

Instituto de Radioproteção e Dosimetria – IRD
Comissão Nacional de Energia Nuclear

**PROJETO DE BASE PARA CONCEPÇÃO DE UM
LABORATÓRIO DE DOSIMETRIA E RADIOPROTEÇÃO
PADRÃO SECUNDÁRIO (SSDL) NA REPÚBLICA DE ANGOLA**

Narciso Cláudio Bento Sambembe

Rio de Janeiro
2015

Narciso Cláudio Bento Sambembe

**PROJETO DE BASE PARA CONCEPÇÃO DE UM
LABORATÓRIO DE DOSIMETRIA E RADIOPROTEÇÃO
PADRÃO SECUNDÁRIO (SSDL) NA REPÚBLICA DE ANGOLA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado para obtenção da certificação de Especialista pelo Programa de Pós-Graduação em Proteção Radiológica e Segurança de Fontes Radioativas do Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear.

Orientador: Prof. Dr. José Ubiratan Delgado
IRD/CNEN

Co-Orientador: Prof. M.sc. Cosme da Silva
IRD/CNEN

Rio de Janeiro – Brasil

Instituto de Radioproteção e Dosimetria – Comissão Nacional de Energia Nuclear

Coordenação de Pós-Graduação

2015

Narciso Cláudio Bento Sambembe

**PROJETO DE BASE PARA CONCEPÇÃO DE UM
LABORATÓRIO DE DOSIMETRIA E RADIOPROTEÇÃO
PADRÃO SECUNDÁRIO (SSDL) NA REPÚBLICA DE ANGOLA**

Rio de Janeiro, 30 de Setembro de 2015

Prof. Dr. Almir Faria Clain – IRD/CNEN

Prof. Dr. Carlos José da Silva – IRD/CNEN

Prof. Dr. José Ubiratan Delgado – IRD/CNEN

O presente trabalho foi desenvolvido no Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear, sob orientação do Prof. Dr. José Ubiratan Delgado e Co-orientado pelo M.Sc. Cosme Norival Melo da Silva.

Ficha Catalográfica

T
389
S188p

Sambembe, Narciso Cláudio Bento

Projeto de base para concepção de um laboratório de dosimetria e radioproteção padrão secundário (SSDL) na República de Angola / Narciso Cláudio Bento Sambembe. Rio de Janeiro: IRD/IAEA, 2015.

XIII, 59 f., 29,7cm: il., tab.

Orientador: Dr. José Ubiratan Delgado

Co-orientador: M.Sc. Cosme Norival Melo da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização (Lato Sensu) em Proteção Radiológica e Segurança de Fontes Radioativas) – Instituto de Radioproteção e Dosimetria. Rio de Janeiro, 2015.

Referências bibliográficas: f. 56-59

1. Metrologia. 2. SSDL. 3. Fundamentos da Metrologia das Radiações Ionizantes 4. Grandezas e Unidades Radiológicas 5. Calibração de Dosímetros Clínicos I. Título

AGRADECIMENTOS

Os meus sinceros agradecimentos vão em primeiro lugar ao Senhor Todo Poderoso, por todas as bênçãos que me tem concedido e pela dádiva da vida à humanidade.

Aos meus Pais, a minha noiva Janeth Emilia, familiares e amigos por todo apoio incondicional nos bons e maus momentos da vida.

Em especial aos Professores Drs. José Ubiratan Delgado, Aucyone Augusto da Silva, Almir Clain e a Senhora Diretora do IRD Dr^a. Dejanira Lauria, pelos encorajamentos, incentivos, amizade, cordialidade e apoios nos momentos difíceis da minha estadia no Brasil.

Ao M.Sc. Cosme Norival meu co-orientador pelos ensinamentos, paciência, amizade e simpatia e de igual modo para a M.Sc. Tânia Cabral, a Dr^a. Karla Patrão e a Técnica Luzianete Amaral, da DIMET.

A todos os Professores do curso Lato-Sensu, funcionários do IRD em especial aos do LNMRI-DIMET,

Aos Drs. Pedro Carlos Domingos Lemos (Diretor Geral da AREA), Luís Filipe Teixeira Cardoso (Diretor Geral-Adjuntos da AREA), Moniz da Rocha (Chefe do Dpto. de Dosimetria e Radioproteção, ao Eng. Felix Viera Lopes (NLO) e a todos os meus colegas da Autoridade Reguladora de Energia Atômica de Angola (AREA), por todo apoio e esforços empreendidos, e tornarem o meu sonho de frequentar este curso em uma realidade.

Ao Senhor Chao-Chia, Coordenador da Cooperação Internacional - CNEN, pela ajuda prestada na resolução dos problemas migratórios.

A todos os meus colegas do curso Lato-Sensu, pelo apoio, carinho, amizade, simpatia e respeito.

A Agência Internacional de Energia Atômica, por todo apoio e o suporte.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para que este curso fosse um sucesso, o meu muito obrigado.

RESUMO

A República de Angola, como qualquer outro país do globo terrestre, tem o compromisso assumido pelos seus órgãos governamentais para a utilização da energia nuclear de forma pacífica e segura, visando aproveitar os ganhos e a grande contribuição que a mesma vem proporcionando para o desenvolvimento das nações.

Mas, existe uma necessidade gritante na República de Angola por serviços de calibração e dosimetria por parte das empresas do ramo industrial, ensino, pesquisa e em serviços de medicina, públicos e privados, que possuem nas suas instalações fontes emissoras de radiação ionizante. Os fundamentos deste projeto são baseados na necessidade do atendimento da demanda sobre os serviços de calibração dos instrumentos de medição da radiação ionizante aplicados às diversas atividades presentes na República de Angola.

O principal objetivo deste trabalho não foi o de fazer uma análise dos custos para instalação de um SSDL, nem tão pouco o de propor um *design*, mas sim nortear as autoridades governamentais competentes da República de Angola, que a instalação de um laboratório desta natureza envolve um investimento sério e comprometido, cujos ganhos de produtividade, capacitação de quadros, aumento do controle da segurança radiológica e nuclear, melhoria da qualidade de vida, assim como a eliminação de desperdícios de recursos financeiros, terão um impacto maior para o desenvolvimento do país.

Como método de trabalho, as etapas para o desenvolvimento inicial do mesmo contaram com o apoio do pessoal e da infraestrutura laboratorial do LNMRI / IRD, como estudo de caso. Parte do objetivo deste trabalho foi concretizada, a qual consistiu na verificação em termos práticos do funcionamento de um laboratório SSDL, assim como foi constatada o provimento de sua rastreabilidade junto dos laboratórios primários bem como a participação ativa nas redes interlaboratoriais e comparações-chave no âmbito do BIPM.

Assim, este estudo demonstrou ser viável a implementação de uma estrutura mínima para um laboratório do tipo SSDL, uma vez assegurada a canalização de fundos e recursos financeiros para a sua materialização.

Palavras chaves: SSDL, Metrologia das Radiações ionizantes, Dosimetria e Radioproteção, Calibração dosimétrica.

ABSTRACT

The Republic of Angola, as any other country of the globe, has the commitment assumed by their government organs for the use of the nuclear energy in a peaceful and safe way, seeking to take advantage the earnings and the great contribution that the same is providing for the development of the nations.

But, a whopping need exists in the Republic of Angola for calibration services and dosimetry on the part of the companies of the industrial branch, I teach, he/she researches and in medicine services, publics and private, that you/they possess in their facilities issuing sources of radiation ionizing. The foundations of this healthy project based on the need of the service of the demand on the services of calibration of the measurement instruments of the radiation applied ionizing to the several present activities in the Republic of Angola.

The main objective of this work was not it of doing an analysis of the costs for installation of a SSDL, nor so a little the one of proposing a design, but to orientate the competent government authorities of the Republic of Angola, that the installation of a laboratory of this nature involves a serious and committed investment, whose won of productivity, training of pictures, increase of the control of the safety radiological and nuclear, improvement of the life quality, as well as the elimination of wastes of financial resources, they will have a larger impact for the development of the country.

As a working method, the steps for the initial development of it had the support of personnel and laboratory infrastructure LNMRI / IRD, as a case study. He/she leaves of the objective of this work was rendered, which consisted of the verification in practical terms of the operation of a laboratory SSDL, as well as the provision of his/her traceability was verified the primary laboratories near as well as the participation activates in the nets interlaboratory and comparison-key in the extent of BIPM.

Like this, this study demonstrated to be viable the implementation of a minimum structure to a laboratory of the type SSDL, once insured the canalization of bottoms and financial resources for his/her materialization.

Key words: SSDL, Metrology of the Ionizing Radiations, Dosimetry and Radioprotection, Calibration dosimetric.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABELAS	xiii
SIGLAS E ACRÔNIMOS.....	xiv
OBJETIVOS	1
1. INTRODUÇÃO	2
1.1. BREVE HISTÓRICO SOBRE A REDE INTERNACIONAL SSDL DA AIEA/OMS.....	4
1.2. PRINCÍPIOS E RECOMENDAÇÕES	5
1.3. A REDE SSDL.....	6
1.4. CRITÉRIOS DA AIEA/OMS PARA O ESTABELECIMENTO DE UM SSDL.....	6
1.4.1 RESPONSABILIDADES DOS ESTADOS-MEMBRO.....	7
1.4.2. DEFINIÇÕES E CONCEITOS APROVADOS PELA REDE SSDL.....	7
1.4.3. CLASSIFICAÇÃO DOS INSTRUMENTOS.....	8
1.4.4. ESTRUTURA ORGANIZACIONAL DO LABORATÓRIO.....	8
1.4.5. LOCALIZAÇÃO DO LABORATÓRIO.....	9
1.4.6. INSTALAÇÕES.....	9
1.4.7. SERVIÇOS.....	10
1.4.8. INSTALAÇÕES DE CALIBRAÇÃO E EQUIPAMENTOS.....	10
1.4.9. RESPONSABILIDADES DO SSDL.....	11
1.5. O LNMRI-IRD.....	12
1.5.1. SERVIÇOS PRESTADOS PELO LNMRI EM DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES.....	13
1.6. SISTEMA DE GESTÃO DA QUALIDADE COM BASE NA NORMA ABNT NB.....	14
2. FUNDAMENTOS GERAIS SOBRE METROLOGIA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES.....	16
2.1. HIERARQUIA DOS SISTEMAS METROLÓGICOS.....	17
2.2. O PROCESSO DE MEDIÇÃO.....	19
2.3. RASTREABILIDADE.....	19
2.4. DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DA MEDIÇÃO.....	20
3. GRANDEZAS E UNIDADES.....	24
3.1. GRANDEZAS FÍSICAS	24
3.1.1. FLUÊNCIA.....	24
3.1.2. KERMA.....	25
3.1.3. DOSE ABSORVIDA.....	25
3.2. GRANDEZAS DE PROTEÇÃO	25
3.2.1. DOSE EQUIVALENTE	25
3.2.2. DOSE EFETIVA	26
3.3. GRANDEZAS OPERACIONAIS	28

3.3.1. GRANDEZAS OPERACIONAIS PARA MONITORÇÃO INDIVIDUAL	28
3.3.2. GRANDEZAS OPERACIONAIS PARA MONITORÇÃO DE ÁREA	28
3.4. PRINCÍPIOS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA	29
3.4.1. PRINCÍPIO DA JUSTIFICAÇÃO	30
3.4.2. PRINCÍPIO DA OTIMIZAÇÃO	30
3.4.3. PRINCÍPIO DA LIMITAÇÃO DE DOSE	30
4. DETECTORES DE RADIAÇÃO IONIZANTE.....	32
4.1. PROPRIEDADES DE UM DETECTOR.....	32
4.2. CLASSIFICAÇÃO DOS DETECTORES	33
4.3. CALIBRAÇÃO DE DETECTORES.....	34
4.3.1.CALIBRAÇÃO ATRAVÉS DE UM INSTRUMENTO PADRÃO DE REFERÊNCIA.....	35
5. METODOLOGIA E INFRAESTRUTURA.....	37
5.1. ESTABELECIMENTO DAS CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA DE UM IRRADIADOR DE ALTAS ENERGIAS USADO NA CALIBRAÇÃO DE MONITORES DE ÁREA	40
5.1.1 PROCEDIMENTOS.....	40
5.2. CALIBRAÇÃO DE DOSÍMETROS CLÍNICOS.....	42
5.2.1. PROCEDIMENTOS.....	43
6. ANÁLISE E DISCUSÃO DOS RESULTADOS.....	52
7. CONCLUSÃO.....	54
7.1. TRABALHOS FUTUROS	55
8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	56

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. MAPA DO CONTINENTE ÁFRICANO	2
FIGURA 2. MAPA DA REPÚBLICA DE ANGOLA	6
FIGURA 3. REPRESENTAÇÃO DA HIEARQUIA E RASTREABILIDADE METROLÓGICA DAS MEDIÇÕES REALIZADAS PELOS INSTRUMENTOS DOS USUÁRIOS ATÉ AOS PADRÕES INTERNACIONAIS, PARA CADA TIPO DE GRANDEZA..18	
FIGURA 4. GEOMETRIA DE IRRADIAÇÃO DA ESFERA ICRU E O PONTO P NA ESFERA, NO QUAL O EQUIVALENTE DE DOSE DIRECIONAL É OBTIDO NO CAMPO DE RADIAÇÃO EXPANDIDO, COM A DIREÇÃO Ω DE INTERESSE.	29
FIGURA 5. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA RELAÇÃO EXISTENTE ENTRE AS DIFERENTES GRANDEZAS DOSIMÉTRICAS: GRANDEZAS FÍSICAS, GRANDEZAS DE RADIOPROTEÇÃO E GRANDEZAS OPERACIONAIS.	31
FIGURA 6. MONITOR DE RADIAÇÃO PORTÁTIL GEIGER-MÜLLER/ GRAETZ 50DE.....	33
FIGURA 7. CINTILÔMETRO PORTÁTIL RAD EYE PRD, DE ALTA SENSIBILIDADE, UTILIZADO EM ATIVIDADES DE TRIAGEM E LOCALIZAÇÃO DE FONTES EMISSORAS DE RADIAÇÃO GAMA.....	34
FIGURA 8. DOSÍMETRO CLÍNICO (CONJUNTO CÂMARA DE IONIZAÇÃO ELETRÔMETRO).....	34
FIGURA 9. CALIBRAÇÃO DE UM INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO	35
FIGURA 10. ARRANJO EXPERIMENTAL DO LABORATÓRIO DO SISTEMA DE IRRADIAÇÃO E POSICIONADOR	42
FIGURA 11. PROFUNDIDADE DE REFERÊNCIA PARA DETERMINAÇÃO DA DOSE ABSORVIDA NA ÁGUA	43
FIGURA 12. PAINEL DE CONTROLE DO IRRADIADOR	48
FIGURA 13. ARRANJO EXPERIMENTAL MOSTRANDO O POSICIONAMENTO DA CÂMARA DE IONIZAÇÃO.....	49

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. INFORMAÇÕES DE UTILIDADE PÚBLICA SOBRE A REPÚBLICA DE ANGOLA.	2
TABELA 2. FATORES DE PONDERAÇÃO RECOMENDADOS PELO ICRP 60 E PELO ICRP 103 PARA OS DIFERENTES ÓRGÃOS OU TECIDOS BIOLÓGICOS	26
TABELA 3. FATORES DE PONDERAÇÃO RECOMENDADOS PELO ICRP 60 E PELO ICRP 103 PARA OS DIFERENTES TIPOS DE RADIAÇÃO	27
TABELA 4. EXEMPLO DE CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA E CONDIÇÕES DE TESTES PADRÃO	35
Tabela 5. Condições de referência para a calibração de câmaras de ionização em ^{60}Co no LNMRI	44

SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIEA – Agência Internacional de Energia Atômica
ALARA – Tão baixo quão razoavelmente possível (As Low As Reasonable Achievable)
AREA – Autoridade Reguladora de Energia Atômica
BSS – International Basics Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiations Sources
BIPM – Bureau Internacional de Pesos e Medidas
CCPMRI – Comitê Consultivo para os Padrões de Medida da Radiação Ionizante
CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear
DIMET – Divisão de Metrologia
GUM – Guia para a Expressão de Incerteza de Medição
ICRP – Comissão Internacional de Proteção Radiológica
ICRU – Comissão Internacional de Medidas e Unidades Radiológicas
IEC – Comissão Electrotécnica Internacional
INMETRO Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IOE – Individuo Ocupacionalmente Exposto
IRD – Instituto de Radioproteção e Dosimetria
ISO – Organização Internacional de Padronização
LNMRI – Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes
NORM – Materiais Radioativos de Ocorrência Natural
OMS – Organização Mundial da Saúde
OIML – Organização Internacional de Metrologia Legal
IOMP – Organização Internacional de Física Médica
PSDL – Laboratório de Dosimetria Padrão Primário
PUC-RJ – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
RP – Radioproteção
RT – Radioterapia
RX – Raios X
SSDL – Laboratório de Dosimetria Padrão Secundário
TLD – Dosímetro Termoluminescente
VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia

OBJETIVO GERAL

Definir as etapas fundamentais para a implementação de um Laboratório de Dosimetria e Radioproteção de Padrão secundário (SSDL) na República de Angola, de acordo com os padrões e regulamentos da Rede SSDL, assim como das normas ISO, para o controle e garantia da qualidade.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Desenvolver competências profissionais na área da metrologia das radiações ionizantes, com o apoio institucional da IAEA e do LNMRI/IRD;
- ii. Instituir na República de Angola o primeiro Laboratório Nacional de metrologia das radiações ionizantes;
- iii. Desenvolvimento de competências metrológicas em Dosimetria das Radiações para a melhoria da qualidade de vida dos cidadãos;
- iv. Proporcionar a nível nacional, serviços de Calibração de monitores de área usados em Radioproteção, Dosimetria clínica e individual;
- v. Participar ativamente da rede internacional de inter-comparação entre Laboratórios de Dosimetria e Radioproteção;
- vi. Impulsionar a pesquisa e a investigação científica na área da dosimetria e das radiações ionizantes, entre instituições públicas, privadas e universidades do país; e
- vii. Proporcionar treinamento na área da metrologia das radiações, para profissionais, estudantes e público em geral.

1. INTRODUÇÃO

A República de Angola é um país de língua oficial Portuguesa, que situa-se geograficamente na costa atlântica Sul da África Ocidental, entre as Repúblicas da Namíbia e do Congo, e também faz fronteira com a República Democrática do Congo e a Zâmbia, a oriente, conforme podemos observar nas Figuras 1 e 2.



Fig. 1-Mapa do continente Africano [1]



Fig. 2-Mapa da República de Angola [1]

Outras informações, importantes sobre o País podemos encontrar na Tabela 1.

Tabela 1- Informações de utilidade pública sobre a República de Angola [1]

Capital	Luanda 🌐 8° 49' S 13° 14' E
Cidade mais populosa	Luanda
Língua oficial	Português
Independência de Portugal	11 de novembro de 1975
Área total	1 246 700 km ²
Fronteira	República do Congo, República Democrática do Congo, Zâmbia e Namíbia
População, Censo de 2014	24,3 milhões hab.
Densidade populacional	19,45 hab./km ²

A aplicação pacífica da energia nuclear tem um papel cada vez mais importante na economia mundial. O uso da radiação ionizante e materiais radioativos, em Angola, tem vindo a trazer benefícios importantes aos setores da economia como

a medicina, a agricultura, a indústria, a investigação, o ensino e o desenvolvimento tecnológico.

A República de Angola é um Estado Membro da Agência Internacional de Energia Atômica, instituição do sistema das Nações Unidas à qual cabe velar para que a energia atômica seja utilizada para fins pacíficos e sem perigo para a saúde humana e o ambiente [2].

O Estado angolano aderiu à Convenção sobre a Segurança Nuclear e sobre a Notificação Rápida de um Acidente Nuclear, bem como ao Acordo Suplementar Revisto sobre a Assistência Técnica pela Agência Internacional de Energia Atômica e ao Acordo Regional Africano de Colaboração para Pesquisa, Desenvolvimento e Formação na Área da Ciência e Tecnologia Nuclear [2].

De um tempo a esta parte, o uso das tecnologias nucleares no país tem aumentado significativamente e as práticas que utilizam a energia nuclear são autorizadas pela Autoridade Reguladora de Energia Atômica, criada à luz do Decreto 79/07 aos 16 de Novembro, pelo parlamento da República de Angola e aprovado, por Sua Excia. o Presidente da República, é a instituição do Estado com autonomia jurídica e financeira para o estabelecimento dos padrões para controle e o uso seguro da radiação ionizante no país.

O marco legislativo da área nuclear na República de Angola, ainda está em desenvolvimento pelo que, o uso da energia nuclear no país encontra-se sob os holofotes da lei 4/07 de 5 de Setembro, lei da Energia Atômica, pelo Decreto Presidencial 12/12 de 25 de Janeiro, Regulamento Sobre Radioproteção, que foram instituídas de acordo aos Padrões Internacionais Básicos de Segurança para a Proteção contra Radiações Ionizantes e para a Segurança das Fontes de Radiação (BSS-115), estabelecidos pela comunidade internacional em 1996, bem como outras recomendações e guias da Agência Internacional de Energia Atômica - AIEA.

Outras normas de Segurança e Radioproteção, para o uso das radiações e fontes em Radioterapia, Medicina Nuclear, Radiológica diagnóstica e Intervencionista, Radiografia industrial, Gestão de Rejeitos e materiais NORM, encontram-se em fase final de estudos e que esperam serem aprovadas brevemente.

Não é possível garantir efetivamente a segurança radiológica e nuclear, sem equipamentos que detectam e quantifiquem a presença da radiação ionizante no meio ambiente. Tais equipamentos, contudo, até podem ser utilizados, mas para se garantir confiabilidade nos resultados medidos, é necessário que sejam calibrados.

Para aferir se os detetores de radiação ou os dosímetros, encontram-se em boas condições de funcionamento, é importante que os mesmos sejam calibrados por laboratórios acreditados por instituições com competências e reconhecimento internacional, os quais seguem modelos de reastreabilidade metrológica para o estabelecimento de padrões de medição, que oferecem garantia da qualidade, visando a satisfação dos clientes, bem como melhorar a qualidade de vida das populações.

Em Angola, até ao momento, não existe nenhum laboratório acreditado para a calibração dos monitores de radiação usados nas áreas médica, industrial, pesquisa e no controle das conformidades regulatórias.

Comumente, tem-se recorrido a laboratórios acreditados para o fim, fora do país e na maioria das vezes, fora do continente, pelo fato do número bastante reduzido de serviços disponíveis no continente Africano.

Este projeto visa a implementação no País de um laboratório com competências e capacidades metrológicas de padrão secundário (SSDL), segundo as normas e recomendações da rede de laboratórios da AIEA e da Organização Mundial da Saúde (OMS), visando dispor para o mercado nacional de serviços de calibração e dosimetria capazes de atender a demanda, evitar custos e desperdícios financeiros.

1.1. BREVE HISTÓRICO SOBRE A REDE INTERNACIONAL SSDL DA AIEA/OMS

Na década de sessenta se deu início a uma necessidade para o desenvolvimento de técnicas capazes de determinar com maior precisão dosimétrica da dose administrada aos pacientes de radioterapia, particularmente nos países em desenvolvimento [13,12], o que levou à criação de um número de laboratórios de

dosimetria em todo o mundo, especializados na calibração de instrumentos de medição da radiação e dosímetros clínicos[13,11].

A fim de coordenar a prestação de orientação e assistência a esses laboratórios, a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) e a Organização Mundial da Saúde (OMS), em 1976 através de um acordo de trabalho conjunto, criam uma rede de Laboratórios de Dosimetria Padrão Secundário (SSDLs) sob a égide conjunta, a fim de melhorar a precisão na dosimétrica da radiação aplicada em todo o mundo [11,12,13].

A principal função de um SSDL é fornecer um serviço no domínio da metrologia das radiações ionizantes. Como detentor de um instrumento de medição padrão secundário, ele fornece um elo essencial para o sistema de medição internacional, consubstanciado em comparação de padrões realizadas por laboratórios padrões primários sob a égide do Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM) [11,12,13].

Um laboratório de Dosimetria padrão secundário pode deter e conservar o padrão nacional de um país (para uma grandeza em particular), e o laboratório pode ser parte de uma organização metrológica internacional. As funções e estatutos de um SSDL são determinados pelas autoridades nacionais ou locais, mas, em todos os casos, o reconhecimento e apoio necessário por parte das autoridades competentes são cruciais para que se verifique um sucesso efetivo do funcionamento do mesmo na prática, e é um pré-requisito para a plena adesão à Rede SSDL [11,13].

1.2. PRINCÍPIOS E RECOMENDAÇÕES

É um princípio básico da metrologia que as medições de grandezas físicas devem ser rastreáveis a padrões de medição aprovados, proporcionando assim a garantia de que a precisão das medições esteja adequada para o efeito [11,13].

Cada país em que a radiação ionizante é utilizada deve optar por manter um padrão de medição nacional, que pode ser um padrão primário ou secundário, para cada grandeza radiológica relevante, além de tomar as providências para o pronto acesso a tais padrões estabelecidos e mantidos em outros países, ou pela

Rede de SSDLs da AIEA/OMS para a calibração dos instrumentos pertinentes [11,13].

Na ausência de padrões primários de medição das radiações ionizantes (PSDL), os padrões nacionais podem ser mantidos por um laboratório nacional pelo padrão secundário (SSDL) [11,13].

1.3. A REDE SSDL

Em todos os países habilitados a fazer parte da Rede de SSDL, a AIEA e OMS recomendam que os mesmos estejam ligados a uma Organização Metrológica Nacional.

No caso de países que não possuem uma instituição nacional responsável em manter os padrões de medida, a AIEA/OMS, podem aceitar a adesão dos mesmos a Rede SSDLs, após um pedido oficial das autoridades nacionais competentes, para tal também é necessário que as autoridades nacionais, garantam todos os apoios ao SSDL, o que representa um pré-requisito para a sua participação na Rede SSDL [11,13].

A Participação na Rede SSDL não constitui um pré-requisito para a obtenção de assistência através do programa de cooperação técnica da AIEA. A prestação de tal assistência será baseada em um pedido das autoridades nacionais competentes e tendo em conta as prioridades estabelecidas por estas, dentro dos limites dos recursos disponíveis para a execução do referido programa [11,13].

1.4. CRITÉRIOS DA AIEA/OMS PARA O ESTABELECIMENTO DE UM SSDL

Os critérios para o estabelecimento de um SSDL têm como objetivo principal orientar as autoridades competentes dos país que pretendem uma adesão à rede, e os mesmos estão publicados na nova carta da Rede SSDL, com o título original na língua inglesa "IAEA/WHO NETWORK OF SECONDARY STANDARD DOSIMETRY LABORATORIES" [11], publicado em Julho do ano de 1997, em que os requisitos mínimos de adesão são essencialmente os seguintes:

1.4.1. RESPONSABILIDADES DOS ESTADOS-MEMBRO

- i. Um laboratório pode tornar-se membro desta rede, após o cumprimento dos critérios gerais estabelecidos pela AIEA/OMS, a pedido de seu governo;
- ii. Apenas um laboratório SSDL deve ser instituído para cada Estado-Membro, o que significa, se o Estado-Membro não possuir nenhum padrão nacional para a medição das radiações ionizantes, o mesmo deve reconhecer como padrão nacional, os padrões mantidos pela rede;
- iii. O desempenho do trabalho de um laboratório dentro da rede não impõe qualquer responsabilidade à AIEA, a OMS ou a outras instituições colaboradoras;

1.4.2. DEFINIÇÕES E CONCEITOS APROVADOS PELA REDE SSDL

- i. Um SSDL nacional é um laboratório que tenha sido designado pelas autoridades nacionais competentes para desempenhar as funções de um laboratório de calibração dentro desse país;
- ii. Um SSDL deve estar equipado com padrões secundários que são calibrados em relação aos padrões primários de laboratórios que participam no sistema de medição internacional;
- iii. Um Laboratório de Dosimetria Padrão Primário (PSDLs), é um laboratório nacional designado pelo governo com a finalidade de desenvolver, manter e melhorar os padrões primários em dosimetria das radiações ionizantes;
- iv. Um PSDL participa ativamente no sistema de medição internacional, fazendo comparações por intermédio do BIPM, e fornece serviços de calibração para instrumentos de medição de padrão secundário;
- v. A rede SSDL da AIEA/OMS é uma associação de SSDLs que se compromete a cooperar na promoção dos objetivos da referida rede, sob os auspícios internacionais. Seus objetivos são:
 - i. para melhorar a precisão da dosimetria, particularmente em radioterapia (RT) e protecção radiológica (RP), através do apoio a centros e laboratórios para a criação e distribuição de conhecimento em dosimetria aplicada;

- ii. para promover o intercâmbio de experiências entre os membros e membros associados e prestar apoio uns aos outros, quando necessário;
- iii. para estabelecer e facilitar as ligações entre os membros e os do sistema internacional de medições da radiação através PSDLs; e
- iv. para favorecer a compatibilidade dos métodos utilizados para a calibração e o desempenho da dosimetria, a fim de se alcançar uniformidade de medições em todo o mundo.

1.4.3. CLASSIFICAÇÃO DOS INSTRUMENTOS

- i. Padrão primário – é um instrumento da mais alta qualidade metrológica, o que permite a determinação da quantidade a ser medida a partir de medições de grandezas físicas básicas, e cuja exatidão tenha sido verificada por comparação com padrões equivalentes de outras instituições que participam no sistema de medição internacional;
- ii. Padrão secundário – é um instrumento de precisão e estabilidade a longo prazo e o mesmo deve ser calibrado por um padrão primário;
- iii. Instrumento de campo – é um instrumento utilizado para as medições de rotina.

1.4.4. ESTRUTURA ORGANIZACIONAL DO LABORATÓRIO

O trabalho do laboratório deve ser independente em caráter e livre de qualquer influência externa que possam afetar adversamente a qualidade ou a imparcialidade do serviço que oferece;

- i. O chefe do laboratório deve ser um profissional com vários anos de experiência em medição e calibração de instrumentos de radiação;
- ii. O chefe do laboratório é responsável pelo trabalho realizado no laboratório e deve ser nomeado pela direção da instituição com jornada de trabalho em tempo integral;
- iii. O chefe do laboratório é responsável pelos procedimentos de calibração devidamente documentados, também pela certificação e da implementação de programas de controle de qualidade;

- iv. Como obrigação primordial, o pessoal do laboratório deve possuir qualificações e experiência em procedimentos de medição adequados e a práticas adequadas às suas responsabilidades;
- v. O chefe do laboratório deve ser a pessoa responsável para assinar os certificados de calibração emitidos pelo SSDL.

1.4.5. LOCALIZAÇÃO DO LABORATÓRIO

Para que o laboratório esteja localizado adequadamente, os seguintes critérios devem ser considerados:

- i. Deve estar localizado geograficamente em uma posição que facilite ao atendimento da demanda dos seus serviços prestados e à prática do desempenho;
- ii. Deve ser livre de perturbações ambientais externas que sejam susceptíveis de afetar às medições;
- iii. Deve ser reservado um espaço, prevendo a possibilidade do aumento das suas instalações no futuro;

1.4.6. INSTALAÇÕES

Os requisitos mínimos que as instalações devem possuir são os seguintes:

- i. É desejável que o laboratório tenha um espaço exclusivo para o desempenho da suas atividades;
- ii. Ter no mínimo uma sala com (6 m X 3 m X 3 m), necessária para as calibrações com raios-X, e uma segunda sala é necessária para calibrações com a radiação gama ou outras;
- iii. A área controlada deve ser devidamente blindada para que a sala de comando e controle das calibrações seja mantida dentro dos limites de permitidos para os IOE's, estabelecidos pelas normas regulamentares;
- iv. Ter uma sala específica para os equipamentos eletrônicos, mecânicos e outros de suporte às atividades desempenhadas pelo laboratório, como por exemplo, verificar e preparar os dosímetros usados nos serviços TLD para a calibração, etc.;

- v. Espaço de escritório para o chefe do laboratório, pessoal técnico-científico e pessoal de secretariado.

1.4.7.SERVIÇOS

- i. Estabilidade adequada do fornecimento de tensão de rede e um sistema de estabilização da tensão;
- ii. Controle das condições ambientais, como a pressão e a temperatura em particular, um sistema automático de ar condicionado e o controle da umidade;
- iii. Sistema para o abastecimento de água adequado e remoção de água dos sistemas de refrigeração;

1.4.8. INSTALAÇÕES DE CALIBRAÇÃO E EQUIPAMENTOS

- i. Um SSDL deve ser capaz de fornecer serviços de calibração para a radioterapia e radioproteção;
- ii. Possuir no mínimo dois padrões secundários, em que um dos quais deve ser mantido no laboratório unicamente como um instrumento de base de referência.
- iii. Possuir métodos de controle de estabilidade, incluindo o uso de fontes radioativas de verificação e testes;
- iv. Os padrões secundários devem inicialmente ser calibrado para as faixas de interesse por um padrão primário de um laboratório nacional de padronização reconhecido, e re-calibrado pelo menos a cada cinco anos;
- v. São necessários equipamentos auxiliares como diafragmas, um conjunto de filtros, um mecanismo de obturação, e bancos de calibração com dispositivos de posicionamento.
- vi. Outros equipamentos necessários e obrigatórios são os abaixo delineados:
 - inclui instrumentos de precisão para a medição de tempo;
 - temperatura, pressão e umidade;

- equipamento adicional para servir como *back-up* em caso de avaria de instrumentação, ou para fornecer técnicas alternativas para confirmar as medições feitas.
- vii. A concepção das instalações de calibração deve estar em conformidade com as normas de segurança nacionais e internacionais relevantes.

1.4.9. RESPONSABILIDADES DO SSDL

As responsabilidades de um SSDL incluem, mas não estão limitados(a), as seguintes atividades:

- i. Manutenção dos instrumentos padrão secundários de acordo com o sistema de medição internacional, e realizar re-calibrações pelo menos a cada cinco anos;
- ii. Realização de calibrações de equipamentos de medição da radiação e a emissão de certificados de calibração com todas as informações necessárias, incluindo as incertezas estimadas;
- iii. A organização de comparações de dose para a RT com as instituições dentro do país ou região, e participar em comparações de medição dentro da rede SSDL, e com outros laboratórios de padronização;
- iv. Estabelecer mecanismos de cooperação com a rede AIEA/OMS e com outros laboratórios metrológicos na troca de informações e aperfeiçoamento dos instrumentos de medição e técnicas;
- v. Documentar e preservar os registros de todos os procedimentos e os resultados das calibrações;
- vi. Manter-se atualizado sobre o progresso nos processos de medição da radiação, de modo a melhorar as técnicas de calibração, conforme necessário, e assim, prestar um melhor serviço aos usuários da radiação;
- vii. Fornecimento de treinamento em técnicas de medição e calibração de radiação e no uso e manutenção de instrumentação relevante, adequados aos usuários da radiação atendidos pelo SSDL;

- viii. Reportando-se ao Secretariado da rede, pelo menos uma vez por ano, sobre o estado das suas normas secundárias, fontes de radiação, calibrações realizadas, publicações e atividades relacionadas.

Existem no mundo atualmente 80 SSDLs da rede AIEA/OMS em que o LNMRI é um dos laboratórios desta rede, desde 1976 [3], cujas principais organizações associadas e colaboradoras são[11,12,13]:

1. Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM)
2. Comissão Internacional de Unidades e Medidas Radiação (ICRU)
3. Comissão Electrotécnica Internacional (IEC)
4. Organização Internacional de Metrologia Legal (OIML)
5. Organização Internacional de Física Médica (IOMP).

1.5. O LNMRI-IRD

O Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD) é uma instituição de pesquisa, desenvolvimento e ensino na área de radioproteção, dosimetria e metrologia das radiações ionizantes. Ligado à Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), atua em colaboração com universidades, agências governamentais e indústrias para promover o uso seguro das radiações ionizantes e da tecnologia nuclear[40], que teve a sua origem em 1960 num pequeno laboratório de dosimetria do Departamento de Pesquisas Científicas e Tecnológicas da CNEN, situado nas instalações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ) [42].

A principal missão do IRD consiste na atuação com excelência nas áreas de radioproteção, dosimetria e metrologia, gerando e disseminando conhecimento e tecnologia para o uso seguro das radiações ionizantes, visando à melhoria da qualidade de vida no país [40].

Desde 1976, o IRD possui um Laboratório de Dosimetria Padrão Secundário reconhecido pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) e pela Organização Mundial de Saúde (OMS). Em 1989, o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) delegou à instituição a responsabilidade nacional no campo da metrologia das radiações ionizantes,

sendo designado Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI) [40].

A área de metrologia do Instituto de Radioproteção e Dosimetria trabalha para garantir à sociedade qualidade e confiabilidade das medições em atividades envolvendo o uso das radiações ionizantes; seja na área médica, controle de emissões radioativas ou em processos industriais, essa atuação promove a saúde e a segurança da população, de pacientes e de trabalhadores expostos à radiação, além da preservação do meio ambiente e de instalações [41].

Como referência nacional em metrologia das radiações ionizantes, o LNMRI realiza pesquisa e desenvolvimento, organiza e participa de comparações interlaboratoriais nacionais e internacionais, em estreita colaboração com o Bureau Internacional de Pesos e Medidas, o Sistema Interamericano de Metrologia e a Agência Internacional de Energia Atômica [41].

Os laboratórios da Divisão de Metrologia (DIMET) dispõem de uma infraestrutura predial de dois mil metros quadrados na área central do IRD, onde opera desde 2003 um sistema da qualidade baseado em requisitos da norma ISO/NBR 17025 e em constante aprimoramento [41].

1.5.1. SERVIÇOS PRESTADOS LNMRI NA ÁREA DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES

- Calibração dos padrões de referência para instituições e empresas vinculadas à Rede de Laboratórios de Metrologia;
- Calibração de dosímetros clínicos empregados em radioterapia;
- Calibração de monitores de área e de contaminação utilizados na proteção radiológica;
- Calibração de dosímetros aplicados no controle de qualidade dos equipamentos de radiodiagnóstico: mamógrafos, tomógrafos e radiografia;
- Irradiação de dosímetros pessoais usados na monitoração individual de trabalhadores;
- Irradiação de amostras de materiais dosimétricos para desenvolvimento de novos detectores.

Metrologia de nêutrons

- Calibração de monitores de área e individuais em feixes de nêutrons;
- Irradiação de monitores individuais e de amostras;

1.6. SISTEMA DE GESTÃO E CONTROLE DA QUALIDADE COM BASE NA NORMA ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005

A gestão da qualidade é um dos métodos de gestão necessários para garantir um bom funcionamento de um negócio e as exigências sobre qualidade atingem os mais diversos setores, incluindo o setor de radiações ionizantes [43].

Esta norma especifica os requisitos gerais para a competência em realizar ensaios e/ou calibrações, incluindo amostragem. Ela cobre ensaios e calibrações realizados, utilizando métodos normalizados, métodos não normalizados e métodos desenvolvidos pelo laboratório. A mesma é aplicável a todas as organizações que realizam ensaios e/ou calibrações e deve ser utilizada por laboratórios no desenvolvimento do seu sistema de gestão para qualidade, operações técnicas e administrativas [44,45].

Ela compreende dois capítulos principais, o capítulo 4 que estabelece requisitos da direção, e o capítulo 5 que estabelece requisitos técnicos.

Os laboratórios de dosimetria e calibração do LNMRI operam de acordo com os requisitos gerais estabelecidos pela norma ISO/IEC 17025, assim como com os princípios e recomendações da rede SSDL.

Durante as entrevistas com os responsáveis da direção do LNMRI, acerca da implementação da norma acima descrita, os seguintes aspectos foram realçados:

- i. O sistema de gestão da qualidade, segundo a norma ISO 17025, permite estabelecer missão e visão, sobre as atividades, viabilizando o comprometimento e entendimento de todos os envolvidos [43];
- ii. Permite criar uma cultura da qualidade com base na prevenção, na melhoria contínua, e no atendimento às necessidades dos clientes;
- iii. Compreender que as Auditorias internas ou externas, permitem testar o desempenho, revisão de processos e todos os envolvidos devem entender o objetivo das mesma, de forma que se tenha ciência e noção das

- responsabilidades de cada um, bem como manter a qualidade dos serviços prestados;
- iv. Promover a melhoria contínua: A Alta direção deve viabilizar o processo de melhoria contínua, eliminando possíveis obstáculos para o mesmo [43,44];
 - v. Instituir o treinamento: Tornar o treinamento uma prática comum, capacitando os funcionários para a perfeita execução de suas tarefas [43,44];
 - vi. Estabelecer a liderança: Criar padrões de liderança, e líderes capazes de gerir pessoas e processos [43,44];
 - vii. Eliminar o medo: A Alta direção deve estabelecer relações de confiança para garantir melhor comunicação [43,44];
 - viii. Otimizar o trabalho da equipe: A Alta direção deve remover gargalos, criando ambiente disciplinar e facilitando a interação das partes envolvidas [43,44];
 - ix. Definir adequadamente metas e criar condições para o cumprimento destas [43,44];
 - x. Definir metas dando ênfase na qualidade ao invés de quantidade [43];
 - xi. estimular e promover continuamente o processo de capacitação: Fornecer e estimular o processo de capacitação para todos [43];
 - xii. Agir: Atuar como planejado, aderir nova cultura e assegurar o engajamento de toda a equipe.

O objetivo inicial deste trabalho consubstancia-se na coleta de informação por parte de um laboratório de referência internacional que é o LNMRI, e buscar adquirir competência de base em metrologia das radiações ionizantes, visando a implantação de um SSDL na República de Angola.

2. FUNDAMENTOS GERAIS SOBRE METROLOGIA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES

Desde as primeiras civilizações, o homem sentiu a necessidade de utilizar padrões de medida [3] que viabilizassem as relações comerciais. Neste contexto a metrologia é provavelmente uma das ciências mais antigas do mundo [8].

Em civilizações extintas, como a egípcia, observam-se indícios da prática da metrologia na padronização da unidade de comprimento, a partir da medida do comprimento do antebraço do Faraó reinante, denominada “Cúbito Real Egípcio” [9].

No mundo atual, não é possível imaginar uma sociedade funcionando sem padrões de medida[3].

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia VIM a palavra metrologia, tem a sua origem na língua grega (metron: medida; logos: ciência), ou seja ciência que estuda as medições, abrangendo todos os aspectos teóricos e práticos, qualquer que seja a incerteza de medição e o campo de aplicação [4,9].

Para se determinar o valor de uma grandeza é necessário efetuar a sua medição, o que exige um padrão que sirva de referência [7].

O resultado de uma medição é, em geral, uma estimativa do valor do objeto da medição [5]. Desta forma a apresentação do resultado é completa somente quando acompanhada por uma (grandeza) quantidade que declara e a sua incerteza [5], isto significa que, um resultado de medição sem a sua incerteza não possui valor e nem qualidade metrológica [6].

Do ponto de vista técnico, quando realizamos uma medição esperamos que ela tenha exatidão (mais próxima do valor supostamente verdadeiro) e que apresente as características de repetitividade (concordância entre os resultados de medições sucessivas efetuadas sob as mesmas condições) e reprodutibilidade (concordância entre os resultados das medições efetuadas sob condições variadas) [5].

Com o advento da descoberta da radioatividade, e a construção de equipamentos geradores de radiação ionizante em larga escala, como os tubos de raios-X,

aceleradores de partículas e fontes radioativas, o uso das radiações ionizantes tornou-se cada vez mais expandido em diversas áreas da técnica e pesquisa, como na indústria, agricultura, medicina e na investigação científica.

Para a afixação de padrões de medição das radiações ionizantes, muitas dificuldades tiveram que ser superadas, pelo fato de existirem vários tipos de radiações ionizantes, bem como a forma diferente como cada uma interage com a matéria [3].

Outras dificuldades superadas no estabelecimento das grandezas radiológicas, foram as relacionadas com a sua grande variedade, envolvidas nas aplicações práticas.

Visto que as radiações ionizantes podem causar efeitos biológicos nos seres humanos, foi preciso a introdução de mecanismos rigorosos, para acompanhar o seu uso e se atingir maior confiança nas medições realizadas [6,3].

2.1. HIERARQUIA DOS SISTEMAS METROLÓGICOS

No âmbito Internacional, a metrologia científica é coordenada pelo Bureau International des Poids et Mèures (BIPM), órgão criado pela Convenção do Metro, em 1875, que compatibiliza os sistemas metrológicos da maioria das nações [7].

O BIPM tem por missão assegurar a unificação das medidas físicas e é encarregado de estabelecer os padrões internacionais e as escalas das principais grandezas físicas [7]; por outro lado, os padrões nacionais das referidas grandezas devem ser calibrados ou rastreados metrologicamente ao BIPM, mediante programas de comparação interlaboratorial [6].



Fig. 3 – Representação da Hierarquia e rastreabilidade metrológica das medições realizadas pelos instrumentos dos usuários até aos padrões internacionais, para cada tipo de grandeza. Adaptado de [6,17].

No campo das radiações ionizantes, foi criado o Comitê Consultivo para os Padrões de Medida da Radiação Ionizante (CCPMRI), com o intuito de coordenar os trabalhos internacionais, que é constituído por representantes dos Laboratórios Padrão Nacionais, para assuntos como a organização das comparações de padrões e análise dos resultados. Este Comitê tem a tarefa de garantir coerência no sistema de medidas das radiações ionizantes e coordenar tal sistema com o de outros países, além de fornecer serviços de calibração de maneira a garantir a rastreabilidade aos padrões internacionais e, conseqüentemente, a confiabilidade metrológica [7].

Na República Federativa do Brasil, o LNMRI-IRD, é a instituição designada pelo (INMETRO), como Laboratório primário de metrologia das radiações ionizantes, que tem como missão, a disseminação e padronização das medidas das radiações ionizantes a nível nacional, bem como a coordenação da rede de laboratórios de calibração para instrumentos de medição aplicados à proteção radiológica.

2.2. O PROCESSO DE MEDIÇÃO

A metrologia é o estudo científico da medição, ou seja, o processo no qual a entrada é uma grandeza física a ser medida e a saída um valor numérico representativo da grandeza de entrada, em termos de uma unidade especificada [7]. O valor numérico é usualmente obtido pela aplicação de correções das leituras geradas pelos instrumentos de medição, de maneira a compensar as diferenças das condições ideais e considerar efeitos não desprezíveis em situações que não podem ser totalmente controladas, tal como efeitos ambientais [7].

2.3. RASTREABILIDADE

A credibilidade das medições está fortemente associada ao termo rastreabilidade, que é definida pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial como sendo: “*a propriedade do resultado de uma medição ou do valor de um padrão estar relacionado a referências estabelecidas, geralmente a padrões nacionais ou internacionais, através de uma cadeia contínua de comparações, todas tendo incertezas estabelecidas*” [4,6,7].

Os instrumentos de medida da radiação devem ser rastreáveis a um padrão nacional apropriado, significando que:

- cada instrumento utilizado para o propósito de calibração deve ser calibrado com um instrumento de referência da mais alta qualidade;
- a frequência de calibração deve ser estabelecida em um intervalo de tempo razoável, de maneira que os valores indicados não estejam fora dos limites aceitáveis entre calibrações sucessivas;
- a calibração de um instrumento com outro de referência é válida em termos exatos somente nas condições de calibração, sendo necessário a utilização de fatores de correção em condições diferentes [7,10].

No campo da metrologia das radiações ionizantes, o padrão primário de determinada grandeza física é essencialmente um arranjo experimental que permite atribuir um valor numérico à amostra particular daquela grandeza em termos da unidade dada pela definição teórica [7]. Possui a mais elevada

qualidade metrológica no campo especificado. O padrão primário é mantido pelos laboratórios nacionais para fins de pesquisa metrológica e participam de intercomparações de padrões primários reconhecidas internacionalmente, coordenadas, por exemplo, pelo BIPM ou regiões metrológicas[7,10].

O padrão secundário tem seus resultados comparados com o padrão primário, de maneira a garantir sua rastreabilidade; é mantido pela rede de Laboratório de Dosimetria Padrão Secundário (SSDL), sendo reconhecido oficialmente pelos Países signatários do Aranjó de Reconhecimento Mútuo, podendo ser utilizado tanto na calibração de outros padrões, como na calibração de instrumentos de medição, que são dispositivos, individuais ou em conjunto com outros equipamentos, que pretende efetuar uma medida [7,10].

O padrão nacional é um instrumento reconhecido oficialmente por um país, para fixar os valores de todos os outros padrões de uma determinada grandeza. Normalmente o padrão nacional de um país é também o padrão primário [7,10].

2.4. DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DA MEDIÇÃO

A incerteza padrão é um parâmetro associado a quaisquer resultados de uma medida, o qual reflete a dúvida envolvida sobre o valor exato do que está sendo medido. Assim, a incerteza pode ser definida como a dispersão de valores que podem ser atribuídos à aquisição do mensurando. Existem regras para determinar a contribuição de cada incerteza e para combiná-las; além disso, é preciso determinar o tipo de incerteza associada ao processo de medição [10,15].

A seguir, estão descritos os tipos de incertezas aplicadas na calibração dos sistemas de dosimetria.

Incertezas do tipo **A** são estimadas pela utilização de métodos estatísticos, por meio de cálculos da média das medições e seu desvio padrão. Isto significa, que em uma série de **n** medições, onde são obtidos valores x_j , a melhor estimativa da quantidade de **x** é dada pela média aritmética das mesmas, que são obtidas da seguinte forma através da Equação 1 [10,15,16,18]:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

A dispersão dos valores medidos em torno de sua média aritmética pode ser caracterizada pelo desvio padrão, que é calculado através da Equação 2 [10,15,16,18]:

$$s(X_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (2)$$

onde $s(X_i)$ representa o desvio padrão.

As incertezas do tipo **A** podem ser determinadas por meio da Equação 3, no caso de um grupo de n medições [10,15,16,18]:

$$U_A = \frac{s(X_i)}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

onde U_A é o valor da incerteza do tipo **A**, $s(X_i)$ é o valor do desvio padrão das medidas e n é a quantidade de medidas realizadas.

De outro lado, incertezas do tipo **B** são estimadas usando qualquer outra informação. Pode ser informação de medições em experiências passadas, de certificados de calibração, especificações de fabricantes, de cálculos, de informações publicadas, além da experiência do realizador das medidas para estimá-las da forma mais coerente possível [10,15,16,18].

Para a realização do cálculo das incertezas do tipo **B** estimadas pelo realizador das medidas, deve ser levada em consideração a influência deste dado no menor valor medido experimentalmente, sendo que o resultado é dividido pela raiz quadrada de 3 para uma distribuição retangular, de acordo com a Equação 4 [10,15,18]:

$$U_B = \frac{U_{máx}}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

onde U_B é o valor da incerteza do tipo **B** e $U_{máx}$ é o valor da maior influência da incerteza estimada nas medidas.

É importante observar que uma avaliação da incerteza tipo **B** pode ser tão confiável quanto uma avaliação do tipo **A**, especialmente em uma situação de medição onde uma avaliação do tipo **A** é baseada em um número comparativamente pequeno de observações estatisticamente independentes [15].

Depois de determinar as fontes de incertezas relevantes ao processo de medição, deve-se combiná-las, de modo a encontrar um valor representativo para o seu resultado final. Ao lidar com um processo de medição direta, todos os efeitos associados a cada uma das fontes de incerteza são refletidos sobre a medida como parcelas aditivas. Todavia, quando o resultado do processo de medida é obtido por meio de várias outras grandezas, se faz necessário o cálculo da incerteza combinada[10,15,16,18].

Na grande maioria dos casos, o cálculo da incerteza combinada pode ser deduzido como a raiz quadrada da soma dos quadrados de cada componente. Porém, em alguns casos as grandezas apresentam dependência entre si, o que pode causar alterações de sua influência no produto final, sendo necessária uma abordagem matemática mais criteriosa para o tratamento das dependências entre os componentes do sistema.

Dessa forma, o termo incerteza combinada é mencionada quando não existe uma ação conjugada de várias fontes de incerteza agindo respectivamente sobre um processo de medição. Esse processo pode ser descrito pela Equação [15]:

$$U_C^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \cdot U^2(X_i) \quad (5)$$

Em que $U^2(y)$ é a incerteza padrão combinada, o $U^2(X)$ é a incerteza padrão para o componente X_i e $(\partial f / \partial X_i)$ é o coeficiente de sensibilidade dado pela derivada da função f em relação ao componente X_i [10,15,18]. Multiplicando a incerteza combinada (U_C) pelo fator de abrangência k obtém-se a incerteza expandida (U), de acordo com a Equação 6 [10,15,18]:

$$U = U_c \cdot k \quad (6)$$

De acordo com o grau de confiança das medições, o fator de abrangência k varia de 1 a 3, onde: Para $k = 1$, estima-se que o grau de confiança das medições realizadas em torno de 67%.

Para $k = 2$, quando a confiabilidade nos resultados obtidos é da ordem dos 95% e para $k = 3$, quando os resultados das medições oferecem 99,9% de confiança.

O Capítulo 3, deste trabalho é parte integrante deste capítulo, mais foi abordado à parte, por ser um assunto extenso.

3. GRANDEZAS RADIOLÓGICAS E UNIDADES

A protecção radiológica tem como objetivo principal proteger os indivíduos e o ambiente de danos provocados pela exposição externa ou interna às radiações ionizantes [35,36]. Para avaliar as doses devido a exposição à radiação, foram desenvolvidos conceitos e grandezas dosimétricas específicas por duas entidades internacionais que cooperam entre si: a ICRU (*International Commission for Radiation Units and Measurements*) e a ICRP (*International Commission on Radiation Protection*) [23,26,35].

As grandezas dosimétricas são utilizadas para descrever e quantificar a energia depositada por um feixe de radiação num determinado meio.

A dosimetria revela-se, assim, essencial para quantificar a incidência das alterações biológicas em função da quantidade de radiação recebida (relação dose-efeito), monitorar a exposição à radiação de indivíduos e realizar ações de vigilância ambiental [26,35].

3.1. GRANDEZAS FÍSICAS

3.1.1. FLUÊNCIA

A fluência é uma grandeza física que está associada aos campos de radiação externos. Para descrever um campo de radiação é necessário saber o tipo e o número de partículas, N , bem como as suas distribuições energéticas, espaciais, temporais e direcionais [35].

A fluência baseia-se então na contagem do número de partículas incidentes numa superfície, sendo definida como o quociente entre a variação do número de partículas, dN , que incidem numa superfície de seção de área dA , e é expressa pela equação 7.

A sua unidades é o m^{-2} [6,21,26,30]:

$$\Phi = \frac{dN}{dA} \quad (7)$$

3.1.2. KERMA

O kerma, K , é o quociente entre dE_{tr} por dm , em que dE_{tr} corresponde à soma das energias cinéticas iniciais de todas as partículas carregadas liberadas dos átomos pela radiação ionizante sem carga, num elemento de massa dm de um determinado material, conforme equação 8 [6,21,24,25,26,28]. A sua unidade no SI é $J.kg^{-1}$, também denominada por Gray (Gy).

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (8)$$

3.1.3 DOSE ABSORVIDA

A dose absorvida, D , é a quantidade de energia depositada pela radiação ionizante num meio através de ionizações e excitações, e é expressa pela equação 9:

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (9)$$

em que dE é a energia média cedida pela radiação ionizante na unidade de massa, dm , do meio. A unidade no SI da dose absorvida é o Gray (Gy), que é equivalente à quantidade de radiação que provoca a absorção de 1 J por kg de matéria exposta à radiação, ou seja: $1 Gy = 1 J.kg^{-1}$ [6,21,25,26,27,28, 31, 33,35].

3.2. GRANDEZAS DE RADIOPROTEÇÃO

3.2.1. DOSE EQUIVALENTE

A dose equivalente, H_T , corresponde à dose média absorvida num tecido T ou órgão, ponderada por um factor relacionado com o tipo de radiação. A dose equivalente, H_T , no tecido biológico ou órgão T , é então definida por:

$$H_T = \sum_R W_R D_{TR} \quad (10)$$

em que, D_{TR} , é a dose média absorvida pelo tecido ou órgão específico T, para uma radiação específica R, e W_R é o factor de ponderação para a radiação R. A unidade da dose equivalente no SI é o Sievert (Sv), que indica a ponderação pelo tipo de radiação. Como W_R é adimensional, a unidade para a dose equivalente é a mesma da dose absorvida, $J.kg^{-1}$ [6,21,23, 24,27,30,31,33,35]. A Tabela 2 apresenta os fatores de ponderação recomendados pela ICRP.

Tabela 2 – Fatores de ponderação recomendados pela ICRP 60 e pela ICRP 103 para os diferentes tipos de radiação, de acordo com [21,23,24,25,27,28,30].

Tipo de Radiação		Factor de Ponderação da radiação (W_R)	
		ICRP 60	ICRP 103
Fótons		1	1
Elétrons e múons		1	1
Prótons, excluindo prótons de recuo, com energia > 2MeV		5	2
Partículas alfa, fragmentos de fissão e íons pesados		20	20
Nêutrons	E < 10keV	5	Curva contínua como função da energia dos nêutrons
	10 keV <E < 100 keV	10	
	100 keV <E < 2 MeV	20	
	2 MeV <E < 20 MeV	10	
	E > 20 MeV	5	

3.2.2. DOSE EFETIVA

A dose efectiva, E , é a grandeza de proteção radiológica que tem em consideração a radiosensibilidade dos diferentes órgãos. A dose efetiva é calculada considerando a soma ponderada das doses equivalentes nos vários órgãos ou tecidos, de acordo com a equação 11 [6,21,23, 24,25,26,27,32]:

$$E = \sum_R W_T H_T \quad (11)$$

A unidade para a dose efectiva é , $J.Kg^{-1}$, também designado por Siervert (Sv) [21,23, 24,25,26,27,32].

Na Tabela 3 estão descritos os valores de W_T para os diferentes tecidos biológicos, tanto para a ICRP-60 (1991) como para a ICRP-103 (2007).

Tabela 3 - Fatores de ponderação recomendados pela ICRP 60 e pela ICRP 103 para os diferentes órgãos ou tecidos biológicos, de acordo com [21,23, 24,25, 26,34,37,38].

Tecido ou órgão	Fator de Ponderação para o tecido ou órgão (W_T)	
	ICRP 60	ICRP 103
Gônadas	0,20	0,08
Medula Óssea	0,12	0,12
Cólon	0,12	0,12
Pulmão	0,12	0,12
Estômago	0,12	0,12
Mama	0,05	0,12
Bexiga	0,05	0,04
Fígado	0,05	0,04
Esófago	0,05	0,04
Tiróide	0,05	0,04
Pele	0,01	0,01
Superfície do Osso	0,01	0,01
Cérebro	-----	0,01
Glândulas Salivares	-----	0,01
Restantes*	0,05	0,12
Corpo todo	1,00	1,00

*Nos Restantes dos órgãos incluem-se glândulas supra-renais, região extra-torácica, vesícula biliar, coração, rins, gânglios linfáticos, músculo, mucosa oral, pâncreas, baço, timo, útero, próstata, intestino grosso superior e intestino delgado.

Os valores de W_T e W_R sofreram mudanças ao longo dos anos devido à atualização do conhecimento sobre a interação da radiação com a matéria e sobre a radiosensibilidade dos diferentes tecidos biológicos [6,21,26,37].

3.3. GRANDEZAS OPERACIONAIS

As doses equivalente e efetiva não são mensuráveis na prática. Por isso a ICRP definiu as chamadas grandezas operacionais com a finalidade de possibilitar a avaliação da irradiação externa, sendo utilizadas na monitorização individual e na monitorização de área [23,21,26]. Tal como já foi referido no capítulo anterior, para monitorização individual, é utilizado o equivalente de dose individual, $H_p(d)$, por sua vez, na monitorização de área, as grandezas usadas são o equivalente de dose ambiente $H^*(d)$ e o equivalente de dose direccional $H^*(d,\Omega)$ [21,23,24,25,26].

3.3.1. GRANDEZAS OPERACIONAIS PARA MONITORIZAÇÃO INDIVIDUAL

Para a monitorização individual devem ser utilizados instrumentos - dosímetros - de medição metrologicamente confiáveis e sensíveis capazes de fornecer resultados dentro dos limites de incertezas aceitáveis.

Desta forma, a exposição à radiação ionizante é controlada através do uso de equipamentos de monitorização de uso pessoal.

O equivalente de dose individual, $H_p(d)$, corresponde ao equivalente de dose no tecido mole, a uma profundidade d , no corpo humano, sob a posição específica em que o dosímetro é utilizado. A unidade é o $J.kg^{-1}$ ou o Sv [21,23, 24,25,26].

3.3.2. GRANDEZAS OPERACIONAIS PARA MONITORIZAÇÃO DE ÁREA

Estas grandezas são definidas com base no valor do equivalente de dose num ponto de um fantoma simples, que simula a presença do corpo humano, conhecido como esfera ICRU (fig.2.2). Esta é constituída por um material equivalente ao tecido mole humano, em termos de atenuação e absorção de radiação, com 30 cm de diâmetro e densidade de $1 g.cm^{-3}$ [21,23,24,25,26].

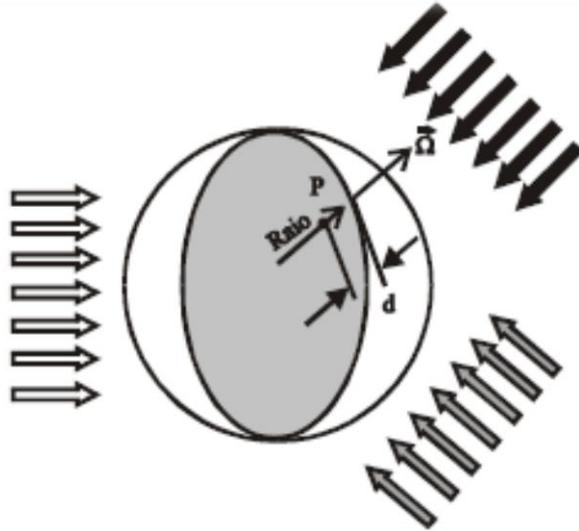


Fig. 4- Geometria de irradiação da esfera ICRU e o ponto P na esfera, no qual o equivalente de dose direcional é obtido no campo de radiação expandido, com a direção Ω de interesse [6,21].

O equivalente de dose ambiente, $H^*(d)$, num certo ponto de um campo de radiação, consiste no equivalente de dose originado pelo correspondente campo alinhado e expandido na esfera ICRU, à profundidade d , no raio oposto à direção do campo alinhado. É expresso em Sv [6,21,23,24,25,26].

O equivalente de dose direcional, $H^*(d, \Omega)$, num determinado ponto de um campo de radiação, define-se como o equivalente de dose produzido pelo correspondente campo expandido na esfera ICRU, à profundidade d , num raio com uma direção específica, Ω . Esta grandeza vem também expressa em Sv [21,23,24,25,26].

3.4. PRINCÍPIOS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

A principal organização internacional que reúne o conhecimento científico na área da proteção contra radiações ionizantes é a International Commission on Radiological Protection (ICRP). Criada em 1928, a ICRP propõe, desde então, recomendações e práticas a adotar para a proteção radiológica, relativamente aos riscos associados a exposição às radiações ionizantes, quer sejam provenientes de fontes de radiação artificiais ou naturais. Estas recomendações são periodicamente atualizadas e consolidadas, com base nas últimas informações

científicas disponíveis e nos consensos alcançados por vários grupos de trabalho que a compõem.

A proteção radiológica baseia-se em três princípios fundamentais: o princípio da justificação, o princípio da otimização e o princípio da limitação de doses que foram introduzidos pela ICRP na publicação 60 (1991). Os três princípios podem ser descritos da seguinte maneira:

3.4.1. PRINCÍPIO DA JUSTIFICAÇÃO

Todas as acções que conduzam ou possam conduzir a um aumento da exposição à radiação para o homem deve ser justificada, para garantir que o benefício decorrente desta ação seja superior ao risco associado devido à exposição, ou seja, nenhuma prática envolvendo exposição à radiação deve ser adotada a menos que ela produza benefício suficiente ao indivíduo exposto ou para a sociedade para compensar o detrimento da exposição provocada [36,39].

3.4.2. PRINCÍPIO DA OTIMIZAÇÃO (ALARA)

Mesmo que a aplicação das radiações ionizantes sejam justificadas e os limites de dose obedecidos, é necessário que a exposição de indivíduos a fontes de radiação devem ser mantidas tão baixo quanto possível, ou seja em relação a uma fonte dentro de uma prática, os valores das doses individuais, o número de pessoas expostas e a probabilidade de ocorrência de exposições devem ser mantidos tão baixos quanto razoavelmente exequíveis, considerando os fatores econômicos e sociais [36,39].

3.4.3. PRINCÍPIO DA LIMITAÇÃO DA DOSE

Uma das metas de proteção radiológica é manter os limites de dose equivalente para os tecidos, abaixo do limiar do detrimento para os efeitos não estocásticos nesse tecido. Deste modo, impõe-se que as doses individuais resultantes da exposição ocupacional e do público não devem exceder os limites anuais de doses estabelecidos pela legislação nacional e internacional [36,39].

Segundo as recomendações da ICRP, as grandezas dosimétricas ou físicas estão relacionadas com as de proteção radiológica e as operacionais, cuja relação encontra-se esquematizada na Figura 5:

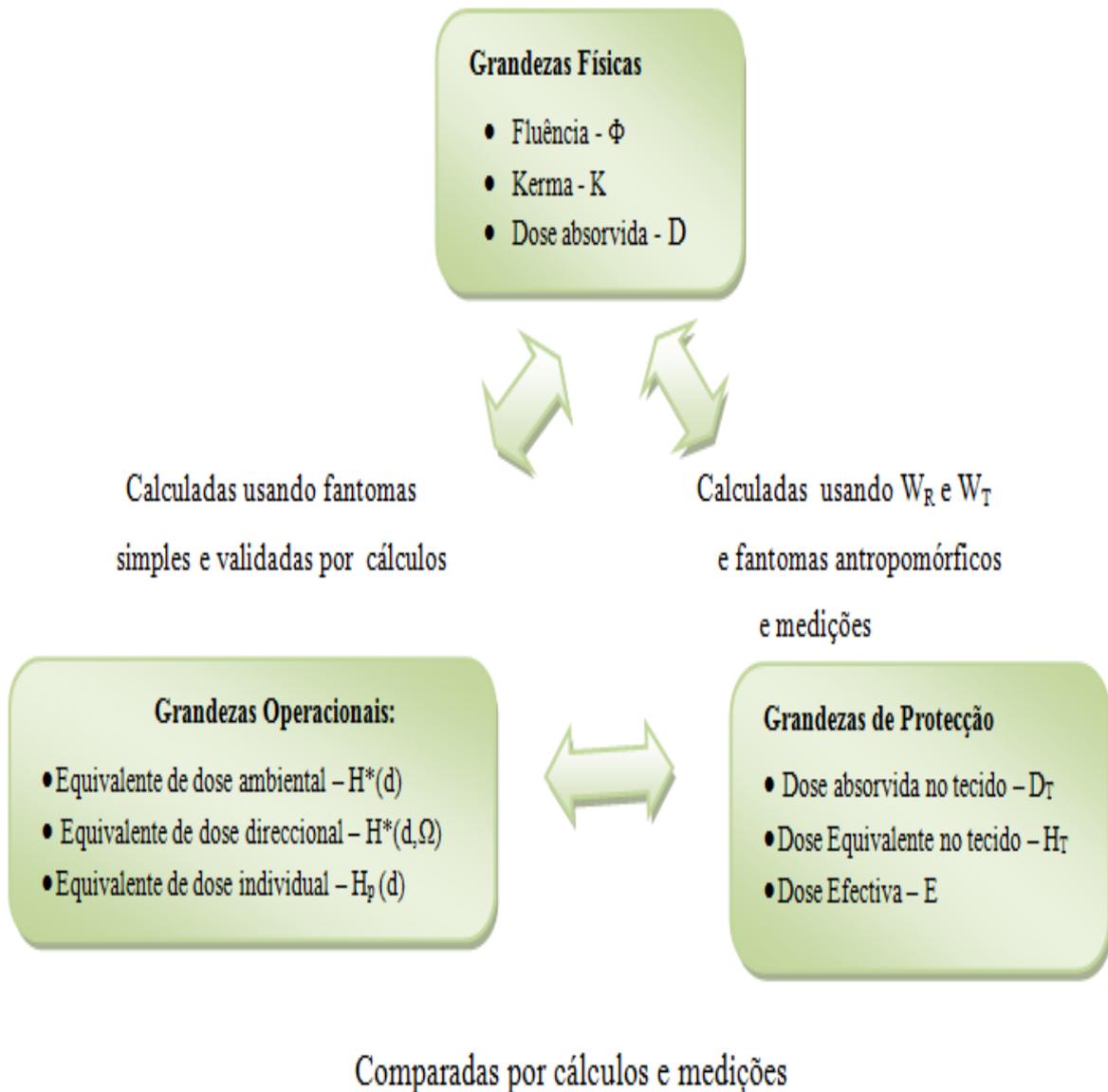


Fig. 5- Representação esquemática da relação existente entre as diferentes grandezas dosimétricas: grandezas físicas, grandezas de protecção e grandezas operacionais. Adaptado de [21,23,26,29].

4. DETECTORES DE RADIAÇÃO IONIZANTE

Detector de radiação é um dispositivo que, quando colocado em um meio onde exista um campo de radiação, é capaz de indicar a sua presença. Existem diversos processos pelos quais diferentes radiações podem interagir com o meio material utilizado para medir ou indicar características dessas radiações [6,19,20]. Dentre esses processos, os mais utilizados são os que envolvem a geração de cargas elétricas, a geração de luz, a sensibilização de películas fotográficas, a criação de traços (buracos) no material, a geração de calor e alterações da dinâmica de certos processos químicos [6,19,20].

Normalmente, um detector de radiação é constituído de um elemento ou material sensível à radiação e um sistema que transforma esses efeitos em um valor relacionado a uma grandeza de medição dessa radiação [6,19,20].

4.1. PROPRIEDADES DE UM DETECTOR

Para que um dispositivo seja classificado como um detector apropriado é necessário que, além de ser adequado para a medição do mensurando, apresente nas suas sequências de medição algumas características, tais como [6]:

- i. Repetitividade - definida pelo grau de concordância dos resultados obtidos sob as mesmas condições de medição;
- ii. Reprodutibilidade - grau de concordância dos resultados obtidos em diferentes condições de medição;
- iii. Estabilidade - capacidade do instrumento manter constantes as suas características de medição ao longo do tempo;
- iv. Exatidão - grau de concordância dos resultados com o “valor verdadeiro” ou valor de referência a ser determinado;
- v. Precisão - grau de concordância dos resultados entre si, normalmente expresso pelo desvio padrão em relação à média;
- vi. Sensibilidade - razão entre a variação da resposta de um instrumento e a correspondente variação do impulso; e

- vii. Eficiência - capacidade de converter em sinais de medição os impulsos recebidos.

4.2. CLASSIFICAÇÃO DOS DETECTORES

Os detectores classificam-se de acordo com a forma de transferência da energia incidente, que pode ser por excitação ou ionização dos átomos e moléculas do meio detector, e a possível conversão que depende de cada tipo de detector, que podem ser: detectores de ionização ou de descarga gasosa; detectores de cintilação; detectores semicondutores; dosímetros termoluminescente (TLD); filmes fotograficos; e estimulação ótica (OSL).

A seguir, são destacados alguns dos detectores mais utilizados em radioproteção, como:

- **Detectores Geiger-Müller** - São denominados detectores a gás, pois são preenchidos com gás no seu interior, com características conhecidas e adequadas à finalidade de medir campos de radiação, que tem como função ser o elemento detector da radiação[6,19].



Fig. 6- Monitor de radiação portátil Geiger-Müller/ Graetz 50DE [19].

- **Detectores por cintilação** - São desenvolvidos com base nas propriedades que algumas substâncias possuem propriedades de absorver a energia cedida pelas radiações ionizantes e convertê-las em luz. Por esse princípio tais materiais são denominados cintiladores [6,19].



Fig. 7 - Cintilômetro portátil Rad Eye PRD, de alta sensibilidade, utilizado em atividades de triagem e localização de fontes emissoras de radiação gama [6].

- **Câmaras de ionização** - Utilizando o ar como elemento detector, as câmaras de ionização são capazes de medir diretamente a grandeza exposição.

Para cada par de íon gerado pela partícula incidente no interior do volume sensível de detecção, um sinal elétrico é coletado [6,19].



Fig. 8 – Dosímetro clínico (conjunto câmara de ionização - eletrômetro) [6].

4.3. CALIBRAÇÃO DE DETECTORES

A calibração é definida como a determinação quantitativa, sob um conjunto de condições padrão controladas, da indicação dada pelo instrumento de medição da radiação em função do valor da grandeza que o instrumento pretende medir [20].

Tais condições padrão são uma faixa de valores aceitáveis para as grandezas de influência no momento da calibração [7].

Na prática, as divergências das grandezas de influência são levadas em consideração por meio da sua correção explícita ou seus efeitos são incorporados dentro da incerteza do processo de calibração [7,10]. A Tabela 4, apresenta

algumas condições de referência e condições de teste padrão para a calibração de dosímetros pessoais, de área e verificação da resposta em função da energia e ângulo de incidência.

Tabela 4 – Exemplo de Condições de referência e condições de testes padrão [7]

Condições de referência e condições de teste padrão da Grandeza de influência	Condições de referência	Condições padrão de teste
Ângulo da radiação incidente	orientação de referência	orientação de referência $\pm 5^\circ$
Temperatura ambiente	20°C	8°C até 22°C
Umidade relativa	65%	50% até 75%
Pressão atmosférica	101,3 kPa	86 a 106 kPa

Como a calibração de detectores é feita com feixes de radiação e energias especificadas e padronizadas, a utilização de um detector para condições diferentes daquelas em que foi calibrado só pode ser feita com a utilização de fatores de conversão adequados [6].

4.3.1. CALIBRAÇÃO ATRAVÉS DE UM INSTRUMENTO PADRÃO DE REFERÊNCIA

O método ilustrado na Figura 9, é muito utilizado quando o valor da grandeza física que caracteriza o campo de radiação é estável durante todo o tempo de calibração. Tanto o instrumento padrão de referência como o instrumento de medição sob calibração são posicionados alternadamente no ponto de interesse [7,10].

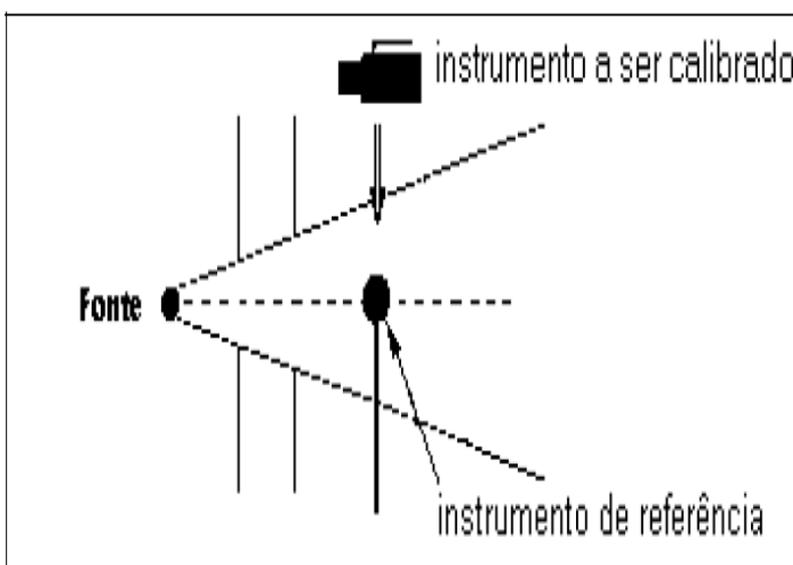


Fig. 9 – Calibração de um instrumento de medição sem câmara monitora [7,10].

Os objetivos principais de um sistema de calibração são [20]:

- i. Garantir que um instrumento esteja funcionando devidamente;
- ii. No caso de um instrumento sem ajuste de calibração, garantir que sejam revelados os erros nas suas medidas. Quando o instrumento apresentar a possibilidade de ajuste, esse fato pode levar a um aperfeiçoamento na precisão do mesmo;
- iii. Submeter o instrumento a testes, como resposta em função da energia e ângulo de incidência da radiação;
- iv. Fornecer informações aos usuários quanto às características mais importantes dos instrumentos;
- v. Fornecer campos padrões de radiação para testes de novos instrumentos (testes de desempenho).

5. METODOLOGIA E INFRAESTRUTURA

Como material para o desenvolvimento deste trabalho foi usada a infraestrutura laboratorial do LNMRI (parte técnica e da gestão da qualidade).

O método baseou-se na entrevista aos responsáveis técnicos e da direção do LNMRI, assim como o acompanhamento de ensaios práticos como:

- Planilhas e *softwares* de gestão;
- Estabelecimento das condições de referência de um irradiador de altas energias, usado na calibração de monitores de área;
- Calibração de dosímetros clínicos.

E teve como a finalidade principal conhecer na prática o modo de funcionamento de um SSDL, não apenas do ponto de vista dos ensaios e calibrações, mas também a parte da atribuição de responsabilidades e do sistema de gestão da qualidade.

Deste modo, o método apresentado neste trabalho é qualitativo e não quantitativo, visto que não são apresentados dados numéricos sobre os procedimentos acima descritos, mas são transmitidos de forma qualitativa.

a) Controle de acesso

Apenas os profissionais do LNMRI-DIMET tem acesso irrestrito aos seus laboratórios. Os demais funcionários do IRD necessitam de autorização de acesso.

Todos os laboratórios do LNMRI possuem instalada uma fechadura eletrônica, acionada por senha ou por identificação biométrica.

O acesso de qualquer pessoa que não pertença ao quadro funcional da DIMET somente será permitido desde que autorizado e acompanhado por um funcionário da própria DIMET.

b) Medidas de segurança

Os laboratórios do LNMRI são áreas controladas, onde o acesso somente é permitido a pessoas monitoradas, considerados Indivíduos Ocupacionalmente Expostos (IOE) às radiações ionizantes.

Os clientes são considerados indivíduos do público, nesta categoria também estão incluídos os profissionais de serviços (obras, manutenção, instalação etc); além de visitantes (autoridades, pesquisadores externos, alunos etc), pelo que não podem ser expostos a níveis de radiação acima dos permitidos por norma regulamentar.

c) Monitoração individual

A monitoração individual, tanto do IOE quanto do indivíduo do público, é obrigatória em todos os laboratórios do LNMRI.

Monitores individual de leitura direta estão à disposição na entrada de cada laboratório do LNMRI.

d) Sequência do procedimento

1. Antes de entrar em um dos laboratórios do LNMRI-DIMET, o indivíduo do público recebe um dosímetro pessoal que deverá manter consigo durante todo o tempo em que estiver nas dependências do laboratório;
2. O acompanhante, pertencente ao quadro funcional da DIMET, deve utilizar o formulário para registro de acesso aos laboratórios do LNMRI-DIMET, controle de acesso de área dos laboratórios do LNMRI;
3. Inicialmente, deve ser registrado o nome e categoria do indivíduo do público: cliente, profissional de serviços, autoridade, pesquisador externo, aluno etc; além do nome do funcionário da DIMET que irá acompanhar o indivíduo do público;
4. O monitor individual de leitura direta deve ser retirado do dessecador. Em seguida deve ser identificado, com número de série, e registrada a hora da entrada e leitura inicial deste instrumento;
5. Após a saída do indivíduo do público, devem ser registradas novamente a hora e leitura do monitor individual;

6. Em seguida o monitor individual deve ser colocado novamente no dessecador.

e) Condições ambientais controladas

As condições de operação de que trata o presente procedimento dizem respeito às condições ambientais que podem ser controladas: temperatura e umidade. Já que a pressão atmosférica é objeto de monitoramento, para fins de correção dos valores de dose e taxa de dose medidos nos laboratórios.

Da mesma forma, a limpeza, iluminação e ventilação dos laboratórios são mantidas em padrões considerados adequados ao desenvolvimento das atividades nos laboratórios.

f) Temperatura

Tanto no salão de controle, quanto no interior dos laboratórios, a temperatura é mantida em níveis seguros à operação dos instrumentos e equipamentos. As faixas de temperatura exigidas em cada processo são descritas nos respectivos procedimentos.

g) Umidade

A umidade relativa do ar é mantida na faixa de 40 a 80 % nas dependências dos laboratórios.

h) Pressão atmosférica

A pressão atmosférica não é passível de controle nos laboratórios do LNMRI. Apesar de que, devido à operação do sistema de ar condicionado, sabe-se que há uma discreta pressurização do ambiente no interior dos laboratórios.

A pressão atmosférica é monitorada em apenas um local do LNMRI: Laboratório de Dosimetria, que consta de um barômetro digital posicionado no salão.

i) Iluminação

A iluminação nos laboratórios do LNMRI é mantida de modo que atenda à luminosidade suficiente para realização das tarefas nos laboratórios. Tanto para segurança como para conforto visual.

j) Limpeza

A limpeza de equipamentos e instrumentos é de responsabilidade exclusiva do pessoal técnico do laboratório.

Quando é necessário contar com o auxílio de algum funcionário da empresa prestadora, os trabalhos devem ser supervisionados direta e constantemente por um técnico do laboratório.

k) Ventilação

A ventilação dos laboratórios do LNMRI é mantida em níveis recomendados pela legislação vigente.

5.1. ESTABELECIMENTO DAS CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA DE UM IRRADIADOR DE ALTAS ENERGIAS, USADO NA CALIBRAÇÃO DE MONITORES DE ÁREA

Os monitores de radiação de área são instrumentos que medem a variação de uma grandeza em função do tempo. Estes monitores possuem como sensor à radiação uma câmara de ionização, um detector Geiger Müller, um contador proporcional, um detector de cintilação ou um detector semicondutor. Eles podem ser portáteis ou fixos, e medem normalmente, taxa de Equivalente de Dose Ambiente, em mSv/h.

Para que a calibração dos mesmos seja adequada, o laboratório primeiramente, precisa manter o seu padrão de medição e após a instalação do sistema de irradiação, é necessário o estabelecimento das condições de referência. Que consiste na realização da medição das taxas de Kerma no interior do instrumento de referência e as devidas conversões para Equivalente de dose ambiental, que é a grandeza usada pelo instrumentos de radioproteção.

5.1.1. PROCEDIMENTOS

1. Condições ambientais

Inicialmente são estabelecidas as condições para a temperatura da sala de irradiação estabilizada entre 17° e 23 ° C, e a umidade relativa do ar entre 20 % e 70 %.

2. Equipamentos de medição e materiais auxiliares

- i. Barômetro calibrado;
- ii. Cronômetro calibrado;
- iii. Eletrômetro calibrado;
- iv. Sistema de vídeo filmando o posicionamento da câmara em relação ao irradiador;
- v. Câmara de ionização de referência;
- vi. Irradiador com fontes de ^{60}Co e ^{137}Cs ;
- vii. Sistema de posicionamento;
- viii. Sistema de posicionamento a laser;
- ix. Sistema de computação e aquisição de dados, com *softwares* apropriados;

3. Procedimento experimental

- i. Posiciona-se a câmara de ionização a distância inicial de 1 m (100 cm), na direção do feixe de fótons colimados de ^{60}Co ou ^{137}Cs ;
- ii. Verifica-se se o instrumento está devidamente acomodado na plataforma, garantindo que ele não se mova ao movimentar o carro;
- iii. Antes de se iniciar a irradiação são verificados o correto funcionamento dos equipamentos, as condições ambientais e o sistema de filtração do feixe;
- iv. Liga-se o eletrômetro e mede-se a corrente de fuga no interior da câmara de ionização;
- v. São registrados os valores numa repetição de 10 medições no intervalo de tempo de 120 s cada uma;
- vi. Depois de estabilizada a corrente de fuga, seleciona-se uma das energias (^{60}Co e do ^{137}Cs) e efetua-se uma irradiação sem filtro e são registrados os valores automaticamente pelos *softwares* de computação;
- vii. Para cada posição foi realizada inicialmente a medição sem filtro tanto para as energias do ^{60}Co como as do ^{137}Cs num total de dez (10 irradiações), sempre no intervalo de 120 s e os resultados são registrados;
- viii. O mesmo procedimento repete-se com a adição de um conjunto de até quatro filtros (F1, F1+F2, F1+F2+F3 e F1+F2+F3 +F4);

ix. É feita no final a análise crítica e aceitação dos resultados.

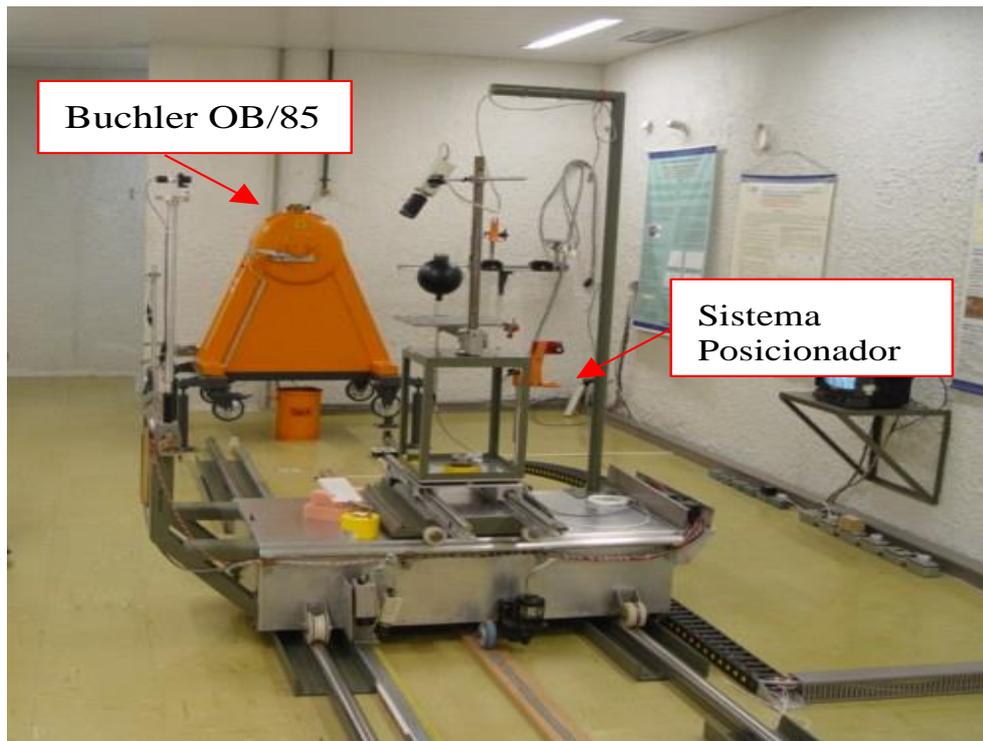


Figura 10 – Arranjo experimental do laboratório do Sistema de irradiação e Posicionador [46].

5.2. CALIBRAÇÃO DE DOSÍMETROS CLÍNICOS

Dose absorvida na água: é o quociente entre $d\bar{\epsilon}$ e dm , isto é, a energia média depositada em um material de massa dm . A dose absorvida na água à profundidade de referência, indicada na Figura 11, de 5 g/cm^2 para um feixe de qualidade Q_0 (^{60}Co) e na ausência da câmara é determinada pela equação 12:

$$D_w(m\text{Gy}) = M(ue) \cdot N_{D,w}(m\text{Gy } ue^{-1}) \quad (12)$$

em que $N_{D,w}$ é o coeficiente de calibração do dosímetro padrão em termos de dose absorvida na água obtido no BIPM e $M(ue)$ é a indicação de leitura do eletrômetro, em unidade de escala, sob as mesmas condições de referência usadas no laboratório do BIPM [48].

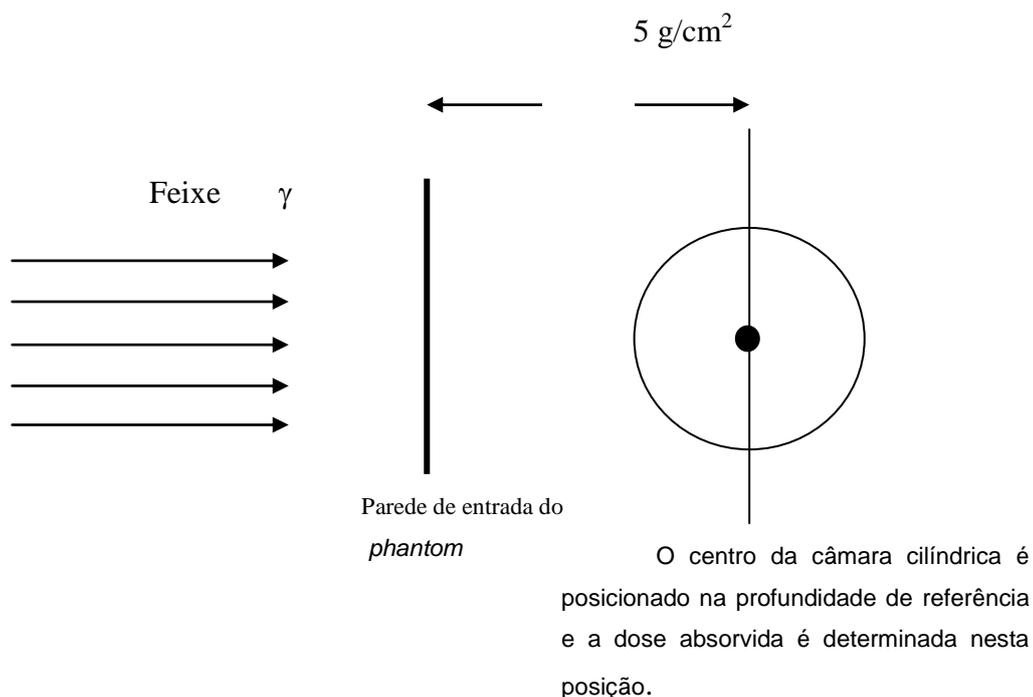


Fig. 11- Profundidade de referência para determinação da dose absorvida na água [47].

O processo de calibração de dosímetros clínicos se inicia no Serviço de Atendimento ao Cliente (SAC), em cujo procedimento é feito o controle de entrada dos instrumentos, conforme podemos observar na Figura 13. Estes são enviados ao LNMRI, onde é realizado o cadastro no programa AUTOLAB, sendo então disponibilizados para os testes de desempenho e calibração [48].

5.2.1. PROCEDIMENTOS

1. A câmara de referência do LNMRI é enviada ao BIPM e colocada em sua luva à prova de água e posicionada em um *phantom* de dimensões 30 cm x 30 cm x 30 cm. Seu eixo é colocado no plano de referência, à profundidade de 5 g/cm² na água. A profundidade inclui a janela do *phantom* (PMMA, 1,19 g/cm³). A marca na luva, assim como a da câmara é orientada em direção ao feixe de radiação [47,48,49].

O coeficiente de calibração é determinado usando a relação a seguir:

$$N_{D,w}(mGy/ue) = \frac{D_w(mGys^{-1})}{M(ue s^{-1})} \text{ No feixe do BIPM} \quad (13)$$

Em que: $N_{D,w}$, é o fator multiplicativo que converte o valor de carga indicado pelo dosímetro e dividido pelo tempo, normalizado para as condições ambientais de referência, em taxa de dose absorvida na água, \dot{D}_w , no ponto de medição.

2. A seguir, no LNMRI, sob as mesmas condições de referência, incluídas na Tabela 5 (janela do *phantom* de 0,257 g/cm²), a taxa de dose absorvida na água é determinada, usando a câmara de referência e o eletrômetro padrão do LNMRI, através de equação 14 [47,48,49]:

$$\dot{D}_w(mGys^{-1}) = M(ues^{-1}) \cdot N_{D,w}(mGyue^{-1}) \quad \text{No feixe do LNMRI} \quad (14)$$

Tabela 5. Condições de referência para a calibração de câmaras de ionização em ⁶⁰Co

Grandezas de influência	Valores de referência
Material do <i>phantom</i>	água
Tamanho do <i>phantom</i>	30 cm x 30 cm x 30 cm
Luva de PMMA	Construída segundo TRS-398
Distância da fonte à superfície do <i>phantom</i> (SSD)	100 cm
Temperatura do ar na cavidade, suposta a mesma da água.	20 °C
Pressão do ar	101,325 kPa
Ponto de referência da câmara de ionização	Centro do volume da cavidade (cilíndrica)
Profundidade do ponto de referência da câmara	5 g/cm ²
Tamanho do campo na janela do <i>phantom</i>	10 cm x 10 cm
Umidade relativa	50 %
Voltagem de polarização e polaridade	Sem valores de referência (mencionar valores no certificado)
Taxa de dose absorvida na água	Sem valores de referência (mencionar valor no certificado)
Recombinação iônica	O certificado deve mencionar se o fator de recombinação iônica foi aplicado e se for, o valor deve ser mencionado no certificado.

3. O conhecimento dessa grandeza é utilizado para calcular o coeficiente de calibração para o conjunto dosimétrico, enviado pelo cliente, seguindo o mesmo procedimento e as mesmas condições de referência [48]

4. equipamentos de medição e materiais auxiliares

- i. Irradiador de ^{60}Co
Fabricante: Picker
Modelo: V4M/60
Atividade: 134 TBq em 01 de abril de 2000
- ii. Eletrômetro;
- iii. Cronômetro;
- iv. Câmara de Ionização;
- v. Barômetro;
- vi. Termometro;
- vii. Transdutor de posição;
- viii. *Phantom*
Modelo: IAEA 30 cm x 30 cm x 30 cm
Material: PMMA
- i. Conjunto de luvas a prova d'água
Material: PMMA

5. Precauções e preparação

Alguns cuidados básicos devem ser tomados com relação aos instrumentos:

- i. O dosímetro deve estar ligado no mínimo 60 minutos antes de ser utilizado;
- ii. Fazer uma pré-irradiação na câmara de ionização, tentando eliminar com isso, as cargas espúrias existentes na câmara;
- iii. Não movimentar os equipamentos (câmaras, eletrômetros e cabos) quando estiverem ligados;
- iv. Tomar cuidado com os cabos e conectores. Evitar ao máximo os choques mecânicos;
- v. Nunca desconectar a câmara enquanto esta estiver polarizada;

- vi. Os cabos das câmaras devem ser desenrolados e enrolados da seguinte forma [48]:

Desenrolar:

- fixar a câmara;
- desenrolar o cabo no sentido câmara/conector;
- conectar o cabo ao eletrômetro;
- só então ligar o eletrômetro.

Enrolar:

- fixar a câmara e colocar sua capa de proteção;
- desligar a alimentação;
- desconectar o cabo do eletrômetro;
- enrolar no sentido conector/câmara;
- evitar torcer o cabo e fazer anéis menores que 30 cm.
- guardar a câmara e o cabo no dessecador.

6. Procedimento experimental

O método de calibração utilizado neste procedimento é o de calibração por substituição, na qual as medições são feitas em um *phantom* de água. Neste método, a câmara padrão é posicionada de acordo com a geometria de referência, utilizada no BIPM para a calibração e então é realizada a determinação da taxa de dose absorvida na água. A câmara padrão é posteriormente substituída pela câmara a ser calibrada, mantendo-se a mesma geometria [48].

a) Operação do Irradiador ^{60}Co

Para operar a unidade de ^{60}Co , deve-se proceder da seguinte forma:

- Fechar a porta da sala;
- ligar a chave *on* do painel de controle;
- girar a chave para iniciar a irradiação;
- pressionar *Emergency* para interromper a irradiação, figura 14;



Fig. 13- Painel de Controle do Irradiador

Antes de iniciar a calibração do dosímetro no feixe de ^{60}Co , devem-se fazer as seguintes verificações [48]:

- i. Ligar o painel de controle e verificar se ele está funcionando. Ligar o feixe e verificar se a iluminação de emergência interna (sobre a porta) e a externa (do lado de fora do prédio) estão funcionando. Verificar se os botões que ligam e desligam manualmente o feixe estão funcionando, bem como as lâmpadas indicadoras de feixe ligado e desligado, bloqueio de feixe com porta aberta. Verificar se o interruptor de segurança está funcionando. Comunicar as alterações observadas ao responsável pelo laboratório;
- ii. Verificar se os equipamentos necessários para realizar a dosimetria e a calibração estão ligados e corretamente posicionados.

6.1. Arranjo experimental

A câmara a ser calibrada é colocada em sua luva à prova de água e posicionada em um *phantom*, figura 3, de dimensões 30 cm x 30 cm x 30 cm, preenchido com água bidestilada até o nível indicado no mesmo por uma linha horizontal. Seu eixo é colocado no plano de referência, à profundidade de 5 g/cm² na água. A profundidade inclui a janela do *phantom* (PMMA, 0,275 g/cm²). A marca vertical na luva, assim como a da haste da câmara é orientada em direção ao feixe de radiação [47,48].

Um campo de referência de 10 cm x 10 cm é estabelecido a 100 cm de distância da fonte e coincide com a superfície da janela de entrada do *phantom* (arranjo SSD).

Um termistor (com leitura externa à sala de irradiação) está instalado na mesa de calibração, que por sua vez é colocada dentro de uma luva à prova de água e mergulhada dentro do *phantom*, ao lado da câmara a calibrar e fora do campo de radiação[48].

A determinação da pressão é feita por um barômetro que se situa na área de controle do laboratório[48].

A distância de 100 cm da fonte é obtida mediante uma haste metálica de referência, usando um pedaço de papel fino para fazer contato entre a haste e a superfície de entrada do *phantom* [47,48].

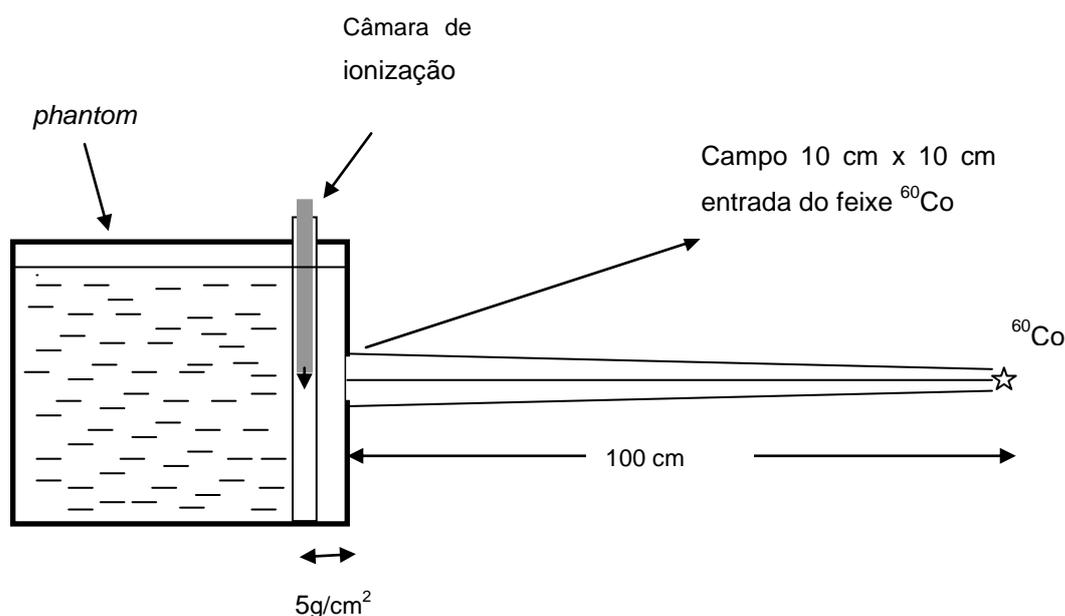


Fig. 14- Arranjo experimental mostrando o posicionamento da câmara de ionização [47,48,49].

6.2. Dosímetro de referência

Visto que as câmaras de ionização são bastante sensíveis nas primeiras leituras, faz parte das boas práticas, pré-irradiar a câmara com uma dose conveniente antes de realizar medições [48].

Depois de verificada a estabilidade da câmara, é feita a determinação da dose absorvida na água, com a utilização da câmara de referência, cujos cálculos e procedimentos de aceitação são estabelecidos pelo sistema de gestão da qualidade e registro apropriado (planilha de cálculos) [48]:

- i. Anota-se a data do início da irradiação;
- ii. O feixe de irradiação permanece acionado durante todo o procedimento de determinação da taxa de dose absorvida na água;
- iii. A aquisição de dados de tempo, temperatura, carga e pressão são realizados por meio do programa LabVIEW, onde é estabelecido o número de medições e o intervalo de tempo para o acúmulo de carga. Ao término da aquisição de dados, estes são transferidos para a planilha de cálculo específica;
- iv. A planilha calcula a corrente corrigida (em nA);
- v. Calcula a corrente média, desvio padrão relativo e desvio padrão da média. O desvio padrão relativo da corrente corrigida deve ser inferior a 0,2%. Verificar que não haja nenhuma tendência nas medições de corrente;
- vi. É determinada a taxa de dose absorvida na água e compará-la com os valores obtidos anteriormente, corrigindo-a para a data de referência. A variação deve ser menor do que $\pm 0,2\%$, como estabelecido na planilha “Controle dos padrões”;
- vii. Calcular a corrente de fuga e esta deve ser inferior a 0,1%;
- viii. A verificação dos padrões de referência é realizada por meio da determinação da taxa de dose absorvida na água. A taxa de dose é determinada antes de cada período de calibração.
- ix. Os resultados são analisados criticamente e estando fora dos limites de aceitação estabelecidos, procede-se uma investigação para determinar e corrigir os motivos para os desvios encontrados;

- x. A incerteza na taxa de dose absorvida na água é calculada utilizando-se a planilha apropriada para o fim;
- xi. O valor da taxa de dose é registrado no arquivo “Controle dos padrões”, a fim de se verificar a estabilidade do sistema de medição;
- xii. Após término das medições para o cálculo da taxa de dose absorvida na água, os dados brutos são utilizados como entrada para o programa padrão, desenvolvido, para validar os resultados da planilha de cálculo;

7. Calibração do dosímetro do usuário

- i. Posicionamento a câmara a ser calibrada rigorosamente na mesma geometria da câmara de referência. O procedimento de medição será o mesmo com a câmara de referência, descrito acima.
- ii. Todos os cálculos necessários para a determinação do coeficiente de calibração em dose absorvida na água são realizados através da planilha apropriada da este fim;
- iii. Anota-se a data do início da irradiação;
- iv. Acionar o botão de medição do eletrômetro para ligar o feixe simultaneamente com o cronômetro;
- v. Anota-se o valores da pressão e temperatura aproximadamente na metade do intervalo de irradiação;
- vi. Quando atingir o valor de carga estabelecido (em torno de 2 nC), desliga-se o feixe e o cronômetro simultaneamente;
- vii. Anota-se os valores da carga medida e o tempo correspondente;
- viii. Uma planilha programa, calcula a corrente corrigida;
- ix. Zera-se o eletrômetro;
- x. São necessárias n grupos de 6 medições consecutivas seguindo-se os passos acima descritos;
- xi. É efetuado o cálculo da corrente média, desvio padrão relativo e desvio padrão da média;
- xii. O valor da taxa de dose absorvida na água é corrigida pelo decaimento radioativo do ^{60}Co , para o dia da realização da calibração do dosímetro do cliente;

xiii. A planilha com o resultado das medições é salva na pasta num arquivo apropriado do sistema de registro;

8. Aceitação dos resultados

Os critérios de aceitação dos resultados estão estabelecidos nos itens 6.2.

9. Incerteza de medição

A incerteza no coeficiente de calibração em dose absorvida na água é estimada utilizando-se a uma planilha programada e especializada para o fim, que foi desenvolvida baseada no ISO GUM 2003[48].

6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os laboratórios de calibração do LNMRI fazem uso de padrões que são a mais alta referência de radioterapia e radioproteção no país. A rastreabilidade dos padrões é mantida pela calibração periódica das suas câmaras no BIPM ou participação em programas interlaboratoriais.

Os procedimentos técnicos apresentados neste trabalho são rigorosamente seguidos pelos responsáveis técnicos dos laboratórios de calibração do LNMRI e são periodicamente auditados de acordo com o sistema de gestão da qualidade.

Durante o acompanhamento destas etapas, foi possível notar que o sistema de gestão da qualidade implementado no LNMRI é funcional de acordo com os requisitos principais da norma ISO/IEC 17025.

Quanto aos resultados das medições, existem, implantados nos laboratórios de calibração do LNMRI, planilhas de cálculo pré-programadas e *Softwares* apropriados que permitem a realização de cálculos rigorosos das grandezas a serem determinadas, assim como o arquivo adequado de todas as informações referentes aos ensaios e calibrações.

No final da calibração de dosímetro clínico, o coeficiente de calibração de um é comparado com a calibração obtida anteriormente.

O desvio máximo esperado entre os coeficientes de calibração deve estar de acordo com a incerteza de medição. Se este for superior, devem-se analisar os dados disponíveis, procurando determinar os motivos da discrepância. Quando isto acontece, é refeito o procedimento da dosimetria, a fim de se certificar que o sistema de medições estejam confiáveis.

Se o resultado da dosimetria estiver correto, segundo os critérios estabelecidos, aceita-se o resultado da calibração e o certificado de calibração é emitido. Caso contrário, procede-se a uma investigação no sistema de medições.

Durante o acompanhamento do processo da dosimetria de referência, tanto no estabelecimento das condições de referência do irradiador como o de

determinação da dose absorvida na água, os mesmos apresentaram as propriedades de repetitividade e reprodutibilidade.

Quanto à calibração de dosímetros clínicos dos clientes, em apenas um caso foi verificada discrepância nos resultados da dosimetria. Foi feita uma investigação rigorosa na referida câmara de ionização e no seu eletrômetro, e conclui-se que a mesma estava com problema.

7. CONCLUSÃO

A implantação de um laboratório de metrologia requer investimentos altos para a preparação de uma infraestrutura apropriada, incluindo laboratórios climatizados e equipamentos com alto teor tecnológico, além de pessoal altamente qualificado [14].

Parte do objetivo deste trabalho foi concretizada, que consistiu na verificação prática de um laboratório de SSDL, assim como é mantida a sua rastreabilidade junto do laboratório primário e participação ativa nas redes interlaboratoriais.

Caso venha a ser aprovada a iniciativa do mesmo, um longo trabalho ainda deve ser feito começando pela busca da viabilidades de implantação de um SSDL, canalizar fundos e recursos financeiros para a sua materialização, assim como começar um rigoso programa de formação de recursos humanos que serão selecionados para fazer parte do grupo de trabalho do mesmo.

Por fim, deve-se considerar que os ganhos de produtividade, da qualidade dos produtos e serviços, de redução dos custos e eliminação de desperdícios que são resultados da evolução e concretização da cultura metrológica, que constitui uma estratégia permanente das organizações.

7.1. TRABALHOS FUTUROS

Caso o projeto seja aprovado e materializado, os seguintes trabalhos serão realizados, considerando-os como partes fundamentais para sua concretização.

1. Solicitação de um estágio por um período de 3 meses ou mais, com o objetivo de aprimorar as competências metrológicas em dosimetria clínica, radioproteção, RX e nêutrons;
2. publicação de artigos de pesquisa nas área acima descritas;
3. desenvolvimento de um projeto de cooperação técnica entre o IRD/LNMRI, Angola, Brasil e a IAEA;
4. treinamento de profissionais e estudantes em Angola.
5. A parte de avaliação de custo não desenvolvida neste trabalho deve ser um requisito do Projeto de cooperação técnica a ser estabelecido entre a AIEA, o IRD e a AREA, incluindo as etapas seguintes:
 - i. Levantamento da demanda;
 - ii. Localização do laboratório;
 - iii. Edificação;
 - iv. Aquisição de equipamentos;
 - v. Instalação de equipamentos; e
 - vi. Treinamento de pessoal

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] pt.m.wikipedia.org, ultima atualização 18 de agosto de 2015 pelas 10h:35min.
- [2] Lei da energia Atômica, Lei 4/07 de 5 de Setembro, publicada em Diário da República de Angola aos 5 de Setembro de 2007.
- [3] IRD-CNEN, Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, , Rio de Janeiro, 1992.
- [4] Vocabulário Internacional de Metrologia, VIM, Conceitos fundamentais e gerais e termos associados, 1ª edição Luso-Brasileira, Inmetro Rio de Janeiro, 2012.
- [5] Metrologia a Ciência da medição, matéria publicada no portal do CNI, www.cni.com.org.
- [6] Luiz Tauhata, Ivan Salati, Renato de Prinzi e Antonieta de Prinzi, Radioproteção e Dosimetria : Fundamentos, Instituto de Radioproteção e Dosimetria – CNEN, 10ª Revisão, Rio de Janeiro Abril de 2014.
- [7] Annibal Theotônio Baptista Neto, Implantação de Radiações de Referência em uma Máquina de Raios-X Diagnóstico Médico para fins de Calibração, dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Ciência e Tecnologia das Radiações Minerais e Materiais, CDTN-CNEN, Belo Horizonte 2005.
- [8] PUC Rio, Certificação digital nº 0312895/C.
- [9] Metrologia, conhecendo e aplicando na sua empresa, CNI 2ª Edição revisada, Brasília 2002 CDD 389.
- [10] International Atomic Energy Agency, Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments, 2000.
- [11] IAEA/WHO Secretariat of de SSDL Network, SSDL News Letter, nº 37, July 1997, ISSN 1011-2669.
- [12] H.H. Eisenlohr, Enfoque moderno de metrología de las radiaciones, Los átomos y la salud, OIEA Boletín, VOL. 25, nº 2, 14.
- [13] Agência Internacional de Energia Atômica, 2003-2004, <http://www.iaea.org/SSDL/guideline.asp>.
- [14] Francisco Bossio, Ricardo de Souza Cardoso, Daniel da Silva Quaresma, Luzianete do Amaral Batista Filha, José Guilherme Pereira Peixoto, Como preparar um laboratório para calibração em radiações ionizantes utilizando raios X, 7º Congresso de Metrologia, IRD, 2013.

- [15] Juliana Viegas Pereira, Avaliação da base metrológica para calibrações de sistemas dosimétricos em Tomografia Computarizada, Dissertação como requisito para obtenção do grau de Mestre em Ciências minerais e materiais, CDTN-CNEN, Agosto de 2011.
- [16] Maíra Tiemi Yoshizumi, Projeto, construção e caracterização de câmaras de ionização especiais para monitorização de feixes de radiação X, tese apresentada como requisito para a obtenção do grau de Doutor em Ciências na área de Tecnologia Nuclear, IPEN-USP, São Paulo 2010.
- [17] Vanessa Fortes Aula 15, Metrologia o que é?
- [18] Inmetro, Guia para a expressão de incerteza de medição GUM, Avaliação de dados de medição, 1ª Edição Brasileira 2008 da 1ª Edição do BIPM de 2008, Rio de Janeiro 2012.
- [19] Gustavo San José Barros, Projeto de um laboratório integrado de calibração de instrumentos, IPEN-CNEN.
- [20] Eliane Carmo Oliveira, Estabelecimento de campos padrões de raios-x de energias baixas, nível radioproteção, para calibração de instrumentos, tese apresentada como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Ciências na área de Tecnologia Nuclear, IPEN-USP, São Paulo 1995.
- [21] Mariana Isabel Seita Baptista, Avaliação da exposição à radiação ionizante de profissionais e pacientes em procedimentos de Cardiologia de Intervenção, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Biomédica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Setembro de 2011.
- [22] Barbara P. Mazzilli, Christovam R. Romero Filho, Yasko Kodama, Fábio Fumio Suzuki, José Claudio Dellamano, Julio T. Marumo, Matias Puga Sanches, Roberto Vicente & Sandra A. Bellintani, Noções Básicas de Protecção Radiológica, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares-IPEN, Agosto de 2002.
- [23] J. J. Pedroso de Lima, Técnicas de diagnóstico com raios X, Aspectos Físicos e Biofísicos, Outubro de 2005, Imprensa da Universidade de Coimbra, ISBN-9728704-58-5.
- [24] International Atomic Energy Agency Vienna, International Basics Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiations Sources, JOINTLY SPONSORED BY FAO, IAEA, ILO, OECD/NEA, PAHO, WHO, Safety Series ISSN 0074-1892; 155. Safety Series 1996.
- [25] Organismo Internacional de Energia Atomica Vienna, Normas Básicas Internacionales de Seguridad para La Protección Contra La Radiación Ionizante y para La Seguridad de Las Fuentes de Radiación, PRATROCINADAS CONJUNTAMENTE POR AEN/OCDE,

OIEA, FAO, OIT, OMS, OPS, Colección de Seguridad, ISBN 92-0-300397-5 ISSN 1011-3096, 1997.

[26] Miguel Nuno Ferreira Pereira, *Optimização de um Sistema de Dosimetria Individual para Monitorização de Extremidades*, Mestrado em Engenharia Física, Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2009.

[27] Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Comissão Nacional de Energia Nuclear, *Notas do Curso Básico de Licenciamento e Fiscalização em Radiologia Médica e Ontológica*, Rio de Janeiro-Brasil, Março de 1994.

[28] James E. Turner, *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*, second edition, Copyright 1995 A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, ISBN 0-471-59581-0.

[29] *Proceedings of an International Conference Geneva, Occupational Radiation Protection: Protecting Workers Against Exposure to Ionizing Radiation*, 26-30 de August 2002, IAEA, ILO, UE, WHO. Printed by the IAEA in Austria July 2003, STI/PUB/1145.

[30] William R. Hendee, & E. Russell Ritenour, *Medical Imaging Physics*, fourth edition, 2002 A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, ISBN 0-471-38226-

[31] Sears e Zemansky *FÍSICA IV: Optica e Física Moderna*, HUGH D. YOUNG, Universidade Carnegie – Mellon & ROGER A. FREEDMAN, Universidade da Califórnia, Santa Barbara, tradução e revisão técnica Adir Moysés Luiz, Pearson Addison Wesley – São Paulo, 2004. ISBN: 85-88639-13-0.

[32] Sónia Cláudia Lin Chin, *Dosimetria numa População de Profissionais Expostos a Radiações Ionizantes*, Mestrado em Radiações Aplicadas às Tecnologias da Saúde Área de Especialização: Proteção Contra Radiações, Instituto Politécnico de Lisboa, Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Lisboa, Lisboa 2013.

[33] ALDA PEREIRA, ANA SOUTO & CONCEIÇÃO GONÇALVES, *Ciências Físico Químicas, CFQ – Física 9º Ano*, Texto Editora, Ida, Lisboa 2003, 3.ª edição, ISBN 972-47-1457-8, Depósito legal n.º 182176/02.

[34] M.C Abreu, L. Matias & L.F. Peralta, *Física Experimental Uma Introdução*, Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Editorial Presença, Lisboa, 1994, Depósito legal n.º 79 216/94.

[35] Teresa Tasso de Figueiredo & Victor Mateus, *Ciências Físico Químicas 9.º ano, Volume 2 Eureka*, Texto Editora, Ida, ISBN 972-47-1456-X.

[36] Autoridade Reguladora de Energia Atómica – AREA, Decreto Presidencial 12/12 de 25 de Janeiro – Regulamento Sobre Radioproteção, Publicado aos 25 de Janeiro de 2012.

- [37] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Princípios Básicos de Segurança e Protecção Radiológica, 3ª Edição revisada, Setembro de 2006.
- [38] Comissão Organizadora do Congresso, Carlos Fujão, Isabel Santos, Manuela Calado e Vítor Reis, Livro de Atas do Congresso SST Sintra 2011 - Manutenção e Reparação Seguras, Seminário 25, 26 e 27 de Outubro de 2011 ISBN 978-972-8875-48-0, Novembro, 2012.
- [39] Narciso Augusto Ambrósio, Estudo da Situação de Radioprotecção do HMP-ISML, Departamento de Física da Faculdade de Ciências-UAN, Luanda 2011.
- [40] IRD, Relatório de Atividades 2014, pesquisa feita através da internet (www.google.com.br), Agosto de 2015.
- [41] IRD, Relatório de Atividades 2012, pesquisa feita através da internet (www.google.com.br), Agosto de 2015.
- [42] IRD, Perfil Organizacional 2013, pesquisa feita através da internet (www.google.com.br), Agosto de 2015.
- [43] Carlos Alberto Lucas Suplino Filho¹, Luciane de Rezende Souza, Estela Maria de Oliveira, Estudo comparativo de implementação de requisitos gerenciais da ABNT NBR ISO/IEC 17025 e boas práticas de gestão em laboratórios de calibração da área de radiações ionizantes, 1º Congresso Brasileiro de Metrologia das Radiações Ionizantes, IRD, Rio de Janeiro Novembro de 2014.
- [44] ABNT NBR ISO/IEC 17025, Requisitos gerais para a competência da laboratórios de ensaio e calibração Segunda revisão, Outubro de 2005.
- [45] Raimundo Dias da Silva , Eduardo Kibrit, Concepção do laboratório de calibração de instrumentos de medição de radiação ionizante (LACIMRI) do CTMSP.
- [46] IRD-LMNRI- DIMET, documento PT02A – 007, calibração de monitores de radiação de área.
- [47] Cosme Norival Mello da Silva e Paulo Henrique Rosado Controle de qualidade da dose absorvida na água realizado no LNMRI, 6º Congresso de Metrologia, IRD;
- [48] IRD-LMNRI-DIMET, documento PT02A – 013, Calibração de dosímetros clínicos em feixes de ⁶⁰Co em dose absorvida na água.
- [49] Paulo Henrique Rosado e Cosme Norival Mello da Silva, Participação do LNMRI em comparações interlaboratoriais, nas medidas de kerma no ar e dose absorvida na água utilizando feixes de ⁶⁰Co em radioterapia, 7º Congresso de metrologia, IRD, 2013.

