionização (poço):** é um cilindro que contém gás geralmente argônio a uma pressão. Esta câmara possui, dois eletrodos coaxiais cilíndricos, que são mantidos sob uma diferença de potencial, assim quando um fóton-γ da fonte interage com o gás da câmara de ionização são geradas duas cargas elétricas (pares iônicos), cada uma destas cargas será então atraída por um eletrodo de polaridade diferente a sua, que posteriormente irá gerar uma corrente de ionização amplificada, sendo esta processada e apresentada no display do equipamento na forma digital em múltiplos de Bequerel (Bq) e Curie (Ci)[8,41]. Esta câmara possui uma blindagem de chumbo, para fornecer proteção radiológica ao trabalhador e também reduzir a radiação de fundo;

b) **Suporte para amostra:** suporte no qual a amostra é inserida da câmara para realizar as medidas de forma que elas sejam reprodutíveis; onde com ajuda um suporte a fonte é introduzida para medição, possibilitando que ela fique em uma posição reprodutível.

c) **Eletrômetro**: responsável por medir a corrente elétrica gerada pela interação da radiação da amostra com o gás da câmara.

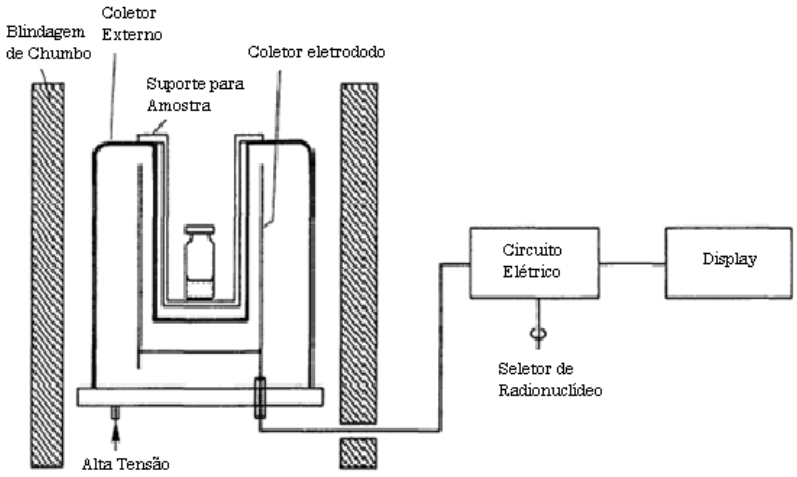


FIGURA 8 - Esquema de um medidor de atividade[8].

Alguns medidores de atividade possuem um ajuste de zero, que permite que a contagem de fundo ou BKG (background) possa ser "desconsiderada" nas medidas de atividade. Todos os instrumentos são calibrados de fábrica com um conjunto de fontes certificadas, ^{57}Co, ^{133}Ba e ^{137}Cs sendo esta chamada de calibração direta ou por comparação com instrumentos de referencia denominada calibração indireta[44].

Por serem equipamentos destinados a área médica, é de suma importância que eles estejam em pleno funcionamento, sendo regularmente verificados por meio de ensaios especificados na norma CNEN-NN-3.05[7].

3.7 Conceitos Metrológicos

O objetivo central da metrologia é a determinação do valor numérico de uma grandeza mensurável, sendo a medição um processo de obtenção experimental de um ou mais valores que podem ser razoavelmente atribuídos a uma grandeza, juntamente com uma incerteza associada a esse valor [46,47].

Em maio de 1875, na cidade de Paris foi assinada a Convenção do Metro, um acordo diplomático internacional com a participação de 17 países incluindo o Brasil, com objetivo de estabelecer bases para a uniformidade das medições. No Brasil em 1961, foi criado o Instituto Nacional de Pesos e Medidas (INPM) que implantou a Rede Nacional de Metrologia Legal (IPEMs) instituindo o Sistema Internacional de Unidades (SI) em todo território nacional[46,48].

O órgão que atua na área de proteção radiológica e metrologia das radiações ionizantes no Brasil é o Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD) localizado no Rio de

Janeiro. A delegação da área metrológica das radiações ionizantes ao IRD foi designada pelo INMETRO em 1989[48].

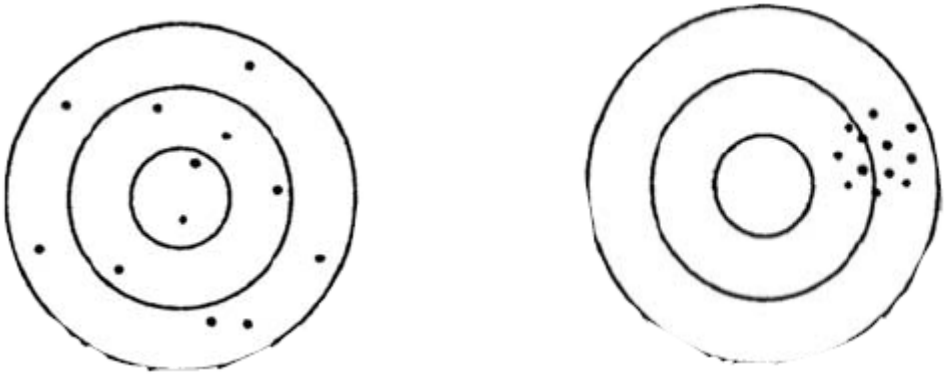
A principal função de um laboratório de metrologia de radionuclídeos é de fornecer padrões com incertezas apropriadas para calibração de sistemas de medição de atividade.

3.7.1 Exatidão e Precisão

A exatidão de um instrumento se refere ao grau com que a média de uma longa série de medições repetidas, feitas por um dado instrumento em um único produto, difere do valor verdadeiro. Essa diferença é, geralmente, devida a um "erro sistemático" do processo de medição, ou seja, a uma diferença entre o valor que foi medido e um valor de referência, que quando feito de maneira repetida, permanece constante ou varia de maneira previsível[45,47,49].

A precisão de um instrumento se refere ao grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições específicas. A precisão é geralmente expressa numericamente por indicadores de incerteza tais como: dispersão, desvio padrão, variância ou coeficiente de variação, sob condições de medição específicas. A dispersão dessas medidas pode ser designada por σ_E, que significa o desvio-padrão da medição. Quanto mais baixo o valor σ_E, mais preciso é o instrumento[45,48,49].

Na FIG. 9 estão representados dois alvos que simbolizam visualmente a distinção entre a exatidão e precisão. O centro do alvo simboliza o valor verdadeiro, aquele que se deseja obter. As medidas tornam-se exatas quando atinge o centro do alvo, a precisão neste caso será o grau de concordância dos valores medidos independente da sua aproximidade com valor verdadeiro[49].



(a) Precisão baixa e exatidão razoável (b) Precisão elevada e exatidão baixa

FIGURA 9 - Diferenças entre exatidão e precisão[49].

3.7.2 Reprodutibilidade

Um método reprodutível é aquele que possui aproximação entre os resultados das medições de uma mesma grandeza quando as medições individuais são efetuadas fazendo variar condições tais como[47]:

a. método de medida;
b. observador;
c. instrumento de medida;
d. local;
e. condições de utilização e
f. tempo.

3.7.3 Linearidade

O teste de linearidade avalia se a resposta do equipamento é linear em todas as faixas de medições da mais alta a mais baixa. As medidas de atividade são colocadas em um gráfico em semilog e o melhor ajuste de linha é dado[47].

3.8 Distribuição t-Student

A distribuição t foi desenvolvida pelo químico inglês chamado William Sealy Gosset. Ele trabalhava em uma cervejaria que não permitia que seus funcionários publicassem artigos utilizando seus nomes, então Gosset, utilizou o pseudônimo Student para fazer suas publicações durante a primeira parte do século XX[50].

A distribuição t-Student é uma distribuição estatística amostral, utilizada para amostras de tamanho n< 30. A distribuição normal não é utilizada quando se trabalha com amostras pequenas porque fornece valores de menor precisão[50]. A principal diferença entre a distribuição normal e a t de Student é que esta tem mais área nas caudas podendo gerar valores mais extremos que a normal (FIG. 10).

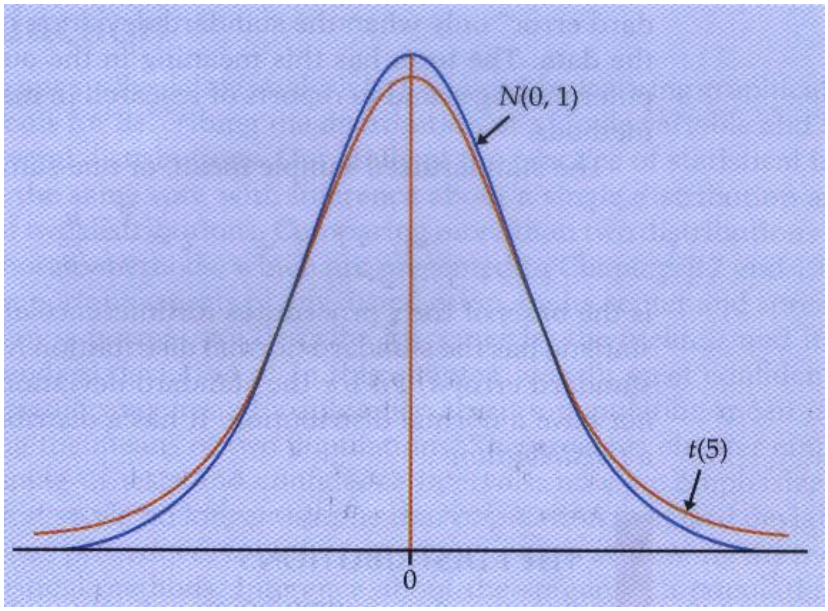


FIGURA 10 - Distribuição normal e distribuição t de Student[50].

O coeficiente "t" depende do grau de liberdade da amostra (tamanho da amostra). Considera-se o grau de liberdade de uma amostra de tamanho "n" como sendo "n– 1". Ao usar a tabela de Student deve-se observar que a primeira coluna corresponde ao número total da amostra menos o 1 amostra[51].

Existe um valor de t para cada tamanho de amostra, sendo que à medida que a amostra (n) cresce, a distribuição t de Student se aproxima da distribuição normal[50]. Para calcular o valor de t é necessário ter:

a) Um nível de confiança desejado;
b) O número de graus de liberdade.

4. REQUISITOS FÍSICOS LABORATORIAIS

A metodologia adotada para realização deste trabalho é baseada em diretrizes das normas da CNEN, no que cabe a proteção radiológica, licenciamento de uma instalação radioativa e ao gerenciamento de seus rejeitos, guias que orientam quanto à implementação de um laboratório radioquímico também foram utilizados para melhor orientação quando as questões de disposições físicas dos equipamentos e estrutura do laboratório, bem como orientações frente a descontaminações. Nos itens que seguem são abordados os diferentes parâmetros a serem levados em consideração em cada item do laboratório.

4.1 Piso

O piso de um laboratório radioquímico, deve ser impermeável e de fácil descontaminação, o seu revestimento também deve cobrir parte da parede, formando um rodapé de 15 cm de altura. As junções entre as folhas dos pisos não são recomendadas, mas podem ser permissíveis se estas forem seladas e posteriormente verificadas para que não haja contaminação[53-56].

O substrato (piso) antes de receber o revestimento deve estar íntegro, os reparos de fissuras e de áreas anômalas devem ser efetuados com materiais e técnicas apropriadas. É importante a correta preparação do revestimento e as juntas devem ser seladas com produtos específicos e compatíveis com o substrato para prevenir a penetração de líquidos e de partículas sólidas[56-59].

O tipo de revestimento a ser aplicado depende do tipo do piso. Um dos revestimentos mais utilizados é o de alto desempenho (RAD), como exemplo pode-se citar: a resina epóxi, poliuretano, entre outros. A espessura do revestimento dependerá da necessidade de resistência a impacto que o piso do laboratório precisará (TAB. 9)[59-61]. O revestimento auto nivelante é um dos mais utilizados em laboratórios, industriais farmacêuticas, hospitais.

TABELA 9 – Classificação dos revestimentos de alto desempenho[59].

Tipo	Classe	Descrição	Espessura[1)] mm	Natureza dos Constituintes	Textura superficial [2)]
01	Monolíticos	Espatulado	3,00 a 10,00	Resina epóxi Endurecedor Agregados minerais	Lisa Semilisa Áspera
02		Autonivelante	1,50 a 6,00	Resina epóxi Endurecedor Agregados minerais	Lisa
03		Camadas múltiplas	1,50 a 4,00	Resina epóxi Endurecedor Agregados minerais Pigmentos	Áspera
04	Pintura	Baixa espessura	0,10 a 0,18	Resina epóxi Endurecedor com ou sem pigmentos Com ou sem solventes	[3)]
		Alta espessura	>0,18 a 1,00	Resina epóxi Endurecedor sem solventes	
05	Decorativo Monolítico	Espatulado	3,00 a 10,00	Resina epóxi Endurecedor Agregados minerais	Lisa Semilisa Áspera
		Autonivelante	1,50 a 4,00	Resina epóxi Endurecedor Agregados minerais	Lisa Semilisa
		Camadas múltiplas	1,50 a 4,00	Resina epóxi Endurecedor Agregados minerais Pigmentos	Semilisa Áspera

1) Camada/filme seco.
2) O tipo da textura superficial ou seu grau de aspereza pode ser definido através de amostra padrão fornecida pelo fabricante.
3) Depende do substrato.

1) O tipo 2 não deve ser selecionado quando a temperatura de uso for superior a 60 °C

A norma NBR 14050 (1998) "Sistemas de revestimentos de alto desempenho, a base de resinas epoxídicas e avaliação do desempenho - Procedimento" especifica os critérios de desempenho e os métodos de ensaio para cada tipo de RAD e também os requisitos para os substratos que serão revestidos[59].

4.2 Parede

As paredes do laboratório devem ser claras, lisas, resistentes ao fogo e a substâncias químicas. Estas devem ser pintadas com uma emulsão acrílica, que propiciará impermeabilidade, limpeza fácil além de uma superfície dura e resistente. Os frisos podem ser vedados com material tipo silicone, para não permitir a penetração de contaminantes [53-58,62].

4.3 Janelas

As janelas devem estar a uma altura aproximada de 1,20 m acima do nível do piso e acima de bancadas e dos equipamentos e estar distante das áreas de trabalho que possam vir a ser afetadas pela circulação de cais como exemplo as capelas de exaustão. Os empregos de materiais não porosos que sejam eficientes no retardo do fogo propiciem boa vedação e sejam de fácil limpeza e manutenção são extremamente necessários[53,55-57].

Em caso de liberação acidental de materiais radioativos no laboratório, estas não devem ser utilizadas como rota de fuga[55].

4.4 Portas

As portas com superfícies de madeira devem ser cobertas com plástico laminado ou pintadas com poliuretano ou vernizes de boa qualidade. Devem ser suficientemente grandes para permitir a instalação e remoção de equipamentos. As portas que dão acesso a locais públicos devem ter acesso restrito se for necessário pode ser instalando um cadeado[53,54,56].

O símbolo de radiação deve ser fixado na mesma indicando a presença de material radioativo (FIG. 11)[22,58]. As portas deverão ter um painel de visão (vidro na parte superior) para permitir a visibilidade do trabalhador dentro no laboratório e fora[53].

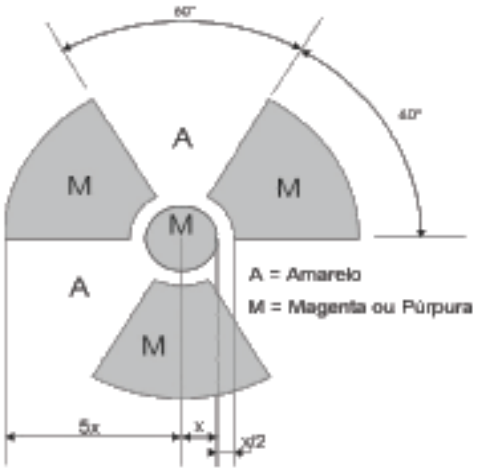


FIGURA 11 - Símbolo internacional da radiação ionizante[22].

4.5 Bancadas

As bancadas de um laboratório radioquímico não são essencialmente diferentes dos laboratórios químicos, além da resistência a materiais químicos elas devem ter superfície lisa e não serem absorventes[55,56]. Elas podem ser divididas em três tipos: bancada central ou castelo, que ficam dispostas no centro do laboratório FIG.12, bancada do tipo península que possui um de seus lados acoplado a uma parede e dessa forma deixa três lados para uso dos usuários FIG.13 e a bancada do tipo murada que está totalmente anexada a uma parede, deixando apenas um de seus lados para os usuários (FIG.14)[53,54,57,63,64].

FIGURA 12 - Bancada do tipo central ou castelo[64].

FIGURA 13 - Bancada do tipo península[64].

FIGURA 14 - Bancada do tipo murada[64].

As bancadas devem ter bordas arredondadas na extremidade, para evitar contaminação. Entre uma bancada e outra deve haver uma distancia de aproximadamente 0,40m para que haja livre tráfego, minimizando o risco de choques com os laboratoristas[56]. As áreas que serão dedicadas para trabalho radioativo deverão ser claramente demarcadas e monitoradas[55].

Para minimizar o risco de contaminação pelo derramamento de algum líquido ou até mesmo pela disseminação da contaminação é uma boa prática trabalhar em bandejas de plástico ou metal especialmente quando grandes quantidades de atividade estão envolvidas[53].

4.6 Pia

A pia deve ser em aço inoxidável geralmente AISI 304. Quando possível elas devem ter as bordas dianteiras arredondadas e a parte posterior deve avançar sobre a parede. O ideal é que placas de respingo sejam instaladas na parte posterior acima da parede da pia, para facilitar a descontaminação[53,57].

A drenagem de efluentes radioativos deve ser rotulada com o símbolo de radiações ionizantes, até um ponto em que os seus conteúdos estejam substancialmente diluídos em efluentes não radioativos. Isto auxilia como sistema de alertar, para as pessoas que efetuam a manutenção e assim, evita-se a eliminação não autorizada de quaisquer soluções contaminada[56,57].

4.7 Capela

A capela é um dos equipamentos mais importantes do laboratório, que permitir a exaustão de gases ou vapores tóxicos. Elas devem ser construídas com material não poroso, para laboratórios radioquímicos as em aço inoxidável AISI 304 são mais aconselháveis[53,54,56-58]. Estas devem possuir dois pontos no mínimo de captação de vapores e gases sendo um na parte superior ao nível do teto e outro na parte inferior ao nível do tampo[56]. A velocidade do fluxo de ar deve ser mantida a uma um nível mínimo de 0,5 $m.s^{-1}$ em acordo com "Departament of Employment in the Ionising Radiations". Isto é necessário para garantir a captura e retenção de vapores diante da turbulência em particularmente devido a movimentação de pessoas trabalhando ou se movimentando próximas a capela. Esta velocidade pode ser avaliada pelo teste de fumaça. Os equipamentos colocados próximos a entrada da capela causarão variações significativas no fluxo de ar, por isso, os mesmos devem ser posicionados no fundo da capela[56,57,65].

Os níveis de ruídos devem ser mantidos em até 85 decibéis e o seu nível mínimo de iluminamento deve ser no mínimo de 300 lux[56].

Deve ser mantida tão longe quanto possível das saídas de emergência, para que em caso de um acidente estas estejam desobstruídas, já que a passagem de pessoas perto da capela e a abertura de portas podem causar distúrbios em seu desempenho. As entradas de ar no laboratório devem vir de lados opostos da capela, para garantir que a velocidade de ar perto da cabeça do laboratorista não seja excessiva e o laboratório como um todo seje ventilado (FIG. 15, FIG.16)[53,56-58].

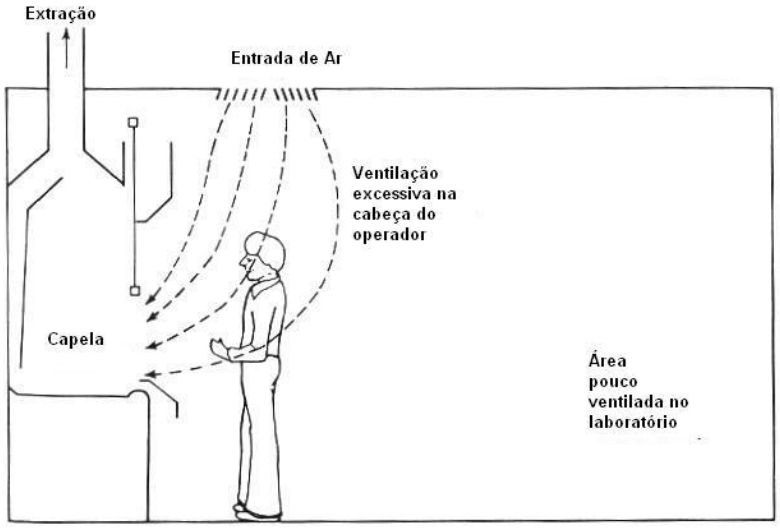


FIGURA 15– Entrada de ar do laboratório má posicionada [57].

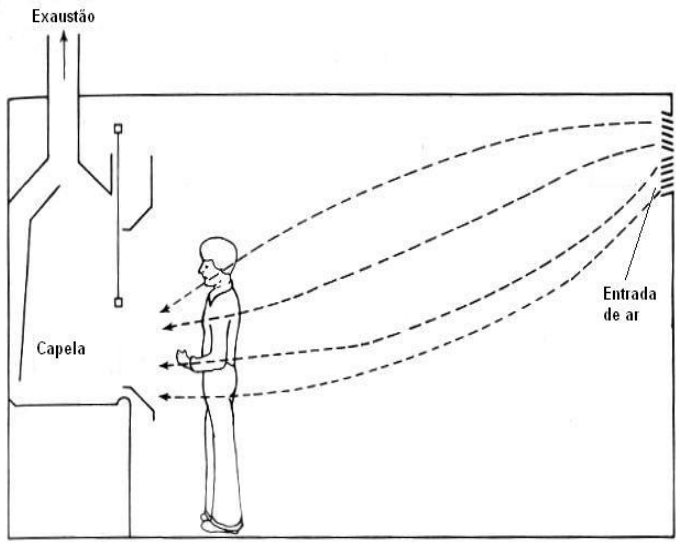


FIGURA 16 – Entrada de ar do laboratório posicionada corretamente [57].

A avaliação do desempenho das capelas deve ser realizada no mínimo uma vez ao ano, onde devem ser avaliadas todas as suas funcionalidades como: sistema de velocidade facial, iluminação, vedações, níveis de ruídos, verificação dos vidros, limpeza de dutos dentre outros[56].

4.8 Iluminação

Os níveis de iluminamento devem seguir as recomendações da norma NBR 5413 Iluminância de Interiores, da ABNT. Para laboratórios radioquímicos a norma estabelece três níveis de iluminância 300- 300 -750 lux, o nível de iluminância é estipulado mediante avaliação dos fatores determinantes da iluminância, estabelecidas nesta norma. As lâmpadas devem ser fluorescentes com proteção para evitar queda sobre piso ou bancadas[27].

4.9 Equipamentos de Monitoração e Proteção Individual

A escolha dos equipamentos de proteção individual depende da atividade e das quantidades de materiais que serão manipulados, porém é extremamente importante o uso de dosímetros termoluminescentes, para quantificar a dose recebida pelo laboratorista[56].

Em acordo com norma CNEN-NN-6.02, 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[23].

4.10 Testes em Medidores de Atividade

Os testes de avaliação para medidores de atividade estipulados na norma CNEN-NN-3.05 foram realizados no laboratório com fontes radioativas seladas da Eckert & Ziegler certificadas(FIG. 17).

Os certificados das fontes encontram-se nos ANEXOS A, B e C.

Para a fonte de ^{133}Ba foi adotado um fator de correção no valor de 0,8986 para adequação da atividade em acordo com certificado.

FIGURA 17 - Fontes radioativas seladas ^{57}Co, ^{137}Cs e ^{133}Ba.

Os cálculos de decaimento para cada fonte foram realizados, para que suas atividades se adequassem ao valor real no momento dos testes conforme a fórmula:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \qquad (4)$$

Onde:

A= atividade final

A_0 = atividade inicial

λ = constante de decaimento

t = tempo

4.10.1 Testes de Precisão e Exatidão

Para a realização dos testes de precisão e exatidão, 10 medidas seqüenciais foram feitas para cada fonte: ^{57}Co, ^{137}Cs e ^{133}Ba, com intervalo de 30 segundos entre as medidas. Os cálculos de precisão e exatidão foram realizados adotando as seguintes fórmulas:

$$P(\%) = \frac{(A_i - A_m)}{A_m} \cdot 100 \qquad (5)$$

Onde:

P= precisão

A_i= atividade medida

A_m= atividade média das medidas

$$E(\%) = \frac{A_m - A_v}{A_v} \cdot 100 \qquad (6)$$

Onde:

E= exatidão

A_m= atividade média das medidas

A_v = atividade verdadeira

4.10.2 Teste de Reprodutibilidade

Para o teste de reprodutibilidade foi utilizada uma fonte ^{137}Cs certificada diferente da utilizada para testes de precisão e exatidão. Foram realizadas 41 medidas consecutivas durante três meses. A variação percentual foi calculada conforme equação:

$$V(\%) = \frac{(A_i - A_t)}{A_t} \cdot 100 \qquad (7)$$

Onde:

V(%)= variação percentual

A_i= atividade medida

A_t= atividade teórica

O cálculo do erro foi realizado com auxilio da tabela de distribuição t-Student, devido ao número de amostras ser pequena (< 30). A obtenção dos valores críticos $t_{\alpha/2}$ foi para intervalo de confiança de 95%.

$$E = t\% \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} \qquad (8)$$

Onde:

E= erro de estimação

$t_{\alpha/2}$ = valor crítico do intervalo de confiança

S = desvio padrão das medidas

$\sqrt{n}$ = tamanho da amostragem

4.10.3 Teste de Linearidade

O teste de linearidade foi realizado com fonte de ^{131}I com atividade inicial de 3.7 GBq, cedida pelo Centro de Radiofarmácia (IPEN) (FIG. 18). A norma orienta a realização do teste com fonte de ^{99m}Tc, porém não foi possível a disponibilidade desta fonte para realização do teste devido a problemas em sua distribuição mundial, assim, por ser um nuclídeo padrão de calibração, possuir tempo de meia vida curta, a fonte de ^{131}I foi utilizada.

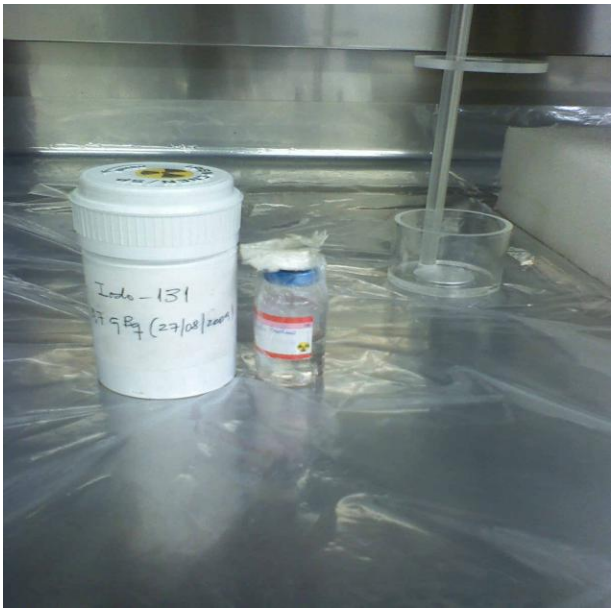


FIGURA 18 - Fonte de ^{131}I.

Os cálculos para testes de linearidade do ^{131}I foram realizados levando-se em consideração o tempo decorrido em horas e decaimento da fonte, sendo sua media vida de 8 dias.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A disposição física de cada item foi baseada nas orientações dos guias e das normas levantadas.

5.1 Piso

O revestimento que será utilizado para o laboratório será autonivelante, por ter uma espessura fina e que permitirá dentre outros fatores a facilidade de descontaminação. Este revestimento é muito utilizado em hospitais e indústrias farmacêuticas especificamente em sala limpas, que necessitam de um controle maior[56,60,61].

5.2 Parede

As paredes serão pintadas com tinta epóxi, em tom claro, as frestas serão seladas com silicone. A escolha da cor depende em parte da iluminação artificial e do ambiente, os tons escuros não serão utilizados por interferirem na visualização das amostras[53,56].

5.3 Porta

A porta do laboratório está instalada, é de madeira com revestimento de verniz e obedece aos requisitos sinalização com símbolo de radiação. Ela também esta identificada como área controlada, ou seja uma área sujeita a regras especiais de proteção e segurança (FIG. 19)[20,58].

FIGURA 19 - Porta do laboratório.

5.4 Pia

A pia do laboratório encontra-se instalada. Ela é em aço inoxidável AISI 304, com bordas dianteiras arredondadas e com placas de respingo instaladas na parte posterior (FIG. 20). Um sistema de drenagem será disponibilizado para os efluentes radioativos, sendo descartados mediante avaliação de adequação a norma CNEN-NE-6.05[24].

FIGURA 20 - Pia do laboratório.

5.5 Bancada

A bancada utilizada no laboratório será do tipo murada com bordas arredondadas, superfície lisa e provida de material que seja resistente a materiais químicos, as mais utilizadas são as de granito e fórmica[56]. Por uma avaliação estrutural da instalação a bancada do tipo murada permite melhor locomoção no laboratório, deixando uma área mais.

Será instalada em local aonde venha a receber luz lateralmente, sua junção com a parede será selada com material tipo silicone e em uma das laterais será disposto um espaço de cerca de 0,40m para permitir a instalação ou eventual manutenção de algum equipamento e procedimentos de limpeza[56].

5.6 Capela

No laboratório foi instalada uma capela de exaustão em aço inoxidável AISI-304 material muito utilizado em capelas de radioisótopos[58]. A capela é revestida em laminado melamínico texturizado, com luminária à prova de gases e vapores, provida de vidro de segurança, equipada com duas lâmpadas tipo fluorescente que geram uma luminância de 500 lux (FIG. 21).

O seu sistema de exaustão é composto de exaustor centrífugo de simples aspiração construído em PRFV (Fibra de Vidro), tomada e saída de ar com f 300 mm, base de fixação em aço carbono com pintura de acabamento martelado, o sistema de filtragem é composto de: caixa de filtragem, com medidas aproximadas de: (600 x 900 x 660) mm, construído em chapa de aço galvanizado, pré-filtro, com meio filtrante formado por fibras sintéticas prensadas plissadas sustentadas por uma malha metálica e filtro de carvão ativado.

FIGURA 21 - Capela de exaustão do laboratório.

O processo de certificação da capela foi realizado mediante a inspeção de todos os itens eletroeletrônicos e mecânicos, teste de velocidade do fluxo de ar também foi realizado conforme mostra (FIG.22). A média aritmética por filtro das medidas da velocidade do fluxo de ar foi de 0,77 m/s, com desvio padrão de 0,11 m/s.

FIGURA 22 - Teste de velocidade do fluxo de ar.

A capela possui também uma caixa para coleta de rejeitos FIG. 23 onde os mesmos ficarão armazenados até que suas atividades permitam liberação como efluente comum.

FIGURA 23 - Caixa de retenção do conteúdo radioativo descartado.

5.7 Equipamento de monitoração individual e de área

Os equipamentos de monitoração individual utilizados para realização do trabalho foram dosímetro de pulso para avaliação de dose mediante a manipulação das amostras, dosímetro de tórax para avaliação da radiação recebida (FIG. 24).

FIGURA 24 - Dosímetros de pulso e tórax

O monitor de área para avaliação dos níveis de contaminação do laboratório, para realização do teste de linearidade com ^{131}I utilizou- Teletector 6150 ADt série S/N 107187 da Automess GmbH (FIG. 25).

FIGURA 25 - Automess-Teletector.

5.8 Medidor de atividade

Foi adquirido um medidor de atividade da marca Capintec modelo CRC-15R FIG. 26, que é do tipo poço com gás argônio. O equipamento possui resposta de leitura de 4 a 16 segundos para fontes de baixa atividade. A profundidade do poço é 25,4 cm, peso de 13,6 kg e diâmetro de 17,2 cm[66].

FIGURA 26 - Medidor de atividade Capintec CRC 15R.

Este medidor foi utilizado para realização dos testes de precisão, exatidão, reprodutibilidade e linearidade.

5.8.1 Testes de Exatidão e Precisão

Os resultados obtidos nos testes de exatidão e precisão são apresentados na (TAB. 10). As medidas realizadas com fonte de ^{133}Ba, encontram-se multiplicadas pelo fator de correção certificado para a fonte.

TABELA 10 - Medidas de atividade das fontes de referência.

	Radionuclídeos					
	^{57}Co		^{137}Cs		^{133}Ba	
Atividade Teórica (MBq)	**184,97**		**7,28**		**8,52**	
Medida	**Atividade Medida (MBq)**	**Precisão (%)**	**Atividade Medida (MBq)**	**Precisão (%)**	**Atividade Medida (MBq)**	**Precisão (%)**
1	181,70	0,01	7,49	0,09	8,36	0,22
2	181,60	0,05	7,48	0,23	8,27	0,86
3	181,60	0,05	7,49	0,09	8,36	0,22
4	181,70	0,01	7,50	0,04	8,36	0,22
5	181,80	0,06	7,51	0,17	8,36	0,22
6	181,80	0,06	7,50	0,04	8,36	0,22
7	181,50	0,10	7,51	0,17	8,36	0,22
8	181,70	0,01	7,50	0,04	8,36	0,22
9	181,80	0,06	7,50	0,04	8,27	0,86
10	181,70	0,01	7,49	0,09	8,36	0,22
Média	**181,69**	-	**7,50**	-	**8,34**	-
Desvio Padrão (%)	**0,10**		**0,009**		**0,038**	
Exatidão (%)	**1,77**		**3,05**		**2,14**	
Erro estimado (%)	**0,07**		**0,01**		**0,03**	

Os valores obtidos nos ensaios de precisão e exatidão estão em acordo com os desvios percentuais estabelecidos em norma de 5% e 10%, respectivamente e concordantes com os já relatados na literatura[37].

Foi observada uma variação percentual maior nas medidas da fonte de ^{137}Cs o que pode ser justificada por esta possuir uma energia maior, apesar disso, esta continua dentro dos valores pré-estabelecidos.

5.8.2 Testes de Reprodutibilidade

Os resultados obtidos no ensaio de reprodutibilidade com fonte de ^{137}Cs, são apresentados na (TAB. 11). O limites superior de 6,10 e inferior de 5,52 foram estabelecidos levando em consideração o desvio percentual ±5% estipulado em norma CNEN-NN-3.05. O maior valor de atividade medido foi 6,00 MBq que corresponde a uma variação de 3,27%.

TABELA 11 - Medidas de reprodutibilidade da fonte de ^{137}Cs.

	Dias	Ativ. Medida MBq	Variação Percentual
	0	5,99	3,10
	1	5,96	2,58
	5	5,99	3,10
	6	5,96	2,58
	7	5,96	2,58
	12	5,96	2,58
	13	5,96	2,58
	14	5,96	2,58
	15	5,99	3,10
	19	5,96	2,58
	20	5,96	2,58
	21	5,96	2,58
	22	5,96	2,58
	23	6,00	3,27
	26	5,95	2,41
	27	5,96	2,58
	28	5,97	2,75
	30	5,95	2,41
	32	5,96	2,58
	33	5,97	2,75
	34	5,96	2,58
	35	5,96	2,58
	36	5,97	2,75
	39	5,95	2,41
	40	5,96	2,58
	41	5,97	2,75
	43	5,96	2,58
	46	5,96	2,58
	47	5,97	2,75
	48	5,96	2,58
	49	5,97	2,75
	54	5,97	2,75
Média		**5,97**	**2,67**

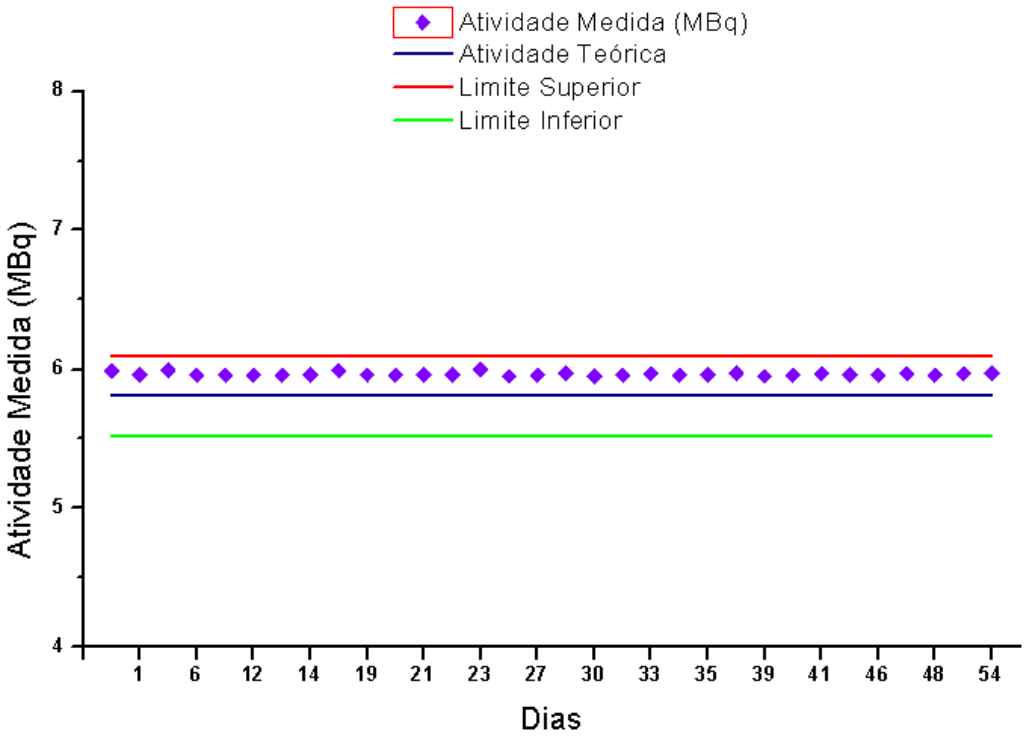


FIGURA 27 - Teste de reprodutibilidade da fonte de ^{137}Cs.

5.8.3 Testes de Linearidade

Os resultados das medidas de linearidade são expressos na TAB. 12 e na FIG. 28 que representa graficamente a linearidade da fonte. A maior variação percentual foi de 16,8%, abaixo dos 20% estabelecidos na norma CNE-NN-3.05.

TABELA 12 - Medidas de linearidade da fonte de ^{131}I

Tempo decorrido (Horas)	Ativ. Medida (MBq)	Variação percentual
0,00	2390	0,38
23,58	2190	0,46
47,85	2010	0,37
167,83	1320	0,91
195,75	1196	0,30
216,83	1109	0,82
312,58	788	1,31
336,22	724	1,50
359,48	667	1,98
383,75	611	1,87
479,57	434	2,33
504,90	397	2,08
526,37	367	2,91
552,58	335	2,43
583,27	300	0,04
647,52	239	3,35
671,77	219	3,27
695,95	201	3,36
719,95	185	3,75
744,08	170	3,96
815,33	131,6	4,37
841,25	120	3,78
864,42	110,6	4,31
888,60	101,5	4,39
1007,78	66,7	5,80
1032,15	61,1	5,69
1055,92	56,2	6,01
1151,12	40,3	7,50
1176,82	36,8	7,05
1205,10	33,3	5,64
1228,75	30,6	5,86
1346,67	20,2	7,77
1369,30	18,7	8,80
1396,08	17	7,86
1513,27	11,2	9,59
1536,65	10,3	9,91
1560,67	9,5	10,54
1656,58	6,85	12,72
1680,55	6,4	14,85
1704,28	5,89	15,27
1728,02	5,44	16,09
1827,25	3,87	16,80

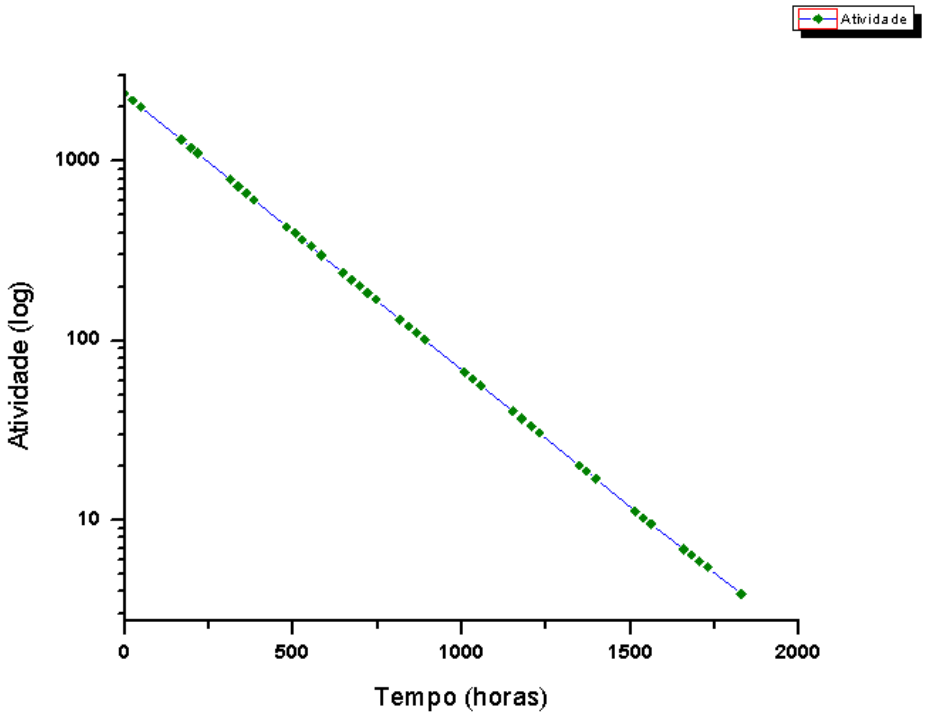


FIGURA 28 - Gráfico da linearidade da fonte de ^{131}I.

6. CONCLUSÕES

Durante o desenvolvimento deste trabalho, não foi encontrada na literatura nacional referências sobre o levantamento de parâmetros para a montagem de um laboratório radioquímico. Portanto, este trabalho será utilizado como uma referência para implementação e funcionamento de laboratórios radioquímicos e de instalações radioativas, pois contém informações claras e concisas tanto de legislações vigentes e referências normativas internacionais quanto da estrutura física de um laboratório.

O levantamento dos parâmetros estabeleceu embasamentos técnicos e normativos para implementação adequada e segura do Laboratório do Centro de Tecnologia das Radiações-CTR. A adequação do laboratório a estas diretrizes visa o licenciamento deste junto a CNEN e a produção das fontes radioativas seladas, cujo foco principal é o atendimento as clínicas de medicina nuclear que as utilizam para verificação dos medidores de atividade em atendimento a norma CNEN-NN-3.05.

Os testes de exatidão e precisão realizados com medidor de atividade mostraram-se dentro dos parâmetros estabelecidos na norma CNEN-NN-3.05, garantindo assim as confiabilidades desejadas de 90 e 95% para exatidão e precisão.

A reprodutibilidade e linearidade dos testes apresentaram desvios percentuais abaixo de 5% e 20% respectivamente conforme a mesma norma.

Os Serviços de Medicina Nuclear também podem utilizar este trabalho como referência para obter informações que possibilitem adequação de suas dependências, podendo ser aplicadas desde os laboratórios de manipulação de radiofármacos e armazenamento de fontes quanto às áreas que destinadas a leitos.

ANEXO A

Eckert & Ziegler
Isotope Products

Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355
Tel 661·309·1010 Fax 661·257·8303

Industrial Gauging and Medical Imaging Laboratory
1800 North Keystone Street Burbank, California 91504
Tel 661·309·1010 Fax 661·257·8303

NIST TRACEABLE CERTIFICATE
GAMMA STANDARD SOURCE

RADIONUCLIDE: Co-57
HALF LIFE: 271.79 ± 0.09 days
CATALOG NO: RV-057-5M
SOURCE NO: 1366-36-30

REFERENCE DATE: 1 Nov 09, 12:00 PST
CONTAINED RADIOACTIVITY: 5.522 mCi
CONTAINED RADIOACTIVITY: 204.3 MBq

SOURCE DESCRIPTION:

CAPSULE TYPE:	RV (27 ml polyethylene bottle)
NATURE OF ACTIVE DEPOSIT:	Co-57 dispersed in an epoxy matrix
ACTIVE DIAMETER/VOLUME:	Approx. 20 ml
BACKING:	Plastic
COVER:	Plastic

RADIOIMPURITIES:
Co-56 = 0.0439%; Co-58 = 0.00887% on 1 Nov 09.

METHOD OF CALIBRATION:
This source was assayed in a pressurized well-type ionization chamber.

UNCERTAINTY OF MEASUREMENT:

TYPE B (SYSTEMATIC) UNCERTAINTY:	± 3.0%
TYPE A (RANDOM) UNCERTAINTY:	± 0.0%
UNCERTAINTY IN ALIQUOT WEIGHING:	± 0.0%
TOTAL UNCERTAINTY AT THE 99% CONFIDENCE LEVEL:	± 3.0%

NOTES:
1. See reverse for leak tests performed on this source.
2. IPL participates in an NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Material (As in NRC Regulatory Guide 4.15).
3. Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
4. This source has a working life of 18 months.

LAB BOOK-PAGE: 1366-36

Daniel James Van Dalsem 1-OCT-09
SIGNATURE | DATE

ANEXO B

Eckert & Ziegler
Isotope Products

Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355
Tel 661•309•1010 Fax 661•257•8303

Industrial Gauging and Medical Imaging Laboratory
1800 North Keystone Street Burbank, California 91504
Tel 661•309•1010 Fax 661•257•8303

NIST TRACEABLE CERTIFICATE
GAMMA STANDARD SOURCE

RADIONUCLIDE: Cs-137
HALF LIFE: 30.17 ± 0.16 years
CATALOG NO: RV-137-200U
SOURCE NO: 1288-4-16

REFERENCE DATE: 1 Mar 08, 12:00 PST
CONTAINED RADIOACTIVITY: 205.5 µCi
CONTAINED RADIOACTIVITY: 7604 kBq

SOURCE DESCRIPTION:

CAPSULE TYPE:	RV (27 ml polyethylene bottle)
NATURE OF ACTIVE DEPOSIT:	Cs-137 dispersed in an epoxy matrix
ACTIVE DIAMETER/VOLUME:	Approx. 20 ml
BACKING:	Plastic
COVER:	Plastic

RADIOIMPURITIES:
None detected

METHOD OF CALIBRATION:
This source was assayed in a pressurized well-type ionization chamber

UNCERTAINTY OF MEASUREMENT:

TYPE B (SYSTEMATIC) UNCERTAINTY:	± 3.0%
TYPE A (RANDOM) UNCERTAINTY:	± 0.1%
UNCERTAINTY IN ALIQUOT WEIGHING:	± 0.0%
TOTAL UNCERTAINTY AT THE 99% CONFIDENCE LEVEL:	± 3.0%

NOTES:
1. See reverse for leak tests performed on this source.
2. IPL participates in an NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Material (As in NRC Regulatory Guide 4.15).
3. Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
4. This source has a working life of 5 years.

LAB BOOK-PAGE: 1288-4

Daniel James Van Dalsem | 22-Jan-08
SIGNATURE | DATE

ISO 13485 CERTIFIED

Authorized Representative
Eckert & Zeigler BEBIG GmbH Robert-Rossle-Str.10 D-13125 Berlin Germany
Tel: +49-30-941084-0 Fax: +49-30-941084-112

CE

ANEXO C

Eckert & Ziegler
Isotope Products

Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355
Tel 661•309•1010 Fax 661•257•8303

Industrial Gauging and Medical Imaging Laboratory
1800 North Keystone Street Burbank, California 91504
Tel 661•309•1010 Fax 661•257•8303

NIST TRACEABLE CERTIFICATE
GAMMA STANDARD SOURCE

RADIONUCLIDE: Ba-133
HALF LIFE: 10.574 ± 0.041 years
CATALOG NO: RV-133-250U
SOURCE NO: 1366-37-5

REFERENCE DATE: 1 Nov 09, 12:00 PST
APPARENT RADIOACTIVITY: 258.2 µCi
APPARENT RADIOACTIVITY: 9553 kBq

SOURCE DESCRIPTION:

CAPSULE TYPE:	RV (27 mL polyethylene bottle)
NATURE OF ACTIVE DEPOSIT:	Ba-133 dispersed in an epoxy matrix
ACTIVE DIAMETER/VOLUME:	Approx. 20 ml
BACKING:	Plastic
COVER:	Plastic

RADIOIMPURITIES:
Cs-134 = 0.171% on 1 Nov 09.

METHOD OF CALIBRATION:
This source was assayed in a pressurized well-type ionization chamber

UNCERTAINTY OF MEASUREMENT:

TYPE B (SYSTEMATIC) UNCERTAINTY:	± 3.0%
TYPE A (RANDOM) UNCERTAINTY:	± 0.1%
UNCERTAINTY IN ALIQUOT WEIGHING:	± 0.0%
TOTAL UNCERTAINTY AT THE 99% CONFIDENCE LEVEL:	± 3.0%

NOTES:
1. See reverse for leak tests performed on this source.
2. IPL participates in an NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Material (As in NRC Regulatory Guide 4.15).
3. The apparent activity value is the reading from a Capintec CRC-15R ionization chamber.
4. Multiply the apparent activity by 0.8986 to calculate the actual activity.
5. Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
6. This source has a working life of 5 years.

LAB BOOK-PAGE: 1366-37

James Van Dalsem 1-OCT-09
SIGNATURE | DATE

ISO 13485 CERTIFIED

Authorized Representative
Eckert & Zeigler BEBIG GmbH Robert-Rossle-Str.10 D-13125 Berlin Germany
Tel: +49-30-941084-0 Fax: +49-30-941084-112

CE

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GUIMARAES, L. R. **Laboratórios quentes**. Belo Horizonte: IPR, 1957. p 30-31.
2. BLAND, W.H; BAUER, F.; CASSEN, B. **The Practice Nuclear Medicine.** Springfield, III – Thomas, 1958. p. VIII-XI.
3. MAZZILLI, B.P.; ROMERO FILHO, C.R; KODAMA, Y.; SUZUKI, F.; DELLAMANO, J.C.; MARUMO, J.T.; SANCHES, M.P.; VICENTE, R.; BELLINTANI, S.A. **Noções básicas de proteção radiológica**. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2002. 52 p.
4. XAVIER, A.M.; MORO, J.T.; HEILBRON, P.F. **Princípios básicos de segurança e proteção radiológica.** 3.ed.rev. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.
5. CHESMAN, C.; ANDRÉ, C.; MACEDO, A. **Física Moderna: Experimental e aplicada.** 2.ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004. p. 165-167.
6. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Atividades.** Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/acnen/atividades.asp>. Acesso em: 10 mar. 2009.
7. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Requisitos de radioproteção e segurança para serviços de medicina nuclear.** Rio de Janeiro: CNEN, 1996. (CNEN-NN-3.05).
8. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENC. **Quality control of nuclear medicine instruments.** Vienna: IAEA, 1991. (IAEA-TECDOC-602).
9. REGIS, R. Radiofármaco reverte imagem negativa da energia nuclear. **Scientific American Brasil**. Edição 5, out. 2002.
10. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Entidades autorizadas e registradas, medicina nuclear.** Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/seguranca/cons-ent-prof/entidades-aut-cert.asp>. Acesso em: 14 jan. 2010.
11. THE ASSOCIATION OF BRITISH PHARMACEUTICAL INDUSTRY. **Guidelines on the control of radioactive substances in pharmaceutical industry.** London: ABPI, 1996.

12. FAIRES, R.A.; BOSWELL, G.G.J. **Radioisotope laboratory techniques**. 4.ed. London: Butterworth, 1981. p. 68-81, 96-102.
13. SCAFF, L.A.M. **Física da radioterapia.** São Paulo: Ed. Sarvier. 1997. p. 4-7,68.
14. CHESMAN, C.; ANDRÉ, C.; MACEDO, A. **Física Moderna: Experimental e aplicada.** 2.ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004. p. 165-167.
15. MCGRAYNE, B.S. **Mulheres que ganharam o prêmio Nobel em ciências**. São Paulo: Marco Zero, 1994. p. 25, 31, 33, 34.
16. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA**. Pierre e Marie Curie.** Disponível em: <http://w3.ufsm.br/petfisica/extras/curie.html>. Acesso em: 04 fev. 2010.
17. STROTHERN, PAUL. **Curie e a Radioatividade em 90 minutos.** Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1998. p. 24, 47.
18. TAUHATA, L; SALATI, I.P.A.; DI PRINZIO, R. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos.** 3 rev. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 1998. p. 170-171.
19. NAPOLITANO, C.M. **Proteção radiológica em minas subterrâneas de urânio.** 1978. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Energia Atômica, São Paulo.
20. XAVIER, A.M.; MORO, J.T.; HEILBRON, P.F. **Princípios básicos de segurança e proteção radiológica.** 3.ed.rev. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.
21. MURRAY, R.L. **Energia Nuclear. São Paulo: Hermus**. 2004. p. 28, 29.
22. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Diretrizes básicas de proteção radiológica.** Rio de Janeiro: CNEN, 2005. (CNEN-NN-3.01).
23. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Licenciamento de Instalações Radioativas**. Rio de Janeiro: CNEN, 1998. (CNEN-NE-6.02).
24. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Gerência rejeitos radioativos em instalações radioativas.** Rio de Janeiro: CNEN, 1985. (CNEN-NE-6.05).
25. INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **Radiation protection – sealed radioactive sources – General requirements and classification.** Genebra: ISO, 1992. (ISO 2919).
26. INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **Radiation protection – sealed radioactive sources – leakage test methods.** Genebra: ISO, 1992. (ISO 9978).

27. ASSOCIAÇÃO BRASIELIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Iluminância de interiores**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. (NBR 5413).
28. MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Equipamento de Proteção Individual**. Norma Regulamentadora n° 6, 1978.
29. MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Atividades Insalubres**. Norma Regulamentadora n° 15, 1978.
30. MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Atividades e Operações Perigosas**. Norma Regulamentadora n° 16, 1978.
31. MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Ergonomia.** Norma Regulamentadora n° 17, 1978.
32. MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Proteção contra incêndios**. Norma Regulamentadora n° 23, 1978**.**
33. MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Sinalização de Segurança**. Norma Regulamentadora n° 26, 1978**.**
34. YAMAZAKI, I.M.; KOSKINAS, M.F.; DIAS, M.S.; SILVA, L.G.A; VIEIRA, J.M. **Optimization of the method for preparing water-equivalent solid sources.** In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, 2007, Santos. Associação Brasileira de Energia Nuclear.
35. SAHAGAIA, M.; GRIGORESCU, E.L. Water-equivalent solid standard sources. **Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.**, v. 312, 1992. p. 236-239.
36. KNOLL, G.F. **Radiation detection and measurement.** Nova York: Wiley, 1979. p. 129-132.
37. SORENSON, J.A; PHELPS, M.E. **Physics in nuclear medicine.** 2.ed. Filadelfia: Saunders, 1987. p. 57, 59, 294, 295.
38. ROCHA, A.F.G.; HARBERT, J.C. **Medicina Nuclear: Bases.** Rio de Janeiro: Guanabara, 1979. p. 26-29, 110, 113.
39. TSOULFANIDIS, N. **Measurement and detection of radiation.** 2.ed. Washington: Taylor & Francis, 1995. p. 177-180.
40. EARLY, P.J.; RAZZAK, M.A.; SODEE, D.B. **Textbook of nuclear medicine technology.** 2.ed. Saint Louis: Mosby, 1975. p. 131-133.
41. CARRIÓ, I.; GONZALÉZ, P.; ESTORCH, M.; CANESSA, J. **Medicina Nuclear Aplicaciones Clínicas**. Barcelona: Masson, 2003. p.18,19.

42. COSTA, A.M.; CALDAS, L.V.E. Intercomparação e calibração de medidores de atividade utilizados em serviços de medicina nuclear. **Radiol. Bras.,** v. 36, n. 5, 2003. p. 293-297.
43. SCHRADER, H., **Activity measurements with ionization chambers.** v. 4. Pavillon de Breteuil: Bureau International des Poids et Mesures, 1997. p.17-19.
44. WAGNER J.R.; HENRY N. **Principles of nuclear medicine.** 2.ed. Filadelfia: W.B.Saunders Company, 1995. p. 2, 235-237.
45. SAHA. B.G. **Physics and radiobiology of nuclear medicine.** 2.ed. Nova York: Springer, 2001. p. 69-71.
46. MENDES, L.C.G. **Controle de qualidade em calibradores de dose: Guia Técnico.** Rio de Janeiro: IRD/ABFM, 1984. p. 12-20.
47. VOCABULÁRIO INTERNACIONAL DE METROLOGIA. **Conceitos Fundamentais e Gerais e termos Associados.** Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e qualidade industrial (INMETRO), 2009.
48. IWAHA, A. **Rastreabilidade e garantia da qualidade em medições de radionuclídeos utilizados em medicina nuclear.** 2001. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
49. FONSECA, I.M.A. Erros Experimentais - uma abordagem pedagógica – Parte 1. **Bol. Soc. Port. Quím.**, n. 95, 2004. p. 39-40.
50. MOORE, D.S.; MCCABE, G.P. **Introduction to the Practice of statistics.** 5. ed. Nova York: W. H. Freeman, 2006. p. 450-452.
51. SPIEGEL, M.R. **Estatística.** 3.ed. São Paulo: Makron Books, 1993. p. 283-289.
52. HOEL, P.G. **Introdution to mathematical statistics.** 2 ed. Nova York: Wiley, 1955. p. 272-275.
53. MEDICAL RESEARCH CONCIL (MRC). **Health and Safety Standards for Radioisotope Laboratories.** Disponível em: <http://www.mrc.ac.uk/Utilities/Documentrecord/index.htm?d=MRC005578>. Acesso em: 12 out. 2008.
54. CONSELHO REGIONAL DE QUÍMICA - IV REGIÃO. **Minicursos 2008: Segurança em Laboratório Químico.** Campinas: CRQ-IV, 2008.p.25.
55. ASSOCIATION OF UNIVERSITY RADIATION PROTECTION OFFICERS. AURO Guide Notes on Working with Ionising Radiation in Reseach and Teaching.2006.p.29,37,38.

56. CONSELHO REGIONAL DE QUÍMICA - IV REGIÃO. **Guia de Laboratório para Ensino da Química. Instalação, montagem e operação**. São Paulo: CRQ-IV, 2007.p.2.
57. EVERETT, K.; HUGHES, D. **A guide to laboratory design.** Londres: Butterworths, 1975. p. 12-14,58,59,64-65.
58. FURR, A.K. **CRC-Handbook of laboratory safety.** Boca Raton: CRC, 2000. p. 64-71.
59. ASSOCIAÇÃO BRASIELIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Sistemas de revestimentos de alto desempenho, à base de resinas epoxídicas e agregados minerais - Projeto, execução e avaliação do desempenho-Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 1998. (NBR 14050).
60. FONTEYNE, A.J.S. **Pisos e Revestimentos para Salas Limpas**. Sociedade Brasileira de Controle de Contaminação (SBCC). Disponível em: <http://www.sbcc.com.br/revistas_pdfs/ed%2018/18ArtigoTecnicoPisos.pdf>. Acesso em: 07 abr. 2008.
61. OLIVEIRA, F.S.P. **Revista Pisos Industriais PI.** Edição 4. Disponível em: <http://www.pisosindustriais.com.br/materias/noticia.asp?ID=83> Acesso em: 12 jan. 2009.
62. WASHINTON, UNIVERSITY. **Environmental Health and Safety Laboratory Safety Design Guide-General Requirements for Laboratories.** 2005.p.7-8.
63. BUILDING RESEARCH ADVISORY BOARD. **Laboratory design for handling radioactive materials**. Washington: The American Institute of Architects/Atomic Energy Comission, 1951. p. 9, 10, 15.
64. SERVYLAB EQUIPAMENTOS E MÓVEIS PARA LABORATÓRIO LTDA. Disponível em: <http://www.servylab.com.br/>. Acesso em: 20 jan.2010.
65. STEERE, N.V. **Handbook of laboratory safety.** 2 ed.Cleveland: CRC Press, 1976. p. 427-429, 438-440.
66. CAPINTEC. **Radioisotope Dose Calibrator. CRC®-15R. Owner's Manual.** Pittsburgh: Capintec, 2007.